

BAB V
NERACA PANAS

Hukum konservasi energi (hk I termodinamika):

[Energi masuk] – [energi keluar] + [energi yang terbangkitkan sistem] – [energi yang terkonsumsi sistem] = [energi terakumulasi dalam sistem]

- ⇒ Reaksi kimia yang bersifat **eksotermis** (menghasilkan panas), maka energi yang dihasilkan disebut sebagai energi yang terbangkitkan sistem.
- ⇒ Reaksi kimia yang bersifat **endotermis** (membutuhkan panas), maka energi yang dihasilkan disebut sebagai energi yang terkonsumsi oleh sistem.



- ⇒ Untuk sistem dengan proses steady state, maka energi yang terakumulasi = 0.

Langkah-langkah penyusunan neraca panas mirip dengan neraca massa.

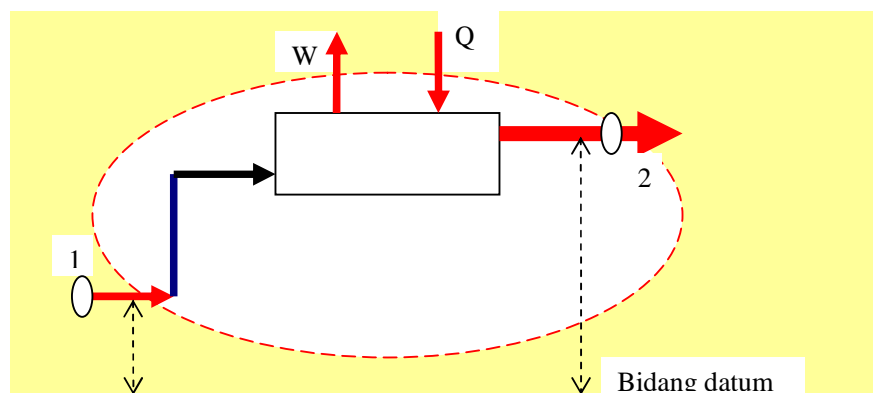
Bentuk-bentuk energi : (lihat kembali materi kuliah Termodinamika)

1. Energi potensial (EP) : akibat posisi objek relatif terhadap bidang datum (bidang referensi).
2. Energi Kinetik (EK) : akibat gerakan objek.
3. Internal Energi (U) : akibat gerakan molekuler di dalam bahan.
4. Work / Kerja (W) :
 - a. Shaft work : kerja turbin. Contoh : turbin air, pompa, kompresor.
 - b. Kerja yang hilang karena gesekan / friksi. Contoh : friksi di permukaan pipa.
5. Heat/ panas (Q).
6. Energi listrik.

Neraca panas / energi / tenaga :

- a. **NP total pada sistem alir (flow system)** pada keadaan steady state

:



Ditinjau NP di sistem sekitar titik 1 ke titik 2 :

$$\text{Input} = \text{output}$$

$$EP_1 + EK_1 + U_1 + P_1V_1 + Q = EP_2 + EK_2 + U_2 + P_2V_2 + W$$

$$\Delta EP + \Delta EK + \Delta U + \Delta PV = Q - W$$

$$g\Delta Z + \frac{\Delta V^2}{2g} + \Delta U + \Delta PV = Q - W$$

Persamaan di atas sering dipakai untuk kasus **transportasi fluida**, yaitu persamaan Bernoulli.

b. **Neraca Energi untuk proses kimia (non flow system)**.

Sistem non alir dianggap terjadi di dalam alat-alat proses, misal alat penukar panas (HE =heat exchanger), reaktor, dan alat-alat transfer massa lainnya.

