

BAB II LANDASAN TEORI

2.1. PEMBAKARAN

Pembakaran dipengaruhi oleh campuran bahan bakar udara. Ada 2 cara didalam teknik pencampuran antara udara dengan bahan bakar dalam pembakaran[25]:

1. Penyalaan difusi/ *non premix* dimana udara tidak bercampur dengan bahan bakar .
2. Penyalaan dengan non difusion/ *premix* dimana udara bercampur dengan bahan bakar sehingga pembakaran menjadi lebih sempurna.

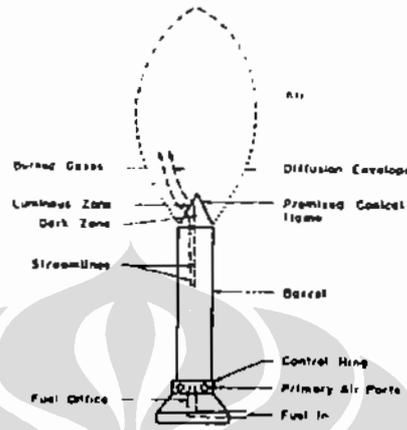
2.1.1. Pembakaran Non difusi

Bunsen's burner merupakan alat pembakar (burner) pertama yang dapat menghasilkan premixed flame ditemukan oleh Bunsen pada tahun 1855, dengan prinsip pengaturan aliran campuran aliran campuran udara dan bahan bakar gas secara kontinyu. Bahan bakar gas masuk kedalam burner melalui saluran masuk pipa di dasar burner yang ujung pipanya berbentuk nozel, agar bahan bakar gas langsung dapat bercampur dengan baik dengan udara primer 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, secara skematik burner bunsen dapat dilihat pada gambar 2.1 [25].

Reaksi kimia yang terjadi pada pembakaran dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain konsentrasi campuran bahan bakar dan udara, temperatur, tekanan, adanya katalisator dan efek radiasi.

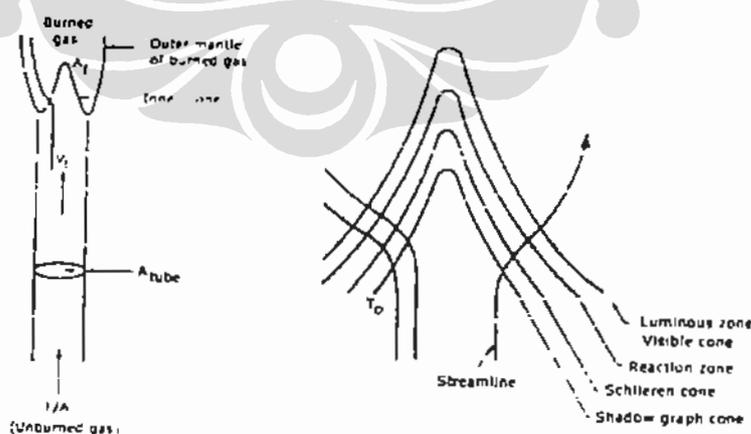
Daerah dimana terjadinya reaksi kimia dinamakan dengan daerah nyala (flame zone). Pada daerah nyala, reaksi yang cepat terjadi dan cahaya akan dipancarkan biasanya dari nyala. Nyala dapat didefinisikan sebagai rambatan yang terus menerus yang terjadi di daerah pembakaran pada kecepatan sub-sonic. Nyala api non difusi terbentuk jika bahan bakar dan oksidan sudah tercampur sebelum masuk daerah

reaksi, sedangkan nyala api difusi terbentuk karena bahan bakar dan oksidan belum tercampur saat memasuki daerah reaksi.



Gambar 2.1. Bunsen's burner

Nyala api non difusi terdiri atas daerah terang, merupakan tempat terjadinya reaksi pembakaran dan energi panas yang dilepaskan daerah reaksi (reaction zone) mempunyai ketebalan $\pm 1\text{mm}$, warna terang ini dapat berubah-ubah tergantung dari rasio bahan bakar dan udara. Struktur nyala api dapat dilihat pada gambar 2.2, daerah schlieren (schlieren zone) dan daerah gelap (dark zone) merupakan daerah transisi terjadinya perubahan molekul gas menjadi gas yang siap bereaksi pada jarak pemanasan awal (preheating zone) [25].

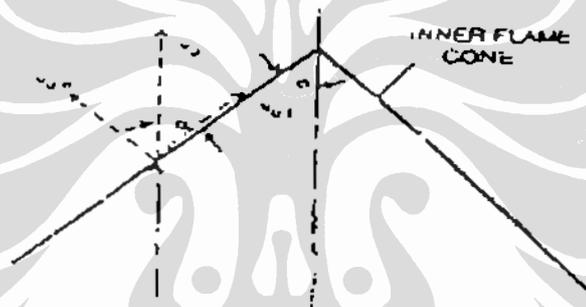


Gambar 2.2. Struktur Nyala

Pada daerah kerucut luminous terjadi reaksi dan pelepasan energi. Sedangkan dibawahnya terdapat daerah gelap (dark zone) dimana molekul gas yang tidak terbakar berubah alirannya dari arah yang semula vertikal menjadi ke arah luar tegak lurus permukaan batas gelap. Kecepatan laminar flame sama dengan kecepatan arah normal molekul gas yang tidak terbakar.

