



İLERİ YANMA VE MODELLEME

✓ YAKITLAR



PROF.DR.MUSTAFA İLBAŞ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ABD

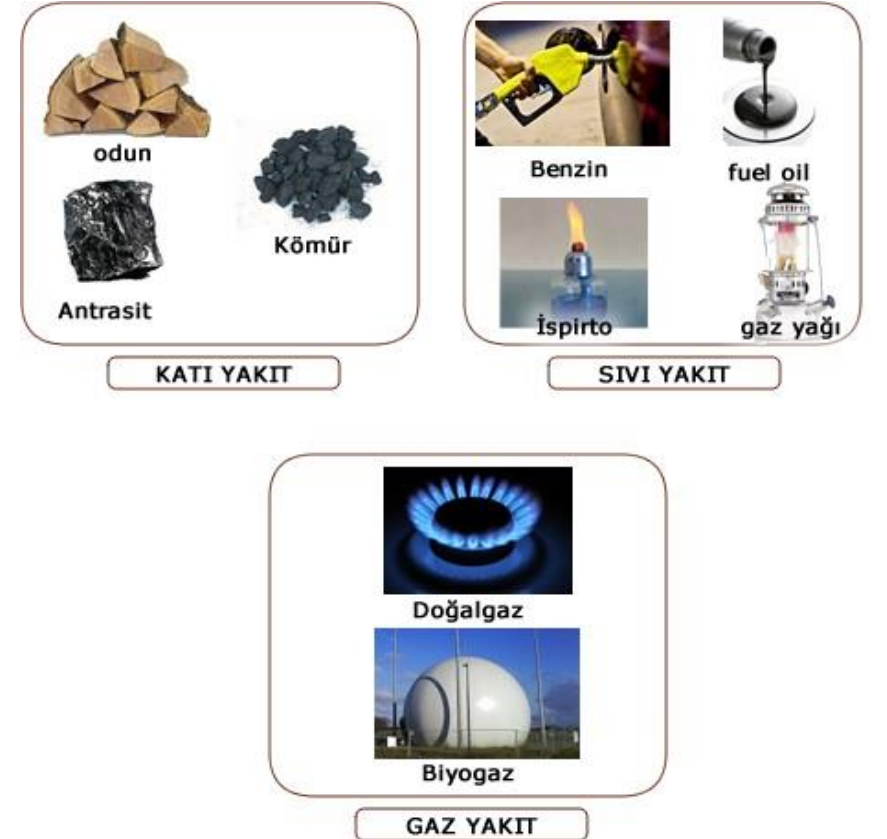
Yakıt:

- Kimyasal reaksiyonlar yoluyla ısı üretimine elverişli maddelere yakıt denir.
- Başka bir deyişle, yakıldığı zaman enerji açığa çıkaran maddelerdir.
- Yakıtlar kökeni itibariyle doğal ve yapay, faz durumları bakımından da katı, sıvı ve gaz yakıtlar olarak sınıflandırılır.

Katı yakıtlar: Taş kömürü, esmer kömür, turb, kok, odun ve odun kömürü bu sınıfta sıralanabilir.

Sıvı yakıtlar: Petrol ve ürünleri, taş ve esmer kömürün koklaştırılmasından, odunun karbonizasyonundan elde edilen katranlar ve alkoldür.

Gaz yakıtlar: Doğal olanı ve en çok bilineni doğalgazdır. Baca gazları, hava, su ve kuvvet gazları, şehir gazları, kok fabrikası gazları, metan, asetilen, hidrojen, bütan gibi gazlarda yapay gaz yakıtlardır.



Yakıtların Bileşimi: Her yakıtın bileşimi analiz sonucu elde edilir. Yakıtlarda genelde C, H, ve S yanıcı maddeler, O ve N’da diğer maddeler olarak bulunur. Katı yakıtlarda ayrıca yanıcı olmayan anorganik ya da inorganik bileşenler de vardır. Bunlar yanma sonucu kül denilen oksitler olarak ortaya çıkar. Yakıtlar, genel olarak çeşitli hidrokarbonların karışımıdır .

Yakıtların Karşılaştırılması:

- Yakıtlar içinde yanma ve taşıma bakımından en fazla güçlük çıkaran yakıtlar katı yakıtlardır. Katı yakıtlar, yanma sırasında kül bırakırlar ve ızgaralara gereksinim gösterirler. Çoğu zaman yanma tam olmaz, Ortaya çıkan kurum nedeniyle tesisatın sık sık temizlenmesi gerekir.
- Sıvı yakıtlar, kolay alevlenirler ve taşımaları kolaydır. Büyük miktarlar, daha uzaklara “pipeline” denilen boru hatlarıyla, küçük miktarlar ise sıvılaştırılmış durumda tüpler veya tankerler içinde nakledilir.
- Gaz yakıtlar, yanma ortamında hacimce kolay yayılabildiklerinden dolayı yanma esnasında çok az hava fazlasına ihtiyaç duyarlar. Çoğu zaman yanma tam olur.

Taşıtlarda Kullanılan Yakıtların Karşılaştırılması :

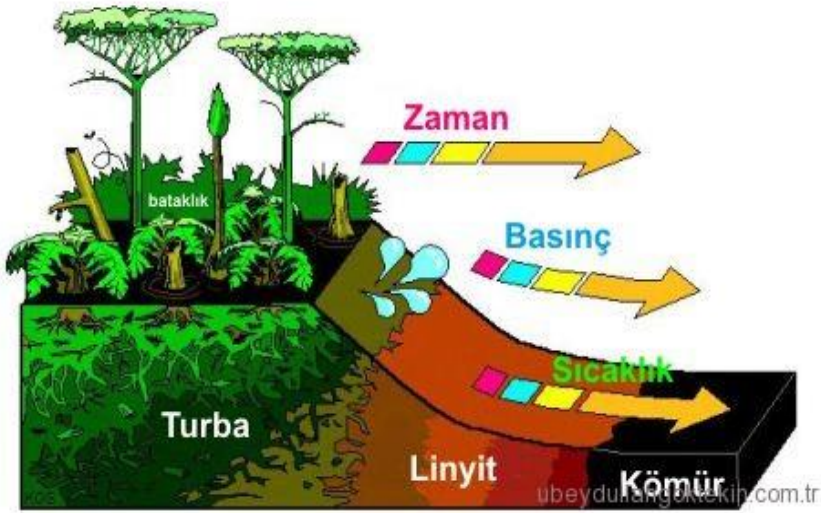
Yakıt	Enerji İçeriği (Kj/L)	Benzin Eşdeğeri (L/L)
Benzin	31850	1
Hafif Mazot	33170	0.96
Ağır Mazot	35800	0.89
LPG	23410	1.36
CNG (200 atm)	8080	3.94
LNG	20490	1.55

Taşıtlar, NO_x, CO ve UHC'lar gibi hava kirleticiler ile birlikte sera gazı olan CO₂'inde esas kaynağıdır. Bu nedenle taşıt endüstrisinde benzin, mazot gibi yakıtlar geleneksel ve petrole dayalı yakıtlardan petrol gazı (LPG) ve hidrojen gibi çevre dostu olan ve daha temiz alternatif yakıtlara gittikçe artan bir kayma vardır. Elektrikli otomobillerin kullanımı da artmaktadır.

KATI YAKITLAR

Katı yakıtlar, kömür ve odun olarak iki sınıfta incelenebilirler. Doğadan elde edilen fosil kömürlerden antrazit, taş kömürü, linyit ve turb ya doğrudan doğruya ya da kok ve briket şeklinde işleme tabi tutularak yakıt olarak yararlanılır. Artıca odunun karbonizasyonundan odun kömürü elde edilir.

Kömürler



Fosil kömürler eski jeolojik devirlerdeki (100-800 milyon yıl önceki) bitkilerin ve kısmende hayvan atıklarının yüksek basınç altında sıcaklığın etkisiyle bozulmaları sonucu oluşmuşlardır. Bu bozulmada, mikroorganizmaların da önemli rolü olduğu ileri sürülmektedir. Kömürün oluşumunda, bitkilerdeki selüloz ve lignin temel maddelerdir. Kömürleşme olayında başlıca üç safha görülmektedir.

- Normal basınç ve sıcaklıkta çeşitli kimyasal ve mikrobiyolojik prosesler sonucu özellikle turblar oluşmuştur. Turbdan esmer kömüre geçiş **1. Kömürleşme safhası**dır. Bu safhaya biyokimyasal faz da denilmektedir.
- **2. Kömürleşme safhası**nda esmer kömürden taş kömürü meydana gelmektedir. Bu jeolojik safhada, yüksek sıcaklık kömürleşmeyi etkileyen en önemli etken olmuştur. Derinlere inildikçe, sıcaklık artışıyla birlikte, yumuşak esmer kömürün sert esmer kömüre ve parlak kömürün de taş kömüre dönüştüğü görülür.
- Genel olarak antrazitten grafitе geçiş **3. Kömürleşme safhası** olarak kabul edilmektedir. Bu üç kömürleşme safhası esmer kömür, taş kömürü ve grafit oluşumuyla belirlidir.



Su ve külsüz madde üzerinden katı yakıtların ortalama bileşimleri;

Yakıt	Özgöl ağırlığı	C	H	O	N	S	Isı değeri (kcal/kg)	
							H _ü	H _a
Selüloz	-	44,4	6,2	49,4	-	-	4100	3700
Odun	1,15	48,5 - 50	5,9 - 6,3	43,4 - 45,2	0,03 - 0,3	-	4750	4400
Turb	1,2	58 - 60	5,5 - 6,0	34 - 34,5	0,7 - 3,4	0,1 - 0,3	5600	5300
Linyit	0,5 - 1,0	57,6 - 64	5,1 - 6,1	36,3	-	-	6800	6550
Esmer kömür	1,2	63,3 - 68,6	4,2 - 6,5	27,2 - 29,2	0,3 - 0,6	2,4 - 2,7	7000	6700
Parlak kömür	1,2 - 1,5	74,6 - 76,2	5,6 - 6,9	17,4 - 18,2	1,4 - 1,7	0,4 - 3,9	7500	7200
Piropisit	-	77,3	11,1	10,7	-	0,9	9200	-
Taş kömürleri								
Alev kömürü	1,25	75 - 80	4,5 - 5,5	15,5 - 19,5	1,0 - 1,5	-	7500	7300
Gaz kömürü	1,3	80 - 85	5 - 5,5	10 - 14,2	0,6 - 2,8	0,04	8400	8100
Yağlı kömür	1,35	88 - 90	4,5 - 5,5	5 - 6,5	0,6 - 2,8	0,04	8600	8300
Yağsız kömür	1,35	90 - 94	3 - 4	3 - 5,5	-	-	8600	8450
Antrazit	1,4	95 - 97	2 - 3	2 - 3	0,2 - 1,5	0,2 - 1,0	8460	8400
Grafit	2,3	100	-	-	-	-	8100	8100

Kömürlerde elementer olarak karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N), fosfor (P), Kükürt (S) ve gereksiz madde olarak da su ve kül bulunur. Kömürün oluşma zamanı ne kadar fazla ise, bünyesinde bulunan karbon (C) miktarı da o kadar fazla olur. Buna karşılık oksijen (O), azot (N) ve hidrojen (H) miktarları da azalma gösterir. Bu durum elementer bileşim üzerinden tanımlanmış **kömürleşme indeksi**,

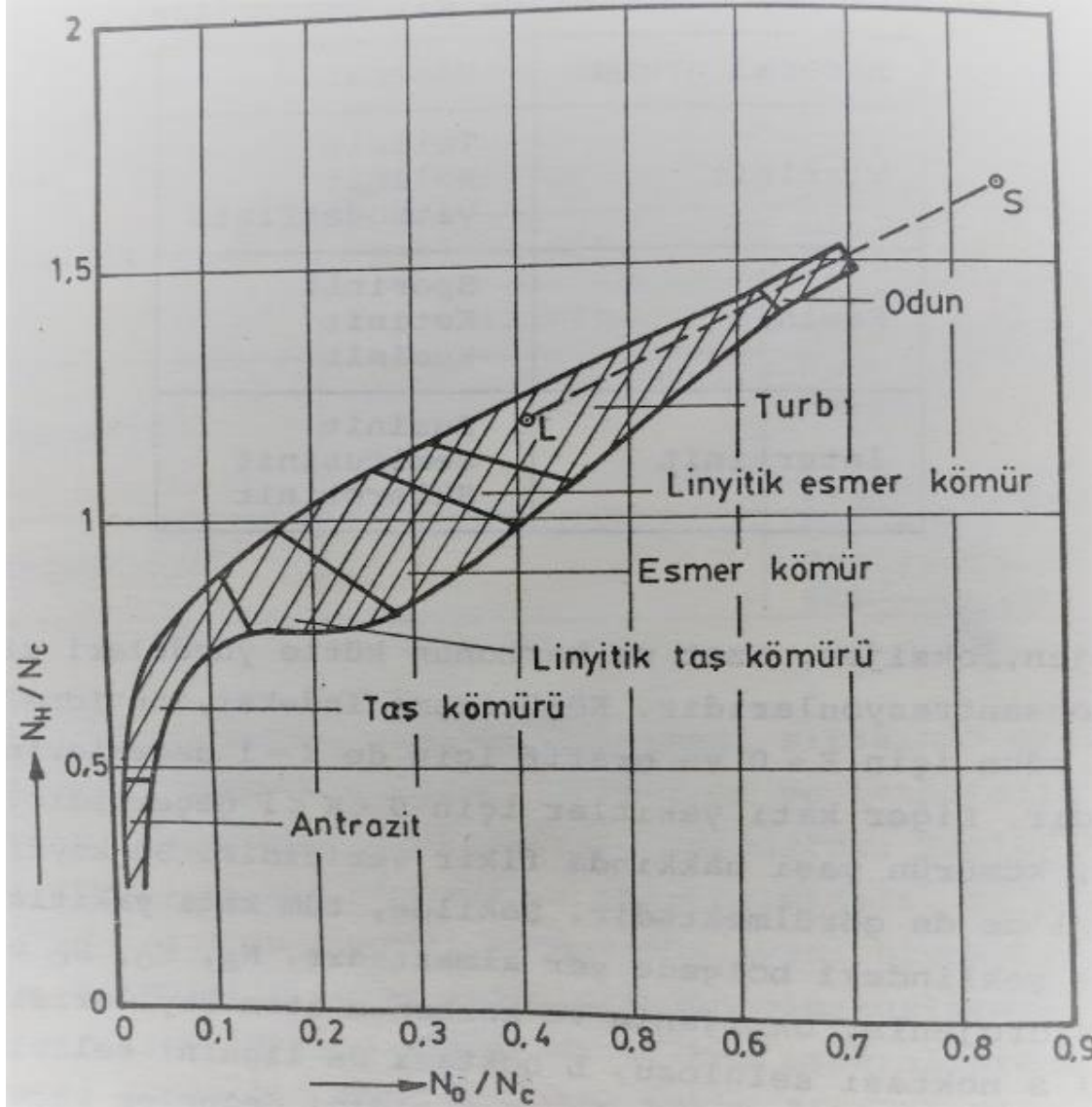
$$K = 1 - \frac{42h + 2.1o + 3n}{7c}$$

ile belirlenmektedir. Burada h,o,n,c kömürün bünyesindeki hidrojen, oksijen, azot ve karbonun kütle yüzdeleri cinsinden konsantrasyonlarıdır. Kömürleşme indeksi, bu formüle göre;

- odun için $K \approx 0$
- grafit için $K = 1$
- diğer katı yakıtlar için $0 < K < 1$ değerlerini almaktadır.

Bu tanım kömürün yaşı hakkında fikir vericidir.

Atom sayısı oranlarına göre katı yakıtların gösterilişi;



- Şekilde tüm katı yakıtlar boynuz şeklindeki bölgede yer almaktadır.
- N_H , N_O , N_C yakıttaki hidrojenin, oksijenin ve karbonun atom sayılarını temsil etmektedir.
- Üst uçtaki S noktası selülozu, L noktası da lignini göstermektedir.
- N_H/N_C ve N_O/N_C oranlarının aldığı değerler küçüldükçe, odun, turb, linyitik esmer kömür, esmer kömür, linyitik taş kömürü, taş kömürü ve antrazit boynuz üzerinde aşağıya doğru sıralanmaktadır.

Katı Yakıtların Yaklaşık (Proximate) ve Nihai (Ultimate) Analizi

Katı yakıtlar, kok ve biyokütle yakıtları için yapılan yaklaşık ve nihai analizler, temel standart labaratuvar deney yöntemlerini temsil eder ve buradaki amaç; katı yakıtların içeriklerini tespit etmektir.

Yaklaşık Analizi; Yaklaşık analiz sonucu, içerik hakkında net bir sonuc vermez. Yaklaşık analiz sayesinde, katı yakıt içerisinde bulunana nem, uçucu maddeler, sabit karbon ve kül miktarları (kütlece) belirlenir.

Nihai Analiz; Tam yanma sonucu elde edilen yanma ürünleri vasıtasıyla, nihai analizde, katı yakıt bünyesinde bulunan C, H, S ve N miktarları belirlenir. Ayrıca, O miktarı da bu miktarlardan sonra doğrudan bulunur.



Kalorific Değer

Her yakıtın ısıtma kapasitesini gösteren bir ifadedir ve katı yakıtlarda (kömür) aşağıda verilen **Dulong eşitliği** sayesinde belirlenebilir. (Kuru-külsüz bazda)

$$\begin{aligned} &\text{Üst ısı değer (ÜİD) (kJ/kg) (yüzdelere ağırlıkça)} \\ &= 338.55 (\%C) + 1443.9 (\%H) - 180.6 (\%O) + 105 (\%S) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Alt ısı değer (AİD) (MJ/kg) (kuru bazda)} \\ &= \text{ÜİD (kuru bazda)} - 2.45 [nem + 9H] \end{aligned}$$



Suyun buharlaşma gizli ısısı

Koklaştırma

- Bitümlü katı yakıtlara, oksijensiz ortamda uygulanan termik bir işlemdir.
- Bu işlemin uygulanmasında amaç; tercihen katran elde etmek ise, bu durumda 600°C'ye kadar ısıtma yapılır. Buna **alçak sıcaklık koklaştırması** denir.
- Geriye kalan kok, hala uçucu bileşenlere sahiptir. Amaç uçucu bileşenlerce fakir, katrandan tamamen arındırılmış ve yüksek oranda C ihtiva eden kok üretimi ise, koklaştırma 1200°C'ye kadar yapılır. Bu işlem de **yüksek sıcaklık koklaştırması**dır.
- 2. İşlemdeki gaz verimi 1. İşleme göre daha yüksektir.
- Koklaştırma, prensip itibariyle her türlü katı yakıtta uygulanabilir. Odun için bu durum, odunun karbonizasyonu şeklinde tanımlanır.

Koklaştırmada başlıca 5 safha görülür.

1. 20°C-100°C : Ön ısınma
2. 100°C-250°C : Kuruma
3. 250°C-450°C : Ön gazlaşma
4. 450°C-800°C : Esas gazlaşma
5. 800°C-1200°C : Son gazlaşma

Odunun Karbonizasyonu

Odun kömürü, odunun havasız bir ortamda termik bir işleme tabi tutulmasıyla elde edilir. Odunun karbonizasyonu ayrıca, gazlar, aset asidi, metanol ve katran gibi yan ürünler de vermektedir. Aşağıdaki tablo, çeşitli odunların labaratuarda kömürleştirilmesinden elde edilen ürünleri ve miktarları göstermektedir. Tabloda belirtilen odun ruhu, metanol, aseton ve metilasetat karışımıdır. Odun kömürü eskiden beri külü az ve hemen hemen kükürtsüz olduğundan, bakırın tasfiyesinde, diğer metalurji kollarında, özellikle yüksek fırınlarda tercih edilen bir redüksiyon maddesidir. Bundan başka, karabarut, karbon sülfür ve aktif kömür üretiminde de odun kömürü kullanılır.



Çeşitli odunların karbonizasyon ürünleri (Susuz odun üzerinden kütle yüzdeleri)

	Akçağaç	Kayın Ağacı	Meşe	Çam
Odun kömürü	35.0	32.5	35.7	32.8
Aset asidi	6.6	7.7	5.6	3.9
Odun ruhu	1.8	2.1	1.6	1.5
Katran	15.5	14.0	13.6	18.9
Gazlar	15.5	16.0	14.9	15.4

SIVI YAKITLAR

- ✓ Doğal sıvı yakıtlar, petrol ve petrolün **destilasyon (fiziksel)** ve **kraklama (kimyasal)** ürünleridir.
- ✓ Yapay sıvı yakıtlar ise, sentez yoluyla elde edilen sıvı yakıtlar ve bunların destilasyon ürünleridir. İspirto da yapay sıvı yakıttır.

Petrol

Çeşitli hidrokarbonların karışımıdır. Bütün petrolerin esas bileşenleri parafinler, naftenler ve aromatik hidrokarbonlardır. Ortalama bir petrol;

- %30 parafinler,
- %40 naftenler,
- %25 aromatik hidrokarbonlar ve
- %5'te O_2 , N_2 ve S bileşikleridir.



Petrolün **anorganik mi** yoksa **organik mi** olduğu sorunu uzun süre tartışılmıştır. Petrolller; kısmen gaz basıncı ve suyun yardımıyla oluştukları yerlerden daha yüksek düzeylere geçmiş ve katettikleri yolda bazı maddeleri alırken, bazı maddeleri de vermişlerdir. Bu nedenle; petrol için doğrudan yapılan analizlerde kesin oluşum teorileri kurmak mümkün olmamıştır.

- **Anorganikçilere göre**, petrol, metal karpitlerinin kızgın su buharı ile meydana gelen işlemleri neticesinde oluşmuştur.
- **Organikçilere göre**, hem petrol içinde tespit edilen porfirinler, klorofil ve hem türevleri olduğundan, petrolün ilk maddesini bitkiler ve hayvanlar oluşturmaktadır. Bu porfirinler, 200°C'nin üzerinde bozunduğundan, ham petrolün bu sıcaklığın altında oluştuğu düşüncesi ortaya çıkmaktadır.

Günümüzde petrolün oluşumunda, yağların, proteinlerin ve lipidlerin temel maddeleri oluşturduğu yaygın olarak kabul edilmektedir.

Petrol ürünleri, fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki yoldan elde edilmektedir. **Fiziksel işlemler**; ısıtma, destilasyon ve yoğuşmadır. **Kimyasal işlemler** ise, termik veya katalitik kraklama, izomerleme, hidrojenleme vb.'dir.

Sıvı Yakıtların Özellikleri

Isıtma kapasitesi, özgül ağırlık, viskozite, parlama noktası (flash point), kendinden ateşleme sıcaklığı (autoignition temperature), oktan sayısı, setan sayısı gibi özellikler, sıvı yakıtlar için oldukça önemli özelliklerdir.

Viskozite; sıvılarda akmaya karşı gösterilen direncin bir ölçüsüdür. Sıvı bir yakıt için viskozite, sıvı yakıtın transfer edilmesindeki ve atomizasyonundaki kolaylığın bir göstergesidir. Sıvıların viskozitesi sıcaklık arttıkça artar.

Parlama noktası; ciddi bir tehlike olmaksızın depolanabilen sıvı bir yakıttaki en yüksek sıcaklığın bir göstergesidir. Başka bir deyişle, sıvı bir yakıt açık bir aleve maruz bırakıldığı zaman, yakıtın bu alevi hızlı bir biçimde yakalayacağı (tutuşacağı) en düşük sıcaklıktır.

Kendinden ateşleme; bir ateşleme veya alev olmaksızın atmosferik havada, standart bir konteynerde, yanmanın kendinden başlayıp devam etmesi için gerekli en düşük sıcaklıktır. Örneğin benzinin kendinden ateşleme sıcaklığı 370°C'dır.



Yakıt	Parlama Noktası (°C)	Kendinden Ateşleme Sıcaklığı (°C)
Metan	-188	537
Etan	-135	472
Propan	-104	470
n-bütan	-60	365
n-oktan	10	206
İzooktan	-12	418
n-setan	135	205
Metanol	11	385
Etanol	12	365
Asetilen	Gaz	305
Karbon monoksit	Gaz	609
Hidrojen	Gaz	400

Petrol Ürünleri

Benzin:

C_nH_{2n+2} $\rightarrow$ $5 \leq n \leq 12$ $\rightarrow$ Parafinler

C_nH_{2n} $\rightarrow$ $5 \leq n \leq 12$ $\rightarrow$ Naftenler

C_6H_6 , C_7H_8 , C_8H_{10} , C_9H_{12} , $C_{10}H_{14}$, $C_{11}H_{16}$, $C_{12}H_{18}$ $\rightarrow$ Aromatik Hidrokarbonlar

Buharlaşıma sıcaklığı: 40°C - 150°C



Benzinde Vuruntu; Henüz yanmamış karışımın ısınma nedeniyle sıkışıp, bu artık karışımın patlaması olayıdır. Vuruntu denilen bu darbeler enerji kaybına ve yetersiz yanmaya, dolayısıyla yanmamış karbon oluşumuna yol açarlar. Basıncın yüksek ve ani olması, motorun elastik parçalarının yorulmasına, pistonun bir süre sonra çökmesine neden olur.

Benzin mukavemeti oktan sayısı ile ölçülür. Oktan sayısı belirlenmek istenen benzin, standart bir motorda yakılır ve aynı motorda kullanılan izooktan, n-heptan karışımıyla karşılaştırılır. İzooktan, hemen hemen vuruntusuz yanar. Normal heptanın vuruntu yeteneği daha yüksektir. Bu karışımda, izooktanın hacim yüzdesi oktan sayısını gösterir. Süper benzinin oktan sayısı 95, uçak benzininki ise 100'dür.

Dizel Yağı (Motorin/Mazot):



- Dizel yağının üretim miktarı %10'u geçmez.
- Dizel yakıtları, dizel motorlarında sıkıştırma-ateşlemeli olarak yakılırlar. Yani ayrıca bir ateşleme düzeneği bulunmaz.
- Bundan dolayı, dizel yakıtların yanma yeteneğinin yüksek olması, yani püskürtmeyle ateş alma arasında zamanın kısa olması gereklidir.
- Dizel yağları için ölçü olarak setan sayısı kullanılır.
- Setan sayısı belirlenmek istenen yakıt, standart motorlarda yakılarak setan ve α -metil naftalin karışımıyla karşılaştırılır.
- Dizel motorlarında kullanılan yağların setan sayısı 70 civarındadır.

Isıtma Yağları (Fuel-Oil):

- Ham petrolün damıtılmasından elde edilen ağır hidrokarbon karışımlarıdır.
- Viskoziteleri yüksektir.
- Viskozitelerine göre sınıflandırılırlar.
- Viskozitelerin büyümesi ile yağın ticari numarası da büyümektedir.
- Isıtma yağları, genellikle yüksek viskoz olduğundan yanma yerine püskürtülmeden önce bir miktar ısıtılır.



GAZ YAKITLAR

Sıvı yakıtlar gibi, gaz yakıtlar da katı yakıtlara göre daha avantajlıdır. Bunlar;

- a) Kolay taşıma ve ucuzluk,
- b) Hava ile daha iyi bir karışma, yanmada daha az hava fazlalık gereksinimi,
- c) Kolay yakılma ve ekipmanların çok karmaşık olmaması,
- d) Yanma hızlarının yüksek olması sebebiyle ocakların daha az yer kaplaması,
- e) Kül, cüruf gibi atıklar bırakmamaları.

Gaz yakıtlar, **doğal ve yapay** olmak üzere ikiye ayrılırlar.

- Doğal olanı doğalgazdır.
- Hidrojen, asetilen, koklaştırma ve kömürün gazlaştırılmasından elde edilen gazlar, ağır yağların kısmi oksidasyonundan ve kömürün hidrojenlenmesinden üretilen gazlar, naftenin kraklamasından elde edilen gazlar ise yapay gaz yakıtlardır.

Bazı gaz yakıtlara ilişkin fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo'da gösterilmiştir.

Gaz yakıtların yanma değerleri

G a z	Mol kütlesi g/mol	Formülü	O _{min} Nm ³ /Nm ³	L _{min} Nm ³ /Nm ³	Isı değeri	
					Üst kcal/Nm ³	Alt kcal/Nm ³
Hidrojen	2,016	H ₂	0,5	2,38	3057	2577
Karbon monoksit	28	CO	0,5	2,38	3014	3014
Metan	16,03	CH ₄	2,0	9,52	9570	8620
Etan	30,05	C ₂ H ₆	3,5	16,7	16600	15170
Propan	44,06	C ₃ H ₈	5,0	23,8	22500	21670
Bütan	58,08	C ₄ H ₁₀	6,5	31,0	30600	28300
Etilen	28,03	C ₂ H ₄	3,0	14,3	15400	14470
Propilen	42,05	C ₃ H ₆	4,5	21,4	22270	20850
Bütilen	56,06	C ₄ H ₈	6,0	28,6	29100	27300
Asetilen	26,02	C ₂ H ₂	2,5	11,9	16050	13460

Doğalgaz:

Doğalgaz bileşiminde çoğunlukla metan bulundurur. Bunun yanı sıra homolog parafinler, karbondioksit (CO_2), hidrojen sülfür (H_2S) ve azot (N_2) gibi anorganik bileşikler de bulunur. Doğalgazın bileşimi çıkarıldığı yere göre değişmekle birlikte, genellikle %56,3 - %99,2 CH_4 , %0,7 - %20 C_2H_6 ve %0 - %10,1 CO_2 içeriğine sahiptir.



Kömür ve petrolün oluşumu ile doğalgazın oluşumu arasında bağlantı görülmektedir. Doğalgaz yataklarının çoğu petrol yataklarının yakınında veya aynı yatakta bulunmaktadır. Kömürleşme safhalarında ortaya çıkan uçucu bileşenlerin yatak değiştirip toplandığı, dolayısıyla doğalgaz halinde bulunduğu düşünülmektedir.

Doğalgazın Temizlenmesi:

- ✓ Doğalgaz, çıkarıldığı gibi kullanılmaz.
- ✓ İçeriğinde, ısı değerini düşüren ve su ile birlikte korozif etkisi olan CO_2 ve zehirli H_2S , az miktarda da helyum (He) vardır.
- ✓ H_2S ve toplam kükürt miktarının belirli bir seviyeyi aşmaması da standartlarca belirlenmiştir.
- ✓ Doğalgaz yataklarında basınç takriben 400 bar düzeyindedir. Çıkarılma sırasında basınç 100 bar'a düşmekte ve bu esnada su buharı ve diğer maddeler yoğunlaşarak ayrılmaktadır.
- ✓ Doğalgazın temizlenmesi ifadesinden, CO_2 ve kükürtlü bileşiklerden arındırma işleri anlaşılmaktadır.

CO_2 ve H_2S 'ü doğalgazdan ayırmak için en uygun yöntem kimyasal veya fiziksel absorpsiyondur.

- **Kimyasal absorpsiyonda**, absorbent, hemen doymaya eriştiğinden, ham doğalgazdan ayrılacak olan ham doğalgazdaki CO_2 ve H_2S miktarlarının düşük olması gerekmektedir.
- **Fiziksel absorpsiyonda** ise absorblanan miktar, basınçla doğru orantılı olduğundan, bu yöntemde yüksek basınçlarla çalışılmaktadır.

Absorpsiyon işleminde ya iki bileşen birlikte absorblanır ya da ikisinden birine öncelik tanınır.

