

BAB II DASAR TEORI

2.1 PROSES PEMBAKARAN

Pembakaran dapat didefinisikan sebagai kombinasi secara kimiawi dari unsur oksigen dengan unsur yang mudah terbakar dari bahan bakar (reaksi oksidasi) yang berlangsung secara cepat maupun lambat pada suhu dan tekanan tertentu. Pada reaksi oksidasi yang berlangsung cepat di hasilkan sejumlah energi elektromagnetik (cahaya), energi panas dan energi mekanik (suara)

Pada semua jenis pembakaran, kondisi campuran udara dan bahan bakar merupakan faktor utama yang harus diperhatikan untuk mendapatkan campuran yang sempurna, pada reaksi pembakaran pada unsur – unsur yang dapat terbakar dari bahan bakar menghasilkan pembebasan energi yang tergantung pada produk pembakaran yang terbentuk tiga unsur utama yang dapat terbakar pada sebagian besar bahan bakar adalah karbon, hidrogen dan belerang.

Pada reaksi pembakaran, berlaku kekekalan massa sehingga massa dari produk pembakaran sama dengan massa dari reaktan. total massa untuk masing-masing unsur yang bereaksi sebelum dan sesudah reaksi adalah sama meskipun masing-masing unsur memiliki rumus kimia yang berbeda. Oksigen yang digunakan dalam proses pembakaran biasanya berasal dari udara yang mengakibatkan terikutnya unsur lain dalam unsur yang tidak dapat terbakar dalam bahan bakar dan akan melewati proses pembakaran tanpa mengalami perubahan dan akan membentuk polutan (NO_2).

Dalam pembakaran adalah : “oksidasi cepat yang menghasilkan panas dan juga oksidasi lambat yang disertai oleh sedikit panas dan tanpa api”. Definisi ini menekankan pada dasarnya pembakaran merupakan proses transformasi energi antara ikatan kimia yang berupa panas dan dapat digunakan dalam berbagai cara, dengan kata lain pembakaran dapat menghasilkan api. Definisi lain dari pembakaran adalah : “reaksi kimia yang meliputi kombinasi bahan bakar dan oksigen yang menghasilkan panas produk pembakaran”.

Dari beberapa definisi diatas terlihat bahwa proses pembakaran selalu membutuhkan oksigen sebagai oksidan, hal ini sangat bertentangan dengan realita yang terjadi, bahwa selama proses pembakaran sebagai oksidannya adalah udara yang pada kenyataannya mengandung 21% Oksigen 78% Nitrogen dan 1% merupakan unsur lain. Dan untuk tujuan perhitungan, gas nitrogen dianggap hanya melewati proses pembakaran tanpa mengalami perubahan. Pada dasarnya proses pembakaran terdiri dari dua kondisi, yaitu :

- ❖ Kondisi pembakaran stoikiometrik (teoritis)
- ❖ Kondisi pembakaran dengan excess air (aktual)

2.1.1 Kondisi pembakaran stoikiometrik (teoritis)

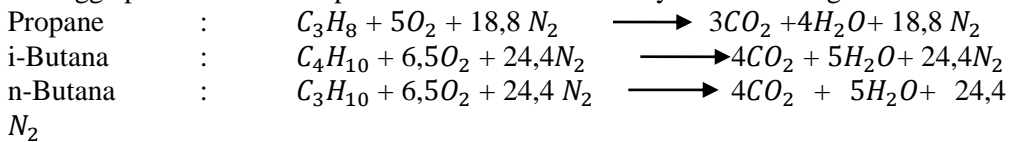
Kondisi pembakaran stoikiometrik adalah dimana relatif jumlah bahan bakar dan udara secara teoritis dibutuhkan minimal untuk memberikan pembakaran yang sempurna, dan dapat dihitung melalui analisa pada bahan bakar gas yang bereaksi dengan oksigen.