Agar kontur struktur nyala api tidak berubah, maka kecepatan nyala api harus sama dengan kecepatan normal komponen dari campuran udara dan 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 (SL) tidak dipengaruhi oleh bilangan Renoldnya seperti diperlihatkan pada gambar 2.3 dan persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut[26] :

$$S_L = V_u \sin \alpha \dots\dots\dots(2.1)$$



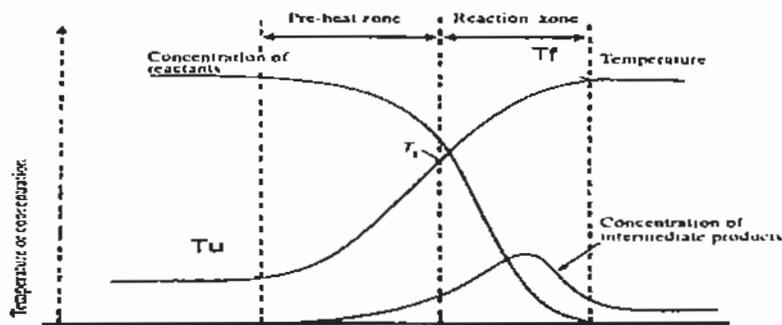
Gambar 2.3 Vektor diagram kecepatan nyala laminar

Proses reaksi pembakaran dalam suatu nyala api adalah gabungan dari reaksi kimia, perpindahan panas, perpindahan massa dan momentum dengan defusi dan pola aliran sehingga bentuk dan dan ukuran nyala sangat dipengaruhi oleh tahapan proses yang terjadi, sehingga bentuk nyala api dimensi satu dibagi menjadi empat daerah seperti terlihat pada gambar 2.4 , adapun tahapan proses tersebut adalah:

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

Daerah dimana terjadinya reaksi kimia dinamakan dengan daerah nyala (flame zone). Pada daerah nyala, reaksi yang cepat terjadi dan cahaya akan dipancarkan

biasanya dari nyala. Nyala dapat didefinisikan sebagai rambatan yang terus menerus yang terjadi di daerah pembakaran pada kecepatan sub-sonic.



Gambar 2.4. Tahapan proses pembakaran non difusi

Sedangkan daerah nyala dapat dibedakan menjadi 2 area yakni preheat zone dan reaction zone. Pada daerah preheat zone laju reaksi atau reaction rate diabaikan karena suhu campuran terlalu rendah. Persamaan keseimbangan energi hanya melibatkan laju konveksi dan difusi saja. Namun pada reaction zone laju reaksi sangat tinggi, mengimbangi laju diffuse. Laju konveksi sangat rendah karena beda temperature juga rendah, namun kurva profil temperature menitik tajam menyatakan suhu difusi yang sangat tinggi. Pembakaran hanya berlangsung di reaction zone, dan energi yang dibangkitkan didifusikan secara konduksi ke campuran gas di preheat zone. Untuk itu pembahasan akan dipecah menjadi 2 yakni preheat zone dan reaction zone secara terpisah[23].

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's 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*).

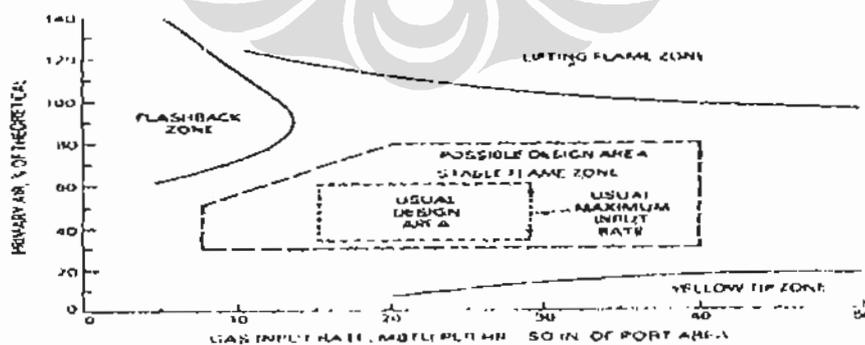
5. Ketidakstabilan diffusivitas termal, meliputi hubungan reaksi difusi dan kalor dengan nyala primer.

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*)[26].

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 2.5 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[26].



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

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

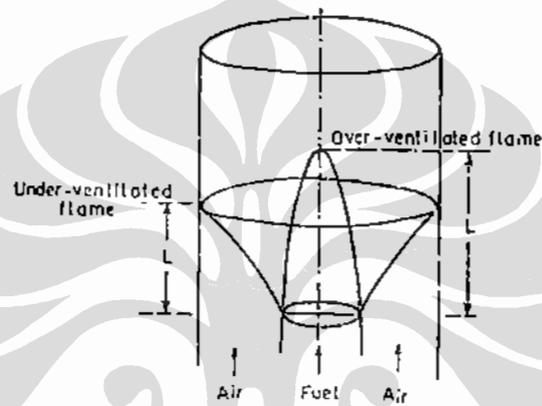
Blow-off merupakan suatu keadaan di mana nyala api padam akibat dari batas kecepatan aliran lebih besar dari laju nyala atau kecepatan pembakaran. Kondisi seperti ini juga sangat dihindari.

