

Heat Effect

Pendahuluan

- **Neraca panas:** ilmu yang mempelajari kesetimbangan energi pada suatu sistem
- Neraca energi dibuat berdasarkan pada hukum pertama thermodinamika
- Hukum pertama ini menyatakan kekekalan energi, yaitu energi tidak dapat dimusnahkan atau dibuat, hanya dapat diubah bentuknya

Manfaat:

- Menghitung kebutuhan pemanas
- Menghitung kebutuhan pendingin
- Untuk desain peralatan perpindahan panas
- Menghitung suhu pada aliran keluar peralatan

Konsep Perhitungan Neraca Panas

- Perumusan dari neraca energi suatu sistem mirip dengan perumusan neraca massa.
- Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam perhitungan neraca panas:
 - Suatu system dapat berupa sistem tertutup namun tidak terisolasi (tidak dapat terjadi perpindahan massa namun dapat terjadi perpindahan panas)
 - Hanya terdapat satu neraca energi untuk suatu sistem (tidak seperti neraca massa yang memungkinkan adanya beberapa neraca komponen).
- Persamaan umum neraca panas

$$[\text{Energi masuk}] - [\text{energi keluar}] + [\text{energi yang terbangkitkan sistem}] - [\text{energi yang dikonsumsi sistem}] = [\text{energi terakumulasi dalam sistem}]$$

Untuk sistem yang steady state maka energy terakumulasi dalam sistem = 0

Reaksi adiabatik

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

Eksotermis → butuh pendingin

Endotermis → butuh pemanas

Macam-Macam Panas

❑ **Panas Sensible:** panas karena perubahan suhunya.

❑ **Panas Laten:** panas karena 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).

❑ **Panas reaksi:** panas yang dihasilkan atau dibutuhkan pada proses yang melibatkan reaksi kimia

Macam-macam panas reaksi :

a. Heat of reaction.

b. Heat of formation.

c. Heat of combustion.

Macam-macam peralatan yang dihitung neraca panas

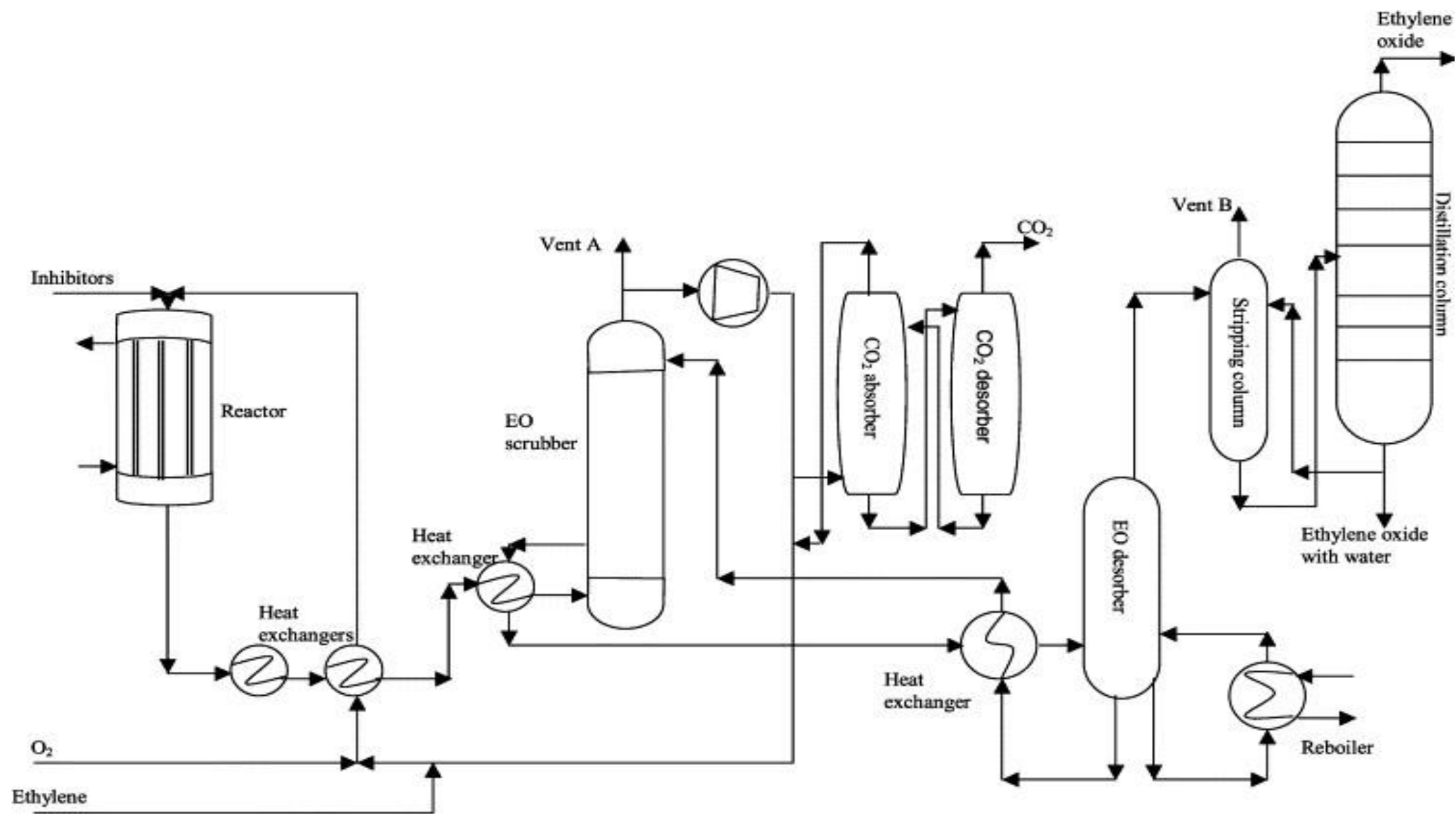
Peralatan tanpa perubahan massa

- Heater
- Cooler
- Heat exchanger
- Reboiler
- Boiler
- Kondensor

Peralatan dengan perubahan massa:

- Reaktor
- Furnace
- Kiln
- Evaporator
- Kristalisator
- Tangki Pengencer
- Tangki Pelarut

- Perpindahan panas merupakan unit operasi yang paling banyak dijumpai di industri.
- Misal, pembuatan ethylene glycol dengan cara oksidasi terhadap ethylene menjadi ethylene oxide dan selanjutnya dihidrasi menjadi glycol.
- Reaksi oksidasi katalitik paling efektif jika dilakukan pada temperatur sekitar 523,15 K (250°C).
- Reaktan, yaitu ethylene dan udara, dipanaskan terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam reaktor.
- Untuk merancang preheater, kita harus mengetahui jumlah panas yang harus ditransfer.



- Reaksi pembakaran antara ethylene dengan oksigen dalam tumpukan/bed katalis akan menaikkan temperatur.
- Jika temperaturnya melebihi 250°C , maka akan terjadi reaksi samping yang tidak diinginkan, yaitu terbentuk-nya CO_2 .
- Oleh karena itu, panas harus terus diambil dari reaktor agar temperaturnya tidak melebihi 250°C .
- Untuk merancang reaktor, kita harus mengetahui laju perpindahan panas, dan hal ini tergantung pada efek panas yang menyertai reaksi kimia.

- Produk ethylene oxide dihidrasi menjadi glycol dengan cara diabsorpsi dengan air.
- Pada proses tsb dilepaskan panas karena perubahan fasa dan proses pelarutan dan juga karena reaksi hidrasi antara ethylene oxide terlarut dengan air.
- Akhirnya, glycol dimurnikan dengan cara distilasi, suatu proses penguapan dan kondensasi, yang mengakibatkan terjadinya pemisahan suatu larutan menjadi komponen- komponennya.
- Semua efek panas yang penting telah diilustrasikan dengan menggunakan satu contoh proses kimia sederhana di atas.

PANAS SENSIBEL

- Panas sensibel adalah panas yang menyertai perubahan temperatur dari suatu sistem tanpa disertai perubahan fasa, reaksi kimia, dan perubahan komposisi.
- Jika sistem berupa suatu senyawa homogen dengan komposisi konstan, maka menurut aturan fasa, keadaan sistem tersebut akan tertentu jika 2 dari sifat-sifat intensifnya sudah tertentu.

$$U = U(T,V)$$

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV$$

$$dU = C_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV$$

$$dU = C_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV$$

Suku kedua ruas kanan akan = 0 jika

- Proses berlangsung pada volum konstan, apapun senyawanya.
- U tidak tergantung pada V, bagaimanapun prosesnya. Ini benar untuk gas ideal atau fluida incompressible.

$$dU = C_V dT$$

$$\Delta U = \int_{T_1}^{T_2} C_V dT \quad (1)$$

Untuk proses reversible yang berlangsung pada volum konstan,

$$Q = \Delta U = \int_{T_1}^{T_2} C_V dT$$

Enthalpy juga dapat dinyatakan sebagai fungsi dari T dan P:

$$H = H(T, P)$$

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP$$

$$dH = C_P dT + \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP$$

Suku kedua ruas akan = 0 jika

- Proses berlangsung pada tekanan konstan, apapun senyawanya.
- H tidak tergantung pada P, bagaimanapun prosesnya. Ini benar untuk gas ideal.

$$dH = C_p dT$$

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (2)$$

Untuk sistem tertutup yang mengalami proses reversibel yang berlangsung pada tekanan konstan, dan juga untuk perpindahan panas di dalam alat penukar panas dalam keadaan steady dengan ΔE_K dan ΔE_p yang dapat diabaikan, dan $W_S = 0$:

$$Q = \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (3)$$

KETERGANTUNGAN C_p TERHADAP T

Persamaan (3) dapat diselesaikan jika tersedia hubungan antara C_p dan T.

