

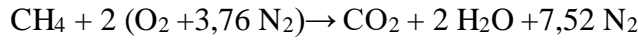
6.7 EKSİK YANMA

Yanma ortamında yeteri kadar oksijen olmadığı takdirde CO oluşur. Bu durumda oluşan gaz bileşenlerini hesaplayabilmek için aslında reaksiyon kinetiği ve termokimyasal denge hesaplamaları yapmak gerekmektedir. Ancak bu tür hesaplamalar oldukça külfetli olabilir ve genelde bir bilgisayar programı yapmak veya kullanmak gerekir. Oluşan gaz bileşenlerini stokiyometrik olarak hesaplayabilmek için şu kabul (eksik havanın az olması halinde) yaklaşık olarak kullanılabilir:

Önce yakıtın içeriğindeki H tamamen yanarak H₂O' na dönüşür. Ardından C yanarak CO oluşturur. Geri kalan O₂, CO'ın yettiği kadar kısmını CO₂'e dönüştürür.

Örnek 6.7: Tamamı metan olduğu varsayılan doğal gaz % 10 eksik hava ile ($\lambda=0,9$) yakıldığına göre (örneğin ayar bozukluğu sebebi ile) oluşan baca gazı bileşenlerinin konsantrasyonlarını hesaplayınız.

Metan için stokiyometrik reaksiyon



olduğuna göre $O_{\min}=2 \text{ m}^3 \text{ O}_2 / \text{m}^3 \text{ Y}$ olur. Buna göre eksik yanmada $\lambda.O_{\min}=0,9.2=1,8 \text{ m}^3 \text{ O}_2 / \text{m}^3 \text{ Y}$ reaksiyona girmektedir. Bu durumda reaksiyon



olur. Bilinmeyen a ve b katsayıları C ve O korunumundan hesaplanabilir:

C korunumu: $a+b=1$

O korunumu: $a+2b+2=3,6$

İki denklem birbirinden çıkarılırsa $b=0,6$, ardından da $a=0,4$ bulunur. Oluşan gaz bileşenleri ve miktarları aşağıda tablo halinde gösterilmiştir.

i	n_i	$y_i = n_i/n$ [%]
H ₂ O	2,0	20,5
CO	0,4	4,1
CO ₂	0,6	6,1
N ₂	6,768	69,3
$n = \sum n_i$	9,768	100

Yukarıdaki gibi bir denklem sistemi çözmeden, eksik yanma sonucu oluşan CO ve CO₂ miktarlarını kısa yoldan hesaplamak amacıyla şöyle bir yol izlenebilir:

Eksik olan her O₂ molekülünün 2 katı CO oluşacaktır (Her eksik O atomu yerine bir CO oluşacağından). Böylece oluşacak olan CO₂ de stokiyometrik reaksiyonda oluşacak miktardan CO mol sayısı kadar az olacaktır:

$$n_{CO}=2(1-\lambda) O_{\min}$$

$$n_{CO2} = n_{CO2, \text{stokiyometrik}} - n_{CO}$$

Bu yol yukarıdaki örnek için uygulanırsa

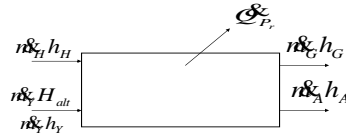
$$n_{CO}=2(1-0,9) 2 = 0,4 \text{ kmolCO/kmolY}$$

$$n_{CO2} = 1-0,4=0,6 \text{ kmolCO/kmolY}$$

elde edilip, görüldüğü gibi yukardaki ile aynı sonuç ortaya çıkmaktadır.

6.8 YANMA SICAKLIĞININ HESAPLANMASI

Yanma esnasında yakıt (Y) ve hava (H) yanma ortamına girmekte, yanma sonucu oluşan gaz (G) ve kül (A) yanma ortamını terk etmektedir. Her biri sıcaklıklarından dolayı entalpi (h_i) içermektedir. Ayrıca yakıt kimyasal enerji (H_{alt}) içermektedir. Yanma sonucu oluşan ısınn bir kısmı proses ısısı (Q_{pr}) olarak kullanılmaktadır. Bu enerjileri dikkate alarak enerjinin korunumu prensibinden yanma ortamını terk eden gazın sıcaklığı t_G hesaplanabilir. Şekil 6.15 yanma ortamına giren ve çıkan enerjileri göstermektedir. Proses ısısı kullanılmıyor ise veya herhangi bir ısı transferi yoksa $Q_{pr}=0$ olur. Böylece ısı transferi olmaksızın hesaplanan sıcaklık teorik yanma sıcaklığı olur.



