

## YANMA



Prof. Dr. Selim ÇETİNKAYA

### Yanma teorisi

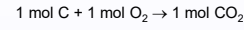
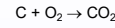
- Bir kimyasal reaksiyonda ya enerji çıkışı olmakta, ya da enerji yutulmaktadır.
- En yaygın enerji açığa çıkarma reaksiyonu, yakıtların havanın oksijeni tarafından oksitlenmesi ya da genel deyim ile yanmasıdır.
- Enerji çıkışı esas olarak yakıt ile oksijen moleküllerinin elektron bağlantı düzenlerindeki değişiminin bir sonucudur.
- Oksijen kullanılmaksızın da enerji açığa çıkarılabilmektedir. Örnek: Hidrojen (H), lityum (Li) veya bor (B) 'un flor (F) ile reaksiyonu
- Yanma işlemi, pratik ve teorik anlamda bir mühendislik işlemidir. Örneğin, termik motorlarda ve termik santrallerde meydana gelen bazı olayların anlaşılması ve açıklanabilmesi için, değişik yanma teorilerinin anlaşılması gereklidir.

### Yakıttaki yanıcı elementler

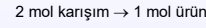
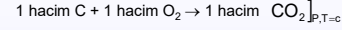
- Yakıtlardaki esas yanıcı elementler, karbon (C) ve hidrojen (H<sub>2</sub>) dir.
- Az miktarda sülfür (S) de bulunabilmektedir.
- Yanıcı olmayan elemanlar ise nitrojen, su ve küldür.
- Yakıtlar çok sayıda karmaşık hidrokarbonların karışımları olduklarından (ör. benzin 400 kadar hidrokarbonun karışımıdır), yanma eşitliklerinde yaklaşık formülleri kullanılmaktadır.
- Benzinin yaklaşık formülü C<sub>8</sub>H<sub>17</sub>
- Diesel yakıtının yaklaşık formülü C<sub>12</sub>H<sub>18</sub> - C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>

### Yanma eşitlikleri

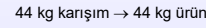
Karbonun oksijen ile tam olarak yanması sonucunda karbondioksit oluşur.



veya

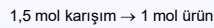
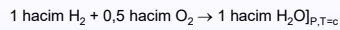
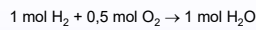
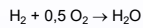


bağıl kütlelerle;

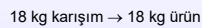
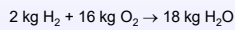


### Yanma eşitlikleri...

Hidrojenin oksijen ile tam olarak yanması sonucunda su oluşmaktadır:



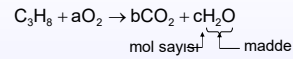
bağıl kütlelerle;



Karışım ağırlığı ürün ağırlığına eşittir. Mol veya hacimler bakımından eşitlik zorunluluğu yoktur.

### Yanma eşitlikleri...

- Bir hidrokarbon yakıt, yeterli oksijen varsa, karbonu tamamen oksitlenerek, karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) ve hidrojeni tamamen oksitlenerek suya (H<sub>2</sub>O) dönüşür.
- Bir mol propanın (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), oksijen ile tam yanma kimyasal eşitliği:



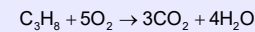
Elementler var veya yok edilemez, öyleyse;

$$C \text{ dengesi: } b=3$$

$$H \text{ dengesi: } 2c=8 \rightarrow c=4$$

$$O \text{ dengesi: } 2b + c = 2a \rightarrow a=5$$

Böylece reaksiyon:



### Bazı elementlerin özellikleri

| Element         | Moleküler sembol | Bağıl moleküler kütle |
|-----------------|------------------|-----------------------|
| Hidrojen        | H <sub>2</sub>   | 2                     |
| Karbon          | C                | 12                    |
| Nitrojen (azot) | N <sub>2</sub>   | 28                    |
| Oksijen         | O <sub>2</sub>   | 32                    |
| Sülfür (kükürt) | S                | 32                    |

7

### Kuru hava

- Kuru hava hacimsel olarak % 20,99 oksijen, % 78,03 nitrojen (azot), % 0,94 argon, % 0,03 karbondioksit, % 0,01 hidrojen ve daha az miktarlarda neon, helyum ve kripton oluşmaktadır.
- Kütle analizi, hacimsel ve molar analizin bir sonucudur ve bu yoldan havanın moleküler kütlesi belirlenebilir.
- Havadaki nem meteorolojik koşullara bağlı olarak değişkendir. Ancak, genellikle önemsiz ve ihmal edilecek düzeydedir.