Persamaan empiris yang paling sederhana yang menyatakan hubungan antara C_p dan T adalah:

$$\frac{C_p}{R} = A + BT + CT^2 + DT^{-2} \quad (4)$$

Dengan A, B, C dan D adalah konstanta yang nilainya tergantung pada jenis senyawa kimia.

Untuk gas ideal:

$$\frac{C_p^{ig}}{R} = A + BT + CT^2 + DT^{-2}$$

Nilai parameter A, B, C, dan D untuk berbagai macam gas dalam keadaan ideal dapat dilihat pada Tabel C.1.

Untuk gas ideal berlaku:

$$\frac{C_V^{ig}}{R} = \frac{C_P^{ig}}{R} - 1 \quad (5)$$

Sehingga hubungan antara C_V dan T mengikuti hubungan antara C_P dan T

Menentukan Panas Sensible (Cara 1)

$$Q = \Delta H = n \int_{T_1}^{T_2} C_p . dT$$

$$\frac{C_p^{ig}}{R} = A + BT + CT^2 + DT^3$$

A, B, C, D diperoleh dari table

R = konstanta gas

Menentukan Panas Sensible (Cara 2)

$$\frac{Cp^{ig}}{R} = A + BT_{am} + \frac{C}{3}(4T_{am}^2 - T_1T_2) + \frac{D}{T_1T_2}$$

$$T_{am} = \frac{(T_1 + T_2)}{2}$$

$$Q = \Delta H = Cp_{mh}(T_2 - T_1)$$

Contoh:

Tentukan Panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 mol metana dari 260 C menjadi 600 C.

Penyelesaian (Metode 1):

1. Ubah Temperatur ke dalam K
2. Lihat data A, B, C, D pada Tabel 4.1 untuk metana
3. Masukkan data A,B,C dan D ke dalam persamaan polinomial
4. Integralkan sehingga didapat nilai Q

$$T_1 = 260 + 273,15 = 533,15 \text{ K}$$

$$T_2 = 600 + 273,15 = 873,15 \text{ K}$$

Dari Tabel 4.1

$$A = 1,702$$

$$B = 9,081 \times 10^{-3}.$$

$$C = -2,164 \times 10^{-6}.$$

$$D = 0$$

$$\begin{aligned} C_p &= R (A + BT + CT^2 + DT^{-2}) \\ &= 8,314 (1,702 + 9,081 \times 10^{-3} T + \\ &\quad -2,164 \times 10^{-6} T^2 + 0) \end{aligned}$$

$$Q = \int_{533,15}^{873,15} C_p . dT$$

$$Q = 8,314 \int_{533,15}^{873,15} (1,702 + 9,081 \times 10^{-3} T - 2,164 \times 10^{-6} T^2 + 0) . dT$$

$$Q = 8,314 \left(1,702 \Big|_{533,15}^{873,15} + \frac{9,081}{2} \times 10^{-3} \Big|_{533,15^2}^{873,15^2} - \frac{2,164}{3} \times 10^{-6} \Big|_{533,15^3}^{873,15^3} \right)$$

$$Q = (8,314)(578,68 + 2171 - 370,7)$$

$$Q = (8,314)(2378,8)$$

$$Q = 19788 \text{ Joule}$$

Penyelesaian (Metode 2)

Prosedur:

1. Tentukan nilai Tam
2. Hitung Cp
3. Hitung $Q = \Delta H$

$$T_{am} = (873,15 + 533,15)/2 = 703,15 \text{ K}$$

$$\frac{C_p}{R} = A + BT_{am} + \frac{C}{3} (4T_{am}^2 - T_1T_2) + \frac{D}{T_1T_2}$$

$$C_p = (8,314)(1,702 + 9,081 \times 10^{-3} \times 703,15 \\ + \frac{-2,164 \times 10^{-6}}{3} (4 \times 703,15^2 - 533,15 \times 873,15) + 0$$

$$C_p = (8,314)(6,996)$$

$$Q = (8,314)(6,996)(873,15 - 533,15)$$

$$Q = 19788 \text{ Joule}$$

CONTOH SOAL

Hitung panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur 1 mol gas metana dari 260 menjadi 600°C di dalam suatu proses alir steady yang berlangsung pada tekanan cukup rendah sehingga metana dapat dianggap sebagai gas ideal.

PENYELESAIAN

$$\frac{C_p^{ig}}{R} = A + BT + CT^2 + DT^{-2}$$

$$A = 1,702$$

$$B = 9,081 \times 10^{-3}$$

$$C = -2,164 \times 10^{-6}$$

$$D = 0$$

$$T_1 = 260^\circ\text{C} = 533,15 \text{ K}$$

$$T_2 = 600^\circ\text{C} = 873,15 \text{ K}$$

$$\Delta H = R \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p^{\text{ig}}}{R} dT \quad \leftarrow \quad \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$$

$$= R \int_{T_1}^{T_2} (A + BT + CT^2) dT = R \left(AT + \frac{B}{2} T^2 + \frac{C}{3} T^3 \right) \Big|_{T_1}^{T_2}$$

$$= R \left\{ A(T_2 - T_1) + \frac{B}{2} (T_2^2 - T_1^2) + \frac{C}{3} (T_2^3 - T_1^3) \right\}$$

$$= 8,314 \{ 1,792 (873,15 - 533,15) +$$

$$+ \frac{9,081 \times 10^{-3}}{2} (873,15^2 - 533,15^2) +$$

$$+ \frac{-2,164 \times 10^{-6}}{3} (873,15^3 - 533,15^3) \} = 19.778 \text{ J/mol}$$

$$Q = \Delta H \times n = 19.778 \text{ J/mol} \times 1 \text{ mol} = 19.778 \text{ J}$$

CONTOH SOAL

Berapa temperatur akhir jika panas sebanyak $0,4 \times 10^6$ (Btu) ditambahkan pada 25 (lb mol) ammonia yang semula berada pada temperatur 500 ($^{\circ}\text{F}$) dalam suatu proses alir steady yang berlangsung pada tekanan 1 (atm)?

PENYELESAIAN

$$\Delta H = \frac{Q}{n} = \frac{0,4 \times 10^6}{25} = 16.000 \text{ (Btu) (lb mol)}^{-1} = 37.218 \text{ J mol}^{-1}$$

$$T_1 = \frac{500 + 459,67}{1,8} = 533,15 \text{ K}$$

$$A = 3,578$$

$$B = 3,02 \times 10^{-3}$$

$$C = 0$$

$$D = -0,186 \times 10^5$$

$$Q = \Delta H = R \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_P^{\text{ig}}}{R} dT \quad \leftarrow \quad Q = \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_P dT$$

$$= R \int_{T_1}^{T_2} \left(A + BT + \frac{D}{T^2} \right) dT = R \left(AT + \frac{B}{2} T^2 - \frac{D}{T} \right) \Big|_{T_1}^{T_2}$$

$$= R \left\{ A(T_2 - T_1) + \frac{B}{2} (T_2^2 - T_1^2) - D \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right\}$$

$$37.218 = 8,314 \{ 3,578 (T_2 - 533,15) +$$

$$+ \frac{3,02 \times 10^{-3}}{2} (T_2^2 - 533,15^2) +$$

$$+ 0,186 \times 10^5 \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{533,15} \right) \}$$

Selanjutnya persamaan di atas diubah menjadi:

$$\mathbf{1,51 \times 10^{-3} T_2^2 + 3,578 T_2 + \frac{0,186 \times 10^5}{T_2} - 6.848,259 = 0}$$

atau $f(T_2) = 0$

Persamaan di atas diselesaikan dengan cara iterasi

T₂	f(T₂)
1000	-1.741,66
900	-2.384,29
1200	-364,76
1250	-1,50
1250.2	-0.04

Jadi $T_2 = 1250,2$ K

$$\mathbf{1,51 \times 10^{-3} T_2^2 + 3,578 T_2 + \frac{0,186 \times 10^5}{T_2} - 6.848,259 = 0}$$

$$T_2 = \frac{1}{3,578} \left(-1,51 \times 10^{-3} T_2^2 - \frac{0,186 \times 10^5}{T_2} + 6.848,259 \right)$$

PANAS REAKSI STANDAR

Untuk reaksi: $a A + b B \rightarrow l L + m M$

Panas reaksi standar didefinisikan sebagai perubahan enthalpy jika a mol A dan b mol B pada temperatur T keadaan standar bereaksi membentuk l mol L dan m mol M pada keadaan standarnya pada temperatur T yang sama.