2.1.2. Pembakaran Difusi

Pembakaran difusi memiliki karakteristik yang berbeda dengan pembakaran non difusi, yaitu laju pembakaran ditentukan oleh laju dimana bahan bakar dan oksidator dialirkan dalam ukuran yang tepat untuk reaksi. Sedangkan laju pembakaran untuk nyala api non difusi ditentukan oleh laju pelepasan energi dan laju reaksi oksidasi yang telah tercampur sebelumnya antara bahan bakar dengan oksidator. Reaksi antara bahan bakar dan udara pada nyala api difusi biasanya terjadi pada daerah temperatur maksimum. Sedangkan pada nyala api non difusi reaksi oksidasi terjadi sebelum daerah temperatur maksimum. Laju konsumsi oksidator per bagian volume pada nyala api difusi seribu kali lebih sedikit dibanding dengan nyala api non difusi. Oleh karena itu, pada nyala api premix terjadi pembakaran yang lebih sempurna. Didalam nyala api difusi ketika gas bercampur dengan dialirkan ke atas,

partikel gas akan mengalir ke sisi bagian luar sedangkan partikel oksidator akan mengalir ke sisi bagian dalam. Hal ini terjadi pada percobaan yang telah kami lakukan.

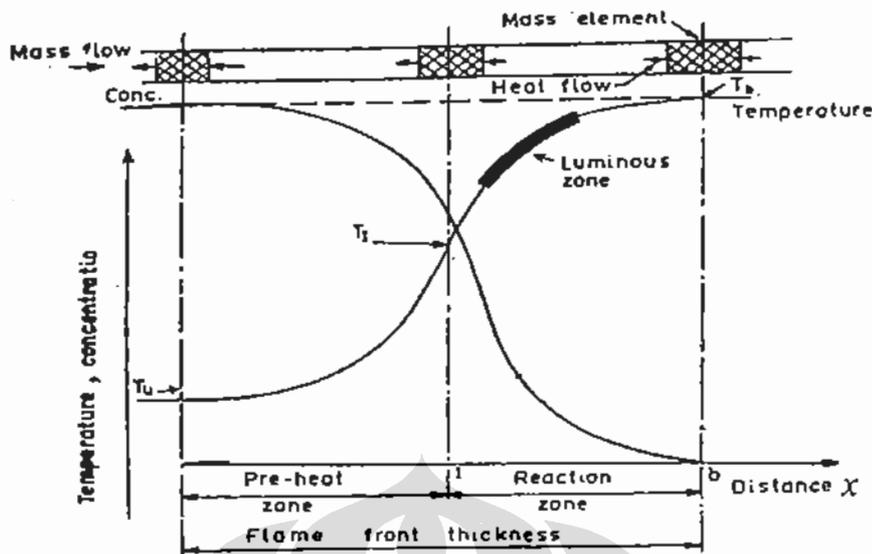
Burke dan Schumman, mempelajari nyala api difusi didalam sebuah tabung dimana aliran bahan bakar dikelilingi oleh aliran udara dengan kedua aliran tersebut memiliki kecepatan yang sama. bentuk api yang terbentuk tergantung dari apakah aliran udara tersebut memiliki lebih banyak oksigen (*over-ventilated*) atau kekurangan oksigen (*under-ventilated*) untuk kebutuhan reaksi pembakaran yang sempurna dengan bahan bakar. Bentuk dari *flame front* dari kondisi tersebut, yaitu seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.6. Over-ventilated dan Under-ventilated pada nyala api difusi

Didalam nyala api *over-ventilated*, batas api menuju ke sumbu axis silinder, sedangkan pada nyala api *under-ventilated* batas api bergerak menuju ke dinding luar silinder. Beberapa bentuk nyala api dapat terjadi diantara dua batas tersebut, yaitu dengan merubah rasio bahan bakar dan udara, biasanya dengan menambah atau mengurangi jumlah aliran bahan bakar atau udara pada flowmeter. Untuk nyala api difusi, batas nyala api didefinisikan sebagai permukaan (*surface*) ketika reaksi pembakaran telah sempurna, yaitu terjadi pada keadaan rasio stoikiometri.

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



Gambar 2.7 Tahapan proses pembakaran difusi

Gambar 2.7. 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* temperature selama perpindahan *mass element* sampai batasan I , naik dengan pergerakan cembung ke arah sumbu x dan kenaikan 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 perlahan-lahan.

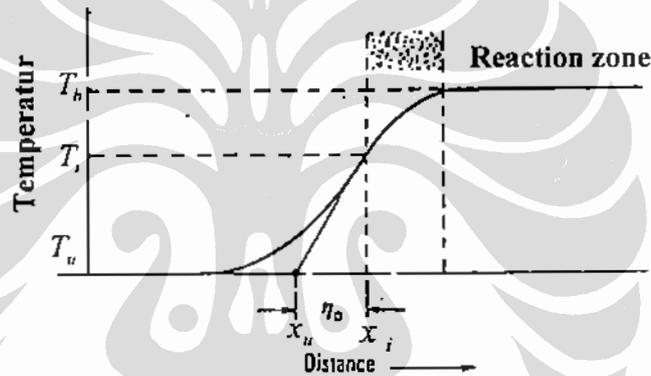
Oleh karena kenaikan temperatur, laju reaksi kimia juga naik. Pada temperatur T_r , *mass element* ini menaikkan reaksi kimia pada dirinya sendiri dan kenaikan temperatur terus berlangsung oleh karena pelepasan panas dari reaksi kimia. *Profile* temperatur setelah batasan I , secara alamiah berubah dan 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 2.7). 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 2.8), ketebalan *preheat zone* (η_o) dapat diprediksi menggunakan persamaan dibawah ini[27].