#### Saf ve kuru havanın analiz sonuçları

| Gaz                           | Hacimsel %    | Moleküler kütle kg | Bağıl kütle kg | Kütle yüzdesi |
|-------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------------|
| Oksijen O <sub>2</sub>        | 20,99         | 32                 | 6,717          | 23,19         |
| Nitrojen N <sub>2</sub>       | 78,03         | 28,016             | 21,861         | 75,47         |
| Argon Ar                      | 0,94          | 39,944             | 0,376          | 1,30          |
| Karbondioksit CO <sub>2</sub> | 0,03          | 44,003             | 0,013          | 0,04          |
| Hidrojen H <sub>2</sub>       | 0,01          | 2,016              | 0,0            | 0,0           |
| <b>Kuru hava</b>              | <b>100,00</b> |                    | <b>28,967</b>  | <b>100,00</b> |

### Kuru hava...

- Hesaplamlarda havanın hacimsel olarak % 21 oksijen ve % 79 nitrojenden oluştuğu varsayılmakta (mol oranı) ve sonuçlar gerçek değerlere oldukça yakın çıkmaktadır.

$$\frac{n_{N_2}}{n_{O_2}} = \frac{n_{N_2}}{n_{tot}} \cdot \frac{n_{tot}}{n_{O_2}} = \frac{y_{N_2}}{y_{O_2}} = \frac{0,79}{0,21} = 3,76$$

- Yanma işleminde, hava ile sağlanan her mol O<sub>2</sub> ile 3,76 mol N<sub>2</sub> bulunur. (1600°C'nin altında N<sub>2</sub> pasif bileşen olduğundan, yanmaya katılmaz.
- Havanın moleküler kütlesi:

$$\begin{aligned} \bar{M}_a &= \sum_{i=1}^n y_i \bar{M}_i = y_{O_2} \cdot \bar{M}_{O_2} + y_{N_2} \cdot \bar{M}_{N_2} \\ &= 0,21(32) + 0,79(28) = 28,84 \text{ kg/kmol} \end{aligned}$$

9

### ÖRNEK 1

Ağırlık olarak % 85 karbon ve % 15 hidrojenenden oluşan benzin ve diesel yakıtının yaklaşık formüllerini belirleyiniz.

### ÇÖZÜM

C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> biçimindeki formülle ağırlık analizi yapılabilir.

$$12x = 85, \quad x = 7,08$$

$$1y = 15, \quad y = 15$$

Buradan;

C<sub>7,08</sub>H<sub>15</sub> formülü yazılabilir. İstenirse, yukarıdaki değerler 1,13 ile çarpılarak C<sub>8</sub>H<sub>17</sub>

veya 1,7 ile çarpılarak C<sub>12</sub>H<sub>26</sub> formülü elde edilebilir.

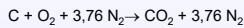
Bunlardan birincisi benzin, ikincisi ise diesel yakıtına karşılık iki formüldür.

### Hava ile yanma

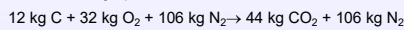
Yanma için genellikle, saf oksijen yerine, havanın oksijeninden yararlanılmaktadır.

Hava moleküler nitrojen N<sub>2</sub> içerir. Havadaki nitrojen ve diğer gazlar düşük sıcaklıkta iken reaksiyondan etkilenmez ve pasif **inert** olarak değerlendirilir.

Oksijen kuru havadan sağlandığında, yanmaya katılan 1 mol oksijen ile birlikte 3,76 mol nitrojen bulunmaktadır. Örneğin;



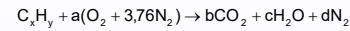
moleküler kütleleri ile çarpılarak;



yazılabilir.

### Yanma stoikiyometrisi

- Bir genel hidrokarbonun (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) hava ile tam reaksiyonu:

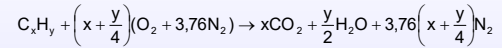


$$C \text{ dengesi: } x = b$$

$$H \text{ dengesi: } y = 2c \rightarrow c = y/2$$

$$O \text{ dengesi: } 2a = 2b + c \rightarrow a = b + c/2 \rightarrow a = x + y/4$$

$$N \text{ dengesi: } 2(3,76)a = 2d \rightarrow d = 3,76a \rightarrow d = 3,76(x + y/4)$$



Kimyasal olarak doğru oranda kullanılan hava oranına **teorik** veya **stoikiyometrik** hava oranı denilmektedir.

