

YANMA

DERS NOTLARI

Mustafa EYRİBOYUN



Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
2009

NOTLAR:

- Değişik kaynaklardan derlenmiştir. Metin içinde ancak çok özel kaynaklara değinilmiştir. Bunların dışında kullanılan kaynaklar, notların sonunda “Değinilen Kaynaklar” başlığı altında gösterilmiştir. Okuyucu bu kaynaklardan daha geniş bilgiye ulaşabilir.
- Bu ders notlarında ondalık ayraç olarak nokta (.), binlik ayraç olarak virgül (,) kullanılmıştır:
 - Örnek: $1/2 = 0.5$
 - $1/3 = 0.333$

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}^o kJ/(kmol·K)
300	9,341	6,939	213.915

Bu tabloda, $T = 300$ K için

$$\bar{h} = 9341 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{s}^o \cong 213.92 \text{ kJ/(kmol·K)}$$

alınabilir.

CO₂'in mol kütlesi: $M_{CO_2} = 44.01 \text{ kg/kmol}$

CO₂'in standart oluşum entalpisi $\bar{h}_f^o = -393,520 \text{ kJ/kmol}$

BAZI SABİTLER:

Evrensel gaz sabiti : $R_u = 8.314 \text{ [kJ/(kmol·K)]}$
 $R_u = 8.314 \text{ [kPa·m}^3\text{/(kmol·K)]}$

Gaz sabiti : $R = R_u / M \text{ [kJ/(kg·K)]}$ veya $\text{[kPa·m}^3\text{/(kg·K)]}$

YAZARKEN!

Birimlerin yazılışı uluslararası standartlarca belirtildiği şekildedir.

Örnek: Kilogram : **kg** (Kg yanlış)
 Miliwatt : **mW** (MW yanlış. **Dikkat!** $1 \text{ MW} = 10^9 \text{ mW}$)
 Kilojoule : **kJ** (kj veya KJ yanlış)

Bir isme atfedilen birimler açık olarak yazılacak ise baş harfi küçük olmalıdır:

Örnek: Joule (isim) birim olarak kullanıldığında; **J** ya da **joule** (Joule yanlış)
 Watt (isim) birim olarak kullanıldığında; **W** ya da **watt** (Watt yanlış)

İÇİNDEKİLER

1 GİRİŞ.....	1
2 GAZ KARIŞIMLARI	3
2.1 Gaz Karışımları için Temel Tanımlar	3
2.2 Bir gaz karışımının P - v - T davranışı.....	5
2.3 Gaz karışımlarının özellikleri	6
3 GAZ-BUCHAR KARIŞIMLARI	7
3.1 Kuru Hava ve Nemli Hava	7
3.2 Özgül Nem ve Bağıl Nem	8
3.3 Yanma Denklemine Nemli Havanın Kullanılması	9
3.4 Çiğ Noktası Sıcaklığı	10
4 YAKITLAR.....	
4.1 Yakıtların Özellikleri	
4.2 Gaz yakıtlar	
4.2.1 Doğal Gaz	
4.2.2 Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG)	
4.3 Sıvı Yakıtlar.....	
4.4 Katı yakıtlar	
5 KİMYASAL TEPKİMELELER	
5.1 Yanma	
5.1 Teorik ve Gerçek Yanma İşlemleri.....	
5.2 Oluşum Entalpisi ve Yanma Entalpisi.....	
5.3 Kimyasal Tepkimeye Giren Sistemlerin Birinci Yasa Çözümlemesi.....	
5.3.1 Sürekli akışlı açık sistemler	
5.3.2 Kapalı sistemler	
5.4 Adyabatik Alev Sıcaklığı.....	
5.5 Tepkimeye Giren Sistemlerin Entropi Değişimleri	
5.6 Kimyasal Tepkimeye Giren Sistemlerin İkinci Yasa Çözümlemesi	
6 KİMYASAL DENGE	
6.1 Kimyasal Denge Kıstası	
6.2 Mükemmel Gaz Karışımları için Denge Sabiti	
6.3 Mükemmel Gaz Karışımlarının Denge Sabiti K_p Üzerinde Bazı Gözlemler	
Eşzamanlı Kimyasal Tepkimelerin Kimyasal Dengesi	
Kimyasal Denge Sabiti K_p 'nin Sıcaklıkla Değişimi	
FAZ DENGESİ	
Tek Karışanlı Sistemin Faz Dengesi	
Faz Kuralı	
Çok Karışanlı Sistemin Faz Dengesi	
Sıvılaştırılmış Petrol Gazlarının (LPG) Karışımları	

KİMYASAL KİNETİK	
TAŞINIM KAVRAMI	
KORUNUM DENKLEMLERİ	
ALEVİN YAPISI	
Laminer Difüzyon Alevi	
Laminer Önkarişımli Alev	
Türbülanslı Akışlı Yanma	
ALEV HIZI /YANMA HIZI	

YANMA
DERS NOTU
(TASLAK)
M. Eyriboyun

1 GİRİŞ

Yanma, yakıtların oksijenle girdikleri kimyasal tepkimenin özel adıdır. Bu tepkime sırasında yakıt içindeki kimyasal enerji açığa çıkar. Açığa çıkan enerjinin büyük kısmı ısı (sıcak gazlar), geri kalan küçük bir kısmı ise elektromanyetik dalgalar (ışık), elektrik (çevreye saçılan serbest elektronlar ve iyonlar) ve mekanik enerji (ses) şeklinde çevreye yayılır. Tepkime sonucunda elektrik ve mekanik enerji şeklinde çok az enerji çıktığı için bunlar genellikle dikkate alınmazlar. Aynı şekilde yanma işleminde ortaya çıkan ışık şeklindeki elektromanyetik enerjinin, toplam enerji içindeki payı da çok azdır. Yanma işlemi sırasında ortaya çıkan ışık, günümüzde ışığa duyarlı dirençler (*Light Dependent Resistor-LDR, fotosel*) yardımıyla, örneğin bir kazan içinde yanmanın devam edip etmediğini izlemeye yaramaktadır. Aydınlatmanın çam ağacından elde edilen çıra veya yakıt olarak değişik yağların kullanıldığı, fitilli lambalar döneminde de yanma olayında oluşan ışık önemli bir konu olmuş olmalıdır.

Bütün maddelerin yapısında kimyasal enerji vardır. Ancak yalnız, oksijenle girdikleri tepkime sonucu ısı ve ışık yayan maddelere yakıt denir. Doğada bulunan odun, kömür ve petrol doğal yakıtlardır. Bunlar dışında alkoller, sıvılaştırılmış petrol gazı (*Liquefied Petroleum Gas, LPG*), sıvılaştırılmış doğal gaz (*Liquefied Natural Gas, LNG*), sıkıştırılmış doğal gaz (*Compressed Natural Gas, CNG*), şehir gazı, yüksek fırın gazı, kok gazı vs. gibi yapay olarak üretilen yakıtlar da vardır. Metanol ve etanol son yıllarda taşıtlarda yakıt olarak kullanımı gittikçe artan alkollerdir. Yine son yıllarda sera gazlarını azaltmak amacıyla enerji ormancılığı çalışmaları hız kazanmıştır. Fosil yakıtların azalmaya başlamasıyla mevcut biyokütle kaynakları da yakıt olarak eskiye göre hem evsel hem de endüstriyel alanda daha çok kullanılır olmuştur.

Yanma, evlerde yemek pişirme ocaklarında, ısınma ve ısıtma araçlarında, buhar ve güç üretme tesislerinde aynı önemle incelenmesi gereken bir kimyasal işlemidir. Bir sobada ya da bir kombi cihazında yanmanın iyi olmaması, eksik yanma nedeniyle karbonmonoksit oluşmasına ve sonuç olarak zehirlenmelere yol açabilir. Aynı şekilde bir termik elektrik santralinde yanmanın iyi olmaması hem ciddi miktarda yakıtın boşa harcanmasına hem de çevreye, gaz ve kül gibi kirleticilerin, iyi yanma halinde atılan miktardan daha fazla atılmasına sebep olur. Yakıt olarak benzin, motorin ve LPG gibi petrol türevi akaryakıt kullanan taşıtların kararlı bir hızda kullanılması yerine sürekli gaza veya frene basılarak kullanılması (ivmeli hareket) da gereğinden fazla yakıt kullanılması, dolayısıyla hem daha fazla kirletici salınması hem para israfı demektir.