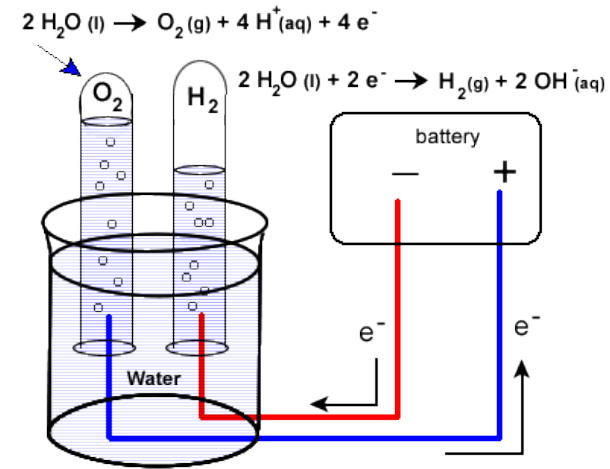
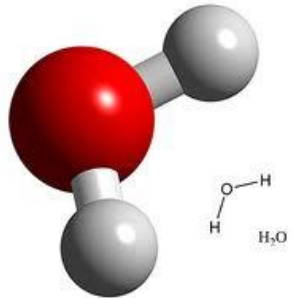
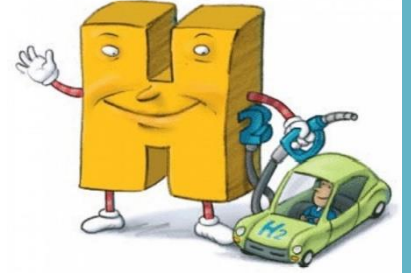
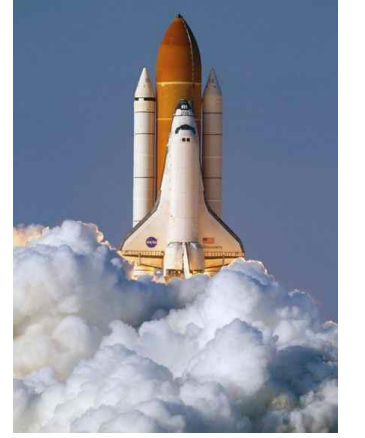
Doğalgazın Sıvılaştırılması:

- ✓ Tüketim yerlerinden uzakta ve coğrafi bakımdan elverişsiz yerlerdeki yataklardan çıkarılan doğalgazın kolayca taşınması ve tüketimin fazla olduğu kış mevsimine kadar saklanması bakımından düşük sıcaklıklarda sıvılaştırma yöntemine başvurulmaktadır.
- ✓ Bu durumda 600/1 oranında hacim küçültme sağlanabilmektedir.
- ✓ Sıvılaştırma tesisleri, genellikle doğalgaz yataklarının yakınında kurulur veya bu sıvılaştırma işlemi, özel tanklı gemilerde yapılır.



Hidrojen:

- ✓ Hidrojen, suni sıvı yakıt üretiminde, roket yakıtı olarak, amonyak sentezinde ve yağların hidrojenlenmesinde kullanılan önemli bir gazdır.
- ✓ Saf hidrojen ancak elektroliz yoluyla elde edilir.
- ✓ Su buharının demir tarafından indirgenmesi, su gazının ekstraksiyonu, kok fırını gazlarının ekstraksiyonu gibi diğer yöntemler gaz karışımı vermektedir.
- ✓ Suyun elektrolizi yönteminde %15'lik sodyum hidroksit çözeltisi kullanılır. 1 mol suyun elektrolizi için minimum enerji 247 kJ olup, 2,7 V civarında gerilim uygulamak gerekir. Sıcaklık 60°C'ta tutulur. Katotta oksijenin, anotta ise hidrojenin toplanmaması için elektrotlar uygun diyaframla birbirinden ayrılır.





İLERİ YANMA VE MODELLEME

✓ ROKET YAKITLARI



PROF.DR.MUSTAFA İLBAŞ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ABD

Roket, momentum prensibine göre çalışan yüksek enerjili yakıtlar ile itki oluşturan motorlara verilen isim olarak adlandırılmaktadır.

Roket motorları Newton'un üçüncü hareket yasasına göre **“her etkiye karşılık eşit ve zıt bir tepki prensibi”** ile çalışmaktadır.



Atmosferin oksijenine ihtiyaç duymadan atmosfer içi ve dışı ortamlarda problemsiz çalışabilirler.

Uzay çalışmalarında kabini uzaya taşımak, askeri amaçlı kullanımlarda silah başlığını hedefe sevk etmek ve haberleşme uydularını yörüngeye yerleştirmek için kullanılmaktadır.

Kimyasal esaslı yakıtla çalışan roketler, genellikle kendi içerisinde üç kategoriye ayrılırlar.

katı yakıtlı roketler

sıvı yakıtlı roketler

hibrid yakıtlı roketler

YAKITTAN İSTENİLEN ÖZELLİKLER

Yanma hızının sabit olması

Buhar basıncının düşük olması
(Katı yakıtlarda buhar basıncı çok düşüktür.)

Yanma sırasında bölgesel patlamalar yapmaması

Donma noktasının düşük olması

Özgül ısısının yüksek olması

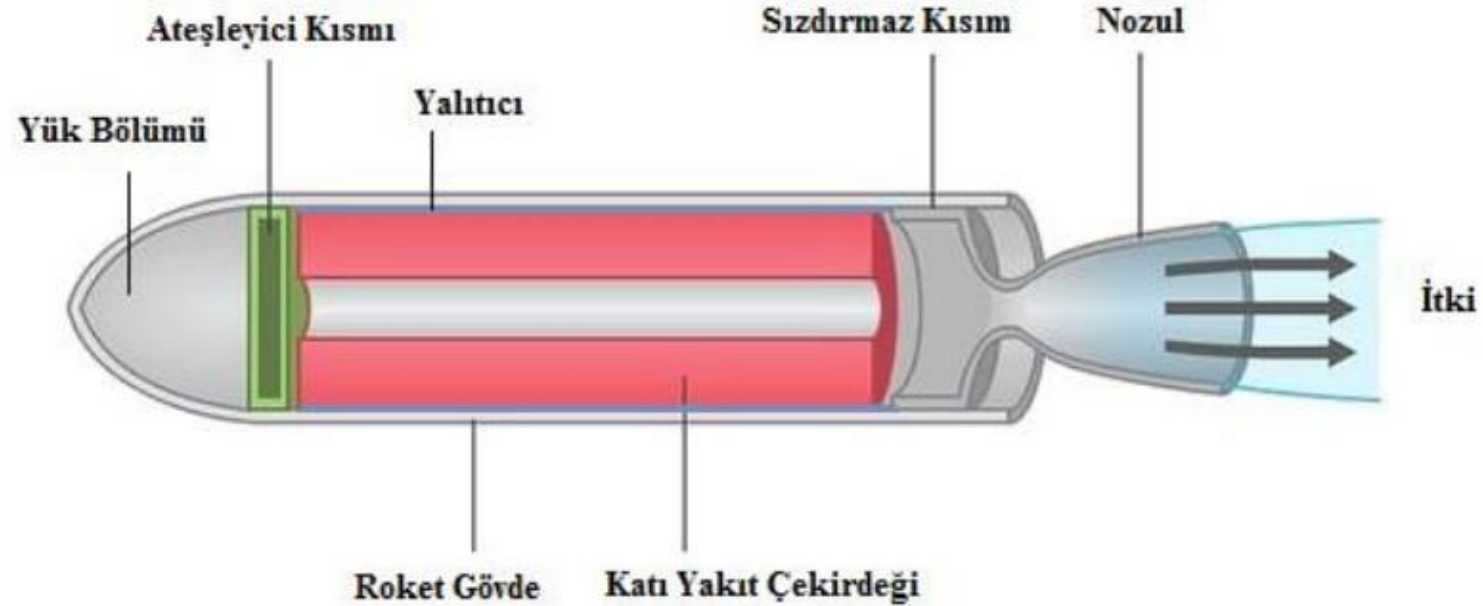
Kolay elde edilmesi ve ucuz olması

Zehirli ve korozyif olmaması

Yakıtlar için kalite indeksi $Q=gV_e^2$ denklemiyle verilir. Burada Q kalite indeksi, g yakıtın yoğunluğu ve V_e ise ekzost hızıdır.

KATI YAKITLI ROKETLER

- ✓ Bu roketlerin en güzel yanı basit yapıda olmalarıdır.
- ✓ Genelde yakıt tankları bir tanedir.
- ✓ Roket basit olarak üç kısımdan oluşmaktadır.
 - Birincisi yük (uydu veya patlayıcı),
 - İkinci kısım yanıcı ve yakıcı maddenin bir arada bulunduğu tek bir yakıt tankı,
 - Üçüncü kısım ise eksoz.



- ✓ Genelde atmosfer içinde veya atmosferin üst kısımlarına yük taşımak amacıyla kullanılırlar.
- ✓ Yakıtın yanmasını sağlayan ve kontrol eden bir motor düzenekleri yoktur.
- ✓ Askeri alanda en çok kullanılan roket türleridir.



- ✓ Hacim ve büyüklük bakımından sıvı yakıtlı roketlere nazaran çok küçük olabilirler.
- ✓ Askeriyede, omuz üzerinden tanklara ve uçaklara karşı kullanılan roketler bu tür yakıt kullanırlar.
- ✓ Bunların atmosfer içinde havanın direncinden dolayı rotalarından çıkmamaları için daha büyük kanatları vardır.

- ✓ Katı yakıtlı roketlerde yanıcı ve yakıcı madde mümkün mertebede homojen olarak karıştırılarak bir arada bulunmaktadır.
- ✓ Bu nedenle eğer karışım homojen olmazsa roketin yanma odasında ve eksoz çıkışında bölgesel patlamalar meydana getirmekte, bu nedenle roketin hızı düzenli olmamaktadır.
- ✓ En büyük avantajları ise itme gücünün yüksek olmasıdır.
- ✓ Sıvı yakıtlılardan iki kat daha büyük bir itme gücü sağlarlar.
- ✓ Eksoz ısıları çok yüksek olduğundan, yakıt tankı ve eksozun çok sağlam olması gerekir.
- ✓ Bazı roketlerde eksozu soğutan bazı ek düzenekler vardır.
- ✓ Roketin hızını ve yanma hızını kontrol eden bir düzenek yoktur.
- ✓ Ek düzeneklerin olmaması roketin yükünü azalttığı için bir yerde avantaj olarak kabul edilebilir.



Kimyasal katı roket yakıtları kombinasyonunda özgül itki değerleri

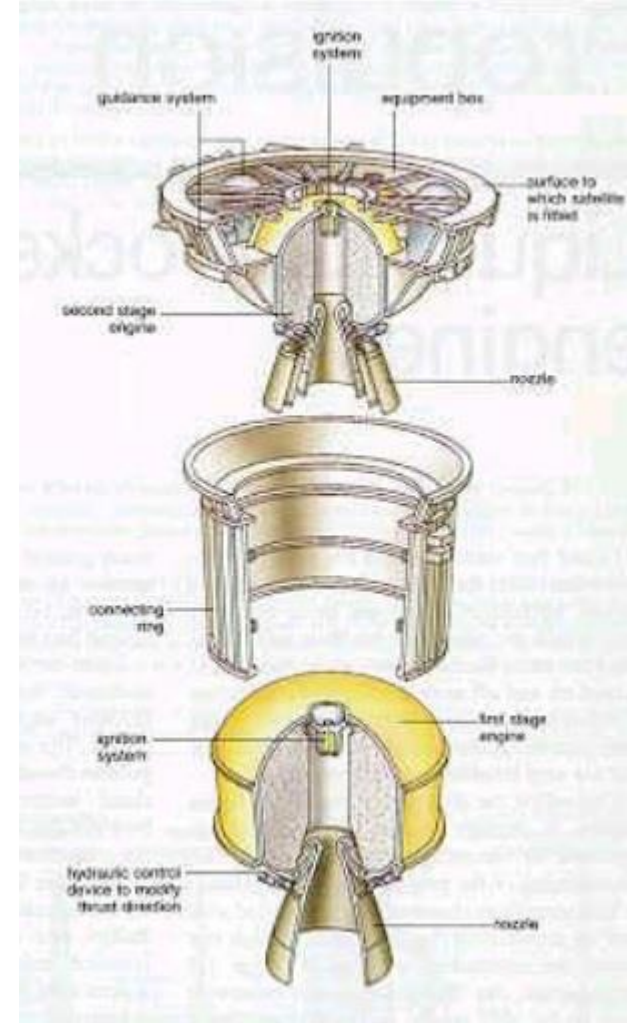
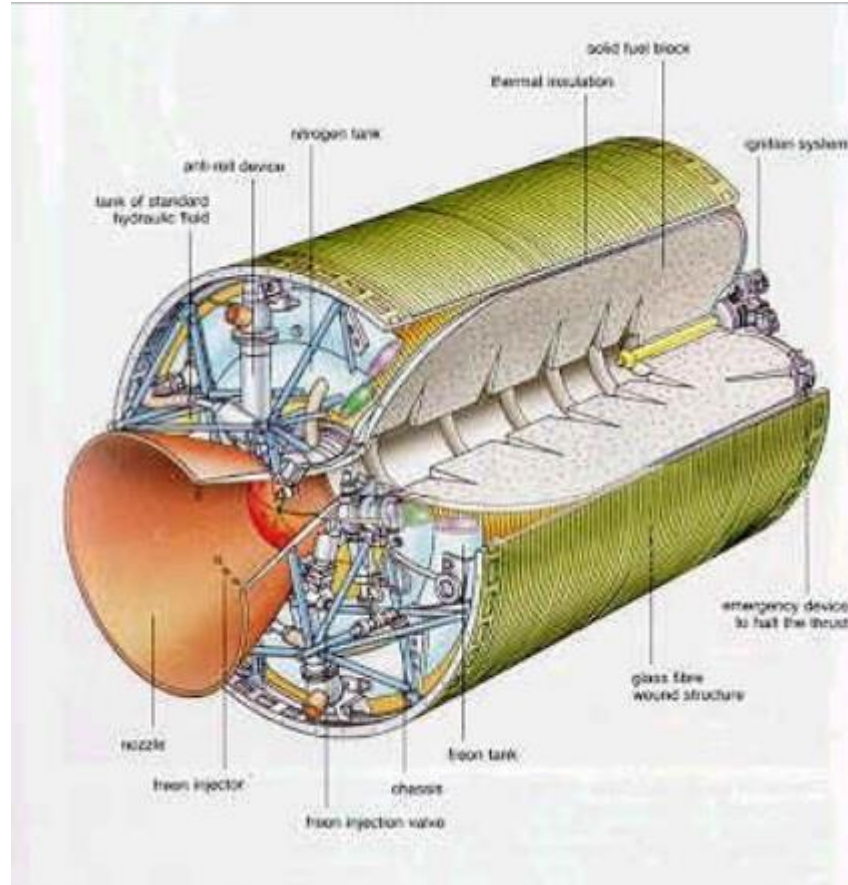
Oksitleyici	Katı Yakıt ve Bağlayıcılar	Özgül İtki (I_{SP}) (Birim Saniye)
Potasyum Perklorat (KP)	Asfalt	170-210 s
Amonyum Perklorat (AP)	Sentetik Kauçuk(Polybutadien) Poluyüretan Nitropolimer (Organik Nitrat)	170-210 s 210-250 s 210- 250 s
Amonyum Nitrat (AN)	Polyester Sentetik Kauçuk (Polibutadien) Nitro Polimer	170-210 s 170-210 s 210-250 s
Amonyum Perklorat (AP)	Bor Lityum Alüminyum	170-250 s 200-250 s 200-250 s
*Oksitleyici Yakıtın Kendi İçeriğinde	*Çift Bazlı (DB) Katı Yakıt	*220-230 s
Amonyum Perklorat (AP)	DB+Al	260-265 s
Amonyum Perklorat (AP)	DB+HMX+Al	265-270 s
Amonyum Perklorat (AP)	Polivinil klorür (PVC) + Al	260-265 s
Amonyum Perklorat (AP)	Poluyüretan(PU) + Al	260-265 s
Amonyum Perklorat (AP)	Polybutadien Akrilik Asit (BPAN) + Al	260-263 s
Amonyum Perklorat (AP)	Karboksil Uçlu Polibütadien (CTPB) + Al	260-265 s
Amonyum Perklorat (AP)	Hidroksil Uçlu Polibütadien (HTPB) + Al	260-265 s
Amonyum Perklorat (AP)	Polibütadien-Akrilik Asit Polimer (PBAA) +	260-265 s

* işaretli çift bazlı yakıtın temel bileşenleri nitroselüloz (NC) ve nitrogliserin (NG)'nin bünyelerinde yeterli oksijen bulundurmasından dışarıdan ayrıca oksitleyiciye ihtiyaç duyulmamaktadır.

Birçok katı yakıt olmasına rağmen aşağıda yazılı iki karışım tercih edilir:

1. Yanma hızı içine çeşitli maddeler katılarak azaltılmış nitrogliserin

2. Amonyum Nitratla karıştırılmış, sentetik lastik



Katı Yakıtlı Roketlerin Avantajları

- 1) Yakıtın ucuzluğu ve kolay elde edilmesi tercih nedenidir.
- 2) Kaldırma kuvvetleri ve hızları çok yüksektir. Bu nedenle askeri roketler genelde katı yakıtlıdırlar. Kısa sürede hedefe ulaşırlar, düşman füzeleri tarafından yakalanması ve düşürülmeleri zordur.
- 3) Amaca göre farklı büyüklüklerde imal edilebilirler (omuz üzerinden, uçaktan ve rampa kullanılarak atılabilecek büyüklüklerde olabilirler).
- 4) Öz itimleri 250-300 saniye dolayındadır. (Öz itim: Roket motorunun 1 saniyelik çalışması ile yakılan yakıtın bir pound (yaklaşık 0.5 kg) dan elde edilen itme kuvvetinin süresi)
- 5) Taşıdıkları yakıt, hedef yükün 20 katına kadar çıkabilir.
- 6) Taşınmaları ve saklanmaları kolaydır.
- 7) Her zaman ateşlemeye hazır durumda tutulabilirler. Yakıt yüksek basınç altında saklanır.
- 8) Yanma süreleri kısadır yüksek eksoz basıncı oluştururlar. Eksoz sıcaklıkları yaklaşık 3000 °C dir.

- 9) Genelde tek kademeli roketlerdir ve tek bir hedef yükü taşırlar.
- 10) İmal edilmeleri basit ve ucuzdur. Sadece yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı bir döküm ve uygun bir kaplamaya ihtiyaç duyarlar.
- 11) Eksoz soğutması ek bir düzenek gerektirmez. Grafit kullanılarak ısının absorblanması sağlanır.
- 12) Sıvı yakıtlı roketlere nazaran daha güvenlidirler.
- 13) Yanma basınçları 1000-2000 Newton'dur.
- 14) Parçalı roketlerin ilk ateşlenen kısımlarında ve kademeli roketlerin birinci bölümünde kullanılırlar.

Katı Yakıtlı Roketlerin Dezavantajları

- 1) Yanma hızı kontrol edilemediğinden, roketten birden fazla eksoz bulunur. Buda itme gücünden kayba neden olur.
- 2) Yakıt homojen olarak imal edilmediyse, yanma odasında ve eksozda tahribata ve hedef sapmasına yol açar (yakıt vana ve pompa sistemleri yoktur).
- 3) Roket ateşlendikten sonra durdurulamaz.

SIVI YAKITLI ROKETLER

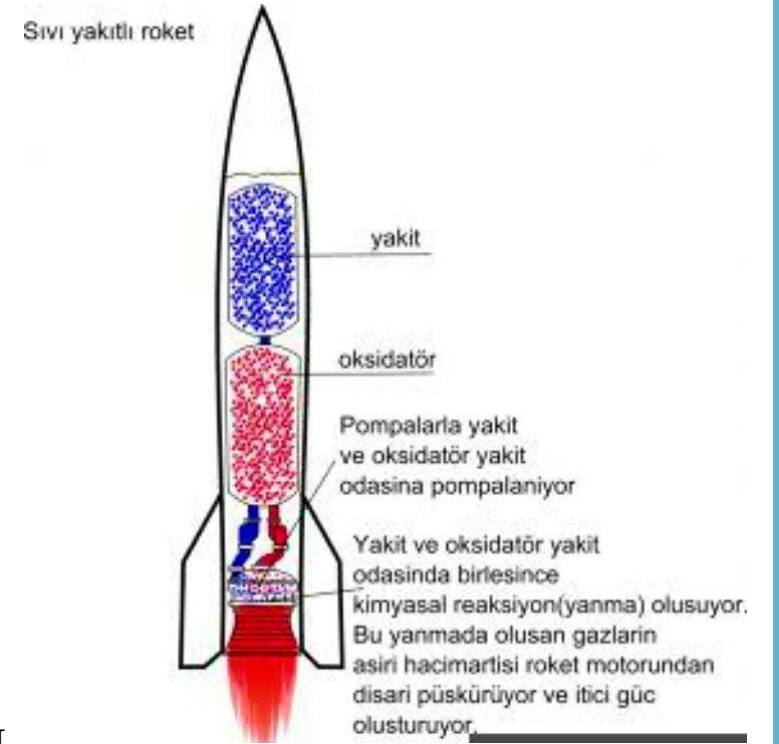
- Yakıt tankları iki kısımdan oluşan, büyük hacimli ve ağır roketlerdir.
- Roket gövdesinde yanıcı ve yakıcı sıvı tankları bulunurlar.

a) Yakıcılar

- Nitrik asit HNO_3
- Nitrojen peroksit (azot peroksit) N_2O_4
- Flor F_2
- Oksijen O_2
- Hidrojen H_2

b) Yanıcılar

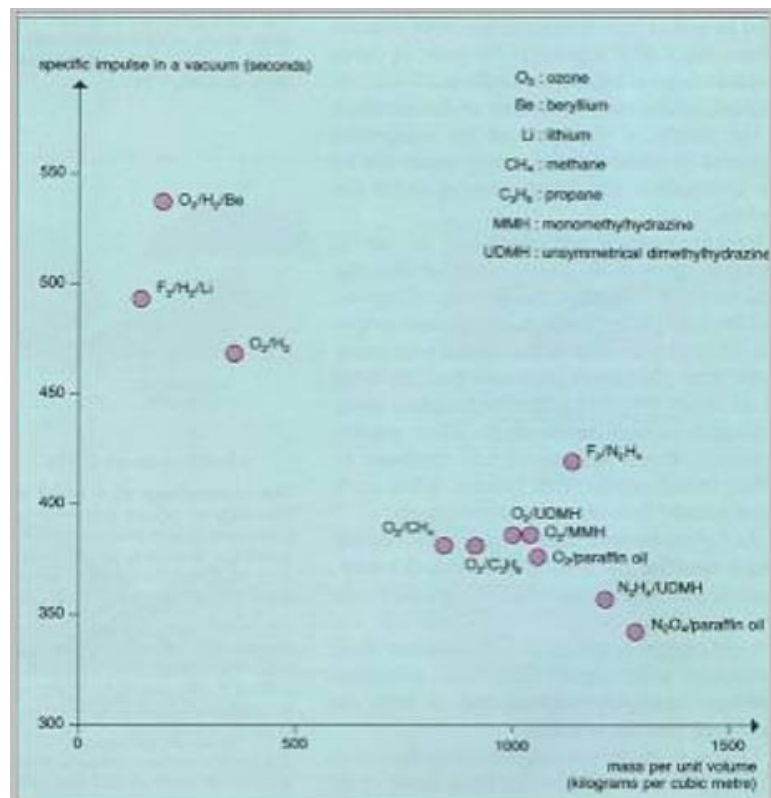
- Sıvı Hidrojen
- Kerosene (parafin oil) $\text{CH}_{1.953}$
- Hidrozin N_2H_4
- Propan C_3H_8
- Metan CH_4
- Hipergolik yakıtlar
 - MMH: monometilhidrozin
 - UDMH: antisimetrik dimetilhidrozin $\text{N}_2\text{H}_2(\text{CH}_3)_2$



- **Hidrojenperoksit** kullanıldığı zaman platin bir katalizör yardımıyla hidrojen ve oksijene ayrıştırılır. Daha sonra yanma odasında yakılır. Kullanımı ve depo edilmesi zor bir yakıt olduğundan sınırlı bir kullanım alanı vardır. Uyduların küçük yörünge düzeltmelerinde kullanılır.
- **Hidrozin**, genelde hidrojen ve azot karışımıdır. Uygun bir katalizör yardımıyla sıcak azot ve hidrojen birbirinden ayrılır. Daha sonra oksijen ve flor ilave edilerek yanma sağlanır. Bu yakıt genellikle Ay'a ve gezegenlere giden insansız uydularda yön değiştirmek ve yörüngeye yerleştirmek için kullanılır. Bazı Rus yapımı roketler ilk ateşlemede bu yakıtı kullanırlar.
- **Kerozen, Oksijen ve Hidrojen** en çok kullanılan yakıtlardır. Bu yakıtı kullanan roketlerin en büyük sorunu H ve O'nin depolanma sorunudur. Depoda çok düşük sıcaklıklarda bulunmak zorundadırlar. Aksi takdirde hemen gaz haline geçerler. Depoda sıvı halde tutulurlar. Depoların yüksek basınca dayanıklı ve ısıya karşı iyi yalıtılmış olmaları gerekir.
- **Hipergolik yakıtlar** ise, kaliteli olmalarına karşın zehirli ve korozen maddelerdir. Kademeli roketlerin ikinci ve üçüncü kısımlarında kullanılır. Neden ilk ateşlemede kullanılmazlar? Hipergolik yakıtlarda yanıcı ve yakıcı madde bira raya geldiğinde bir ateşleme tertibatına gerek kalmadan kendiliğinden tutuşurlar. Yakıcı olarak genelde azottetraoksiti kullanırlar. Delta, Atlas ve Thor roketlerinin ikinci kademe yakıtıdırlar.

Bazı kimyasal sıvı roket yakıt kombinasyonlarının özgül itki değerleri

Yakıt Çeşidi ve Enerji Düzeyi	Sıvı Yakıt Kombinasyonu ve Oksitleyici	Özgül İtki (I_{SP}) (Birim Saniye)
Düşük Enerjili Mono Yakıtlar	Hidrazine Ethilen Oksit Hidrojenperoksit	160-190 s
Yüksek Enerjili Mono Yakıtlar	Nitrometan	190-230 s
Düşük Enerjili Tek Bazlı Yakıtlar	Perkloryl fuloride-available fuel Analine-Asit JP4-Asit Hidrojenperoksit-JP4	200-230 s
Orta Seviye Tek Bazlı Yakıtlar	Hidrazine-Asit Amonia- Nitrojentetraoksit	230-260 s
Yüksek Enerjili Tek Bazlı Yakıtlar	Sıvı Oksijen-JP4 Sıvı Oksijen-Alkol Hidrazine-Chlorine trifloride	250-270 s
Daha Yüksek Enerjili Tek Bazlı Yakıtlar	Sıvı Oksijen ve florine-JP4 Sıvı Oksijen ve ozon-JP4 Sıvı Oksijen-Hidrazine	270-330 s
Süper Yüksek Enerjili Tek Bazlı Yakıtlar	Florine-Hidrojen Florine-Amonia Ozon-Hidrojen Florine- Diborane	300-385 s
Kriyojenik Süper Yüksek Enerjili Tek Bazlı Yakıt	Sıvı Oksijen-Sıvı Hidrojen	380-460 s

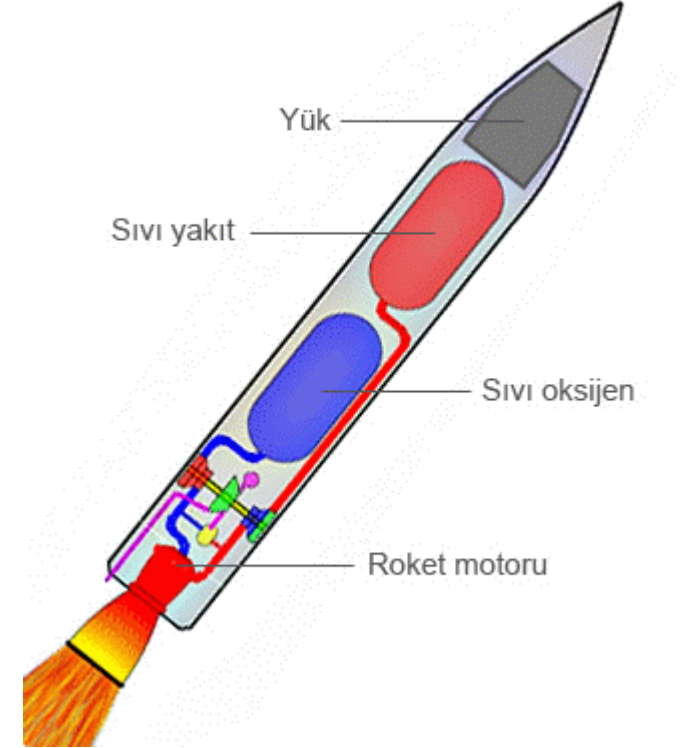


Various properties of liquid fuels

	oxidant					fuel		
	nitric acid	nitrogen peroxide	oxygen	fluorine	hydrogen	kerosene (paraffin oil)	hydrazine	UDMH
Chemical formula	HNO_3	N_2O_4	O_2	F_2	H_2	$CH_{1.953}$	N_2H_4	$N_2H_2(CH_3)_2$
Molecular weight (atomic mass units)	63	92	32	38	2		32	60
Temperature of freezing point ($^{\circ}C$)	-41.6	-11.2	-218.8	-219.5	-258.76	-50	1.53	-57.2
Temperature of boiling point at sea level ($^{\circ}C$)	84.1	21.15	-183	-188	-252.76	distillation from 180 to 255	113.5	63.1
Density (kg/m^3)	1504	1434	1140	1605	71	800	1004	785

Sıvı Yakıtlı Roketlerin Avantajları

- 1) Yanma odasında yanma hızı kontrol altında tutulabilir. Yanma odası delikli bir yapıya sahiptir. Deliklerden eşit şiddette püskürtülen madde homojen olarak yakılabilir.
- 2) Eksoz soğutması bizzat yakıt tarafından yapılır. Yakıt yanma hücreğine gelmeden evvel eksoz çevresinde dolaştırılarak eksoz soğutulur. Aynı zamanda gaz da ısıtılmış olur.
- 3) Çok kademeli roketler için ideal bir yakıt türüdür. Birden fazla hedef yük taşıyabilirler (örneğin aynı anda iki veya üç uydu, ya da birden fazla nükleer yakıt başlığı taşımaları).
- 4) Yanma süreleri uzundur ve yanma sıcaklıkları 22000 °C kadar çıkabilir.



Sıvı Yakıtlı Roketlerin Dezavantajları

- 1) Fırlatılmaları için dev rampalara ihtiyaç duyarlar. Dev yapılı roketlerdir ve ağırdırlar.
- 2) Öz itimleri katı yakıtlara nazaran %15 daha azdır.
- 3) Yakıt kütlesi, yükün on katından fazla olamaz.
- 4) Çok karışık mühendislik gerektirirler bu nedenle çok pahalı roketlerdir. Ariane roketlerinin bir atılışta iki veya üç uyduyu yörüngeye oturmalarının nedeni, roket sisteminin pahalılığından kaynaklanmaktadır.
- 5) Yakıtın yanması ve kontrolü, vana ve pompa sistemleri ile yapıldığından ek bir yük getirir.
- 6) Yakıt çok zehirli ve yanıcı olduğundan olağanüstü güvenlik tedbirlerine ihtiyaç vardır.
- 7) Yakıt, roket ateşlenmeden kısa bir süre önce rokete yüklenmelidir. Eğer herhangi bir nedenle fırlatma ertelenirse, yakıt derhal boşaltılmalıdır.

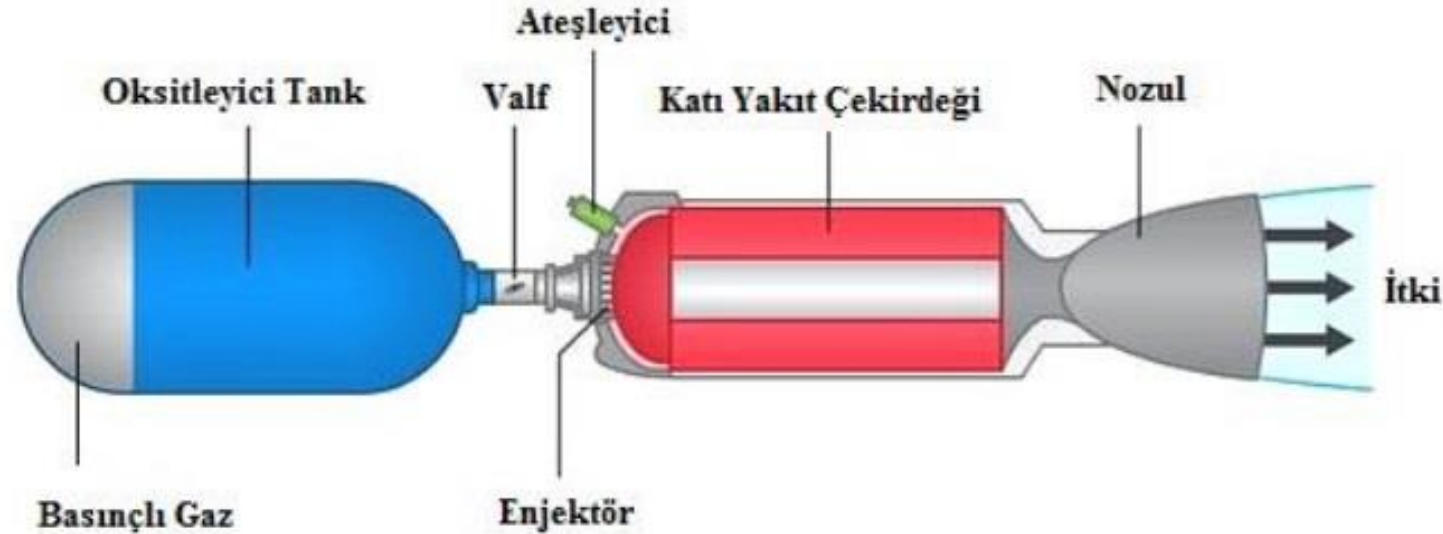
- 8) Kullanılan yakıt oksitleyici özelliğe sahip olduğundan vana ve pompalarda arızaya bu da roketin kontrolden çıkmasına ve düşmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı mekanik pompalardan kaçınılır. Bunların yerine mekanik olmayan gazla çalışan pompalar veya yardımcı gazın basıncı ile püskürtme işini sağlayan yollar denenmiştir.