Gambar 2.8 : Prediksi ketebalan *preheat zone* berdasarkan *profile* temperatur

$$\eta_o = \frac{T_i - T_u}{(dT/dx)_i} \quad (2.2)$$

dan

$$\eta_o = x_i - x_u \quad (2.3)$$

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) melakukan observasi terhadap *preheat zone* bahan bakar propana. diperoleh distribusi temperatur yang terjadi sepanjang daerah *preheat zone* sesuai persamaan berikut:

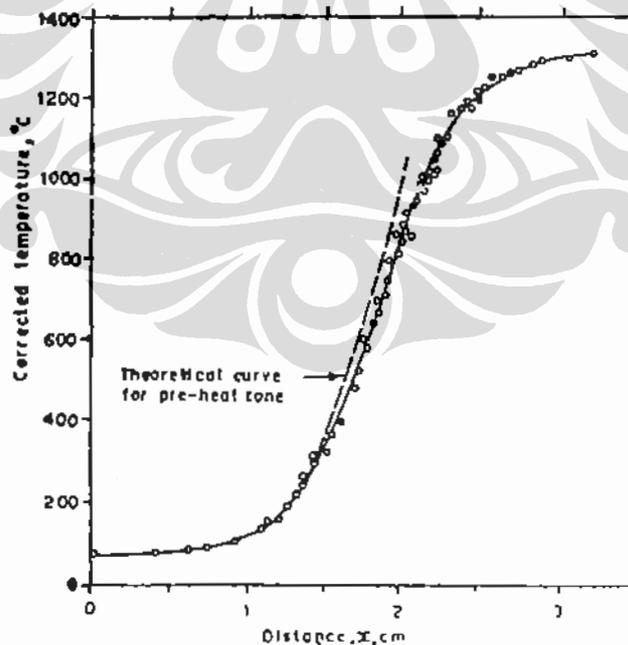
$$T_{pz} = -0,2051 x^3 + 45,75 x^2 - 3334,3 x + 79767 \quad (2.4)$$

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

Dan diperoleh ketebalan *preheat zone* pada temperatur nyala $T_f = 466^\circ\text{C}$ 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 eksponensial.

Dizon-Lewis dan *Wilson* ,menyatakan bahwa campuran methana-udara dapat bereaksi pada temperatur 1450 K s/d 2100 K, dan temperatur penyalaaan 1100 K s/d 1300 K. *R. Friedman, E. Burke* dan *J. Chem* (1954) memperoleh temperatur penyalaaan untuk campuran *acetylene*-udara, *ethelene*-udara dan *propane*-udara diperoleh secara eksperimen sebesar 400°C s/d 800°C . Gambar 2.9 menunjukkan *profile* temperatur nyala api difusi *propane*-udara[28].



Gambar 2.9 : *Profile* temperatur *propane*-udara

Proses terangkatnya pangkal penyalaan pada 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 .

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 .

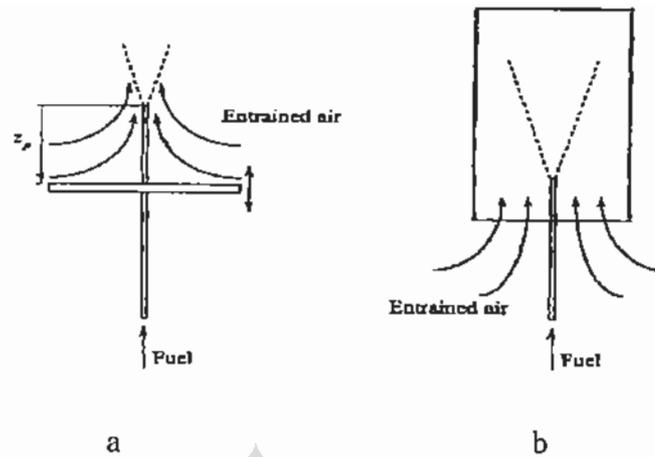
Eickhoff et al. pada *Twentieth Simposium of Combustion* (1984) menyatakan bahwa dalam pembakaran difusi sejumlah udara terinfiltrasi ke dalam semburan bahan bakar hingga terjadi kondisi *premix*. Kondisi *premix* yang memungkinkan terangkatnya pangkal nyala api difusi. Selain itu dinyatakan pula bahwa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

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 .

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 .

Vancuickenborne 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 .

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 .



Gambar 2.10 : 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*/nozlel, sesuai persamaan dibawah ini.

$$\bar{x}_f = 0.002245u_f - 0.01663 \quad (2.5)$$

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

$$\frac{\bar{x}_f}{d_n} = u_f \left(1.02 + \frac{0.0976}{d_n - 0.35} \right) \quad (2.6)$$

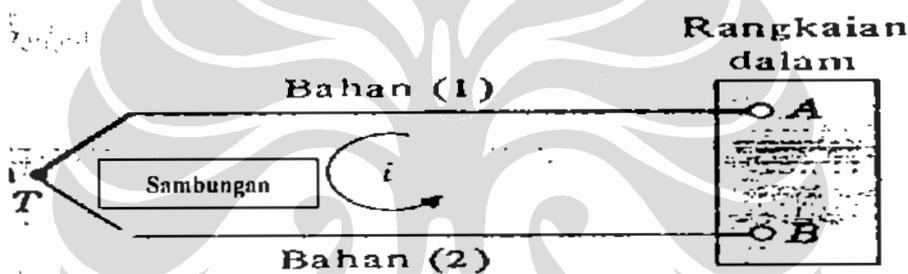
Eduardo Fernandez-Tarrazo, et al. (2005) melakukan analisa *numeric* guna menentukan kondisi *liftoff* dan *blowoff* pada pembakaran difusi dimana campuran bahan bakar dan udara disemburkan secara paralel dengan arah horizontal .

I Made Kartika Dhiputra, Harinaldi dan NK Caturwati (2008) melakukan observai 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 nozlel, $Re_{f,i} = 34$ 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 $Re_{a,i} = 1715$.