Şekil 6.15: Yanma esnasında enerji dengesi

Enerjinin korunumu prensibinden

$$n_H h_H + n_Y h_Y + n_Y H_{alt} = n_G h_G + n_A h_A - Q_{pr} \quad (6.39)$$

olur. Burada

$$n_G = n_H + n_Y - n_A \quad (6.40)$$

eşitliği geçerlidir. Bir i bileşeninin entalpisi

$$h_i = c_{pi} t_i \quad (6.41)$$

olup t sıcaklık (birim $^{\circ}\text{C}$), c_p (birim kJ/kgK) özgül ısı (spesifik ısı) kapasitesidir. $n_A h_A \approx 0$ ve $Q_{pr} = 0$ kabul edilerek eşitliğin her iki tarafı $m_H c_{pH}$ ile bölünürse

$$\frac{m_H c_{pH} t_H}{m_H c_{pH}} + \frac{m_Y c_{pY} t_Y}{m_H c_{pH}} + \frac{m_Y H_{alt}}{m_H c_{pH}} = \frac{(m_H + m_Y) c_{pH} t_G}{m_H c_{pH}}$$

olur. Buradan

$$t_G = \frac{t_H + \frac{1}{H} \cdot \frac{c_{pY}}{c_{pH}} t_Y + \frac{1}{H c_{pH}} H_{alt}}{\left(1 + \frac{1}{H}\right) \frac{c_{pG}}{c_{pH}}} \quad (6.42)$$

bulunur. Yanma gazlarının özgül ısı kapasitesi c_{pG} , bileşenlerin özgül ısı kapasitelerinden ve bileşenlerin konsantrasyonlarından (y_i) hesaplanabilir.

Özgül ısılar sıcaklığa bağlı olup $c_{pi} = c_{pi}(t)$ 'dir. Gazların ayrı ayrı c_p ' leri standart data kitaplarında tablolar halinde bulunurlar veya polinomlar şeklinde verilirler. Bu bakımdan c_{pG} önceden direkt olarak hesaplanamaz. Sıcaklık ve özgül ısı kapasite ancak ardışık hesaplama ile (iterasyon ile) bulunabilir:

1. t_G tahmin edilir,
2. $c_{pG}(t_G)$ hesaplanır,
3. t_G hesaplanır.

3. adımda hesaplanan t_G 1. adımda tahmin edilen t_G 'den farklı olacağından, hesap 1. adımdan itibaren yeni bulunan t_G ile tekrarlanır. Bu işlem $\varepsilon \ll 1$ olmak üzere

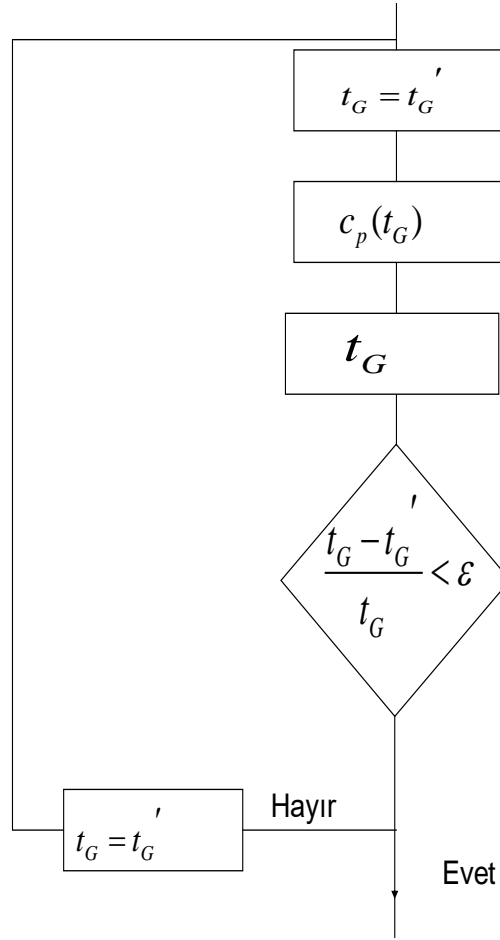
$$\frac{t_G - t_G'}{t_G} \ll \varepsilon$$

şartı gerçekleşinceye kadar tekrarlanarak t_G istenen duyarlılıkta hesaplanabilir. Bu iterasyon işleminin akış şeması şekil 6.16'da görülmektedir.