Keadaan standar adalah **keadaan tertentu dari suatu spesies pada temperatur T dan pada tekanan, komposisi, dan kondisi fisik tertentu, seperti gas, cair, atau padat.**

Gas : zat murni dalam keadaan gas ideal pada 1 bar

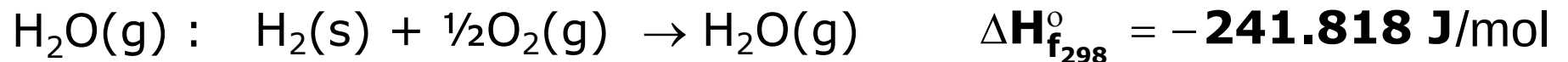
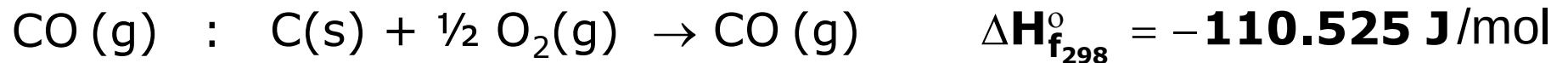
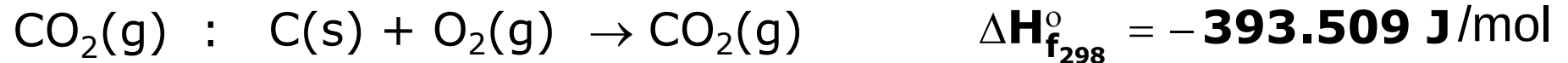
Cairan/padatan: cairan atau padatan nyata pada 1 bar



PANAS PEMBENTUKAN STANDAR

Panas pembentukan standar adalah perubahan enthalpy yang menyertai pembentukan 1 mol suatu senyawa dari elemen-elemen penyusunnya pada keadaan standar.

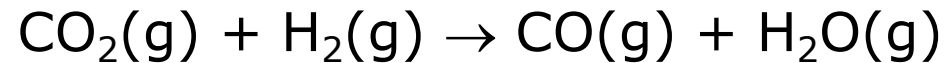
CONTOH:



Panas pembentukan untuk elemen = 0

Panas pembentukan standar dapat digunakan untuk menghitung panas reaksi standar.

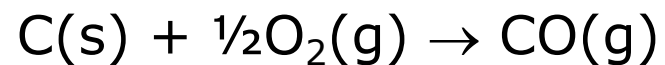
Misal untuk menghitung panas reaksi dari water-gas shift reaction pada 25°C:



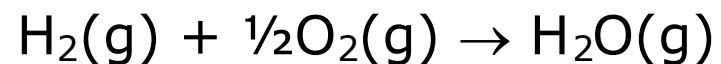
Cara menghitungnya adalah:



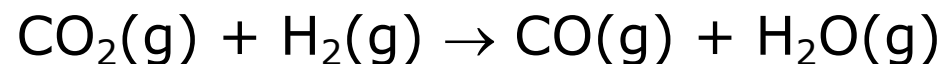
$$\Delta H_{298}^{\circ} = 393.509 \text{ J/mol}$$



$$\Delta H_{298}^{\circ} = -110.525 \text{ J/mol}$$



$$\Delta H_{298}^{\circ} = -241.818 \text{ J/mol}$$

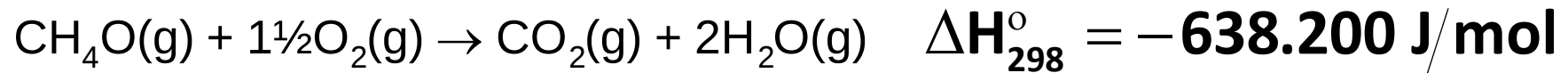
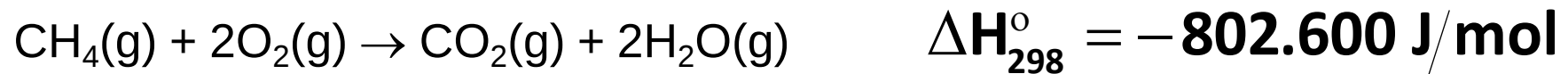


$$\Delta H_{298}^{\circ} = 41.166 \text{ J/mol}$$

PANAS PEMBAKARAN STANDAR

Panas pembakaran standar adalah perubahan enthalpy yang menyertai pembakaran 1 mol suatu senyawa.

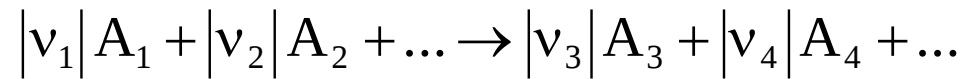
CONTOH:



Seperti halnya panas pembentukan standar, panas pembakaran standar juga dapat digunakan untuk menghitung panas reaksi standar.

HUBUNGAN ANTARA ΔH DENGAN T

Reaksi secara umum:

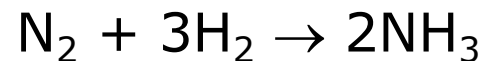


$|v_i|$ adalah koefisien stoikiometri reaksi

Konvensi tanda untuk v_i :

- Positif (+) untuk produk
- Negatif (-) untuk reaktan

CONTOH:



$$v_{\text{N}_2} = -1 \quad v_{\text{H}_2} = -3 \quad v_{\text{NH}_3} = 2$$

$$\Delta H^\circ \equiv \sum_i v_i H_i^\circ \quad (5)$$

H_i^o adalah enthalpy spesies i pada keadaan standar, yaitu sama dengan panas pembentukan standar ditambah dengan enthalpy pada keadaan standar dari semua elemen-elemen penyusunnya.

Jika sebagai dasar perhitungan diambil enthalpy pada keadaan standar elemen penyusun = 0, maka:

$$H_i^o = \Delta H_{f_i}^o \quad (6)$$

Jika pers. (6) ini disubstitusikan ke pers. (5):

$$\Delta H^o \equiv \sum_i v_i \Delta H_{f_i}^o \quad (7)$$

Untuk reaksi standar, produk dan reaktan selalu berada pada keadaan standar, yaitu tekanan 1 bar, sehingga enthalpy keadaan standar hanya merupakan fungsi dari temperatur:

$$dH_i^o = C_{P_i}^o dT$$

Jika dikalikan dengan v_i :

$$v_i dH_i^o = v_i C_{P_i}^o dT$$

Penjumlahan untuk semua produk dan reaktan:

$$\sum_i v_i dH_i^o = \sum_i v_i C_{P_i}^o dT \quad (8)$$

Karena v_i konstan maka

$$\sum_i v_i dH_i^o = \sum_i (dv_i H_i^o) = d \sum_i v_i H_i^o$$

Kalau persamaan terakhir digabung dengan pers. (8) maka:

$$d \sum_i v_i H_i^o = \sum_i v_i C_{p_i}^o dT \quad (9)$$

Persamaan (5): $\Delta H^o \equiv \sum_i v_i H_i^o$

Pers. (5) dideferensialkan:

$$d\Delta H^o = d \sum_i v_i H_i^o$$

Kalau persamaan terakhir digabung dengan pers. (9) maka:

$$d\Delta H^o = \sum_i v_i C_{p_i}^o dT$$

Jika didefinisikan:

$$\Delta C_p^o = \sum_i v_i C_{p_i}^o$$

$$d\Delta H^o = \Delta C_p^o dT$$

(10)

$$\Delta \mathbf{C_P^o} = \sum_i v_i \mathbf{C_{P_i}^o} \tag{9}$$

$$\frac{\Delta \mathbf{C_P^o}}{\mathbf{R}} = \sum_i v_i \frac{\mathbf{C_{P_i}^o}}{\mathbf{R}}$$

$$= \sum_i v_i \left(\mathbf{A_i} + \mathbf{B_i T} + \mathbf{C_i T^2} + \mathbf{D_i T^{-2}} \right)$$

$$= \sum_i v_i \mathbf{A_i} + \sum_i v_i \mathbf{B_i T} + \sum_i v_i \mathbf{C_i T^2} + \sum_i v_i \mathbf{D_i T^{-2}}$$

$$= \Delta \mathbf{A} + (\Delta \mathbf{B})\mathbf{T} + (\Delta \mathbf{C})\mathbf{T^2} + (\Delta \mathbf{D})\mathbf{T^{-2}}$$