Bu eşitlik, **stoikiyometrik** yakıt ve hava oranlarını tanımlar.

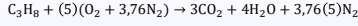
### Yanma stoikiyometrisi...

Örnek: propanın ( $C_3H_8$ ) tam yanması:

$$x = 3$$

$$y = 8$$

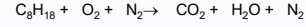
$$a = x + y/4 = 3 + 8/4 = 5$$



### Yanma eşitliğinin işlem basamakları

Yanma eşitliğinin kurulmasına ilişkin işlem basamakları

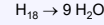
Örnek  $C_8H_{18}$ 'in tam yanması



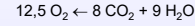
Karbon dengesi ( $C_{karşım} = C_{ürün}$ ):



Hidrojen dengesi ( $H_{karşım} = H_{ürün}$ ):



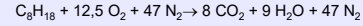
Oksijen dengesi ( $O_{ürün} = O_{karşım}$ ):



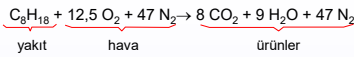
Nitrojen dengesi ( $N_2 = 3,76 O_2$ ):



Bu durumda komple eşitlik;



### Hava/yakıt oranı



Reaksiyonun hava/yakıt mol oranı;

$$\frac{a}{f} = \frac{12,5 + 47}{1} = 59,5 \text{ kmol hava / kmol yakıt}$$

kütle oranı

$$\frac{a}{f} = \frac{\text{hava kütlesi}}{\text{yakıt kütlesi}} = \frac{12,5 \times 32 + 47 \times 28}{8 \times 12 + 1 \times 18} = \frac{15,1}{1}$$

Yakıt oksijen içeriyorsa, işlemler burada açıklananlardan farklıdır. Sadece yakıtın bünyesinde bulunan oksijen kadar daha az oksijen gereklidir.

### Hava/yakıt oranı...

$C_xH_y$  yakıtın stoikiyometrik hava/yakıt kütle oranı:

$$(A/F)_s = \frac{m_a}{m_f} = \frac{\sum n_i M_i}{\sum n_i M_i} = \frac{\left(x + \frac{y}{4}\right) M_{O_2} + 3,76 \left(x + \frac{y}{4}\right) M_{N_2}}{x M_C + y M_H}$$

İlgili moleküler kütleleri yerine yazıp, üst ve altı x e bölerek, sadece yakıttaki hidrojen atomlarının karbon atomlarına oranına ( $y/x$ ) bağlı bir ifade elde edilebilir:

$$(A/F)_s = \frac{1}{(F/A)_s} = \frac{\left(1 + \frac{y/x}{4}\right)(32 + 3,76 \cdot 28)}{12 + (y/x) \cdot 1}$$

Örneğin;

$$\text{Metan (CH}_4\text{) için, } y/x = 4 \rightarrow (A/F)_s = 17,2$$

$$\text{Oktan (C}_8\text{H}_{18}\text{) için, } y/x = 2,25 \rightarrow (A/F)_s = 15,1$$

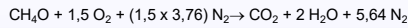
Not: Yukarıdaki eşitlik sadece stoikiyometrik karışımlara uygulanır.

16

### ÖRNEK 2

Metanol ( $CH_3OH$  veya  $CH_4O$ ) un, tam yanmasına ilişkin kimyasal eşitliği yazarak, hava/yakıt mol ve kütle oranlarını hesaplayınız.

### ÇÖZÜM



Reaksiyonun hava/yakıt mol oranı;

$$\frac{a}{f} = \frac{1,5 + 5,64}{1} = 7,14 \text{ kmol hava / kmol yakıt}$$

kütle oranı

$$\frac{a}{f} = \frac{\text{hava kütlesi}}{\text{yakıt kütlesi}} = \frac{1,5 \times 32 + 5,64 \times 28}{12 + 4 + 16} = \frac{6,44}{1}$$

### Problem

Toluenin ( $C_7H_8$ ) tam yanmasına ilişkin kimyasal eşitliği yazarak, hava/yakıt mol ve kütle oranlarını hesaplayınız.

## Problem

Propanol ( $C_3H_7OH$  veya  $C_3H_8O$ ) un, tam yanmasına ilişkin kimyasal eşitliği yazarak, hava/yakıt mol ve kütle oranlarını hesaplayınız.

