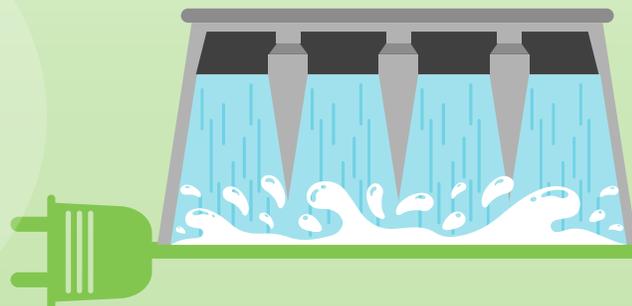


An illustration showing various energy sources: wind turbines, a factory with smokestacks, solar panels, and power lines, all set against a sun and a globe. The globe is partially obscured by the title text.

MESIN KONVERSI ENERGI

Prawoto dan Reza Abdu Rahman

Jurusan Teknik Mesin
**UNIVERSITAS PANCASILA
JAKARTA**



PROSES PEMBAKARAN



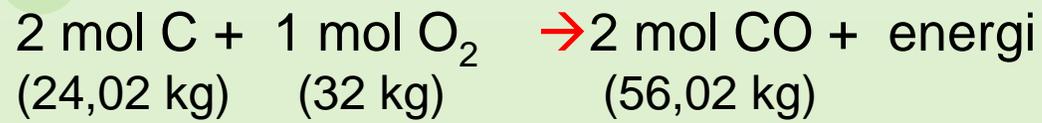
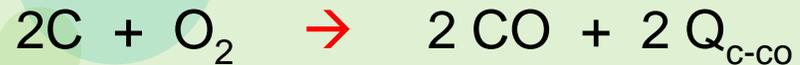
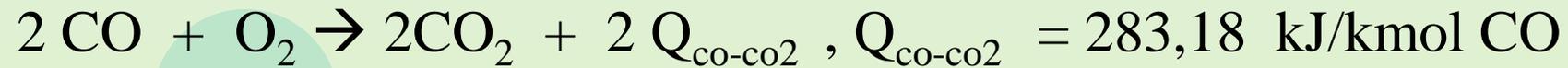
Reaksi Kimia dan Pembakaran

1. Energi kimia

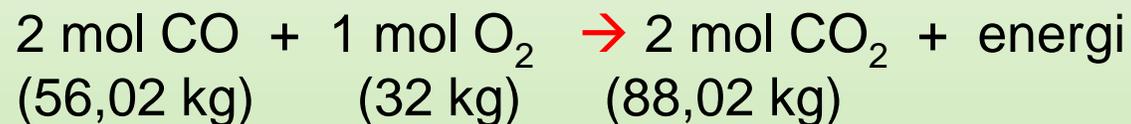
- Energi yang keluar sebagai hasil interaksi elektron dari dua atau lebih atom dan/atau molekul-molekul yang berkombinasi dan menghasilkan senyawa kimia yang stabil.
- Sistem campuran bereaksi, adalah sebuah sistem dengan multi komponen dimana terjadi reaksi kimia antara komponen penyusun. Selama proses akan terjadi perubahan komposisi kimia.
 - ❖ Energi kimia hanya terdapat dalam bentuk energi tersimpan. dilepaskan dalam suatu reaksi kimia “eksotermis”.
 - ❖ Pembakaran merupakan suatu reaksi kimia eksotermis yang paling penting.



Contoh:



jika O_2 cukup \rightarrow



Jadi: untuk membakar sempurna 2 mol C diperlukan 2 mol O_2 atau

64 kg O_2 untuk 24,02 kg C \rightarrow

atau = $64/24,02 = 2,66 \text{ kgO}_2/\text{kg C}$



2. Reaksi Pembakaran

- ✓ Pembakaran adalah reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidator sedemikian sehingga energi kimia yang tersimpan di dalam bahan bakar dilepaskan.
- ✓ Energi kalor yang dilepaskan sebagai hasil proses pembakaran dapat dipergunakan untuk tujuan pemanasan atau untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi pada boiler atau daya pada turbin gas dan motor pembakaran dalam.
- ✓ Terdapat tiga aspek penting dalam reaksi kimia sesuai dengan hukum alam yang harus diperhatikan, yaitu: **Prinsip Kekekalan Massa, Hukum Termodinamika I dan Hukum Termodinamika II.**



a. Prinsip Kekekalan Massa

- Aspek ini dikenal dengan **Stoikiometri (Stoichiometry)**
- Stoikiometri memperhatikan hubungan antara komposisi dari **Reaktan** dan komposisi **Produk** (hasil pembakaran).
- Karena itu reaksi kimia dapat didefinisikan sebagai pengaturan kembali atom atau pendistribusian elektron, maka penting untuk menghitung massa dari elemen kimia yang ikut dalam reaksi.

