

BAB II

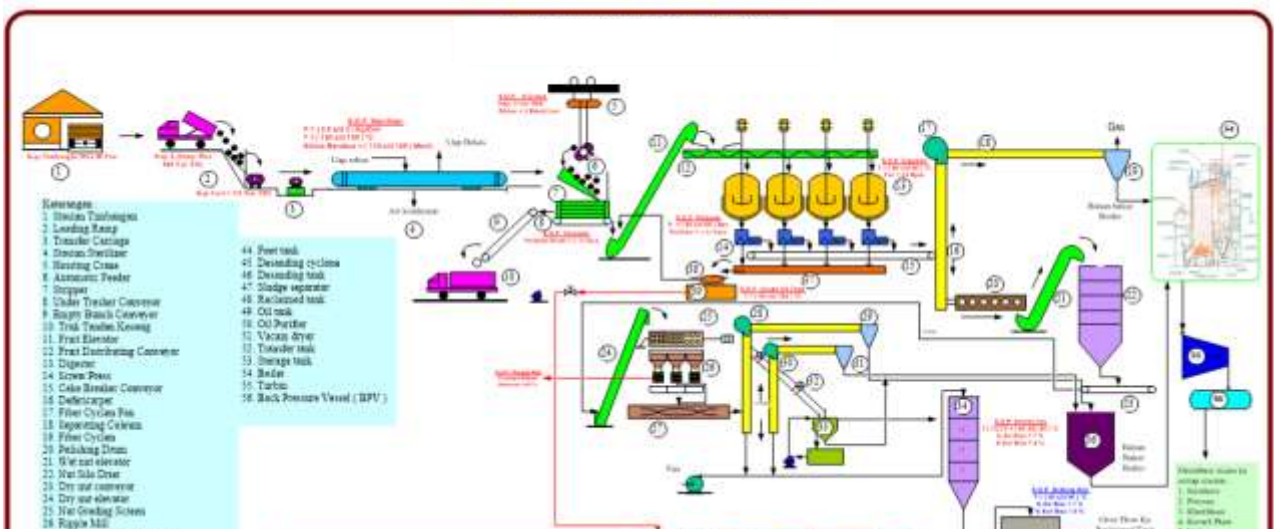
TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian tentang analisis energi dan eksergi pada sistem boiler merupakan studi ilmiah yang berkaitan dengan pemanfaatan sumber daya energi yang efisien. Dalam beberapa dekade terakhir, analisis eksergi telah banyak digunakan sebagai alat yang berguna dalam desain, evaluasi, optimasi dan perbaikan sistem energi.

Eksergi merupakan kerja yang berguna dapat diperoleh dari sistem pada keadaan tertentu dalam kondisi atmosfer tertentu. Dalam beberapa dekade terakhir, analisis eksergi mulai digunakan untuk optimasi sistem. Dengan menganalisis eksergi yang dihancurkan oleh setiap komponen dalam suatu proses, dapat terlihat di mana harus memfokuskan upaya untuk meningkatkan efisiensi sistem. Eksergi juga dapat digunakan untuk membandingkan komponen atau sistem untuk membantu membuat keputusan desain yang tepat.

2.1 ALUR PROSES BAHAN BAKAR BOILER

Alur proses bahan bakar boiler dimulai dari stasiun pressan. Dimana di stasiun pressan menghasilkan ampas fibre & minyak kasar. Ampas fibre dipisahkan lagi di separating coloumn dan fibre cyclone untuk memisahkan fibre & nut. Fibre tersebut kemudian dibawa melalui fibre conveyor dan nut tadi di proses lebih lanjut di stasiun kernellery. Nut yang sudah di proses di stasiun kernellery akan menghasilkan kernel sebagai produk utama dan cangkang yang dapat digunakan sebagai bahan bakar boiler. Cangkang tersebut kemudian dibawa melalui shell conveyor ke boiler sebagai bahan bakar. Kemudian cangkang & fibre bercampur di fuel feeder conveyor lalu



Gambar 2.1 *Flow Process* Bahan Bakar Boiler

Menurut ASME PTC 4-2008 (2008)terdapat beberapa tipe steam generator yang memproduksi uap untuk menggerakkan turbin dan generator antara lain :

1 *Tipe Oil and Gas Fired steam Generator*

Berdasarkan bahan bakarnya tipe ini memproduksi uap dengan bahan bakar minyak dan gas.

2 *Tipe Pulverized Coal Fired Steam Generator*

Tipe ini menggunakan bahan bakar batubara untuk memproduksi uap dimana batubara sebelum masuk boiler di haluskan dengan meggunakan peralatan Pulverizer.

3 *Tipe Circulating Bed Steam Generator*

Tipe ini menggunakan bahan bakar batubara untuk memproduksi uap dan pada boiler terdapat bed material yang terfluidasi untuk membakar batubara.

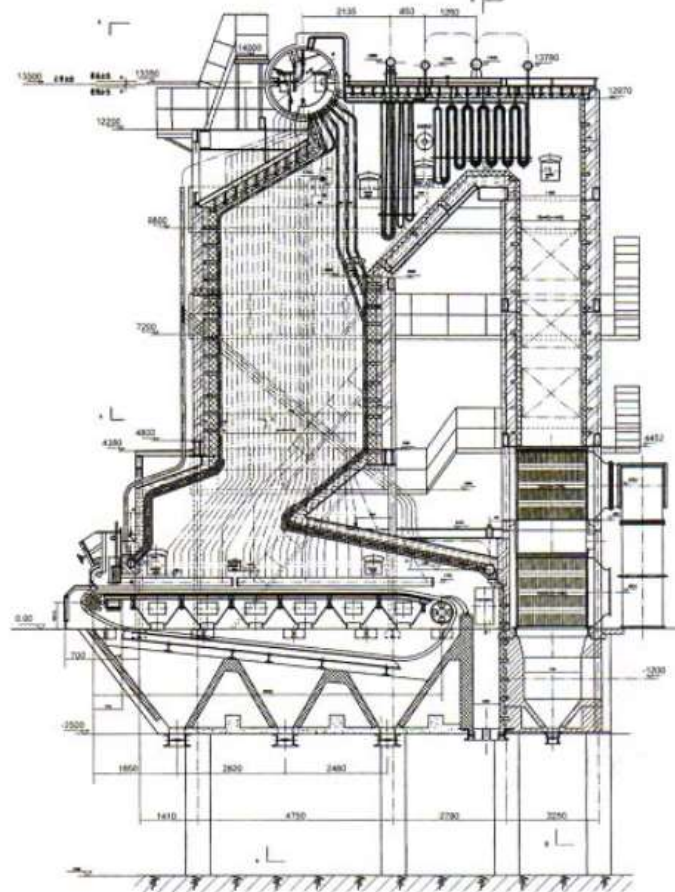
4 *Tipe Stoker coal fired steam generator*

Tipe ini menggunakan bahan bakar batubara untuk memproduksi uap dan menggunakan chain grate sebagai media transport batubara ke dalam boiler.