(Ariane V'in V63 nolu fırlatılması: 24 Ocak 1994 günkü uçuşun numarası V63 idi ve diğer birçok uçuş gibi 2 uydu taşıyordu: Türksat 1 ve Eutelsat 2F5. Fırlatma aracı Ariane filosunun ikinci en güçlü modeli olan Ariane-4 AR44LP idi. Ancak uçuş başarısızlıkla sonuçlandı. Toplam kayıp 350\$ civarında idi. Kaza Ariane'nın 1976'dan beri meydana gelen 6. kazası. Başka bir deyişle 63 fırlatmadan 57'si başarılı, 6'sı başarısızlıkla sonuçlanmıştı. Kazaya cryogenic 3. aşama motorunun görevini yapamaması neden olmuştur. Aslında 6 kazadan dördünde suç aynı motorda bulunmuştur. Bu motor Fransız SEP (Societe Europeene de Propulsion) tarafından üretilmekte. Yetkililerin açıklamalarına göre, fırlatmadan 6 dakika 47 saniye sonra (3. aşama motorunun ateşlenmesinden bir dakika sonra) sıvı oksijen turbo pompasındaki bir mil yatağında hızlı bir sıcaklık artması gözlemlendi. Bu turbo motor 13000 devir/dakika hızla dönmekte ve -170 °C sıcaklıkta tutulmada idi. 20 saniye sonra pompa tamamı ile durdu. Uzmanlar mil yatağının tahrip olduğunu düşünüyorlar. 3. aşama motoru ve iki uydu, Batı Afrika açıklarında Atlantik'e düştü.)

HİBRİT YAKITLI ROKETLER

Roket motorunda birbirinden farklı fazdaki farklı roket yakıtları kullanan bir roketdir. Bu yakıtlardan biri **katı** halde ve diğeri ise **gaz** ya da **sıvı** haldedir.

En basit haliyle, hibrit roket motorunda, **sıvı oksitleyici** içeren **basınçlı bir kazan** (tank) ve **katı roket yakıtı** içeren bir **yanma odası** ile bunları ayıran mekanik bir cihazdan oluşmaktadır. İtki gerektiğinde, uygun bir ateşleme kaynağı yanma odasına sokulur ve aradaki **vana** açılır. Sıvı (ya da gaz) yakıt yanma odasına akar ve orada buharlaşır akabinde ise katı yakıt ile etkileşir. Yanma, katı yakıtın yüzeyine bitişik bir sınır tabaka yayılma alevi içerisinde gerçekleşmektedir.





AMROC şirketinin 44 kiloNewton (10 kilolbf) değerinde itkiye sahip hibrit roket motorunun 1994 yılında Stennis Uzay Merkezindeki test edilişı

Sıvı yakıtlı roketlere göre üstünlükleri

- 1) Mekaniksel olarak daha basit - sadece tek bir sıvı yakıt bileşeni içerdiğinden daha az karmaşık boru sistemi, daha az sayıda vana, ve daha basit işlemler ve süreçler içermektedir.
- 2) Daha yoğun yakıt- katı fazdaki yakıt genellikle sıvı haldekilere göre daha yüksek yoğunluğa sahiptir, bu da toplam sistem hacmini küçültür.
- 3) Metalik katkı maddeleri - alüminyum, magnezyum, lityum ya da berilyum gibi reaktif metaller, sıkıştırılmış yakıt tozu içine kolayca eklenebilmekte ve özgün itici kuvvet ve yoğunluk değerlerinden birisini ya da ikisini de birden artırabilmektedir.
- 4) Yanma kararsızlıkları- Hibrit roketler, sıkıştırılmış katı yakıt tozunun akustik dalgaları kırması sebebiyle, sıvı roketlerde sıkıntı yaratan yüksek frekans yanma kararsızlıklarını sergilemez. Akustik dalgaların yanma kararsızlıklarına yol açmasının sebebi içinde boşluk içeren sıvı yakıt yanma odasının iç çeperlerinden yansımalarıdır.

- 5) Yakıt basınçlandırması - Sıvı yakıtlı roket sistemlerinin tasarlaması en zor kısımları turbo-pompalardır. Turbo-pompa tasarımının, farklı özelliklerdeki (genellikle çok uçucu olan) iki farklı sıvıyı çok yüksek hacimli akış hızlarında, sıklıkla kriyojenik sıcaklıklarda, birbirinden ayrık halde tutması ve kendisine güç sağlayabilmek amacıyla bu iki sıvıyı, kesin ve etkili bir şekilde hassas miktarlarda karıştırarak yakmak üzere pompalaması gerektiğinden, turbo-pompa tasarımı çok karmaşıktır. Hibrit motorlarda sistem içinde dolaşan daha az miktarda sıvı bulunur ve bu sıvılar (sıvı roketlerde kullanılamayacak kadar ağır gelecek olan) aşağı-üfleyen sistem ya da kendiliğinden basınçlı (N_2O gibi) oksitleyiciler sayesinde basınçlandırılabilirler.
- 6) Soğutma- Sıvı yakıtlı roketler, yanma odasını ve nozulu soğutmak için sıklıkla, çok yüksek ısı akıları ve metal çeperlerin oksitlenmeye ve gerilme çatlamasına karşı zayıflığı nedeniyle, itici sıvılardan birini, genellikle de yakıtı kullanır. Hibrit roketlerin yanma odaları katı yakıtla kaplı olduğu için oluşan gazlardan korunur. Nozulları genellikle, katı yakıtlı roket motorlarına benzer şekilde ya grafitendir ya da aşınabilir/ablatif malzemeye kaplanmıştır. Sıvı soğutma akış düzeneğinin tasarımı, üretimi ve testi karmaşık olduğundan, sistemi bozulmalara açık hale getirir.

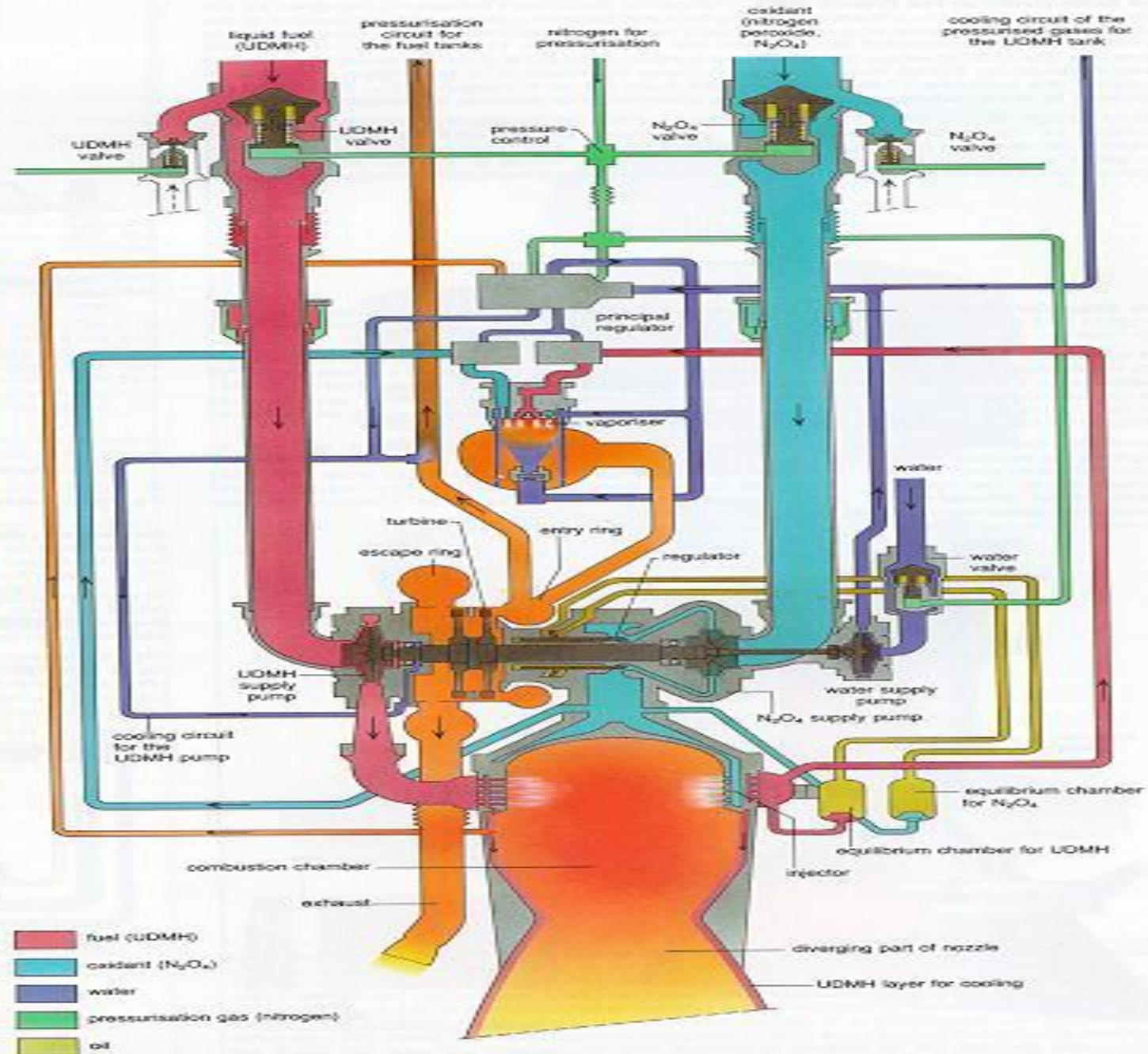
Katı yakıtlı roketlere göre üstünlükleri

- 1) Daha yüksek kuramsal özgün itici kuvvet değerleri - Sıklıkla kullanılan sıvı oksitleyiciler ile karşılaştırıldığında, bilinen katı oksitleyicilerin limitleri bu değerleri mümkün kılmaktadır.
- 2) Daha düşük patlama tehlikesi - Sıkıştırılmış yakıt tozu, çatlamlar gibi hatalara karşı daha dayanıklıdır çünkü yanma oranı oksitleyicinin kütle akı oranına bağlıdır. Sıkıştırılmış yakıt tozu, ortamdaki elektrik kaçağından kaynaklanan kıvılcımlardan alev alamaz ve ayrıca ısıdan kaynaklı kendiliğinden alev alan bir yapıya da sahip değildir. Hibrit roket motorları, fırlatma alanına oksitleyici ve yakıt ayrı ayrı saklanarak götürülebilir ve böylece güvenlik artırılabilir.
- 3) Bakım ve depolama ile ilgili daha az sorun - Katı yakıtlı roketlerdeki malzemeler genellikle kimyasal ve ısısal/termal açıdan birbirleriyle uyumsuzdurlar. Sıcaklıktaki tekrarlayan değişimler sıkıştırılmış tozun yapısında bozulmalara yol açabilir. Sıkıştırılmış tozun dağılmasını ya da bozulmasını önlemek için antioksidanlar ve kaplamalar kullanılır.
- 4) Daha iyi idare/kontrol edilebilir - Durdurma/yeniden-başlatma ve kısılabılme özellikleri kolayca çoğu tasarıma eklenebilmektedir. Katı yakıt motorları ise nadiren kolayca durdurulabilmekte ve neredeyse hiçbir zaman "kısılabılme" ya da "yeniden başlatılabilme" özelliğini içermemektedir.

Hibrit roketlerin dezavantajları

- 1) Oksitleyici/yakıt oranı değişimi (O/Y değişimi)- sabit bir oksitleyici akış-hızı ile, (oksitleyici ve katı yakıt tozunun yanması sonucu oluşan) itici yakıt üretimin hızı, yakıt tozu azaldıkça, oksitleyici akış hızına göre değişecektir. Bu da kimyasal verim açısından, olabileceğinden daha düşük işleme/operasyona yol açar. Ancak iyi tasarlanmış bir hibrit motor için, O/Y oranı değişiminin verim üzerinde çok küçük bir etkisi olur, çünkü özgün itici kuvvet değeri en yüksek işlem verimine yakın noktalarda O/Y oran değişiminden etkilenmemektedir.
- 2) düşük 'azalma-oranı'na (katı yakıt tozunun azalma oranı) sahip yakıtlar genellikle çok-girişli/delikli katı yakıt tozundan oluşurlar. Çok-girişli katı yakıt tozları kötü hacimsel verime sahiptir ve sıklıkla, yapısal kusurlar içerirler. 1990'ların sonuna doğru geliştirilen yüksek azalma oranına sahip sıvılaştıran yakıtlar, bu soruna olası bir çözüm sunmaktadırlar.
- 3) Sıvı yakıt temelli itki sistemleri ile karşılaştırıldığında, itki yakıtını kısmen ya da tamamen tüketmiş olan bir hibrit roketin yakıtı tekrar doldurma işlemi önemli zorluklara yol açmaktadır çünkü katı yakıt (tozu) basitçe yakıt tankına pompalanamaz. Ancak bu durum, (yakıtı tükenmiş) roketin ne amaçla kullanılacağına bağlı olarak sorun teşkil etmeyebilir.

- Roket yakıtlarının pahalı olması, taşınmaları ve korunmalarının tehlikeli olması roket mühendislerini daha değişik kaynaklar aramaya sevk etmiştir.
- Özellikle yörüngeye oturtulan uydularda yörünge düzeltmeleri yapmak, her türlü haberleşme için hep enerjiye ihtiyaç vardır.
- Enerji uydunun sistemlerindeki elektronik donanım içinde en önemli unsurdur. Bu nedenle enerjiyi sağlayan kaynak ya uydu ile beraber gönderilir ya da uzaydan tedarik edilmeye çalışılır.
- Eğer uydunun içerisine enerji kaynağı konulursa bu hem sınırlı bir kullanım sağlar aynı zamanda uydu içinde bir tehlike oluşturur.
- Bu nedenle insanlı ve insansız uydularda enerji güneş pilleri yardımıyla sağlanır ya da akü sistemi kullanılır.
- Böyle olunca da yörünge düzeltmesi için kullanılan motorlar daha özenli ve kullanışlı yapılmak zorundadır.
- Hangi yolla olursa olsun elde edilen enerjinin büyük bir kısmı yörünge düzeltmelerinde kullanılır.





İLERİ YANMA VE MODELLEME

✓ YANMA-1

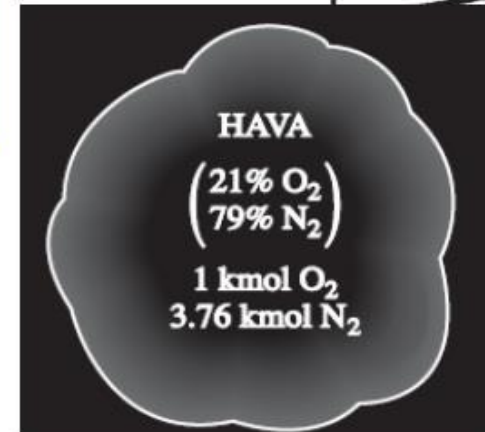


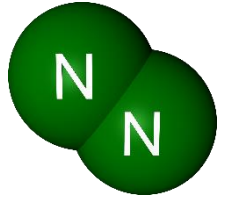
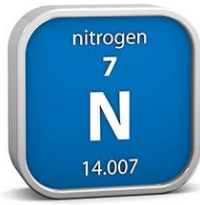
PROF.DR.MUSTAFA İLBAŞ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ABD

YANMA

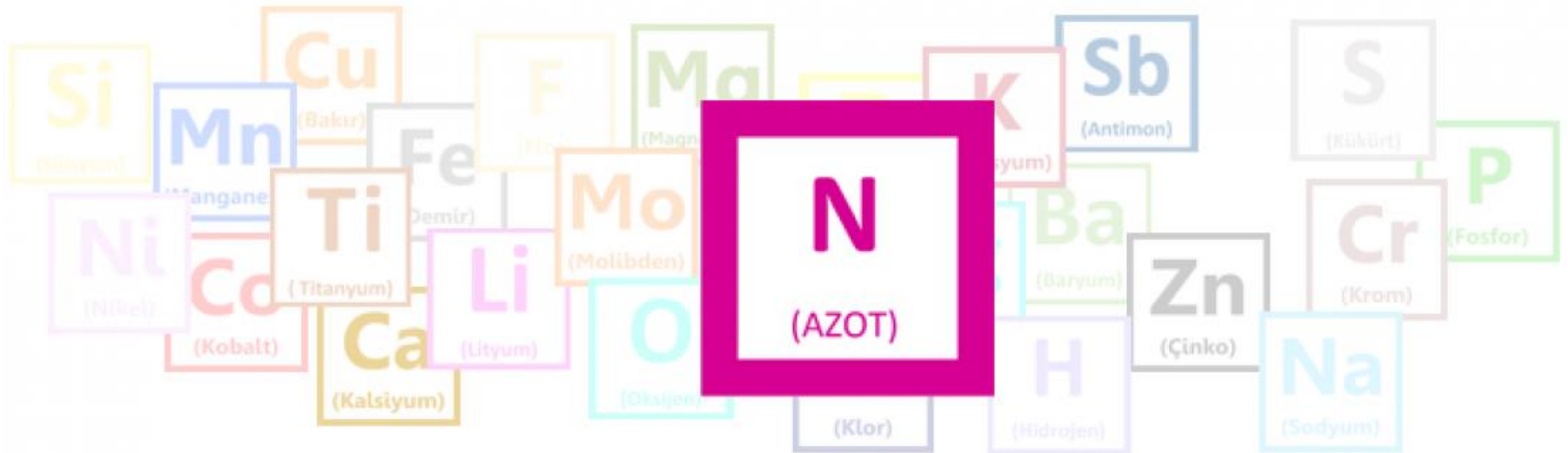
Bir yakıtın yüksek miktarda enerji açığa çıkararak gerçekleştirdiği oksitlenme tepkimesine yanma denir. Yanma prosesinde, gerek serbest olması gerekse de kolay elde edilebilmesi gibi nedenlerden dolayı en sık kullanılan oksitleyici havadır. Saf oksijen (O_2) yalnızca kesme ve kaynak gibi, havanın kullanılmadığı bazı özel uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu yüzden, havanın bileşimi hakkında daha detaylı bilgi sahibi olunmasında fayda vardır.

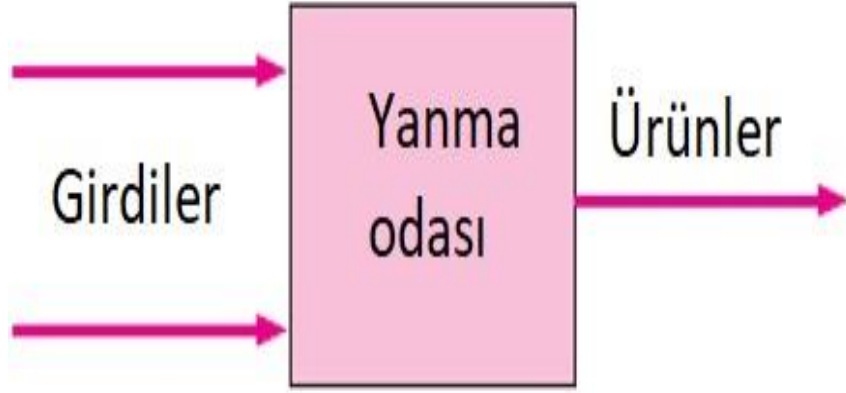
Mol veya hacimce kuru hava %20.9 oksijen, %78.1 azot, %0.9 argon ve az miktarda karbon dioksit, helyum, neon ve hidrojenden meydana gelir. Yanma işlemi incelenirken, havadaki argon azot olarak işlem görür ve eser miktarda bulunan diğer gazlar göz ardı edilir. O zaman, kuru hava, yaklaşık molce %21 oksijen ve %79 azotdan ibarettir. Bu nedenle, yanma odasına giren her mol oksijen $0.79/0.21 = 3.76$ mol azot bulunur.





- Yanma esnasında **azot inert gaz** olarak davranır ve yanma sonucu çok az miktarda azot oksit oluşturmasının dışında diğer elementler ile tepkimeye girmez.
- Bununla beraber, azotun varlığı bile yanma sonucunu önemli ölçüde etkiler.
- Çünkü genellikle büyük miktarlarda azot, yanma odasına düşük sıcaklıklarda girer ve yanma sırasında ortaya çıkan kimyasal enerjinin büyük bir kısmını alarak önemli derecede yüksek bir sıcaklıkla yanma odasını terk eder.





Yanma işlemi esnasında;

- Tepkimeden önce bulunan bileşenlere “girdiler”,
- Tepkimeden sonra bulunan bileşenlere de “ürünler” denir.



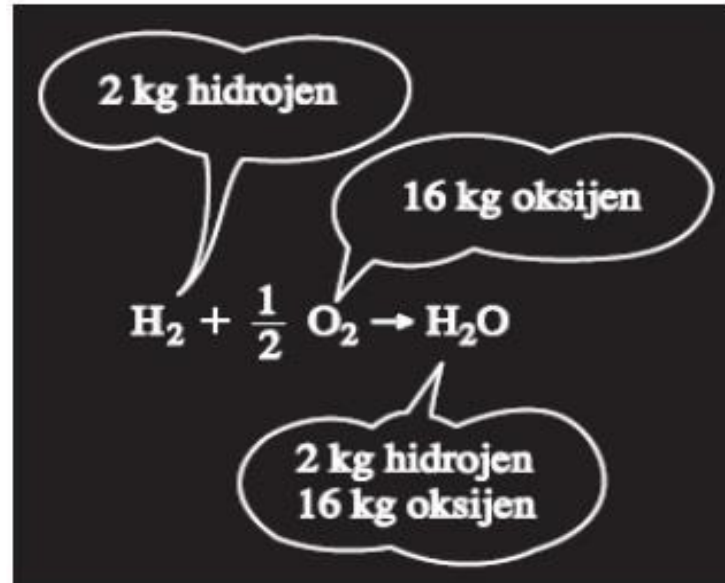
Burada C ve O₂, yanma gerçekleşmeden önce oldukları için girdilerdir, CO₂ ise yanma gerçekleştikten sonra ortaya çıktığı için üründür. Eğer bu girdi, yanma esnasında tepkimeye girmiyorsa ürünlerde de görünecektir. Bu durumda hem girdi hem de ürün olarak nitelendirilecektir.

Yakıtın oksijen ile temas etmesi, yanma işleminin başlaması için yeterli değildir. Aksi bir durum söz konusu olmuş olsa idi, şu anda tüm dünya yanmış olurdu.

- Yanmanın başlaması için yakıt “**tutuşma sıcaklığı**”nın üzerine getirilmelidir.
- Bundan başka, yanmanın başlaması için, **yakıt ve hava oranları** yanma için uygun aralıkta olmalıdır.



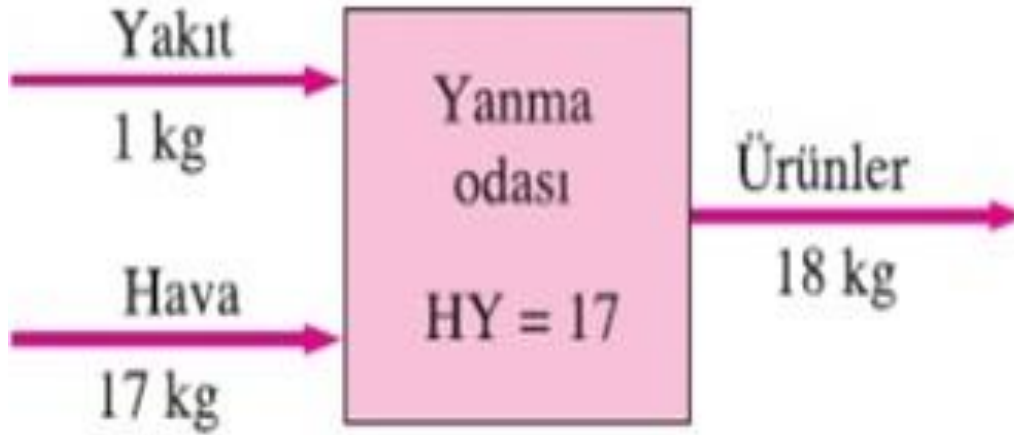
- Kimyasal tepkimeler, **kütlenin korunumu ilkesi**ne dayalı olarak denkleştirilmelidir.
- Kütlenin korunumu ilkesi; kimyasal tepkime sırasında her bir elementin toplam kütlesi sabit kalır şeklinde ifade edilebilir.
- Bu, kimyasal tepkimenin sağ tarafındaki her bir ürünün toplam kütlesinin, sol tarafındaki her bir ürünün toplam kütlesine eşit olduğu anlamına gelmektedir.
- Bununla beraber, kimyasal tepkimelerde **mol korunumu diye bir kavramın olmadığı unutulmamalıdır**.
- Yalnızca, kimyasal tepkimenin ürünlerdeki her bir elementin toplam kütlesi, element girdi ve ürünlerde farklı bileşikler içinde bulunsa bile, girdilerde o elementin toplam kütlesine eşit olmalıdır.



Her bir elementin (ve atom sayısının) kütlesi kimyasal tepkime sırasında sabit kalır

Yanma işlemlerinin analizinde, yakıt ve hava miktarlarını sayısal olarak ifade etmek için sık sık kullanılan bir büyüklük vardır. Bu büyüklüğe “**hava-yakıt oranı (HY)**”adı verilmektedir. Hacimsel olarak da ifade edilmesinin yanı sıra genellikle kütleye göre ifade edilir ve **havanın kütlesinin yakıtın kütlesine oranı** olarak tanımlanır.

$$HY = \frac{m_{hava}}{m_{yakıt}}$$



$$m = NM$$

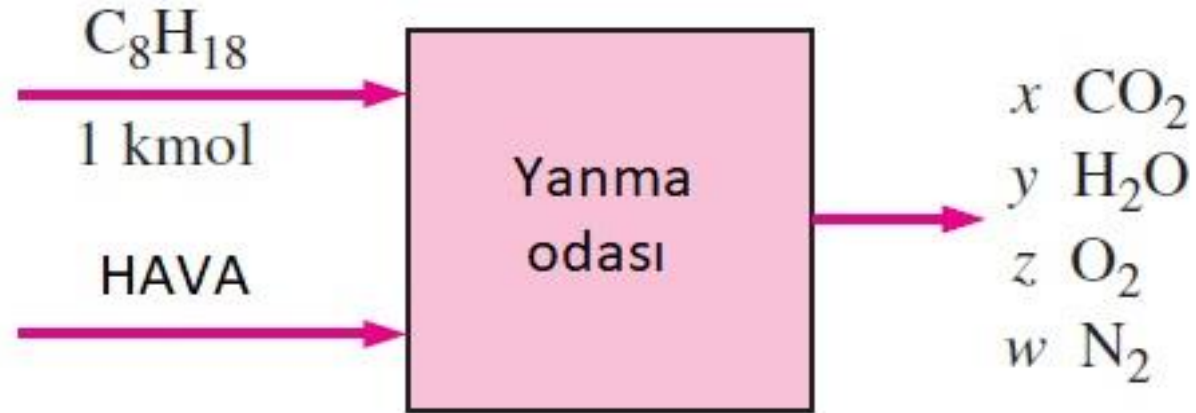
m kütle

N mol sayısı

M mol kütlesi

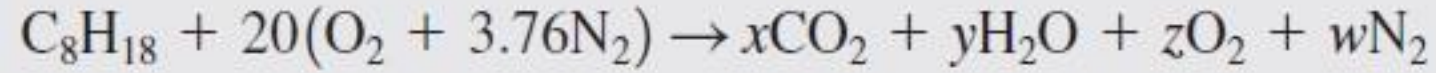
ÖRNEK:

Bir kmol oktan (C_8H_{18}), 20 kmol O_2 içeren hava ile yakılmaktadır. Ürünler sadece CO_2 , H_2O , O_2 ve N_2 'den oluştuğuna göre, ürünler içindeki her bir gazın mol sayısını ve bu yanma işlemindeki hava-yakıt oranını belirleyin.



ÇÖZÜM:

$$M_{\text{hava}} = 28.97 \text{ kg/kmol} \cong 29.0 \text{ kg/kmol}$$



$$\text{C:} \quad 8 = x \quad \rightarrow \quad x = \mathbf{8}$$

$$\text{H:} \quad 18 = 2y \quad \rightarrow \quad y = \mathbf{9}$$

$$\text{O:} \quad 20 \times 2 = 2x + y + 2z \quad \rightarrow \quad z = \mathbf{7.5}$$

$$\text{N}_2: \quad (20)(3.76) = w \quad \rightarrow \quad w = \mathbf{75.2}$$



$$\begin{aligned} \text{HY} &= \frac{m_{\text{hava}}}{m_{\text{yakıt}}} = \frac{(NM)_{\text{hava}}}{(NM)_{\text{C}} + (NM)_{\text{H}_2}} \\ &= \frac{(20 \times 4.76 \text{ kmol})(29 \text{ kg/kmol})}{(8 \text{ kmol})(12 \text{ kg/kmol}) + (9 \text{ kmol})(2 \text{ kg/kmol})} \\ &= \mathbf{24.2 \text{ kg hava/kg yakıt}} \end{aligned}$$

Yaş ve Kuru Temel

Gaz karışımları, sıvı ya da katı yakıtlar, farklı içeriklere sahip olabilir. Bu içeriklerde su buharı bulunma ya da bulunmama durumlarına göre yaş veya kuru temel olarak adlandırılırlar.

ÖRNEK: Yanma sonu ürünlerinin toplamda 100 kmol olduğu kabulü ile, bu ürünler %60 N₂, %15 CO₂, %10 O₂ ve %15 H₂O içermektedir. Yaş temelde verilen bu oranları kuru temele çeviriniz.

Kuru temel:

$$(60 \text{ kmol N}_2) + (15 \text{ kmol CO}_2) + (10 \text{ kmol O}_2) = 85 \text{ kmol ürün}$$

$$\frac{60 \text{ kmol}}{85 \text{ kmol}} \times 100 = \%70.6 \text{ N}_2$$

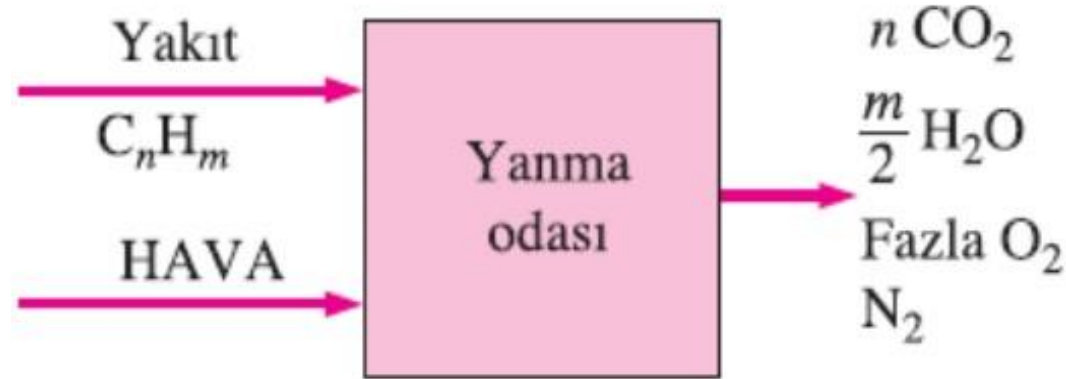
$$\frac{15 \text{ kmol}}{85 \text{ kmol}} \times 100 = \%17.6 \text{ CO}_2$$

$$\frac{10 \text{ kmol}}{85 \text{ kmol}} \times 100 = \%11.8 \text{ O}_2$$

Kuru temelde

Teorik (Stokiyometrik) ve Gerçek Yanma

- Bir yakıtın bünyesindeki tüm C yanarak CO_2 'e, tüm H yanarak H_2O 'a ve tüm S (eğer varsa) yanarak SO_2 'ye dönüşüyorsa bu yanma işlemine “**tam yanma**” denir.
- Yani, yanma işlemi sırasında yakıtın tüm yanabilen bileşenleri tamamen yanar.
- Aksine, eğer ürünler içerisinde yanmamış yakıt veya C, H_2 , CO ve OH gibi bileşenler varsa yanma işlemi tamamlanmamıştır.