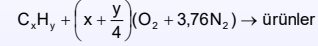
## Hava fazlalık katsayısı

■ **Hava fazlalık katsayısı**  $\lambda$ , bir karışımın stoikiyometrik, yakıt fakir veya yakıt zengin olduğunu belirtmede kullanılır.

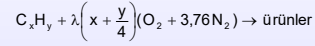
$$\lambda = \frac{(A/F)_{\text{karışım}}}{(A/F)_s}$$

|                            |               |
|----------------------------|---------------|
| Stoikiyometrik             | $\lambda = 1$ |
| Hava fazla (yakıt fakir)   | $\lambda > 1$ |
| Hava noksan (yakıt zengin) | $\lambda < 1$ |

Stoikiyometrik karışım:



Stoikiyometrik olmayan karışım:



## Hava fazlalık katsayısı...

■ **Hava fazlalık katsayısı**  $\lambda$ 'nın yerine bazen **equivalence oranı**  $\Phi$  ( $=1/\lambda$ ) ifadesi de kullanılmaktadır.

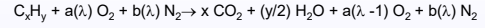
$$\phi = \frac{(F/A)_{\text{karışım}}}{(F/A)_s}$$

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| Stoikiyometrik             | $\Phi = 1$ |
| Yakıt fazla (hava fakir)   | $\Phi > 1$ |
| Yakıt noksan (hava zengin) | $\Phi < 1$ |

- Yanmada ne kadar hava kullanıldığını belirtmede başka ifadeler de kullanılmaktadır. Örneğin;
- % 120 stoikiyometrik hava = % 120 teorik hava = % 20 fazla hava

## Hava fazlalığında yanma

Hava fazlalığı ile yanmanın kimyasal eşitliğinde tam yanma eşitliği yazılarak, gerekli olandan fazla hava reaksiyona girmediğinden sadece bileşenlerde ve ürünlerde gösterilir.



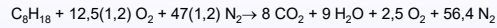
$\lambda$ : hava fazlalık katsayısı (hava fazlalığında  $\lambda > 1$ )

22

## ÖRNEK 3

Oktan ( $C_8H_{18}$ ) in, %120 teorik hava ile yanmasına ilişkin kimyasal eşitliği yazarak, ürünlerin mol analizini yapınız ve 1 bar basınçtaki ürünler arasındaki suyun kısmi basıncını hesaplayınız.

## ÇÖZÜM



Ürünlerin mol toplamı:

$$8 + 9 + 2,5 + 56,4 = 75,9$$

Ürünlerin mol analizi:

$$CO_2 = 8/75,9 = \% 10,54$$

$$H_2O = 9/75,9 = \% 11,86$$

$$O_2 = 2,5/75,9 = \% 3,29$$

$$N_2 = 56,4/75,9 = \% 74,31$$

T o p l a m: %100,00

Suyun kısmi basıncı:

$$100(0,1186) = 11,9 \text{ kPa}$$

## Problem

Dodekanın ( $C_{12}H_{26}$ ) %130 teorik hava ile yanmasına ilişkin kimyasal eşitliği yazarak, ürünlerin mol analizini yapınız ve 1,1 bar basınçtaki ürünler arasındaki nitrojenin kısmi basıncını hesaplayınız.

#### ÖRNEK 4

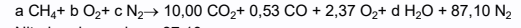
Metan (CH<sub>4</sub>), atmosferik hava ile yakılmış ve kuru bazda aşağıdaki ürünler elde edilmiştir:

|                 |          |
|-----------------|----------|
| CO <sub>2</sub> | % 10,00  |
| O <sub>2</sub>  | % 2,37   |
| CO              | % 0,53   |
| N <sub>2</sub>  | % 87,10  |
|                 | % 100,00 |

Yanma eşitliğini yazarak, hava/yakıt oranını, teorik hava/yakıt oranını ve hava fazlalık katsayısını hesaplayınız.