2.2 PENGUKURAN TEMPERATUR

2.2.1 Termokopel

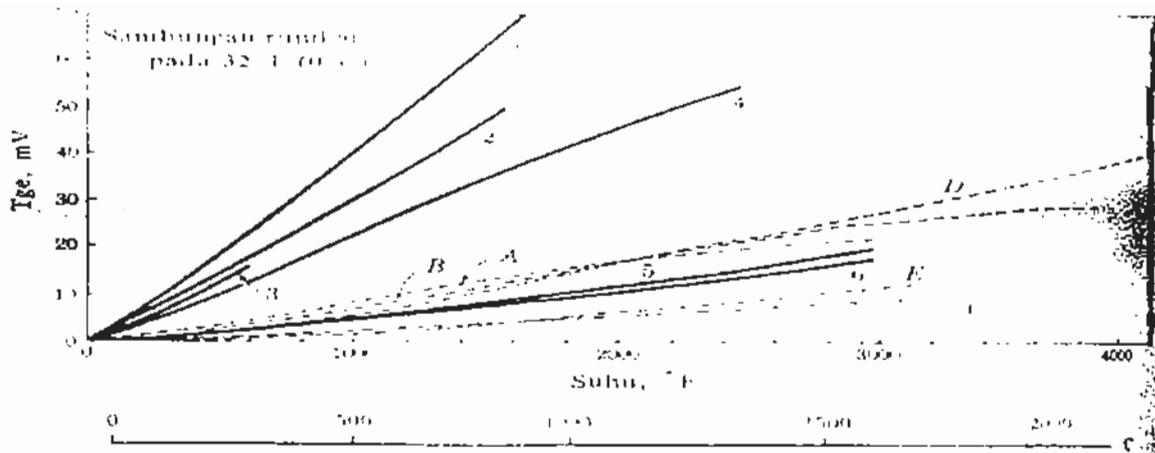
Pengukuran temperatur dengan menggunakan termokopel pada prinsipnya memanfaatkan efek termoelektrik. Bila dua macam logam yang berlainan disatukan seperti gambar 2.11, akan timbul tegangan gerak elektrik (*electromotive force*) disingkat tge (emf) antara dua titik A dan B yang terutama merupakan fungsi suhu persambungan (*junction temperature*). Fenomena ini disebut efek Seebeck (*Seebeck effect*). Jika kedua bahan itu dihubungkan dengan rangkaian luar sedemikian rupa sehingga arus mengalir, tge dapat berubah sedikit karena fenomena yang disebut efek peltier (*Peltier effect*). Selanjutnya jika terdapat gradien suhu pada salah satu atau kedua bahan, tge sambungan akan mengalami perubahan sedikit lagi, hal ini disebut efek Thomson,



Gambar 2.11 Sambungan dua logam berlainan yang menunjukkan efek termoelektrik

Dari ketiga tge tersebut yang paling perlu mendapat perhatian adalah tge Seebeck karena bergantung pada suhu sambungan. Jika tge yang dibangkitkan pada persambungan dua logam yang tidak sama diukur dengan seksama sebagai fungsi suhu, maka sambungan itu dapat dipakai untuk mengukur suhu. Setiap rangkaian termokopel harus mempunyai sedikitnya dua persambungan, jika suhu satu sambungan diketahui maka suhu sambungan lainnya dapat di hitung dengan menggunakan sifat termoelektrik bahan-bahan, suhu yang diketahui disebut suhu rujukan.

Tge termoelektrik biasa dinyatakan dalam potensial yang dibangkitkan bila persambungan rujukan berada pada 0°C (32°F). Tabel-tabel termokopel standar dibuat atas dasar ini dan rangkuman karakteristik keluaran gabungan-gabungan termokopel yang paling umum diberikan pada gambar 2.12 [24].



Gambar 2.12 Hubungan suhu terhadap tge pada bahan-bahan termokopel

Keterangan

Kurva-kurva tentatif

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1 Kromel-Konstantan | A Renium-Molibden |
| 2 Besi-konstantan (tipe J) | B Renium-Wolfram |
| 3 Tembaga-konstantan (tipe T) | C Iridium-Iridium rodium |
| 4 Kromel-Alumel (tipe K) | D Wolfram-Wolfram renium |
| 5 Platina-platina rodium (tipe R) | E Plat rodium-plat rodium 10% |
| 6 Platina-platina rodium (tipe S) | |

2.2.2 Pengukuran Temperatur Dengan Radiasi

Pengukuran temperatur nyala api pada titik tertentu secara konvensional dapat dilakukan dengan menggunakan termokopel. Penggunaan termokopel memiliki banyak kelemahan antara lain timbulnya kesalahan karena fluktuasi nyala api serta karena perpindahan panas pada permukaan termokopel [12]. Metode yang berkembang selanjutnya adalah metode spektroskopi yakni Raman and Rayleigh Spectroscopy atau Coherent anti-Stokes Raman Spectroscopy (CARS). Namun metode ini membutuhkan sistem optik skala besar dan hanya mengukur temperatur pada titik tertentu [13].

Metode non kontak yang sekarang banyak dikembangkan adalah metode termografi yang prinsip kerjanya adalah melalui pengukuran radiasi termal yang dipancarkan oleh obyek tersebut.