2.1.1 Boiler Stoker/Chain Grate

Biasanya *boiler stoker* diaplikasikan untuk pembangkit yang memiliki daya <

10 MW. Karakteristik *boiler stoker* seperti terlihat pada gambar 2.3 yaitu bahan bakar dimasukan ke ruang bakar dan diletakan di atas *traveling grate*. Bahan bakar dibakar diatas *traveling grate* yang berjalan dengan sangat lambat dimana abu sisa pembakaran yang berupa *bottom ash* akan jatuh keluar ruang bakar di posisi ujung perjalanan dari *traveling grate*. Udara untuk pembakaran dihembuskan oleh fan dari bawah ruang bakar menembus celah-celah pada *traveling grate* sehingga abu sisa pembakaran yang berbentuk *fly ash* akan terbang menuju ke cerobong untuk dilepaskan keudara bebas



Gambar 2.3 Boiler Stoker/Chain Grate

2.2 SISTEM BOILER

Menurut Winanti.W,S dan T, Prayudi ada dua metode yang biasa digunakan untuk menentukan efisiensi boiler yaitu metode langsung (*input & output heat method*) dan metode tidak langsung (*heat loss method*).

Efisiensi *boiler* dapat dicapai terutama dengan mengurangi kehilangan panas melalui gas buang, serta melakukan isolasi termal yang efektif, serta mengatur aliran blowdown dengan atau tanpa pemanfaatan kembali panas dari blowdown. Secara umum, efisiensi boiler dapat dihitung dengan 2 metode :

1. Metode langsung

$$\text{Efisiensi, \%} = \frac{\text{Panas yang diserap oleh uap}}{\text{Energi total di dalam bahan bakar}}$$

2. Metode tak langsung

$$\text{Efisiensi, \%} = 100\% - (\text{jumlah semua kehilangan, \%})$$

Meskipun merupakan metode yang langsung, metode pertama sangat sulit diterapkan. Untuk menghitung jumlah panas yang diserap oleh uap, dibutuhkan data akurat seperti laju aliran uap, kualitas uap, dan tekanan uap. Peralatan yang dibutuhkan untuk mengukur parameter-parameter tersebut umumnya mahal dan memerlukan perawatan yang baik dan berkelanjutan. Banyak boiler di beberapa pabrik tidak dilengkapi dengan peralatan tersebut.

Metode kedua menghitung efisiensi secara tidak langsung dengan mengidentifikasi dan menghitung seluruh sumber kehilangan panas. Pendekatan yang paling masuk akal untuk meningkatkan efisiensi boiler adalah dengan menelusuri faktor-faktor penyebab kehilangan energi, mengukur besarnya masing-masing kehilangan, lalu memfokuskan upaya pengurangan pada sumber kehilangan yang paling berpengaruh terhadap efisiensi. Secara umum, kehilangan panas terbesar terjadi melalui gas buang, disusul oleh kehilangan akibat radiasi dan konveksi—terutama pada boiler yang sudah tua atau beroperasi dengan laju aliran di bawah kapasitas desain.”

Sebelum memulai suatu perhitungan yang rinci, data-data operasional mengenai *boiler* sebaiknya sudah tersedia dan dipahami dengan baik. Untuk perhitungan lengkap efisiensi suatu *boiler* diperlukan data-data sebagai berikut.

Item

Satuan

Karakteristik bahan bakar

- | | |
|---------------------------------------|---------|
| 1. Nilai kalor bruto (GHV) | kcal/kg |
| 2. Hidrogen di dalam bahan bakar | % berat |
| 3. Kandungan air di dalam bahan bakar | % berat |

Bahan bakar padat

- | | |
|--|--------------|
| 4. Kandungan abu di dalam bahan bakar | % berat |
| 5. Fraksi abu yang terbawa bersama gas buang | fraksi berat |
| 6. Combustible pada abu yang terbawa bersama gas buang | % berat |
| 7. Combustible pada timbunan abu | % berat |
| 8. Temperatur keluar timbunan abu | °C |

Bahan bakar minyak

- | | |
|--|----|
| 9. Temperatur minyak yang telah dipanaskan | °C |
|--|----|

Gas buang

- | | |
|---|-------|
| 10. Temperatur gas | °C |
| 11. Temperatur udara luar | °C |
| 12. Kandungan Oksigen | % vol |
| 13. Kandungan Karbon Monoksida | % vol |
| 14. CO ₂ teoritis maksimum pada gas buang kering | % vol |

Blowdown

- | | |
|--|---------|
| 15. Temperatur <i>blowdown</i> (setelah <i>heat recovery</i>) | °C |
| 16. Jumlah <i>blowdown</i> | % berat |
| 17. Temperatur air umpan | °C |

Lain-lain

- | | |
|--|---------------|
| 18. Panas hilang oleh radiasi dan konveksi | % panas total |
|--|---------------|

Beberapa data harus diperoleh melalui pengamatan langsung dari operasi *boiler* dan pengukuran di lapangan. Selain itu, mungkin juga diperlukan data-data

hasil pengujian di laboratorium, dari pemasok bahan bakar atau mungkin, dalam hal tidak ada data mengenai suatu jenis bahan bakar, data dari literatur mengenai bahan bakar yang mirip jenisnya dapat digunakan.

Komposisi bahan bakar juga mempunyai pengaruh terhadap efisiensi *boiler*. Perbedaan pembakaran pada berbagai jenis bahan bakar disebabkan oleh berbedanya kandungan hidrogen pada masing-masing bahan bakar, sehingga kandungan uap air pada gas hasil pembakaran juga berbeda. Semakin besar ratio antara atom hidrogen terhadap karbon di dalam bahan bakar akan mengakibatkan semakin banyak air yang dihasilkan dalam reaksi pembakaran. Semakin banyak air yang dihasilkan, semakin besar pula energi yang dibutuhkan untuk menguapkannya sehingga panas yang tersedia untuk membangkitkan uap air menjadi berkurang.

Perhitungan-perhitungan yang harus dilakukan untuk menghitung efisiensi boiler dengan metoda tak langsung adalah.