Pada penelitian ini menggunakan LPG sesuai dengan spesifikasi yang dikeluarkan oleh Pertamina yang meliputi ethana (C_2H_6), propane (C_3H_8), iso-butana (C_4H_{10}), normal-butana (C_4H_{10}), iso-pentana (C_5H_{12}) seperti yang ditunjukkan pada lempira C, sedangkan untuk perhitungan stoikiometrik hanya unsur yang dominan : propane (C_3H_8), i-butana (C_4H_{10}), n-butana (C_4H_{10}).

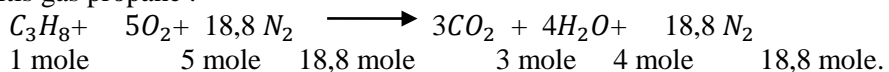
Tabel 2.1 Spesifikasi Bahan Bakar (LPG)

Jenis BB	Rumus Kimia	Berat Mol (gr/mol)	% berat	Jumlah Mol (mol/gram)	Fraksi Mol
Propane	C_3H_8	44	11	0,25	0,14
i-butana	C_4H_{10}	58	31	0,53	0,30
n-butana	C_4H_{10}	58	58	1,00	0,56
Jumlah			100	1,78	1,00

Sehingga persamaan reaksi pembakaran stoikiometriknya adalah sebagai berikut :



dari beberapa persamaan diatas, sebagai contoh untuk persamaan reaksi pembakaran teoritis gas propane :



Jadi secara teoritis dapat dilihat bahwa kebutuhan bahan bakar dan udara sebanding dengan jumlah koefisien masing-masing reaktan dan produk.

Sehingga konsentrasi CO₂ pada produk pembakaran stoikiometrik :

$$\% CO_2 \text{ (wet)} = \frac{3}{3+4+18,8} \times 100\% = 11,63\%$$

$$\% CO_2 \text{ (dry)} = \frac{3}{3+18,8} \times 100\% = 13,76\%$$

Kondisi pembakaran secara stoikiometri pada umumnya sulit untuk dicapai, hal ini dikarenakan laju reaksi yang terbatas dan adanya proses pencampuran bahan bakar yang tidak sempurna, sehingga pembakaran biasanya diekspresikan dengan

excess air. Hal ini akan menjamin tidak adanya bahan bakar yang terbuang dan sempurnanya proses pembakaran.

2.1.2 Pembakaran Dengan Udara Lebih (Aktual)

pembakaran dalam prakteknya adalah sukar untuk daerah kondisi *stoikiometrik*. Beberapa *burner* untuk industri beroperasi pada rasio udara/gas yang mendekati nilai teoritisnya tetapi sebagian besar *burner* penentuan udaranya melebihi kondisi *stoikiometrinya*, hal ini untuk meyakinkan bahwa pembakaran terjadi dengan sempurna.

Alasan utama untuk menentukan udara lebih (*excess air*) adalah kegagalan aliran gas dan udara untuk bercampur secara sempurna sebelum terjadinya proses pembakaran. Terjadinya pembakaran tergantung pada tumbukan molekul bahan bakar dengan molekul oksigen. Jika terjadi kekurangan campuran pada kedua fluida tersebut, maka oksigen harus diberikan untuk menambah terjadinya tumbukan molekul.

Metode yang tepat untuk menentukan udara aktual didalam sebuah system pembakaran terhadap jumlah ketentuan teoritisnya diekspresikan sebagai ratio udara aktual yang digunakan (vol/vol bahan bakar) terhadap kebutuhan udara stoikiometrik (vol/vol bahan bakar) :

$$A F = (\text{udara aktual yang digunakan}) / (\text{kebutuhan udara stoikiometrik})$$

