

## BAB 2

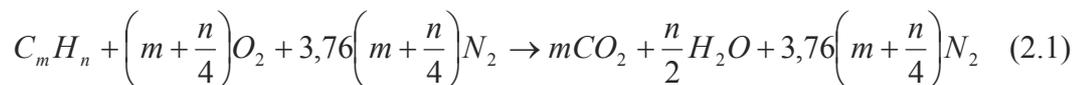
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pembakaran

Pembakaran dapat didefinisikan sebagai proses/reaksi oksidasi yang sangat cepat antara bahan bakar (*fuel*) dan oksidator dengan menimbulkan nyala dan panas. Bahan bakar 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.

Fenomena-fenomena yang terjadi pada pembakaran 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. Sehingga kajian pembakaran membutuhkan saling keterkaitan antara ilmu dasar dan turunannya yakni Termodinamika, Mekanika Fluida, Perpindahan Kalor dan Massa, Material, Statistika dan Probabilitas [35].

Pembakaran menghasilkan panas sehingga disebut sebagai proses oksidasi eksotermis. Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara kering, di mana udara kering terdiri dari 21% oksigen dan 78% nitrogen, maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon murni  $C_mH_n$  dapat ditulis dengan persamaan [37] :



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 terdapat 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 Klasifikasi Nyala

Nyala api sebagai hasil pembakaran dapat diklasifikasikan berdasarkan aspek yang berbeda. Berdasarkan kondisi oksidator dan bahan bakar mencapai daerah reaksi nyala maka nyala dapat diklasifikasikan menjadi nyala *non premix*, *partially premix* dan *fully premix*. Berdasarkan kondisi daerah reaksi, nyala dapat diklasifikasikan menjadi *well stirred reactor* (WSR) dan *plug flow reactor*. Sedangkan berdasarkan karakteristik aliran reaktan yang masuk, dapat diklasifikasikan menjadi nyala laminar dan nyala turbulen.

Dalam suatu pembakaran premix perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting dalam menentukan hasil proses pembakaran.

Rasio campuran bahan bakar dan udara dapat dinyatakan dalam beberapa parameter yang lazim antara lain *AFR* (*Air Fuel Ratio*), *FAR* (*Fuel Air Ratio*), dan Rasio Ekuivalen ( $\phi$ ).

### 2.2.1 Rasio Udara-Bahan Bakar (*Air Fuel Ratio/AFR*)

Rasio ini merupakan parameter 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 [37]:

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

Dengan  $\dot{m}_a$  adalah laju massa udara (kg/dt),  $\dot{m}_f$  = laju massa bahan bakar, (kg/s),  $M_a$  adalah massa molar udara,  $N_a$  adalah jumlah mol udara,  $M_f$  adalah massa molar bahan bakar,  $N_f$  adalah jumlah mol bahan bakar.

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.

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

Rasio bahan bakar-udara merupakan kebalikan dari  $AFR$  yang dirumuskan sebagai berikut [37]:

$$FAR = \frac{m_f}{m_a} = \frac{M_f N_f}{M_a N_a} \quad (2.3)$$

$AFR$  dan  $FAR$  dapat juga dinyatakan dalam perbandingan volume. Untuk bahan bakar gas perbandingan volume lebih sering dipergunakan karena sebanding dengan perbandingan jumlah mol.

### 2.2.3 Rasio Ekuivalen (*Equivalent Ratio, $\phi$* )

Rasio ini termasuk juga rasio 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

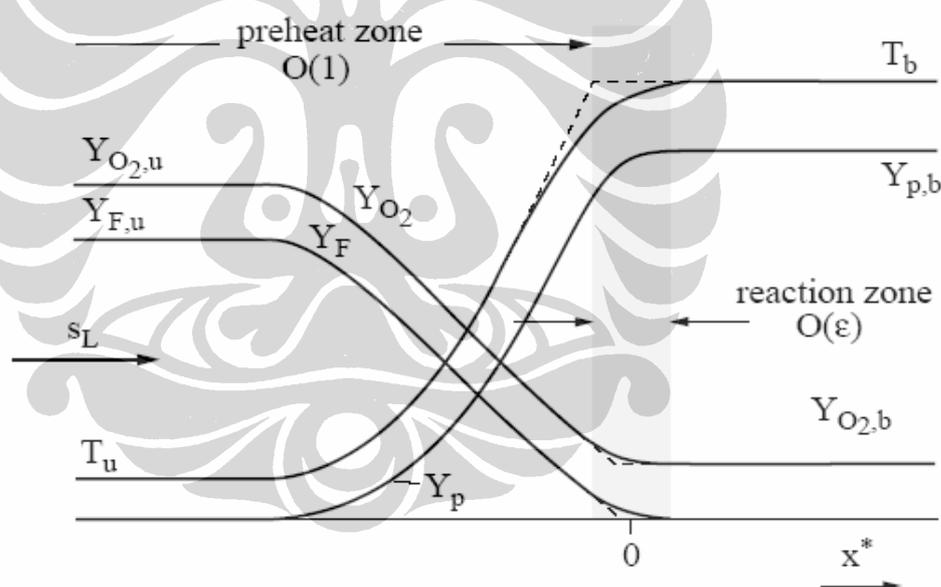
### 2.2.4 Rasio Campuran (*Mixture Ratio, $f$* )

Rasio campuran adalah perbandingan antara fraksi massa bahan bakar yang terbakar dengan fraksi massa bahan bakar awal. Rasio campuran berbeda

dengan fraksi massa bahan bakar maupun rasio bahan bakar dan udara. Istilah ini mulai dipergunakan seiring dengan perkembangan penyelesaian masalah pembakaran dengan metode numerik. Rasio campuran memudahkan penyelesaian persamaan differensial maupun integral dari sisi kondisi batas yakni pada daerah bahan bakar maka fraksi massa oksigen adalah 0 sebaliknya fraksi bahan bakar pada kondisi masukan adalah 1.

### 2.3 Struktur Nyala Api Laminer

Dengan pendekatan satu langkah reaksi, campuran kurus dan nyala api diasumsikan datar, tunak dan arahnya tegak lurus terhadap sumbu  $x$  dengan  $x \rightarrow -\infty$  adalah gas yang belum terbakar dan  $x \rightarrow +\infty$  adalah gas yang terbakar maka struktur nyala dapat disketsa seperti pada Gambar 2.1 [38].



Gambar 2.1. Struktur Nyala Api dengan Satu Langkah Asimptotik [38].

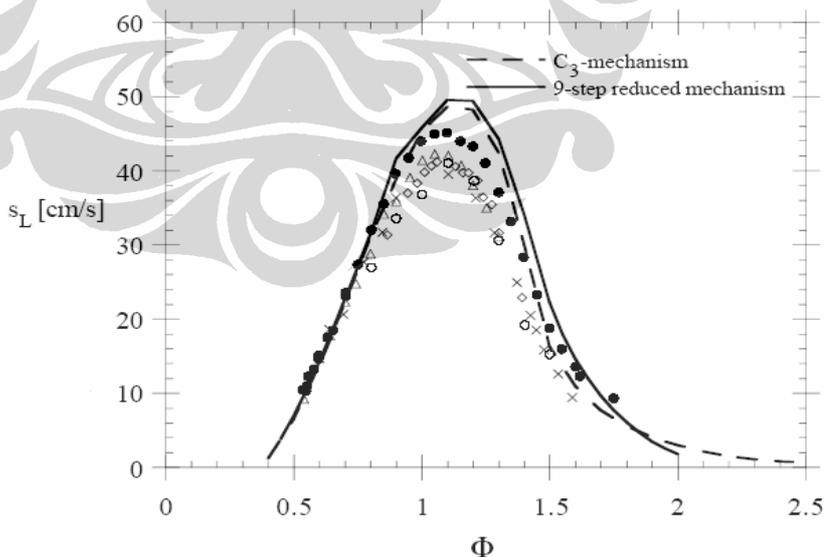
Pada  $x \rightarrow -\infty$  fraksi massa bahan bakar dan oksidator dengan kecepatan pembakaran  $s_L$  dari daerah *pre heat zone* berdifusi ke daerah reaksi. Reaksi kimia mulai menghasilkan produk P dan fraksi massa bahan bakar mulai berkurang demikian pula dengan fraksi massa oksidator. Temperatur mengalami kenaikan dan mencapai puncaknya setelah keluar dari daerah reaksi. Keluar dari daerah reaksi fraksi bahan bakar menjadi nol, sedangkan fraksi oksidator menjadi  $Y_{O_2,b}$ .

*Thermal flame theory* dari Zel'dovich dan Frank-Kamenetzki pada Kuo [35] merupakan salah satu contoh klasik dari konsep asimptotik satu langkah reaksi dan mendefinisikan Bilangan Zel'dovich sebagai kebalikan dari energi aktivasi tanpa dimensi yakni [38]:

$$Ze = \frac{Ea(T_b - T_u)}{RT_b^2} \quad (2.5)$$

Sedangkan parameter fundamental dari nyala *premixed* yakni kecepatan pembakaran, dapat ditentukan dari persamaan kekekalan massa, species dan temperatur diselesaikan secara numerik dengan memasukkan kondisi batas untuk fraksi massa dan temperatur, gradient kondisi batas disamakan dengan nol.