Jika pers. (10) diintegrasikan:

$$d\Delta H^0 = \Delta C_p^0 dT$$

$$\int_{\Delta H_{T_0}^0}^{\Delta H_T^0} d\Delta H^0 = \int_{T_0}^T \Delta C_p^0 dT$$

$$\Delta H_T^0 - \Delta H_{T_0}^0 = R \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^0}{R} dT$$

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{T_0}^0 + R \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^0}{R} dT$$

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + R \int_{298}^T \frac{\Delta C_p^0}{R} dT \quad (11)$$

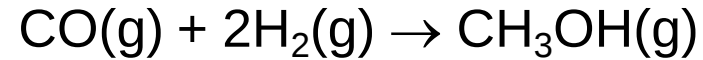
$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C^B}{R} dT = \int_{T_0}^T [\Delta A + (\Delta B)T + (\Delta C)T^2 + (\Delta D)T^{-2}] dT$$

$$= \left[(\Delta A)T + \frac{\Delta B}{2}T^2 + \frac{\Delta C}{3}T^3 - \frac{\Delta D}{T} \right]_{T_0}^T$$

$$= (\Delta A)(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) - \Delta D \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

CONTOH SOAL

Hitung panas reaksi standar untuk sintesis metanol pada 800°C



PENYELESAIAN

$$T_{\text{ref}} = T_0 = 298,15 \text{ K}$$

$$T = 1073,15 \text{ K}$$

$$\Delta H_T^\circ = \Delta H_{298}^\circ + R \int_{298}^T \frac{\Delta C_P^\circ}{R} dT$$

i	ν_i	ΔH_{f298}°	A	$10^3 B$	$10^6 C$	$10^{-5} D$
CH ₃ OH	1	- 200.660	2,211	12,216	- 3,450	0,000
CO	- 1	- 110.525	3,376	0,557	0,000	- 0,031
H ₂	- 2	0	3,249	0,422	0,000	0,083

$$\Delta H_0^\circ = \Delta H_{298}^\circ = -200.660 - (-110.525) = -90.135 \text{ J/mol CH}_3\text{OH}$$

$$\Delta A = \sum v_i A_i = (1) (2,211) + (-1) (3,376) + (-2) (3,249) = -7,663$$

Dengan cara yang sama:

$$\Delta B = 10,815 \times 10^{-3}$$

$$\Delta C = -3,450 \times 10^{-6}$$

$$\Delta D = -0,135 \times 10^5$$

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} dT = \int_{T_0}^T [\Delta A + (\Delta B)T + (\Delta C)T^2 + (\Delta D)T^{-2}] dT$$

$$= \left[(\Delta A)T + \frac{\Delta B}{2} T^2 + \frac{\Delta C}{3} T^3 - \frac{\Delta D}{T} \right]_{T_0}^T$$

$$= (\Delta A)(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2} (T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3} (T^3 - T_0^3) - \Delta D \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

$$= -1.615,5 \text{ K}$$

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_0^o + R \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} dT \quad \Rightarrow \quad \Delta H_{1073}^0 = \Delta H_{298}^o + R \int_{298}^{1073} \frac{\Delta C_P^o}{R} dT$$

$$= -90.135 + 8,314 (-1.615,5) = -103.566 \text{ J/mol}$$

HEAT EFFECTS IN INDUSTRIAL REACTIONS

CONTOH

Berapa temperatur maksimum yang dapat dicapai oleh reaksi pembakaran gas metana dengan udara yang berlebihan 20%? Udara dan metana masuk ke burner pada temperatur 25°C.

PENYELESAIAN



Basis: 1 mol CH_4 yang bereaksi

$$\Delta H_{298}^{\circ} = -393.509 + (2)(-241.818) - (-74.520) = -802.625 \text{ J}$$

Asumsi:

- Reaksi berlangsung sempurna
- Reaksi berlangsung secara adiabatik ($Q = 0$)
- ΔE_K dan ΔE_P diabaikan
- $W_S = 0$

Sehingga $\Delta H = 0$

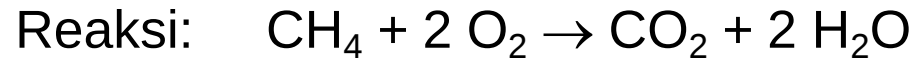
Basis: 1 mol CH₄ yang dibakar

Mol O₂ yang dibutuhkan = 2,0

Mol O₂ kelebihan = (0,2) (2,0) = 0,4

Mol O₂ total yang masuk = 2,4

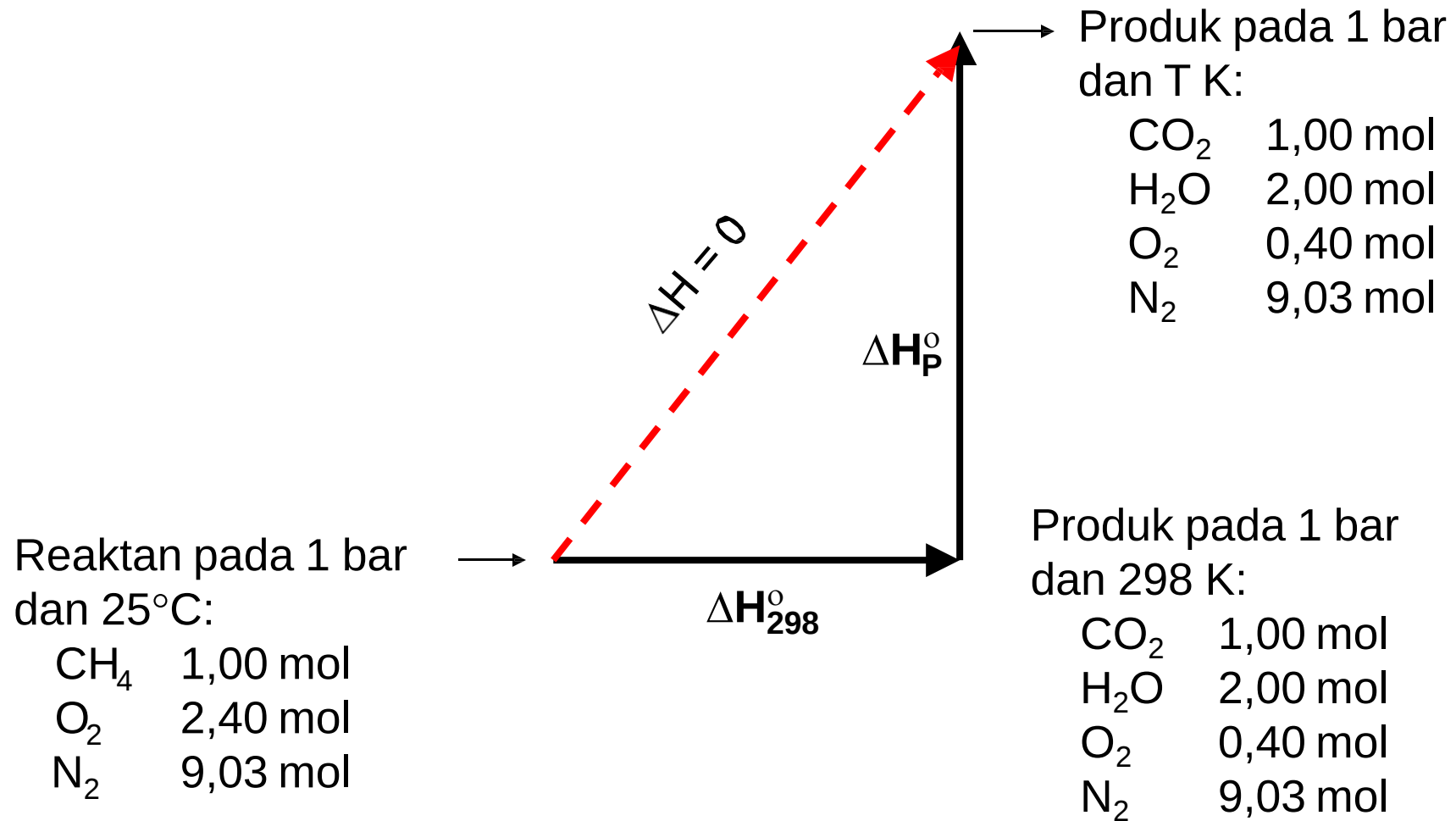
Mol N₂ yang masuk = (2,4) (79/21) = 9,03



Neraca massa

	CH ₄	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂
Masuk	1,00	2,40	0,00	0,00	9,03
Reaksi	- 1,00	- 2,00	1,00	2,00	0,00
Keluar/Sisa	0,00	0,40	1,00	2,00	9,03