Yanma işlemi yakıtın yanabilen tüm bileşenleri tamamen yandığında tamamlanır

- Yetersiz oksijen tam yanmamanın açık bir nedenidir ama tek nedeni de değildir.
- **Tam olmayan yanma**, yanma odasında tam yanma için gerekenden daha fazla oksijen olduğu zaman bile olabilir.
- Bu durum, yakıt ve oksijenin temas ettiği sınırlı bir süre içinde yanma odasında yeterli karışma olmaması şeklinde de açıklanabilir.
- Eksik yanmanın diğer bir nedeni de yüksek sıcaklıklarda önemli olan ayrışmadır.

İyi bir yanmanın olabilmesi için 3 temel faktör: (3T Kuralı)

Sıcaklık (Temperature)

Karışım (Turbulence)

Zaman (Time)

Oksijen, karbon ile birleşme yerine daha çok hidrojen ile birleşme eğilimindedir. Bu nedenle, normalde yakıtta bulunan hidrojen, tam yanma için gerekenden daha az oksijen olduğu zaman bile, H₂O oluşturarak tamamen yanar. Ayrıca, karbonun bir kısmı ürünler içinde CO olarak veya düz karbon tanecikleri (is) olarak bulunur.

Stokiyometrik veya teorik hava: Bir yakıtın tam yanması için gereken minimum hava miktarına stokiyometrik veya teorik hava denir.

(Bu tanıma göre; bir yakıt stokiyometrik hava ile tamamen yandığı zaman, ürünler içerisinde elementel olarak hiç oksijen bulunmayacaktır. Stokiyometrik havadan daha az hava ile meydana gelen yanma işleminin tamamlanması mümkün değildir.)

Stokiyometrik veya teorik yanma: Bir yakıtın teorik hava ile tamamen yanması sırasında meydana gelen ideal yanma işlemine yakıtın stokiyometrik veya teorik yanması denir.



“metanın stokiyometrik yanması”

Fazla hava: Gerçek yanma işlemlerinde, tam yanmayı sağlamak ve yanma odasının sıcaklığını kontrol etmek için stokiyometrik miktardan fazla hava kullanmak genel bir uygulamadır. Stokiyometrik miktardan fazla hava fazla hava denir.

Eksik hava: Stokiyometrik miktardan daha az havaya eksik hava denir.

%50 fazla hava=%150 teorik hava
%200 fazla hava=%300 teorik hava
%90 teorik hava=%10 eksik hava

Eşdeğerlik oranı: Yanma işlemlerinde kullanılan hava miktarı gerçek yakıt-hava oranının teorik yakıt-hava oranına oranı demek olan eşdeğerlik oranı ile ifade edilir.

$$\text{Hava fazlalık katsayısı } (\lambda) = \frac{(HY)_{\text{gerçek}}}{(HY)_{\text{stokiyometrik}}}$$

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

$$\text{Eşdeğerlik oranı } (\phi) = \frac{(YH)_{\text{gerçek}}}{(YH)_{\text{stokiyometrik}}}$$

Hava fazlalık oranının başka bir şekilde ifadesi de şöyledir:

$$\% \text{ fazla hava} = \frac{(\text{hava mol sayısı})_{\text{beslenen}} - (\text{hava mol sayısı})_{\text{stokiyometrik}}}{(\text{hava mol sayısı})_{\text{stokiyometrik}}} \times 100$$

ÖRNEK: 100 mol/h bütan (C_4H_{10}) ve 5000 mol/h hava, bir yanma odasına beslenmektedir. Hava fazlalık katsayısını (λ) hesaplayınız.

1.Çözüm

Bütanın stokiyometrik yanma denklemi  $C_4H_{10} + 13/2O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$

$$(\dot{n}_{O_2})_{stokiyometrik} = (100 \text{ mol } C_4H_{10}) \times (6.5 \text{ mol } O_2)$$

$$(\dot{n}_{O_2})_{stokiyometrik} = 650 \frac{\text{mol}}{\text{h}} O_2 \text{ gerekli}$$

$$(\dot{n}_{hava})_{stokiyometrik} = \left(650 \frac{\text{mol}}{\text{h}} O_2 \right) \times (4.76 \text{ mol hava})$$

$$(\dot{n}_{hava})_{stokiyometrik} = 3094 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \text{ hava gerekli}$$

$$\% \text{ fazla hava} = \frac{(\dot{n}_{hava})_{beslenen} - (\dot{n}_{hava})_{stokiyometrik}}{(\dot{n}_{hava})_{stokiyometrik}} \times 100$$

$$\% \text{ fazla hava} = \frac{5000 - 3094}{3094} \times 100 = \%61.6$$

2.Çözüm

$$(HY)_{stokiyometrik} = \left(\frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} \right)_{stokiyometrik}$$

$$(HY)_{stokiyometrik} = \frac{\left(\frac{3094 \text{ mol}}{h} \times \frac{29 \text{ kg}}{1 \text{ kmol}} \times \frac{1 \text{ kmol}}{1000 \text{ mol}} \right)}{\left(\frac{100 \text{ mol}}{h} \times \frac{1 \text{ kmol}}{1000 \text{ mol}} \right) \times \left(\frac{12 \text{ kg}}{\text{kmol}} \times 4 \text{ kmol} + \frac{2 \text{ kg}}{\text{kmol}} \times 5 \text{ kmol} \right)}$$

$$(HY)_{stokiyometrik} = 15.47$$

$$(HY)_{gerçek} = \frac{\left(\frac{5000 \text{ mol}}{h} \times \frac{29 \text{ kg}}{1 \text{ kmol}} \times \frac{1 \text{ kmol}}{1000 \text{ mol}} \right)}{\left(\frac{100 \text{ mol}}{h} \times \frac{1 \text{ kmol}}{1000 \text{ mol}} \right) \times \left(\frac{12 \text{ kg}}{\text{kmol}} \times 4 \text{ kmol} + \frac{2 \text{ kg}}{\text{kmol}} \times 5 \text{ kmol} \right)}$$

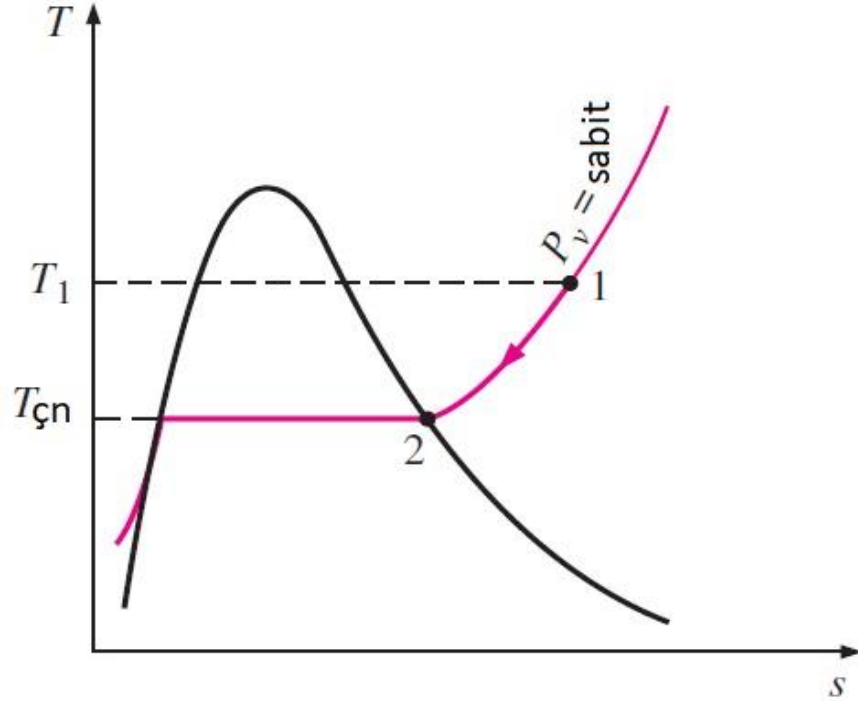
$$(HY)_{gerçek} = 25$$

$$\lambda = \frac{(HY)_{gerçek}}{(HY)_{stokiyometrik}} = \frac{25}{15.47} = \mathbf{1.616} \text{ ya da } \mathbf{\%61.6 \text{ fazla hava}}$$

Çiğ Noktası Sıcaklığı (Dew Point Temperature)

- Hava sabit basınçta soğutulduğunda yoğuşmanın başladığı sıcaklık olarak tanımlanır.
- Başka bir deyişle, $T_{\text{çn}}$ suyun söz konusu buhar basıncındaki doyma sıcaklığıdır.

$$T_{\text{çn}} = T_{\text{doyma}} @ P_v$$

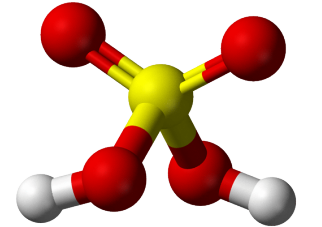


Hava, sabit basınçta soğurken, buhar basıncı P_v 'de sabit kalır. Böylelikle havadaki buhar (1 hali), doymuş buhar hattına (2 haline) gelinceye kadar sabit basınçta soğuma işleminden geçer. Bu noktadaki (2 hali) sıcaklık **çiy noktası sıcaklığı**dır.

- ✓ Yanma odasına giren hava normal olarak üzerinde düşünölmeye değör miktarda su buharı (veya nem) içerir.
- ✓ Yanma işlemlerinin çoğunda, nem ve yanma sırasında oluşın H_2O 'da azot gibi inert gaz olarak varsayılabılır.
- ✓ Bununla beraber yüksek sıcaklıklarda, su buharının birazı H ve O_2 ile birlikte H, O, ve OH'le ayrıışmaktadır.
- ✓ Yanma gazları su buharının çiy noktasının altına soğuduğunda, bir miktar nem yoğuşur.

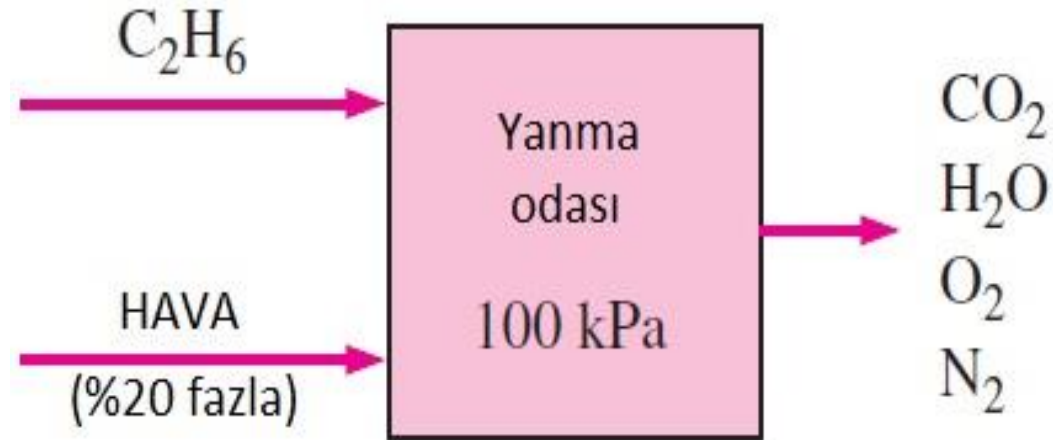


- ✓ Bu durumda ortaya çıkan su damlaları, yanma sonu ürünlerinde bulunan kükört dioksit ile birleşerek korozyona neden olan **sülfirik asit** oluşturduğu için çiy noktası sıcaklığının önceden bilinmesi oldukça önem arz etmektedir.

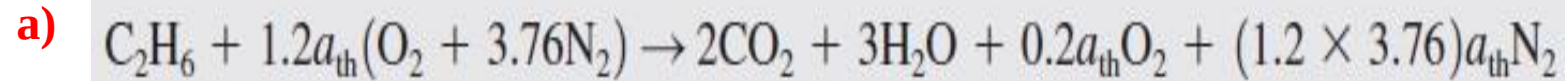


ÖRNEK: Etan (C_2H_6) %20 fazla hava ile yanmaktadır. Yanma tam olduğuna ve ürünlerin toplam basıncı 100 kPa olduğuna göre,

- a) Yakıt-hava oranını ($YH=?$)
- b) Yanma ürünlerinin çiy noktası sıcaklığını belirleyiniz. ($T_{\text{çn}}=?$)



ÇÖZÜM:



$$\text{O}_2: \quad 1.2a_{\text{th}} = 2 + 1.5 + 0.2a_{\text{th}} \rightarrow a_{\text{th}} = 3.5$$



$$\begin{aligned} Y_{\text{H}} &= \frac{m_{\text{yakıt}}}{m_{\text{hava}}} = \frac{(2 \text{ kmol})(12 \text{ kg/kmol}) + (3 \text{ kmol})(2 \text{ kg/kmol})}{(4.2 \times 4.76 \text{ kmol})(29 \text{ kg/kmol})} \\ &= \mathbf{0.052 \text{ kg yakıt/kg hava}} \end{aligned}$$

b)
$$P_{\text{su}} = \left(\frac{N_{\text{su}}}{N_{\text{top.}}} \right) (P_{\text{top.}}) = \left(\frac{3 \text{ kmol}}{21.49 \text{ kmol}} \right) (100 \text{ kPa}) = 13.96 \text{ kPa}$$

$$T_{\zeta\text{n}} = T_{\text{doy@ } 13.96 \text{ kPa}} = \mathbf{52.3^\circ\text{C}} \quad (\text{Table A-5})$$



İLERİ YANMA VE MODELLEME

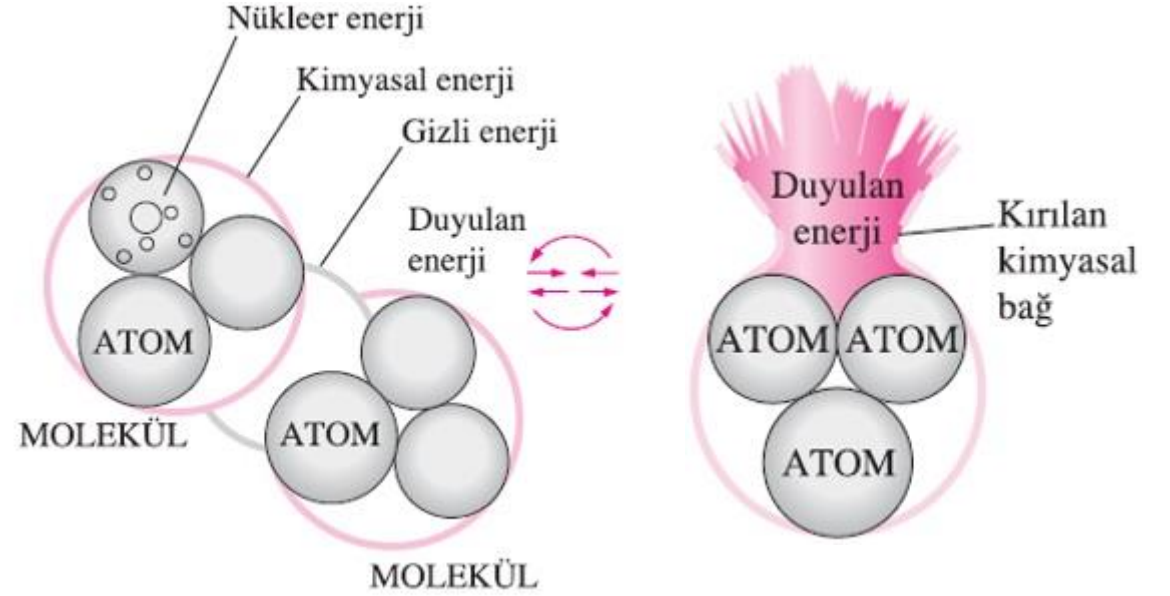
✓ YANMA-2



PROF.DR.MUSTAFA İLBAŞ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ABD

Oluşum Entalpisi ve Yanma Entalpisi

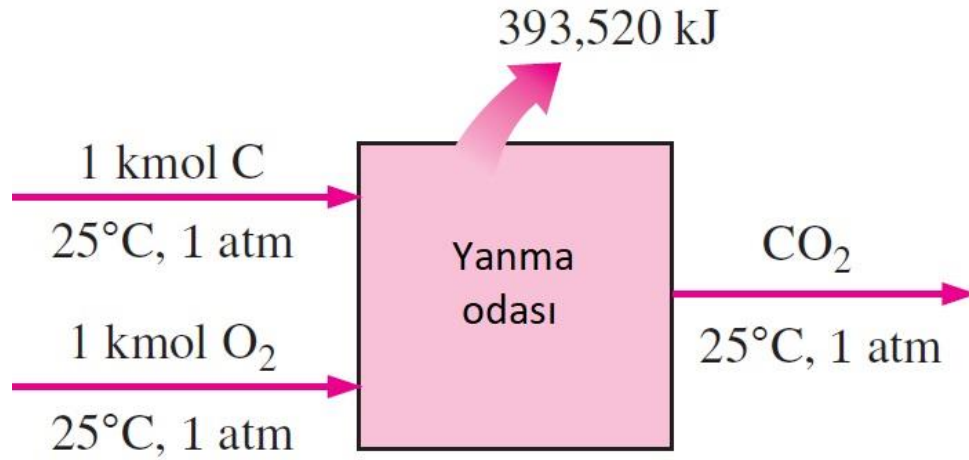
Bir kimyasal tepkime sırasında, molekül içinde atomları bağlayan bazı kimyasal bağlar kırılır ve yenileri oluşur. Bu nedenle, kimyasal tepkime meydana gelen bir süreçte enerji dengelerinde mutlaka hesaba katılması gereken kimyasal enerji değişiklikleri olacaktır.



Tepkimeli sistemler analiz edilirken, standart referans hal ile ilgili özellik değerleri kullanılmalıdır. Ama bu amaçla yeni bir özellik tablosunun hazırlanmasına gerek yoktur. Belli bir haldeki özellik değerlerinden standart referans haldeki değerler çıkarılarak var olan termodinamik tablolar kullanılabilir.

Örneğin 500 K'deki N_2 'un standart referans hale göre mükemmel gaz entalpisi;

$$\bar{h}^o_{500K} - \bar{h}^o = 14581 - 8669 = 5912 \text{ kJ/k mol'dür.}$$



CO₂ , kararlı bir reaksiyon işleminde, hem C hem de O₂ 25°C ve 1 atm'de yanma odasına girsin. Bu işlem neticesinde oluşan CO₂'de yanma odasından 25°C ve 1 atm'de ayrılsın. CO₂ oluşturan bu proses sırasında yanma odasından çevreye 393520 kJ/kmol ısı verilecektir. Bu işlemde iş etkileşimi yoktur. Bu yüzden, kararlı akıştaki enerji denklik bağıntısından, bu işlem sırasındaki ısı transferi, ürünler ve girdilerin entalpileri arasındaki farka eşit olmalıdır. Yani,

$$Q = H_{\text{ürün}} - H_{\text{girdi}} = -393520 \text{ kJ/kmol}$$

- ✓ Hem girdiler hem de ürünler aynı olduğu için, bu işlem sırasında meydana gelen entalpi değişimi sadece sistemin kimyasal bileşimindeki değişimden dolayıdır. Bu entalpi değişimi, farklı tepkimelerde birbirinden farklı olacaktır. Bu tepkimeye “tepkime entalpisi” (h_t) adı verilir.
- ✓ Tepkime entalpisi, tüm tepkime için belli bir haldeki ürünlerin entalpileri ile aynı haldeki girdilerin entalpileri arasındaki fark olarak tanımlanır. Yanma işlemlerinde, tepkime entalpisi genellikle “yanma entalpisi” (h_y) olarak tanımlanır. Bu, 1 kmol veya 1 kg yakıt, belirli bir basınç ve sıcaklıkta tamamen yandığı zaman ortaya çıkan ısı miktarını temsil eder.

$$h_y = H_{\text{ürün}} - H_{\text{girdi}}$$

- ✓ Yanma entalpisinin yakıtların yanma işlemlerinin analizinde çok yararlı bir özellik olduğu açıktır. Ama, birçok farklı yakıt ve yakıt karışımları vardır. Bu yüzden olası tüm haller için “ h_y ” değerlerinin bir listesini hazırlama imkanı yoktur. Bunun yanı sıra, yanma tamamlanmadığı zaman yanma entalpisi çok kullanılmaz. Bu yüzden birkaç referans haldeki bir element veya bileşiğin kimyasal enerjisini temsil edecek daha temel bir özelliğe sahip olmak çok daha pratik bir yaklaşımdır. Bu özellik, “Belli bir haldeki bir maddenin kendi kimyasal bileşiminden ileri gelen entalpi olarak görülen “oluşum entalpisi” ($\bar{h}_{ol}$)’dir.”

Tüm kararlı elementlerin (O_2 , N_2 , H_2 ve C gibi) 25°C ve 1 atm standart hallerindeki oluşum entalpileri sıfır kabul edilir.

Termodinamik tablolardan Tablo A-26’dan çoğu bileşiğin oluşum entalpisine ulaşılabilir.

Yakıtların yanması ile bağlantılı olarak yaygın şekilde kullanılan diğer bir terim yakıtın “ısı değeri”dir. Bir yakıt kararlı bir yanma neticesinde tamamen yandığı zaman ve ürünler girdilere dönüştüğü zaman ortaya çıkan ısı miktarı olarak tanımlanır.

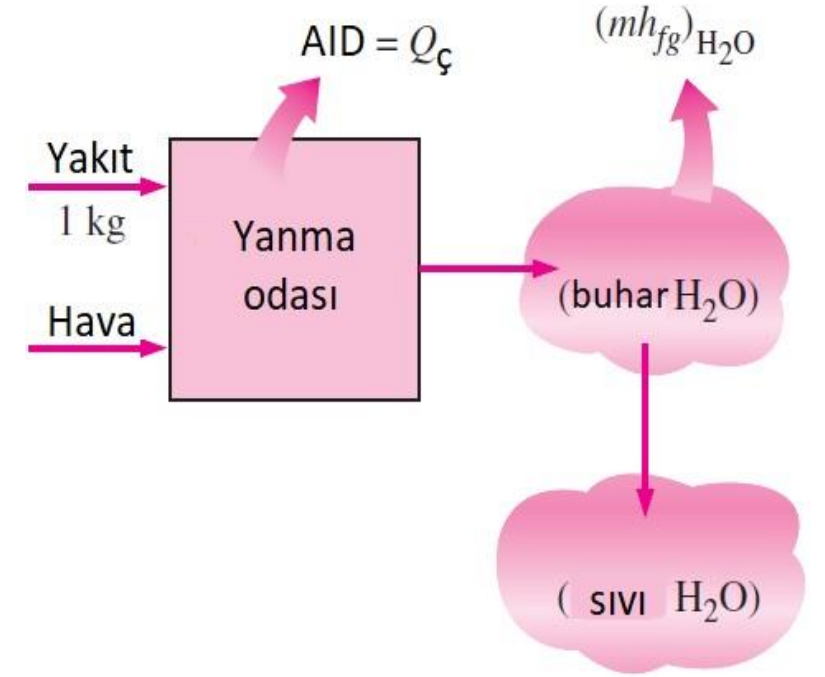
$$\text{Isı Değeri} = |h_y| \quad (\text{kJ/kg yakıt})$$

Isı değeri ürünlerde bulunan suyun fazına bağlıdır. Ürünlerdeki su sıvı halde olduğundaki ısı değerine ise “üst ısı değer (ÜİD)”, ürünlerdeki su buhar fazında ise “alt ısı değer (AİD)” denir.

$$\text{ÜİD} = \text{AİD} + (mh_{fg})_{H_2O} \quad (\text{kJ/kg yakıt})$$

m: birim kütle başına ürünlerdeki suyun kütlesi

h_{fg} : suyun buharlaşma entalpisi



Bir yakıtın üst ısı değeri, yakıtın alt ısı değeri ile ürünlerde bulunan suyun buharlaşma ısısının toplamına eşittir.

ÖRNEK:

İçeriği aşağıdaki gibi olan kömürün 1 kg'ının %50 fazla hava ile yakılması durumunda hava-yakıt oranını belirleyiniz.

ÇÖZÜM:

(Kütlece)

% 3.5	H
% 48.6	C
% 0.5	S
% 0.7	N
% 12	O
% 5.8	Kül
% 28.9	Nem



1 kg kömür

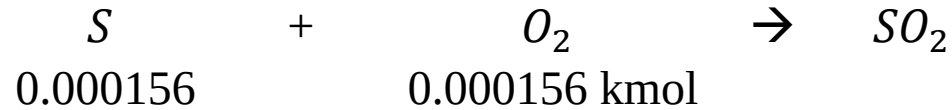
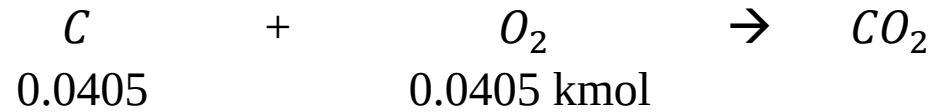
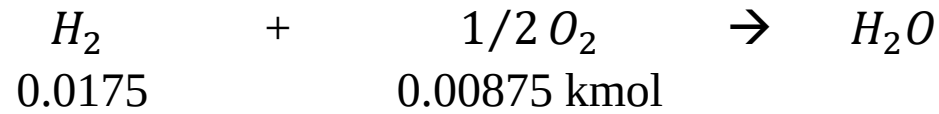
$$\frac{0.035 \text{ kg } H_2}{2 \text{ kg } H_2 / 1 \text{ kmol } H_2} = 0.0175 \text{ kmol } H_2$$

$$\frac{0.486 \text{ kg } C}{12 \text{ kg } C / 1 \text{ kmol } C} = 0.0405 \text{ kmol } C$$

$$\frac{0.005 \text{ kg } S}{32 \text{ kg } S / 1 \text{ kmol } S} = 0.000156 \text{ kmol } S$$

$$\frac{0.007 \text{ kg } N_2}{28 \text{ kg } N_2 / 1 \text{ kmol } N_2} = 0.00025 \text{ kmol } N_2$$

$$\frac{0.12 \text{ kg } O_2}{32 \text{ kg } O_2 / 1 \text{ kmol } O_2} = 0.00375 \text{ kmol } O_2$$



0.049406 kmol O_2 gerekli

$0.049406 - 0.00375 = 0.04565 \text{ kmol gerekli min } O_2$ (stokiyometrik O_2 miktarı)

$0.04565 \times 4.76 = 0.2173 \text{ kmol}$ stokiyometrik hava miktarı

$$HY = \frac{1.5 \times (0.2173 \text{ kmol} \times 29 \text{ kg/1 kmol hava})}{1 \text{ kg yakıt}} \longrightarrow HY = 9.45 \text{ kg hava/kg yakıt}$$

Yanmanın Termodinamiği ve Birinci Yasa Analizi

Açık Sistemler

Yanma prosesindeki bir bileşenin (girdi ya da ürün) entalpisi yeniden tanımlanacak olursa;

$$Entalpi = \bar{h}_{ol}^o + (\bar{h} - \bar{h}^o)$$

Burada;

$\bar{h}$: belli bir haldeki duyulur entalpi

$\bar{h}^o$: 25°C ve 1 atm'deki standart haldeki duyulur entalpi

$\bar{h} - \bar{h}^o$: standart referans hale göre duyulur entalpi

(Bazı kitaplarda bu değer doğrudan verilmektedir.)

Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edildiği zaman, kimyasal bir tepkime için;

$$\dot{E}_{\text{giren}} = \dot{E}_{\text{çıkan}}$$

$$\underbrace{\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum \dot{n}_g(\bar{h}_{ol}^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_g}_{\text{Isı, iş ve kütle ile net enerji giriş hızı}} = \underbrace{\dot{Q}_s + \dot{W}_s + \sum \dot{n}_u(\bar{h}_{ol}^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_u}_{\text{Isı, iş ve kütle ile net enerji çıkış hızı}}$$

$$\underbrace{Q_g + W_g + \sum N_g(\bar{h}_{ol}^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_g}_{\text{Isı, iş ve kütle ile 1 mol yakıt için içeriye enerji transferi}} = \underbrace{Q_s + W_s + \sum N_u(\bar{h}_{ol}^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_u}_{\text{Isı, iş ve kütle ile 1 mol yakıt için dışarıya enerji transferi}}$$

$\dot{n}_g$: Her bir girdinin birim zamandaki mol sayısı

$\dot{n}_u$: Her bir ürünün birim zamandaki mol sayısı

Sisteme verilen ısı ve sistem tarafından yapılan iş pozitif büyüklükler olarak alınarak, yukarıdaki enerji denklik bağıntısı, yandaki gibi daha kısa olarak ifade edilebilir.

Yanma odasında gerçekleşen yanma işlemlerinde normal olarak ısı çıkışı olur ama hiç ısı girişi olmaz. Ayrıca genellikle iş etkileşimi de olmaz. Bu durumda tipik açık sistemli bir yanma işleminin enerji denkliği;

veya

$$Q - W = \sum N_{\bar{u}}(\bar{h}_{ol}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\bar{u}} = \sum N_g(\bar{h}_{ol}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_g$$

burada

$$Q - W = H_{\text{ürün}} - H_{\text{girdi}} \quad (\text{kJ/kmol yakıt})$$

$$H_{\text{ürün}} = \sum N_{\bar{u}}(\bar{h}_{ol}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\bar{u}} \quad (\text{kJ/kmol yakıt})$$

$$H_{\text{girdi}} = \sum N_{\bar{u}}(\bar{h}_{ol}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\bar{u}} \quad (\text{kJ/kmol yakıt})$$

$$Q - W = \bar{h}_y^{\circ} + \sum N_{\bar{u}}(\bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\bar{u}} - \sum N_g(\bar{h} - \bar{h}^{\circ})_g \quad (\text{kJ/kmol})$$

$$Q_{\varsigma} = \underbrace{\sum N_g(\bar{h}_{ol}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_g}_{\substack{\text{1 Mol yakıtın kütlesiyle} \\ \text{giren enerji}}} - \underbrace{\sum N_{\bar{u}}(\bar{h}_{ol}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\bar{u}}}_{\substack{\text{1 Mol yakıtın kütlesiyle} \\ \text{çıkan enerji}}}$$

Kapalı Sistemler

$$E_{\text{giren}} - E_{\text{çıkan}} = \Delta E_{\text{sistem}}$$

$$(Q_g - Q_ç) + (W_g - W_ç) = U_{\text{ürün}} - U_{\text{girdi}} \quad (\text{kJ/kmol yakıt})$$

$$\bar{u} = \bar{h} - P\bar{v}$$

Burada $\bar{u}_{ol}^o$ gibi yeni bir kavramı kullanmak yerine;

$$\bar{u}_{ol}^o + \bar{u} - \bar{u}^o = \bar{h}_{ol}^o + \bar{h} - \bar{h}^o - P\bar{v} \quad \text{yazılabilir.}$$

Böylece yukarıdaki eşitlik;

$$Q - W = \sum N_{\bar{u}} (\bar{h}_{ol}^o + \bar{h} - \bar{h}^o - P\bar{v})_{\bar{u}} - \sum N_g (\bar{h}_{ol}^o + \bar{h} - \bar{h}^o - P\bar{v})_g$$

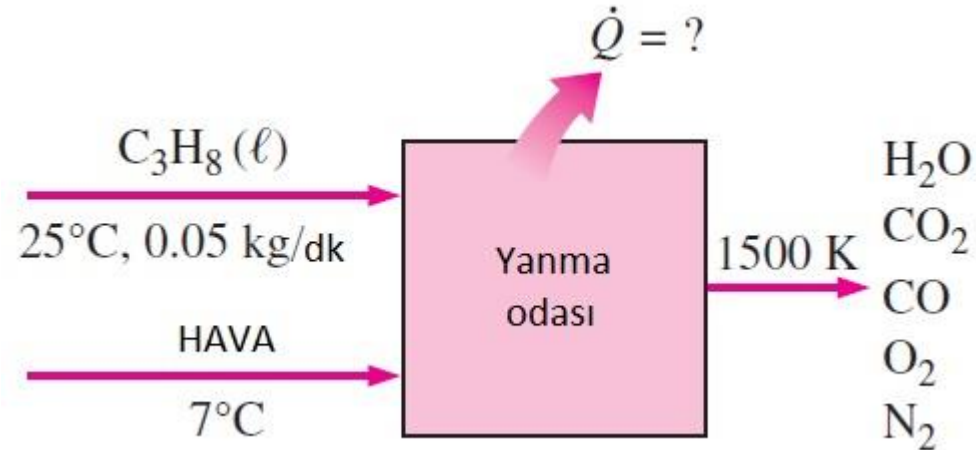
olarak yazılabilir. Buradaki $P\bar{v}$, katı ve sıvılar için ihmal edilebilir ve mükemmel davranan gazlar için $R_u T$ bunun yerine kullanılabilir.