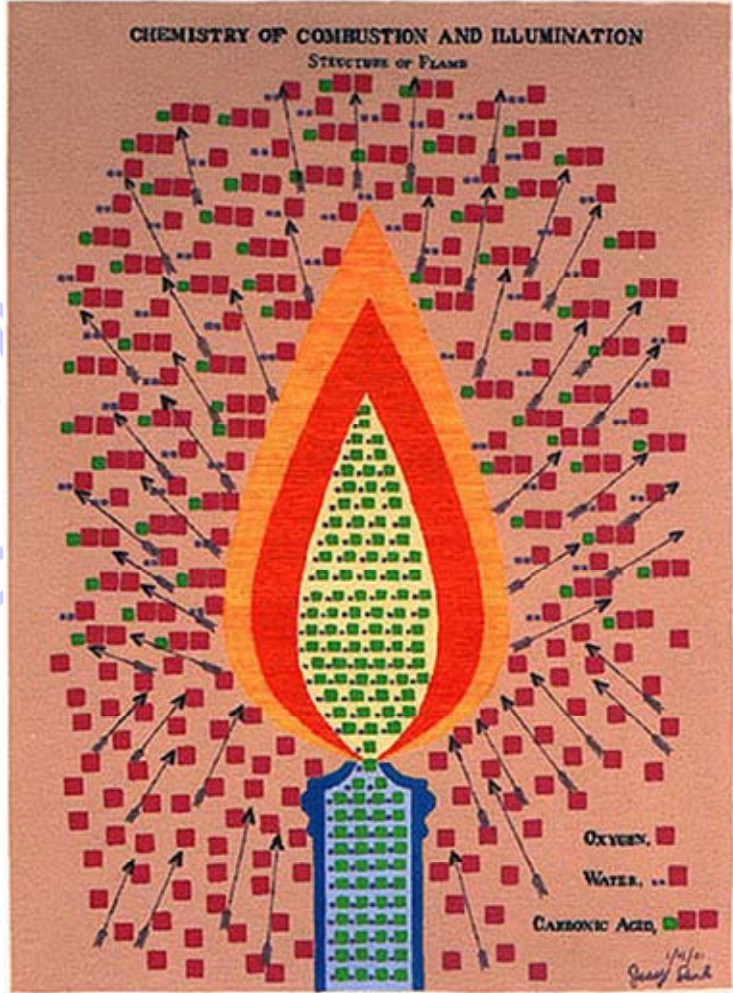
Şekil 1 Otomatik beslemeli pelet yakıtlı bir kazan.
Kaynak: <http://www.techline.linak.com/corporate/imagelibrary/casestories/Pellet-oven-1.jpg> (13 Kasım 2009)

Yanma işleminde kullanılan oksijen hava içinde doğada olarak bulunan bir gazdır. Dolayısıyla çoğu uygulamada yanma işlemi, yakıtın hava ile tepkimeye sokulması şeklinde gerçekleşir. Hava içinde kabaca, hacimsel olarak yüzde 21 oksijen (O_2), yüzde 79 azot (N_2)

bulunur. Detaylı bileşim sonraki bölümlerde verilecektir. Yakıtlar, yanma öncesi hangi fazda olursa olsunlar, yanma işlemi gaz fazında gerçekleşir. Yanmakta olan bir sıvı yakıtın, aslında önce ısınarak sıcaklığı yükselmiş ve gaz fazına geçmiştir ve bu gaz fazındaki hali oksijenle (veya hava içindeki oksijenle) tepkimeye girerek yanmaktadır. Aynı şekilde bir katı yakıt da ısınarak önce sıvılaşır, sonra buhar fazına geçer ve yanmaya katılır.

Yanma işlemi sırasında tepkimeye giren maddeler yakıt ve hava (veya O_2) iken yanma sonunda başta karbondioksit (CO_2), su buharı (H_2O) ve azot (N_2) olmak üzere değişik miktarlarda başka gazlar da bulunur. Yanma sırasında kimyasal tepkimeler aslında çok ince bir tabaka içinde gerçekleşir. Bu tabakaya da *alev* adı verilir. Alev içinde ne olup bittiği düşünüldüğünde, yanma konusunun zorluğu daha iyi anlaşılacaktır. Alevde; bir yanda yanıcı olarak gaz fazında yakıt, diğer yanda yakıcı olarak oksijen varken ortamda, aynı anda tepkime sonucu ortaya çıkan gazlar da vardır. Gerek karbondioksit, gerek azot ve diğer gazlar yanmaya katılmadıkları gibi yakıtın oksijenle buluşmasını da zorlaştırırlar. Sürekli rejimde olsa bile yanma olayında veya alev içinde gazların hareketi ile beraber ısı ve kütle transferi de aynı anda gerçekleşmektedir. Ayrıca gazların derişiklikleri her noktada farklı değerler alır. Bu karmaşık yapının çözülebilmesi için ısı transferi, kütle ve momentum transferi aynı anda gerçekleşmektedir. Dolayısıyla yanma olayı incelenirken gaz karışımlarına ait temel tanımlar ile akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve kütle transferi konuları iyi bilinmelidir.

Yakıt bileşiminde bulunan elementlerin birbirleriyle ve oksijenle kimyasal olarak etkileşimlerinin nasıl olacağı bilinmelidir. Yanmanın sonuçta bir kimyasal tepkime olması ve yanma denklemlerde yanma işlemine giren ve yanma işleminden çıkan maddelerin eşitlenmesi gibi işlemlerde gerekli olduğundan temel kimya bilgisi de ayrıca gereklidir.



Şekil 2 Alevin yapısını gösteren, 1857'de çizilmiş bir resim.

Description:

"This picture was made in 1857 from Youman's Chemical Atlas, N.Y. The water molecules in the picture are one small square and one large square, but I made them two small squares and one large square, because that was a long time ago when they didn't know how many hydrogen atoms. Oxygen and hydrocarbon went in the flame, and carbonic acid and water came out from the flame" Size: 16.5" x 20.75", \$500. Unframed

To purchase prints, cards and original artwork, contact:

Pamala Rogers

Pure Vision Arts

114 West 17th St.,

New York, NY 10011

Phone: 212-366-4263 or e-mail us at purevisionarts@aol.com.

2 GAZ KARIŞIMLARI

Gaz karışımı denince, en az iki farklı gazdan oluşan karışım anlaşılmalıdır. Karışımında bulunan gazlardan her birine bileşen denir. Bir gaz karışımının özelliklerini belirleyebilmek için karışımında bulunan bileşenlerden her birinin miktarı ve özellikleri bilinmelidir. Karışımında bulunan bileşenlerin miktarları mol olarak veya kütle olarak belirtilebilir. Buna bağlı olarak gaz karışımları ile ilgili değerler mol esasına göre veya kütle esasına göre tanımlanabilirler. Dolayısıyla incelemelerde hangi değer esas alındığı mutlaka belirtilmelidir.

2.1 Gaz Karışımları için Temel Tanımlar

Karışım kütlesi (m) : N adet bileşenden oluşan bir gaz karışımının kütlesi m , bileşenlerin kütleleri toplamına eşittir.

$$m = \sum_{i=1}^N m_i = m_1 + m_2 + \dots + m_N \quad (2.1)$$

Karışımın mol miktarı (n): N adet bileşenden oluşan bir gaz karışımının mol miktarı n , bileşenlerin mol miktarlarının toplamına eşittir.

$$n = \sum_{i=1}^N n_i = n_1 + n_2 + \dots + n_N \quad (2.2)$$

Mol: *Madde miktarı birimidir.* Maddenin fiziksel miktarını gösteren birkaç birimden biri olan mol, Uluslararası Birim Sisteminde (SI) temel birimlerden biridir. Bir “mol” maddede Avagadro sayısı kadar tanecik (partikül) bulunur.

$$\text{Avagadro sayısı} = 6.02217 \times 10^{23} \text{ tanecik/mol} \quad (2.3)$$

Mol kütlesi (M): *Gram olarak maddenin bir molünün kütlesidir.* Gram-mol veya kısaca g/mol olarak gösterilir. Bir maddenin bir kilomolünün kütlesi de kilogram olarak tanımlanır. Bir maddenin kütlesi m , mol kütlesi M ile mol miktarı n 'nin çarpımına eşittir:

$$m = M \cdot n \quad (\text{kg}) = (\text{kg/kmol}) \cdot \text{kmol} \quad (2.4)$$

Kütle oranı: Gaz karışımı içindeki bir gazın kütlesinin, karışımın kütlesine oranına *kütle oranı* denir ve y_{mi} ile gösterilir.

$$y_{mi} = \frac{m_i}{m} \quad (2.5)$$

Mol oranı: Gaz karışımı içindeki bir gazın mol miktarının, karışımın toplam mol miktarına oranına *mol oranı* denir ve y_{ni} ile gösterilir.

$$y_{ni} = \frac{n_i}{n} \quad (2.6)$$

Bir gaz karışımı için kütle oranlarının veya mol oranlarının toplamı 1'dir.