Pada sistem ini, biasanya EP dan EK \lll Q dan W, sehingga EP dan EK dapat diabaikan dan NP menjadi :

$$\Delta U + \Delta PV = Q - W$$

$$\Delta H = \Delta U + \Delta PV = Q - W$$

$$\Delta H = Q - W$$

$$H_2 - H_1 = Q - W$$

Untuk beberapa proses, biasanya nilai W sangat kecil. Sehingga :

$$H_2 - H_1 = Q = \Delta H$$

Dengan, H1 = entalpi arus masuk (titik satu),

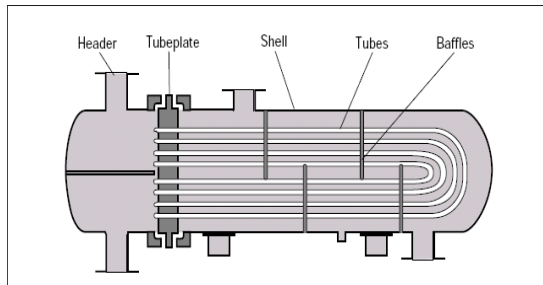
H2 = entalpi arus keluar (titik dua).

Macam-macam perubahan entalpi (panas):

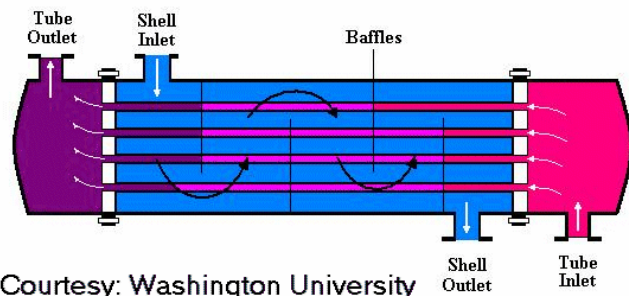
1. **sensible** (panas yang bisa dirasakan perubahan suhunya).
 Kapasitas panas (c_p) = banyaknya panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu setiap satuan massa setiap satuan suhu.
 Untuk padatan dan gas, C_p merupakan fungsi suhu.
 Beberapa sumber data-data C_p :
 - a. $C_p = f(T)$; appendix D, Coulson and Richardson, "Chemical Engineering".
 Table E.1. Himmelblau.
 - b. C_p dalam bentuk grafik; Geankoplis; Perry.
 - c. C_p untuk foods and biological material; appendix A.4, Geankoplis, "Transport Processes and Unit Operation".
2. **laten** (panas perubahan fase dengan suhu tetap).
 - a. Panas peleburan (dari fase padat menjadi cair).
 - b. Panas sublimasi (dari fase padat menjadi gas).
 - c. Panas kondensasi (dari fase gas menjadi cair).
 - d. Panas penguapan (dari fase cair menjadi gas).
3. **reaksi** (panas yang dihasilkan atau dibutuhkan pada proses yang melibatkan reaksi kimia).
 Macam-macam entalpi reaksi :
 - a. Heat of reaction.
 - b. Heat of formation.
 - c. Heat of combustion.

Pada kuliah Neraca Massa dan Energi akan banyak mempelajari neraca panas proses kimia, sedangkan neraca panas proses fisis banyak dipelajari di mata kuliah Perpindahan Panas.

skema HE shell and tube:



HE 1-2 (1 pass in shell, 2 passes in tube)

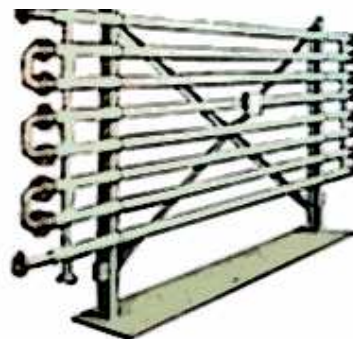
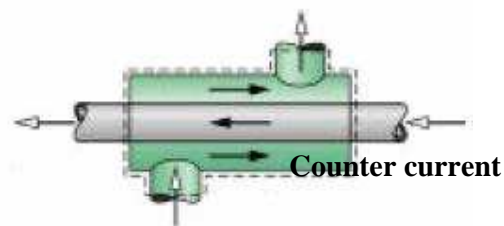
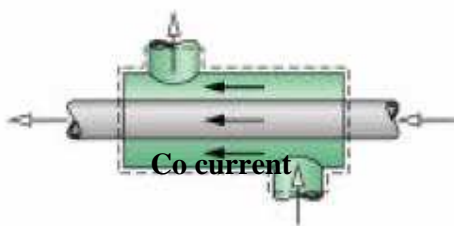


Courtesy: Washington University

HE 1-1 (1 pass in shell, 1 pass in tube)



Skema double pipe HE:



PANAS REAKSI

Panas reaksi pada kondisi standar.