Dimana : A F adalah air – fuel ratio

Presentase udara lebih dapat diekspresikan sebagai $100 \times (A F - 1)$ excess air dapat ditentukan oleh kandungan karbon dioksida atau oksigen dari produk pembakaran dengan menggunakan persamaan :

$$AF - 1 = (V_0/A_0) [(CO_{2\ st} - CO_{2\ act}) / (CO_{2\ act})] \text{ Atau } AF - 1 = (V_0/A_0) [O_2 / (21 - O_2)]$$

Dimana :

V_0 = produk pembakaran kering stoikiometrik vol/vol.fuel

A_0 = udara stoikiometrik vol/vol.fuel

$CO_{2\ st}$ = CO_2 stoikiometrik dalam produk pembakaran kering % vol

$CO_{2\ act}$ = CO_2 pengukuran dalam produk pembakaran kering % vol

O_2 = O_2 pengukuran dalam produk udara kering

Ratio V_0/A_0 bervariasi dari 0,89 sampai dengan 0,98

2.2 API (FLAME)

api adalah : “pengembangan sendiri berkesinambungan dari daerah pembakaran yang dilokasikan pada kecepatan subsonic”. Ada beberapa kata kunci pada definisi ini. Pertama, diperlukan api yang dilokasikan, yaitu api hanya menempati sebagian kecil dari campuran pembakaran pada satu waktu sembarang. Kata kunci kedua adalah subsonic, gelombang pembakaran yang terpotong-potong (*discrete*) bergerak secara subsonic yang disebut dengan *deflagrasi*. ini juga memungkinkan Untuk gelombang pembakaran yang

berkembang pada kecepatan supersonic, gelombang seperti ini disebut *detonasi*. Dasar mekanisme pengembangan berbeda pada *deflagrasi* dan *detonasi*, ini disebabkan karena fenomenanya jarak.

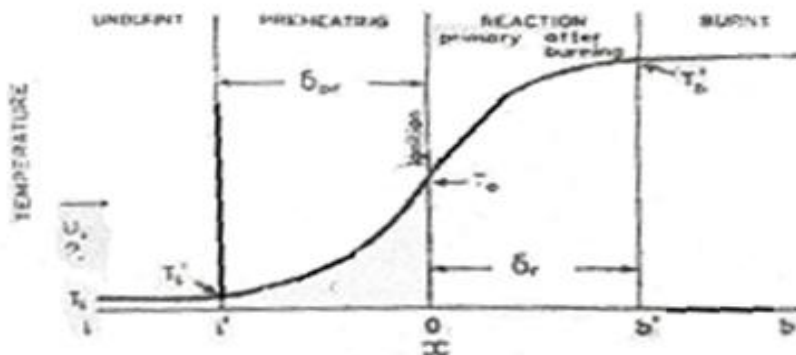
2.2.1 KARAKTERISTIK API

Api hidrokarbon dikarakteristikan oleh radiasinya yang tampak dengan sebuah *Excess air*, daerah reaksi terlihat biru. Radiasi biru ini berasal dari *excitasi* CH radical didalam daerah yang bertemperatur tinggi, ketika udara berkurang sehingga kurang dari stoikiometriknya, daerah api akan terlihat biru-hijau. Radiasi biru-hijau ini berasal dari *excitasi* C_2 . Dalam kedua api tersebut, *OH radical* juga memberikan kontribusi terhadap radiasi yang nampak. Jika api lebih kaya campurannya, jelaga akan terbentuk yang diakibatkan oleh radiasi yang berwarna hitam. Meskipun radiasi jelaga mempunyai intensitas yang maksimal dalam infra merah, kepekaan spectrum pada mata manusia menyebabkan kita melihat cahaya kuning terang (mendekat putih) akibat pudarnya emisi orange, tergantung pada temperatur api. Sesuai dengan pembagiannya api dibagi dalam dua daerah yaitu :

- *Pre heat zone* : daerah dimana sedikit panas dilepaskan
- *Reaction zone* : daerah dimana sebagian besar energi kimia dilepaskan

Namun Turns (1995) menyatakan bahwa suatu api satu dimensi dapat dibagi menjadi empat zone, seperti ditunjukkan pada gambar 2.1