$$\sum_i^N y_{mi} = 1 \quad \text{ve} \quad \sum_i^N y_{ni} = 1 \quad (2.6)$$

Karışımın görünür (veya ortalama) mol kütlesi (M): (2.4) Eşitliğinden hareketle,

$$M = \frac{m}{n} = \frac{\sum m_i}{n} = \frac{\sum n_i M_i}{n} = \sum_i^N y_{ni} M_i \quad (\text{kg/kmol}) \quad (2.7)$$

Karışıma ait termodinamik bir özelliği hesaplamak için *görünür (veya ortalama) mol kütlesi* ifadesinde yapıldığı şekilde ilgili formül yazılabilir. Karışıma ait ortalama (veya görünür) gaz sabiti ise aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$R = \frac{R_u}{M} \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (2.8)$$

Burada R_u evrensel gaz sabitidir. R_u 'nun değişik birimlerdeki değeri şöyledir:

$$R_u = \begin{cases} 8.314 & [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \\ 8.314 & [\text{kPa}\cdot\text{m}^3/(\text{kmol}\cdot\text{K})] \\ 0.08314 & [\text{bar}\cdot\text{m}^3/(\text{kmol}\cdot\text{K})] \end{cases} \quad (2.9)$$

Yanma işlemlerinde çok karşılaşılan bazı maddelerin simgeleri ve mol kütleleri Tablo 1'de verilmiştir. Pratik hesaplamalarda yuvarlatılmış mol kütlesi değerleri kullanılabilir.

Tablo 1. Bazı maddelerin mol kütleleri.

Madde	Simgesi	Mol kütlesi (kg/kmol)	Yuvarlatılmış mol kütlesi (kg/kmol)
Karbon	C	12.011	12
Hidrojen	H	1.008	1
Oksijen	O	15.999	16
Azot	N	14.008	14
Kükürt	S	32.064	32
Argon	Ar	39.948	40
Su	H ₂ O	18.015	18
Hava	(Karışım)	28.964	29

Gaz karışımındaki bileşenler kendileri de birer bileşik halinde olabilirler. Bu durumda bileşiğin mol külesinden bahsetmek gerekir. Mol kütlesi yerine formül kütlesi deyimi de kullanılmaktadır. Örneğin karbondioksitin (CO₂) formül kütlesi (mol kütlesi) $(1 \times 12) + (2 \times 16) = 44 \text{ kg/kmol}$ 'dür ($M_{CO_2} = 44 \text{ kg/kmol}$).

Tablo 1'de C, H, O, N, S ve Ar birer element; H₂O, iki elementten meydana gelmiş bir bileşik ve hava ise ikiden fazla gazın karışımından meydana gelmiş bir maddedir. Tabloda hava için verilen mol kütlesi, hava içinde bulunan gazların mol kütlelerinin ağırlıklı ortalaması alınarak bulunmuş olan değerdir. Yanma ile ilgili hesaplamalarda havanın bir karışım olduğu asla unutulmamalıdır.

Yanma olaylarında yakıcı (oksitleyici) olarak gerekli olan oksijenin kaynağı genellikle havadır. Hacimsel olarak yaklaşık yüzde 21'i oksijen olan atmosferik hava, kolay ve ucuz şekilde temin edilebilmesi nedeniyle de yanma işlemlerinde en çok kullanılan oksitleyici maddedir. İnsanların yaşadığı atmosferin alt tabakasında bulunan hava az ya da çok nem de içerir. Nemli havaya ait özel tanımlar daha sonra anlatılacaktır. Kuru havanın bileşiminde bulunan gazlar ve hacimsel yüzdeleri **Tablo 2'**de verilmiştir.

Pratik yanma hesaplamalarında hava, yalnız azot (N_2) ve oksijenden (O_2) ibaretmiş gibi alınabilir. Bu durumda hava, hacimsel olarak; %21 oksijen ve diğer gazlar da içine katılmış olarak %79 azot olarak kabul edilir. Yanmaya katılmayan diğer gazların azota dahil edilmeleri ciddi bir sorun yaratmamaktadır. Kütle oranlar ise: %23.2 oksijen ve %76.8 azot şeklindedir.

Tablo 2 Kuru havanın bileşimi.

Bileşen	% Hacimsel Oranı
Azot	78.0881
Oksijen	20.9495
Karbondioksit	0.0300
Argon	0.9300
Neon	0.0018
Helyum	0.00053
Kripton	0.00011
Ksenon	0.000009

Yukarıda verilen yuvarlatılmış oranlara göre mol bazında aşağıdaki bağıntılar yazılabilir:

$$\begin{aligned} 0.21 \text{ m}^3 \text{ O}_2 + 0.79 \text{ m}^3 \text{ N}_2 &= 1 \text{ m}^3 \text{ kuru hava} \\ 0.21 \text{ kmol O}_2 + 0.79 \text{ kmol N}_2 &= 1 \text{ kmol kuru hava} \\ \text{Ya da,} \\ 1 \text{ m}^3 \text{ O}_2 + 3.762 \text{ m}^3 \text{ N}_2 &= 4.762 \text{ m}^3 \text{ kuru hava} \\ 1 \text{ kmol O}_2 + 3.762 \text{ kmol N}_2 &= 4.762 \text{ kmol kuru hava} \end{aligned}$$

Kütle bazında ise:

$$\begin{aligned} 0.232 \text{ kg O}_2 + 0.768 \text{ kg N}_2 &= 1 \text{ kg kuru hava} \\ 1 \text{ kg O}_2 + 3.310 \text{ kg N}_2 &= 4.310 \text{ kg kuru hava} \end{aligned}$$

2.2 Bir gaz karışımının P - v - T davranışı

Mükemmel bir gazın P - v - T davranışı, mükemmel gaz hal denklemi adı verilen $Pv = RT$ bağıntısıyla verilir. Gerçek gazların P - v - T davranışları ise daha karmaşık hal denklemleriyle veya $Pv = ZRT$ bağıntısıyla modellenir. Burada Z , sıkıştırılabilirlik çarpanıdır.

Gaz karışımlarının P - v - T davranışlarını açıklamak için iki model ortaya konulmuştur. Bu modeller *Dalton'un toplanan basınçlar yasası* ve *Amagat'ın toplanan hacimler yasası* diye bilinir.

Dalton'un toplanan basınçlar yasası: Bir gaz karışımının basıncı, bileşenlerin karışım sıcaklığında olmaları kaydıyla her birinin ayrı ayrı aynı hacmi doldurmaları halinde sahip olacakları basınçların toplamına eşittir.

$$P = \sum_i^N P_i(T, V) \quad (2.10)$$

Burada P_i , i bileşeninin aynı sıcaklıkta, aynı hacmi tek başına doldurması halinde okunacak basınç olup i bileşeninin kısmi basıncı adını alır.

Amagat'ın toplanan hacimler yasası: Bir gaz karışımının hacmi, bileşenlerin karışım sıcaklığı ve basıncında olmaları durumunda ayrı ayrı kaplayacakları hacimlerin toplamıdır.

$$V = \sum_i^N V_i(T, P) \quad (2.11)$$

Burada V_i , i bileşeninin aynı basınç ve sıcaklıkta sahip olduğu hacim olup **bileşen hacmi** ya da bileşen için **kısmi hacim** diye adlandırılır.

Ayrıca P_i/P , i bileşeninin basınç oranı, V_i/V ise i bileşeninin hacim oranı diye tanımlanır.