ΔH°_R = panas yang dihasilkan atau dibutuhkan jika reaksi dijalankan pada kondisi standar.

ΔH°_R = satuan panas setiap satuan mol reaktan yang bereaksi.

ΔH°_R bernilai negatif menunjukkan reaksi menghasilkan panas.

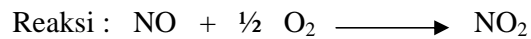
ΔH°_R bernilai positif menunjukkan reaksi membutuhkan panas.

Kondisi standar : komponen murni; P = 1 atm; suhu 25 °C.

Sumber data ΔH°_R :

1. Data ΔH°_R yang tersedia di tabel.

Contoh :



Dari tabel diperoleh $\Delta H^{\circ}_R = -56,68 \text{ KJ}$

Panas reaksi di atas dibaca sebagai berikut :

Reaksi di atas menghasilkan panas sebesar

$$\begin{aligned} &= \frac{56,68 \text{ KJ}}{\text{mol NO yang bereaksi}} \\ &= \frac{56,68 \text{ KJ}}{1/2 \text{ mol O}_2 \text{ yang bereaksi}} \\ &= \frac{56,68 \text{ KJ}}{\text{mol NO}_2 \text{ yang dihasilkan dari reaksi}} \end{aligned}$$

Soal : Berapakah panas yang dihasilkan untuk membakar 10 gram NO?

Berapakah panas yang dihasilkan untuk membakar 150 gram NO?

2. Nilai ΔH°_R dievaluasi dari nilai ΔH°_f (panas pembentukan) atau panas pembakaran (ΔH°_C).

Nilai ΔH°_f elemen bebas adalah nol.

Sumber data ΔH°_f :

Table 29; Hougen Watson, 1954.

Appendix F; Himmelblau.

Appendix A.3.; Geankoplis.

Appendix B; Felder & Rousseau.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_enthalpy_change_of_formation_\(data_table\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_enthalpy_change_of_formation_(data_table)).

Hubungan ΔH°_R dengan ΔH°_f :

$$\Delta H^{\circ}_R = \sum (n_i \cdot \Delta H^{\circ}_f)_{\text{produk}} - \sum (n_j \cdot \Delta H^{\circ}_f)_{\text{reaktan}}$$

Dengan:

i = komponen produk persamaan reaksi,

j = komponen reaktan dari persamaan reaksi

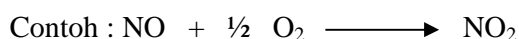
Hubungan ΔH°_R dengan ΔH°_C :

$$\Delta H^{\circ}_R = - [\sum (n_i \cdot \Delta H^{\circ}_C)_{\text{produk}} - \sum (n_j \cdot \Delta H^{\circ}_C)_{\text{reaktan}}]$$

Dengan:

i = komponen produk persamaan reaksi,

j = komponen reaktan dari persamaan reaksi



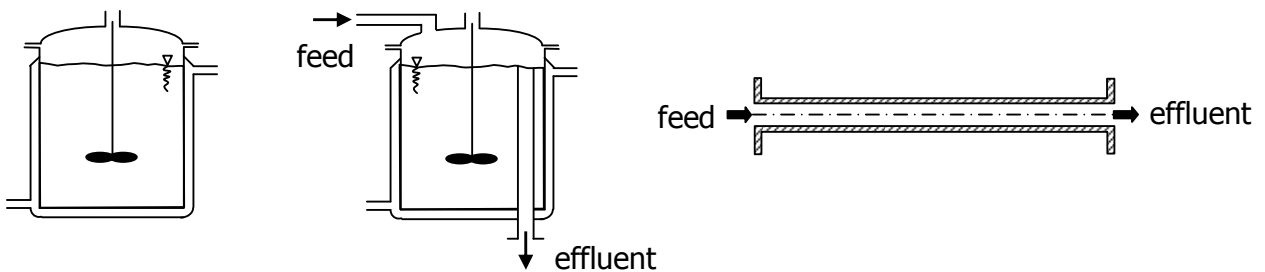
SOAL:

Hitung panas reaksi pada kondisi standar dari reaksi sbb.:

1. $\text{CH}_4(\text{g}) + 2 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$
2. $\text{CH}_4(\text{g}) + 2 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g})$
3. $\text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
4. $4 \text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{Cl}_2(\text{g})$
5. $4\text{FeS}_2(\text{s}) + 11 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + 8 \text{SO}_2(\text{g})$
6. $\text{C}_3\text{H}_8(\text{l}) + 2 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$

NERACA PANAS DI SEKITAR REAKTOR

Skema reaktor (tempat terjadinya reaksi):



Batch reactor
Reaktor Tangki
Berpengaduk (RTB)

Continuous flow Stirred
Tank Reactor (CSTR)
Reaktor Alir Tangki Berpengaduk
(RATB)

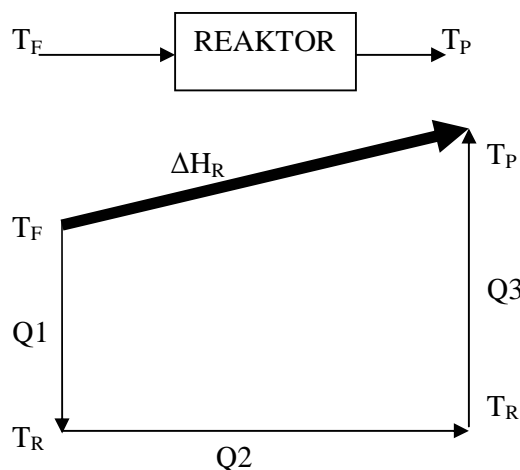
Plug Flow reactor (PFR)
Reaktor Alir Pipa (RAP)

Jika reaksi tidak dijalankan pada kondisi standar.

Jika di reaktor reaksi tidak dijalankan pada kondisi standar, maka dipikirkan:

1. suhu umpan (T_F) diturunkan atau dinaikkan sampai suhu standar, kemudian
2. direaksikan pada kondisi standar (T_R), lalu
3. suhu produk dinaikkan suhunya sampai suhu keluar reaktor (T_P).
4. Selanjutnya panas reaksi dihitung.

Perhitungan panas reaksi digambarkan sbb.:



Panas reaksi kondisi di atas =

$$\Delta H_R = Q1 + Q2 + Q3 \quad (1)$$

Dengan,

$Q1 = \text{entalpi umpan}$

$$= \sum_{i=1}^N \left(n_i \int_{T_F}^{T_R} c_{p,i} \cdot dT \right) \quad (2)$$

i = komponen-komponen dalam reaktan.

N = jumlah komponen reaktan

n_i = mol atau berat reaktan i (tergantung satuan cp-nya).

$Q2 = \text{panas reaksi pada kondisi standar.}$

$$= \Delta H_R^\circ \times (\text{jumlah mol reaktan yang bereaksi}) \quad (3)$$

$Q3 = \text{entalpi produk}$

$$= \sum_{i=1}^N \left(m_i \int_{T_R}^{T_P} c_{p,i} \cdot dT \right) \quad (4)$$

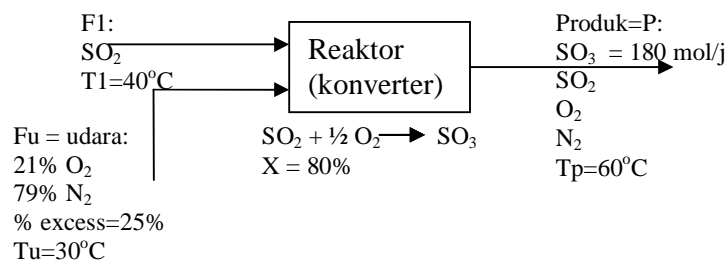
Tampak bahwa untuk menyelesaikan neraca panas pada proses kimia perlu diselesaikan terlebih dahulu neraca massanya.