NERACA ENERGI



Neraca energi:

$$\Delta H_{298}^{\circ} + \Delta H_P^{\circ} = \Delta H = 0 \quad (a)$$

ΔH_P° adalah panas sensibel untuk menaikkan temperatur produk dari 298,15 K menjadi T K

$$\begin{aligned} \Delta H_P^{\circ} &= \sum_i n_i R \int_{T_0}^T \frac{C_{P_i}^{\circ}}{R} dT = R \int_{T_0}^T \sum_i \left(\frac{n_i C_{P_i}^{\circ}}{R} \right) dT \\ &= R \int_{T_0}^T \left[\left(\sum_i n_i A_i \right) + \left(\sum_i n_i B_i \right) T + \left(\sum_i n_i C_i \right) T^2 + \left(\sum_i n_i D_i \right) T^{-2} \right] dT \\ &= R \left[\left(\sum_i n_i A_i \right) T + \frac{\left(\sum_i n_i B_i \right)}{2} T^2 + \frac{\left(\sum_i n_i C_i \right)}{3} T^3 - \left(\sum_i n_i D_i \right) \left(\frac{1}{T} \right) \right]_{T_0}^T \\ &= R \left[\left(\sum_i n_i A_i \right) (T - T_0) + \frac{\left(\sum_i n_i B_i \right)}{2} (T^2 - T_0^2) + \frac{\left(\sum_i n_i C_i \right)}{3} (T^3 - T_0^3) - \left(\sum_i n_i D_i \right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \end{aligned}$$

$$\sum_i n_i A_i = (1) (5,457) + (2) (3,470) + (0,4) (3,639) + (9,03) (3,280) \\ = 43,471$$

Dengan cara yang sama akan diperoleh:

$$\sum_i n_i B_i = 9,502 \times 10^{-3} \quad \sum_i n_i C_i = 0 \quad \sum_i n_i D_i = -0,645 \times 10^5$$

Jika dimasukkan ke persamaan untuk ΔH_p° :

$$\Delta H_p^\circ = 8,314 \left[(43,471)(T - 298,15) + (4,751 \times 10^{-3})(T^2 - 298,15^2) + \right. \\ \left. + (0,645 \times 10^5) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right]$$

Persamaan neraca energi [persamaan (a)] menjadi:

$$-802.625 + 8,314 \left[(43,471)(T - 298,15) + (4,751 \times 10^{-3})(T^2 - 298,15^2) + \right. \\ \left. + (0,645 \times 10^5) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right] = 0$$

$$T = 2066,3 \text{ K}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[802.625 + 8,314 \ln 43,471 + T - 298,15 - 298,15^2 \right] + \\
 & \left[4,751 \times 10^{-3} T^2 + (0,645 \times 10^5) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right] = f(T) = 0
 \end{aligned}$$

$T = 1000\text{K} \rightarrow f(T) = - 514...$

$T = 2000\text{K} \rightarrow f(T) = - 34....$

Kesimpulan : $T > 2000\text{ K}$

T	f(T)
500	-724035
1000	-514238
2000	-34588.4
2066	-143.422
2066.274	0.033162

CONTOH

SOAL 1.9

One method for the manufacture of "synthesis gas" (primarily a mixture of CO and H₂) is the catalytic reforming of CH₄ with steam at high temperature and atmospheric pressure:



The only other reaction which occurs to an appreciable extent is the water-gas-shift reaction:

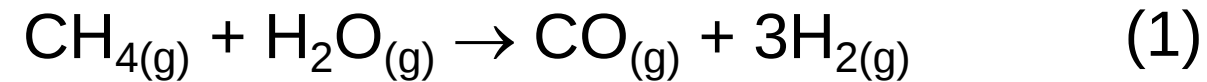


If the reactants are supplied in the ratio, 2 mol steam to 1 mol CH₄, and if heat is supplied to the reactor so that the products reach a temperature of 1300 K, the CH₄ is completely converted and the product stream contains 17.4 mol-% CO. Assuming the reactants to be preheated to 600 K, calculate the heat requirement for the reactor.

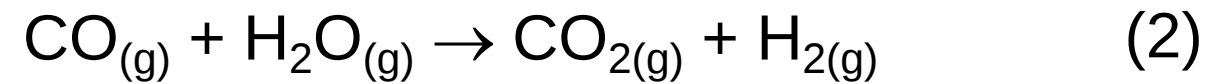
PENYELESAIAN

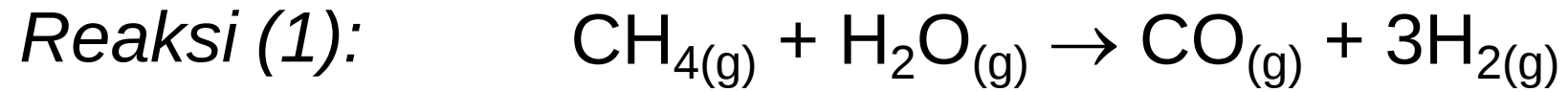
Basis: 1 mol CH₄
2 mol H₂O

Reaksi utama:

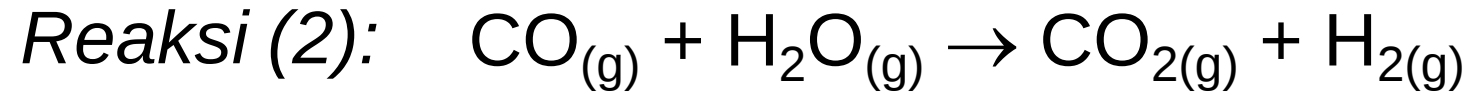


Reaksi samping:





i	ν_i	ΔH°_{f298}	A	10^3 B	10^6 C	10^{-5} D
CH₄	− 1	− 74.520	1,702	9,081	− 2,164	0,000
H₂O	− 1	− 241.818	3,470	1,450	0,000	0,121
CO	1	− 110.525	3,376	0,557	0,000	− 0,031
H₂	3	0	3,249	0,422	0,000	0,083



i	ν_i	ΔH°_{f298}	A	10^3 B	10^6 C	10^{-5} D
CO₂	1	– 393.509	5,547	1,045	0,000	– 1,157
H₂	1	0	3,249	0,422	0,000	0,083
H₂O	– 1	– 241.818	3,470	1,450	0,000	0,121
CO	– 1	– 110.525	3,376	0,557	0,000	– 0,031

CH₄ habis bereaksi

Misal CO yang bereaksi menurut reaksi (2) adalah x, maka:

	CH ₄	H ₂ O	CO	H ₂	CO ₂
Awal	1	2	0	0	0
Reaksi (1)	- 1	- 1	1	3	0
Reaksi (2)	0	- x	- x	x	x
Sisa	0	1 - x	1 - x	3 + x	x

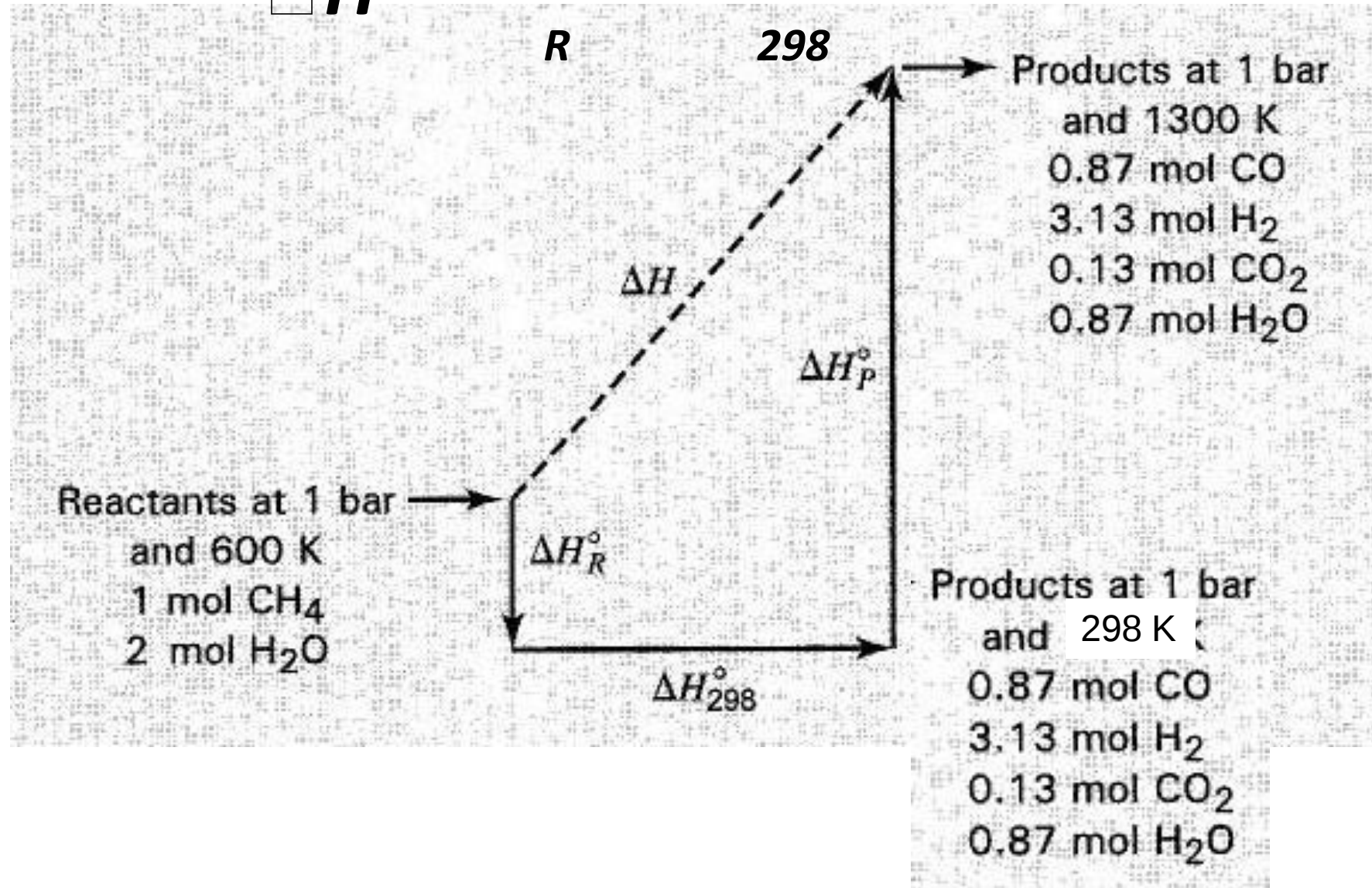
$$\text{Total} = (1 - x) + (1 - x) + (3 + 3) + x = 5$$