Mükemmel Gaz Karışımları

Mükemmel gaz hal denkleminin geneli için yazılabileceği yazılabileceği gibi karışımdaki her bir bileşen için ayrı ayrı da yazılabilir. V Hacminde, T sıcaklığında bir karışım olsun:

$$\text{Karışım için:} \quad PV = nR_u T \quad (2.12)$$

$$i \text{ Bileşeni için:} \quad P_i V = n_i R_u T \quad (2.13)$$

(2.13) ile (2.12) birbirine oranlanırsa:

$$\frac{P_i(T, V)}{P} = \frac{n_i R_u T / V}{n R_u T / V} = \frac{n_i}{n} = y_{ni} \quad (2.14)$$

Aynı şekilde V hacimleri için de;

$$\frac{V_i(T, P)}{V} = \frac{n_i R_u T / P}{n R_u T / P} = \frac{n_i}{n} = y_{ni} \quad (2.15)$$

Son iki denklemden;

$$\frac{P_i}{P} = \frac{V_i}{V} = \frac{n_i}{n} = y_{ni} \quad (2.16)$$

Son üç denklemden; “mükemmel gaz karışımındaki bir bileşen için mol oranı, basınç oranı ve hacim oranının birbirine eşittir” sonucu çıkmaktadır. Ayrıca buradan kısmi basınç ve kısmi hacim ifadeleri de mol oranına bağlı olarak çıkarılabilir:

$$\text{Kısmi basınç:} \quad P_i = y_{ni} P \quad (2.17)$$

$$\text{Kısmi hacim:} \quad V_i = y_{ni} V \quad (2.18)$$

Gerçek Gaz Karışımları

Dalton'un toplanan basınçlar yasası ve Amagat'ın toplanan hacimler yasası gerçek gazlar için de oldukça hassas sonuçlar verirler. Fakat bu kez, bileşen basıncı veya hacmi, bileşenlerin mükemmel gaz davranışından gösterdiği farklılığı göz önüne alan bağıntılar kullanılarak hesaplanmalıdır. Bu, mükemmel gaz hal denkleminin yerine gerçek gazlar için türetilmiş denklemleri kullanarak yapılabileceği gibi sıkıştırılabilme çarpanı kullanılarak da yapılabilir.

$$PV = Z n R_u T \quad (2.19)$$

(2.19) Numaralı denklem Dalton yasası ve Amagat yasası bağıntılarının her iki tarafına uygulanır ve sadeleştirme yapılırsa, karışımın sıkıştırılabilme çarpanı Z , bileşenlerin sıkıştırılabilme çarpanları cinsinden elde edilebilir:

$$Z = \sum_i^N y_{ni} Z_i \quad (2.20)$$

Bu kısım devam edecek.

2.3 Gaz karışımlarının özellikleri

Bu kısım sonra eklenecek.

3 GAZ - BUHAR KARIŞIMLARI

Kritik sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda, bir maddenin gaz fazı *buhar* olarak adlandırılır. Buhar terimi, bir maddenin doyma bölgesi yakınlarındaki gaz halini belirtir. Bu nedenle maddenin hal değişimi sırasında yoğunlaşabileceğini düşündürür.

3.1 Kuru Hava ve Nemli Hava

Atmosferik hava içinde, bölgeden bölgeye değişse de az veya çok mutlaka su buharı bulunur. Havada bulunan su buharına *nem* ve içinde su buharı bulunan havaya da *nemli hava* denir. Bunun tersi olarak; içinde hiç su buharı bulunmayan havaya *kuru hava* denir. Yeryüzünde bölgeden bölgeye, aynı bölgede mevsimler arasında ve hatta aynı gün içinde gündüzden geceye havadaki nem miktarı değişse de sıfır olması hemen hemen hiç mümkün değildir.

Dolayısıyla gerçek yanma olaylarında yakıcı olarak kullanılan hava içinde bir miktar su buharı bulunur. Öte yandan yanma işleminde yakıcı olarak yalnız oksijen veya endüstriyel olarak üretilmiş kuru hava kullanılsa dahi yanma işleminden çıkan ürünler (*yanma sonu ürünleri*) içinde yine su buharı bulunur. Çünkü yakıtlar esas itibarıyla hidrojen ve karbondan oluşurlar ve yanma sırasında yakıtın bünyesindeki hidrojen ile hava içindeki oksijen tepkimeye girerek su (H₂O) oluşturur. Yakıcı olarak nemli hava kullanılan bir yanma işlemi sonunda ürünler arasında hem yanmadan kaynaklanan su buharı hem de yanmaya katılan hava içindeki nemden dolayı su buharı bulunur.

Yanma odasına hava ile birlikte giren nem, yanmada oluşan ısının bir kısmını alarak, sıcaklığı yükselmiş olarak, diğer ürünlerle beraber yanma odasını terk eder. Baca gazı soğutulursa; yanma sonu ürünleri içindeki su buharı, kısmen ya da tamamen yoğunlaşarak diğer gazlardan ayrılır. Dolayısıyla su buharı içeren gazların incelenmesi yanma olaylarının iyi anlaşılması için gereklidir.

Esas itibarıyla iklimlendirme ve kurutma konuları içinde daha detaylı incelenmesi gereken nemli hava konusu burada; temel tanımların yapılması şeklinde kısaca ele alınacaktır.

3.2 Özgül Nem ve Bağlı Nem

Bileşimi Tablo 2'de verilen kuru havayı oluşturan gazların oranları, yeryüzünün hemen her yerinde aynı iken, su buharının değişken olması bazı tanımları zorunlu kılmıştır. Bunlardan ikisi burada anlatılacaktır.

Özgül nem (ω): Bir nemli havada, birim kuru hava kütlesi başına bulunan su buharı kütlesine *özümlü nem* denir. Özümlü nem yerine mutlak nem de kullanılmakla beraber bazı kaynaklarda mutlak nem'in anlamı değişik verildiğinden burada yalnız özümlü nem kullanılacaktır. Özümlü nem ω (küçük omega) ile gösterilir ve

$$\omega = \frac{m_{sb}}{m_{kh}} \quad (\text{kg su buharı / kg kuru hava}) \quad (2.21)$$

ifadesi ile gösterilir.

Hava içindeki su buharı doymuş buhar halinde olsa bile kabul edilebilir bir hata ile mükemmel gaz olarak kabul edilebilir. Buna göre mükemmel gaz hal denklemi nemli havadaki kuru hava ve su buharı için ayrı yazılabilir (Denklemler 2.22 ve 2.23).

$$P_{sb}V = R_{sb}T \quad (2.22)$$

$$P_{kh}V = R_{kh}T \quad (2.23)$$

Gaz sabiti değerleri yerlerine konarak, bu iki denklemden özgül nem için,

$$\omega = \frac{m_{sb}}{m_{kh}} = \frac{P_{sb}V/R_{sb}T}{P_{kh}V/R_{kh}T} = \frac{P_{sb}/R_{sb}}{P_{kh}/R_{kh}} = \frac{P_{sb}(M_{H_2O}/R_u)}{P_{kh}(M_{kh}/R_u)} = \frac{P_{sb}(18.015)}{P_{kh}(28.964)} = 0.622 \frac{P_{sb}}{P_{kh}} \quad (2.24)$$

ifadesi elde edilir. Nemli havanın toplam basıncı, kuru hava ve su buharı kısmi basınçları toplamı olarak alınır;

$$P = P_{kh} + P_{sb} \quad (2.25)$$

ve buradan

$$\omega = \frac{0.622P_{sb}}{P - P_{sb}} \quad (\text{kg su buharı / kg kuru hava}) \quad (2.26)$$

ifadesi elde edilebilir.

Belirli miktarda kuru hava ele alındığında (örneğin 1 kg), tanımı gereğince bu hava içinde su buharı olmamalıdır. Dolayısıyla özgül nemi sıfırdır. Bu havaya yavaş yavaş su buharı eklenirse özgül nem değeri sürekli artar. Ancak öyle bir an vardır ki; bu andan itibaren havaya verilen su buharı hava içinde *sis* olup gözle görünür olmaya başlar. Havanın tam bu andaki haline *doymuş hava* denir. Daha fazla su buharı gönderilirse su molekülleri birleşerek daha büyük su molekülleri oluşturur ve havada sis olarak asılı kalır. Sis miktarı artırılmaya devam edilirse, yoğunlaşarak havadan ayrılır.

Bağlı Nem (ϕ): Günlük yaşamda “hava nemli”, ya da “hava kuru” derken kastedilen aslında havadaki özgül nemin azlığı ya da çokluğu değildir. Yanmada olduğundan daha çok insanların konforuyla doğrudan ilgili olan bu durumun ölçüsü; havada mevcut halde bulunan nem miktarının (m_{sb}), aynı sıcaklıkta o havada bulunabilecek en yüksek buharı miktarına (m_{sbd}), oranı olarak tanımlanan *bağlı nem* değeridir.

Bağlı nem ϕ (küçük fi) ile gösterilir:

$$\phi = \frac{m_{sb}}{m_{sbd}} \quad (2.27)$$

Mükemmel gaz hal denklemlerinden, özgül nemde olduğu gibi burada da aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$\phi = \frac{m_{sb}}{m_{sbd}} = \frac{P_{sb}V/R_{sb}T}{P_{sbd}V/R_{sb}T} = \frac{P_{sb}}{P_{sbd}} \quad (2.28)$$

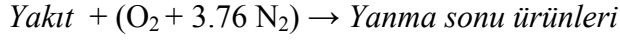
Burada P_{sbd} , havanın sıcaklığı (T) için, su buharının doyma basıncıdır ($P_{sbd} = P_{doyma, T}$).