ÖRNEK:

Sıvı propan (C_3H_8) yanma odasına $25^\circ C$ 'de ve 0.05 kg/dk 'lık kütleli debi ile girmektedir. Yakma havası ise, yanma odasına $7^\circ C$ 'de ve %50 fazla hava olarak gönderilmektedir. Yanma gazlarının analizi, yakıtta bulunan tüm hidrojenin yanarak H_2O 'ya dönüştüğünü, fakat karbonun %90'ının yanarak CO_2 oluşturduğunu, kalan %10'un ise CO olarak görüldüğünü göstermektedir. Yanma gazlarının çıkış sıcaklığı 1500 K olduğuna göre;

$$(\bar{h}_{ol}^o_{C_3H_8(l)} = -118910 \text{ kJ/kmol})$$

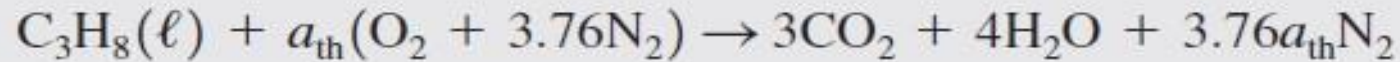
- a) Havanın debisini?
- b) 1 kmol yakıt için yanma odasından çevreye çıkan ısı miktarını belirleyiniz?



ÇÖZÜM:

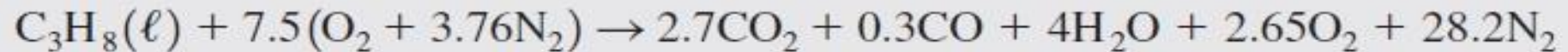
a)

Sıvı propanın stokiyometrik yanma denklemi;



$$a_{\text{th}} = 3 + 2 = 5$$

Sıvı propanın gerçek yanma denklemi;



$$\begin{aligned}\text{HY} &= \frac{m_{\text{hava}}}{m_{\text{yakıt}}} = \frac{(7.5 \times 4.76 \text{ kmol})(29 \text{ kg/kmol})}{(3 \text{ kmol})(12 \text{ kg/kmol}) + (4 \text{ kmol})(2 \text{ kg/kmol})} \\ &= 25.53 \text{ kg hava/kg yakıt}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{hava}} &= (\text{HY})(\dot{m}_{\text{yakıt}}) \\ &= (25.53 \text{ kg hava/kg yakıt})(0.05 \text{ kg yakıt/kg dakika}) \\ &= \mathbf{1.18 \text{ kg hava/dakika}}\end{aligned}$$

b)

$$Q_{\zeta} = \sum N_g(\bar{h}_{o_l}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_g - \sum N_{\ddot{u}}(\bar{h}_{o_l}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\ddot{u}}$$

Madde	$\bar{h}_{o_l}^{\circ}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{280 \text{ K}}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{298 \text{ K}}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{1500 \text{ K}}$ kJ/kmol
$\text{C}_3\text{H}_8(\ell)$	-118,910	—	—	—
O_2	0	8150	8682	49,292
N_2	0	8141	8669	47,073
$\text{H}_2\text{O}(g)$	-241,820	—	9904	57,999
CO_2	-393,520	—	9364	71,078
CO	-110,530	—	8669	47,517

$$\begin{aligned}
 Q_{\zeta} &= (1 \text{ kmol C}_3\text{H}_8)[(-118,910 + h_{298} - h_{298}) \text{ kJ/kmol C}_3\text{H}_8] \\
 &\quad + (7.5 \text{ kmol O}_2)[(0 + 8150 - 8682) \text{ kJ/kmol O}_2] \\
 &\quad + (28.2 \text{ kmol N}_2)[(0 + 8141 - 8669) \text{ kJ/kmol N}_2] \\
 &\quad - (2.7 \text{ kmol CO}_2)[(-393,520 + 71,078 - 9364) \text{ kJ/kmol CO}_2] \\
 &\quad - (0.3 \text{ kmol CO})[(-110,530 + 47,517 - 8669) \text{ kJ/kmol CO}] \\
 &\quad - (4 \text{ kmol H}_2\text{O})[(-241,820 + 57,999 - 9904) \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}] \\
 &\quad - (2.65 \text{ kmol O}_2)[(0 + 49,292 - 8682) \text{ kJ/kmol O}_2] \\
 &\quad - (28.2 \text{ kmol N}_2)[(0 + 47,073 - 8669) \text{ kJ/kmol N}_2] \\
 &= 363,880 \text{ kJ/kmol C}_3\text{H}_8
 \end{aligned}$$

ÖRNEK:

Bir çam kabuğunun nihai analizi aşağıda verilmiştir. Bu çam kabuğu, bir yakma fırınında %100 teorik hava ile yakılacak olursa, 100 kg çam kabuğunun tam yanma işlemi için;

- a) Hava-yakıt oranını bulunuz.
- b) Çam kabuğu 25°C, yakma havası 400 K ve ürünler de 600 K olursa, ortaya çıkan ısı miktarını hesaplayınız.

Bileşen	% Kütlece
H	5.6
C	53.4
S	0.1
N	0.1
O	37.9
Kül	2.9

ÇÖZÜM:

a) $HY=?$

$$\frac{5.6 \text{ kg } H_2}{2 \text{ kg } H_2 / 1 \text{ kmol } H_2} = 2.8 \text{ kmol } H_2$$

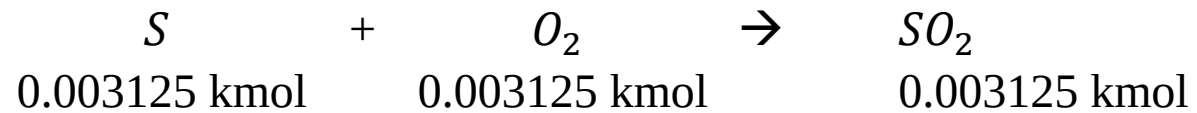
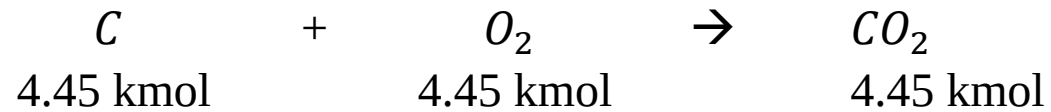
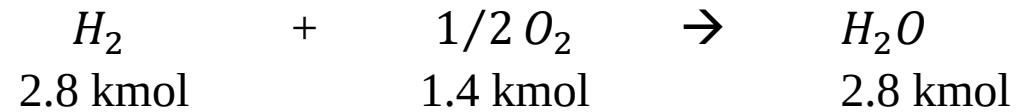
$$\frac{53.4 \text{ kg } C}{12 \text{ kg } C / 1 \text{ kmol } C} = 4.45 \text{ kmol } C$$

$$\frac{0.1 \text{ kg } S}{32 \text{ kg } S / 1 \text{ kmol } S} = 0.003 \text{ kmol } S$$

$$\frac{0.1 \text{ kg } N_2}{28 \text{ kg } N_2 / 1 \text{ kmol } N_2} = 0.0036 \text{ kmol } N_2$$

$$\frac{37.9 \text{ kg } O_2}{32 \text{ kg } O_2 / 1 \text{ kmol } O_2} = 1.18 \text{ kmol } O_2$$

Bileşen	% Kütlece
H	5.6
C	53.4
S	0.1
N	0.1
O	37.9
Kül	2.9



$$\text{gerekli min } O_2 \text{ miktarı} = 1.4 + 4.45 + 0.003125 = 5.853 \text{ kmol}$$

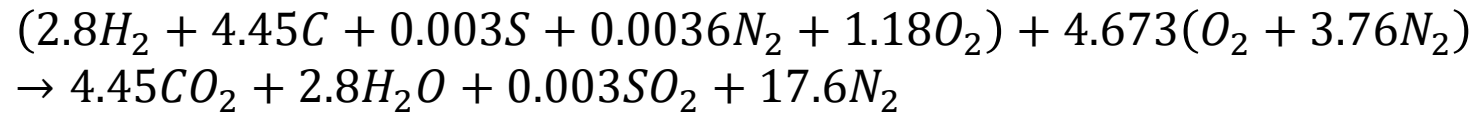
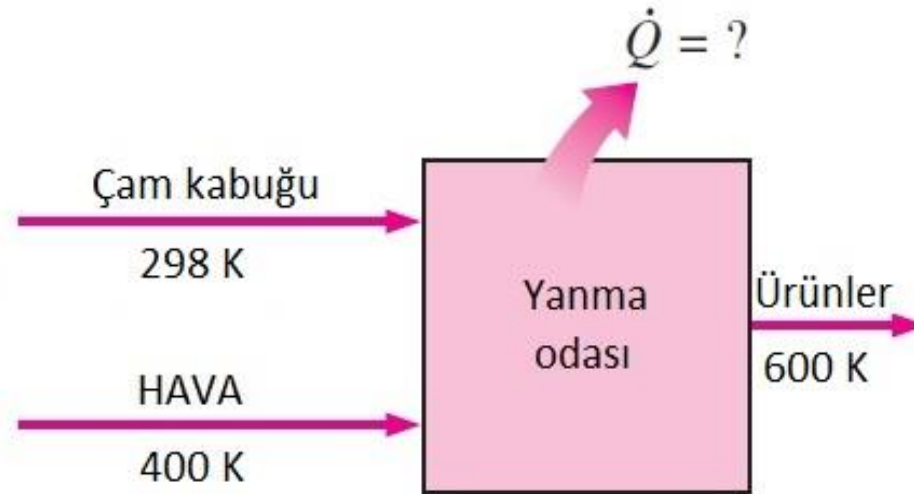
$$5.853 - 1.18 = 4.673 \text{ kmol gerekli stokiyometrik } O_2 \text{ miktarı}$$

%100 teorik hava olduğu için;

$$4.76 \times 4.673 = 22.24 \text{ kmol hava gerekli}$$

$$HY = \frac{(22.24 \text{ kmol}) \times (29 \text{ kg/kmol})}{100 \text{ kg yakıt}} \longrightarrow \text{HY} = 6.45 \text{ kg hava/kg yakıt}$$

b)

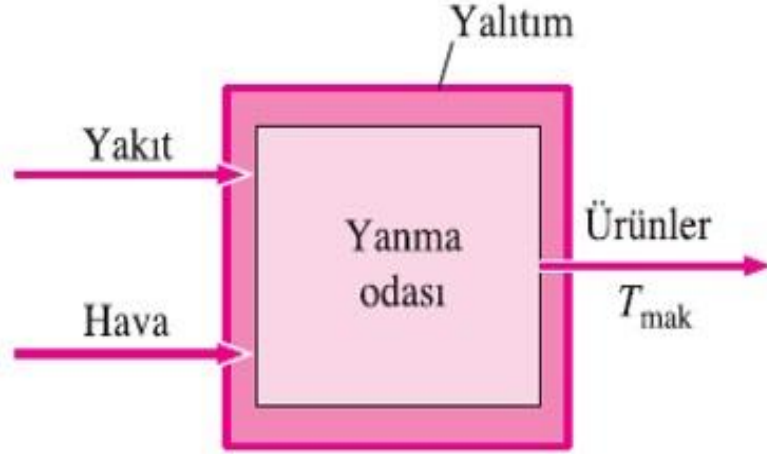


$$Q_{\dot{c}} = \sum N_g(\bar{h}_{o1}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_g - \sum N_{\dot{u}}(\bar{h}_{o1}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\dot{u}}$$

$$0 + 4.673x(0 + 11711 - 8682) + 4.673x3.76x(0 + 11640 - 8669) \\ - 4.45x(-393520 + 22280 - 9364) - 2.8x(-241820 + 20402 - 9904)$$

$$Q_{\dot{c}} = 2252096.7 \text{ kJ/100 kg çam kabuğu}$$

Adyabatik Alev Sıcaklığı



Çevreye hiç ısı kaybının olmadığı sınır halinde ($Q=0$), ürünlerin sıcaklıkları tepkimenin **adyabatik alev** veya **adyabatik yanma sıcaklığı** denilen maksimum değerine ulaşacaktır.



$$\begin{aligned} Q_{\text{ç}}^0 &= \sum N_g(\bar{h}_{\text{ol}}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_g - \sum N_{\text{ü}}(\bar{h}_{\text{ol}}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\text{ü}} \\ \sum N_g(\bar{h}_{\text{ol}}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_g &= \sum N_{\text{ü}}(\bar{h}_{\text{ol}}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\text{ü}} \end{aligned}$$

Ürünlerin sıcaklıkları hesaplanmadan önce bilinmediğinden, entalpilerin hesaplanması o kadar kolay olmayacaktır. Bu nedenle, adyabatik alev sıcaklığının belirlenmesi için, ürünlerin duyulur entalpi değişimleri, ürünlerin sıcaklığı ile ilgili tahminler yürütülerek gerçekleştirilir. Yapılan tahmin neticesinde elde edilen $H_{\text{ürün}}$ değeri, H_{girdi} değerine eşit değilse, ürünlerin sıcaklık tahmini yenilenerek H_{girdi} değerine yaklaşılmaya çalışılır.

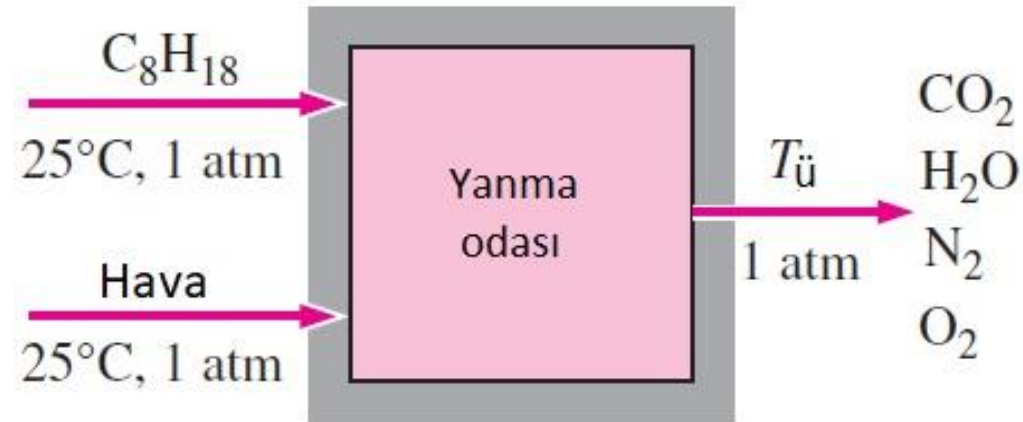
Yanma odasında, maddenin karşılaşacağı en yüksek sıcaklık metalurjik değerlendirmeler ile sınırlanır. Bu yüzden adyabatik alev sıcaklığı, yanma odalarının, gaz türbinlerinin ve nozul tasarımında oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra, bahsedilen bu cihazların maksimum sıcaklıkları, hesaplanan adyabatik alev sıcaklığından düşük olmaktadır.

ÖRNEK:

Sıvı oktan (C_8H_{18}) bir gaz türbininin yanma odasına $25^\circ C$ ve 1 atm'de düzenli olarak girmekte ve yine $25^\circ C$ ve 1 atm'de hava ile yakılmaktadır.

- a) %100 teorik hava ile tam yanma,
- b) %400 teorik hava ile tam yanma,
- c) %90 teorik hava ile tam olmayan yanma

(C'un %70'i CO_2 , %30'u CO) durumları için adyabatik alev sıcaklıklarını hesaplayınız.



ÇÖZÜM:

a)



$$\sum N_g(\bar{h}_{o1}^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_g = \sum N_{\ddot{u}}(\bar{h}_{o1}^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_{\ddot{u}}$$

Tüm girdiler standart referans halde olduğu N_2 ve O_2 için $\bar{h}_{o1}^\circ = 0$ olduğu için indirgenir. 298 K'de $\bar{h}_{o1}^\circ$ ve h değerleri tablo olarak verilmiştir.

Madde	$\bar{h}_{o1}^\circ$ kJ/kmol	$\bar{h}_{298 \text{ K}}$ kJ/kmol
$\text{C}_8\text{H}_{18}(\ell)$	-249,950	—
O_2	0	8682
N_2	0	8669
$\text{H}_2\text{O}(g)$	-241,820	9904
CO_2	-393,520	9364

Değerlerin yerine konulması ile;

$$\begin{aligned} & (8 \text{ kmol CO}_2)[(-393,520 + \bar{h}_{\text{CO}_2} - 9364) \text{ kJ/kmol CO}_2] \\ & + (9 \text{ kmol H}_2\text{O})[(-241,820 + \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} - 9904) \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}] \\ & + (47 \text{ kmol N}_2)[(0 + \bar{h}_{\text{N}_2} - 8669) \text{ kJ/kmol N}_2] \\ & = (1 \text{ kmol C}_8\text{H}_{18})(-249,950 \text{ kJ/kmol C}_8\text{H}_{18}) \end{aligned}$$

elde edilir ve

$$8\bar{h}_{\text{CO}_2} + 9\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 47\bar{h}_{\text{N}_2} = 5,646,081 \text{ kJ} \quad \text{bulunur}$$

Deneme yanılma ile $T_{\text{ürün}}$ sıcaklığı bulunacaktır. İlk tahmin için; $\frac{5646081}{8 + 9 + 47} = 88220 \text{ kJ/kmol}$

N₂ için yaklaşık 2650 K

H₂O için yaklaşık 2100 K

CO₂ için yaklaşık 1800 K

Ürünlerde en fazla N₂ var. Dolayısıyla $T_{\text{adyabatik}}$ değeri 2650 K'ne yakın olmalı.

İlk tahmin 2400 K olsun.

$$8\bar{h}_{\text{CO}_2} + 9\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 47\bar{h}_{\text{N}_2} = 8 \times 125,152 + 9 \times 103,508 + 47 \times 79,320 \\ = 5,660,828 \text{ kJ}$$

sonucu bulunur. Bu değer 5646081 kJ'den büyüktür. Bu yüzden gerçek sıcaklık 2400 K'in biraz altında olacaktır. Bundan sonra 2350 K seçeriz.

$$8 \times 122,091 + 9 \times 100,846 + 47 \times 77,496 = 5,526,654$$

Bu değer 5646081 kJ'den düşüktür. Bu nedenle, gerçek ürün sıcaklıkları 2350 ve 2400 K arasındadır. İnterpolasyon ile **T_{ady}=2394.5 K** olarak bulunur.

b) ve c) ödev



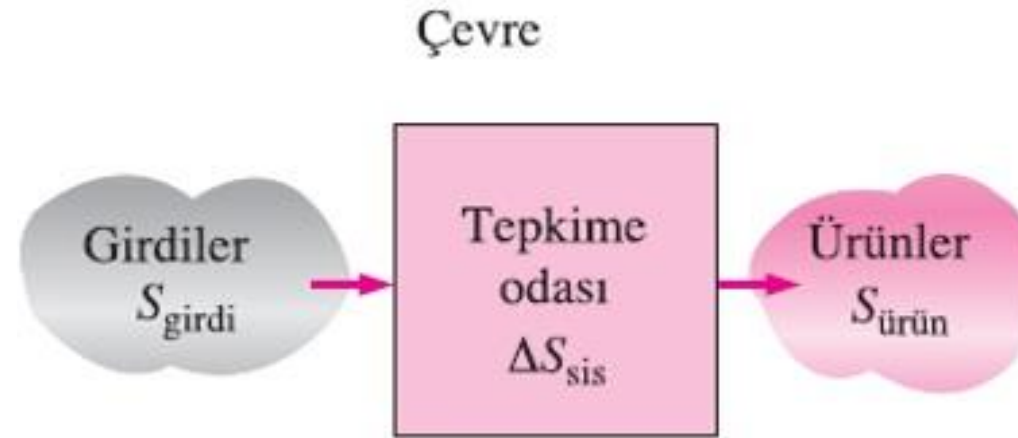
İLERİ YANMA VE MODELLEME

✓ YANMA-3



PROF.DR.MUSTAFA İLBAŞ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ABD

Tepkimeli Sistemlerin Entropi Değişimi



Tepkimeli sistemler de dahil herhangi bir sistem için entropi denkliği,

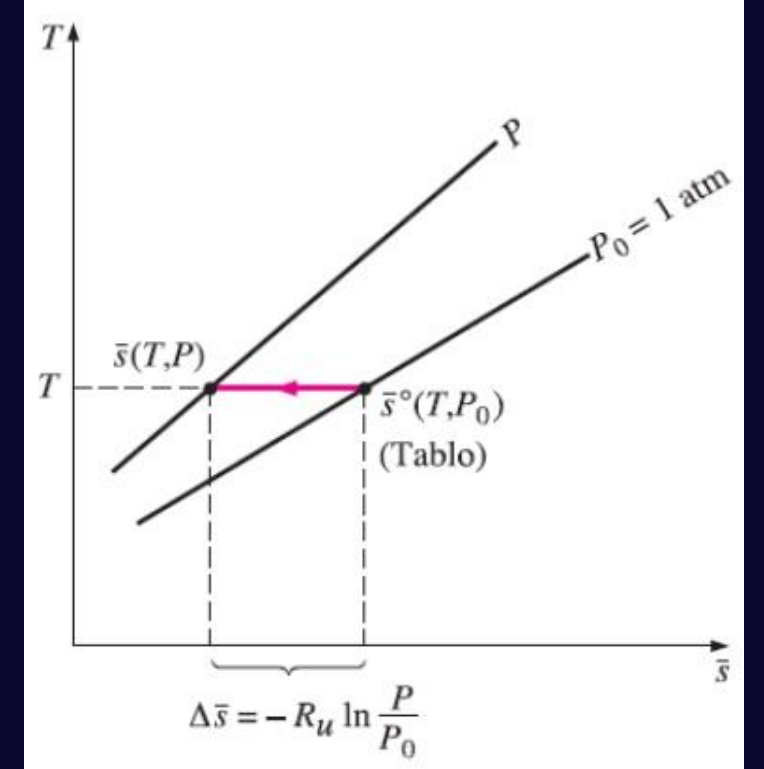
$$\underbrace{S_g - S_{\text{ç}}}_{\text{Isı ve kütle ile net entropi transferi}} + \underbrace{S_{\text{üretim}}}_{\text{Entropi üretimi}} = \underbrace{\Delta S_{\text{sistem}}}_{\text{Entropi değişimi}} \quad (\text{kJ/K})$$

1 mol yakıt başına büyüklükleri kullanarak ve sisteme doğru olan ısı transferinin yönünü pozitif kabul ederek, entropi denklik bağıntısı kapalı veya kararlı akımda tepkimeli sistemler için,

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + S_{\text{üretim}} = S_{\text{ürün}} - S_{\text{girdi}} \quad (\text{kJ/K})$$

Burada T_k sınırdaki sıcaklık, Q_k sınırı geçen ısıdır. Adyabatik işlemlerde ($Q=0$) entropi transfer terimi düşer.

$$S_{\text{üretim, adyabatik}} = S_{\text{ürün}} - S_{\text{girdi}} \geq 0$$



Belli bir sıcaklıkta ve $P_0=1 \text{ atm}$ 'den başka bir basınçtaki bir mükemmel gazın mutlak entropisi, 1 atm 'deki listelenmiş değerlerden $R_u \ln(P/P_0)$ çıkarılarak belirlenebilir.

Mükemmel gaz karışımındaki bir bileşenin entropisinin değerlendirilmesinde bileşenin kısmi basıncı ve sıcaklığı kullanılmalıdır. Bir bileşenin sıcaklığının, karışımın sıcaklığı ile aynı olduğuna ve bileşenin kısmi basıncının, bileşenin mol kesri ile karışımın toplam basıncının çarpımına eşit olduğu unutulmamalıdır.

$$\bar{s}(T,P) = \bar{s}^{\circ}(T,P_0) - R_u \ln \frac{P}{P_0}$$

Mükemmel gaz karışımındaki bir i bileşeni için

$$\bar{s}_i(T,P_i) = \bar{s}_i^{\circ}(T,P_0) - R_u \ln \frac{y_i P_m}{P_0} \quad (\text{kJ/kmol} \cdot \text{K})$$

Burada $P_0=1$ atm, P_i kısmi basıncı, y_i bileşenin mol kesri ve P_t karışımın toplam basıncıdır.

$\bar{s}_i$ = bir gaz karışımındaki i bileşeninin entropisidir.

$\bar{s}_i^{\circ}$ = bir gaz karışımındaki i bileşeninin mutlak entropisidir.

Tepkimeli Sistemlerin İkinci Yasa Analizi

$$X_{\text{yok olan}} = T_0 S_{\text{üretim}} \quad (\text{kJ})$$

$$W_{\text{ter}} = \sum N_g (\bar{h}_{\text{ol}}^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ - T_0 \bar{s})_g - \sum N_{\bar{u}} (\bar{h}_{\text{ol}}^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ - T_0 \bar{s})_{\bar{u}}$$

Hem ürünler hem de girdiler T_0 sıcaklığında olduğunda

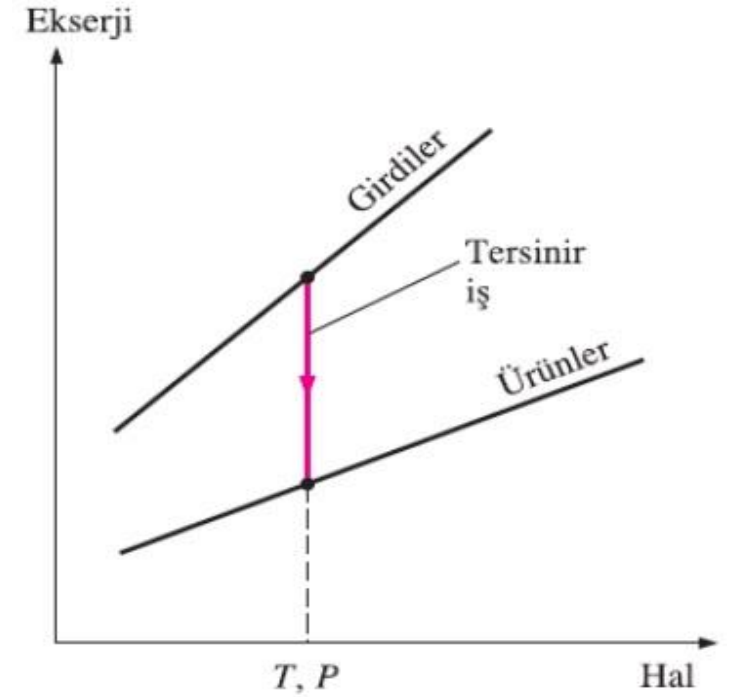
$$\bar{h} - T_0 \bar{s} = (\bar{h} - T_0 \bar{s})_{T_0} = \bar{g}_0$$

g_0 = Maddenin T_0 sıcaklığındaki molar Gibbs fonksiyonu

$$W_{\text{ter}} = \sum N_g \bar{g}_{0,g} - \sum N_{\bar{u}} \bar{g}_{0,\bar{u}}$$

$$W_{\text{ter}} = \sum N_g (\bar{g}_{\text{ol}}^\circ + \bar{g}_{T_0} - \bar{g}^\circ)_g - \sum N_{\bar{u}} (\bar{g}_{\text{ol}}^\circ + \bar{g}_{T_0} - \bar{g}^\circ)_{\bar{u}}$$

$\bar{g}_{\text{ol}}^\circ$ = Gibbs oluşum fonksiyonu



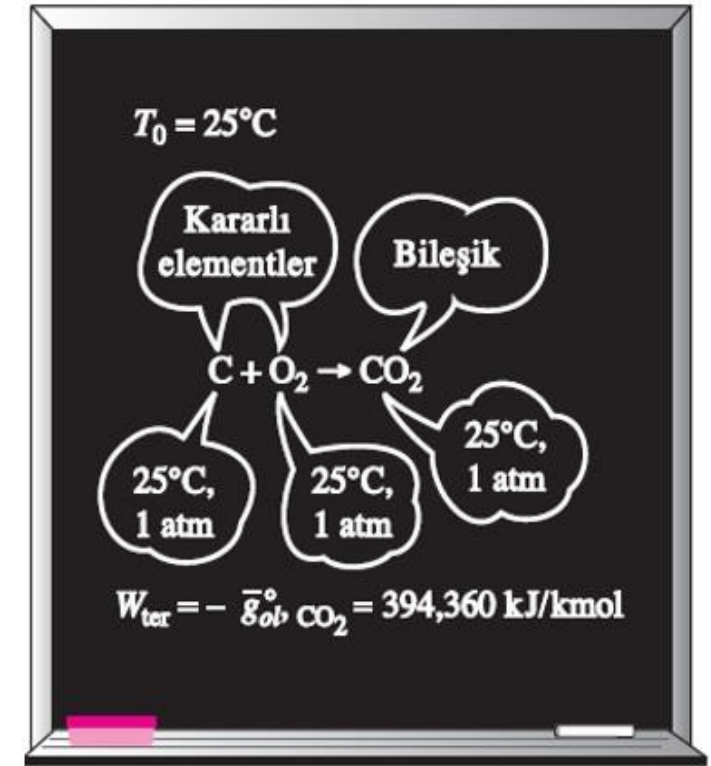
Bir kimyasal tepkimenin ürünleri ve girdilerine ait ekserjileri arasındaki fark o tepkimenin tersinir işini verir.

Oluşum entalpisi gibi, 25°C ve 1 atm standart halde bulunan N₂ ve O₂ gibi kararlı elementler için $\bar{g}_{ol}^o = 0$

$\bar{g}_{T_0} - \bar{g}^o = \text{standart hale göre } T_0 \text{ sıcaklığındaki bir maddenin Gibbs fonksiyonunu göstermektedir.}$

$T_{girdi} = T_{ürün} = T_0 = 25^\circ\text{C}$ olduğu için;

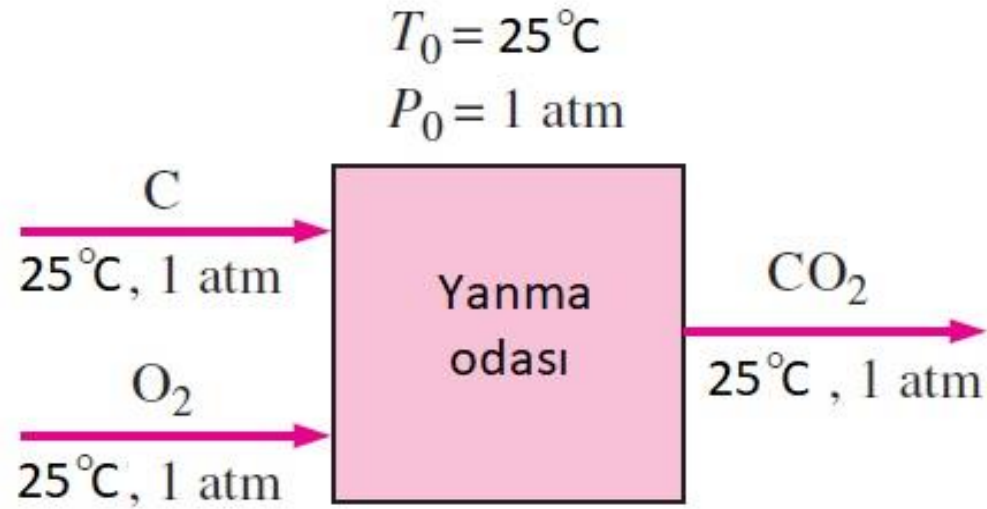
$$W_{\text{ter}} = \sum N_g \bar{g}_{ol,g}^o - \sum N_{\bar{u}} \bar{g}_{ol,\bar{u}}^o \quad (\text{kJ})$$



25°C, 1 atm'deki bir bileşiğin negatif Gibbs oluşum fonksiyonu o bileşiğin 25°C, 1 atm'deki bir ortamda 25°C ve 1 atm bulunan kararlı elementlerinden oluşumu ile ilgili tersinir işi gösterir.

