

# ÇEV 806

## Hava Kirliliđi ve İklim Deđiřimi

### 2 - Yanma

Doç. Dr. Özgür ZEYDAN

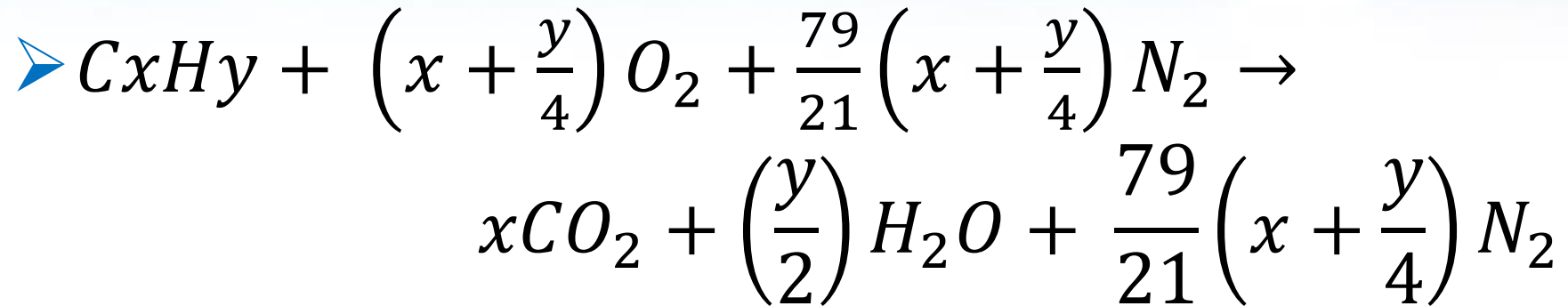
<https://ozgurzeydan.com.tr/>



# Yanma Reaksiyonları

- $C + O_2 \rightarrow CO_2$
- $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O_{(g)}$
- $S + O_2 \rightarrow SO_2$
- $H_2O_{(s)} \rightarrow H_2O_{(g)}$
- $N_2 \rightarrow N_2$
- $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$  (termal şartlara bağlı)

# CxHy hidrokarbonu için ideal yanma denklemi



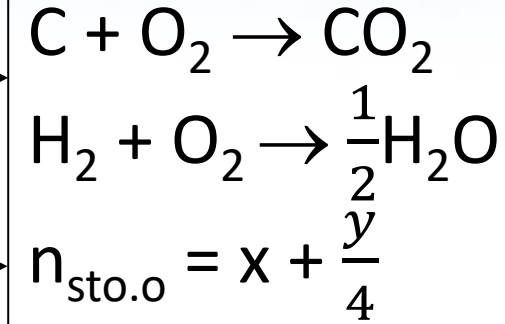
➤ Tam yanma için sisteme fazla hava verilir.

$$\text{➤ Hava fazlası (\%)} = \frac{\text{Fazla hava}}{\text{Teorik hava}} \cdot 100$$

# Yanma Odası

Yakıt (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>)

Hava



Yanma ürünleri

X mol CO<sub>2</sub>

y/2 mol H<sub>2</sub>O yanmadan

X.n<sub>kuru</sub> mol H<sub>2</sub>O havadan

0.79 .n<sub>kuru</sub> mol N<sub>2</sub> havadan

E. n<sub>kuru</sub> mol O<sub>2</sub>

$$n_{\text{kuru}} = n_{\text{sto}} \cdot \frac{(1+E)}{0.21}$$

$$n_{\text{toplam}} = n_{\text{kuru}} (1+X)$$

X: nem oranı

E: fazla hava

$$\text{Toplam mol} = x + \frac{y}{2} + n_{\text{kuru}} \cdot \left[ \left( \frac{1+E}{0.21} \right) (1 + X) - 1 \right]$$

# Yanma Odası

- Stokiyometrik oksijen ihtiyacı:  $n_{sto.o} = x + \frac{y}{4}$
- Kuru hava:  $n_{kuru} = n_{sto.o} \left( \frac{1+E}{0.21} \right)$
- Nem oranı:  $X = \left( \frac{mol H_2O}{mol\ kuru\ hava} \right)$
- Toplam hava:  $n_{toplamlava} = n_{kuru} (1 + X) = n_{sto.o} \left( \frac{1+E}{0.21} \right) (1 + X)$
- Toplam yanma ürünleri:  $n_{toplamürün} = x + \frac{y}{2} + n_{sto.o} \cdot \left[ \left( \frac{1+E}{0.21} \right) (1 + X) - 1 \right]$