2.26 ve 2.27 numaralı denklemler birleştirilirse, bağlı nem ile özgül nem değerleri arasındaki ilişkiyi veren ifade bulunmuş olur:

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega)P_{sbd}} \quad \text{ve} \quad \omega = \frac{(0.622 + \phi)P_{sbd}}{P - \phi P_{sbd}} \quad (2.29)$$

3.3 Yanma Denkleminde Nemli Havanın Kullanılması

Uygulamada yanma denklemleri yazılırken kolaylık olması için hava genellikle yalnız oksijen (O_2) ve azottan (N_2) ibaretmiş gibi alınır. Hava içinde, hacimsel olarak %21 O_2 ve %79 N_2 olduğundan her bir kmol O_2 için 3.76 kmol N_2 bulunur. Dolayısıyla yanma denklemi:



şeklinde yazılır. Burada 1 kmol O_2 ile 3.76 kmol N_2 toplam olarak 4.76 kmol madde (kuru hava) demektir.

Yanma denkleminde hava içindeki nem de katılmak istenirse bu durumda nem miktarının denkleme ne şekilde katılacağı aşağıdaki şekilde bulunabilir:

Havadaki su buharının kütlesi m_{H_2O} olsun. Bu durumda mol sayısı

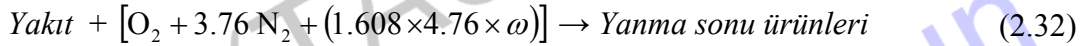
$$n_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{M_{H_2O}} = \frac{\omega m_{kh}}{M_{H_2O}} = \frac{\omega(n_{kh} M_{kh})}{M_{H_2O}} = \frac{\omega(n_{kh} 28.964)}{18.015} = 1.608 n_{kh} \omega \quad (2.30)$$

O halde her bir kmol kuru hava için ($n_{kh}=1$ için) $n_{H_2O} = 1.608 n_{kh} \omega$ eşitliğinde $n_{kh}=1$ yazılarak, $n_{H_2O} = 1.608 \omega$ olması gerektiği sonucu çıkar. Buradan da, 4.76 kmol kuru hava için;

$$\text{Yanmaya katılan nemli hava: } \left[\underbrace{O_2 + 3.76 N_2}_{\text{Kuru hava}} + \underbrace{\left(1.608 \times n_{kh} \times \omega \right)}_{\text{Nem (su buharı)}} \right]_{\text{Nemli hava}} \quad (2.31)$$

olur.

Sonuç olarak yanma denklemi de aşağıdaki şekilde yazılabilir.



3.4 Çiğ Noktası Sıcaklığı

Nemli hava, basıncı sabit kalacak şekilde soğutulursa, sıcaklığı belli bir değere düştüğünde içindeki su buharı yoğuşmaya başlar. İşte bu sıcaklığa *çiğ noktası sıcaklığı* denir ve $T_{çn}$ ile gösterilir. Bu aynı zamanda suyun buhar basıncına karşılık gelen doyma sıcaklığıdır. Yazın bulutsuz gecelerde uzay boşluğu ile ısı transferi sonucu soğuyan bitki yüzeylerine çarpan hava içindeki nem burada yoğuşarak havadan ayrılır. Sabahları çimenlerin ıslak olması bu yüzden. Aynı şekilde kışın etrafı kaplayan kırağı da havadaki su buharının soğuk yüzeyde yoğuşup donması sonucunda oluşur.

Baca gazı içindeki su buharının yoğuşup ayrılması korozif etkisinden dolayı istenmez. Bunun tersi olarak yoğuşmalı kazanlarda yakıtın ısısından daha fazla yararlanmak için baca gazındaki su buharı özellikle yoğuşturulur (Tabii bu durumda pazlanmaz malzeme kullanılması gerektiği unutulmamalıdır.). Dolayısıyla baca gazı içindeki su buharının hangi sıcaklıkta yoğuşacağını bilmesi, yani çiğ noktası sıcaklığı önemlidir.

Nemli havanın mol kütlesi:

Nemli hava, kuru hava ve su buharı karışımı olarak ele alındığında, mol kütlesi (M_{nh}),

$$M_{nh} = \frac{(n_{kh}M_{kh}) + (n_{sb}M_{sb})}{n_{kh} + n_{sb}} \quad (2.33)$$

şeklinde tanımlanabilir.

2.30 numaralı denklemde, $n_{H_2O} \equiv n_{sb}$ olduğu hatırlanırsa, $n_{sb} = 1.608n_{kh}\omega$ yazılıp 2.33 numaralı denklemde yerine konurlur ve $M_{kh} = 1.608 M_{sb}$ olduğu da dikkate alınır,

$$M_{nh} = \frac{(n_{kh}M_{kh}) + (1.608n_{kh}\omega M_{sb})}{n_{kh} + (1.608n_{kh}\omega)} = \frac{(n_{kh}M_{kh}) + (n_{kh}\omega M_{kh})}{n_{kh}[1 + (1.608\omega)]} \quad (2.34)$$

ve buradan

$$M_{nh} = M_{kh} \frac{1 + \omega}{1 + (1.608\omega)} \quad (\text{kmol/kg nemli hava}) \quad (2.35)$$

elde edilir.

YANMA
DERS NOTU
(TASLAK)
M. Eyriboyun

4 YAKITLAR

Yakıldığı zaman enerji veren maddelere *yakıt* adı verilir. Yakıtlar genellikle hidrojen ve karbondan oluşur ve bu nedenle hidrokarbon olarak adlandırılırlar. Hidrokarbon yakıtlar gaz, sıvı ve katı fazında bulunabilir. Yakıtların buldukları faza göre değişik yapıda yakıcı cihazlara ihtiyaç vardır.

4.1 Yakıtların Özellikleri

Buradan sonrası tekrar düzenlenecek!

YAKITLAR (Hidrokarbonlar)

Yakıtlar esas itibariyle hidrokarbonlardır. Hidrokarbon, hidrojen ve karbondan oluşan kimyasal bileşiklerin ortak adıdır. Hidrokarbon bileşikleri içerdikleri karbon sayısına göre belli önekler alırlar:

Bileşikteki Karbon Sayısı	Ön-ek	Alkanlar C_nH_{2n+2}	Alkenler C_nH_{2n}	Alkinler C_nH_{2n-2}
1	Met-	-an	-en -ilen	-in
2	Et-			
3	Prop-			
4	Büt-			
5	Pent-			
6	Hekz-			
7	Hept-			
8	Okt-			
9	Non-			
10	Dek-			
11	Undek-			
12	Dodek-			

Örnek: C_3H_8 PropAN
 C_3H_6 PropEN (PropİLEN)
 C_3H_4 PropİN

Alkanlar: Doymuş hidrokarbonlardır. Bünyelerinde bulunabilecek en yüksek hidrojen sayısının tamamı bulunur. Karbon atomları arasında tekli bağlar vardır.

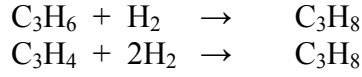
Alkenler: Doymamış hidrokarbonlardır. Bünyelerinde bulunabilecek en yüksek hidrojen sayısından 2 eksik hidrojen vardır. Karbon atomları arasında ikili bağ içerirler.

Alkinler: Doymamış hidrokarbonlardır. Bünyelerinde bulunabilecek en yüksek hidrojen sayısından 4 eksik hidrojen vardır. Karbon atomları arasında üçlü bağ içerirler.

! Tekli, ikili ve üçlü bağ şekilleri için aşağıda verilen tablolara bakınız.

Doymamış hidrokarbonlar bünyelerine hidrojen alarak doymuş hale geçebilirler.