b. Hukum Termodinamika I

- Hukum termodinamika I terutama berperan dalam penerapan prinsip Kekekalan Energi.



c. Hukum Termodinamika II

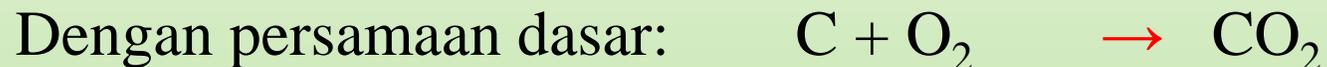
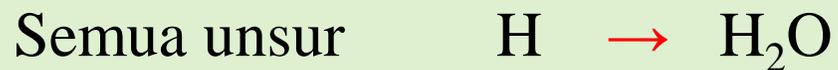
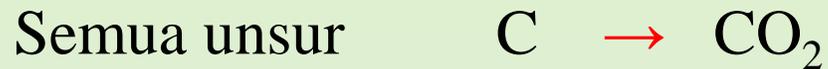
Hukum termodinamika II berperan dalam:

- Proses Reversibel atau Irreversibel
- Keseimbangan komposisi campuran bereaksi tergantung pada temperatur dan tekanan.



3. Stoikiometri Pembakaran

- ✓ Tujuan praktis dari stoikiometri adalah untuk menentukan secara cepat dan tepat jumlah udara yang harus dipergunakan untuk mengoksidasi bahan bakar yang tersusun dari C, H, S dll. menjadi karbon dioksida, uap air dan sulfur dioksida.
- ✓ Secara teoritis dalam proses pembakaran semua bahan bakar terbakar sempurna.



Koefisien 1 dan ½ disebut sebagai koefisien stoikiometri.



Pembakaran sempurna dari hidrokarbon akan menghasilkan karbon dioksida dan air, Contoh:

a. Pembakaran Metana, CH_4



b. Pembakaran Propana, C_3H_8



kesetimbangan oksigen:

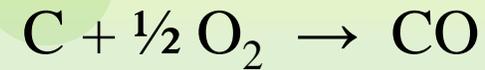
$$2 \text{ atom } x = 3.2 + 4.1$$

$$2x = 6 + 4 = 10 \rightarrow x = 5$$

maka reaksi pembakaran di atas menjadi:



Jika pembakaran karbon tidak sempurna maka akan terbentuk:



- ✓ Adanya karbon monoksida dalam hasil pembakaran menunjukkan pemakaian energi yang tidak efisien.
- ✓ Karbon monoksida juga merupakan polutan udara.
- ✓ Dalam kenyataan, proses pembakaran sering terjadi secara tidak sempurna.
- ✓ Gas hasil pembakaran mengandung unsur bahan bakar yang tidak terbakar atau komponen-komponen C_xH_y , CO atau OH.
- ✓ Pembakaran tidak sempurna terjadi diantaranya disebabkan oleh kurangnya oksigen atau adanya disosiasi pada suhu tinggi.



3.1. Udara Teoritis

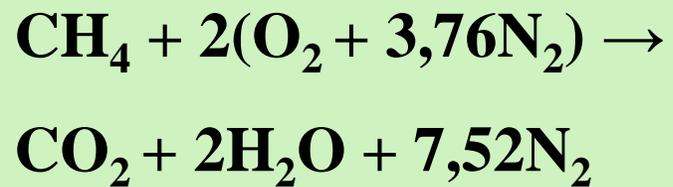
- Oksigen yang dipergunakan dalam kebanyakan proses pembakaran berasal dari udara.
- Udara kering tersusun dari Oksigen, Nitrogen, Argon, Karbon dioksida, Helium, Neon dsb.
- Untuk perhitungan pembakaran, udara umumnya diasumsikan tersusun dari 21% Oksigen dan 79% Nitrogen (% volume), sehingga



- Persamaan di atas menunjukkan jumlah kebutuhan udara kering minimum yang akan memberikan oksigen untuk pembakaran sempurna.
- Kebutuhan udara minimum untuk proses pembakaran sempurna suatu bahan bakar disebut udara stoikiometri atau udara teoritis.