- 1) Menghitung kebutuhan udara teoritis

$$= [(11.43 \times C) + (34.5 \times (H_2 - O_2/8)) + (4.32 \times S)]/100 \quad (2.1)$$

- 2) Menghitung % kelebihan udara yang dipasok [Excess Air/(EA)]

$$= (\%O_2 \times 100)/(21 - \%O_2) \quad (2.2)$$

- 3) Menghitung Massa udara sebenarnya yang dipasok/kg bahan bakar (AAS)

$$= (1 + EA/100) \times \text{Udara Teoritis} \quad (2.3)$$

- 4) Menghitung *Heat Loss*:
 - a. Kehilangan panas yang diakibatkan oleh gas buang yang kering

$$= [m \times c_p \times (T_f - T_a) \times 100/GCV] \quad (2.4)$$

- b. Kehilangan panas karena penguapan kadar air karena adanya H_2 dalam bahan bakar

$$= [9 \times H_2 (584 + 0.45 (T_f - T_a))/GCV] \quad (2.5)$$

- c. Kehilangan panas karena kadar air dalam udara

$$= [AAS \times \text{kelembaban} \times 0.45 \times (T_f - T_a) \times 100]/GCV \quad (2.6)$$

- d. Kehilangan panas karena radiasi

$$Q_{\text{rad}} = [5.67 \cdot e \cdot A \cdot T^4]/GCV \text{ bahan bakar} \quad (2.7)$$

e. Kehilangan panas karena konveksi

$$Q_{\text{konv.}} = a \cdot A \cdot (T_s - T_o) / \text{GCV bahan bakar} \quad (2.8)$$

f. Kehilangan panas karena blowdown

$$= [(m_{\text{BD}} \cdot (h_{\text{BD}} - h_{\text{FW}}))] / [m_{\text{BB}} \cdot h_{\text{BB}}] \quad (2.9)$$

2.3 PENDEKATAN ENERGI

2.3.1 Ketersediaan Termodinamika

Ketersediaan termodinamika adalah dasar konsep eksergi. Hingga sampai sekarang, sebagian besar diabaikan di dalam penjelasan termodinamika. Konsep ini berasal dari Hukum Termodinamika Kedua dan dengan teliti menjelaskan tentang reversibel dan entropi. Dua kesimpulan dari pertimbangan Hukum Termodinamika Kedua adalah:

- 1) Kerja adalah bentuk energi kualitas tertinggi dibandingkan energi panas.
- 2) Bilamana sebuah sistem berinteraksi dengan sekelilingnya, efisiensi termodinamika yang optimal akan tercapai ketika semua proses reversibel.

2.3.2 Neraca Energi

Untuk menyelesaikan perhitungan neraca energi langkah-langkah yang harus dilakukan adalah mengetahui persamaan energi pada suatu sistem. Persamaan energi ini digunakan untuk memperoleh strategi dalam menyelesaikan perhitungan neraca energi. Persamaan yang banyak digunakan untuk menyelesaikan perhitungan neraca energi adalah persamaan yang sering dinyatakan dalam Hukum Termodinamika Pertama yaitu:

$$\dot{Q} - \dot{W}_x = \frac{dE_{\text{CV}}}{dt} + \sum_{\text{aliran masuk}} \dot{m}_e \left[h_e + \frac{(V_m)_e^2}{2} + gZ_e \right] - \sum_{\text{aliran keluar}} \dot{m}_i \left[h_i + \frac{(V_m)_i^2}{2} + gZ_i \right] \quad (2.10)$$

Persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$\dot{Q} - \dot{W}_x = \sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_i \dot{m}_i h_i \quad (2.11)$$

Persamaan energi untuk sistem reaksi juga dinyatakan dalam Hukum Termodinamika Pertama.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_p \dot{N}_i \bar{h}_i(T_p, P) - \sum_R \dot{N}_i \bar{h}_i(T_R, P) \quad (2.12)$$

Keterangan ;

Q : Panas yang ditransfer ke dalam atau keluar dari sistem (J/kJ)

W : Kerja yang dilakukan oleh atau pada sistem (J/kJ)

$\dot{m}$: Laju massa aliran (kg/s)

h : Entalphy spesifik (kJ/kg)

V_m : Kecepatan aliran massa (m/s)

g : Percepatan gravitasi (m/s²)

Z : Ketinggian (meter), menunjukkan energi potensial gravitasi

dE_{cv}/dt : Laju perubahan energi total dalam volume control

N : Jumlah mol zat tertentu dalam sistem

$\bar{h}$: Entalphy molar (kJ/mol)

T : Suhu

P : Tekanan (Pa/kPa)

Dalam perhitungan neraca energi pada *boiler* diperlukan data kapasitas panas yang disesuaikan dengan bentuk fasa dari zat tersebut. Data-data kapasitas panas dapat diperoleh dari beberapa literatur yang berhubungan dengan kapasitas panas. Perhitungan energi pada *boiler* berupa panas sensibel, panas pembakaran, panas reaksi, panas pembentukan, panas konveksi, panas radiasi, daya motor *FD fan* dan daya pompa *feed water*.

Energi yang masuk dan keluar *boiler* berupa panas sensibel, panas reaksi, kerja motor, kerugian panas akibat konveksi, dan kerugian panas akibat radiasi. Maka untuk menghitung panas tersebut dapat ditentukan persamaannya. Persamaan yang digunakan untuk menghitung panas sensibel yaitu:

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (2.13)$$

Untuk menghitung panas reaksi yang terjadi di dalam *boiler* dapat menggunakan panas dissosiasi. Panas pembakaran dapat ditentukan dengan mengetahui nilai pembakaran tinggi (HHV) pada bahan bakar yang digunakan untuk proses pembakaran.

Kerja motor yang digunakan untuk mensuplai udara dan *feed water* ke *boiler* merupakan energi listrik. Panas yang hilang akibat konveksi dan radiasi dapat ditentukan sesuai dengan performan mesin *boiler* yang digunakan.

2.4 PENDEKATAN EKSERGI

Analisis eksergi adalah sebuah metode yang menggunakan prinsip kekekalan massa dan kekekalan energi dengan menggunakan Hukum Kedua Termodinamika di dalam menganalisis, merancang, mengoptimisasi energi dan sistem lainnya. Metode eksergi ini adalah cara untuk meningkatkan efisiensi dalam penggunaan energi, metode eksergi dapat menentukan lokasi, jenis, dan besarnya kerugian dan kehilangan energi yang terjadi.

Analisis eksergi (atau ketersediaan) untuk proses tanpa aliran dan proses aliran. Dalam salah satu kasus, mengenai apa yang terjadi dengan pemberian eksergi ketika terjadi proses yang sebenarnya.

Ketika diuraikan secara rinci dengan suatu proses tanpa aliran, seseorang seharusnya dapat mengidentifikasi penyediaan eksergi, x_{masuk} , pada sebuah proses. Sebagai contoh, jika suatu sistem melakukan kerja dalam sebuah proses, maka besar kerja bersih yang dihasilkan sistem tersebut setara dengan eksergi yang diberikan kepadanya. Begitu pula dalam konteks perhitungan energi listrik, seperti kerja poros atau kerja listrik, energi yang dilakukan pada sistem mencerminkan aliran eksergi ke dalam sistem dan dapat dianggap sebagai eksergi yang masuk ke dalam proses. Selain itu, kita juga dapat mengidentifikasi eksergi produk, x_{produk} , yaitu hasil yang diharapkan dari suatu proses yang dinyatakan dalam bentuk eksergi dan aliran eksergi.