Örnek:



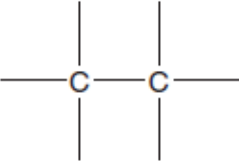
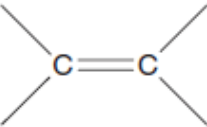
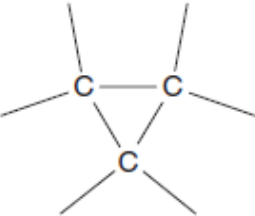

Combustion

Fourth Edition

Irvin Glassman

Richard A. Yetter

a. Alkyl Compounds

<p>Paraffins (alkanes: single bonds)</p> 	<p>$\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10}, \dots, \text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ Methane, ethane, propane, butane, ..., straight-chain; isobutane, branched chain All are saturated (i.e., no more hydrogen can be added to any of the compounds) Radicals deficient in one H atom take the names methyl, ethyl, propyl, etc.</p>
<p>Olefins (alkenes: contain double bonds)</p> 	<p>$\text{C}_2\text{H}_4, \text{C}_3\text{H}_6, \text{C}_4\text{H}_8, \dots, \text{C}_n\text{H}_{2n}$ Ethene, propene, butane (ethylene, propylene, butylene) Diolefins contain two double bonds The compounds are unsaturated since C_nH_{2n} can be saturated to $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$</p>
<p>Cycloparaffins (cycloalkanes: single bonds)</p> 	<p>C_nH_{2n} - no double bonds Cyclopropane, cyclobutane, cyclopentane Compounds are unsaturated since ring can be broken $\text{C}_n\text{H}_{2n} + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n+2}$</p>
<p>Acetylenes (alkynes: contain triple bonds)</p> 	<p>$\text{C}_2\text{H}_2, \text{C}_3\text{H}_4, \text{C}_4\text{H}_6, \dots, \text{C}_n\text{H}_{2n-2}$ Ethyne, propyne, butyne (acetylene, methyl acetylene, ethyl acetylene) Unsaturated compounds</p>

AN INTRODUCTION TO COMBUSTION

Concepts and Applications

Stephen R. Turns

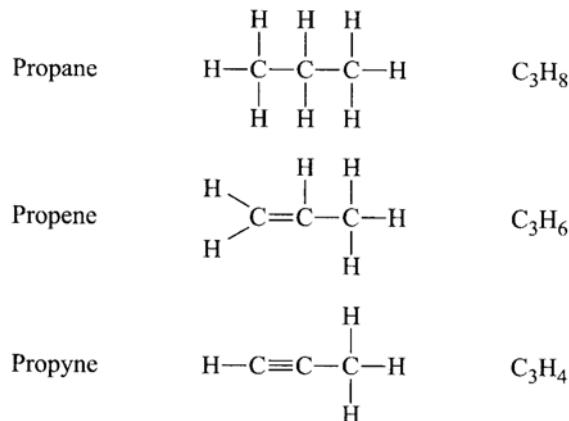
*Propulsion Engineering Research Center
and*

*Department of Mechanical and Nuclear Engineering
The Pennsylvania State University*

Table 2A.1 Basic hydrocarbon families

Family Name	Other Designations	Molecular Formula	Carbon–Carbon Bonding	Primary Molecular Structure
Alkanes	Paraffins	C_nH_{2n+2}	Single bonds only	Straight or branched open chains
Alkenes	Olefins	C_nH_{2n}	One double bond, remainder single	Straight or branched open chains
Alkynes	Acetylenes	C_nH_{2n-2}	One triple bond, remainder single	Straight or branched open chains
Cyclanes	Cycloalkanes, Cycloparaffins, Naphthenes	C_2H_{2n} or $(CH_2)_n$	Single bonds only	Closed rings
Aromatics	Benzene family	C_nH_{2n-6}	Resonance hybrid bonds (Aromatic bonds)	Closed rings

Using this nomenclature, and knowing that the word endings **-ane**, **-ene**, and **-yne** indicate how the carbon atoms are bound in the molecule, alkane, alkene, and alkyne family members containing three carbon atoms, for example, would be given as



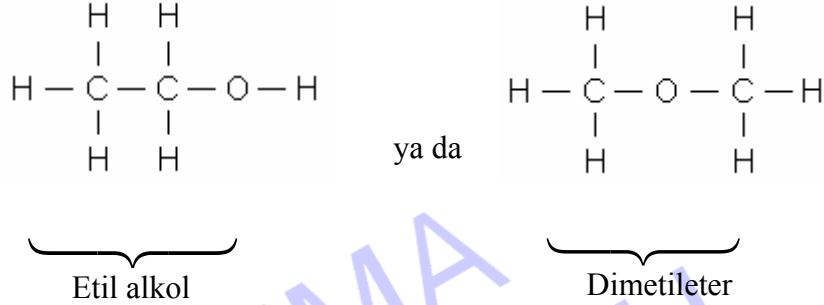
Note that the older conventions can sometimes complicate fuel names for alkene and alkyne family members that have two, three, or four carbon atoms:

	C_1	C_2	C_3	C_4
Alkanes	Methane	Ethane	Propane	Butane
Alkenes	—	Ethene	Propene	Butene
	—	Ethylene	Propylene	Butylene
Alkynes	—	Ethyne	Propyne	Butyne
	—	Acetylene	Methyl acetylene	Ethyl acetylene

İzomerlik:

Bir ve aynı molekül formülüne birden çok bileşiğin karşılık gelmesidir.

Örneğin, C_3H_6O kapalı formülüne karşılık iki farklı açık formül vardır:

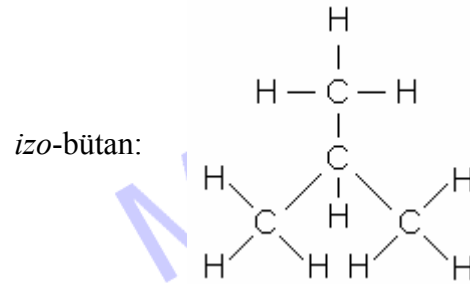
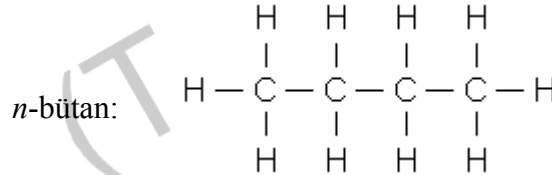


Bunlardan ilki; kaynama noktası 78.5°C olan *etil alkol*, ikincisi ise Kaynama noktası -23.7°C olan *dimetileter*dir.

Bünyesinde dört ve dörtten fazla karbon bulunan hidrokarbonların iki ya da daha fazla izomeri vardır. Bütanın ise yalnız iki izomeri vardır: Normal-bütan ($n\text{-C}_4\text{H}_{10}$) ve izo-bütan ($i\text{-C}_4\text{H}_{10}$). Kapalı formülleri yazılırken normal olarak tanımlananların başına “*n-*”, izo olanların başına “*i-*” öneki getirilerek birbirlerinden ayrılımları sağlanır.

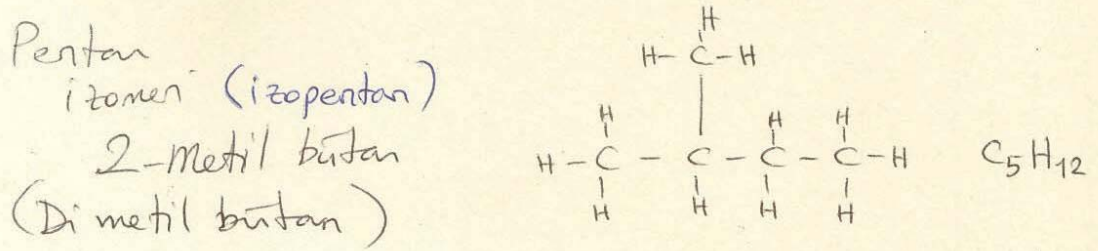
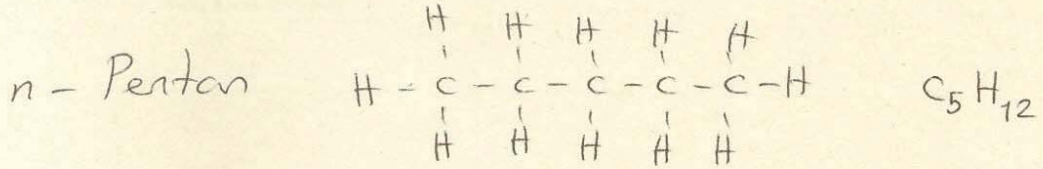
‘Normal’ olanlar düz zincir yapısında olurlar, diğerlerinde karbon dizilişi farklılık gösterir.

Örnek:



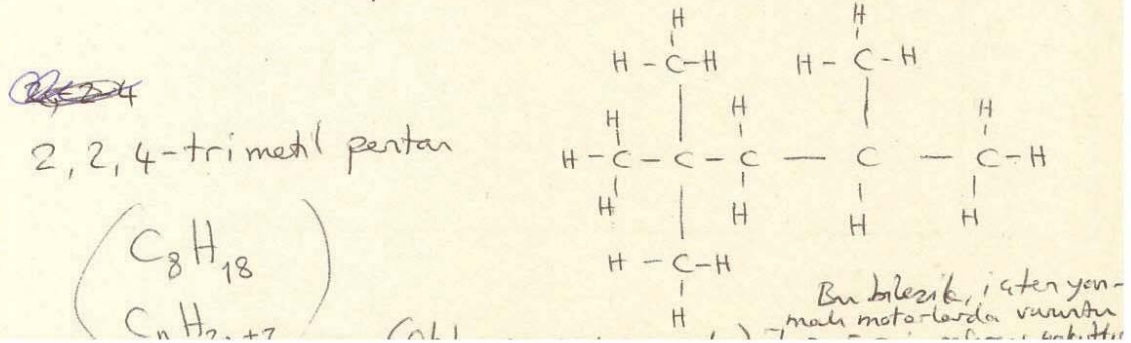
(17)

Bütanın izomeri izo-bütan olarak adlandırılmakta beraber örneğin pentan'da durum farklıdır.