# Örnek Soru - 1

- 1 mol metan ( $\text{CH}_4$ ) %20 fazla hava ile yanmaktadır. Havanın nem oranı 0.0116 mol/hava ise yanma ürünlerini hesaplayınız.
- $n_{\text{CO}_2} = x = 1 \text{ mol}$
- $n_{\text{H}_2\text{O yanma}} = \frac{y}{2} = 2 \text{ mol}$
- $n_{\text{sto.o}} = x + \frac{y}{4} = 1 + \frac{4}{4} = 2 \text{ mol}$
- $n_{\text{kuru}} = n_{\text{sto.o}} \left( \frac{1+E}{0.21} \right) = 2 \cdot \left( \frac{1+1.2}{0.21} \right) = 11.43 \text{ mol}$
- $n_{\text{toplamhava}} = n_{\text{kuru}} (1 + X) = 11.43 \cdot (1 + 0.0116) = 11.56 \text{ mol}$



# Örnek Soru - 1

- $n_{N_2} = 0.79 \cdot n_{kuru} = 0.79 \cdot 11.43 = 9.03 \text{ mol}$
- $n_{O_2} = E \cdot n_{sto.o} = 0.2 \cdot 2 = 0.4 \text{ mol}$
- $n_{H_2O \text{ toplam}} = n_{H_2O \text{ toplam}} + X \cdot n_{kuru} = 2 + 0.0116 \cdot 11.43 = 2.13 \text{ mol}$
- $n_{\text{toplamürün}} = 1 + \frac{4}{2} + 2 \cdot \left[ \left( \frac{1+0.2}{0.21} \right) (1 + 0.0116) - 1 \right] = 12.56 \text{ mol}$
- $n_{\text{toplamürün}} = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{O_2} + n_{N_2} = 1 + 2.13 + 0.4 + 9.03 = 12.56 \text{ mol}$

## Örnek Soru - 2

- 400 MW kapasiteli bir termik santral yakıt olarak pulvarize linyit kömürü kullanmaktadır. Yanma sisteminin termal verimi %60 olup, %30 fazla hava kullanılmaktadır. Kömürün kalorifik değeri 8500 kcal/kg olup elementel analizi sonraki slaytta verilmiştir.
- Buna göre oluşan baca gazı debisini ve kirletici emisyonlarını hesaplayınız.



# Örnek Soru - 2

Element	Ağırlık Yüzdesi
Karbon (C)	42.0
Hidrojen (H)	2.8
Kükürt (S)	0.7
Oksijen (O)	12.4
Azot (N)	0.7
Kül ( - )	6.9
Su (H <sub>2</sub> O)	34.8

- Bu tip sorularda yakıt **100 birim** kabul edilerek çözüm yapılır.
- Sıvı – katı yakıtlar: 100 kg
- Gaz yakıtlar: 100 mol veya 100 L (100 m<sup>3</sup>)

# 100 kg kömür için

Element	Ağırlık Yüzdesi	MA (kg/kmol)	Mol Miktarı (kmol)
Karbon (C)	42.0	12	3.53 C olarak
Hidrojen (H)	2.8	2	1.40 H <sub>2</sub> olarak
Kükürt (S)	0.7	32	0.022 S olarak
Oksijen (O)	12.4	32	0.39 O <sub>2</sub> olarak
Azot (N)	0.7	28	0.025 N <sub>2</sub> olarak
Su (H <sub>2</sub> O)	34.8	18	1.93 H <sub>2</sub> O olarak
Kül ( - )	6.9	-	-

# Yanma reaksiyonları (girenler ve ürünler)

Yanma Reaksiyonu	Girenler	Ürünler
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	3.53 kmol C 3.53 kmol O <sub>2</sub>	3.53 kmol CO <sub>2</sub>
$2H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$	1.40 kmol H <sub>2</sub> 0.70 kmol O <sub>2</sub>	1.40 kmol H <sub>2</sub> O
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	0.022 kmol S 0.022 kmol O <sub>2</sub>	0.022 kmol SO <sub>2</sub>
$N_2 \rightarrow N_2$	0.025 kmol N <sub>2</sub>	0.025 kmol N <sub>2</sub> *
$H_2O_{(s)} \rightarrow H_2O_{(g)}$	1.93 kmol H <sub>2</sub> O	1.93 kmol H <sub>2</sub> O **