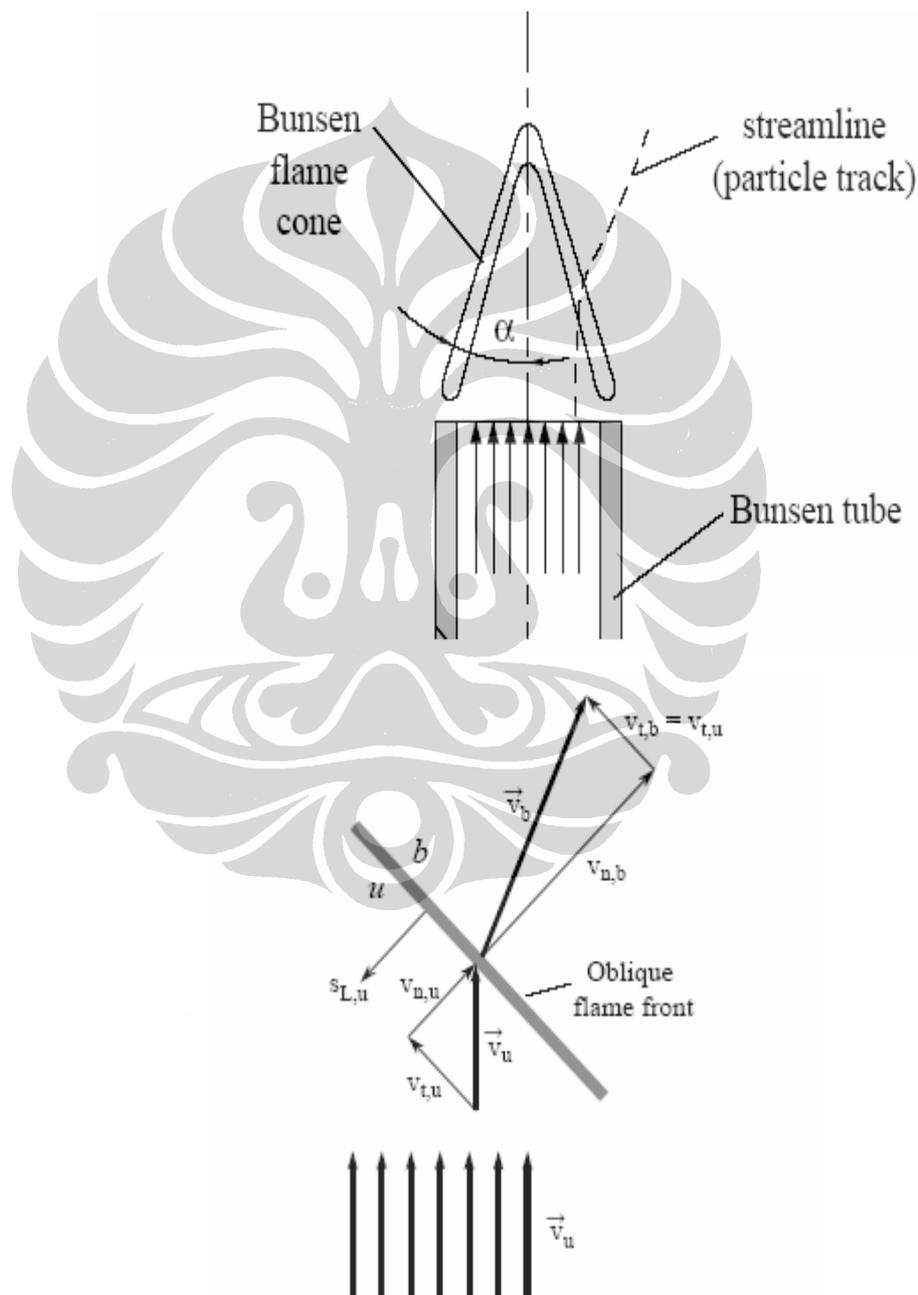
Kecepatan pembakaran didefinisikan sebagai kecepatan lokal dari campuran reaktan tegak lurus terhadap daerah reaksi, searah dengan laju gas ke daerah reaksi. Kecepatan pembakaran sangat dipengaruhi oleh temperatur nyala api. Pada kondisi adiabatik, variasi kecepatan nyala pada berbagai nilai rasio ekuivalens hanya dipengaruhi oleh temperatur nyala adiabatik. Salah satu contoh hasil penentuan kecepatan pembakaran propana-udara ditampilkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Kecepatan Pembakaran vs Rasio Ekuivalen [38].

Nilai kecepatan pembakaran laminar mencapai maksimum pada rasio ekuivalen sedikit lebih besar dari 1. Kecenderungan kurva ini mirip seperti distribusi temperatur nyala maksimum [35].

Sedangkan pada pembakaran menggunakan *burner* Bunsen konsep dasar tentang kecepatan nyala laminar dapat digambarkan pada nyala kerucut Bunsen seperti sketsa pada Gambar 2.3. Kecepatan pembakaran laminar adalah kecepatan permukaan nyala api yang tegak lurus terhadap permukaan nyala ke arah campuran yang belum terbakar. Pada kondisi tunak maka kecepatan pembakaran laminar akan sama dengan kecepatan campuran tegak lurus terhadap permukaan nyala.



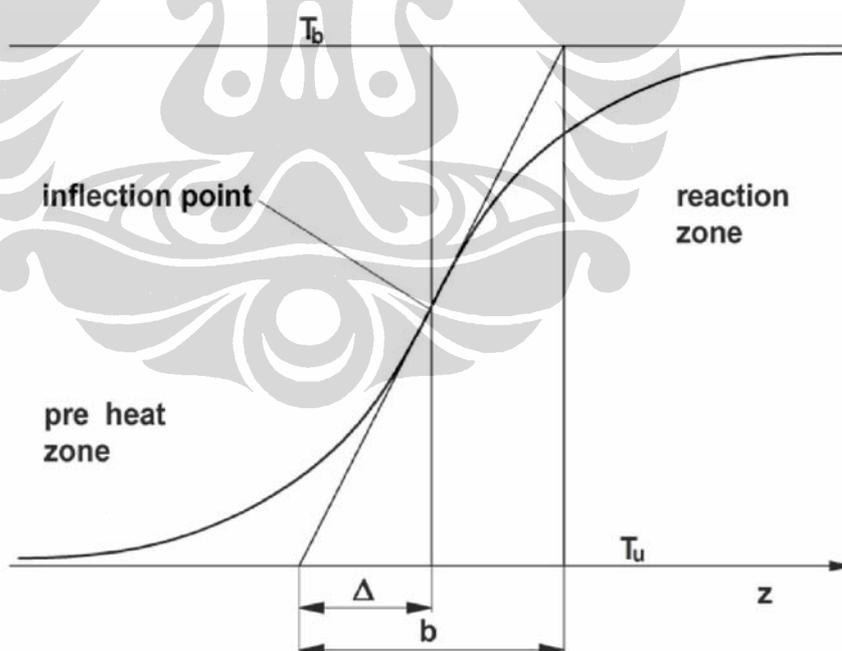
Gambar 2.3. Sketsa Vektor Kecepatan Pembakaran Laminar [38].

Kecepatan pembakaran laminar dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.6 [35,38]

$$S_{L,u} = v_u \sin \alpha = U \sin \alpha \quad (2.6)$$

Selain kecepatan pembakaran, tebal nyala juga merupakan parameter yang penting pada nyala *premixed* laminar. Tebal nyala dipergunakan untuk memprediksi karakteristik waktu reaksi kimia pada penentuan bilangan Karlovitz. Namun masih ditemukan ketidakseragaman tentang definisi dan rumus tebal nyala untuk penentuan Bilangan Karlovitz. *Preheat zone thickness*, *reaction zone thickness* atau *thermal flame thickness* dan *characteristic thickness* adalah beberapa istilah yang sering dipergunakan. *Characteristic thickness* seperti yang diperkenalkan oleh Zel'dovich diilustrasikan pada Gambar 2.4. dan dihitung dengan Persamaan 2.7 [39]

$$\eta = \frac{k}{c_p \rho S_L} \quad (2.7)$$



Gambar 2.4. Ilustrasi *Charateristic Thickness* [40]

Ketidakeragaman dalam penentuan *characteristic thickness* sendiri juga ditemukan dengan rumus yang berbeda. Berdasarkan difusivitas panas dari campuran belum terbakar seperti pada Persamaan 2.7 beberapa penelitian

menghasilkan nilai *characteristic thickness* yang relatif kecil [40-42], sedangkan pada penelitian yang lain berdasarkan temperatur menghasilkan nilai *characteristic thickness* yang lebih besar [43,44].