Eksergi produk tidak dapat melebihi eksergi yang masuk untuk suatu proses kecuali kalau komponen eksergi total yang diberikan telah dihilangkan. Pada kenyataannya, dalam proses yang sebenarnya, sebagian eksergi digunakan untuk

proses irreversibel. Eksergi yang dikonsumsi dinotasikan $x_{\text{yang dikonsumsi}}$. Istilah ini seringkali disebut sebagai perusakan eksergi oleh peneliti. Ini juga mungkin untuk mendapatkan eksergi yang dikonsumsi yang tidak digunakan, seperti eksergi yang dihubungkan dengan kenaikan temperatur dari massa udara (untuk disimpan) ketika udara dikompresikan. Pada contoh ini, produk yang diinginkan adalah udara pada tekanan yang lebih tinggi tetapi pada suatu temperatur kamar; eksergi dihubungkan dengan disertai kenaikan temperatur oleh karena itu dapat dianggap sebagai eksergi yang tak terpakai atau tidak digunakan, $x_{\text{yang tidak digunakan}}$. Di dalam aplikasinya, perpindahan panas terjadi disekelilingnya setelah jangka waktu tertentu dan udara yang diterima akhirnya mencapai temperatur lingkungan (ambien). Apapun eksergi yang dihubungkan dengan kenaikan temperatur selama proses tekanan dengan demikian akan dihilangkan. Pada kasus yang biasanya, persamaan ketersediaan tanpa aliran (*NonFlow Availability Equation*, NFAE) dapat ditulis seperti

$$X_{\text{masuk}} = X_{\text{produk}} + x_{\text{yang dikonsumsi}} + x_{\text{yang tidak digunakan}} \quad (2.14)$$

Jelaslah bahwa, ketika semua proses adalah reversibel, $x_{\text{yang dikonsumsi}}$ adalah nol. Jika, pada waktu yang sama, tidak ada eksergi yang tak terpakai, kesimpulannya adalah eksergi produk (yang berguna) sama dengan eksergi masuk ke dalam proses. Dalam semua proses, eksergi produk harus lebih kecil dari eksergi masuk.

2.4.1 Efisiensi Hukum Termodinamika Kedua (η_2)

Efisiensi Hukum Termodinamika Kedua, η_2 untuk sebuah proses dapat didefinisikan sebagai

$$\begin{aligned} \eta_2 &= \frac{\text{eksergi produk}}{\text{eksergi masuk}} \times 100\% \\ &= \frac{X_{\text{produk}}}{X_{\text{masuk}}} \times 100\% \end{aligned} \quad (2.15)$$

Secara jelas, η_2 harus selalu lebih kecil dari 100%; η_2 mencapai nilai 100% hanya ketika semua proses yang dilibatkan adalah reversibel (dan semua eksergi produk berguna). Maka, η_2 memberikan kita dengan suatu perbandingan yang realistis antara apa yang dicapai di dalam situasi yang sebenarnya dan jauh lebih baik mungkin bisa dicapai ketika suatu perubahan sistem dari keadaan yang diberikan ke keadaan lainnya.

2.4.2 Proses Aliran dan Persamaan Ketersediaan Keadaan Aliran (*Steady-Flow Availability Equation, SFAE*)

Ketika berurusan dengan proses aliran, aliran eksergi yang dihubungkan dengan aliran massa seperti halnya dengan aliran pada salah satu energi seperti panas atau kerja yang melewati batas permukaan. Maka, pada setiap aplikasi, seseorang seharusnya bisa mengidentifikasi laju alir eksergi yang masuk, $\dot{x}_{\text{yang masuk}}$, ke dalam proses dan menghasilkan (bermanfaat) laju alir eksergi produksi, $\dot{x}_{\text{produksi}}$. Untuk keadaan proses aliran, penyesuaian Persamaan Ketersediaan Keadaan Aliran (*Steady-Flow Availability Equation, SFAE*) pada dasarnya mempunyai bentuk yang sama dengan persamaan (2.1) untuk proses tanpa aliran.

$$\dot{x}_{\text{yang masuk}} = \dot{x}_{\text{produk}} + \dot{x}_{\text{yang dikonsumsi}} + \dot{x}_{\text{yang tak digunakan}} \quad (2.16)$$

$\dot{x}_{\text{yang dikonsumsi}}$ dan $\dot{x}_{\text{yang tak digunakan}}$ dalam kasus ini, menunjukkan laju alir pemakaian eksergi dan laju alir eksergi produk yang tidak digunakan. Seperti dengan proses tanpa aliran, jauh lebih baik mungkin bisa dicapai untuk semua proses reversibel, yang mana laju alir pemakaian eksergi adalah nol. Jika semua eksergi produk berguna, laju alir pemakaian eksergi sama dengan eksergi yang masuk. Efisiensi Hukum Termodinamika Kedua, η_2 , didefinisikan untuk kasus yang disertai dengan proses aliran seperti

$$\begin{aligned} \eta_2 &= \frac{\text{laju alir eksergi produk}}{\text{laju alir eksergi yang masuk}} \times 100\% \\ &= \frac{\dot{x}_{\text{produk}}}{\dot{x}_{\text{masuk}}} \times 100\% \end{aligned} \quad (2.17)$$

2.4.3 Eksergi dan Kerja

Selama energi mekanik (atau kerja) dialirkan dalam bentuk rotasi yang eksnerginya dapat dihitung, maka energi tersebut merupakan bentuk kerja murni yang secara langsung berubah menjadi aliran eksergi dengan besaran yang setara. Oleh karena itu, aliran kerja (W) memiliki nilai yang sebanding dengan aliran eksergi, atau $x_w = W$ (2.18)

Selama eksergi didefinisikan sebagai kerja bersih atau atau kerja yang berguna, beberapa kerja yang tidak berguna diasosiasikan dengan sebuah perubahan dalam volume sistem yang berlawanan dengan tekanan P_o pada lingkungan referensi (keadaan sekitarnya) yang seharusnya dikurangi dari W untuk mendapatkan nilai aliran eksergi yang benar dan sebanding.

2.4.4 Eksergi Diasosiasikan Dengan Aliran Panas

Pengukuran eksergi untuk nilai aliran panas dapat dihitung dengan mengetahui nilai aliran panas yang telah diketahui sebelumnya. Nilai eksergi pada aliran panas dapat ditentukan sebagai berikut

$$x_Q = \left(1 - \frac{T_o}{T_{\text{permukaan}}} \right) Q \quad (2.19)$$

Keterangan:

x_Q : Eksergi yg diasosiasikan dengan aliran panas (J/kJ)

Q : Panas yang ditransfer (J/kJ)

T_o : Suhu lingkungan (K)

T : Suhu permukaan tempat aliran panas terjadi

2.4.5 Eksergi Untuk Sistem Gas Ideal

Ketika eksergi dari sebuah sistem gas ideal terevaluasi, pendekatan sederhananya adalah dengan menggunakan rumus-rumus yang menjabarkan tentang perubahan-perubahan sifat. Maka nilai eksergi pada sistem gas ideal adalah

$$x_{\text{gas ideal}} = m c_v T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right) + m R T_0 \left(\frac{V}{V_0} - 1 - \ln \frac{V}{V_0} \right) \quad (2.20)$$

atau

$$x_{\text{gas ideal}} = m c_v T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right) + m R T_0 \left(\frac{P_0}{P^*} - 1 - \ln \frac{P_0}{P^*} \right) \quad (2.21)$$

dimana:

$$P^* = \frac{m R T_0}{V} = P \frac{T_0}{T} \quad (2.22)$$

Didasari pada persamaan (2.8), eksergi untuk gas ideal dapat ditentukan

$$x_{\text{gas ideal}} = m c_p T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right) + m R T_0 \left(\frac{P_0}{P} - 1 - \ln \frac{P_0}{P} \right) \quad (2.23)$$