- Proses pembakaran ideal, dimana bahan bakar terbakar secara sempurna dengan udara teoritis disebut **pembakaran stoikiometri** atau **pembakaran teoritis**.

Contoh: Pembakaran Metana dengan udara kering



- tidak ada bahan bakar yang tidak terbakar
- tidak ada oksigen berlebih pada hasil pembakaran

Pembakaran teoritis

Dari persamaan di atas berarti diperlukan $2 \times 4,76$ mol udara untuk membakar 1 mol metana secara sempurna.



3.2. Udara Berlebih (*excess air*)

- Pada kebanyakan proses pembakaran yang sesungguhnya (aktual), sering ditemui permasalahan untuk mendapatkan pencampuran bahan bakar dengan udara yang diberikan secara memuaskan, dengan demikian udara diberikan dalam jumlah berlebih untuk memastikan terjadinya pembakaran secara sempurna.
- Udara berlebih (*excess air*), adalah udara yang diberikan untuk pembakaran dalam jumlah yang lebih besar dari udara teoritis yang dibutuhkan bahan bakar.
- Dalam praktek, udara berlebih sering ditunjukkan dalam prosentase terhadap udara teoritis. Jadi 10% udara berlebih berarti 110% dari udara teoritis.

Contoh: Metana (CH₄) dibakar dengan 10% udara berlebih, maka persamaan pembakarannya adalah:



3.3. Perbandingan Udara Bahan Bakar (*Air Fuel Ratio/AFR*)

- ✓ AFR adalah perbandingan antara massa udara yang disuplai dengan massa bahan bakar yang dibakar (dipergunakan).

$$AFR = \frac{m_{udara}}{m_{bb}} \quad \text{Dengan} \quad m = n M$$

n : Jumlah mol [kmol]
 M : berat molekul. [kg/kmol]
 m : massa [kg]

- ✓ AFR dapat juga dinyatakan dalam basis molar sebagai perbandingan jumlah mol udara terhadap jumlah mol bahan bakar.

Pembakaran sempurna metana (CH_4) dengan udara teoritis, maka:

$$AFR = \frac{n_{udara}}{n_{bb}} = \frac{2 + 7,52}{1} = 9,52 \text{ mol udara per mol bahan bakar}$$



Jika berat molekul udara $M = 28,9$ kg/kg mol, maka AFR dalam basis massa menjadi,

$$AFR = \frac{m_{udara}}{m_{bb}} = \frac{9,52 \cdot 28,9}{1 \cdot 16} = 17,2 \text{ kg udara per kg bahan bakar}$$

Pada mesin-mesin konversi energi proses pembakaran pada umumnya terjadi pada $AFR > AFR$ stoikiometrik (campuran miskin).

Jika $AFR < AFR$ stoikiometrik (campuran kaya).

Contoh Untuk oktana C_8H_{18} AFR stoikiometrik = 15

untuk bahan bakar hidrokarbon $C_n H_m \rightarrow AFR = \frac{m_{udara}}{m_{bb}} = \frac{(n \cdot M)_{udara}}{(n \cdot M)_C + (m \cdot M)_{H_2}}$

❖ Dalam beberapa hal sering dinyatakan perbandingan bahan bakar terhadap udara atau terhadap oksidan. Perbandingan bahan bakar-udara merupakan kebalikan dari perbandingan udara-bahan bakar.

$$FAR = \frac{1}{AFR}$$



3.4. Persamaan Umum Stoikiometri Pembakaran

- ✓ Bahan bakar secara umum mengandung unsur-unsur: Karbon, Hidrogen, Oksigen, Nitrogen dan Belerang.
- ✓ Untuk mengevaluasi kebutuhan udara pembakaran dan gas buang yang terjadi pada pembakaran dapat dilakukan pendekatan stoikiometri dengan memperhatikan prosentase dari masing-masing unsur yang terkandung dalam suatu bahan bakar, misal:

Karbon = a %

Hidrogen = b %

Oksigen = c %

Belerang = d %

Nitrogen = e %



Dengan memperhatikan berat atom masing-masing unsur dapat ditentukan formulasi fiktif dari bahan bakar, misalnya:



Misal untuk 100 kg bahan bakar, harga-harga x, y, z, p dan q dapat ditentukan dari persamaan berikut:

$$x = \frac{a}{12}, \quad y = \frac{b}{1}, \quad z = \frac{c}{16}, \quad p = \frac{d}{32}, \quad q = \frac{e}{14}$$

□ Persamaan Umum Kebutuhan Udara

- Kebutuhan udara dapat dihitung berdasarkan asumsi oksigen yang terkandung dalam bahan bakar akan atau sudah bereaksi dengan hidrogen membentuk air (H₂O).