Istilah *thermal flame thickness* dengan rumus yang didasarkan dari *gradient* temperatur maksimum seperti pada Persamaan 2.8. cenderung lebih banyak digunakan [40,45]

$$\eta = \frac{T_b - T_u}{(dT/dx)_{maks}} \quad (2.8)$$

#### 2.4 Data Base Nyala Api *Premix* Turbulen

Sebuah kelompok riset dalam bidang nyala api *premix* yakni *International Working Group on Premixed Flame* telah membuat pangkalan data atau *data base* tentang nyala api *premix* yang diklasifikasikan menjadi nyala api stasioner dengan *shear turbulence*, nyala api stasioner dengan *isotropic turbulence* dan nyala api tidak stasioner [20].

Pada Gambar 2.5 ditampilkan kategori nyala api stasioner dengan *isotropic turbulence* yang ditandai dengan distribusi kecepatan rata-rata dan rms yang datar melewati mulut *burner* serta campuran hampir homogen dan kurus. Intensitas turbulensi dikendalikan plat atau *grid*. Yang termasuk dalam katagori ini adalah *Oblique Flame*, *Envelope Flame*, dan *Unattached Flame*. *Oblique Flame* terbagi menjadi 2 yakni *Plane-Symmetric Oblique Flame* dan *Axi-symmetric Oblique Flame*. *Envelope Flame* terbagi menjadi 2 katagori juga yakni *Plane-Symmetric Envelope Flame* dan *Axi-symmetric Envelope Flame*. *Unattached Flame* terbagi menjadi 2 katagori *Unattached flames in impinging flows* dan *Unattached flames in swirl-generated diverging flows*. Keseluruhan katagori nyala api stasioner dengan *isotropic turbulence* sesuai dengan notasi pada Gambar 2.5 adalah sebagai berikut:

- a. *Plane-Symmetric Oblique Flame* adalah nyala berbentuk V yang distabilkan oleh kawat kecil.



a. Plane-Symmetric Oblique Flame



b. Axi-symmetric Oblique Flame



c. Plane-Symmetric Envelope Flame



d. Axi-symmetric Envelope Flame



e. Unattached flames in impinging flows



f. Unattached flames in swirl-generated diverging Flow

Gambar 2.5. Nyala Api Stasioner Isotropis Turbulen [20]

- b. *Axi-symmetric Oblique Flame* adalah nyala berbentuk kerucut terbalik akibat adanya benda penghalang yang sangat kecil ditempatkan tepat di ujung *burner* dan ditengah-tengah penampang *burner*.
- c. *Plane-Symmetric Envelope Flame* terbentuk dari *burner* persegi panjang atau slot *burner* dengan lebar yang terbatas untuk menjaga bentuk nyala.
- d. *Axi-symmetric Envelope Flame* lebih dikenal dengan nyala Bunsen turbulen dengan kondisi pembakaran yang miskin bahan bakar.
- e. *Unattached flames in impinging flow* adalah nyala yang terbentuk dari aliran divergen pada perambatan pembakaran premix dan ditahan oleh sebuah plat diam (*stagnation plate*) sehingga nyala tertahan pada jarak tertentu dari plat.
- f. *Unattached flames in swirl-generated diverging flows* adalah nyala yang terbentuk dari aliran divergen yang dihasilkan oleh olakan rendah (*low swirl*) aliran turbulen pada daerah tepi. Pada daerah tengah-tengah tidak terjadi olakan.

Pada Gambar 2.6 ditampilkan kategori nyala api stasioner dengan *shear turbulence* yang ditandai dengan distribusi aliran yang tidak seragam, gradient kecepatan yang besar dan terdapat puncak rms.



**a. Piloted jet flame**



**b. Flame Stabilized by a large bluff body**



**c. High-swirl flame generated by a vane swirler**

Gambar 2.6. Nyala Api Stasioner dengan *Shear Turbulen* [20]

*Non-isotropic turbulence* timbul karena tegangan geser. Yang termasuk pada kategori ini adalah *Piloted Jet Flame*, *Flame Stabilized by a large bluff body* dan *High-swirl Flame generated by a vane-swirler*.

- a. *Piloted Jet Flame* adalah nyala sangat panjang dan lurus yang terbentuk dari aliran campuran udara dan bahan bakar yang menyerupai aliran *fully developed* pada pipa. Nyala dibatasi oleh lapisan pencampuran (*mixing layer*) dan distabilkan oleh *pilot flame* akibat kecepatan aliran yang sangat tinggi pada ujung *burner*.
- b. *Flame Stabilized by a large bluff body* adalah nyala yang terbentuk dari penggunaan benda penghalang yang luas penampangnya lebih besar dari luas penampang *burner*. Ukuran dan bentuk aerodinamis dari benda penghalang serta laju kehilangan kalor ke benda penghalang menjadi parameter penting yang mempengaruhi sifat nyalanya.
- c. *High-swirl Flame generated by a vane-swirler* adalah nyala yang terbentuk dari olakan tinggi (*high swirl*) aliran yang ditimbulkan oleh sudu-sudu pada tengah-tengah *burner*. Nyala timbul pada daerah diluar *wake*.

## 2.5 Teori dan Pemodelan Pembakaran

### 2.5.1 Pembakaran Laminer

Kajian teoritis tentang pembakaran telah berkembang lama diawali oleh teori detonasi oleh Chapman Jouguet, teori nyala difusi oleh Burke-Schuman, teori pembakaran spontan atau energi aktivasi asimptotik oleh Frank-Kamenetskii, teori deflagrasi oleh Zeldovich serta pendekatan asimptotik menggunakan Bilangan Peclet oleh Darrieus-Landau. Sebagian besar kajian matematikanya merupakan penerapan konsep asimptotik yang membutuhkan parameter yang besar dan koordinat ruang sebagai dasarnya [46].

Kajian teoritis meskipun dengan pendekatan yang sederhana terbukti lebih memperjelas pemahaman fisik dari pembakaran. Namun demikian penyesuaian model matematis menjadi penting saat terjadi perbedaan dengan hasil eksperimental atau penyelesaian numerik. Perkembangan komputasi numerik juga terjadi pada kajian pembakaran seiring dengan perkembangan teknologi

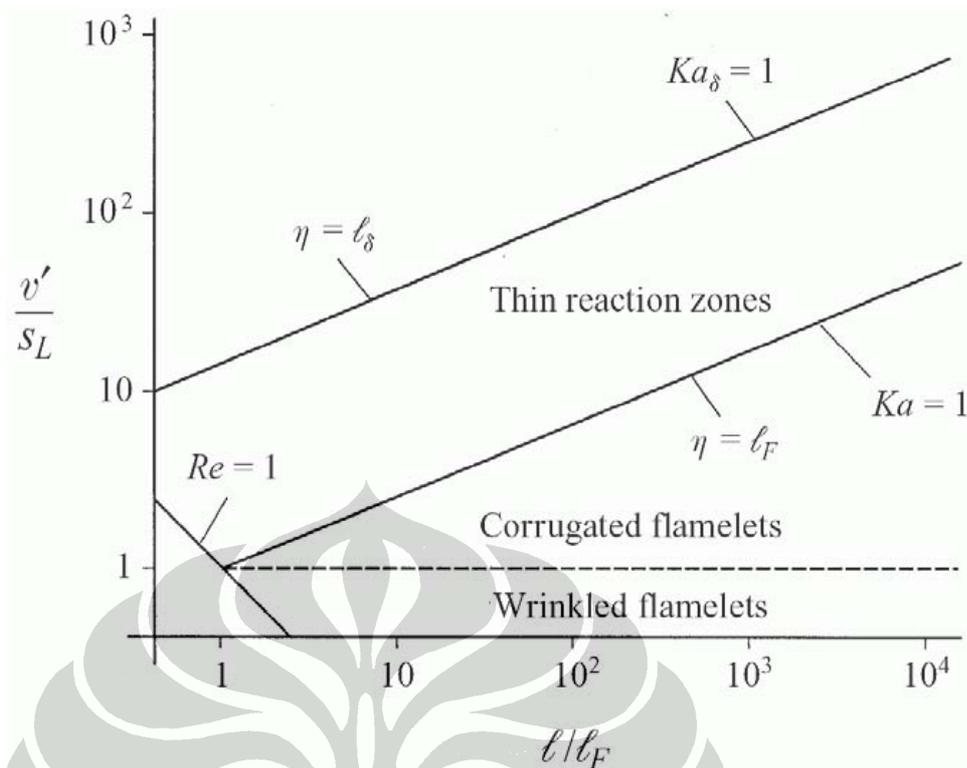
informasi. Hal ini tidak berarti penyelesaian numerik menyelesaikan kesulitan pemahaman tentang pembakaran karena penyelesaian numerik masih relatif lebih sederhana jika dibandingkan dengan penyelesaian mekanisme reaksi.