Contoh :

Suatu konverter digunakan untuk mengoksidasi SO_2 menjadi SO_3 . Oksigen disuplai dari udara. Dianggap berisi 21% mol O_2 dan 79% mol N_2 . Jika digunakan udara berlebihan 25% dan diinginkan SO_3 yang terbentuk adalah 180 mol/jam. Tentukan kebutuhan SO_2 dan udara umpan jika konversi hanya 80%. Jika suhu SO_2 umpan adalah 40°C , suhu udara umpan 30°C dan suhu gas keluar konverter adalah 60°C , berapa panas yang dihasilkan konverter itu.

Penyelesaian:

- a. **Skema:** Prediksikan komponen dalam gas hasil berdasarkan data komponen umpan, konversi dan excess. Kondisi steady state.



Dicari : Panas yang dihasilkan konverter?

- b. **Neraca massa di sekitar reaktor:** untuk menentukan mol/j setiap komponen di setiap arus.

Basis perhitungan : SO_3 dalam $P = 180 \text{ mol/j}$.

1. NM SO_3 :

Input + reaksi = output

$$0 + \text{reaksi} = 180$$

Jadi SO_3 yang dihasilkan dari reaksi = 180 mol/j

Berdasarkan persamaan reaksi, maka:

SO_2 yang bereaksi = 180 mol/j .

O_2 yang bereaksi = 90 mol/j .

2. NM SO₂ :

$$\text{Input} - \text{reaksi} = \text{output}$$

$$F1 - 180 = \text{output}$$

Dari data konversi, maka:

$$x = 80\% = \frac{\text{SO}_2 \text{ yang bereaksi}}{\text{SO}_2 \text{ umpan}} = \frac{180}{F1}$$

maka,

$$F1 = 225 \text{ mol/j}$$

Berdasarkan NM SO₂, maka SO₂ dalam P = 225 - 180 = 45 mol/j.

3. NM O₂:

$$\text{Input} - \text{reaksi} = \text{output}$$

$$0,21 \cdot Fu - 90 = \text{output}$$

Dari data % excess = 25%, maka:

$$25\% = \frac{\text{O}_2 \text{ umpan} - \text{O}_2 \text{ yg dibutuhkan jika SO}_2 \text{ habis bereaksi}}{\text{O}_2 \text{ yg dibutuhkan jika SO}_2 \text{ habis bereaksi}}$$

Dari perhitungan sebelumnya, SO₂ umpan = 225 mol/j

$$25\% = \frac{0,21Fu - (0,5 \cdot 225)}{(0,5 \cdot 225)}$$

$$Fu = 669,643 \text{ mol/j}$$

Berdasarkan NM O₂, maka O₂ dalam P = 0,21 · 669,643 - 90 = 50,625 mol/j.

4. NM N₂:

$$\text{Input} = \text{output}$$

$$0,79 Fu = \text{output}$$

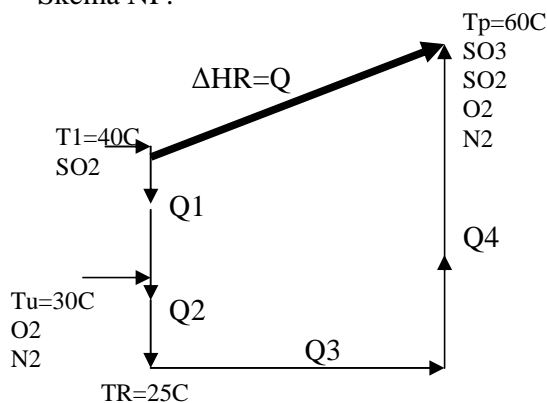
maka N₂ dalam P = 529,018 mol/j.