1. Unburned gas
2. Preheating
3. Reaction
4. Burned gas



Gambar.2.1 struktur api (flame) satu dimensi

Pada batas yang ada, didesain menggunakan profil temperatur sebagai dasar referensi. *premixed gas* mendekati api yang mempunyai kecepatan, temperatur dan konsentrasi yang relatif sama dengan sifat-sifat fisik konstan di daerah *unburned gas*. pada daerah *preheating*, temperatur meningkat disebabkan semata-

mata panas konduksi dari api seluruh reaksi kimia dan pelepasan panas terjadi dalam daerah *reaction* sedangkan gas-gas yang terbentuk dari api masuk kedalam daerah *burned gas*.

2.2.2 KLASIFIKASI API

menurut cara pencampuran dan reaksi (penyalaan) bahan bakar dan *oxidizer*, api dikategorikan menjadi :

1. *Premixed flame*

Bila reaktan tercampur sempurna pada tingkat molekul sebelum terjadinya reaksi kimia yang signifikan. Laju pengembangan api (kecepatan pembakaran) tergantung pada komposisi dan laju reaksi kimia.

2. *Diffusion flame (non-premixed)*

Bila awalnya bahan bakar dengan *oxidized* terpisah dan reaksi terjadi hanya hubungan antara bahan bakar dan *oxidizer*, dimana pencampuran dan reaksi terjadi secara bersamaan. Pengembangan *diffusion flame* diatas oleh kecepatan berdiffusi reaktan terhadap lainnya. Api juga dikategorikan menurut sifat-sifat mekanika fluidanya, yaitu :

- Api laminar, api yang aliran fluidanya bergerak dengan kondisi lapisan-lapisan yang membentuk garis-garis alir dan tidak berpotongan satu sama lain. Alirannya relatif mempunyai kecepatan rendah dan fluidanya bergerak sejajar (*laminae*) dan memiliki batasan-batasan yang berisi aliran fluida. partikel fluida mengalir atau bergerak dengan bentuk garis lurus dan sejajar. laminar ciri arus yang berkecepatan rendah, dan aliran partikel sedimen dalam zona aliran yang berpindah. Aliran laminar tergambar sebagai filamen panjang yang mengalir sepanjang aliran. Aliran laminar mempunyai bilangan reynold lebih rendah dari 2300. Pada kondisi aliran laminar, aliran dari gas terbakar mengikuti streamline aliran tanpa adanya diffusi turbulen dimana diffusi panas dan massa tergantung pada sifat molekul dari komponen gas.
- Api turbulen, aliran turbulen adalah aliran fluida yang partikel-partikelnya bergerak secara acak dan tidak stabil dengan kecepatan yang berfluktuasi yang saling berinteraksi. akibat dari hal tersebut garis alir antar partikel saling berpotongan. turbulen mentransport dengan dua cara yaitu dengan penambahan fluida dan penurunan tekanan lokal ketika pusaran turbulen bekerja pada aliran turbulen memiliki bilangan reynold yang lebih besar dari 4000. Untuk kondisi aliran turbulen tergantung pada skala dan intensitas turbulensinya.

2.3 PROSES PERPINDAHAN PANAS

Perpindahan panas merupakan perpindahan energi yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur. Selama terdapat perbedaan temperatur maka perpindahan panas masih akan terjadi. Perpindahan panas dapat dibedakan menjadi 3 hal yaitu :

1. Konduksi

Perpindahan panas yang terjadi pada gradien temperatur yang terdapat dalam medium yang diam, baik itu benda padat maupun benda cair (fluida) persamaan dapat dituliskan :

$$q_x = - kA \frac{dt}{dx} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

- q_x = laju perpindahan panas konduksi (Watt)
- k = konduktivitas thermal (W/m. °C)
- A = luas penampang yang tegak lurus dengan arah laju perpindahan panas (m²)
- dt = perubahan suhu
- dx = ketebalan bahan