Keterangan :

$x_{\text{gas ideal}}$: Eksergi untuk sistem gas ideal (J/kJ)

m : Massa gas (kg)

c_v : Kapasitas panas spesifik pada volume tetap

T_0 : Suhu referensi atau lingkungan

T : Suhu sistem

R : Konstanta gas ideal

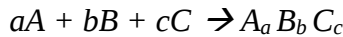
V : Volume gas

V_0 : Volume referensi

2.4.6 Eksergi Referensi

A. Eksergi Referensi Pada Senyawa Kimia

Fungsi eksergi diciptakan untuk menghitung nilai eksergi secara numerik pada sebuah keadaan yang telah ditetapkan nilai eksergi referensinya secara numerik, x^θ . Langkah pertama adalah memeriksa perubahan eksergi yang dihubungkan dengan bentuk senyawa, $A_a B_b C_c$ dari unsur-unsur kimia:



Pada temperatur konstan, T_o , dan tekanan konstan, P_o , perubahan di dalam eksergi referensi dapat dihubungkan dengan reaksi kimia yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\Delta x^\theta &= x^\theta(A_a B_b C_c) - ax^\theta(A) - bx^\theta(B) - cx^\theta(C) \\ &= \Delta H_f^\theta(T_o) - T_o \Delta S_f^\theta(T_o) \\ &= \Delta G_f^\theta(T_o)\end{aligned}\quad (2.24)$$

Dan untuk mengevaluasi keberadaan eksergi referensi, maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$x^\theta(A_a B_b C_c) = \Delta G_f^\theta(T_o) + ax^\theta(A) + bx^\theta(B) + cx^\theta(C) \quad (2.25)$$

Keterangan :

Δx^θ : Perubahan eksergi standar reaksi (kJ/mol)

x^θ : Eksergi molar standar pada kondisi referensi (kJ/mol)

$A_a B_b C_c$: Senyawa produk reaksi

A, B, C : Zat-zat penyusun (reaktan atau produk) reaksi kimia

a, b, c : Koefisien stoikiometri zat dalam reaksi kimia

$\Delta H_f^\theta(T_o)$: Entalpi pembentukan standar pada suhu referensi (kJ/mol)

T_o : Suhu referensi

$\Delta S_f^\theta(T_o)$: Entropi pembentukan standar pada suhu referensi

$\Delta G_f^\theta(T_o)$: Energi bebas Gibbs pembentukan standar pada suhu referensi T_o

B. Eksergi Referensi Pada Unsur-unsur Kimia

Untuk mengevaluasi eksergi referensi pada unsur-unsur kimia, persamaan dalam perhitungan eksergi referensi pada senyawa dapat ditulis kembali dalam bentuk berikut ini:

$$x^\theta(A) = \{x^\theta(A_a B_b C_c) - bx^\theta(B) - cx^\theta(C) - \Delta G_f^\theta(T_o)\} / a \quad (2.26)$$

Karena eksergi referensi pada sebuah senyawa terdapat kerja maksimum walaupun secara kimia disetimbangkan dengan keadaan disekitarnya pada T_o dan P_o , eksergi referensi pada beberapa senyawa seharusnya mempunyai nilai nol, senyawa yang dipertimbangkan untuk mencapai kesetimbangan dengan keadaan disekitarnya. Dengan kata lain, senyawa menunjukkan kondisi kimia pada keadaan disekitar itu.

Jika $A_a B_b C_c$ pada persamaan di atas seperti sebuah senyawa “referensi”, $x^\theta(A_a B_b C_c)$ mendapatkan nilai nol, maka nilai $x^\theta(A)$ dapat dievaluasi dengan menggunakan persamaan berikut:

$$x^\theta(A) = \{-bx^\theta(B) - cx^\theta(C) - \Delta G_f^\circ(T_o)\}/a \quad (2.27)$$

dimana $x^\theta(B)$ dan $x^\theta(C)$ adalah nilai yang sudah diketahui.

Dalam menghitung eksergi referensi pada unsur-unsur kimia diperlukan urutan metode untuk menyelesaikan perhitungan tersebut. Metode yang digunakan adalah sebagai berikut:

- 1) Menentukan urutan unsur-unsur kimia. Agar konsisten dengan nilai eksergi pada bahan bakar sebelum ditentukan. Selanjutnya, bilangan Clark yang digunakan untuk menentukan urutan letak unsur-unsur kimia.
- 2) Untuk menghitung eksergi referensi pada sebuah unsur kimia, A, pilih senyawa referensi diantara senyawa A terdiri dari A dan yang unsur-unsur kimia pada eksergi referensi yang telah diketahui.
- 3) Memakai standar ukuran senyawa referensi akan memberikan nilai maksimum untuk $x^\theta(A)$. Dengan menggunakan standar ukuran ini dapat disimpulkan bahwa senyawa referensi paling stabil untuk data *thermochemical* yang tersedia.
- 4) Menetapkan keadaan lingkungan. Udara mengandung uap air jenuh pada temperatur 298,15 K yang diasumsikan sebagai komposisi udara referensi. Selanjutnya, air dapat digunakan sebagai senyawa referensi pada hidrogen.

Dengan menggunakan persamaan tersebut, eksergi referensi pada unsur kimia dapat dihitung dengan menggunakan hasil perhitungan eksergi referensi pada senyawa.

2.5 REAKSI PEMBAKARAN

Karbon merupakan salah satu unsur yang dapat terbakar paling penting dan menjadi bagian utama dari setiap senyawa hidrokarbon. Oksidasi karbon lebih lambat dan lebih sulit daripada yang berasal baik dari hidrogen maupun sulfur.

2.5.1 Perbandingan Udara-Bahan Bakar Teoritis

Perbandingan udara-bahan bakar teoritis atau stoikiometri menunjukkan kebutuhan udara minimum untuk pembakaran sempurna suatu bahan bakar. Dapat dinyatakan dalam bentuk massa udara per massa bahan bakar, dalam bentuk mol udara per mol bahan bakar ataupun dalam bentuk volume udara per volume bahan bakar. Biasanya semua harga tersebut dapat diperoleh melalui analisis bahan bakar “begitu terbakar” (*as-burned*). Perbandingan udara-bahan bakar kering, gravimetrik, teoritis, dari suatu batubara ditentukan dengan analisis ultimasi begitu terbakar. Prosedur perhitungan yang agak kompleks untuk menentukan perbandingan udara-bahan bakar teoritis ini dapat diringkaskan menjadi sebuah persamaan sederhana, sebagai berikut.