Pembakaran mungkin merupakan fenomena klasik paling rumit yang baru sedikit dapat diungkapkan secara teoritis. Mekanisme reaksi yang banyak, yang berbeda untuk tiap jenis bahan bakar, perambatan nyala, aliran multidimensi yang tunak atau transient, yang kompresibel dan inkompresibel, laminar atau turbulen, viskos atau non viskos, kerugian kalor, mempengaruhi struktur nyala sekaligus kajian teoritisnya. Analisis non-linier (*weakly non-linear theory*) melahirkan teori percabangan (*bifurcation theory*) yakni penggunaan persamaan eksplisit pada permukaan nyala seperti kelengkungan nyala (*curvature*), peregangan (*stretch*), vortisitas [47-48].

### 2.5.2 Pembakaran Turbulen

Pemodelan pembakaran turbulen diawali oleh Damkohler pada tahun 1940 mengenai pengaruh intensitas turbulensi pada struktur nyala. Kemudian Schelkin, pada tahun 1943 menyatakan pengaruh waktu terhadap kecepatan pembakaran turbulen dan dilanjutkan oleh Karlovitz, Summerfield dan Kovasznay [35]. Dengan mengacu pada metode pembakaran laminar pada tahun 1982 ditemukan analisa asimtotik skala jamak (*multiple-scale asymptotic analyses*) yang digunakan untuk memprediksi kecepatan pembakaran laminar. Pada pembakaran premix, pendekatan asimtotik ini membagi daerah pembakaran turbulen sesuai diagram pada Gambar 2.7.

Metode pemodelan untuk pembakaran premix turbulen sebagian besar berdasarkan pada pendekatan Persamaan G (*G-equation*) antara lain: Reynold Average Navier-Stokes Simulation (RANS), *Direct Numerical Simulation* (DNS) dan *Large Eddy Simulation* (LES). Metode pemodelan yang berdasarkan konsep probabilitas adalah metode PDF atau *Probability Density Function* yang memisahkan antara model kimiawi dengan pencampuran molekuler. Sedangkan untuk pembakaran non *premixed* diperkenalkan konsep *flamelet* dan *mixture fraction based model* [49].



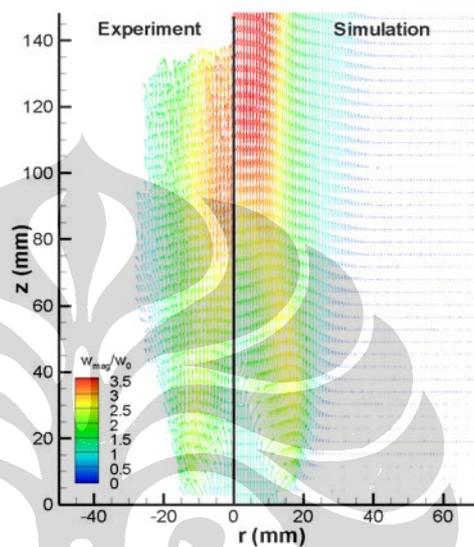
Gambar 2.7. Daerah Pembagian Nyala Turbulen [49]

Penelitian terbaru yang dipublikasi di jurnal internasional tentang nyala *premix* adalah analisa permukaan normal dan kelengkungan nyala turbulen dengan metode *cross-plane tomography* [1]. Tiga jenis nyala turbulen dengan variasi Bilangan Markstein telah diteliti. Dua faktor utama yang menyebabkan distribusi kelengkungan nyala tidak simetris adalah ketidakstabilan difusivitas termal dan terbentuknya ceruk nyala.

Pendekatan berbasis model *flamelet* juga dilakukan oleh peneliti dari Amerika yakni pada perbandingan nyala *premix* campuran metana dan udara. Metode simulasinya adalah *Direct Numerical Simulation* sedangkan perhitungan model *flameletnya* adalah metode perhitungan regangan nyala laminar. Fokus penelitiannya adalah kajian penerapan metode perhitungan regangan nyala laminar pada nyala turbulen di daerah reaksi. Parameter yang dikaji adalah pergeseran kecepatan dan kecepatan konsumsi bahan bakar. Pada bilangan Damkohler yang tinggi diperoleh kesesuaian pergeseran kecepatan antara hasil simulasi dan perhitungan. Namun pada bilangan Damkohler yang rendah terjadi penurunan respon dari regangan. Pada kecepatan konsumsi bahan bakar terdapat

ketidaksesuaian yang besar disebabkan oleh berbagai macam faktor dan juga gangguan karena fluktuasi regangan [50].

Sedangkan pada aspek nyala premix turbulen telah dilakukan simulasi dan eksperimen dari dinamika nyala *flickers* [51]. Perbandingan kecepatan campuran ditampilkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Perbandingan Kecepatan Antara Simulasi dan Eksperimen pada Nyala *Flicker* [51]

Dari aspek *flame stretch* penentuan bilangan Karlovitz 1-D, bilangan Karlovitz lokal dan *stretch rate* dari regangan nyala premix saat akan padam atau *extinction* telah diteliti oleh S.H. Chung et al [52]. Bilangan Karlovitz dinyatakan sebagai perbandingan dua waktu yakni waktu reaksi kimia dan waktu aliran fisik. Waktu reaksi kimia merupakan fungsi dari tebal nyala dibagi kecepatan nyala. Sedangkan waktu aliran fisik sama dengan kebalikan dari *flame stretch*. Berdasarkan definisi ini Bilangan Karlovitz merupakan kebalikan dari Bilangan Damkohler. Bilangan Karlovitz pada penelitian ini dinyatakan dengan Persamaan 2.9 [52]:

$$K = \frac{\eta}{S_L} Ka \quad (2.9)$$

Tebal nyala dihitung berdasarkan persamaan Zheldovich seperti pada Persamaan 2.7 sedangkan persamaan difusivitas termal atau  $\alpha$  adalah [52]

$$\alpha = \frac{k}{\rho_u c_p} \quad (2.10)$$

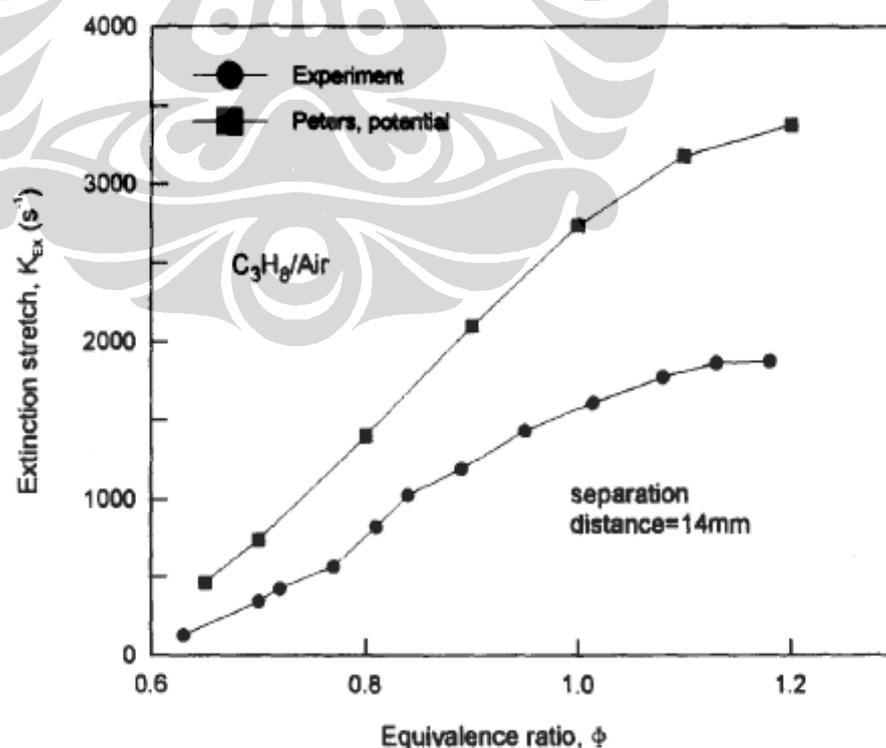
Jika disubstitusikan akan diperoleh 2 persamaan waktu reaksi kimia yakni  $\frac{\alpha}{S_L^2}$

dan  $\frac{\eta}{S_L}$ . Penentuan bilangan Karlovitz pada kondisi tidak ada *stretch* atau 1-D