2. Konveksi

Perpindahan panas yang terjadi karena perbedaan temperatur antara medium yang bergerak dengan suatu permukaan yang dilewatinya. Tanpa memperhatikan mekanismenya, persamaan laju perpindahan panas konveksi dinyatakan dalam bentuk :

$$q = \bar{h} \times A_s \times (T_s - T_\infty) \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

- q = laju perpindahan panas (W)
- \bar{h} = koefisien perpindahan panas(W/m² °C)
- A_s = luas perpindahan panas (m²)
- T_s = temperatur dinding (°C)
- T_∞ = temperatur sekeliling (°C)

3. Radiasi

Radiasi termal adalah energi yang diemisikan oleh suatu benda yang berada pada temperatur hingga energi radiasi dapat diemisikan dari permukaan benda padat, cair, maupun gas. emisi radiasi dapat diketahui dengan adanya perubahan dalam konfigurasi elektron dan atom atau molekul. Lebih lanjut energi dan medan radiasi ditransportasikan oleh gelombang elektromagnetik yang berasal dari energi dalam material yang memancar, perbedaan utama antara perpindahan panas radiasi dengan perpindahan panas konduksi dan perpindahan panas konveksi adalah perpindahan panas radiasi

tidak memerlukan media material. Adapun radiasi thermal dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$q = \sigma \cdot A (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{W}) \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

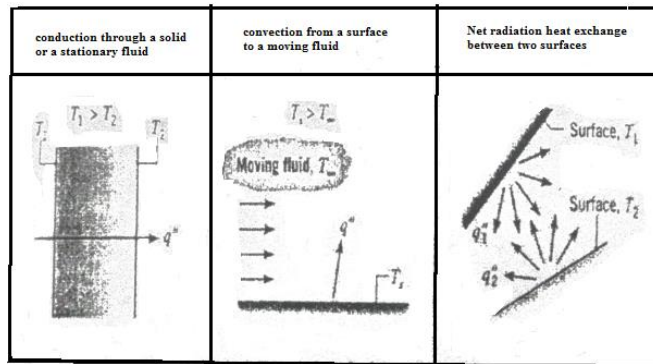
Dimana:

q = laju perpindahan panas (w)

σ = konstanta bolztman ($5,669 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$)

A = luas penampang (m^2)

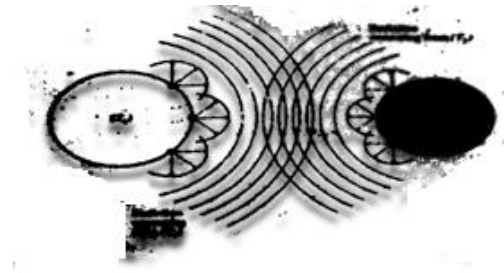
T_1, T_2 = temperatur permukaan ($^\circ\text{K}$)



Gambar. 2.2 proses perpindahan panas

Penjelasan lebih lanjut tentang perpindahan panas radiasi dapat digambarkan dengan dua bodi yang mempunyai temperatur (T_1) dan (T_2) berbentuk sembarang. Dua bodi tersebut mengemisikan aliran-aliran dari *radial thermal* pada seluruh arah. Setiap titik (elemen luas) dari setiap bodi mengemisikan radiasi kesegala arah. Hanya sebuah fraksi dari aliran emisi oleh (T_1) yang diterima dan diserap oleh bodi (T_2) fraksi ini tergantung tidak hanya pada bentuk dan ukuran dari dua bodi tersebut melainkan tergantung pula terhadap posisi relative, yaitu kondisi permukaan bodi (seperti kekerasan, kebersihannya) dan juga tergantung dari sekelilingnya). Dengan demikian masalah perpindahan panas mengurangi pada perhitungan :