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,m,d} = \frac{2,66C + 7,94H_2 + 0,998S - O_2}{0,232} \quad (2.28)$$

Keterangan :

A/F : Perbandingan udara terhadap bahan bakar (air- fuel ratio)

th : Perbandingan udara terhadap bahan bakar teoritis

m : Menunjukkan bahwa perbandingan ini dinyatakan dalam massa (mass basis)

d : Menunjukkan bahwa perbandingan ini didasarkan pada bahan bakar kering (dry basis)

C : Kandungan karbon dalam bahan bakar

H₂ : Kandungan hydrogen dalam bahan bakar

S : Kandungan belerang dalam bahan bakar

0.232 : Konstanta yang berkaitan dengan massa molekul rata-rata udara dan faktor konversi lainnya dalam perhitungan ini.

2.5.2 Proses Pembakaran Aktual

Ada dua cara untuk menyatakan jumlah udara yang disediakan bagi suatu proses pembakaran tertentu-koefisien pengenceran (*dilution coefficient*) dan presentase kelebihan udara (*excess air*). Koefisien pengenceran didefinisikan sebagai perbandingan antara angka perbandingan aktual dan teoritis udara-bahan bakar.

Koefisien pengenceran:

$$DC = \frac{\text{angka perbandingan A/F aktual}}{\text{angka perbandingan A/F teoritis}} \quad (2.29)$$

Persentase kelebihan udara:

$$= \left\{ \frac{(\text{angka perbandingan A/F aktual}) - (\text{angka perbandingan A/F teoritis})}{(0,01)(\text{angka perbandingan A/F teoritis})} \right\} \quad (2.30a)$$

atau

$$= 100 (\text{koefisien pengenceran} - 1,0) \quad (2.30b)$$

Setelah diketahuinya analisis sisa, analisis gas orsat gas asap, dan analisis ultimasi batubara, perbandingan udara-bahan bakar aktual dapat dihitung. Dari semua unsur dalam bahan bakar dan udara (C, H₂, O₂, N₂, dan S), hanya karbon dan nitrogen yang dapat diperhitungkan secara total dalam analisis sisa dan orsat. Perbandingan persentase nitrogen dengan karbon monoksida ditambah karbondioksida dari analisis orsat adalah perbandingan mol nitrogen dari bahan bakar dan udara dengan mol karbon yang terbakar dalam proses pembakaran. Angka perbandingan udara-bahan bakar ini dapat ditulis sebagai berikut.

Angka perbandingan massa udara kering-bahan bakar aktual:

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{act, m, d}} = \frac{N_a}{0,768} \quad (2.31a)$$

dimana N_f adalah massa nitrogen dari udara per satuan massa batubara.

atau

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{act, m, d}} = \left[\frac{(\%N_2)(28,016)}{(\%CO + \%CO_2)(12,01)} C_b - N_f \right] / 0,768 \quad (2.31b)$$

dimana:

C_b = massa karbon yang sebenarnya terbakar per satuan massa bahan bakar

N_f = fraksi massa nitrogen dalam bahan bakar (dari analisis ultimasi)

2.6 FAKTOR KOREKSI TEMPERATUR

Walaupun temperatur paling baik untuk T_o adalah 298,15 K, temperatur lainnya kadang-kadang sesuai dengan perhitungan. Pertimbangan perubahan temperatur dari T_o menjadi T'_o , merupakan sebuah faktor koreksi temperatur, $\delta_T(A)$, dapat masukkan, yaitu:

$$x^o(A : T'_o) - x^o(A : T_o) = \delta_T(A)(T'_o - T_o) \quad (2.32)$$

dimana $x^o(A : T'_o)$ dan $x^o(A : T_o)$ merupakan eksergi referensi A pada T'_o dan T_o ,

Ketika $A_a X_x Y_y$ adalah senyawa referensi pada A, $\delta_T(A)$ yang dihitung dari:

$$\delta_T(A) = [\Delta S_f^o(A_a B_b C_c) - b\delta_T(B) - c\delta_T(C)] / a \quad (2.33)$$

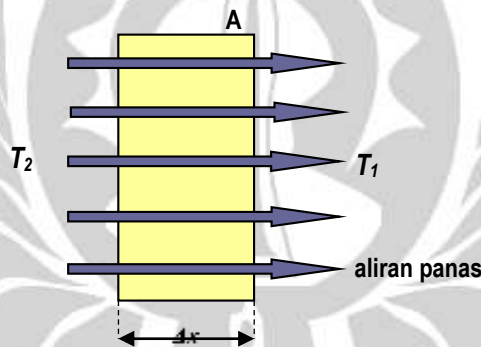
2.7 PERPINDAHAN PANAS

Bila kedua benda atau lebih terjadi kontak panas, maka akan terjadi aliran panas dari benda yang bertemperatur lebih tinggi ke benda yang bertemperatur lebih rendah, hingga tercapainya kesetimbangan termal. Proses perpindahan panas berlangsung dalam tiga mekanisme, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.7.1 Konduksi

Proses perpindahan panas secara konduksi bila dilihat secara atomik merupakan pertukaran energi kinetik antar molekul (atom), dimana partikel yang energinya rendah dapat meningkat dengan menumbuk partikel dengan energi yang lebih tinggi.

Sebelum dipanaskan, atom dan elektron dari logam bergetar pada posisi setimbang. Ketika ujung logam mulai dipanaskan, pada bagian ini atom dan elektron bergetar dengan amplitude yang makin membesar. Selanjutnya bertumbukan dengan atom dan elektron sekitarnya dan memindahkan sebagian energinya. Kejadian ini berlanjut hingga pada atom dan elektron di ujung logam yang satunya. Konduksi terjadi melalui getaran dan gerakan elektron bebas.

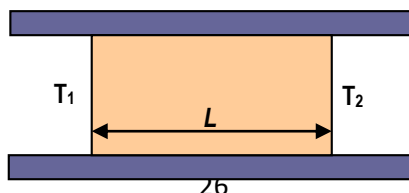


Gambar 2.2. Proses perpindahan panas konduksi

Bila T_2 dan T_1 dipertahankan terus (lihat gambar 2.2), maka kesetimbangan panas tidak akan pernah tercapai, dan dalam keadaan tunak (*steady state*) panas yang mengalir per satuan waktu sebanding dengan luas penampang A , sebanding dengan perbedaan temperatur ΔT dan berbanding terbalik dengan lebar bidang Δx maka diperoleh persamaan berikut.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = q \times A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.34)$$

Untuk penampang berupa bidang datar (lihat gambar 2.3)



Gambar 2.3. Perpindahan panas konduksi pada bidang datar

Maka nilai panas konduksinya adalah

$$Q = \frac{-k A (T_1 - T_2)}{L} \quad (2.35)$$

dimana k adalah konduktivitas panas material.

2.7.2 Konveksi

Apabila panas berpindah dengan cara gerakan partikel yang telah dipanaskan dikatakan sebagai perpindahan panas secara konveksi. Bila perpindahannya dikarenakan perbedaan kerapatan disebut konveksi alamiah (*natural convection*) dan bila didorong, misalkan dengan fan atau pompa disebut konveksi paksa (*forced convection*).