Radiasi thermal adalah radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh suatu benda karena suhunya. Daya emisi (*emissive power*) E suatu benda adalah energi yang

dipancarkan benda itu persatuan luas persatuan waktu, pada kondisi yang tercapai keseimbangan, energi yang diserap suatu benda mesti sama dengan energi yang dipancarkan, sebab jika tidak, tentu ada energi yang mengalir masuk atau keluar benda itu dan menyebabkan suhunya naik atau turun. Perbandingan daya emisi suatu benda (E) dengan daya emisi benda hitam (E_b) pada suhu yang sama ialah sama dengan nilai absorptivitas benda itu, perbandingan ini disebut emisivitas ϵ benda,

$$\epsilon = E / E_b \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

Di sini perlu kita ingatkan bahwa emisivitas dan absorptivitas tersebut adalah adalah sifat-sifat total benda itu, artinya, merupakan tingkah laku integral bahan itu untuk keseluruhan panjang gelombang. Benda-benda nyata memancarkan radiasi lebih sedikit dari permukaan hitam sempurna, sebagaimana di ukur dari emisivitas bahan, yang nilainya berubah-ubah suhu dan panjang gelombang radiasi.

Benda kelabu adalah benda yang mempunyai emisivitas monochromatic ϵ_λ yang tidak tergantung dari panjang gelombang, emisivitas monokromatik didefinisikan sebagai perbandingan antara daya emisi monokromatik benda (E_λ) itu dengan daya emisi monokromatik benda hitam pada panjang gelombang dan suhu yang sama.

$$\epsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{b_\lambda}} \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana E_{b_λ} adalah daya emisi benda hitam persatuan panjang gelombang, jika terdapat kondisi benda kelabu, artinya (E_λ) = konstan, sehingga persamaan dapat disederhanakan menjadi, $\epsilon = \epsilon_\lambda$

Hubungan fungsi untuk E_{b_λ} diturunkan oleh Planck dengan menggunakan konsep kuantum untuk energi electromagnetic, dengan metode termodinamik statistic, dan E_{b_λ} ternyata berhubungan langsung dengan densitas energi, sesuai pada persamaan berikut:

$$E_{b_\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2 / \lambda T - 1}} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana λ = panjang gelombang, μm

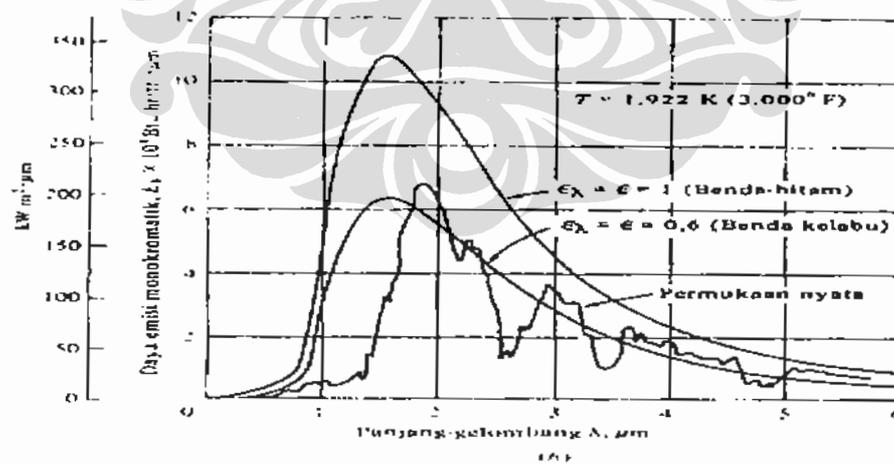
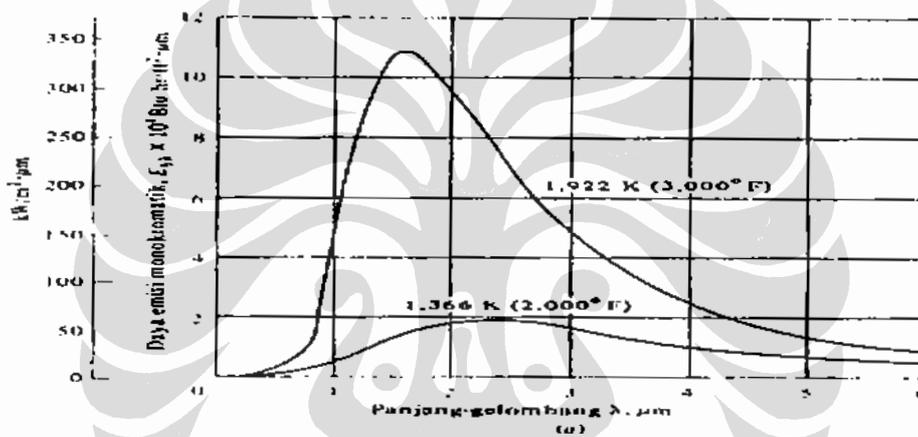
T = suhu, K

$$C_1 = 3,743 \times 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$C_2 = 1,4387 \times 10_4 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Grafik $E_{b,\lambda}$ sebagai fungsi suhu dan panjang gelombang dapat dilihat pada gambar 2.13, puncak kurva pada suhu tinggi tergeser kearah panjang gelombang yang lebih pendek. Titik maksimum dalam kurva radiasi dihubungkan oleh hukum pergeseran Wien (Wien's displacement law) yang persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2897,6 \mu\text{m} \cdot \text{K} \dots\dots\dots (2.10)$$



Gambar 2.13 (a) Daya emisi benda hitam sebagai fungsi panjang gelombang dan suhu
 (b) Perbandingan antara daya emisi benda hitam dan benda kelabu dengan daya permukaan nyata.