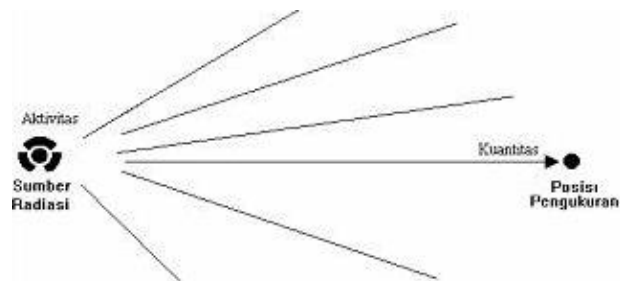
- Laju perpindahan radiasi panas yang meninggalkan permukaan bodi (yaitu radiasi diemisikan oleh permukaan, ditambah bagian radiasi yang direfleksikan)
- Laju perpindahan radiasi panas yang mengenai permukaan (yaitu bagian radiasi yang diserap oleh permukaan).



Gambar 2.3. interaksi radiasi thermal antara dua bodi yang mempunyai temperatur berbeda

2.3.1 Kuantitas Radiasi

kuantitas radiasi adalah persatuan waktu persatuan luas, pada suatu titik pengukuran. Kuantitas radiasi ini berbanding lurus dengan waktu aktifitas sumber dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak (r) antara sumber dan system pengukur.



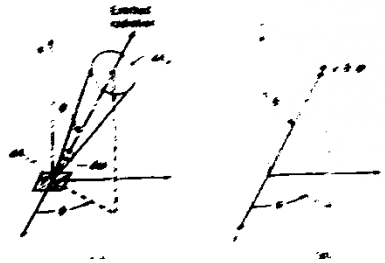
Gambar 2.4 kuantitas radiasi

Gambar di atas menunjukkan bahwa jumlah radiasi yang mencapai titik pengukuran (kuantitas radiasi) merupakan hanya sebagian saja dari semua radiasi yang dipancarkan oleh sumber.

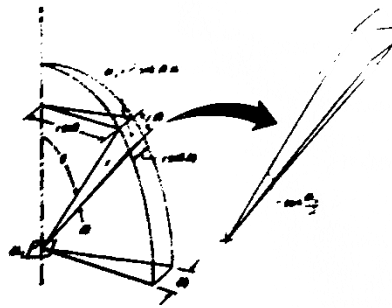
2.3.2 Intensitas Radiasi

Radiasi di emisikan oleh sebuah permukaan ke segala arah, distribusi arah ini menjadi hal yang sangat menarik untuk diketahui. Demikian juga radiasi yang menimpa suatu permukaan mungkin datang dari arah yang

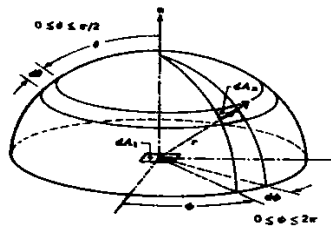
berlawanan dan cara permukaan merespon radiasi ini tergantung pada arahnya. Efek dari arah inilah yang mendasari konsep intensitas radiasi.



Gambar 2.5 arah radiasi neutral



Gambar 2.6 sudut solid yang ditimbulkan oleh dA_1 pada sebuah titik dA_2 dalam sebuah koordinat bola.



Gambar 2.7 Emisi dari elemen luasan kecil dA_2 ke bidang hypothetical hemisphere yang berpusat di dA_1

Dengan demikian bila nilai $I_{2,e}$ diketahui maka dapatlah ditentukan fluk-fluk radiasi yang penting, hubungan itu antara lain :