- Dengan demikian hidrogen yang masih memerlukan udara dapat dievaluasi dengan langkah berikut:

- Dari reaksi Hidrogen dan Oksigen: $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Untuk sejumlah z kmol oksigen perlu $2z$ kmol hidrogen atau $2z$ kg Hidrogen.

Jadi Hidrogen yang masih memerlukan udara adalah sebesar $(y-2z)$ kmol atau $(y-2z)$ kg Hidrogen;

dengan demikian kebutuhan udara masing-masing unsur yang akan bereaksi, dapat dihitung berdasar reaksi sempurna, sbb:

a. Karbon

Dari reaksi: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$

Maka untuk tiap mol C, kebutuhan udara adalah: $1(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2)$

untuk x mol C, kebutuhan udara adalah: $x(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2)$



b. Hidrogen

Dari reaksi: $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ atau



Dengan cara seperti di atas diperoleh sisa hidrogen yang memerlukan udara sebesar: $(y - 2z)$; dengan demikian diperoleh jumlah udara yang dibutuhkan sebesar:

$$\frac{(y - 2z)}{4} (\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2)$$

c. Belerang

Dari reaksi: $\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$

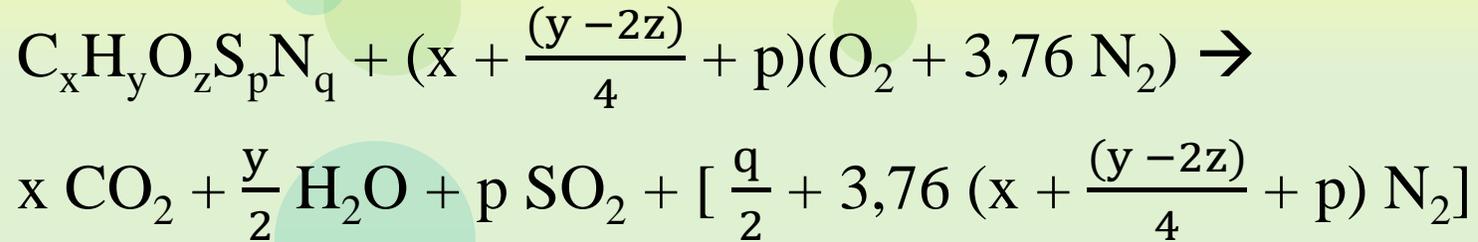
maka untuk p mol S, kebutuhan udara adalah : $p(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2)$

Dengan demikian untuk formula fiktif bahan bakar $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z\text{S}_p\text{N}_q$ akan diperoleh kebutuhan udara sebesar:

$$\left(x + \frac{(y - 2z)}{4} + p\right) (\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2)$$



Sehingga persamaan umum reaksi pembakarannya menjadi:



Contoh:



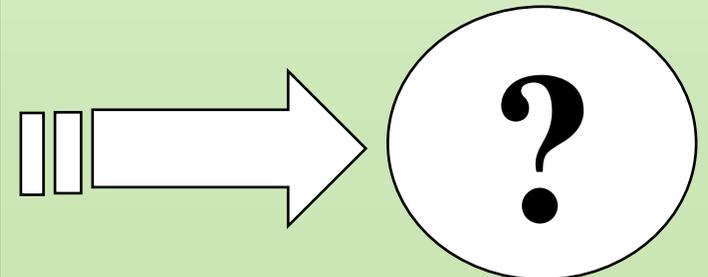
$$x = n; \quad y = \frac{m}{2}; \quad z = \frac{2x+y}{2}; \quad Q = m(bb). Q_{LHV}$$