Rekapitulasi NM di sekitar reaktor:

Komponen	Umpan, mol/j	Reaksi, mol/j	Output, mol/j
SO ₃	0	180	180
SO ₂	225	180	45
O ₂	140,625	90	50,625
N ₂	529,018	0	529,018

c. **Neraca Panas**, menentukan panas yang dihasilkan reaktor (Q).

Skema NP:



NP:

$$Q = Q1 + Q2 + Q3 + Q4$$

Data pendukung yang dibutuhkan:

a. kapasitas panas:

$$Cp = a + bT + cT^2 + dT^3; \text{ Joule}/(\text{mol} \cdot \text{K}).$$

b. Panas reaksi pada kondisi standar:

$$\Delta H^{\circ}_R; \text{ KJ/mol.}$$

Komponen	a	b	c	d	ΔH_f° ; KJ/mol
O2	28,106	-3,68E-06	1,75E-05	-1,07E-08	0,00
N2	31,15	-1,35E-02	2,68E-05	-1,17E-08	0,00
SO2	23,852	6,70E-02	-4,96E-05	1,33E-08	-297,05
SO3	16,37	1,46E-01	-1,12E-04	3,24E-08	-395,53

Sumber: appendix Coulson & Richardson Vol.6.

Maka,

$$\Delta H_R^\circ = (-395,53 - (-297,05 + 0)) = -98,48 \text{ Kjoule.mol}$$

Hal ini menunjukkan reaksinya eksotermis.

$$Q1 = n_{\text{SO}_2 \text{ umpan}} \cdot \int_{40+273}^{298} c_{p_{\text{SO}_2}} \cdot dT$$

$$= 225 \left[23,853(298 - 313) + \frac{6,70 \cdot 10^{-2}}{2} (298^2 - 313^2) + \frac{-4,96 \cdot 10^{-5}}{3} (298^3 - 313^3) + \frac{1,33 \cdot 10^{-8}}{4} (298^4 - 313^4) \right]$$

$$= \dots \text{Joule/j} \quad (\text{dilanjutkan sendiri})$$

$$Q2 = [n_{\text{O}_2 \text{ umpan}} \cdot \int_{30+273}^{298} c_{p_{\text{O}_2}} \cdot dT] + [n_{\text{N}_2 \text{ umpan}} \cdot \int_{30+273}^{298} c_{p_{\text{N}_2}} \cdot dT]$$

$$= \int_{303}^{298} 140,625 (28,106 - 3,68 \cdot 10^{-6} T + 1,75 \cdot 10^{-5} T^2 - 1,07 \cdot 10^{-8} T^3) dT +$$

$$\int_{303}^{298} 529,018 (31,15 - 1,35 \cdot 10^{-2} T + 2,68 \cdot 10^{-5} T^2 - 1,17 \cdot 10^{-8} T^3) dT$$

$$= \int_{303}^{298} 20431,317 - 7,14226T + 1663,86 \cdot 10^{-5} T^2 - 769,42 \cdot 10^{-8} T^3 dT$$

$$= \dots \text{Joule/j}$$

$$Q3 = \nabla H_R^\circ (\text{mol SO}_2 \text{ yang bereaksi}) = -98,48 \cdot 180 = -17726,40 \text{ KJoule/j}$$

$$Q4 = [n_{\text{O}_2 \text{ Produk}} \cdot \int_{298}^{60+273} c_{p_{\text{O}_2}} \cdot dT] +$$

$$[n_{\text{N}_2 \text{ Produk}} \cdot \int_{298}^{333} c_{p_{\text{N}_2}} \cdot dT] +$$

$$[n_{\text{SO}_2 \text{ produk}} \cdot \int_{298}^{333} c_{p_{\text{SO}_2}} \cdot dT] +$$

$$[n_{\text{SO}_3 \text{ produk}} \cdot \int_{298}^{333} c_{p_{\text{SO}_3}} \cdot dT]$$

$$= \int_{298}^{333} [A + BT + CT^2 + DT^3] \cdot dT$$

$$Q4 = \dots$$

maka, Q =

Jika suhu produk dipertahankan 60°C, maka harus ada panas yang dihilangkan sebesar Q KJ/j melalui pendinginan reaktor.