Buadaki (2) metil kökünün bağlı olduğu bütan-
daki karbonun kaçınca sıra sayısını ifade edet-

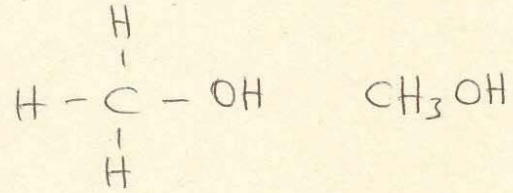
Bu örnekte, molekül yapısındaki simetriden dolayı metilin 2. ya da 3. karbona bağlanmasından sonucu değıştirmeyecektir. Yani 2-metil bütan yerine 3-metil bütan da denses sonuç aynı olurdu. Ancak bu genellenemez. Örneğin mühendislikte özel bir önemi olan alkan izomerlerinden birisi 2,2,4-trimetil pentan dup basitçe izo-oktan olarak söylenir:



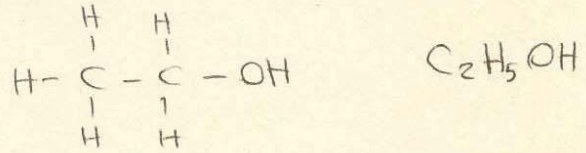
Alkoller, bir alkan molekülünde, bir H atomu ile bir hidroksil (OH) grubunun yer değiştirmesiyle elde edilirler. Sonlarına -OL eki alırlar.

Örnek

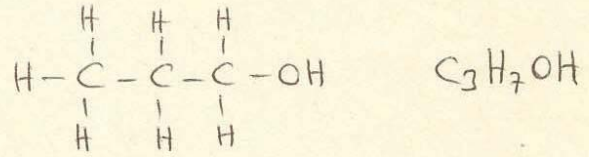
Metanol
(metil alkol)



Etanol
(Etil alkol)

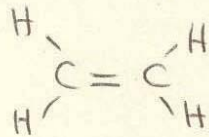


Propanol
(Propil alkol)

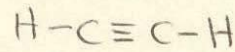


EK

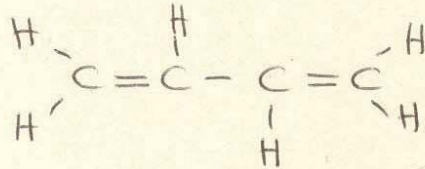
Genel Kılıf - Sienko



Etilen
(C_nH_{2n})



Asetilen ($\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$)



Bütadien ($\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$)

Kaynak : (İçten Yanmalı Motorlar, Öğretmen) (19)

Benzinli ve diesel yakıtlı motorlar için tanımlar :

Oktan Sayısı : İki referans yakıtla tanımlanır

- 1) i-oktan (2,2,4-trimetilpentan) C_8H_{18} OS = 100
- n-Heptan C_7H_{16} OS = 0

OS = 85 denilince hacimsel olarak %85 i-oktan ve %15 n-heptan veya bu karışıma eşdeğer sıkıştırma oranı gösteren yakıt anlaşılmalıdır. Oktan sayısı bir anlamda yakıtın kendi kendine tutuşma özelliklerini belirtir. OS yükseldikçe kendi kendine tutuşma özelliği kötüleşir ki bu da benzinli motorlarda istenen bir nitelik değildir.

Setan Sayısı (SS) :

Referans yakıtlar :

- 1) Hekzadekan (normal setan, $C_{16}H_{34}$) SS = 100
- 2) Heptametilnonan ($C_{16}H_{34}$) SS = 15

Bunlar diesel yakıtını tanımlamak için kullanılır. Setan kendi kendine tutuşması çok iyi olan ve dieselle tercih edilen bir yakıttır. Setan sayısı 74,5 olan yakıt denildiğinde hacimsel olarak %70 setan ve %30 heptametilnonan karışımı veya aynı tutuşma özelliği gösteren yakıt anlaşılmalıdır.

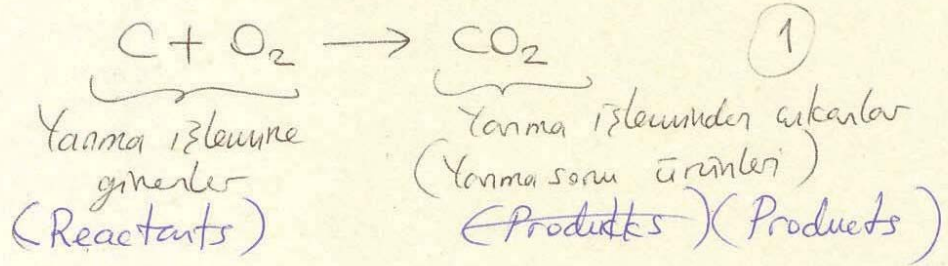
$$y_1 \cdot SS_{\text{setan}} + y_2 \cdot SS_{\text{heptametilnonan}} = 0,7 \times 100 + 0,3 \times 15 = 74,5$$

(20)

Kimyasal Termodinamik

Yanma, yakıtın oksijenle birleştiği ve büyük miktarda enerjinin açığa çıktığı bir kimyasal reaksiyondur.

Yanma işlemi sırasında kimyasal reaksiyondan önce varolan maddelere yanma işlemine girerler, reaksiyondan sonra oluşan maddelere de yanma işleminden çıkarlar veya yanma sonucu ürünleri derir. Örneğin 1 kmol karbonun 1 kmol oksijenle yanması sonucu karbondioksit oluşur.



Yanmanın başlaması için yakıtın tutuşma sıcaklığına getirilmesi gerekir. Bazı yakıtların atmosferik havada tutuşma sıcaklıkları:

Benzen	260 °C
Karbon	400 °C
Hidrojen	580 °C
Karbon monoksit	610 °C
Metan	630 °C

Ayrıca, yanmanın başlayabilmesi için yakıt ve havanın uygun oranlarda birarada bulunmaları gerekir. (Doğal gaz)

(yakıtlar)
Bazı yakacaklar için hava-yakıt karışımlarına ait
Jütüşme sınırları ve Jütüşme sıcaklıkları:

(21)

Tablo 3 ASHRAE
Bölüm 15
Sayfa 15.3

Tablo için sonraki sayfaya bakınız.

Kimyasal denklemler kütlelerin korunumu ilkesine göre dengeleştirilir. Bu ilkeye göre: Bir kimyasal reaksiyon sırasında her elementin kütlesi sabit kalır.

① no lu reaksiyonda denklemin her iki tarafında 12 kg karbon ve 32 kg oksijen vardır. Reaksiyona girer toplam kütle 44 kg, çıkar toplam kütle de 44 kg'dır. Bununla birlikte yanma işlemine girenlerin toplam mol miktarı 2 kmol, yanma sonu ürünlerinin toplam mol miktarı ise 1 kmol'dür. O halde kimyasal reaksiyon sırasında mol miktarlarının korunumu söz konusu değildir.

Yakacaklar ve Yanma

15.3

Tablo 2 Çeşitli yakacak bileşenleri için yanma reaksiyonları.

Bileşen	Sembol	Max. CO ₂ (%)	Çiğ noktası (°C)	Stokiyometrik yanma sonucu çıkan yanma ürünleri			
				m ³ / m ³ yakacak		kg / kg yakacak	
				CO ₂	H ₂ O	CO ₂	H ₂ O
Karbon (CO ₂ yanması)	C	29,30	--	--	--	3,664	--
Karbon monoksit	CO	34,70	--	1,0	--	1,571	--
Hidrojen	H ₂	--	72	--	1,0	--	8,937
Metan	CH ₄	11,73	59	1,0	2,0	2,744	2,246
Etan	C ₂ H ₆	13,18	57	2,0	3,0	2,927	1,798
Propan	C ₃ H ₈	13,75	55	3,0	4,0	2,994	1,634
Butan	C ₄ H ₁₀	14,05	54	4,0	5,0	3,029	1,550
--	C _n H _{2n+2}	--	53	n	n + 1	$\frac{44,01n}{14,026n + 2,016}$	$\frac{18,016(n+1)}{14,026n + 2,016}$
Etilen	C ₂ H ₄	15,05	52	2,0	2,0	3,138	1,285
Propilen	C ₃ H ₆	15,05	52	3,0	3,0	3,138	1,285
--	C _n H _{2n}	15,05	52	n	n	3,138	1,285
Asetilen	C ₂ H ₂	17,53	39	2,0	1,0	3,384	0,692
--	C _n H _{2m}	--	--	n	m/2	$\frac{6,005n}{6,005n + 1,008m}$	$\frac{9,008m}{6,005n + 1,008m}$
				SO _x	H ₂ O	SO _x	H ₂ O
Kükürt (SO ₂ yanması)	S	--	--	1,0 SO ₂	--	1,998 SO ₂	--
Kükürt (SO ₃ yanması)	S	--	--	1,0 SO ₃	--	2,497 SO ₃	--
Hidrojen sülfür	H ₂ S	--	52	1,0 SO ₂	1,0	1,880 SO ₂	0,528

Gas Engineers Handbook (1965)' dan kısaltılarak düzenlenmiştir.
Not : Çiğ noktası sıcaklıkları, Şek.2'den alınmıştır.