Iso-oktan
 $Q_{LHV} = 10,6 \text{ kcal/g}$

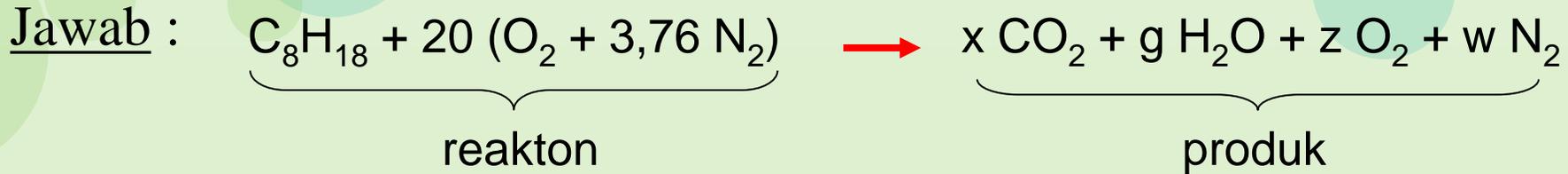
Cetana ($C_{16}H_{34}$)
 $Q_{LHY} = 10,4 \text{ kcal/g}$

Alkohol (C_2H_6O)
 $Q_{LHY} = 6,6 \text{ kcal/g}$

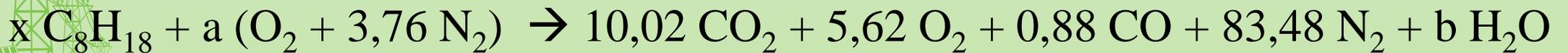
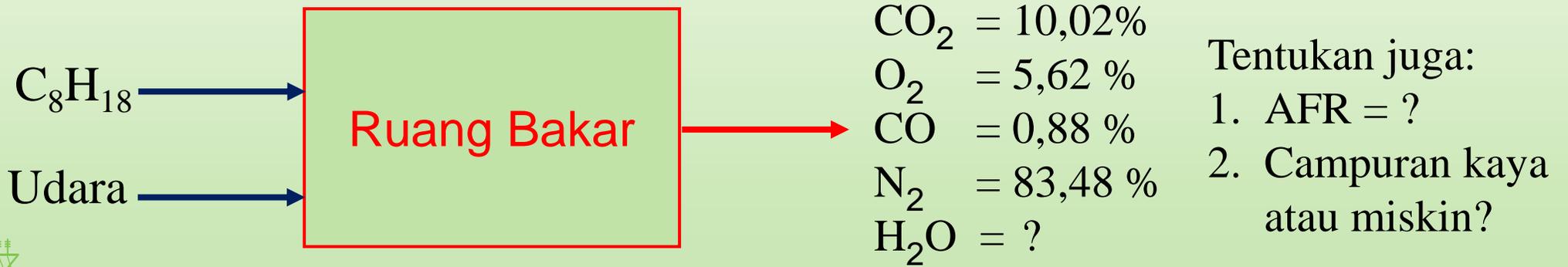


Contoh:

- 1) Satu kmol oktana (C_8H_{18}) dibakar dengan udara yang mengandung 20 kmol O_2 . Misalkan hasil pembakaran yang terjadi hanya terdiri atas CO_2 , H_2O , O_2 dan N_2 , tentukan:
- perbandingan udara bahan bakar (AFR).



- 2) x kmol oktana (C_8H_{18}) dibakar dengan udara menghasilkan gas sbb:



Equivalence Ratio, ϕ

Equivalence ratio atau perbandingan equivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara AFR aktual dengan AFR stoikiometrik.

$$\phi = \frac{\text{AFR}_{\text{aktual}}}{\text{AFR}_{\text{stoikiometri}}}$$

Dengan demikian terdapat 3 kondisi, yaitu:

$\phi < 1$: kondisi campuran kurus/miskin

$\phi = 1$: kondisi campuran stoikiometri

$\phi > 1$: kondisi campuran kaya

Dalam beberapa hal biasa dinyatakan juga suatu besaran λ , yang merupakan kebalikan dari ϕ ,

$$\lambda = \frac{1}{\phi}$$



Nilai Kalor Bahan Bakar

Nilai kalor atau Nilai pembakaran bahan bakar padat dan cair ditentukan dengan membakar 1 gram bahan bakar dalam suatu bom kalorimeter (*combustion bomb*) di bawah oksigen bertekanan. Bom dicelupkan ke dalam bak air yang diisolasi bagian luarnya (adiabatik), total kalor yang timbul selama pembakaran sampel bahan bakar ditentukan oleh peningkatan temperatur air dalam bak tersebut.