Tekrar yukarıda türetilen yanma sıcaklığı t_G eşitliğine dönelim. Bu eşitlik bazı varsayımlarla basitleştirilebilir. Yanma ürünleri (gazları) ile havanın büyük kısmını azot teşkil ettiğinden, bunların bazı özellikleri birbirine yakındır. Bu bakımdan yanma gazları ile havanın özgül ısı değerleri $c_{pG} \approx c_H$ kabul edilebilir. Yakıtın girişteki entalpisi, diğer terimlere oranla ihmal edilebilir. Ayrıca paydada parantez içindeki $1 \gg 1/H$ olduğundan $1/H$ ihmal edilebilir. Böylece

$$t_G = t_H + \frac{H_{alt}}{c_{pH} H} = t_H + \frac{H_{alt}}{c_{pH} \lambda H_{min}} \quad (6.43)$$

olur. c_{pH} , $H_{min} \approx$ sabit kabul edilirse bu eşitlikten yanma sıcaklığının yakıtın alt ısı değeri ve yanma havası sıcaklığına doğru orantılı, buna karşılık hava fazlalık katsayısı λ ile ters orantılı olarak değiştiği görülür.



Şekil 6.16: Yanma sıcaklığının hesaplanması için akım şeması

Örnek 6.8: Benzinin hava fazlalığı olmadan ($\lambda=1$), tam yanması sonucu oluşabilecek teorik yanma sıcaklığını hesaplayınız. Havanın girişteki sıcaklığı $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ olsun. Benzinin minimum hava ihtiyacı $H_{\min} \approx 15\text{ kgHava/kgY}$ tır. Alt ısı değeri ise $\approx 42\text{ MJ/kg}$ 'dir.

Önce basitleştirilmiş eşitliği kullanalım. Havanın özgül ısı değeri $c_{pH}(20\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ kabul edilerek

$$t_G = 20 + \frac{1}{1 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} 15} \cdot 42 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2820^{\circ}\text{C}$$

bulunur. Bu değer basitleştirmeler sebebiyle gerçek değerden çok yüksektir.

Yakıt entalpisi ihmal edilerek ve $c_{pG} = 1,2\text{ kJ/kgK}$ kabul edilerek basitleştirilmemiş formül kullanılırsa

$$t_G = \frac{20 + \frac{1}{15 \cdot 1} \cdot 42 \cdot 10^3}{\left(1 + \frac{1}{15}\right) \cdot \frac{1,2}{1}} \approx 2187^0 C$$

olur. Bu sıcaklık gerçek sıcaklığa yakın olmakla birlikte, aslında yanma ortamındaki kayıplar (radyasyon) ve tam yanmama nedeniyle genellikle elde edilmez. Daha gerçekçi bir hesaplama yapmak için termokimyasal denge durumunu da dikkate almak gerekmektedir. Bu bakımdan yukarıda açıklanan yöntemde önemli bir basitleştirme yapıldığı unutulmamalıdır.

Yukarıda belirtildiği gibi özgül ısılar polinomlar şeklinde ilgili literatürde mevcuttur. Örneğin

$$c_p = a_0 + a_1 T + a_2 T^2$$

olup katsayılar Tablo 6.5’de bazı gazlar için sunulmuştur. Burada T mutlak sıcaklıktır (birimi K). Daha yüksek dereceden polinomlar da mevcuttur. Tablo 6.6 ise bazı yakıtların ısı değerlerini göstermektedir.

Tablo 6.5 : Özgül ısı polinomunun katsayıları [16]

Gaz	a_0	$a_1 \cdot 10^3$	$a_2 \cdot 10^6$
O ₂	0,799	45,5-46,5	-0,130
N ₂	0,964	0,208	-0,010
Hava	0,924	0,255	-0,038
CO	0,948	0,270	-0,040
NO	0,897	0,288	-0,058
H ₂ O	1,658	0,608	0,011
CO ₂	0,602	0,963	-0,325
SO ₂ O	0,454	0,654	-0,248
CH ₄	0,837	4,810	-1,170

Tablo 6.6: Bazı yakıtların ısı değerleri [3]

Yakıt	Üst ısı değer (MJ/kg)	Alt ısı değer (MJ/kg)
Benzin	45,5-46,5	41,5-42,5
Dizel	45,0-46,5	41,0-42,5
Etanol (C ₂ H ₅ OH)	29,7	26,8
Metan (CH ₄)	56,0	50,4
Etan (C ₂ H ₆)	51,2	47,4
Propan (C ₃ H ₈)	49,9	46,1
Bütan (C ₄ H ₁₀)	49,4	45,7
Asetilen (C ₂ H ₂)	57,8	48,5