2.2.2.1 Radiasi Dari Gas Panas Dan Nyala Api Non Luminous

Sejauh ini, interaksi radiasi dengan gas telah diabaikan. Gas mengemisi dan mengabsorpsi radiasi dalam pita energi diskrit yang diatur oleh tingkat energi yang diperbolehkan dalam molekul. Karena energi yang dikaitkan dengan gerak vibrasi atau rotasi molekul hanya dapat mempunyai nilai-nilai tertentu, akibatnya jumlah energi yang di emisi atau diabsorpsi oleh molekul akan mempunyai frekuensi, $\nu = \Delta E/h$, yang berkaitan dengan beda energi ΔE antara tingkat-tingkat yang diperbolehkan. Emisi radiasi untuk gas-gas terlihat dalam daerah spektrum Infra merah.

Hanya gas yang mempunyai *moment dipole* dapat berinteraksi dengan radiasi elektromagnetik pada *thermal region* pada spectrum nya (0.4 – 100 μm). Untuk gas yang tak bercahaya, gas inert dan gas diatomik dengan komposisi simetris seperti O_2 , N_2 , dan H_2 dapat dianggap transparan terhadap radiasi thermal. Jenis media penting yang mengabsorpsi dan mengemisi radiasi adalah gas poliatomik seperti CO_2 dan H_2O dan molekul tak simetris seperti CO . Gas-gas ini juga dikaitkan dengan produk pembakaran hidrokarbon. Penentuan absorpsi dan emisi radiasi sangat sulit, karena melibatkan temperatur, komposisi, densitas dan geometri gas [19].

Terdapat beberapa penyederhanaan yang memungkinkan estimasi radiasi dalam gas dibuat secara langsung, idealisasi ini adalah sebagai berikut :

- a. Gas berada dalam kesetimbangan termodinamik, dimana keadaan demikian dapat dikarakterisasi secara lokal dengan temperatur konstan.
- b. Gas dapat dianggap abu-abu, penyederhanaan ini memungkinkan absorpsi dan emisi radiasi dikarakterisasi oleh suatu parameter seperti $\alpha = \epsilon$.

Dalam jangkauan temperatur yang dikaitkan dengan produk pembakaran hidrokarbon, emisivitas gas abu-abu dari H_2O dan CO_2 dapat diperoleh dengan memakai grafik hasil percobaan Hottel, dapat dilihat pada Gambar 2.14. Sebuah masa gas setengah bola dengan tekanan 1 atm digunakan oleh Hottel untuk mengevaluasi emisivitasnya. Sementara grafik berlaku khusus untuk masa gas

setengah bola berjari-jari L, bentuk lain dapat diberlakukan dengan pertimbangan panjang berkas rata-rata L seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1

Bentuk	L
Bola	$\frac{2}{3}$ x diameter
Silinder infinit	1 x diameter
Ruang antara bidang paralel infinit	1,8 x jarak antar bidang
Kubus	$\frac{2}{3}$ x sisi
Ruang diluar tumpukan tabung infinit dengan pusat pada segitiga samasisi; diameter tabung sama dengan lebar celah	2,8 x lebar celah
Sama seperti diatas kecuali diameter tabung sama dengan setengah lebar celah	3,8 x lebar celah

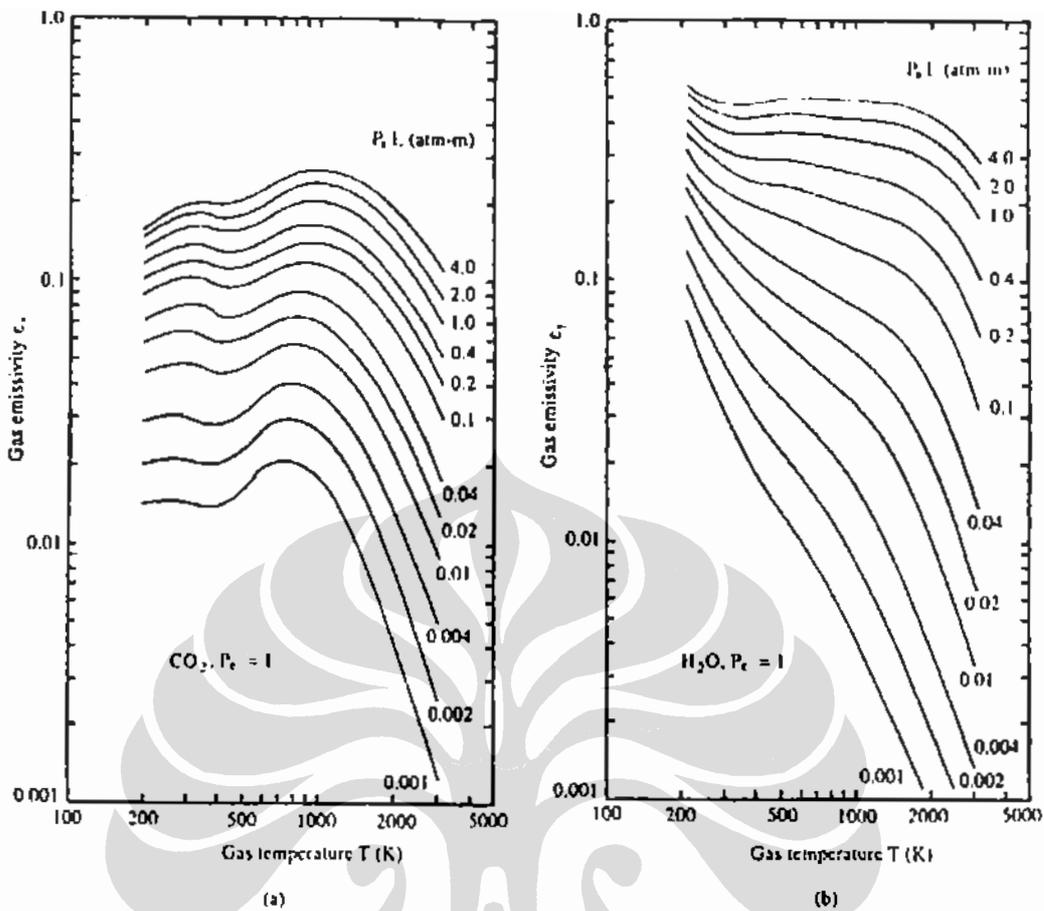
†Dari H.C. Hottel, "Radiation," Bab IV dalam W.H. Mc Adam (ed), Heat Transmission, edisi ke tiga, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1964.