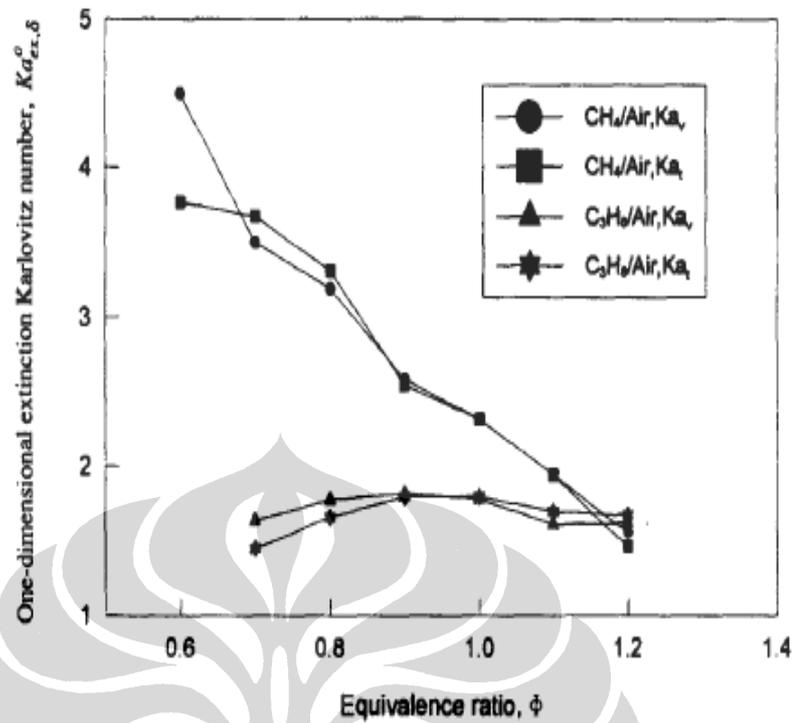
dapat dihitung dengan 2 persamaan yakni berdasarkan kecepatan nyala dan berdasarkan tebal nyala yang ditentukan berdasarkan suhu nyala seperti pada Persamaan 2.11 [52]:

$$K = \frac{\alpha}{S_L^2} Ka \quad \text{atau} \quad K = \frac{\eta}{S_L} Ka \quad (2.11)$$

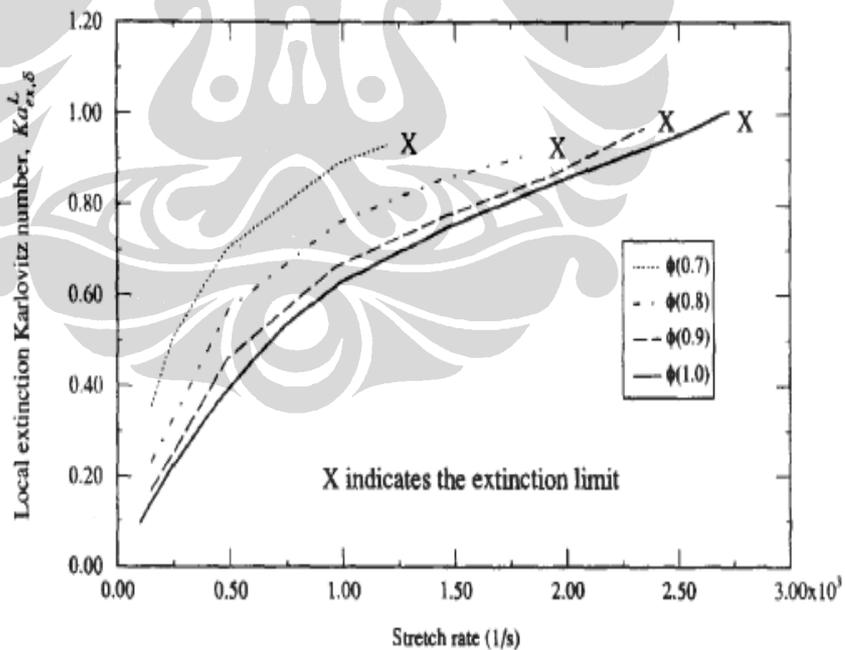
Grafik-grafik yang ditampilkan pada Gambar 2.9, 2.10 dan 2.11 dapat memberikan gambaran tentang faktor-faktor yang mempengaruhi *extinction*.



Gambar 2.9. *Stretch Rate* Pembakaran Propana dan Udara [52]



Gambar 2.10. Bilangan Karlovitz 1-D Nyala Campuran Propana dan Udara [52]



Gambar 2.11. Variasi Bilangan Karlovitz Lokal Berdasarkan Ketebalan Nyala Campuran Propana dan Udara [52]

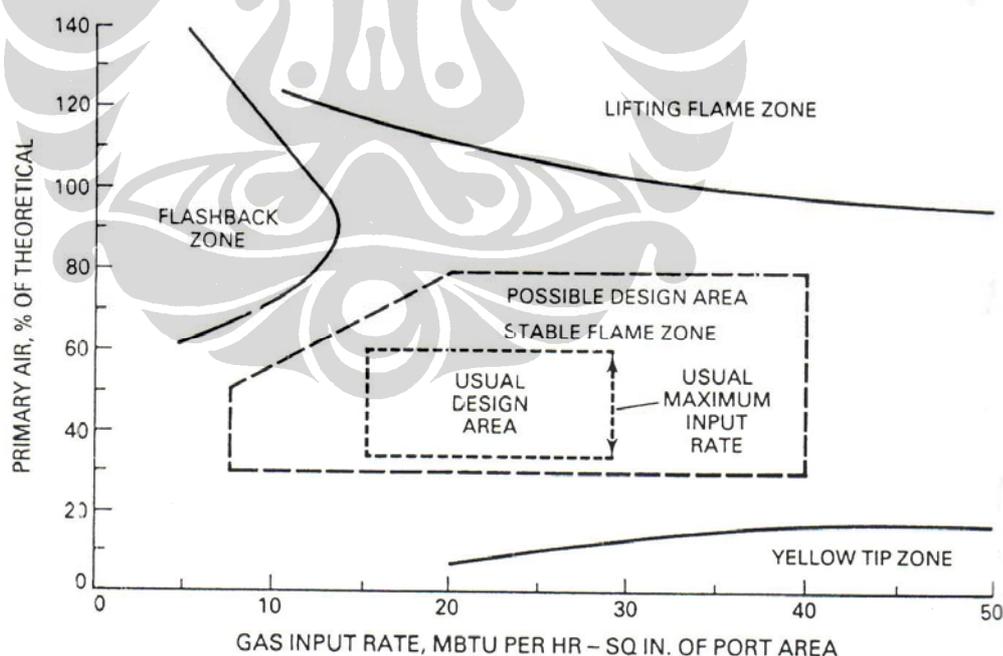
Gambar 2.9 memperlihatkan kesamaan kecenderungan *stretch rate* antara hasil eksperimen dengan perhitungan numerik. Gambar 2.10 memperlihatkan

variasi bilangan Karlovitz 1-D yang berkisar antara 1-5. Ditemukan pula bahwa perhitungan bilangan Karlovitz berdasarkan profil kecepatan dan profil suhu mempunyai kesamaan. Gambar 2.11 memperlihatkan bahwa bilangan Karlovitz lokal pada kondisi *extinction* adalah mendekati 1.

Penelitian lain yang membahas Bilangan Karlovitz adalah korelasi antara laju nyala dengan regangan nyala pada nyala turbulen udara dan metana [53].

## 2.6 Stabilitas Nyala

Kestabilan nyala api dapat dinyatakan dari berbagai macam parameter antara lain batas mampu nyala, gradient kecepatan nyala, kerugian kalor dan daerah stabilitas nyala. Daerah stabilitas nyala adalah luasan pada Grafik Fuidge yang dibatasi oleh daerah *flash back*, *yellow tip* dan *blow off* seperti pada Gambar 2.12 [54]. Daerah operasi sebelah kiri mengakibatkan terjadinya *flashback*, sementara itu untuk menghindari terjadinya *flashback* daerah kerja dirancang pada sisi kanannya yaitu pada daerah stabilitas nyala.



Gambar 2.12. Diagram Stabilitas *Flashback*, *Lift-off*, dan *Yellow Tipping* untuk Bahan Bakar Gas Industri [54]

### 2.6.1 *Flashback*

*Flashback* terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih cepat daripada kecepatan campuran udara-bahan bakar sehingga nyala api merambat kembali ke dalam tabung pembakar. Fenomena ini kadang disebut juga *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. *Flashback* secara umum merupakan kejadian sesaat jika 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*.

Kajian eksperimental maupun numerik tentang *flash back* pada *burner* dengan penambahan media yang porous dilakukan dengan pendekatan model perpindahan kalor yang sederhana dan stasioner [55,56]. Kajian *flash back* dengan simulasi numerik 1D untuk kondisi tunak dan transient juga dilakukan pada *burner* dengan penambahan busa berbahan keramik [57]. Simulasi numerik pada kondisi tunak menunjukkan terdapat kondisi operasi yang solusinya tidak terselesaikan. Hal ini terlihat pada simulasi transient sebagai daerah terjadinya *flash back*. *Flash back* terjadi karena kenaikan kecepatan pembakaran pada daerah porous akibat dari ketidakseimbangan kalor radiasi dengan kalor konveksi di dalam media porous tersebut.