1. Emission power

Yaitu jumlah emisi radiasi per unit luasan permukaan spectral hemispherical, yang didefinisikan sebagai laju radiasi pada panjang gelombang λ yang diemisikan pada seluruh arah dari suatu permukaan perunit panjang gelombang, karena pendekatan permukaan adalah diffuse emitter maka emisi bergantung terhadap arahnya

$$E = \pi \times I_e \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

E : Emission power

$\pi = 3,14$

I_e = Intensitas Radiasi

2. Irradiasi

Secara garis besar irradiasi adalah lawan dari radiasi. Jika radiasi adalah energi yang diemisikan oleh suatu bodi, maka irradiasi adalah energia akibat radiasi yang emisinya menimpa suatu bodi, irradiasi dapat diformulasikan :

$$G = \pi \times I_1 \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

G = Iradiasi

$\pi = 3,14$

I_1 = Intensitas Radiasi

3. Radiositas

Radiositas adalah fluk radiasi atau seluruh energi radiasi yang meninggalkan permukaan, energi ini termasuk energi irradiasi yang direfleksikan dan emisi dari bodi itu sendiri, diformulasikan sebagai berikut :

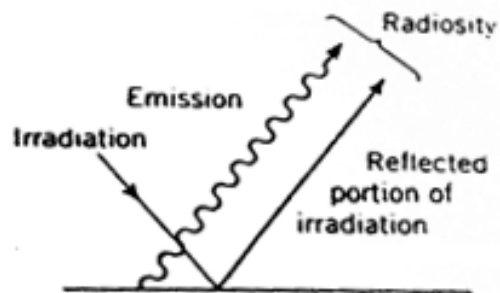
$$G = \pi \times I_{rad} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana :

G = Iradiasi

$\pi = 3,14$

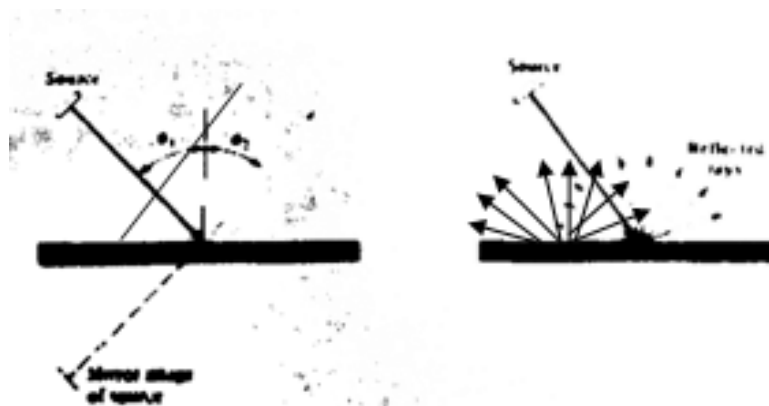
I_{rad} = Intensitas Radiasi



Gambar 2.8 Surface Radiosity

2.3.3 Sifat – Sifat Radisi

Bila energi radiasi menimpa permukaan suatu bahan, maka sebagian dari radiasi itu dipantulkan (*refleksi*), sebagian diserap (*absorpsi*), dan sebagian lagi diteruskan (*transmisi*). Fraksi yang dipantulkan adalah *reflektivitas* ρ , fraksi yang diserap *absorptivitas* α , fraksi yang diteruskan *transmisivitas* τ . Ada dua fenomena refleksi yang dapat diamati bila radiasi menimpa suatu permukaan. Jika sudut jatuhnya sama dengan sudut refleksi, maka dikatakan refleksi itu *spekular* (*specular*). Dilain pihak apabila berkas yang jatuh itu tersebar secara merata ke segala arah sesudah refleksi, maka refleksi itu disebut *diffusi* atau *baur* (*diffuse*), kedua jenis refleksi ini digambarkan dalam gambar berikut :



(a) *spekular*

(b) *refleksi diffusi*

Gambar 2.9 *Spekular & refleksi diffusi*

Andaikan bahwa semua permukaan yang kita persoalkan dalam analisa bersifat diffusi dan mempunyai suhu merata (*uniform*), dan bahwa sifat-sifat refleksi dan emisinya konstan diseluruh permukaan, maka terdapat istilah baru dalam menghitung perpindahan panas radiasi benda-tak-hitam yaitu :