ÖRNEK:

25°C sıcaklık ve 1 atm basınçtaki 1 kmol C, 1 kmol O₂ ile düzgün bir şekilde yakılmaktadır. Yanma işleminde oluşan CO₂, sonradan çevre koşulları 25°C sıcaklığa ve 1 atm basınca getirilmektedir. Yanma işlemi tam olduğuna göre, bu yanma işleminin tersinir işini bulunuz.



ÇÖZÜM:

$$\begin{aligned}W_{\text{ter}} &= \sum N_g \bar{g}_{\text{ol},g}^{\circ} - \sum N_{\ddot{u}} \bar{g}_{\text{ol},\ddot{u}}^{\circ} \\&= N_C \bar{g}_{\text{ol},C}^{\circ} + N_{\text{O}_2} \bar{g}_{\text{ol},\text{O}_2}^{\circ} - N_{\text{CO}_2} \bar{g}_{\text{ol},\text{CO}_2}^{\circ} = -N_{\text{CO}_2} \bar{g}_{\text{ol},\text{CO}_2}^{\circ} \\&= (-1 \text{ kmol})(-394360 \text{ kJ/kmol}) \\&= \mathbf{394360 \text{ kJ}}\end{aligned}$$

Gibbs fonksiyonu kullanmadan da hesaplanabilirdi.

$$\begin{aligned}W_{\text{ter}} &= \sum N_g (\bar{h}_{\text{ol}}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ} - T_0 \bar{s})_g - \sum N_{\ddot{u}} (\bar{h}_{\text{ol}}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ} - T_0 \bar{s})_{\ddot{u}} \\&= \sum N_g (\bar{h}_{\text{ol}}^{\circ} - T_0 \bar{s})_g - \sum N_{\ddot{u}} (\bar{h}_{\text{ol}}^{\circ} - T_0 \bar{s})_{\ddot{u}} \\&= N_C (\bar{h}_{\text{ol}}^{\circ} - T_0 \bar{s}^{\circ})_C + N_{\text{O}_2} (\bar{h}_{\text{ol}}^{\circ} - T_0 \bar{s}^{\circ})_{\text{O}_2} - N_{\text{CO}_2} (\bar{h}_{\text{ol}}^{\circ} - T_0 \bar{s}^{\circ})_{\text{CO}_2}\end{aligned}$$

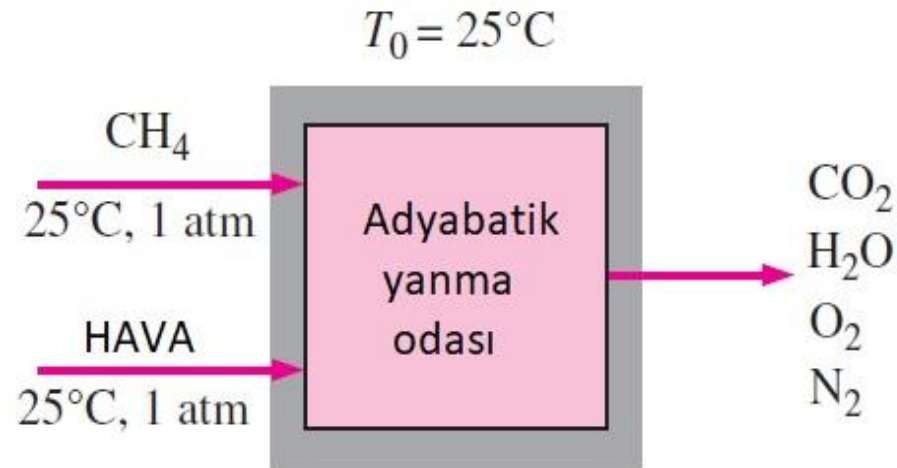
$$\begin{aligned}W_{\text{ter}} &= (-1 \text{ kmol C})[0 - (298\text{K})(5.74 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K})] \\&\quad + (1 \text{ kmol O}_2)[0 - (298\text{K})(205.04 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K})] \\&\quad - (1 \text{ kmol CO}_2)[-393520 \text{ kJ/kmol} - (298\text{K})(213.80 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K})] \\&= \mathbf{394420 \text{ kJ}} \text{ elde edilir.}\end{aligned}$$

ÖRNEK:

Metan (CH_4) gazı kararlı bir akım ile 25°C sıcaklık ve 1 atm basınçtaki yanma odasına girmekte ve aynı basınç ve sıcaklıkta yanma odasına giren %50 fazla hava ile yakılmaktadır. Yanma tam ve adyabatik olduğuna göre;

- a) Ürünlerin sıcaklığını,
- b) Entropi oluşumunu,
- c) Tersinmezliği hesaplayınız.

($T_0 = 298\text{ K}$ ve ürünlerin toplam basıncını 1 atm kabul edin.)



ÇÖZÜM:



$$\cancel{Q_{\cancel{\text{ç}}}}^0 = \sum N_{\text{g}}(\bar{h}_{\text{oi}}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\text{g}} - \sum N_{\text{ü}}(\bar{h}_{\text{oi}}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\text{ü}}$$

$$H_{\text{girdi}} = H_{\text{ürün}}$$

$$\sum N_{\text{g}}(\bar{h}_{\text{oi}}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\text{g}} = \sum N_{\text{ü}}(\bar{h}_{\text{oi}}^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\text{ü}}$$

Madde	$\bar{h}_{\text{oi}}^{\circ}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{298 \text{ K}}$ kJ/kmol
$\text{CH}_4(g)$	-74,850	—
O_2	0	8682
N_2	0	8669
$\text{H}_2\text{O}(g)$	-241,820	9904
CO_2	-393,520	9364

$$\begin{aligned} & (1 \text{ kmol CO}_2)[(-393,520 + \bar{h}_{\text{CO}_2} - 9364) \text{ kJ/kmol CO}_2] \\ & + (2 \text{ kmol H}_2\text{O})[(-241,820 + \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} - 9904) \text{ kJ/kmol H}_2\text{O}] \\ & + (11.28 \text{ kmol N}_2)[(0 + \bar{h}_{\text{N}_2} - 8669) \text{ kJ/kmol N}_2] \\ & + (1 \text{ kmol O}_2)[(0 + \bar{h}_{\text{O}_2} - 8682) \text{ kJ/kmol O}_2] \\ & = (1 \text{ kmol CH}_4)(-74,850 \text{ kJ/kmol CH}_4) \end{aligned}$$

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} + 2\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + \bar{h}_{\text{O}_2} + 11.28\bar{h}_{\text{N}_2} = 937,950 \text{ kJ}$$

$$T_{\text{ürün}} = \mathbf{1789 \text{ K}}$$

b) Yanma adyabatik olduğu için

$$S_{\text{üretim}} = S_{\text{ürün}} - S_{\text{girdi}} = \sum N_{\text{ü}} \bar{s}_{\text{ü}} - \sum N_{\text{g}} \bar{s}_{\text{g}}$$

Her bir bileşenin entropisi

$S_i = N_i \bar{s}_i(T, P_i) = N_i [\bar{s}_i^\circ(T, P_0) - R_u \ln y_i P_{\text{toplaml}}]$					
	N_i	y_i	$\bar{s}_i^\circ(T, 1 \text{ atm})$	$- R_u \ln y_i P_{\text{toplaml}}$	$N_i \bar{s}_i$
CH ₄	1	1.00	186.16	—	186.16
O ₂	3	0.21	205.04	12.98	654.06
N ₂	11.28	0.79	191.61	1.96	2183.47
$S_{\text{girdi}} = 3023.69$					
CO ₂	1	0.0654	302.517	22.674	325.19
H ₂ O	2	0.1309	258.957	16.905	551.72
O ₂	1	0.0654	264.471	22.674	287.15
N ₂	11.28	0.7382	247.977	2.524	2825.65
$S_{\text{ürün}} = 3989.71$					
$S_{\text{üretim}} = S_{\text{ürün}} - S_{\text{girdi}} = (3989.71 - 3023.69) \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K CH}_4$					
$= \mathbf{966.0 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}}$					

c) $X_{\text{yok olan}} = T_0 S_{\text{üretim}} = (298 \text{ K})(966.0 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K})$
 $= \mathbf{288 \text{ MJ/kmol CH}_4}$

KİMYASAL DENGİ

$$\left. \begin{array}{l} \delta Q - P dV = dU \\ dS \geq \frac{\delta Q}{T} \end{array} \right\} dU + P dV - T ds \leq 0$$

Gibbs serbest enerji fonksiyonu;

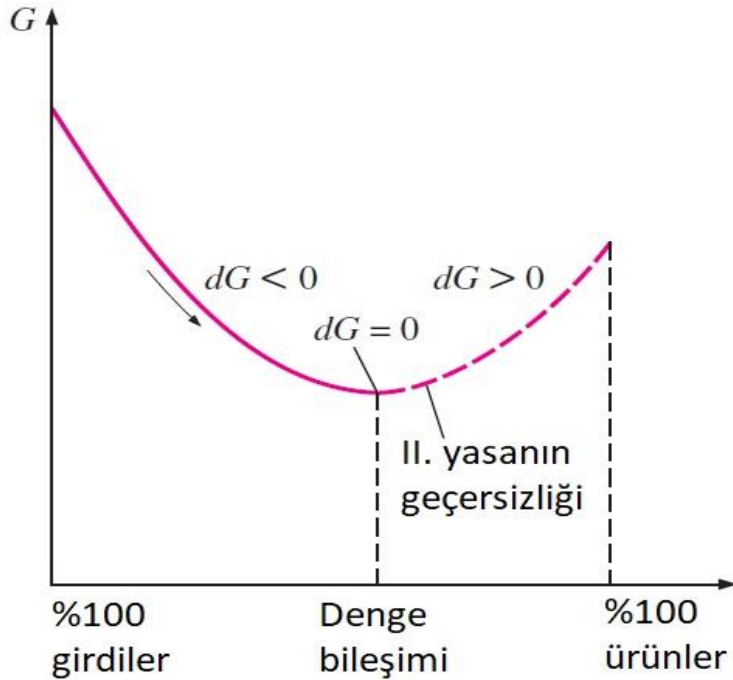
$$G = H - TS \longrightarrow G = U + PV + TS$$

Gibbs fonksiyonu sıcaklığa (T) ve basınca (P) bağlıdır.

$$\begin{aligned} (dG)_{T,P} &= dH - T dS - S dT \\ &= (dU + P dV + \overset{\nearrow 0}{V dP}) - T dS - \overset{\nearrow 0}{S dT} \\ &= dU + P dV - T dS \end{aligned}$$

Bu eşitlik bir önceki eşitlik ile birleştirilirse; $(dG)_{T,P} \leq 0$ elde edilir. Bu yüzden, belli bir basınç ve sıcaklıkta yürüyen bir kimyasal tepkime Gibbs fonksiyonunu azaltacak yönde ilerler. Gibbs fonksiyonu en düşük değerine ulaştığında kimyasal tepkime durur ve kimyasal denge kurulur. Bu yüzden kimyasal denge kriteri

$$(dG)_{T,P} = 0 \text{ olur.}$$



Belli bir basınç ve sıcaklıkta oluşan bir kimyasal tepkime, termodinamiğin II.yasasına aykırı olduğu için, Gibbs fonksiyonunu arttıracak yönde yürüyemez.

Sabit basınç ve sıcaklık için, sonsuz küçük miktarda A ve B girdilerinin C ve D ürünlerine dönüştüğü bir tepkime düşünölsün.



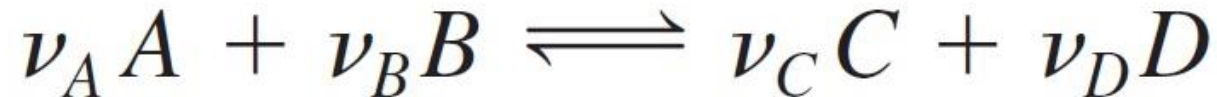
Denge kriterine göre işlem süresince karışımın Gibbs fonksiyonunda meydana gelen değışmenin sıfıra eşit olması gerekir.

$$(dG)_{T,P} = \sum (dG_i)_{T,P} = \sum (\bar{g}_i dN_i)_{T,P} = 0$$

ya da

$$\bar{g}_C dN_C + \bar{g}_D dN_D + \bar{g}_A dN_A + \bar{g}_B dN_B = 0$$

$\bar{g}$:Belli bir basınç ve sıcaklıktaki molar gibbs fonksiyonu.
ya da stokiyometrik tepkimeye göre,



$$\nu_C \bar{g}_C + \nu_D \bar{g}_D - \nu_A \bar{g}_A - \nu_B \bar{g}_B = 0$$

Bu eşitlik kimyasal denge kriteri olarak bilinir ve her fazdaki tüm kimyasal tepkimeler için geçerlidir.

İdeal Gaz Karışımlarında Denge Sabiti

1 atm basınçta ve karışım sıcaklığında, ideal gaz karışımındaki her i bileşeninin Gibbs fonksiyonu;

$$\bar{g}_i(T, P_i) = \bar{g}_i^*(T) + R_u T \ln P_i$$

$\bar{g}_i^*(T)$: i bileşeninin 1 atm basınçta ve T sıcaklığındaki Gibbs fonksiyonu.

$$\begin{aligned} \nu_C [\bar{g}_C^*(T) + R_u T \ln P_C] + \nu_D [\bar{g}_D^*(T) + R_u T \ln P_D] \\ - \nu_A [\bar{g}_A^*(T) + R_u T \ln P_A] - \nu_B [\bar{g}_B^*(T) + R_u T \ln P_B] = 0 \end{aligned}$$

Ayrıca, kolaylık bakımından standart haldeki Gibbs fonksiyonundaki değişme;

$$\Delta G^*(T) = \nu_C \bar{g}_C^*(T) + \nu_D \bar{g}_D^*(T) - \nu_A \bar{g}_A^*(T) - \nu_B \bar{g}_B^*(T)$$

Bu tanım yukarıdaki eşitlikte yerine konulursa;

$$\Delta G^*(T) = -R_u T (\nu_C \ln P_C + \nu_D \ln P_D - \nu_A \ln P_A - \nu_B \ln P_B) = -R_u T \ln \frac{P_C^{\nu_C} P_D^{\nu_D}}{P_A^{\nu_A} P_B^{\nu_B}}$$

İdeal gaz karışımındaki kimyasal denge sabiti K_p ;

$$K_p = \frac{P_C^{\nu_C} P_D^{\nu_D}}{P_A^{\nu_A} P_B^{\nu_B}}$$

$$K_p = e^{-\Delta G^*(T)/R_u T}$$

kimyasal denge sabiti

Bu yüzden belli bir sıcaklıktaki ideal gaz karışımı için denge sabiti K_p , aynı sıcaklıktaki standart Gibbs fonksiyonundaki değişimden hesaplanabilir. Çeşitli tepkimelerin K_p değerleri Tablo A-28’de verilmiştir.

ÖRNEK:

$\text{N}_2 \rightarrow 2\text{N}$ ayrışma tepkimesinin 25°C 'deki denge sabiti K_p 'yi hesaplayın.

ÇÖZÜM:

$$K_P = e^{-\Delta G^*(T)/R_u T}$$

25°C ve 1 atm'de

oluşum gibbs fonksiyonu N_2 için 0

oluşum gibbs fonksiyonu N için 455,510 kJ/kmol

$$\begin{aligned}\Delta G^*(T) &= \nu_{\text{N}} \bar{g}_{\text{N}}^*(T) - \nu_{\text{N}_2} \bar{g}_{\text{N}_2}^*(T) \\ &= (2)(455,510 \text{ kJ/kmol}) - 0 \\ &= 911,020 \text{ kJ/kmol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\ln K_P &= -\frac{911,020 \text{ kJ/kmol}}{(8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K})(298.15 \text{ K})} \\ &= -367.5\end{aligned}$$

$$K_P \cong 2 \times 10^{-160}$$

Bu tepkimenin K_p değeri uygulamada sıfır sayılır.

Bu sonuç da bu tepkimenin bu sıcaklıkta gerçekleşmeyeceğini gösterir.

Denge sabiti bir kez belirlendikten sonra, tepkimeye giren ideal gaz karışımındaki bileşenlerin denge bileşimlerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Bu işlem, bileşenlerin kısmi basınçlarını mol kesirleri cinsinden ifade edilerek yapılır.

$$P_i = y_i P = \frac{N_i}{N_{\text{toplam}}} P$$

$$K_P = \frac{P_C^{\nu_C} P_D^{\nu_D}}{P_A^{\nu_A} P_B^{\nu_B}} \quad \text{eşitliğinde yerine yazılırsa;}$$

$$K_P = \frac{N_C^{\nu_C} N_D^{\nu_D}}{N_A^{\nu_A} N_B^{\nu_B}} \left(\frac{P}{N_{\text{toplam}}} \right)^{\Delta \nu}$$

(1) Kısmi basınçlara göre

$$K_P = \frac{P_C^{\nu_C} P_D^{\nu_D}}{P_A^{\nu_A} P_B^{\nu_B}}$$

(2) $\Delta G^*(T)$ 'ye göre

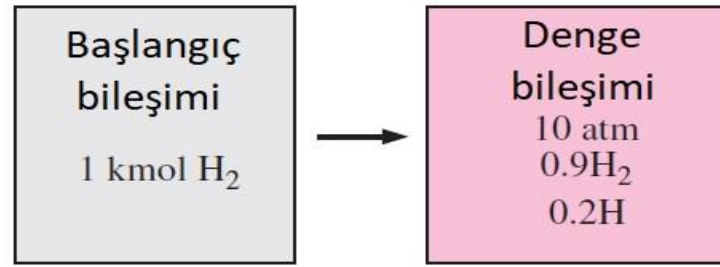
$$K_P = e^{-\Delta G^*(T)/R_u T}$$

(3) Denge bileşimine göre

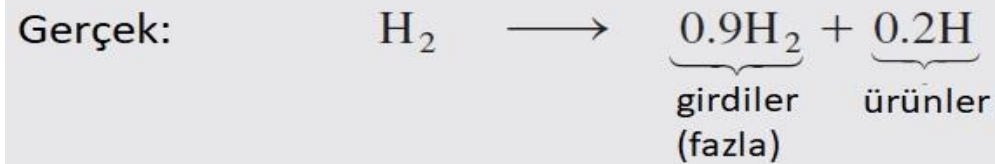
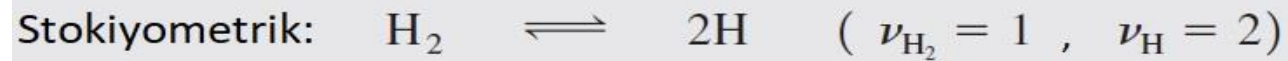
$$K_P = \frac{N_C^{\nu_C} N_D^{\nu_D}}{N_A^{\nu_A} N_B^{\nu_B}} \left(\frac{P}{N_{\text{toplam}}} \right)^{\Delta \nu}$$

ÖRNEK:

10 atm basınçtaki iki atomlu H_2 'nin %10'unun tek atomlu hidrojene parçalandığı sıcaklığı hesaplayın.



ÇÖZÜM:



$$N_{H_2} = 0.9 \quad N_H = 0.2$$

$$K_P = \frac{N_H^{\nu_H}}{N_{H_2}^{\nu_{H_2}}} \left(\frac{P}{N_{\text{toplam}}} \right)^{\nu_H - \nu_{H_2}} = \frac{(0.2)^2}{0.9} \left(\frac{10}{0.9 + 0.2} \right)^{2-1} = 0.404$$

Tablo A-28'den $\longrightarrow T = 3535 \text{ K}$

İdeal Gazların K_p Değerleri Hakkında Bazı Açıklamalar

- 1) Tepkimenin K_p değeri sadece sıcaklığa bağlıdır.

$$K_p = e^{-\Delta G^*(T)/R_u T}$$

- 2) Ters yöndeki tepkimenin K_p değeri $1/K_p$ 'dir.



- 3) Daha çok tamamlanmaya giden tepkimenin K_p değeri daha da büyür.

$K_p > 1000$ (veya $\ln K_p > 7$) olan tepkimeler genellikle tamamlanmış olarak kabul edilir.

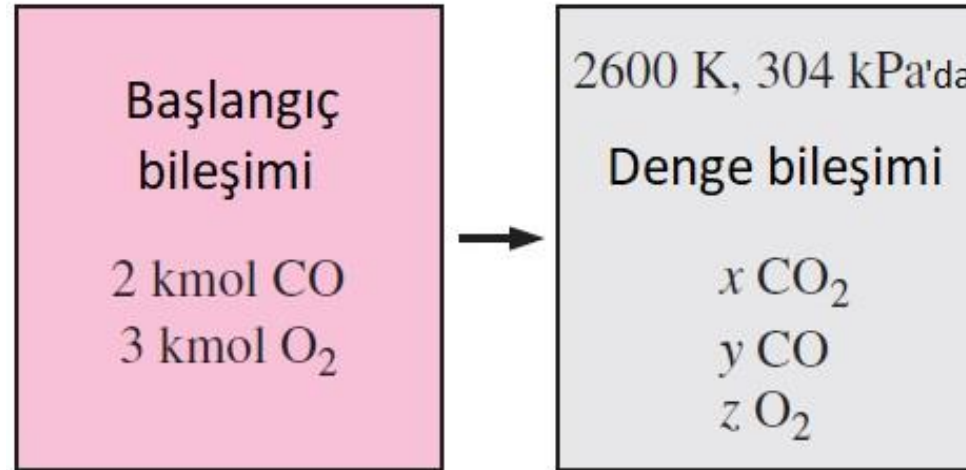
$K_p < 0.001$ (veya $\ln K_p < -7$) olan tepkimeler de hiç olmamış kabul edilir.

- 4) Karışımın basıncı, denge sabiti K_p 'nin değerini etkilemez ama denge bileşimini etkiler.
- 5) İnert gazların varlığı, denge sabiti K_p 'nin değerini etkilemez ama denge bileşimini etkiler.
- 6) Denge hesaplamaları bir tepkimenin hızı hakkında değil, denge bileşimi hakkında bilgi verir.

ÖRNEK:

2 kmol CO ve 3 kmol O₂ karışımı 304 kPa sabit basınçta 2600 K'ne ısıtılmaktadır.

Karışımın CO₂, CO ve O₂'den oluştuğunu varsayarak denge bileşimini belirleyin.



ÇÖZÜM:

Stokiyometrik: $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$ ($\nu_{\text{CO}_2} = 1, \nu_{\text{CO}} = 1, \nu_{\text{O}_2} = \frac{1}{2}$)

Gerçek: $2\text{CO} + 3\text{O}_2 \longrightarrow \underbrace{x\text{CO}_2} + \underbrace{y\text{CO} + z\text{O}_2}$

C denkliği: $2 = x + y$ $y = 2 - x$

O denkliği: $8 = 2x + y + 2z$ $z = 3 - \frac{x}{2}$

$$N_{\text{toplam}} = x + y + z = 5 - \frac{x}{2}$$

Basınç: $P = 304 \text{ kPa} = 3.0 \text{ atm}$

Tablo A-28'deki en yakın tepkime $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$ 'dir.

2600 K'de $\ln K_p = -2.801$ 'dir. Bu eldeki tepkimenin tersidir ve buna göre

$\ln K_p = +2.801$ veya $K_p = 16.461$ olur.

$$K_P = \frac{N_{\text{CO}_2}^{\nu_{\text{CO}_2}}}{N_{\text{CO}}^{\nu_{\text{CO}}} N_{\text{O}_2}^{\nu_{\text{O}_2}}} \left(\frac{P}{N_{\text{total}}} \right)^{\nu_{\text{CO}_2} - \nu_{\text{CO}} - \nu_{\text{O}_2}}$$

$$16.461 = \frac{x}{(2-x)(3-x/2)^{1/2}} \left(\frac{3}{5-x/2} \right)^{-1/2}$$

$$x = 1.906$$

$$y = 2 - x = 0.094$$

$$z = 3 - \frac{x}{2} = 2.047$$

2600 K ve 304 kPa'daki karışımın denge bileşimi:





İLERİ YANMA VE MODELLEME

✓ ALEV TÜRLERİ



PROF.DR.MUSTAFA İLBAŞ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ A.B.D

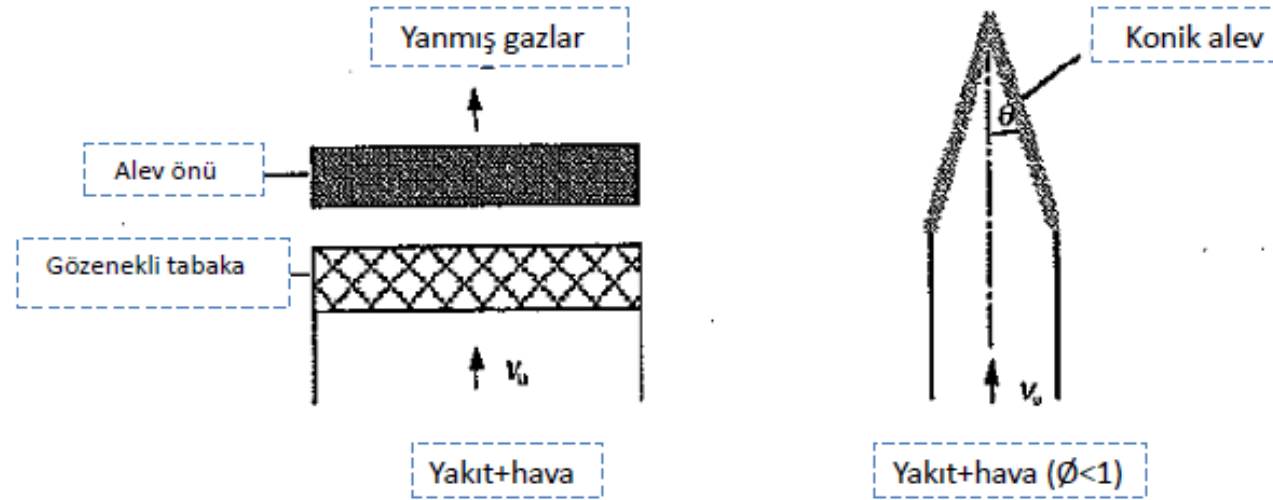
Temel Alev Türleri

Yakıt / Oksidizer Karışımı	Akış Hareketi	Örnek Uygulamalar
ön karışıklı	Türbölanslı	SI benzin motoru
	Laminer	Düz alev, Bunsen alevi, ön karışıklı mum
ön karışıklı	türbölanslı	Dizel motoru, uçak türbini, H ₂ /O ₂ roket motoru
	Laminer	Odun alevi, mum

- Laminer düz alevler “laminer yanma hızı, V_L (m/s)” ile tanımlanırlar ve yanma hızı yakıt eşdeğerlik oranı (ϕ), basınç ve başlangıç sıcaklığının bir fonksiyonudur.
- Eğer düz bir alevin laminer yanma hızı (V_L), yanmamış gazın yanma hızından (V_U) daha azsa alev patlar (burada ‘u’ işareti ingilizce bir terim olan unburned yani yanmamış anlamından dolayı böyle kullanılmıştır). Bu yüzden laminer alevler için karakteristik olarak,
 $V_L > V_U$ olmalıdır. Yani $V_L \approx V_U$ sınır değerlerine yakın değerlerde patlama olur.
- Eğer şekilde görülen açısı artarsa daha yüksek giriş hızlarına erişilebilir. Bunsen yakıcısında $V_L = V_U \cdot \sin \theta$ eşitliği elde edilir.

Laminer Önkarişımlı Alevler

- Bu tip alevlerde, yakıt ve oksitleyici yanmadan önce karışırlar ve akış laminardır. Bunlara “düz alevler” ve Bunsen alevleri (yakıtça fakir durumlarda) örnek olarak verilebilir.



Şekil: Laminer düz alevin (soldaki) ve Bunsen alevinin (sağdaki) şematik gösterimleri (her ikisi de ön karışımli)

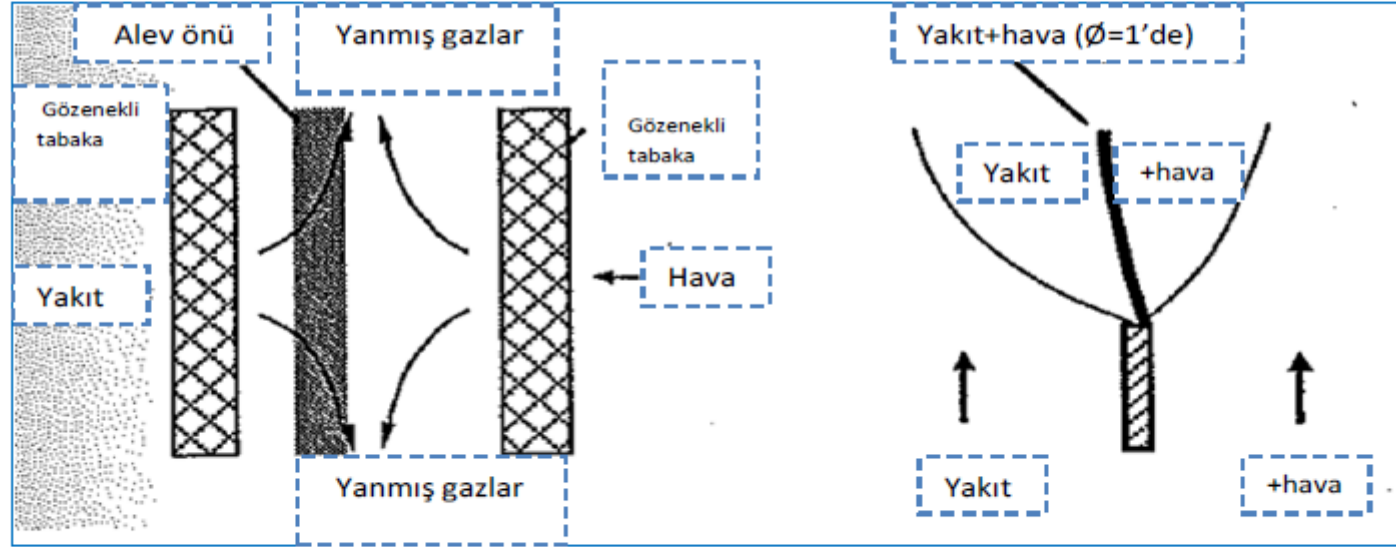
Türbülanslı Ön karışimli Alevler

Benzin motorlarında vb. alev ön karışimli olmakla birlikte laminar değil türbülanslı bir yapıdadır. Bu durumda, ön karışimli alev türü türbülanslı akışa doğru ilerler.

- Ön karışımın avantajı yanmanın çok iyi kontrol edilebilmesidir. Fakir karışımlarda yüksek sıcaklıklar oluşmayacağından daha az “NO” ve “is” emisyonu oluşur. Çünkü is genellikle zengin karışımların bir sonucudur. Bu avantajlarına karşın ön karışimli türbülanslı alevler çok miktarlarda reaktantın bir araya gelmesi durumunda tehlikeli büyük patlamalara yol açtıklarından çok yaygın bir kullanıma sahip değildirler.

Laminer Önkarişimsız Alevler

Laminer ön karişimsız alevlerde (laminer difüzyon alevi), yakıt ve oksitleyici eş zamanlı olarak karişır ve yanarlar. Gaz lambaları ve mumlar örnek olarak verilebilir.



Şekil: Laminer karşı akışlı ön karişimsız alev (soldaki) ve laminer aynı yönlü ön karişimsız alev (sağdaki)

Türbülanslı Önkarişimsız Alevler

Bu durumda, ön karişimsız alevler bir türbülanslı akış alanında yanarlar ve düşük türbülans yoğunluklarında az önce bahsedilen “sözde alev konsepti (so-called flamelet concept) kullanılabilir.

- Güvenlik nedenlerinden ötürü endüstriyel yanma cihazlarında genellikle ön karişimsız alev kullanılır.
- Ön karişimsız alevler ön karişimli alevlere nazaran daha karmaşık bir yapıya sahiptirler, çünkü eşdeğerlik oranı ($0-\infty$) arasında değişir. Yakıt tarafında zengin yanma, hava tarafında ise fakir yanma oluşur. Alev önü ise stokyometrik karişıma yakın olarak ayarlanır. Bu yüzden ön karişimli alevlerden farklı olarak ön karişimsız alevler yayılmazlar ve bu sebepten “laminer yanma hızı” ile karakterize edilemezler.
- **Önkarişimli ve Önkarişimsız Birleşimi Alevler:** Ev ısıtması ve su ısıtması bu hibrit yöntemlerle yapılır.

ALEVLERİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Bilgisayar simülasyonları yanma olaylarında sıklıkla ve giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır ancak hala deneysel araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Deney araştırmalarında ise en çok simülasyonlarda tahmini yapılan hız, basınç ve tür konsantrasyonları ölçülür. Bu ölçümlere ihtiyaç duyulmasının nedenleri ise şunlardır:

- Kimyasal reaksiyonlarda simülasyonlarda tahmin edilemeyen türler ve reaksiyonlar oluşabilir. Böylece deneysel sonuçlarla simülasyonlar karşılaştırılarak bu ikisi arasındaki ilişki geliştirilebilir (araştırma).
- Yanma esnasında çok karmaşık modeller kullanılmaktadır. Yapılan deneyse araştırmalar sayesinde bu karmaşık modellerden hangi kısımların çıkarılarak modelin basitleştirilebileceği belirlenebilir (doğrulama – verification)

Deneysel olarak yapılan hız, basınç ve konsantrasyon ölçümlerinde farklı yöntemlerden faydalanılmaktadır.

Hız Ölçümleri

- Kızgın Telli Anemometre (Hot-wire Anemometer)
- Partikül İzleme Metodu (Particle Tracking Method)
- Laser-Doppler Anemometresi (Laser-Doppler Anemometry)

Yoğunluk Ölçümleri

- Laser- Rayleigh Serpiştirilmesi Yöntemi (laser – Rayleigh scattering)

Konsantrasyon Ölçümleri

- Raman-Spektroskopi Yöntemi
- Probe Örnekleri Yöntemi
- CARS Spektroskopisi
- LIF Yöntemi (Laser Induced Fluorescence)

Sıcaklık Ölçümleri

- Termoelemanlar (Thermocouples)
- CARS Spektroskopisi
- LIF Yöntemi

Basınç Ölçümleri

- Basınç Transdüzörleri
- Sıvı Manometreler



İLERİ YANMA VE MODELLEME



✓ YANMA KAYNAKLI HAVA KİRLİLİĞİ

PROF.DR.MUSTAFA İLBAŞ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ABD

GENEL BİR BAKIŞ

- Emisyonların kontrol edilmesi, modern yanma sistemlerindeki en önemli parametredir.
- Çünkü emisyonlar çevreye, dolayısıyla da insan sağlığına olumsuz yönde etki ederler.
- Emisyonlar, zarar verdikleri yerlere göre 4'e ayrılabilir.
 - 1) Atmosferde, dolayısıyla da yağışlarda meydana gelen değişimler,
 - 2) Bitki örtüsüne verilen zararlar,
 - 3) Malzemelerin kirlenmesi ve bozunması,
 - 4) İnsanlara verilen zararlar (Ölüm veya ağır hastalık oranlarındaki ciddi artışlar)

EMİSYON İNDEKSİ

- **Emisyon indeksi**; birimsiz bir ifade olup, yakılan yakıtın kütlesi başına oluşan kirleticilerin seviyesini ortaya koyabilmek için belirlenmiş bir eşitliktir.
- Yani bu indeks, kirleticilerin oluşumuna bağlı olarak, yanma prosesi için verimin bir ölçüsü olarak da düşünülebilir.

$$El_i = \frac{m_{i,\text{emitted}}}{m_{F,\text{burned}}}$$

EMİSYON İNDEKSİ

Hidrokarbon yakıtlar için, bu indeks, C atomu içeren tüm kirleticilerin dikkate alındığı bir eşitlik haline dönüşür ve en genel ifadesiyle şöyle yazılır.

$$EI_i = \left(\frac{\chi_i}{\chi_{CO} + \chi_{CO_2}} \right) \left(\frac{x MW_i}{MW_F} \right),$$

Burada;

- EI_i = i emisyonu için emisyon indeksini,
- χ_i = i emisyonunun mol sayısını,
- χ_{CO} = CO emisyonunun mol sayısını,
- χ_{CO_2} = CO₂ emisyonunun mol sayısını,
- x = yakılan bir mol yakıttaki C atomu sayısını C_xH_y
- MW_i = i emisyonunun mol ağırlığını,
- MW_F = yakıtın mol ağırlığını ifade eder.

EMİSYON İNDEKSİ (ÖRNEK)

Example 15.1. A spark-ignition engine is running on a dynamometer test stand and the following measurements of the exhaust products are made:

$$\text{CO}_2 = 12.47\%$$

$$\text{CO} = 0.12\%$$

$$\text{O}_2 = 2.3\%$$

$$\text{C}_6\text{H}_{14} \text{ (equivalent)} = 367 \text{ ppm}$$

$$\text{NO} = 76 \text{ ppm.}$$

All concentrations are by volume on a dry basis. The engine is fueled by isooctane. Determine the emission index of the unburned hydrocarbons expressed as equivalent hexane.

Solution. If we ignore the fact that not all of the fuel appears as CO and CO₂, i.e., unburned hydrocarbons are measured, we can use Eqn. 15.2 directly. The molecular weights of hexane and isooctane are 86.2 and 114.2 kg/kmol, respectively. Thus,

$$\begin{aligned} EI_{\text{C}_6\text{H}_{14}} &= \left(\frac{\chi_{\text{C}_6\text{H}_{14}}}{\chi_{\text{CO}} + \chi_{\text{CO}_2}} \right) \left(\frac{x \text{ MW}_{\text{C}_6\text{H}_{14}}}{\text{MW}_{\text{C}_8\text{H}_{18}}} \right) \\ &= \left(\frac{367 \cdot 10^{-6}}{0.0012 + 0.1247} \right) \frac{8(86.2)}{114.2} \end{aligned}$$

$$EI_{\text{C}_6\text{H}_{14}} = 0.0176 \text{ kg/kg or } 17.6 \text{ g/kg}.$$

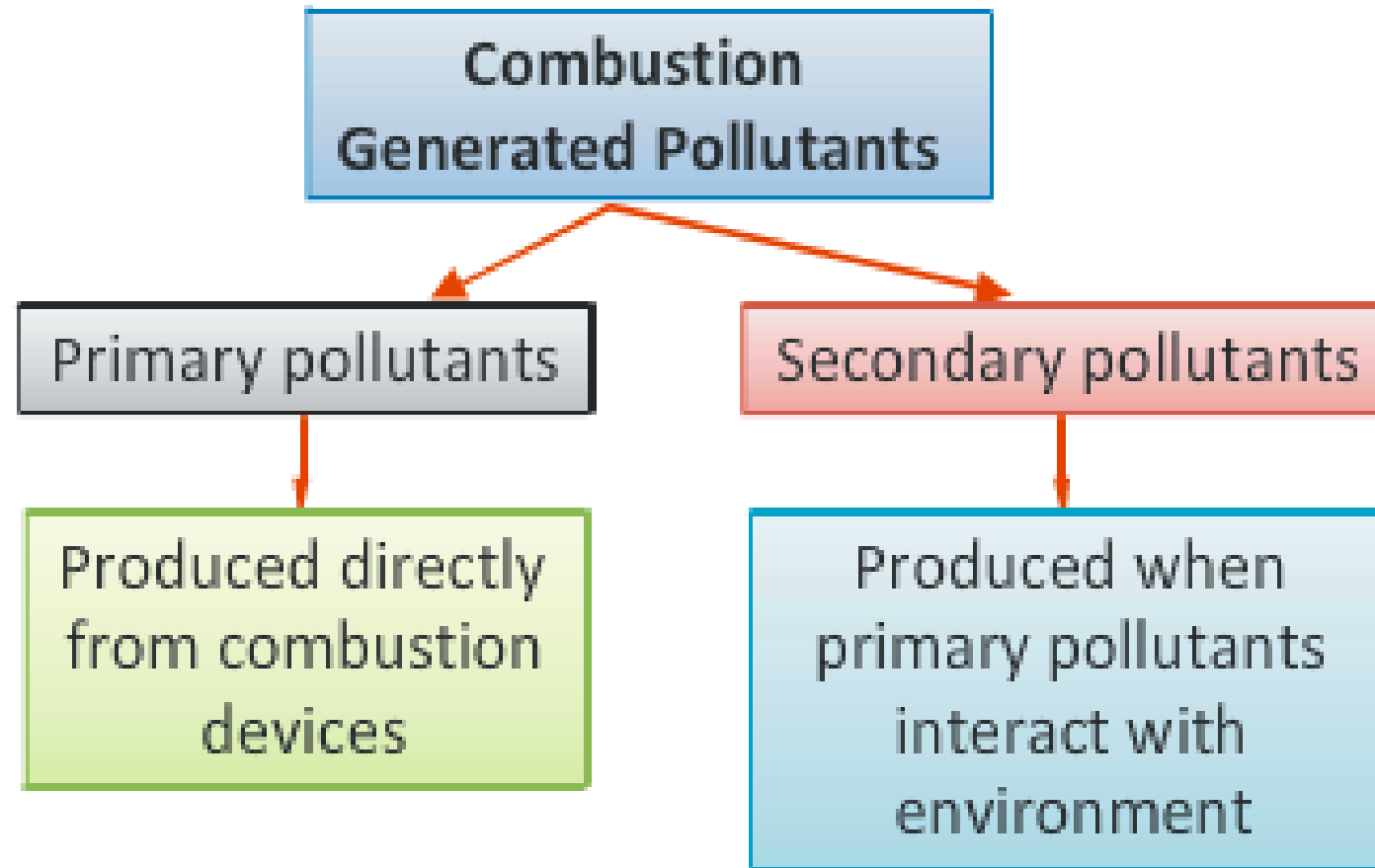
We can redo this calculation, taking into account the unburned hydrocarbons, by adding $6 \chi_{\text{C}_6\text{H}_{14}}$ to $\chi_{\text{CO}} + \chi_{\text{CO}_2}$ in the denominator of Eqn. 15.2:

$$EI_{\text{C}_6\text{H}_{14}} = \left(\frac{367 \cdot 10^{-6}}{0.0012 + 0.1247 + 6(367 \cdot 10^{-6})} \right) \frac{8(86.2)}{114.2}$$

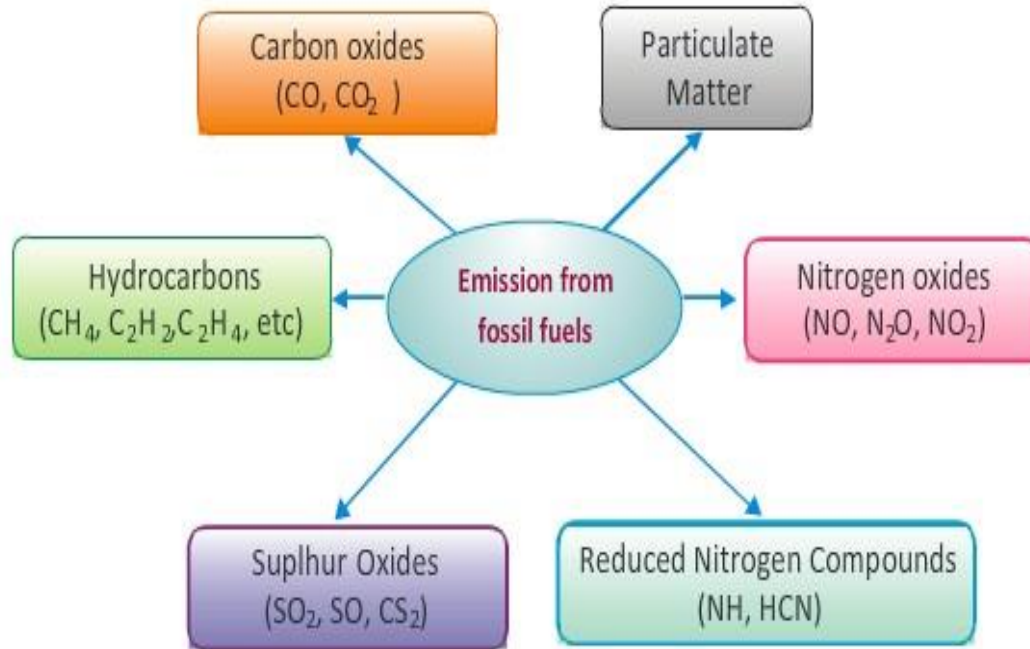
$$EI_{\text{C}_6\text{H}_{14}} = 17.3 \text{ g/kg}.$$

This value is lower than the previous value by about 1.7%; thus, the amount of fuel carbon appearing as unburned hydrocarbons has only a small effect on the calculated emission indices.

EMİSYONLAR



EMİSYONLAR



Yanma sonucu açığa çıkan bazı emisyonlar şöyledir:

CO₂

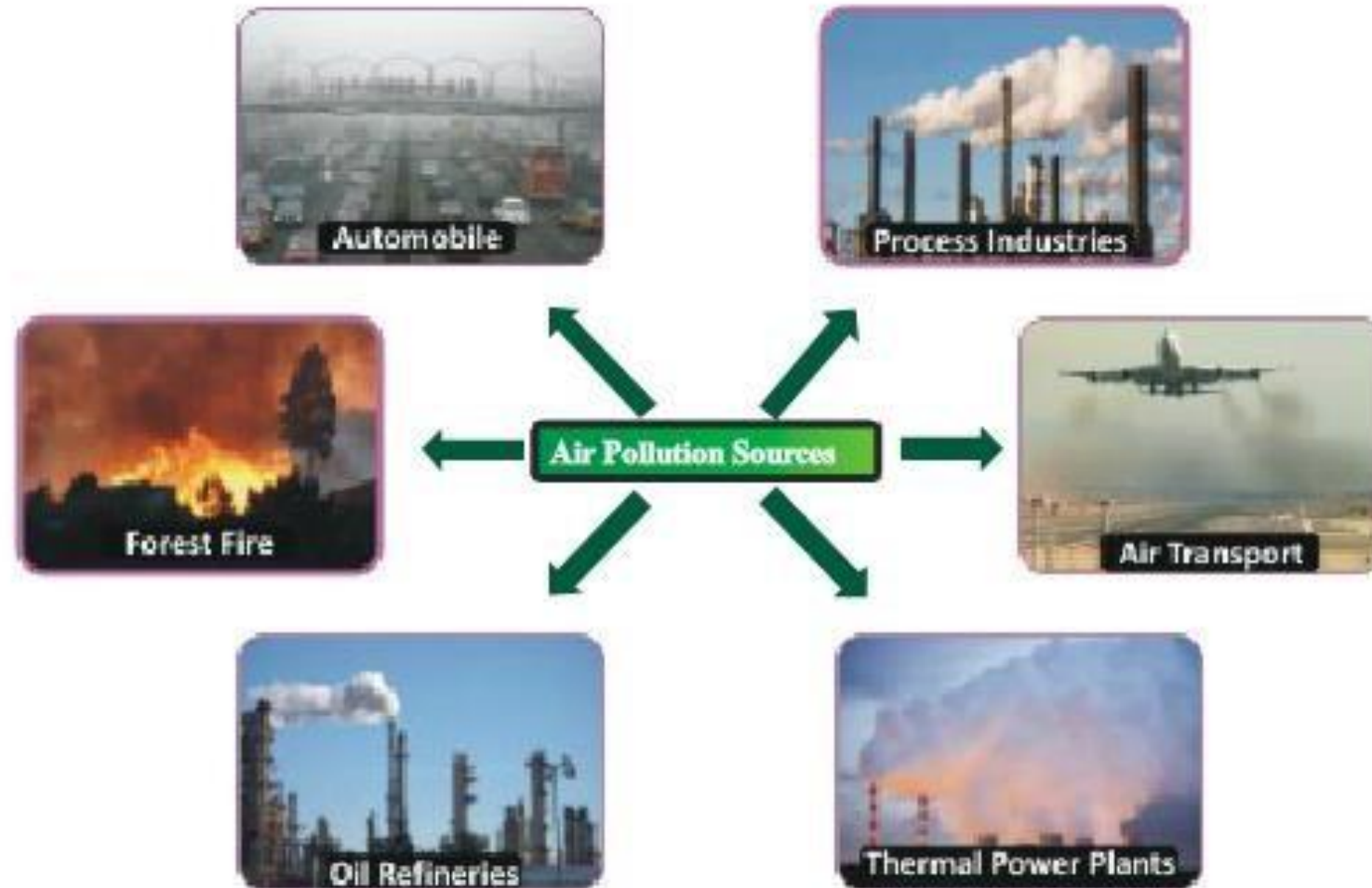
CO

H₂O

SO_x

NO_x

Yanmamış hidrokarbonlar



NO_x NEDİR?

- Fosil yakıtların yakılması sırasında, gerek yakıta bağlı bulunan azot ve gerekse yakma havasındaki azot tepkime koşullarında oksijen ile birleşerek N₂O, NO, N₂O₃, N₂O₅, ve O₃ gazlarını meydana getirir.
- Ancak bunlardan N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅ ve NO₃ kararsız yapıda oldukları için NO ve NO₂ verecek şekilde bozunurlar. Bu nedenle yanma gazlarında bulunan azot oksitleri NO ve NO₂ şeklinde oluşur.
- Hava kirliliğine neden olanlar ise NO, NO₂ ve N₂O dur.

Major Sources of NO Emission

Source category	Emissions (Millions tons per year)	%
Gasoline motor vehicles	7.8	17.53
Diesel, Aircraft , trains, ships	2.0	4.49
Off-highway vehicles	1.9	4.27
Coal	3.9	8.76
Fuel oil	1.3	2.92
Natural gas	4.7	10.56
Wood	0.1	0.22
Total fuel combustion	21.7	48.76
Industrial processes	0.2	0.45
Agricultural burning	0.3	0.67
Solid waste disposal	0.4	0.90
Miscellaneous	0.2	0.45
Total	44.5	100

NO_x NEDİR?

- N₂O; inert bir gaz olup anestezik (uyuşturucu) karakteristik gösterir. NO_x oluşumuna bağlı olmaksızın çevresel çevrimlerde genellikle dengeli bir yapıya sahiptir.
- NO; renksiz bir gazdır ve 0.50 ppm'den daha az konsantrasyonlarında, insan sağlığı için zehirleyici etkisi oldukça azdır. Bunun yanında, NO, fotokimyasal duman oluşumunda, aktif rol oynamaktadır. Ayrıca NO emisyonları solunduğu zaman, sinir sistemini doğrudan etkilemekte, kandaki hemoglobine yapışmaktadır.
- NO₂; NO'nun, atmosferde hızlıca NO₂'ye dönüşmesi neticesinde ortaya çıkar ve göz ve burnun tahrişine yol açar. Ayrıca, NO₂ seviyesi, 15 ppm'in üzerine çıkacak olursa, akciğer rahatsızlıklarına neden olabilir.

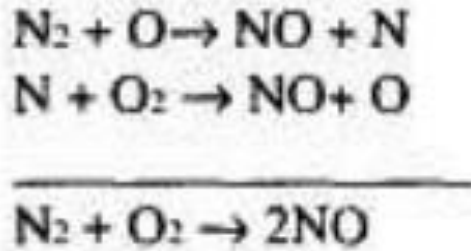
NO_x OLUŞUM MEKANİZMALARI

Yanma işlemlerinde NO_x oluşumu bilinen 3 mekanizma ile gerçekleşir:

- Thermal (Isıl) NO_x mekanizması
- Prompt (Hızlı/Ani) NO_x mekanizması
- Fuel (Yakıt) NO_x mekanizması

ISIL NO_x MEKANİZMASI

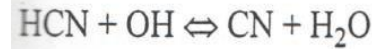
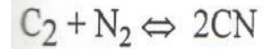
- Azot bileşikleri içermeyen yakıtların yanması sırasında yakıcı gazdaki (hava), atmosfer azotunun, ortamda yeteri kadar oksijen bulunması halinde "Isıl" mekanizma ile oksitlenmesi sonucu oluşmakta ve sıcaklığın üstel bir fonksiyonu olarak gelişmektedir. Isıl NO_x oluşum mekanizması, alev sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Alev sıcaklığı ne kadar yüksekse, oluşan NO_x seviyelerinde, ısıl NO_x mekanizmasının etkisi de o kadar yüksektir.



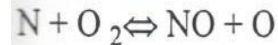
- Tepkimeleri ile azot oksidin meydana gelişi, yüksek aktivasyon enerjilerinden dolayı 1300° - 1400°C üzerinde önem kazanmakta, bu sıcaklığın altında yakıtça zengin karışımlarda ise azotoksit indirgenmektedir.

HIZLI (ANI) NO_x MEKANİZMASI

- Hidrokarbon yakıtların yanmasında NO_x'ların oluşum hızları, özellikle zengin karışım bölgesinde Isıl-NO mekanizmasında tanımlanan azotun oksitlenme hızını aşmakta ve çok hızlı bir şekilde, ani-NO oluşumu gerçekleşmektedir.
- Bu oluşumda özellikle (CH, CH₂) gibi hidrokarbon radikallerinin önemli rol oynadığı, bunların moleküler azotla hızlı bir tepkimeye girerek amin ve siyanür gibi ara ürünler üzerinden zincirleme reaksiyon ile NO oluşumuna neden olduğu belirtilmektedir.

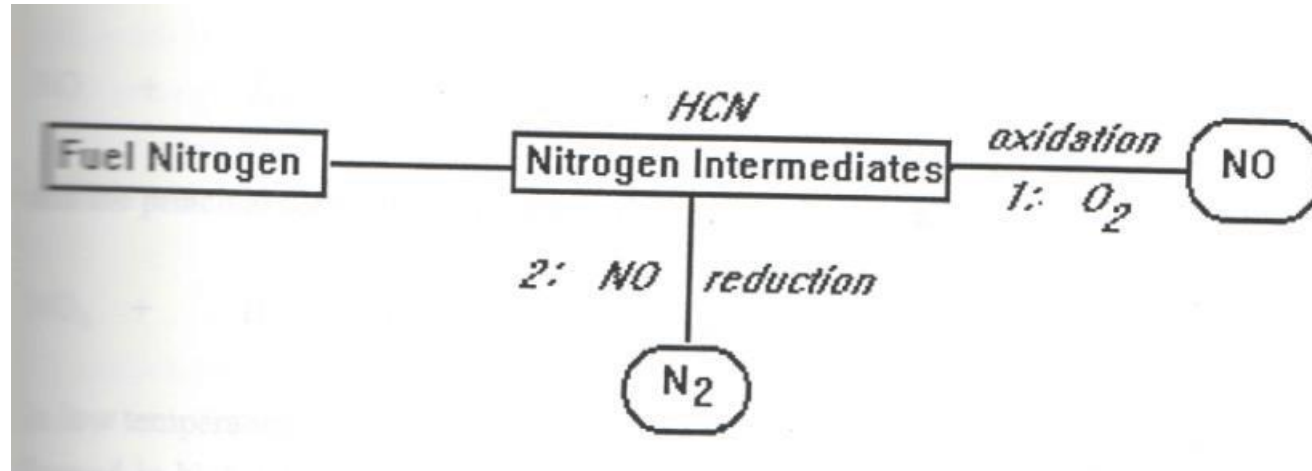


These reactions may produce early NO formation by oxidation of N and CN.



YAKIT NO_x MEKANİZMASI

- Yanma sonucu oluşan NO_x için bir başka kaynak da yakıtın bünyesinde bulunan bağlı azottur. Bu azotun NO_x'a dönüşümü, büyük ölçüde sıcaklık ve stokiyometri gibi yanma bölgesinin yerel özelliklerine ve yakıt/hava karışımındaki azotun başlangıç derişimine bağlıdır.
- Yakıt-NO oluşumunda reaksiyon zincirinin, yakıttaki azot bileşiklerinin çok hızlı bir şekilde HCN ve NH₃'e dönüşümleri ile başladığı bilinmekte, azotun aromatik halkaya bağlı olması halinde HCN, amin şeklinde olması durumunda ise NH₃'ün ağırlık kazandığı belirtilmektedir.



NO₂ REAKSİYON MEKANİZMASI

- NO, çeşitli oksijen içeren türlerle reaksiyona girerek NO₂ oluşturur.
- Oluşan NO₂ nin miktarı, yanma sistemine ve yakıta bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte, genellikle oluşan toplam NO_x un yaklaşık % 5 ine tekabül eder ve bu yüzden bazı durumlarda ihmal edilir.



NO_x

- Azot dioksitin sağlık üzerine etkileri; çeşitli kesimlerdeki bireylere değişik konsantrasyonlar uygulanması ile tespit edilmiştir.
- 3000-9400 µg/m³ konsantrasyonlarına 10-15 dakika süre ile maruz kalındığında, normal ve bronşitli kişilerde akciğer fonksiyon değişimleri gözlenmiştir.
- Azot dioksit maruziyeti sonucunda oluşan şikayetler; normal ve sağlıklı kişilerde 1880 µg/m³ konsantrasyonundan itibaren başlarken, astımlı kişilerde aynı şikayetler 940 µg/m³ konsantrasyon seviyesinden itibaren başlamaktadır.

CO NEDİR? NASIL OLUŞUR?

- Karbon monoksit (CO) renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır.
- CO, karbon kaynaklı yakıtların iyi yanmaması sonucu ortaya çıkar.
- Eksik yanmanın birincil nedeni hava yetersizliği olmakla birlikte, yüksek alev sıcaklıkları da eksik yanmaya yol açabilir.
- Eksik yanma sonucunda yanabilir surumda olan C atomlarının bir kısmı CO oluşturur.

CO KAYNAKLARI NELERDİR?

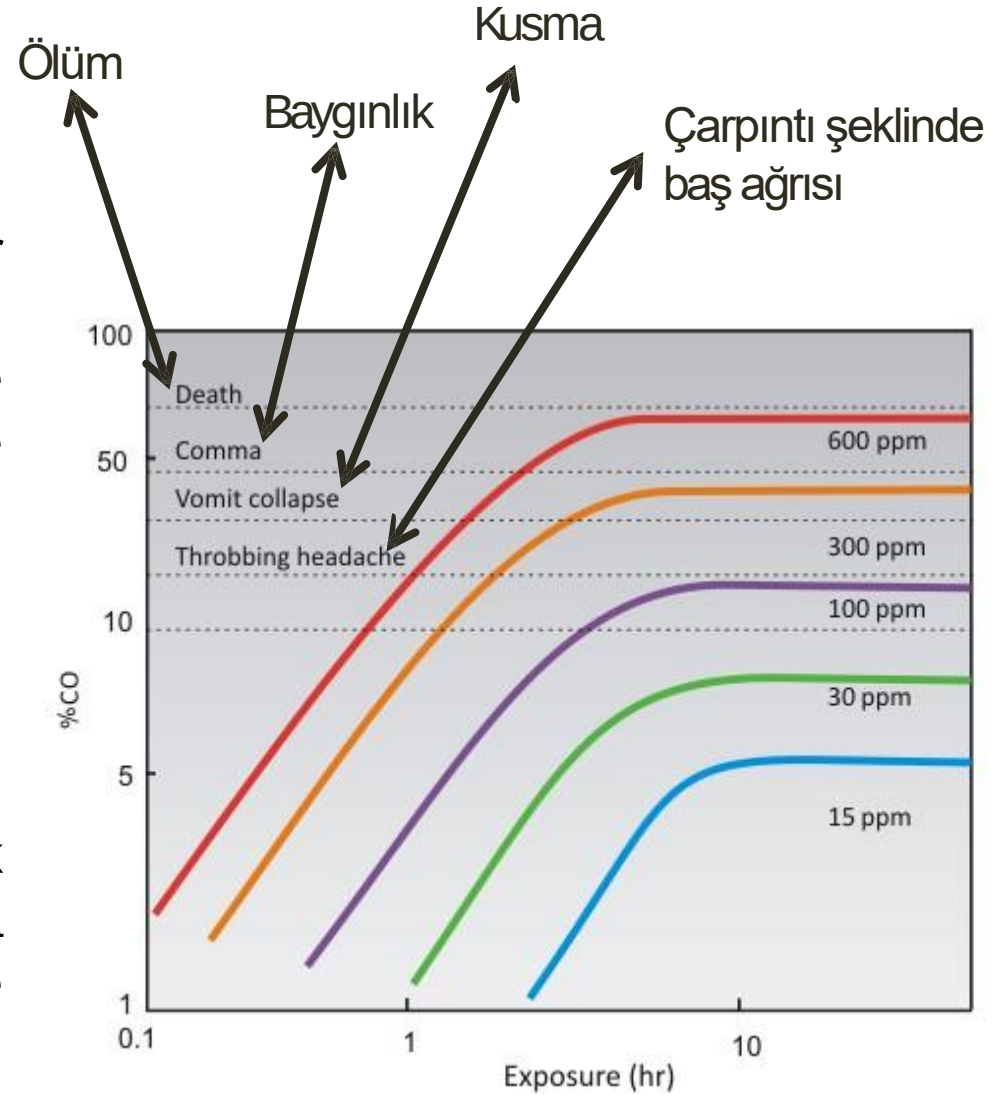
Major Sources of CO Emission

Source category	Emissions (Millions tons per year)	%
Gasoline motor vehicles	95.8	36.69
Diesel, aircraft, trains, vessels	5.6	2.14
Off-highway vehicles	9.5	3.64
Coal	0.5	0.19
Fuel oil	0.1	0.038
Natural gas	0.1	0.038
Wood	0.1	0.038
Total stationary sources	0.8	0.30
Total fuel combustion	111.7	42.78
Industrial processes	11.4	4.36
Agricultural burning	13.8	5.28
Solid waste disposal	7.2	2.75
Miscellaneous	4.5	1.72
Total	261.1	100.0

- Motorlu araçların egzoz gazları,
- Yangınlardan kaynaklanan dumanlar,
- Gaz gücüyle çalışan motorlar,
- Orman yangınları,
- Metilen klorür içeren boyalar en yaygın CO kaynaklarıdır.

CO ZEHİRLENMESİ

- CO, solunduktan sonra akciğerler aracılığıyla kana geçer. CO gazı, kırmızı kan hücrelerinin içerisinde bulunan ve dokulara oksijen taşıyan hemoglobine oksijenden ortalama 200 kat daha hızlı bağlanır.
- CO'nin hemoglobinle birleşmesi sonucu karboksihemoglobin (COHb) oluşur. Vücudumuzda yer alan oksijen azalarak CO ile yer değiştirir. Kan, dokulara yeterince oksijen taşıyamaz. Kalp, beyin ve diğer organlarımız çalışamaz hale gelir. Bu da hastalıklara ve en kötüsü ölümlere neden olur.



CO ZEHİRLENMESİNDE BELİRTİLER

Hafif Düzeyli Zehirlenmeler;

- Baş ağrısı,
- Yorgunluk ve bitkinlik hissi,
- Nefes darlığı,
- Mide bulantısı,
- Baş dönmesi şeklindedir.

Ciddi Düzeyli Zehirlenmeler;

- Sersemlik,
- Kusma,
- Kas koordinasyonunun kaybolması,
- Bilinç kaybı,
- Ölümle sonuçlanır.

CO₂

- **Karbondioksit**, kovalent bağlı bir karbon ve iki oksijen atomundan oluşan moleküle sahip, normal koşullarda gaz halinde bulunan bileşiğin adıdır. Renk ve kokusu yoktur. Formülü CO₂ şeklinde olup molekül ağırlığı 44,009 g/mol'dür.
- C atomu içeren hidrokarbonların yanması sonucu açığa çıkar.
- Solunumdaki yeri açısından hayati önem arz eder. Oksijen, akciğerlere üst hava yollarını geçerek gelir ve alveolde hemoglobin ile taşınarak alveole getirilmiş olan karbondioksit ile yer değiştirir. Daha sonra karbondioksit oksijenin takip ettiği yolla dışarıya verilir. Bitkiler gündüz CO₂ alır, O₂ verirler. Gece ise O₂ alır, CO₂ verirler.

CO₂ BAŞLICA KULLANIM ALANLARI

- Doğal olarak elde edilmiş olan karbondioksit gazı tıp alanında kullanılmaktadır.
- Gaz altı kaynaklarında gaz olarak, meşrubat, maden sodası ve bira gibi gazlı içecek üretimi sırasında ise karbondioksit, sıvılardaki çözünürlüğü nedeniyle karbonizasyon aşamasında kullanılmaktadır. Karbondioksit içeceğe zarar veren mikropların üremesini sınırlama veya tamamen durdurma özelliğine sahiptir. Bakterilerin gelişiminin durdurulmasında en önemli husus ürün içerisinde çözünmüş karbondioksit miktarıdır. Bu miktar ne kadar yüksek ise, ürünlerin dayanıklılığı o kadar artar. Ayrıca içeceklerin tatlarını uzun süre korumalarını sağlar ve raf ömürlerini uzatır.