$$\text{Fraksi mol CO} = \frac{1 - x}{5} = 0,174 \quad \longrightarrow \quad x = 0,13$$

	CH ₄	H ₂ O	CO	H ₂	CO ₂
Awal	1	2	0	0	0
Reaksi (1)	− 1	− 1	1	3	0
Reaksi (2)	0	− 0,13	− 0,13	0,13	0,13
Sisa	0	0,87	0,87	3,13	0,13

$$\square H \square \square H \square + \Delta H_p^\circ$$

$$\square H \square$$



Panas reaksi pada 298 K

$$\Delta H_{298}^0(1) = (1 \text{ mol})(426.863 \text{ J/mol}) = 426.863 \text{ J}$$

$$\Delta H_{298}^0(2) = (0,13 \text{ mol})(-41.166 \text{ J/mol}) = -5.351,6 \text{ J}$$

Panas sensibel reaktan (600 K $\rightarrow$ 298 K)

$$\begin{aligned}\Delta H_R^O &= \sum_i n_i R \int_T^{T_0} \frac{C_{P_i}^O}{R} dT = R \int_T^{T_0} \sum_i \left(\frac{n_i C_{P_i}^O}{R} \right) dT \\ &= R \left[\left(\sum_i n_i A_i \right) (T_0 - T) + \frac{\left(\sum_i n_i B_i \right)}{2} (T_0^2 - T^2) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\left(\sum_i n_i C_i \right)}{3} (T_0^3 - T^3) - \left(\sum_i n_i D_i \right) \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]\end{aligned}$$

i	n _i	A	10 ³ B	10 ⁶ C	10 ⁻⁵ D
CH ₄	1	1,702	9,081	– 2,164	0,000
H ₂ O	2	3,470	1,450	0,000	0,121
Σn		8,642	11,981	– 2,164	0,242

$$\sum_i n_i A_i =$$

$$8,642$$

$$\sum_i n_i B_i = 11,981 \times 10^{-3}$$

$$\sum_i n_i C_i = -2,164 \times 10^{-6}$$

$$\sum_i n_i D_i = 0,242 \times 10^5$$

Jika dimasukkan ke persamaan untuk ΔH_R° :

$$\begin{aligned}\Delta H_R^\circ &= 8,314 \left[(8,642)(298 - 600) + \right. \\ &\quad + (11,981 \times 10^{-3})(298^2 - 600^2) \\ &\quad + (-2,164 \times 10^{-6})(298^3 - 600^3) \\ &\quad \left. + (0,242 \times 10^5) \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{600} \right) \right] \\ &= \dots\dots\dots \text{ J}\end{aligned}$$

Panas sensibel produk (298K $\rightarrow$ 1300K)

$$\begin{aligned}\Delta H_p^o &= \sum_i n_i R \int_{T_0}^T \frac{C_{p_i}^o}{R} dT = R \int_{T_0}^T \sum_i \left(\frac{n_i C_{p_i}^o}{R} \right) dT \\ &= R \left[\left(\sum_i n_i A_i \right) (T - T_0) + \frac{\left(\sum_i n_i B_i \right)}{2} (T^2 - T_0^2) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\left(\sum_i n_i C_i \right)}{3} (T^3 - T_0^3) - \left(\sum_i n_i D_i \right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]\end{aligned}$$

i	n _i	A	10 ³ B	10 ⁶ C	10 ⁻⁵ D
CO ₂	0,13	5,547	1,045	0,000	– 1,157
H ₂ O	0,87	3,470	1,450	0,000	0,121
CO	0,87	3,376	0,557	0,000	– 0,031
H ₂	3,13	3,249	0,422	0,000	0,083

$$\sum_i n_i A_i = 16,847$$

$$\sum_i n_i C_i = 0$$

$$\sum_i n_i B_i = 3,203 \times 10^{-3}$$

$$\sum_i n_i D_i = 0,188 \times 10_5$$

Jika dimasukkan ke persamaan untuk ΔH_p° :

$$\begin{aligned}\Delta H_p^\circ &= 8,314 \left[(16,847)(1300 - 298) + \right. \\ &\quad \left. + (3,203 \times 10^{-3})(1300^2 - 298^2) \right. \\ &\quad \left. + (0,188 \times 10^5) \left(\frac{1}{1300} - \frac{1}{298} \right) \right] \\ &= \dots\dots\dots \text{ J}\end{aligned}$$

$$\Delta H = \Delta H_R^\circ + \Delta H_{298}^\circ + \Delta H_p^\circ$$

CONTOH SOAL

Sebuah boiler menggunakan bahan bakar minyak kualitas tinggi (hanya berisi hidrokarbon) yang memiliki panas pembakaran standar – 43.515 J g⁻¹ pada 25°C dengan CO₂(g) dan H₂O(l) sebagai produk. Temperatur bahan bakar dan minyak masuk ke ruang pembakaran pada 25°C. Udara dianggap kering. Gas hasil pembakaran keluar dari boiler pada 300°C, dan analisis rata-ratanya adalah (basis kering) 11,2% CO₂, 0,4% CO, 6,2% O₂ dan 82,2% N₂. Berapa bagian dari panas pembakaran yang ditransfer sebagai panas ke boiler?

PENYELESAIAN

Basis: 100 mol gas hasil pembakaran kering:

CO ₂	11,2 mol
CO	0,4 mol
O ₂	6,2 mol
N ₂	82,2 mol

Total	100,0 mol

NERAC

Masuk:

$$\text{Masuk sebagai O}_2 \text{ (dalam udara)} = 82,2 \times \frac{21}{79} = 21,85 \text{ mol}$$

$$\text{Masuk sebagai O (dalam udara)} = 2 \times 21,85 \text{ mol} = 43,7 \text{ mol}$$

Keluar:

$$\text{Dalam CO}_2 = 2 \times 11,20 = 22,40 \text{ mol}$$

$$\text{Dalam CO} = 0,40 \text{ mol}$$

$$\text{Dalam O}_2 \text{ sisa} = 2 \times 6,20 = 12,40 \text{ mol}$$

$$\text{Total O selain H}_2\text{O} = 35,20 \text{ mol}$$

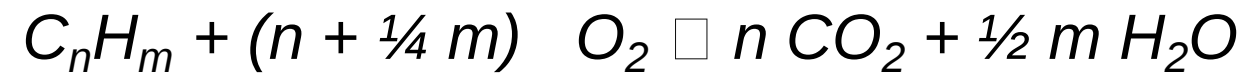
$$\text{Jadi O yang bereaksi membentuk H}_2\text{O} = 43,7 - 35,2 = 8,5 \text{ mol}$$

$$\text{H}_2\text{O yang terbentuk} = 8,50 \text{ mol}$$

$$\text{Total O yang bereaksi} = 22,4 + 0,4 + 8,5 = 31,3 \text{ mol}$$

Kesimpulan:

$$\text{Total O}_2 \text{ yang bereaksi} = \frac{1}{2} \times 31,3 = 15,65 \text{ mol}$$



NERACA C

Keluar:

Sebagai CO₂ = 11,20 mol

Sebagai CO = 0,40 mol

Total = 11,60 mol

Masuk:

Mol C masuk = mol C keluar = 11,60 mol

NERACA H

Keluar:

Sebagai H₂O = $2 \times 8,50 = 17,0$ mol

Masuk:

Mol H masuk = mol H keluar = 17,0 mol

KESIMPULAN

Rumus molekul bahan bakar = C_{11,6}H₁₇

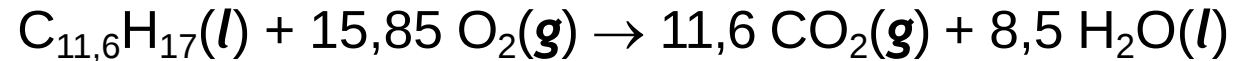
C dan H semuanya berasal dari bahan bakar, sehingga total berat

bahan bakar yang

masuk adalah

$$= (11,60) (12) + (17,0) (1) = 156,2 \text{ g}$$

Reaksi pembakaran jika bahan bakar terbakar sempurna membentuk $\text{CO}_2(\text{g})$ dan $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ adalah:

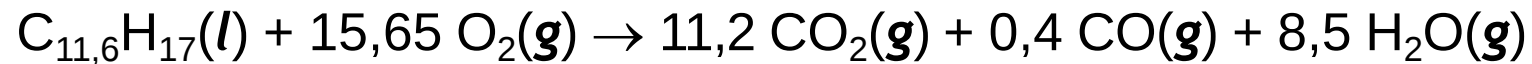


$$\Delta H^\circ_{298} = -43.515 \text{ J/g}$$

Jika semua bahan bakar terbakar sempurna membentuk $\text{CO}_2(\text{g})$ dan $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ pada 25°C , maka panas pembakarannya adalah:

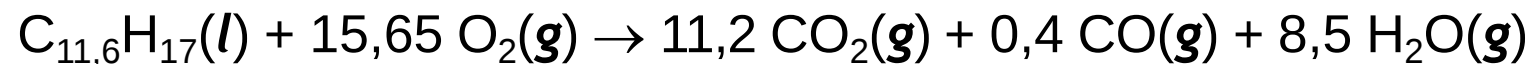
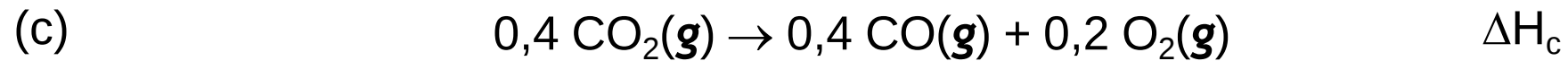
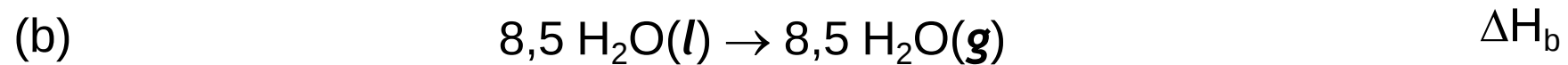
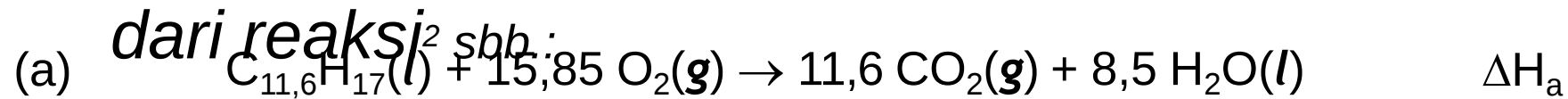
$$\Delta H^\circ_{298} = (-43.515 \text{ J/g})(156,2 \text{ g}) = -6.797.040 \text{ J}$$

Analisis hasil pembakaran menunjukkan bahwa pembakaran berlangsung tidak sempurna (karena terbentuknya CO) dan H₂O berupa gas bukan cairan.
Reaksi yang terjadi:



Panas reaksi untuk reaksi tersebut dapat dihitung dengan menggunakan berbagai panas reaksi yang telah diketahui datanya.

Reaksi di atas merupakan penjumlahan



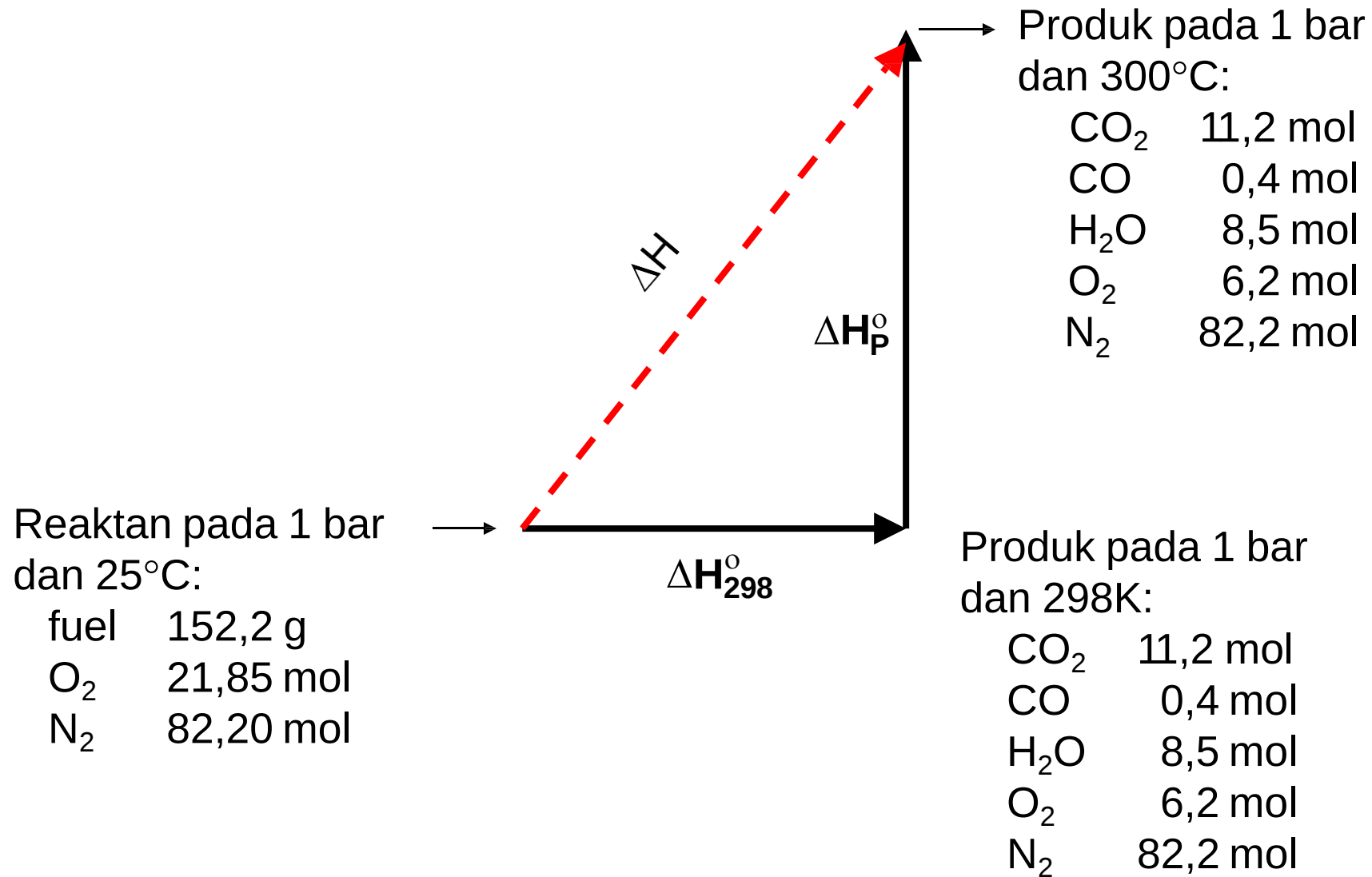
Panas reaksi standar total pada 25°C:

$$\Delta\text{H}_{298}^{\circ} = -6.797.040 + (44.012)(8,5) + (282.984)(0,4) = -6.309.740 \text{ J}$$

$$\Delta H_a = - 6.797.040 \text{ J}$$

$$\Delta H_b^0 = 8,5 \text{ mol} \times \underbrace{\Delta H_{f,298}^0 \text{ H}_2\text{O}_{(\text{gas})} - \Delta H_{f,298}^0 \text{ H}_2\text{O}_{(\text{liquid})}}_{\text{Panas laten penguapan} = \Delta H_{\text{vap}}}$$