Dikenal 2 (dua) jenis nilai kalor, yaitu:

- Nilai kalor atas (*Higher heating value*), HHV [kJ/kg BB] (termasuk nilai kandungan kalor dari uap air).
- Nilai kalor bawah (*Lower heating value*), LHV [kJ/kg BB] (tanpa nilai kandungan kalor dari uap air).

$$\text{HHV} = \text{LHV} + m_{\text{uap air}} \cdot h_{\text{fg}}$$

$m_{\text{uap air}}$: Jumlah uap yang terbentuk [kg H₂O/kg BB]

h_{fg} : Entalpi penguapan dari H₂O [kJ/kg H₂O]



Untuk batu bara misalnya perbedaan HHV dan LHV adalah sekitar 1,2 MJ/kg, dipengaruhi oleh kandungan hidrogen BB dan uap air.

- Nilai kalor suatu campuran merupakan jumlah proporsional nilai kalor unsur-unsur pembentuknya.
- Nilai kalor dinyatakan dalam volumetrik atau gravimetrik.

Nilai kalor volumetrik (HV_v)

$$(HV_v)_{\text{campuran } P_r, T_r} = \sum_i (HV_{v_i})_{P_r, T_r} (\chi_i) \quad \left. \begin{array}{l} P_r \\ T_r \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{tekanan dan} \\ \text{suhu acuan} \end{array}$$

$$(HV_v)_{P,T} = (HV_v)_{P_r, T_r} \left(\frac{P_r \cdot T}{P \cdot T_r} \right)$$



Nilai kalor gravitametrik (HVm)

$$(HVm)_{P,T} = (HVv)_{P,T}(v)_{P,T}$$

v : Volume jenis = $V/m = RT/P = R_u T/PM$

R_u : Konstanta gas universal = $0,08314 \text{ bar.m}^3/\text{kmol.K}$

M : Berat molekul gas. $[\text{kg}/\text{kmol}]$

Contoh:

Hitung nilai kalor atas (HHV) baik volumetrik $[\text{kJ}/\text{m}^3]$ maupun gravimetrik $[\text{kJ}/\text{kg}]$ pada 10°C dan 3 atm untuk suatu campuran dengan komposisi gas sebagai berikut:

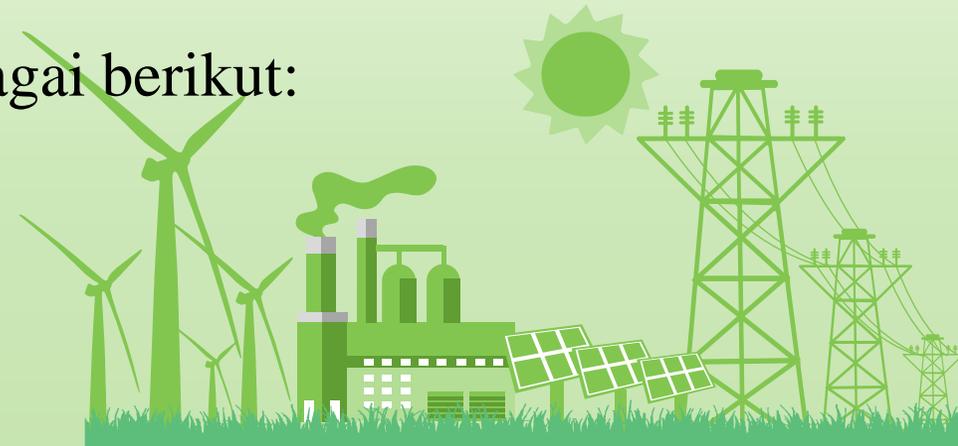
94,3 % CH_4 ; 4,2 % C_2H_6 dan 1,5% CO_2

diketahui pada kondisi 20°C dan 1 atm nilai kalor sebagai berikut:

$$(HHVv)_{\text{CH}_4} = 37.204 \text{ kJ}/\text{m}^3$$

$$(HHVv)_{\text{C}_2\text{H}_6} = 65.782 \text{ kJ}/\text{m}^3$$

$$(HHVv)_{\text{CO}_2} = 0.$$





Terima kasih