### 2.6.2 *Lift-off*

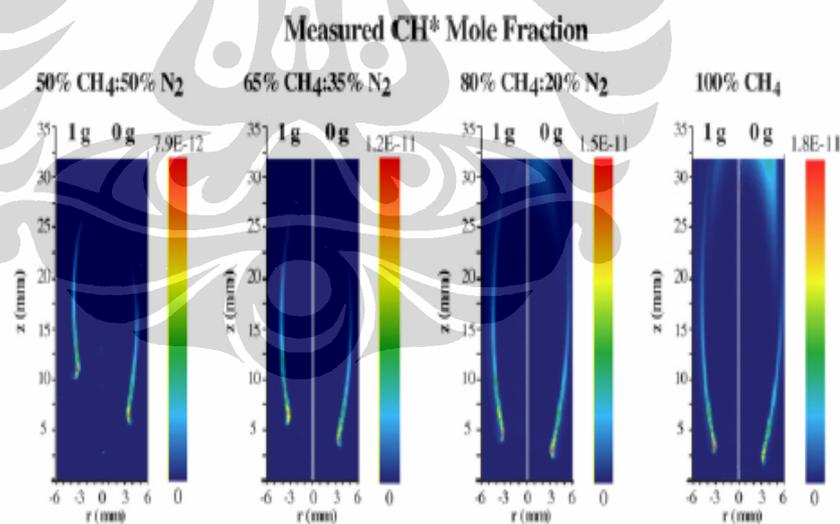
*Lift-off* adalah kondisi di mana nyala api tidak menyentuh permukaan mulut tabung pembakar, tetapi agak stabil pada jarak tertentu dari tabung pembakar. Sama seperti halnya *flashback*, fenomena *lift-off* juga berhubungan dengan kecepatan nyala api laminar lokal dan kecepatan aliran lokal yang sebanding.

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. 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 akan padam dan kondisi ini tidak diinginkan.

Dari banyak riset tentang fenomena *lift-off* yang sebagian besar memberikan kesimpulan yang sama bahwa *lift-off* terjadi karena keseimbangan kecepatan pembakaran dengan kecepatan aliran. Salah satu yang menarik untuk dikemukakan adalah perbandingan ketinggian *lift-off* antara kondisi gravitasi normal dan gravitasi rendah pada nyala diffusi laminar seperti tampak pada Gambar 2.13. Pada kondisi tanpa gravitasi dengan fraksi bahan bakar yang sama ternyata ketinggian *lift-off* menurun [58].



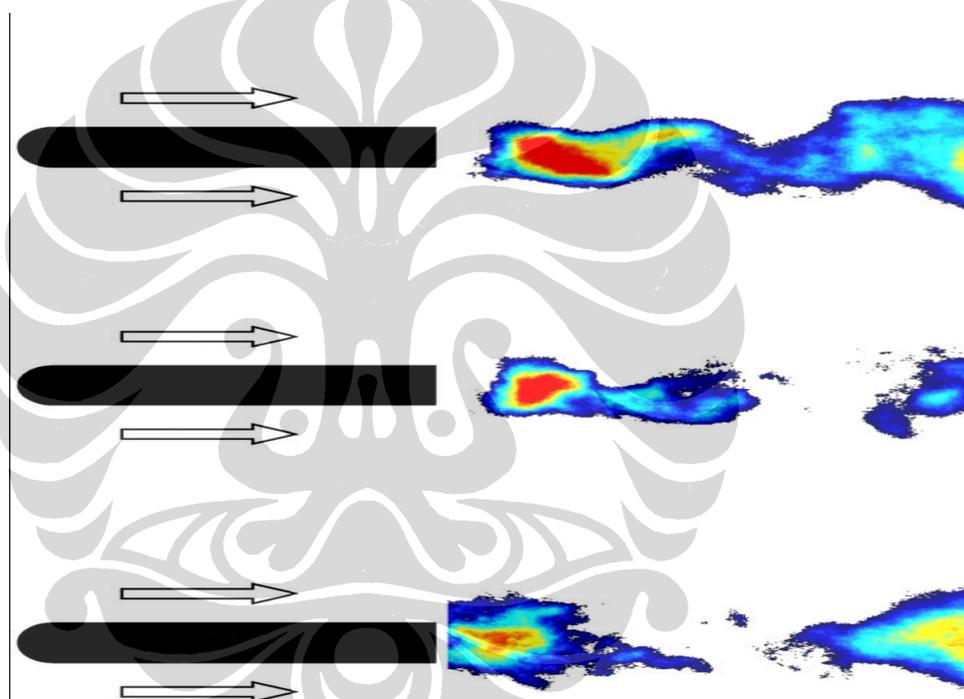
Gambar 2.13. Perbandingan Ketinggian *Lift-off* Antara Kondisi Gravitasi Normal dan Tanpa Gravitasi [58]

### 2.6.3 *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. Penelitian tentang *blow off* yang dilakukan bersamaan dengan kondisi *lift-off* menunjukkan bahwa pada fraksi massa bahan bakar yang rendah maka kecepatan *blow off* juga menurun secara linier menjadi lebih rendah dari kecepatan aliran saat *lift-off*. Hal ini yang mengakibatkan pada fraksi massa bahan bakar yang rendah tidak dapat terjadi *lift-off* karena nyala langsung *blow off* tanpa sempat mengalami *lift-off* [69].

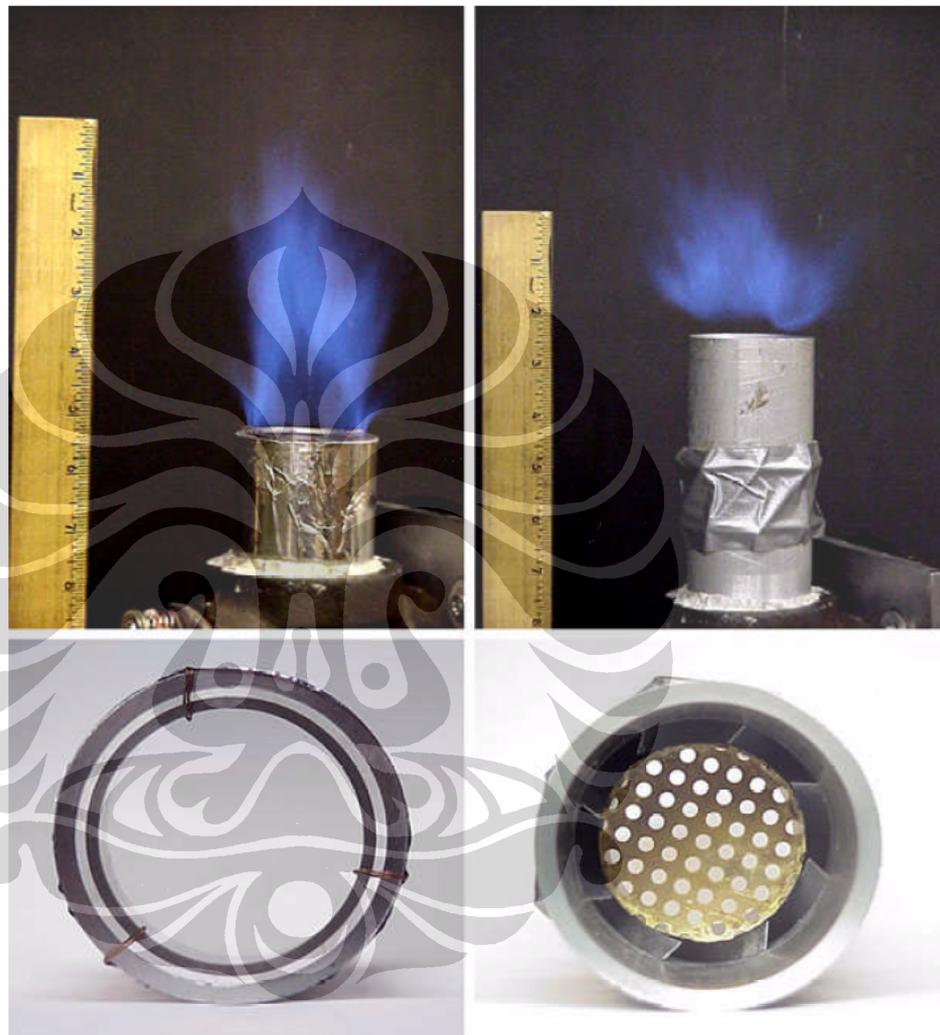
Sebaliknya pada kecepatan aliran yang tinggi dan bilangan Reynold yang tinggi mendekati *blow-off* dapat terjadi '*residual flame*' dan padamnya api di lokasi nyala seperti tampak pada Gambar 2.14 [14].



Gambar 2.14. *Residual Flame* mendekati *Blow-off* [14]

Aspek utama perancangan *burner* dalam hubungannya dengan nyala adalah stabilitas nyala. Salah satu metode unik untuk memperluas daerah kestabilan nyala adalah dengan memasang *ring* pada ujung keluaran *burner* [21]. Pada eksperimen yang dilakukan di *Lawrence Berkeley National Laboratory* Amerika diperoleh bahwa daerah nyala akan lebih luas dengan semakin mengecilnya diameter luar *ring*. Peningkatan celah antara diameter luar *ring* dengan diameter dalam tabung juga meningkatkan ketahanan terhadap fenomena *blow off* dan *flash back*. Hal ini diduga karena adanya daerah resirkulasi di dalam

daerah gelap. Penggunaan *ring* ini juga merubah tinggi nyala premix yang dipengaruhi oleh daerah resirkulasi. Daerah resirkulasi menyebabkan terjadinya perubahan kecepatan dan arah partikel gas yang belum terbakar. Photo percobaan dapat dilihat pada Gambar 2.15.