\*: sadece yakıttaki azot, \*\*: havadan gelen nem hariç

# Hesaplar

- Yanma için gerekli stokiyometrik oksijen =  $3.53 + 0.70 + 0.22 = 4.25$  kmol
- Yakıt bileşimindeki mevcut oksijen =  $0.39$  kmol
- 100 kg kömürü yakmak için gerekli oksijen =  $4.25 - 0.39 = 3.86$  kmol
- Yakmada %30 fazla hava kullanılıyorsa:  $3.86 \times 1.3 = 5.02$  kmol  $O_2$
- Oksijenle beraber gelen azot miktarı =  $3.86 \times (79/21) = 18.88$  kmol
- Sisteme verilen toplam hava miktarı =  $18.88 + 5.02 = 23.90$  kmol
- Yanmadan çıkan fazla oksijen =  $5.02 - 3.86 = 1.16$  kmol
- Havanın nem içeriği (mol  $H_2O$  / mol kuru hava) %1.1 kabul edildiğinde:  
 $23.9 \times (1.1/100) = 0.26$  kmol  $H_2O$

# 100 kg yakıt için

Baca Gazı Bileşeni	Miktarı (kmol)	Kaynağı
CO <sub>2</sub>	3.53	Yanma reaksiyonu
SO <sub>2</sub>	0.022	Yanma reaksiyonu
N <sub>2</sub>	0.025	Yakıttan
N <sub>2</sub>	18.88	Havadan
H <sub>2</sub> O	1.4	Yanma reaksiyonu
H <sub>2</sub> O	1.93	Yakıttan
H <sub>2</sub> O	0.26	Havadan
O <sub>2</sub>	1.16	Havadan (fazla oksijen)
Kuru bazda toplam:	23.62 kmol baca gazı	
Yaş bazda toplam:	27.21 kmol baca gazı	

# Baca Gazındaki SO<sub>2</sub> konsantrasyonu

- Standart Şartlarda (@ 0°C ve 1 atm): 1 mol gaz = 22.4 Litre  
1 kmol gaz = 22.4 N.m<sup>3</sup>
- Standart şartlarda baca gazı hacmi:
- Kuru bazda = 23.62 kmol × (22.4 N.m<sup>3</sup>/1 kmol) = 529.1 N.m<sup>3</sup> / 100 kg yakıt
- Yaş bazda = 27.21 kmol × (22.4 N.m<sup>3</sup>/1 kmol) = 609.5 N.m<sup>3</sup> / 100 kg yakıt
- Baca gazındaki SO<sub>2</sub> konsantrasyonu:
- Hacimsel % olarak SO<sub>2</sub> = 0.022 kmol SO<sub>2</sub> / 23.62 kmol kuru baca gazı × 100 = %0.0931 SO<sub>2</sub>



# Baca Gazındaki SO<sub>2</sub> konsantrasyonu

- ppm olarak SO<sub>2</sub> konsantrasyonu = % SO<sub>2</sub> × 10000 = 0.0931 × 10000 = 931 ppm SO<sub>2</sub>
- mg/N.m<sup>3</sup> olarak SO<sub>2</sub> konsantrasyonu: (ppm × P × Ma) / (R × T)
- (931 ppm × 1 atm × 64 kg/mol) / (0.082 m<sup>3</sup>.atm/kmol.K × 273 K) = 2660 mg/N.m<sup>3</sup>
- Isıl Güç = 400 MW × 238.8 (kcal/s)/(MW) = 95520 kcal/s
- Teorik yakıt tüketimi = 95520 kcal/s / 8500 kcal/kg = 11.24 kg/s kömür = 67.43 ton/saat kömür

# Baca Gazı Kütleselel SO<sub>2</sub> Debisi

- Baca gazı hacimsel debisi:
- $(67.43 \text{ ton/saat kömür} \times 529.1 \text{ N.m}^3/100 \text{ kg kömür}) / 1000 \text{ (kg/ton)} = 356750 \text{ N.m}^3/\text{saat}$
- Baca Gazı Kütleselel SO<sub>2</sub> Debisi:
- $2660 \text{ mg/N.m}^3 \times 356750 \text{ N.m}^3/\text{saat} \times (1\text{kg}/1000000\text{mg}) = 948.96 \text{ kg/saat SO}_2$

# Diđer Kirletici Emisyonları

- Diđer kirleticilerin emisyonlarını benzer şekilde hesaplayınız.

# Kaynaklar

- Noel de Nevers, Air Pollution Control Engineering, McGraw-Hill, New York - London, 1995.