Panas laten penguapan = ΔH_{vap}



$$\Delta H_P^\circ = \sum_i n_i R \int_{T_0}^T \frac{C_{P_i}^\circ}{R} dT = R \int_{T_0}^T \sum_i \left(\frac{n_i C_{P_i}^\circ}{R} \right) dT$$

$$= R \left[\left(\sum_i n_i A_i \right) (T - T_0) + \frac{\left(\sum_i n_i B_i \right)}{2} (T^2 - T_0^2) + \frac{\left(\sum_i n_i C_i \right)}{3} (T^3 - T_0^3) - \left(\sum_i n_i D_i \right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

$$\sum_i n_i A_i = 384,142$$

$$\sum_i n_i B_i = 76,134 \times 10^{-3}$$

$$\sum_i n_i C_i = 0$$

$$\sum_i n_i D_i = -10,0617 \times 10^5$$

Jika dimasukkan ke persamaan untuk ΔH_P° :

$$\Delta H_P^\circ = 8,314 \left[(384,142)(573,15 - 298,15) + \right. \\ \left. + (76,134 \times 10^{-3})(573,15^2 - 298,15^2) + (0,645 \times 10^5) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right]$$

$$= 940.660 \text{ J}$$

$$= -6.309.740 + 940.660 = -5.369.080 \text{ J}$$

$$\Delta H = \Delta H$$

Proses pembakaran ini merupakan proses alir tunak dengan:

$$\Delta H \bullet W_s = 0$$

- $\Delta E_k = 0$
- $\Delta E_p = 0$

Maka: $\Delta H = Q$

$Q = -5.369.080 \text{ J}$ merupakan panas yang ditransfer ke boiler

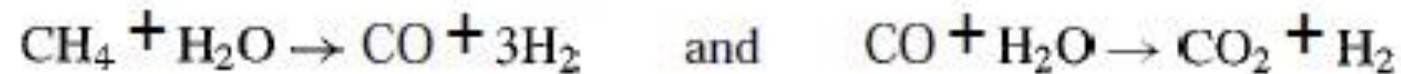
Jadi fraksi panas pembakaran yang ditransfer ke boiler adalah:

$$= \frac{5.369.080}{6.797.040} \times 100\% = 79,0\%$$

4.3

2

A gas mixture of methane and steam at atmospheric pressure and 773.15 K (500°C) is fed to a reactor, where the following reactions occur:

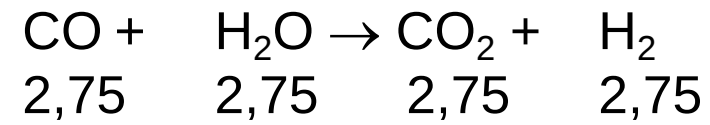


The product stream leaves the reactor at 1123.15 K (850°C). Its composition (mole fractions) is:

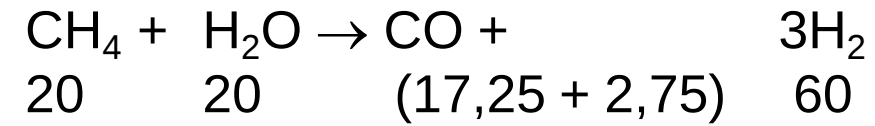
$$y_{\text{CO}_2} = 0.0275 \quad y_{\text{CO}} = 0.1725 \quad y_{\text{H}_2\text{O}} = 0.1725 \quad y_{\text{H}_2} = 0.6275$$

Determine the quantity of heat added to the reactor per mole of product gas.

Reaksi (2):



Reaksi (1):



Reaktan:

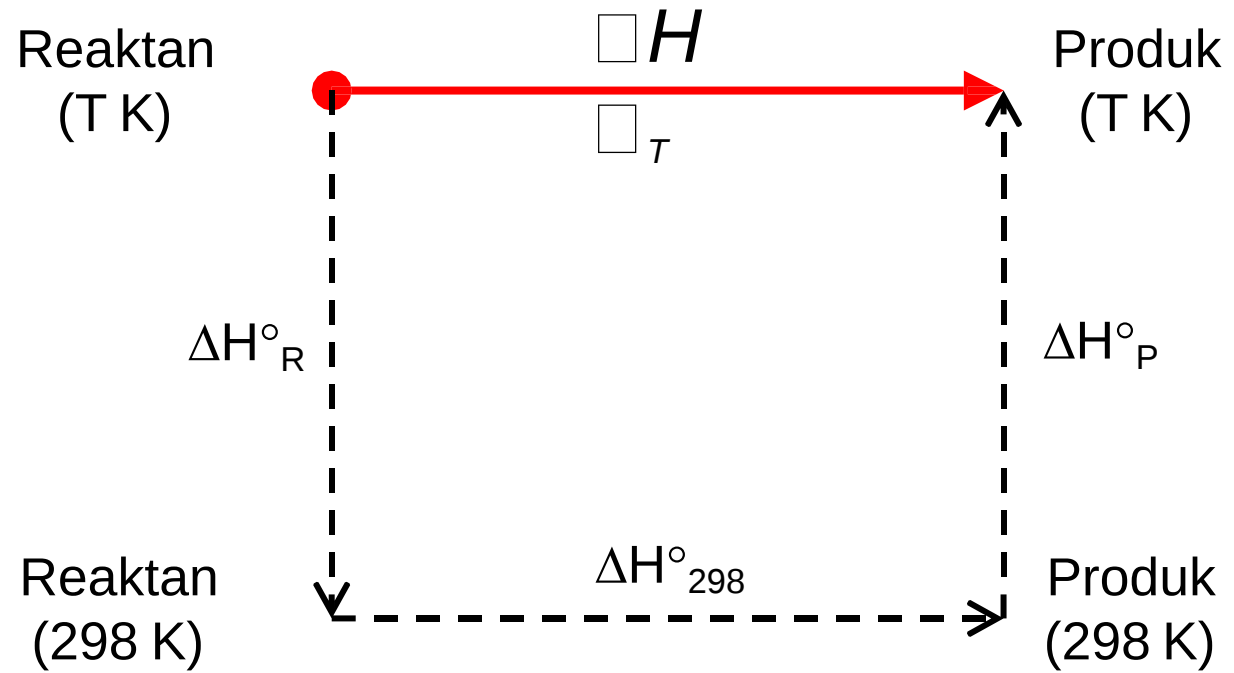
$$\text{CH}_4 = 20 \text{ mol}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 22,75 \text{ mol}$$

4.29

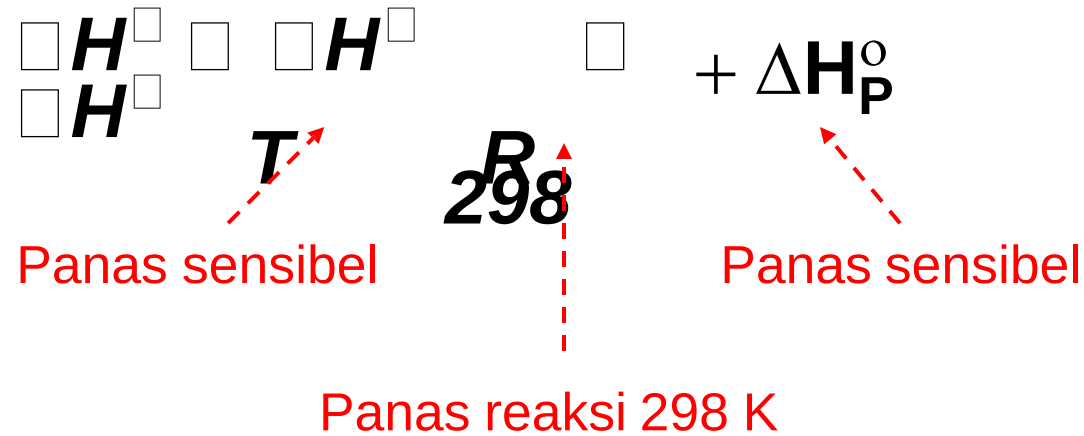
Methane gas is burned completely with 30% excess air at approximately atmospheric pressure. Both the methane and the dry air enter the furnace at 303.15 K (30°C), and the flue gases leave the furnace at 1773.15 K (1500°C). The flue gases then pass through a heat exchanger from which they emerge at 323.15 K (50°C).

Per mole of methane, how much heat is lost from the furnace, and how much heat is transferred in the heat exchanger?



H merupakan state function → tidak tergantung pada jalannya proses

$$\Delta H^\circ_T = \Delta H^\circ_R + \Delta H^\circ_{298} + \Delta H^\circ_P$$



$$\Delta H_R^0 = \left(\sum_i n_i \int_T^{298} C_{P_i} dT \right)_R = \left(\sum_i n_i \int_T^{298} C_{P_i} dT \right)_R = - \left(\sum_i \int_{298}^T n_i C_{P_i} dT \right)_R$$

$$\Delta H_P^0 = \left(\sum_i n_i \int_{298}^T C_{P_i} dT \right)_P = \left(\sum_i \int_{298}^T n_i C_{P_i} dT \right)_P$$

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \left(\sum_i \int_{298}^T n_i C_{P_i} dT \right)_P - \left(\sum_i \int_{298}^T n_i C_{P_i} dT \right)_R$$

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + R \int_{298}^T \frac{\Delta C_P^0}{R} dT$$

TERIMA KASIH