*LBNL low-NO<sub>x</sub> burner showing 20-kW flame at 25 vol % excess air and 15-ppm NO<sub>x</sub> (3 vol % O<sub>2</sub>). Left: With ring stabilizer insert. Right: Without insert.*

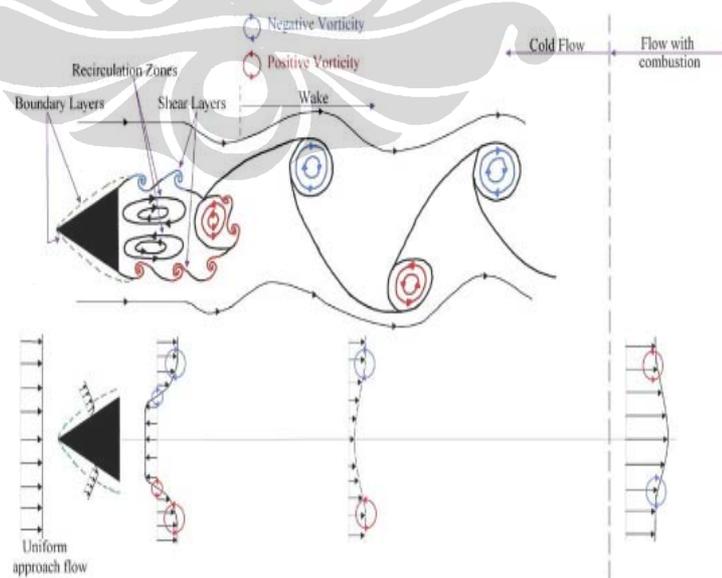
Gambar 2.15. Photo Percobaan *Ring Stabilizer* [21]

Umumnya daerah resirkulasi pada proses pembakaran sengaja dibuat dengan memasang *bluff-body*. Penelitian tentang fenomena aliran melewati suatu *bluff-body* juga telah diawali sejak tahun 70-an. Pembahasannya masih terpusat pada aspek mekanika fluidanya saja yakni pada aspek turbulensi aliran fluida. Sedangkan pengaruh turbulensi aliran sekaligus reaksi kimia pada proses pembakaran baru diawali tahun 1980-an. Kebanyakan penelitian tentang daerah

resirkulasi pada pembakaran membahas tentang visualisasi aliran baik dalam tingkat simulasi maupun penggunaan peralatan yang canggih seperti *Phase Doppler Anemometry (PDA)*, *Laser Doppler Velocimetry (LDV)*, *Particle Image Velocimetry (PIV)*, *Fluid Image Velocimetry (FIV)*, *Laser Induced Fluorescence (LIF)* dll. Pembahasan daerah resirkulasi sebagai fungsi dari parameter aliran fluida dan sekaligus reaksi kimia awal tahun 2000 telah mulai dipublikasikan [7].

Penelitian yang mempergunakan pemegang nyala (*flame holder*) pada pembakaran premix adalah karakteristik *blow off* pada 3 jenis pemegang nyala yakni bentuk rod, piringan dan kerucut terpancung. Parameter yang diubah pada percobaan adalah kecepatan aliran campuran dari propana dan udara. Pada kecepatan campuran yang rendah ditemukan bahwa pada ketiga pemegang nyala kondisi nyala lebih stabil karena *blow off* terjadi pada rasio ekuivalen yang lebih rendah. Namun pada kecepatan campuran yang tinggi pemegang nyala bentuk piringan dan kerucut kurang stabil. Sedangkan pada pemegang nyala bentuk rod masih diperoleh kestabilan nyala. Analisis medan aliran juga dilakukan dengan menggunakan *Particle Image Velocimetry (PIV)* [3].

Perbedaan profil kecepatan aliran dingin dan aliran eksotermis atau pembakaran pada aliran setelah *bluff body* ditampilkan oleh kelompok peneliti dari *Georgia Institute of Technology* seperti tampak pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Distribusi Kecepatan Kondisi Aliran Dingin dan Pembakaran [14]

Aliran setelah *bluff body* pada aliran dingin adalah berupa *wake* sedangkan pada kondisi pembakaran menyerupai aliran jet [14].

#### 2.6.4 *Lift-up*

*Lift-up* adalah kondisi saat pangkal nyala api terlihat berpindah dari sebelumnya pada ujung *burner* menuju benda penghalang. Pada pembakaran premix kondisi *lift-up* terjadi pada pembakaran yang miskin bahan bakar. Jenis material benda penghalang mempengaruhi temperatur dan besarnya *AFR* untuk terjadinya *lift-up* [28-32]. Hal ini berhubungan dengan laju kehilangan kalor benda penghalang seperti pada kondisi *flame stabilized by a large bluff body* [20].

Penelitian tentang kondisi *lift-up* masih terbatas pada hasil kajian eksperimental menggunakan *ring* sebagai benda penghalang. Parameter penelitian belum mencakup laju kehilangan kalor dan ukuran daerah resirkulasi namun masih terfokus pada pengaruh laju aliran bahan bakar, jarak benda penghalang dari ujung *burner*, diameter dalam *ring* dan jenis material *ring* terhadap *AFR* saat *lift-up*, temperatur *ring* dan temperatur ujung *burner* serta panjang nyala setelah *lift-up*.

*AFR* saat *lift-up* sangat dipengaruhi oleh posisi *ring* dari ujung *burner*. Makin tinggi posisi *ring* dari ujung *burner* maka *AFR* semakin besar. Hal ini berkebalikan dengan panjang nyala saat *lift-up*.

Fenomena *lift-up* tidak hanya dipengaruhi oleh medan aliran saja tapi juga oleh temperatur *ring*nya. Hal ini didukung oleh hasil eksperimental pada material *ring* yang berbeda namun geometri dan posisi *ring* serta *burning load* yang sama diperoleh *AFR* yang berbeda untuk terjadinya *lift-up*. Material *ring* mempengaruhi temperatur *ring*. Pada laju aliran bahan bakar yang tinggi temperatur *ring* saat *lift-up* cenderung meningkat. Dari aspek material *ring*, menggunakan material baja tahan karat, temperatur *ring* saat *lift-up* lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan *ring* dari keramik. Temperatur *ring* juga berpengaruh terhadap *AFR* terjadinya *lift-up* yakni *AFR* sebanding dengan temperatur *ring* baik pada material *ring* baja tahan karat maupun pada keramik

Panjang nyala saat *lift-up* dipengaruhi juga oleh temperatur *ring* sehingga pada posisi *ring* yang mendekati ujung kerucut nyala panjang nyala api mencapai maksimum.

Temperatur ujung *burner* mengikuti kecenderungan perubahan temperatur nyala api yang menurun seiring dengan penurunan rasio ekuivalens atau kenaikan *AFR*. Kondisi temperatur ujung *burner* yang lebih rendah menjadi pertimbangan untuk penerapan fenomena ini pada perancangan *burner*. Kajian eksperimental dan teoritis dari aspek reaksi kinetik dan perpindahan kalor perlu dilakukan untuk dapat mengungkapkan penyebab melompatnya nyala api dari ujung *burner* ke *ring* [32]. Demikian pula penelitian tentang panjang nyala api setelah *lift-up* perlu dilakukan jika fenomena ini akan diterapkan pada rancangan *burner*.

## 2.7 Panjang Nyala Api

Sebagian besar penelitian tentang panjang nyala api adalah untuk mengidentifikasi bilangan tanpa dimensi yang paling berpengaruh terhadap panjang nyala api. Bilangan Froude, bilangan Richardson, perbandingan momentum, perbandingan temperatur adalah kelompok bilangan tanpa dimensi yang digunakan pada penentuan panjang nyala api difusi [60-65].

Perbedaan persamaan panjang nyala api yang diperoleh sebagian besar disebabkan oleh perbedaan metode pengukurannya. Kalghatgi [61] menggunakan kamera dengan kecepatan 1/30 detik dan tiga kali pengambilan gambar untuk menghitung panjang nyala rata-ratanya. Sugawa dan Sakai [63] mengukur panjang nyala api menggunakan kamera video dan rata-rata panjang nyala dari sembilan pengambilan gambar. Faktor lain yang mempengaruhi perbedaan hasil pengukuran adalah faktor ketahanan retina mata pengamat. Salah satu metode untuk mengatasi hal ini adalah metode yang ditawarkan oleh Hawthorne dkk [62] adalah konsep panjang nyala api kimiawi. Panjang nyala api kimiawi adalah jarak sampai ujung api dimana fraksi mol bahan bakar mencapai 0,0005 pada sumbu nyala api.