G = iradiasi (*irradiation*)
= total radiasi yang menimpa suatu permukaan per satuan waktu per satuan luas

J = radiositas (*radiosity*)
= total radiasi yang meninggalkan suatu permukaan per satuan waktu per satuan luas

Radiositas didefinisikan pula sebagai energi yang dipancarkan (emisi) dan energi yang dipantulkan (refleksi) apabila tidak ada energi yang diteruskan (transmisi).

$$J = (\epsilon \times E_1) + (\rho \times G) \dots\dots\dots(2.7)$$

$$J = (\epsilon \times E_1) + \{(1 - \epsilon) \times G\} \dots\dots\dots(2.8)$$

Energi netto yang meninggalkan permukaan itu ialah selisih antara radiositas dan irradiasi

$$:\frac{q}{A} = J - G = (\epsilon \times E_1) + \{(1 - \epsilon) \times G\} - G \dots\dots\dots(2.9)$$

$$q = \frac{E_1 - J}{(1 - \epsilon) / \epsilon \times A} \dots\dots\dots(2.10)$$

2.4 METODE ANALISIS

2.4.1 Temperatur rata- rata api

Distribusi temperature api tanpa beban digunakn untuk menentukan kedudukan beban optimal, artinya pada kedudukan optimal tersebut beban menerima temperature rata – rata paling tinggi kedudukan ini penting ditentukan agar dalam penelitian ini mendapatkan hasil yang optimal.

Pendekatan analisa dengan asumsi penampang temperature api jika dipotong pada ketinggian h tertentu adalah berbentuk dinding dinding lingkaran, dimana garis garis melingkar menunjukkan garis – garis isothermal dari api, dengan daerah tempaeratur rata – rata diatara dua garis isothermal. Sehingga luasan temperature api pada masing - masing ketinggian dapat diketahui.

Tempertur rata – rata (T rata – rata) setiap ketinggian dihitung dari jumlah luasan temperature ($A \times T$) total dibagi dengan luasan total (A total yang merupakan penjumlahan n daerah temperature dalam ketinggian tertentu.

$$T_{rata-rata} = \frac{(AxT)_{total}}{A_{total}} \dots\dots\dots(12)$$

Dimana :

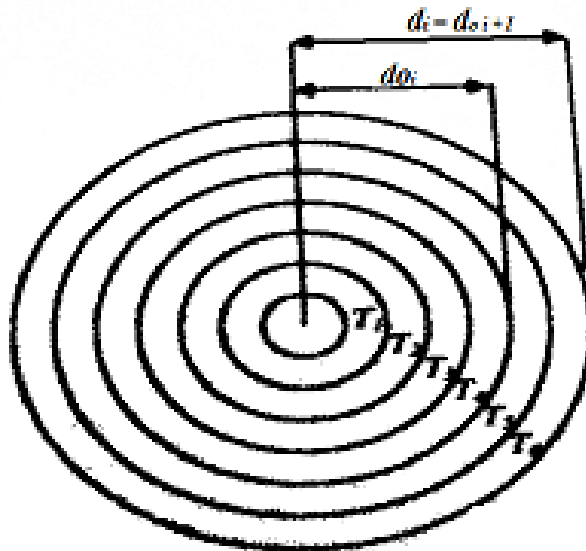
$$A_{total} = \sum_{i=1}^n [\pi \cdot (r_{o_i}^2 - r_{i_i}^2)] \dots\dots\dots(13)$$

$$(AxT)_{total} = \sum_{i=1}^n [\pi \cdot (r_{o_i}^2 - r_{i_i}^2) \times T_i] \dots\dots\dots(14)$$

T_i = Temperatur rata-rata diantara garis isothermal

r = jari-jari garis isothermal

A_{total} = total luas penampang



Gambar 2.10 Skema penampang api