Wajib diselesaikan sendiri. Perhatikan satuannya.

SOAL LATIHAN DENGAN REAKSI KIMIA

- Gas metan dibakar dengan oksigen. Seratus lima puluh kgmol/jam umpan terdiri atas 20% metan, 60% O₂ dan 20% CO₂ diumpankan ke reaktor. Konversi limiting reactant = 90%. Jika suhu gas umpan 50°C dan suhu gas keluar dari ruang pembakaran 190°C, tentukan panas yang dibutuhkan/dihasilkan dari ruang pembakaran itu.
- Gas metan dibakar dengan oksigen. Seratus lima puluh kgmol/jam umpan terdiri atas 20% metan, 60% O₂ dan 20% CO₂ diumpankan ke furnace. Hasil analisis gas hasil furnace menunjukkan gas hasil berisi gas metan 1,5 kgmol/jam. Jika suhu gas umpan 27°C dan suhu gas keluar dari ruang pembakaran 327°C, tentukan panas yang dibutuhkan/dihasilkan dari ruang pembakaran itu.
- Reaktor digunakan untuk mengoksidasi SO₂ menjadi SO₃. Umpan terdiri atas 12% SO₂, 8% O₂, dan 80% N₂ dengan suhu umpan 427°C. Jika konversi SO₂ adalah 50%, dan gas hasil keluar reaktor pada suhu 527°C serta 100 mol/jam gas diumpankan. Tentukan :
 - komposisi gas hasil reaktor.
 - Panas reaksi yang dihasilkan/dibutuhkan reaktor itu.
- Reaksi amonia dijalankan pada reaktor fase gas, reaksi :

$$4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 \longrightarrow 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$$
 Oksigen disuplai dari udara yang diumpankan ke reaktor dengan 25% berlebihan. Jika diumpankan 100 gmol/jam NH₃ dengan suhu 30°C dan udara pada suhu 40°C. Gas hasil keluar reaktor pada suhu 50°C.
 - Berapa udara umpan?
 - Jika konversi hanya 80%, tentukan komposisi gas hasil!
 - Tentukan panas reaksi reaktor itu!
 - Eksotermis atau endotermiskah reaktor itu?
- Suatu ketel digunakan untuk membuat uap air. Panas yang digunakan adalah panas pembakaran gas metan. Gas metan bertekanan 1 atm, suhu 473°C dan berkecepatan 38.786 L/j diumpankan ke furnace, sedangkan suhu udara yang diumpankan 373°C. Agar terjadi pembakaran sempurna, udara yang diumpankan 50% berlebihan. Gas hasil pembakaran keluar furnace pada suhu 1473°K. Tentukan :
 - Kecepatan arus udara umpan.
 - Kecepatan dan komposisi gas hasil furnace.
 - Panas yang dihasilkan.

REAKSI ADIABATIS

Reaksi adiabatik adalah reaksi yang dijalankan dalam suatu tempat dimana tidak ada panas yang tambahan atau dihilangkan.

Reaksi adiabatik dijalankan dalam reaktor tanpa pemanas maupun pendingin, sehingga:

- Jika reaksi bersifat endotermis (membutuhkan panas) maka reaksi akan menurunkan suhu produk reaktor.
- Jika reaksi bersifat eksotermis (menghasilkan panas) maka reaksi akan menaikkan suhu produk reaktor.

Neraca Panas reaksi adiabatik:

$$\Delta H_R = 0$$

$$\Delta H_R = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Soal:

Gas metan dibakar dengan oksigen dalam suatu reaktor tanpa pendingin. Seratus lima puluh kgmol/jam umpan terdiri atas 20% metan, 60% O₂ dan 20% CO₂ diumpankan ke reaktor. Konversi limiting reactant = 90%. Jika suhu gas umpan 50°C, tentukan suhu keluar reaktor.