Tabel 2.1. Panjang berkas rata-rata, L, untuk Berbagai Geometri

Untuk geometri yang tidak tercakup dalam tabel, panjang berkas rata-rata dapat diperkirakan dengan relasi $L=3,4$ (volume)/(luas permukaan). Gambar 2.14 memberikan emisivitas massa setengah bola gas H₂O dan CO₂ pada tekanan 1 atm dan tekanan parsial mendekati nol sebagai fungsi temperatur ,hasil kali p_wL dan p_cL , dengan p_w dan p_c adalah tekanan parsial gas H₂O dan CO₂.

Besar nilai emisivity total untuk molekul hitero molekuler dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{co_2} + \epsilon_{H_2O} \dots\dots\dots(2.11)$$



Gambar 2.14 Emisivty Gas CO₂ dan H₂O

2.2.2.2 Radiasi Dari Nyala Api Luminous Dan Smoky Gas Panas

Nilai emisivty dari nyala api luminous dan smoky gas panas dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\epsilon = 1 - \exp(-KL) \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana:

- K : koefisien efektif emission
- L : Flame thickness

Untuk diameter nyala api < 1 m, emisivty dapat dianggap dari specie molecular H₂O dan CO₂, sedangkan nilai emisivty terhadap nyala api dengan diameter > 1m dan merupakan luminous hydrokarbon biasa disamakan dengan black body yaitu $\epsilon = 1$ [23].

2.2.2.3 Pengukuran Temperatur dengan Infra Red Thermografi

Pengukuran temperatur nyala api dengan metode non kontak seperti Infra red dapat digunakan untuk mengukur temperatur suatu obyek hingga 2000 °C. Prinsip kerja peralatan ini adalah mengukur besarnya intensitas radiasi infra red yang dipancarkan suatu obyek.

Intensitas radiasi infrared yang datang dari titik tertentu pada suatu obyek adalah penjumlahan radiasi yang dipancarkan oleh obyek itu sendiri dan radiasi ambient yang di pantulkan oleh obyek tersebut,

$$I = \varepsilon.I_{object} - (1 - \varepsilon).I_{ambient} \dots\dots\dots$$

(2.13)

Dimana :

I_{object} : Intensitas radiasi yang datang dari obyek

$I_{ambient}$: Intensitas radiasi yang datang dari sekitar obyek

ε : Emissivity obyek

I : Intensitas radiasi yang terdeteksi

Emissivity pada umumnya merupakan fungsi dari frekwensi radiasi dan temperatur obyek, tapi pada prakteknya, untuk mendapatkan nilai perkiraan yang baik , jenis material dan temperatur di anggap sebagai faktor indipenden yang bertemu secara kebetulan, serta diasumsikan bahwa nilai absorpsi dan emisi atmosferic tidak signifikan[21].

Persamaan diatas diberikan untuk menghitung nilai temperatur suatu titik pada suatu obyek sesuai dari nilai intesitas radiasi yang terdeteksi, tetapi kita harus tahu nilai emisivity pada titik tersebut dan berikut nilai ambient temperatur. Jika kita tahu intensitas radiasi dari suatu titik-titik yang berbeda temperaturnya, yaitu T_1 dan T_2 , nilai emisivity dan ambient temperatur pada permukaan obyek tersebut dapat dihitung. Dengan berasumsi bahwa efek lingkungan adalah seragam menembus permukaan obyek, satu image pada satu titik yang temperaturnya uniform (tetapi berbeda ambient temperaturnya) sudah cukup untuk menghitung nilai emissivity titik-titik pada permukaan obyek [21].

2.2.2.4. Pengukuran temperatur dengan Infra View Thermografi

Infra View boiler thermometer adalah detector infra red yang yang dapat dipakai untuk mengukur gas-gas produk pembakaran dengan range temperature 250°F s/d 3000°F. Gas CO₂ yang dipanaskan berada pada level moleculer yang terexcitasi, dimana jika berada pada level tersebut menjadi mudah dideteksi dengan metode pengukuran radiasi infra red yang dipancarkan. Jika temperatur pembakaran meningkat, maka gas CO₂ yang tereksitasi akan meningkat dalam spectrum infra rednya. [22]

Respon spectral infra red dari Infra-View thermometer ditetapkan secara spesifik untuk mendeteksi emisi infra red dari gas panas CO₂, dengan cara memfilter pajang gelombang yang lain dari energi radiasi infra red . Radiasi infra red yang di amati merupakan energi radiasi dari molekul gas yang tereksitasi. Banyak energi transisi yang berlangsung pada gas yang tereksitasi secara termal yang menghasilkan emisi radiasi pada daerah infra red.[22]