Tablo 3 Bazı yakacaklar için hava-yakacak karışımlarına ait tutuşma sınırları ve tutuşma sıcaklıkları.

Madde	Sembol	Alt tutuşma sınırı (%)	Üst tutuşma sınırı (%)	Tutuşma sıcaklığı (°C)	Kaynaklar
Karbon (aktif kok)	C	--	--	660	Hartman (1958)
Karbon monoksit	CO	12,5	74	609	Scott ve ark. (1948)
Hidrojen	H ₂	4,0	75,0	520	Zabetakis (1956)
Metan	CH ₄	5,0	15,0	705	Gas Engineers Handbook (1965)
Etan	C ₂ H ₆	3,0	12,5	520 ila 630	Trinks (1947)
Propan	C ₃ H ₈	2,1	10,1	466	NFPA (1962)
Butan, n	C ₄ H ₁₀	1,86	8,41	405	NFPA (1962)
Etilen	C ₂ H ₄	2,75	28,6	490	Scott ve ark. (1948)
Propilen	C ₃ H ₆	2,00	11,1	458	Scott ve ark. (1948)
Asetilen	C ₂ H ₂	2,50	81	406 ila 440	Trinks (1947)
Kükürt	S	--	--	190	Hartman (1958)
Hidrojen sülfür	H ₂ S	4,3	45,50	492	Scott ve ark. (1948)

Tutuşma sınırları, Coward ve Jones (1952)'den alınmıştır.
Bütün değerler 16 °C sıcaklığa, 101,4 kPa basınca ve kuru baza göre düzeltilmiştir.

sıcaklık olarak tanımlanır. Tutuşma sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda, hava-yakacak karışımına ısı verilmedikçe, yanma kendiliğinden ve sürekli olmayacaktır, fakat yakacak ve hava karışımı arasında bir kimyasal reaksiyon olabilir. Çeşitli derecelerde olmak üzere, tutuşma sıcaklığına birçok değişken etki etmektedir. Hava-yakacak karışımlarının tutuşma sıcaklıkları ve tutuşma sınırları, tutuşma için potansiyel birer ölçütüdür (Gas Engineers Handbook 1965).

Yanma Şekilleri

Yanma reaksiyonları, sürekli veya darbeli yanma şekillerinde oluşur. Sürekli yanmada, yanma odasına yakacak ile havanın tutuşma sınırları içinde kalacak şekilde beslenmesi durumunda, yanma kendi kendine sürer. Pratikte sürekli yanmaya, darbeli yanmadan daha çok karşılaşılr ve birçok yakıcı cihaz bu şekilde çalışır.

Yakıt	Alt Isıl Değer	Birim Fiyat	Ortalama Verim	TL / 1000 kCal	TL/1000 kCal	Ucuzluk Sıralaması
DOĞALGAZ İZMİT Serbest Tüketici	8250 kCal/m ³	0,518419TL /m ³	90%	$\frac{(0,518419 * 1000)}{(8250 \times 0,80)}$	0,069821	1
DOĞALGAZ İZMİT Serbest Olmayan Tüketici	8250 kCal/m ³	0,605375 TL/m ³	90%	$\frac{(0,605375 * 1000)}{(8250 * 0,90)}$	0,081532	2
İTHAL KÖMÜR	6000 kCal/kg	331,31 TL / ton	60%	$\frac{(0,33131 * 1000)}{(6000 * 0,60)}$	0,092031	3
FUEL OIL No : 6	9860 kCal/kg	1,15 TL/m ³	80%	$\frac{(1,15 * 1000)}{(9860 * 0,90)}$	0,145791	4
FUEL OIL No : 4 (T-615 Kalorifer Yakıtı)	9700 kCal/kg	1,51 TL / kg	80%	$\frac{(1,51 * 1000)}{(9700 * 0,80)}$	0,194588	5
ELEKTRİK	860 kCal/kWh	0,2451 TL/kWh	99%	$\frac{(0,2451 * 1000)}{(860 * 0,99)}$	0,287879	6
DÖKME LPG	10.900 kCal/kg	2,80 TL / kg	88%	$\frac{(2,80 * 1000)}{(10900 * 0,88)}$	0,291910	7
MOTORİN	10.200 kCal/kg	2,521 TL / kg	84%	$\frac{(2,521 * 1000)}{(10200 * 0,84)}$	0,294234	8
GAZ YAĞI	8290 kCal/kg	2,462 TL / kg	84%	$\frac{(2,462 * 1000)}{(8290 * 0,84)}$	0,353553	9

Kaynak: <http://www.izgaz.com.tr/yakit.asp>

YAKITLARIN ISIL DEĞERLERİ

YAKIT		kcal	kWh	kcal	kWh
Miks LPG	kg	11000	12.76	11900	13.80
Propan	kg	11100	12.87	12000	13.98
Miks LPG	m ³	26000	30.16	28200	32.71
Propan	m ³	21200	23.95	23000	25.93
Doğalgaz	Nm ³	8250	9.59	9155	10.62
Odun	Kg	2500	2.90	2800	3.25
Kömür	Linyit	Kg	3000	3.50	3.84
	Soma	Kg	5500	6.38	6.96
	İthal	Kg	6000	6.98	7.56
Motorin	Kg	10200	11.86	10800	12.58
Kalorifer yakıtı	Kg	9700	11.28	10500	12.18
Sanayi yakıtı fuel oil	kg	9200	10.69	10300	11.95
Elektrik	kWh	860	1	860	1

YARARLANILAN ESERLER

Türkçe Eserler:

Ders Notları:

Yanma Ders Notları, Hasan A. Heperkan, YTÜ, 1989

Kitaplar:

Termodinamik, Cilt 2 Uygulama Esasları, Ahmet Rasim Büyüktür, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa, 1985

Mühendislik Yaklaşımıyla **Termodinamik** (İngilizce 2. Baskıdan Çeviri), Yunus A. Çengel, Michael A. Boles, Çeviri: Taner Derbentli, McGraw-Hill ve Literatür, İstanbul 1996

Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla (İngilizce 5. Baskıdan Çeviri), Yunus A. Çengel, Michael A. Boles, Çeviri: Ertan Buyruk, Coşkun Özalp, Atilla Bilgin, Hüseyin Günerhan, Satılmış Basan, Editör: Ali Pınarbaşı, İzmir Güven Kitabevi, 2008

Yanma Stokiyometrisi, Oğuz Borat, İTÜ Makine Fakültesi, 1982

Yanma (Aerotermokimya) Bilgisi, Oğuz Borat, Mustafa Balcı, Ali Sürmen, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları,-4, Ankara, 1992

Yakıtlar ve Yanma, 3. Baskı, Zekai Kazım Telli, Palme Yayıncılık, Ankara, 1998

Kimyasal Kinetik, 2. Baskı, Mehmet Saçak, Gazi Kitabevi, 2004

Kimyasal Kinetik, Tevfik Atalay, Nobel Yayıncılık, 2005

Yakacaklar ve Yanma, ASHRAE Temel El Kitabı, Bölüm 15, Çeviren: Osman F. Genceli, TTMD Yayınları, Ankara, 1997

Tezler:

Yanma Odalarının Modellenmesi, Doktora Tezi, Celalettin Çelik, İTÜ-FBE, İstanbul, 1996

Endüstriyel Alevlerde İis Oluşumu, Doktora Tezi, Mustafa Eyriboyun, YTÜ-FBE, İstanbul, 1997

İngilizce Eserler:

Combustion Fundamentals, Roger A. Strehlow, McGraw-Hill, International Edition, 1985

Principles of Combustion, Kenneth K. Kuo, John Wiley and Sons, Inc., 1986

An Introduction to Combustion, Concept and Applications, Second Edition, Stephen R. Turns, McGraw-Hill, International Edition, 2000

Combustion Physics, Chung K. Law, Cambridge University Pres, 2006

Combustion, Fourth Edition, Irvin Glassman, Richard A. Yeter, Elsevier, 2008