Sonju dan Hustad [64] mengembangkan persamaan matematis menggunakan bilangan Froude,  $Fr$ , untuk menentukan panjang nyala api difusi seperti Persamaan 2.12.

$$\frac{L}{d_o} = 27 Fr^{1/5} \quad (2.12)$$

Persamaan panjang nyala api difusi ini diperoleh dari hasil penelitian pembakaran propana dan juga pembakaran metana dengan panjang nyala api yang mencapai hampir 8 meter.

Sedangkan penelitian tentang panjang nyala api premix masih agak jarang, salah satunya adalah yang dilakukan oleh Rokke [34]. Mengacu pada persamaan dari Sonju dan Hustad persamaan matematis untuk menentukan panjang nyala api premix diusulkan oleh Rokke menggunakan bilangan tanpa dimensi fraksi massa bahan bakar dan bilangan Froude seperti Persamaan 2.13 [34].

$$\frac{L}{d_o} = 33 Y_f^{2/5} Fr^{1/5} \quad (2.13)$$

Penelitian oleh Rokke menggunakan propana dengan fraksi massa propana antara 0,15 sampai 1,0. Persamaan ini berlaku pada pada bilangan Froude,  $Fr \leq 10^4$ . Khusus tentang metode pengukuran panjang nyala yang terbaru yakni pengukuran panjang nyala dengan analisa pencitraan struktur nyala berbasis CFD telah dilakukan dengan mengambil contoh penerapan pada pembakaran difusi dari propana [66].

Semua persamaan tersebut menunjukkan bahwa faktor stabilitas internal dari pembakaran mempunyai pengaruh yang dominan terhadap panjang nyala api. Selain itu diffusivitas thermal yang berhubungan dengan laju reaksi juga berperan terhadap panjang nyala api dan kecepatan nyala.

## 2.8 Simulasi dengan Perangkat Lunak Komputer

Pemodelan pembakaran banyak melibatkan persamaan differensial yang solusinya membutuhkan pendekatan non-linier. Pada dinamika fluida persamaan diferensial diselesaikan dengan metode komputasi atau *Computational Fluid Dynamic (CFD)*. Beberapa vendor perangkat lunak komersial berbasis CFD adalah ANSYS-CFX, Fluent Inc., Aerosoft Inc., Numeca International s.a., CFD Research Corporation dan CD Adapco.

Perangkat lunak Fluent dapat digunakan untuk menganalisis aliran sub sonik, sampai hypersonik. Fluent dapat menyelesaikan persamaan integral untuk

konservasi massa, momentum, energi, dan persamaan skalar lainnya seperti pada kasus aliran turbulen dan persamaan konsentrasi kimia.

Simulasi dengan perangkat lunak Fluent dilakukan setelah proses konfigurasi *burner* dan proses *meshing* pada perangkat lunak Gambit. *Mesh* yang dapat dilakukan oleh gambit ada beberapa macam, diantaranya hexagonal dan tetrahedral. *Mesh* hexagonal digunakan untuk domain yang teratur sedangkan *mesh* tetrahedral digunakan untuk domain yang lebih rumit dan tidak teratur karena bentuknya dapat disesuaikan dengan kondisi.

Bahan bakar dan oksidator pembakaran *premixed* memasuki zona reaksi dalam keadaan tercampur dalam format *mixture*, dengan komposisi fraksi massa yang ditentukan. Di dalam melakukan simulasi *premixed* dalam software Fluent ada beberapa skema yang dapat dipakai, *species transport* dan PDF (*Probability Density Function*).

Fluent dapat memodelkan *species transport* dengan atau tanpa reaksi kimia. Reaksi kimia yang dapat dimodelkan diantaranya

1. Reaksi fase gas yang melibatkan  $\text{NO}_x$  dan formasi polutan lainnya.
2. Reaksi permukaan (misal deposisi uap kimia) yang mana reaksi ini muncul di batas solid (*wall*)
3. Reaksi permukaan partikel (misal pembakaran arang atau *charcoal*) dengan reaksi muncul di permukaan partikel yang telah terdiskritisasi.

Fluent dapat memodelkan pencampuran dan transport spesies kimia dengan menyelesaikan persamaan konservasi yang mendeskripsikan konveksi, difusi dan reaksi sumber untuk setiap komponen spesies yang ada. Dalam spesies transport Fluent memprediksi fraksi massa untuk setiap spesies  $Y$  melalui persamaan konveksi-difusi untuk setiap  $i$  spesies seperti pada Persamaan 2.14 sampai Persamaan 2.16 [67].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (2.14)$$

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (2.15)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.16)$$

Pada persamaan 2.15  $G_k$  mewakili pembentukan energi kinetik turbulen berdasarkan kenaikan rata-rata kecepatan.  $G_b$  adalah pembentukan energy kinetik turbulen berdasarkan *buoyancy*.  $Y_M$  mewakili kontribusi dilatasi yang berfluktuasi pada turbulensi yang dapat terkompresi.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ , and  $C_{3\varepsilon}$  adalah konstanta. Persamaan reaksi yang dipakai pada komputasi adalah persamaan Arrhenius yang dinyatakan dalam Persamaan 2.17 [67].

$$\sum_{i'=1}^n v'_{i',k} M_{i'} \leftrightarrow \sum_{i''=1}^n v''_{i'',k} M_{i''} \quad (2.17)$$

Persamaan 2.16 berlaku untuk reaksi yang *reversibel* maupun *irreversibel*. Pada Fluent dianggap tidak dapat dibalik secara standar, sehingga  $k_{b,k}$  dapat diabaikan. Laju molar pembentukan/penghancuran zat  $i'$  pada reaksi  $k$ ,  $R_{i',k}$  pada persamaan laju reaksi, ditentukan oleh Persamaan 2.18 [67].

$$R_{i',k} = \Gamma \left( v''_{i'',k} - v'_{i',k} \right) \left( k_{f,k} \prod_{f=1}^n [C_f]^{\eta_{f,k}} - k_{b,k} \prod_{j=1}^n [C_f]^{\eta_{j,k}} \right) \quad (2.18)$$

dan  $\Gamma$  mewakili pengaruh zat/benda ketiga pada laju reaksi, yang dinyatakan dalam Persamaan 2.19 [67]

$$\Gamma = \sum_{j'}^N \gamma_{j',k} C_{j'} \quad (2.19)$$

dimana  $C_{j',k}$  adalah efisiensi benda ketiga dari zat  $j'$ th. Secara standar Fluent tidak memasukkan pengaruh benda ketiga pada perhitungan laju reaksi. Konstanta laju reaksi maju pada reaksi  $k$ ,  $k_{f,k}$ , dihitung menggunakan persamaan Arrhenius yakni Persamaan 2.20 [35,67].

$$k_{f,k} = A_k T^{\beta_k} \exp(-Ea / RT) \quad (2.20)$$

Jika reaksinya dapat dibalik, maka laju reaksi mundurnya dihitung dari laju reaksi maju menggunakan Persamaan 2.21 [67].

$$k_{b,k} = \frac{k_{f,k}}{K_k} \quad (2.21)$$

dengan  $K_k$  adalah konstanta equilibrium untuk reaksi  $k$  yang dihitung dengan Persamaan 2.22 [67]:

$$K_k = \exp\left(\frac{\Delta S_k^o}{R} - \frac{\Delta H_k^o}{RT}\right) \left(\frac{p}{RT}\right)^{\sum_{k=1}^{n_R} \eta_{f,k}'} \quad (2.22)$$

Eksponennya mewakili perubahan dari persamaan energi bebas Gibbs dan komponennya dihitung dengan Persamaan 2.23 [67]:

$$\frac{\Delta S_k^o}{R} = \sum_{i'=1}^N (v_{i',k}'' - v_{i',k}') \frac{S_{i'}^o}{R} \quad (2.23)$$

$$\frac{\Delta H_k^o}{RT} = \sum_{i'=1}^N (v_{i',k}'' - v_{i',k}') \frac{H_{i'}^o}{RT} \quad (2.24)$$

Selain dari aspek dinamika fluida permasalahan pembakaran dapat diselesaikan dari sisi persamaan reaksi kinetik yang kompleks menggunakan perangkat lunak CHEMKIN yang dikeluarkan oleh Reaction Design Inc. Khusus untuk masalah pembakaran beberapa paket program yang tersedia adalah AURORA, OPPDIF, PASR, PLUG dan PREMIX [68].

AURORA dipergunakan untuk kasus tunak dan transient pada suatu jaringan reaktor termasuk plasma, gas dan reaksi permukaan dengan pendekatan *Well Stirred Reactor* atau *Perfectly Stirred Reactor*. Sedangkan OPPDIF adalah untuk kasus pembakaran difusi yang *counter flow*. PASR untuk analisis pencampuran dan reaksi kinetik pada *Partially Stirred Reactor*. PLUG adalah paket program untuk pemodelan *Plug flow Reactor* dengan fase gas. PREMIX dipergunakan untuk mensimulasikan aliran tunak, laminar 1-D dari pembakaran *premixed*.