Besarnya konveksi tergantung pada:

- 1) Luas permukaan benda yang bersinggungan dengan fluida (A).
- 2) Perbedaan temperatur antara permukaan benda dengan fluida (ΔT).
- 3) Koefisien konveksi (α) tergantung pada:
 - a. Viskositas fluida
 - b. Kecepatan fluida
 - c. Perbedaan temperatur antara permukaan dan fluida
 - d. Kapasitas panas fluida
 - e. Rapat massa udara
 - f. Bentuk permukaan kontak

Untuk menghitung perpindahan panas konveksi diperlukan beberapa ketentuan-ketentuan sebagai berikut:

- a. Menentukan bilangan Grashof (Gr)

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_o)D^3}{\nu^2} \quad (2.36)$$

dimana: g = percepatan gravitasi (m/s^2)

β = koefisien temperatur, $1/T_f$ (1/K)

T_f = Temperatur film, $\frac{T_s + T_o}{2}$ (K)

D = diameter luar *boiler* (m)

ν = viskositas kinematik (m^2/s)

- b. Menentukan bilangan Prandtl (Pr)

Nilai bilangan Prandtl dapat ditentukan dari tabel properties

- c. Menentukan bilangan Rayleigh (Ra)

Nilai Bilangan Rayleigh adalah hasil kali bilangan Grashof dengan bilangan Prandtl.

- d. Menentukan bilangan Nusselt (Nu)

Perpindahan panas dengan cara konveksi pada *boiler* dapat diartikan sebagai konveksi pada silinder horisontal. Perpindahan panas dari silinder horisontal cukup banyak digunakan dalam industri-industri besar. Untuk menghitung nilai bilangan Nusselt pada *boiler* dapat menggunakan persamaan Dittus-Boelter sebagai berikut.

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad (2.37)$$

Dimana:

D = diameter dalam

Pr = bilangan Prandtl

n = 0,4 untuk pemanasan fluida

n = 0,3 untuk pendinginan fluida

Persamaan Dittus-Boelter ini berlaku untuk:

$$0,7 \leq Pr \leq 160$$

$$Re_D \geq 10.000$$

$$\frac{L}{D} \geq 10$$

- e. Menentukan nilai koefisien perpindahan panas (α)

Nilai koefisien perpindahan panas konveksi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut

$$\alpha = \frac{N_u \cdot k}{D} \quad (2.38)$$

Dimana:

N_u = bilangan Nusselt

k = konduktivitas panas (W/m.K)

D = diameter luar *boiler* (m)

Dengan menggunakan ketentuan-ketentuan di atas, maka panas yang diakibatkan konveksi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Q = \alpha \times A \times (T_s - T_o) \quad (2.39)$$

2.7.3 Radiasi

Pada proses radiasi, energi panas diubah menjadi energi radiasi. Energi ini termuat dalam gelombang elektromagnetik, khususnya daerah infra merah (700 nm-100 μ m). Saat gelombang elektromagnetik tersebut berinteraksi dengan benda, energi radiasi berubah menjadi energi termal.

Untuk benda hitam, radiasi termal yang dipancarkan per satuan waktu per satuan luas pada temperatur Kelvin adalah.

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.40)$$

Dimana:

ϵ = emisivitas ($0 \leq \epsilon \leq 1$)

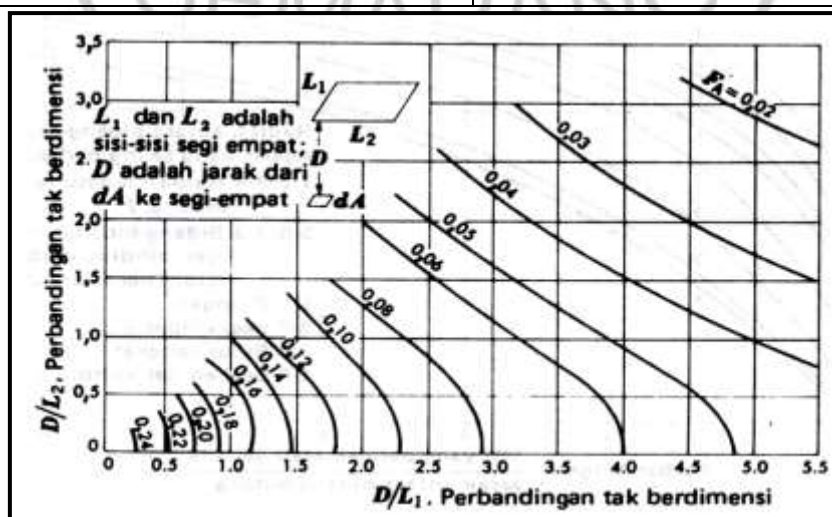
σ = konstanta Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

a. Faktor bentuk radiasi

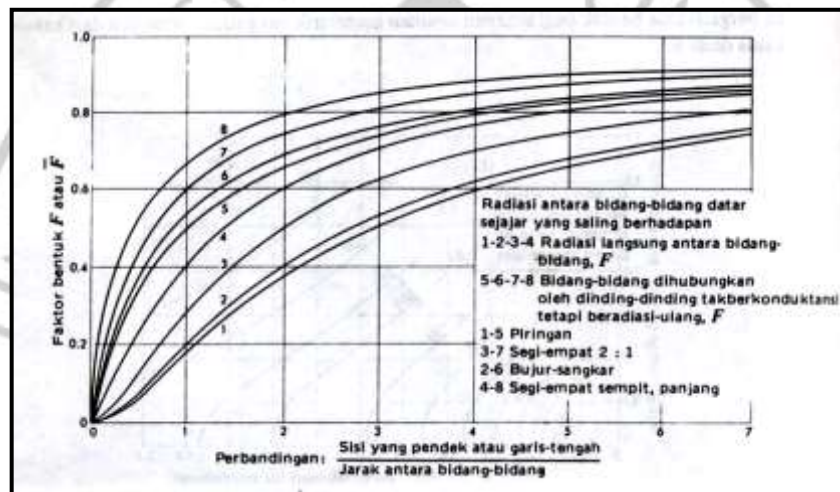
Faktor bentuk radiasi ini digunakan untuk menunjukkan permukaan dari mana radiasi itu berasal, sedangkan indeks kedua menunjukkan permukaan yang menerima radiasi tersebut. Faktor bentuk radiasi ini dapat dilihat pada tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.1. Faktor bentuk radiasi