#### ÇÖZÜM

Ürünlerin analizinden (analizin kuru bazda olduğu hatırla tutularak):



Nitrojen dengesi:  $c = 87,10$

Tüm nitrojen havadan elde edildiğine göre, oksijen dengesi:

$$\frac{c}{b} = 3,76 \quad b = \frac{87,1}{3,76} = 23,16$$

Karbon dengesi:

$$a = 10,00 + 0,53 = 10,53$$

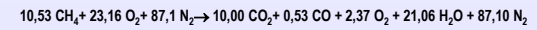
Hidrojen dengesi:

$$d = 2a = 10,53 \cdot 2 = 21,06$$

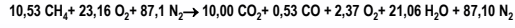
Oksijen dengesi diğer bir yoldan kontrol edilebilir:

$$b = 10,00 + \frac{0,53}{2} + 2,37 + \frac{21,06}{2} = 23,16$$

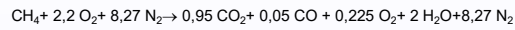
a, b, c ve d değerleri yerlerine yazılarak,



#### ÇÖZÜM...



1 kmol yakıt için yeniden düzenlemek üzere, her terim 10,53'e bölünür.



Reaksiyonun hava/yakıt mol oranı

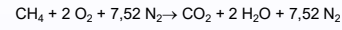
$$\frac{a}{f} = \frac{2,2 + 8,27}{1} = 10,47 \text{ kmol hava / kmol yakıt}$$

ağırlık oranı ise

$$\frac{a}{f} = \frac{10,47 \times 28,97}{1 \times 12 + 4 \times 1} = \frac{18,97}{1} \text{ kg hava / kg yakıt}$$

#### ÇÖZÜM...

Teorik ağırlık oranı ve hava fazlalık katsayısı teorik yanma eşitliği yardımıyla belirlenebilir.



$$\frac{a}{f} = \frac{(2 + 7,52) \times 28,97}{16} = \frac{17,23}{1}$$

ve hava fazlalık katsayısı

$$\lambda = \frac{18,87}{17,23} = 1,1$$

#### Problem

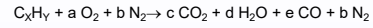
Propan gazı (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), atmosferik hava ile yakılmış ve kuru bazda aşağıdaki ürünler elde edilmiştir:

|                 |          |
|-----------------|----------|
| CO <sub>2</sub> | % 12,0   |
| O <sub>2</sub>  | % 1,0    |
| CO              | % 0,5    |
| N <sub>2</sub>  | % 86,5   |
|                 | % 100,00 |

Yanma eşitliğini yazarak, hava/yakıt oranını, teorik hava/yakıt oranını ve hava fazlalık katsayısını hesaplayınız.

#### Noksan hava ile yanma

Hava azlığında karbon monoksit yanma



■ Karbon dengesi

$$c + e = x \rightarrow e = x - c$$

■ Hidrojen dengesi

$$d = y/2$$

■ Oksijen dengesi

$$c + \frac{d}{2} + \frac{e}{2} = a$$

d ve e değerleri yerine yazılırsa;

$$c + \frac{y}{4} + \frac{x-c}{2} = a$$

$$c + \frac{3}{4}x - \frac{1}{2}c = a$$

$$\frac{1}{2}c - a = -\frac{3}{4}x$$

$a = \lambda a_{sto}$  yerine yazılırsa;

$$\frac{1}{2}c = -\frac{3}{4}x - \lambda a_{sto}$$

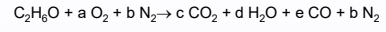
x ve λ değerleri yerine yazılarak c, e ve b değerleri belirlenir.

### ÖRNEK 5

- Etanolün % 10 hava azlığı ile yanmasına ilişkin kimyasal eşitliği (ürünlerde fazladan sadece karbon monoksit bulunması koşulunda) yazınız.

### ÇÖZÜM

- Etanolün % 10 hava azlığı ile yanması

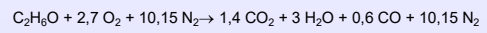


- Karbon dengesi  $c + 1,5 + 1 - 0,5c - 0,5 = a$   
 $c + e = 2 \rightarrow e = 2 - c$   $0,5c - a = -2$
- Hidrojen dengesi  $d = 3$   $a = 0,9 a_{sto}$  ve  $a_{sto} = 3$  olduğundan;

- Oksijen dengesi  $a = 3 \times 0,9 = 2,7$   
 $c + \frac{d}{2} + \frac{e}{2} = a + \frac{1}{2}$   $0,5c = -2 + 2,7 = 0,7$   
 $c = 1,4$   
 $e = 2 - c = 0,6$

d ve e değerleri yerine yazılırsa

$$c + \frac{3}{2} + \frac{2-c}{2} = a + \frac{1}{2} \quad b = 3,76 \quad a = 10,15$$



### Problem

- Heptanın % 15 hava azlığı ile yanmasına ilişkin kimyasal eşitliği (ürünlerde fazladan sadece karbon monoksit bulunması koşulunda) yazınız.

SON