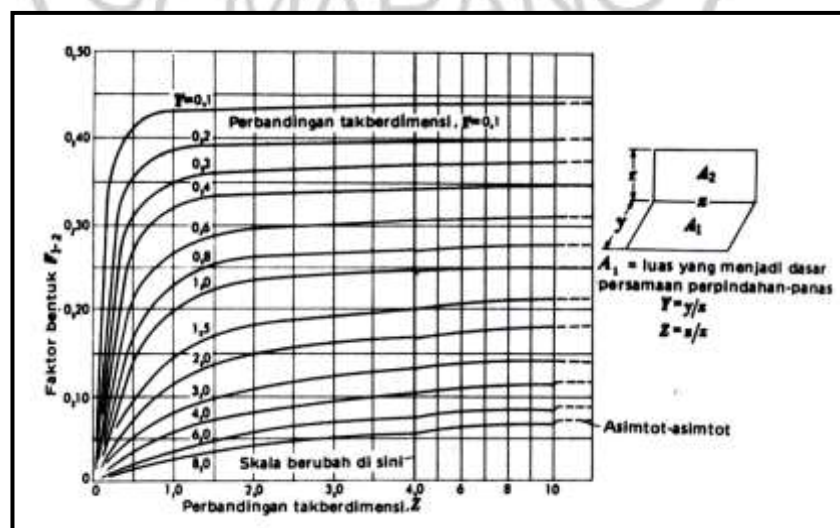
Permukaan radiasi terjadi antara permukaan-permukaan ini	Faktor bentuk, F_{1-2}
1. Bidang-bidang datar tak terhingga	1
2. Benda A, yang sepenuhnya terkurung oleh benda lainnya, A_2 . Benda A_1 tidak dapat melihat bagian dari dirinya sendiri	1
3. Elemen permukaan dA (A_1) dan permukaan segi empat (A_2) yang sejajar serta langsung di atasnya, dengan satu sudut dari segi empat tersebut terletak pada garis tegak lurus pada dA	Lihat gambar 2.4
4. Elemen dA , (A_1) dan piringan berbentuk lingkaran yang sejajar (A_2) dengan pusatnya langsung di atas dA	$a^2 / (a^2 + L^2)$
5. Dua bujur sangkar, segi empat atau piringan yang sama dan sejajar, dengan lebar atau garis tengah D , dan jarak antara L .	Lihat gambar 2.5
6. Dua piringan sejajar dengan garis tengah yang berbeda, dengan jarak antara L , dengan titik-titik lurus pada permukaan-permukaan tersebut, piringan kecil A_1 berjari-jari a , piringan besar berjari-jari b .	$\frac{1}{2a} \left[L^2 + a^2 + b^2 - \sqrt{(L^2 + a^2 + b^2)^2 - 4a^2b^2} \right]$
7. Dua segi empat di bidang-bidang datar yang saling tegak lurus dengan satu sisi sekutu.	Lihat gambar 2.6
8. Radiasi antara sebuah bidang datar tak terhingga A_1 , dan satu atau dua baris pipa sejajar tak terhingga di bidang datar sejajar A_2 jika satu-satunya permukaan lainnya adalah permukaan bahan tahan api di belakang pipa-pipa.	Lihat gambar 2.7



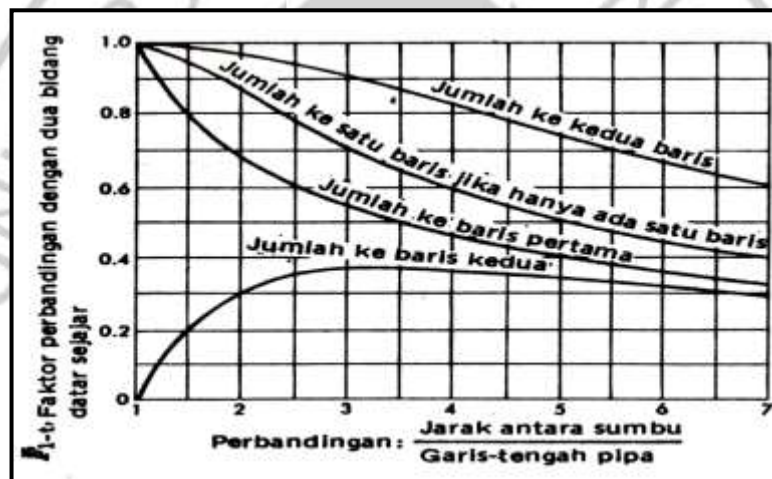
Gambar 2.4. Faktor bentuk untuk sebuah elemen dan sebuah permukaan segi empat yang sejajar. (Dengan ijin dari H. C. Hottel, "Radiant Heat Transmission", Mechanical Engineering, Tahun ke 52, 1930).



Gambar 2.5. Faktor bentuk untuk dua bujur sangkar, dua segi empat (empat persegi panjang), dan sejajar. Kurva yang bernomor 5, 6, 7, dan 6 berlaku pula untuk suhu dinding samping yang berubah secara kontinyu dari atas ke bawah. (Dengan ijin dari H. C. Hottel, "Radiant Heat Transmission", Mechanical Engineering, Tahun ke 52, 1930).



Gambar 2.6. Faktor bentuk untuk segi empat-segi empat yang berbatasan pada bidang-bidang datar yang saling tegak lurus. (Dengan ijin dari H. C. Hottel, “Radiant Heat Transmission”, Mechanical Engineering, Tahun ke 52, 1930).



Gambar 2.7. Faktor bentuk untuk sebuah bidang datar dan satu atau dua baris pipa-pipa di atasnya dan sejajar dengannya. (Dengan ijin dari H. C. Hottel, “Radiant Heat Transmission”, Mechanical Engineering, Tahun ke 52, 1930).

b. Emisivitas permukaan

Radiasi dari benda hitam (*black body*) berbeda dengan radiasi dari permukaan benda abu-abu. Suatu permukaan benda abu-abu selalu beradiasi lebih sedikit dari pada benda hitam dengan temperatur yang sama. Emisivitas permukaan abu-abu tergantung dari material benda tersebut. Material pada *boiler* termasuk ke dalam pelat baja kuat dengan lapisan oksida kasar dengan nilai emisivitas, $\epsilon = 0,8$.

Dengan ditentukannya nilai emisivitas dan faktor bentuk radiasi pada *boiler*, maka panas yang hilang akibat radiasi dapat diketahui.

Radiasi untuk benda hitam (*black body*):

$$E_b = \dot{Q}_r / A = \sigma \times T^4 \times F \quad (2.41)$$

Dimana: σ = konstanta Stefan Boltzman

$$= 5,67 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$$= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Radiasi untuk permukaan abu-abu:

$$E_b = \dot{Q}_r / A = \epsilon \sigma T^4 F \quad (2.42)$$

Maka panas yang hilang secara radiasi adalah:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_r &= \epsilon \cdot E_b \cdot A \cdot F \\ &= \epsilon \cdot \sigma T^4 \cdot A \cdot F \end{aligned} \quad (2.43)$$

Karena nilai faktor bentuk radiasi pada *boiler* bernilai satu, maka panas yang hilang secara radiasi adalah:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_r &= \epsilon \cdot E_b \cdot A \\ &= \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A \end{aligned}$$

Persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$\dot{Q}_r = 5,67 \times \epsilon \times A \left[(T_s/100)^4 - (T_o/100)^4 \right] \quad (2.44)$$