CO₂ BAŞLICA KULLANIM ALANLARI

- Gıda sektöründe kırmızı ve beyaz et, hazır yemekler, hamur işleri, balık, kabuklu deniz hayvanları, mantar, çilek ahududu ve dondurma gibi pahalı, hassas ve önceden hazırlanan gıda ürünlerinin dondurulmasında karbondioksit kullanılmaktadır.
- Geleneksel soğutma yöntemlerinin aksine, Karbondioksit ile soğutmada üründeki su kaybı minimize edildiğinden çözöldükten sonra ağırlığındaki kayıp da azalmış olur. Ürün tazeliğini korur. Bu sebeple ekonomik olarak kazançlı ve etkin bir soğutma metodudur.
- Kuru buzla +10 derece ve -25 derece arasında depolama sıcaklıkları sağlanabilir. Uygulanabilirliği, sürekliliği düşük yatırım gerektirmesi ve yüksek soğutma kapasitesi karbondioksiti gıda sektörü için vazgeçilmez yapmaktadır.

CO₂ BAŞLICA KULLANIM ALANLARI

- Kimya ve gıda sanayinde uygulama alanları bulunan karbondioksit ile soğuk öğütme proseslerinde kar halindeki kuru buz, düşük sıcaklığı sayesinde istenmeyen ısıyı ortamdan uzaklaştırmakta kullanılmaktadır.
- Karbondioksit ile koruyucu gazlı paketleme et ürünleri, ekmek ve diğer unlu ürünler, süt ürünleri başta olmak üzere birçok gıdada uygulanmaktadır.
- Seralarda Karbondioksit gübrelemesi ve tarımda sulama suyunda Karbondioksit kullanımı gelişmekte olan uygulamalardır.

CO₂ BAŞLICA KULLANIM ALANLARI

- Kimya sektöründe emniyet ve ürün kalitesinin sağlanması amacıyla azotun yanı sıra karbondioksit kullanılmaktadır.
- Buğday, mısır, baklagiller gibi hububatların saklandığı silolarda karbondioksit kullanımı, haşereye karşı **fümigasyon** işleminde zararları kanıtlanmış kimyasal ilaçlar yerine insan sağlığına ve çevreye zararsız bir yöntemdir.
- En önemli özelliklerinden biri de inert gaz olduğundan karbondioksit yangın söndürme cihazlarında kullanılmaktadır.

Fumigasyon, bir tür zararlılardan korunma metodudur. Zararlı olduğu düşünülen haşere, böcek ve bakteriler, kapalı bir ortamda gaz halde kimyasal maddeler fumigant verilerek boğulur.

SO_x

- Gaz halindeki kirleticiler arasında yanıcı olmayan renksiz bir gaz olan kükürt oksitler, en çok bilinen birincil hava kirleticilerdendir.
- Atmosferde kalıcılık süresi 40 günü bulmaktadır. Çoğunlukla fosil yakıtların yanması sonucunda meydana gelirler. Kükürt oksitlerin %80'inden fazlasının endüstriyel kaynaklardan meydana geldiği tahmin edilmektedir. Bu emisyonların dünya üzerindeki durumuna bakıldığında en büyük payın Avrupa ile Kuzey Amerika olduğu görülür.
- Her yıl tonlarca SO₂ çeşitli kaynaklardan yayılarak atmosfere karışmaktadır. Kükürt dioksit ve atmosferdeki ürünleri iritan (tahriş edici) etki gösterirler. Solunan yüksek konsantrasyondaki kükürt dioksitin %95'i üst solunum yollarından absorbe olur. Bunun sonucu olarak, bronşit, anfizem ve diğer akciğer hastalık semptomları meydana gelir.

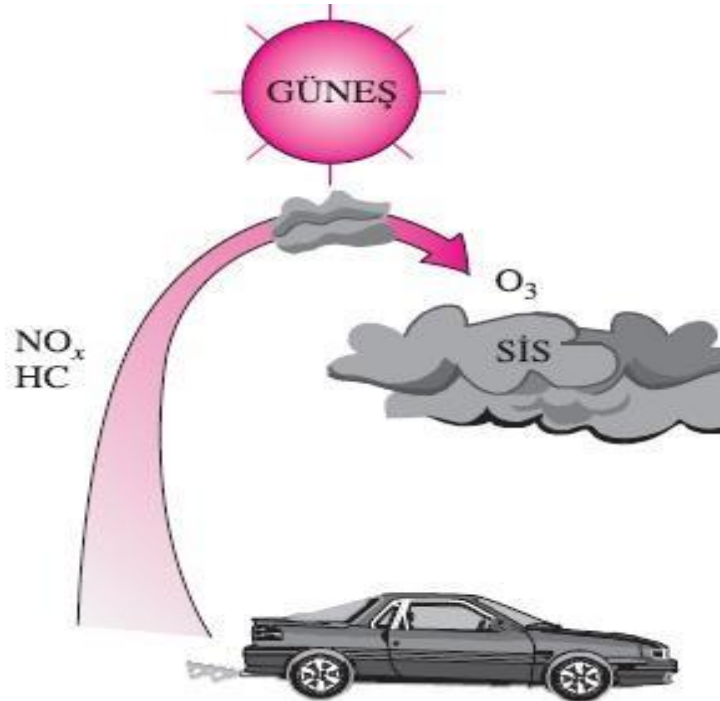
OZON VE DUMANLI SİS

Enerjinin bir biçimden diğer biçime dönüşmesi benzen ve formaldehit gibi yüzlerce element ve bileşik oluşturması sonucu, çevreyi ve farklı yollarla soluduğumuz havayı etkilemektedir.



OZON VE DUMANLI SIS

- **Dumanlı sis:** genellikle yer seviyesinde-ki ozondan (O_3) oluşur, ancak ayrıca, **karbon monoksit** gibi kimyasallardan, kurum gibi küçük zerrelerden, benzen, bütan ve diğer hidrokarbonlar gibi uçu-cu organik bileşenlerden (VOCs) oluşur.
- **Ozon:** Gözler ile akciğerlerde oksijen ile karbondioksitin yer değiştiği bronşları tahriş eder ve bu yumuşak süngerimsi dokuların sertleşmesine neden olur.

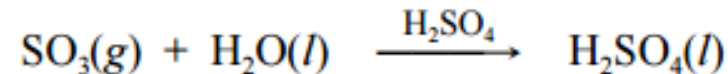
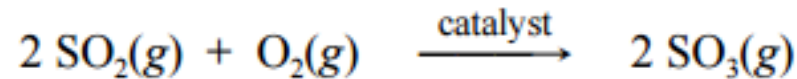


- Sis içerisindeki diğer ciddi kirletici; renksiz, kokusuz ve zehirli bir gaz olan karbon monoksittir.
- Genellikle motorlu araçlardan bırakılırlar.
- Düşük seviyelerde, karbon monoksit beyine giden ve diğer organlar ve kasalardaki oksijen miktarında ve vücut reaksiyonları ile beraber reflekslerde azalmaya ve karar verme gücünde zayıflamaya neden olur.
- Sis ayrıca araçlar ve sanayilerden bırakılan toz ve kurum gibi küçük parçacıklarda içermektedir. Bu maddeler asit ve metal taşıdıkları için göz ve akciğerler için tahriş edicidir.

Kükürt oksit ve nitrik oksidin atmosferdeki gün ışığının fazla olması ile su buharı ve diğer kimyasallarla tepkimeye girmesi ile sülfürik asit ve nitrik asit oluşur.

ASİT YAĞMURLARI

- Asit yağmuru, asidik kimyasalların yağmur, kar, sis, çiy veya kuru parçacıklar halinde yeryüzüne düşmesine verilen isimdir.
- Atmosfere Yayılan kükürtdioksit ve azotoksit gazlarının kimyasal dönüşümlerden geçtikten sonra bulutlardaki su damlacıkları tarafından emilmesi ile oluşur. Daha sonra bu damlacıklar yeryüzüne yağmur, kar gibi yollarla düşerler. Bu toprağın asitlik miktarını artırır ve tatlı su kaynaklarının kimyasal dengesini bozar.



SERA ETKİSİ, KÜRESEL ISINMA VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

- Güneş'ten Dünya'ya yalnızca ışık tayfının görünür kısmında olan ışınlar değil aynı zamanda kızılötesi ve morötesi kısmında olan ışınlar da ulaşır. Bu ışınların bazıları atmosfer tarafından uzaya geri yansıtılır ancak büyük bir kısmı yeryüzüne ulaşır.
- Yeryüzündeki bitkiler kısa dalga boylu yani yüksek enerjili ışığı fotosentezde kullanarak besin ve oksijen üretir. Bu sürecin sonunda bitkiler ve bitkilerle beslenen hayvanlar tarafından çevreye yayılan ısı ise uzun dalga boylu yani düşük enerjili ışıktır.
- Atmosferdeki gazlar yeryüzünden uzaya yayılan uzun dalga boylu ışığı önce soğurur daha sonra tekrar yayar. Sera gazları olarak adlandırılan bu gazlar tarafından yayılan ışık herhangi bir yönde olabilir. Dolayısıyla sera gazları Dünya'dan uzaya yayılan ısıнын (kızılötesi ışığın) bir kısmını geri yansıtarak Dünya'nın ısınmasına neden olur. Bu olaya **sera etkisi** denir.
- Sera gazlarının bazıları şunlardır: su (H_2O), karbondioksit (CO_2), metan (CH_4) ve ozon (O_3). Bu gazların sera etkisine katkıları ise yaklaşık şu şekildedir: su %36-70, karbondioksit %9-26, metan %4-9, ozon %3-7.



SERA ETKİSİ, KÜRESEL ISINMA VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

- Dünya'nın ortalama sıcaklığı yaklaşık 14°C 'dir. Ancak eğer Dünya'nın atmosferi olmasaydı ortalama sıcaklık -18°C civarında olurdu. Yani sera gazları Dünya'nın yaklaşık 32°C daha sıcak olmasını sağlar.
- Ancak sera gazlarındaki aşırı artış çok fazla enerji birikmesine ve böylece hassa dengenin bozulmasına neden olmaktadır. Sera etkisinin arzu edilmeyen bu sonucuna küresel ısınma denir.



Ortalama bir araç her yıl kendi ağırlığının üzerinde bir miktarda CO_2 üretmektedir

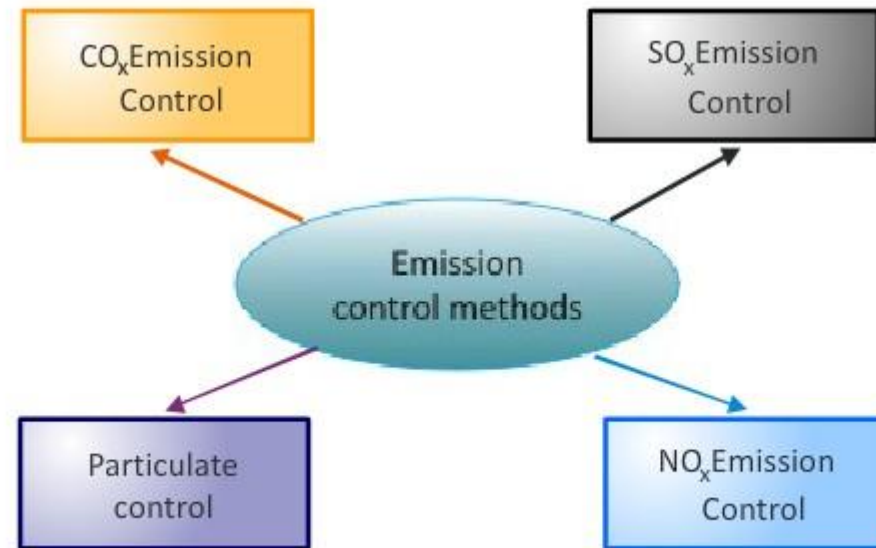


Rüzgar gibi **yenilenebilir enerji** sera gazları ve kirlenici madde bırakmadığından "**yeşil enerji**" olarak adlandırılır.

EMİSYON AZALTMA YÖNTEMLERİ

Emission Control Methods

- Best method of reducing emission is to avoid using excess fuel.
- Public awareness must be initiated to avoid unwanted burning of fuels.
- Eco-friendly combustion devices have to be designed and developed.
- Cost effective methods can be devised to treat the combustion products before allowing them to the atmosphere.



EMİSYON AZALTMA YÖNTEMLERİ

- Benzin motorlu araçlarda katalitik konvertör kullanımı ile , tam olarak yanmamış **CO**, **NO_x**, **CH** gibi zararlı gazlar, reaksiyona girerek **CO₂**, **N₂**, **O₂**, **H₂O** meydana getirirler. İkinci yanma işlemi motor dışında gerçekleştiğinden bundan işe dönüştürülebilir enerji elde edilmez.
- Burada CO oksijen ile yanar ve zehirsiz CO₂'e dönüşür. CH oksijen ile yanar ve CO₂ + Su haline dönüşür. NO den oksijen ayrılarak N₂ ve CO₂ oluşur.
- Yanma prosesi, kademeli gerçekleştirilerek, yanmamış hidrokarbonların da yanması sağlanır. Böylece CO ve UHC emisyonları azaltılmış olur .
- CO azaltmanın diğer bir yolu da hava fazlalık katsayısını biraz daha yüksek tutmaktır.

CO AZALTMA

Emission Control Methods

CO_x Emission control

Under what circumstances CO is formed?

CO is formed where fuel-air mixture is burnt under rich or lean condition.

How CO is formed at fuel lean condition?

CO is formed due to dissociation of CO₂ particularly at high temperature

Why CO is formed under fuel rich condition?

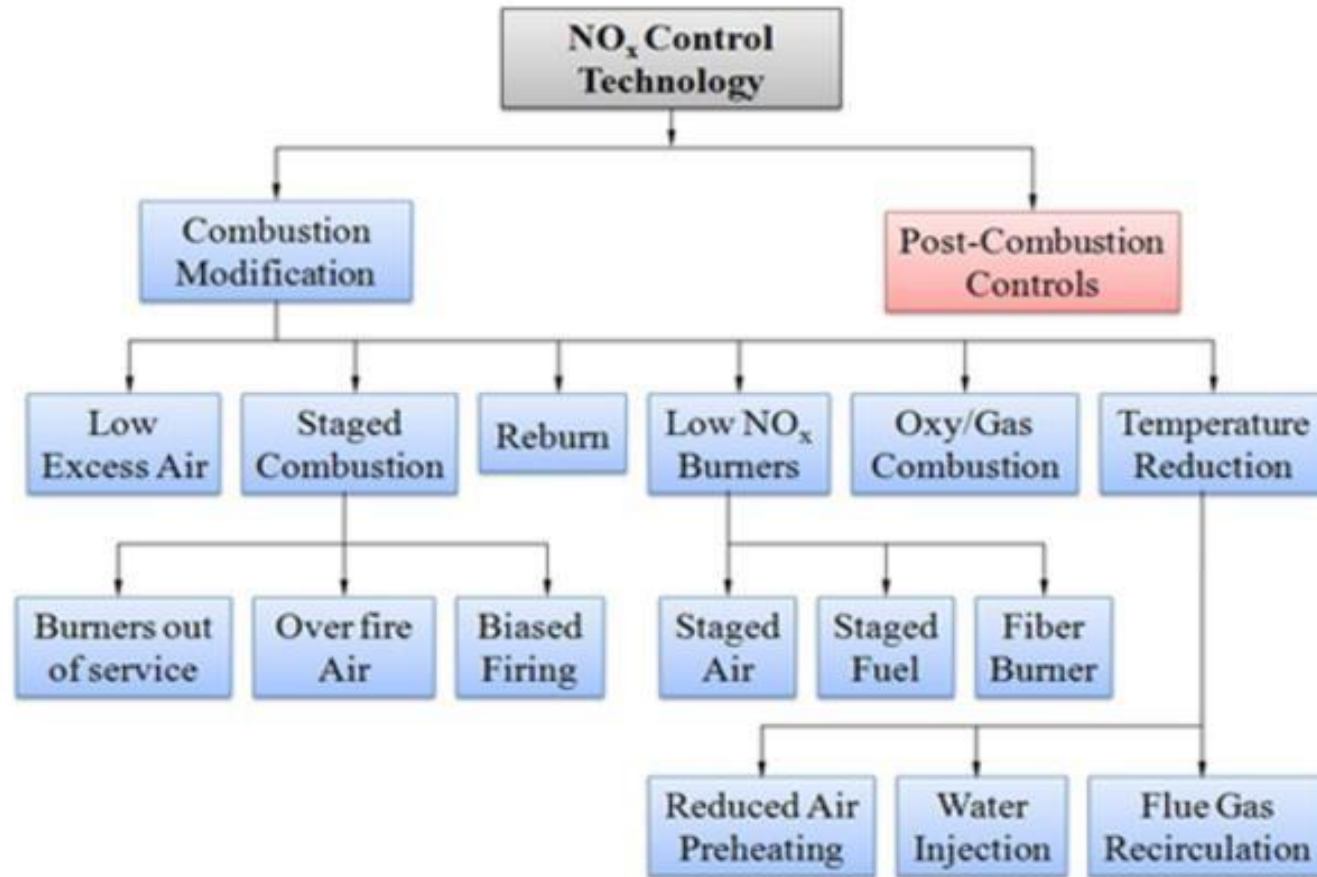
Due to insufficient quantity of oxygen.

What are the ways to reduce CO emission?

- i. Recirculation of flue gases,
- ii. CO capture using membranes.

NO_x

NO_x Control Technologies



NO_x

Low excess air

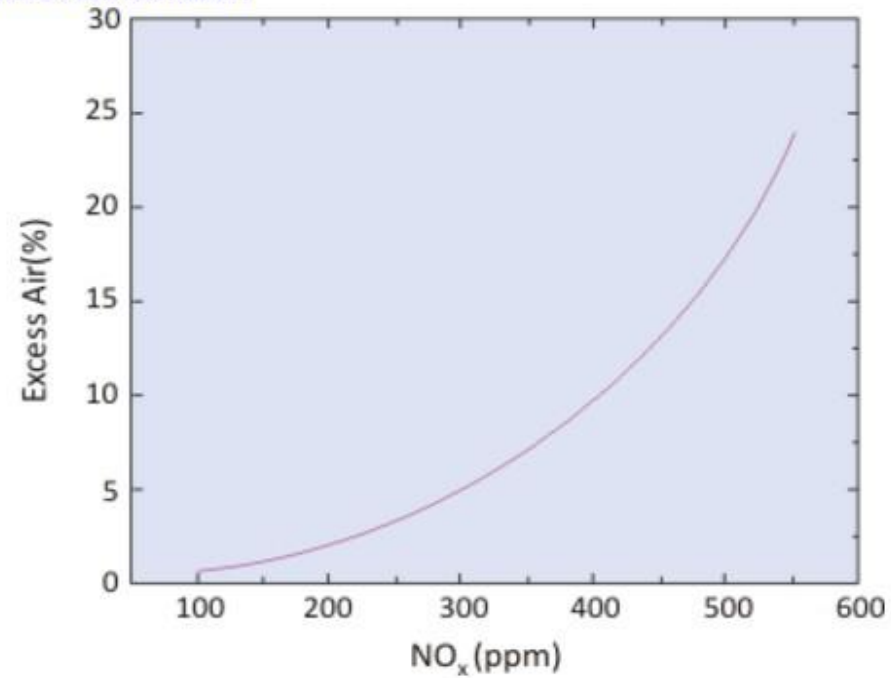
Boilers and furnaces are operated with excess air – why?

To ensure the fuel is burnt completely.

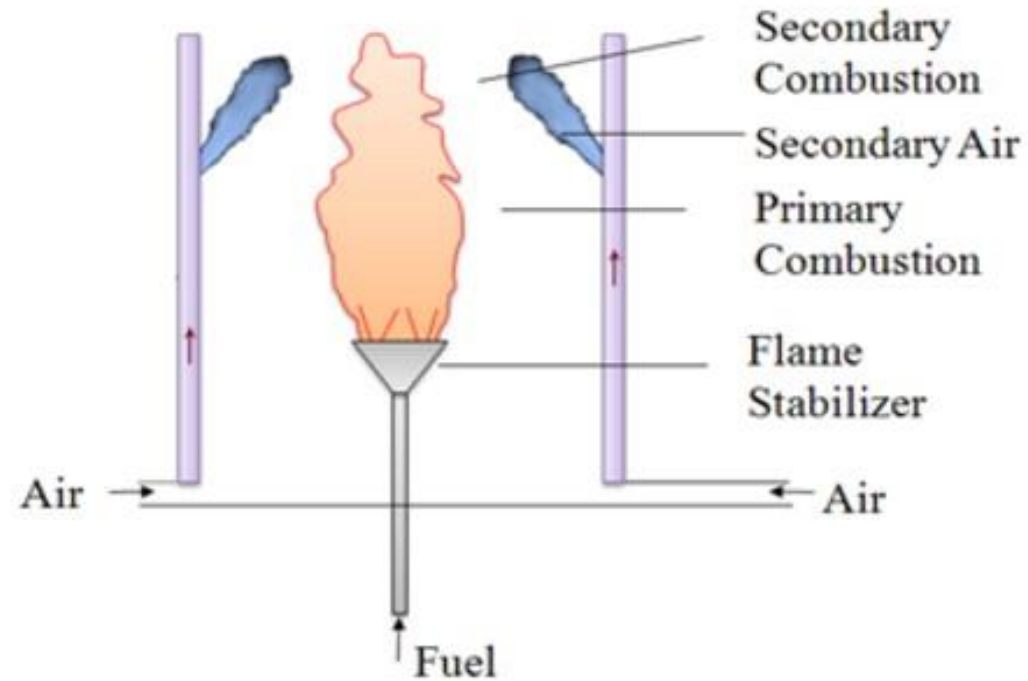
Less CO formation.

Is operating with excess air always advantageous?

No! It leads to more NO_x formation



Staged Combustion



(Figure 40.4)

- Most effective method to control NO_x formation.
- Upstream burner operates in fuel rich mode.
- Additional air is added in the downstream for burning of fuel in stages.
- NO_x emissions can be reduced by 10 to 40%.

Flame Cooling

Thermal NO can be controlled by reducing the temperature.

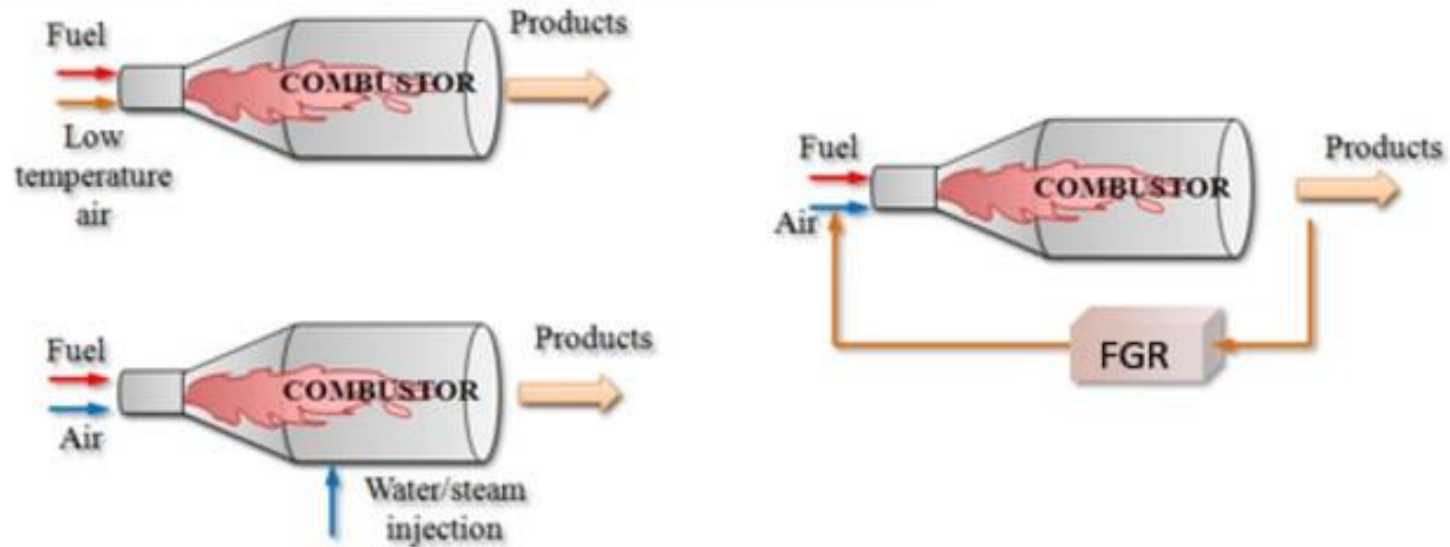
How to achieve temperature reduction?

- i. Reducing air preheating,
- ii. Water/steam injection,
- iii. EGR

These three methods reduce the peak temperatures.

May lead to the formation of CO.

10 to 15% reduction in NO can be achieved by these methods



Particulate Controls

How the particulates are formed?

Particulates are formed due to oxidation of inorganic materials in the fuel.

What are the sources of the particulate matter?

Coal and biomass combustion will result in particulate emissions.

Combustion of low grade oil also generated particulate matters.

These particulates are generally less than 10 micron size.

How to remove these particulate matters?

Long bag house filter or an electrostatic precipitator can be used to remove it.

First charge the particles in the flue gas.

These charged particles are made to attach to the walls by passing through strong electric field.

The particles are subsequently removed by shaking devices.

Cyclone and hydro-cyclone separators are also employed to remove particulates.

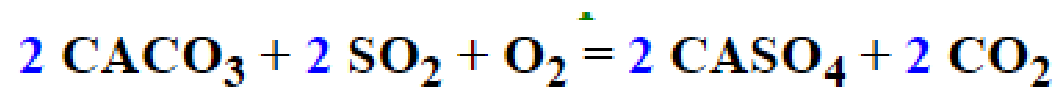
EMİSYON AZALTMA YÖNTEMLERİ

CO₂ gazı tüm yanma işlemlerinde oluştuğu ve küresel ısınmaya neden olduğu için, enerji üretim ve tüketiminin her aşamasında uygulanacak verimlilik çalışmaları bu sera gazını azaltacaktır:

- Yalıtım,
- Atık ısının değerlendirilmesi,
- Yakma havasının ön ısıtmaya tabi tutulması,
- Günlük hayatta kullanılan elektrikli ev aletlerinin daha verimli olanlarının seçilmesi,
- Düşük yakıt tüketimli araçların tercih edilmesi vb.

SO_x

- Kükürtoksitler; bilindiği gibi katı yakıtların yakılması sonucunda açığa çıkarlar. Bu nedenle, kükürt oranı düşük olan kömürler kullanılmalıdır.
- Kükürt oranı yüksek kömür kullanılıyorsa (örneğin linyit), kömüre bir miktar katkı maddesi eklenmelidir. Bu katkı maddesi genellikle kireç taşı (CaCO₃) olup kireçtaşının kükürtü tutma özelliğinden dolayı baca gazlarında kükürtoksit oluşumu azaltılmaktadır.



- Yanma sonucu oluşan kükürtoksit absorplanarak da tutulabilir.



İLERİ YANMA VE MODELLEME

✓ MODELLEME

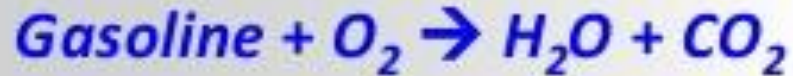


PROF.DR.MUSTAFA İLBAŞ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ABD

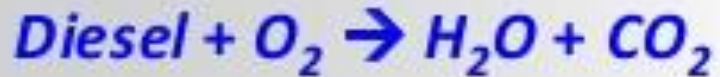
MODELLEM'EYE GİRİŞ

Reacting flows are all around us!

Did you drive to work?



OR



Ahh, but I have an electric car!

- Battery
 - Electro-chemical reaction $\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + e$
- Charging
 - ~85% of world-wide electricity generation is from combustion



KAPSAM

- Basic definitions and concepts
- Gas mixtures
- Reacting gas mixtures
- Types of flames and related phenomenon
- Solid and liquid burning and other reactions
- Role of turbulence in reacting flows
- Reacting flow modeling

TEMEL TANIMLAR

- Chemical reaction
 - A process involving changes in the structure and energy content of atoms, molecules, or ions
- Exothermic reaction
 - Chemical reaction that releases energy in the form of light or heat
- Endothermic reaction
 - Chemical reaction that absorbs energy from its surroundings
- Basic types of reaction

Synthesis reaction



Single replacement reaction



Decomposition reaction



Double replacement reaction



TEMEL TANIMLAR

- **Combustion reaction**
 - Sequence of exothermic chemical reactions between a fuel and an oxidizer accompanied by the production of heat and conversion of chemical species
 - Combustion dominated flows form main part of reacting flows
- **Stoichiometry**
 - Amount of oxidizer needed to completely burn a given quantity of fuel
 - $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
- **Stoichiometric fuel-air ratio**
 - Ratio of mass of fuel to the mass of air at stoichiometry
- **Excess air**
 - Fraction of air (oxidizer) supplied in excess of stoichiometric requirement
- **Equivalence ratio (ϕ)**
 - Ratio of actual fuel-air ratio to stoichiometric fuel-air ratio
 - $\phi > 1 \rightarrow$ Rich mixture in fuel; $\phi < 1 \rightarrow$ lean mixture in fuel

GAZ KARIŞIMLARI

- Mole fraction (X_i)
 - Fraction of total number of moles of a given species in a mixture
 - $X_i = \frac{N_i}{N_{Tot}}$
- Mass fraction (Y_i)
 - Fraction of mass of a given species in a mixture, $Y_i = \frac{m_i}{m_{Tot}}$
- Relation between Y_i and X_i
 - $Y_i = X_i \frac{Mw_i}{Mw_{Mix}}$
- Mixture molecular weight
 - $Mw_{Mix} = \sum_i X_i Mw_i = \left(\sum_i \frac{Y_i}{Mw_i} \right)^{-1}$

REAKSIYONA GİREN GAZ KARIŞIMLARI

Reactants
(Stoichiometric
mixture at standard
condition)



Products
(Complete combustion
at standard condition)

Heat removed = Heat of reaction (H_r)

$$H_r = \sum \Delta h^f_{prod} - \sum \Delta h^f_{react}$$

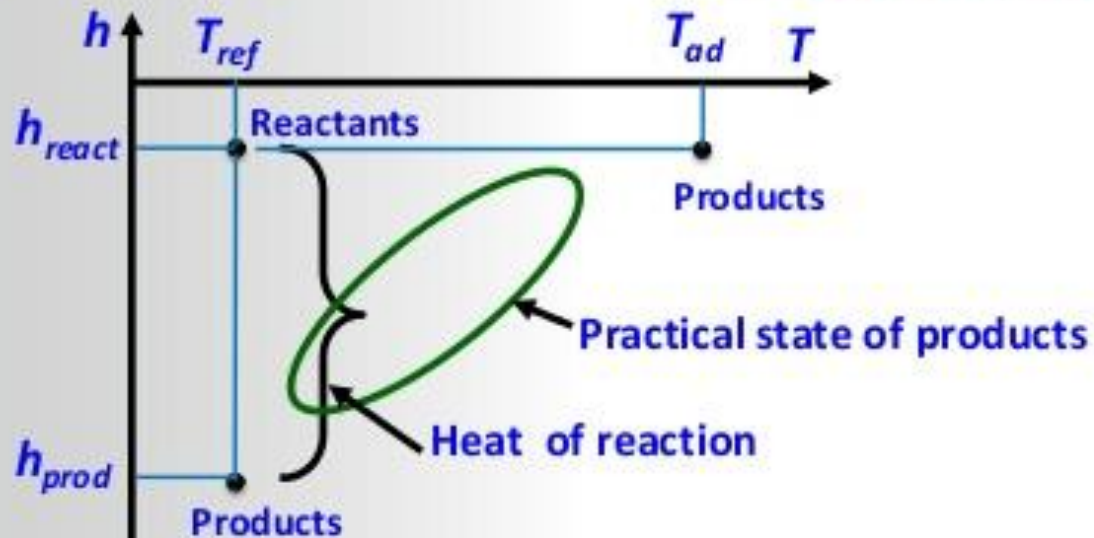
Heat removed = 0

Reactants
(Stoichiometric
mixture at standard
condition)



Products at temp, T
(Complete combustion)

$T = T_{ad}$ (Adiabatic flame temp)

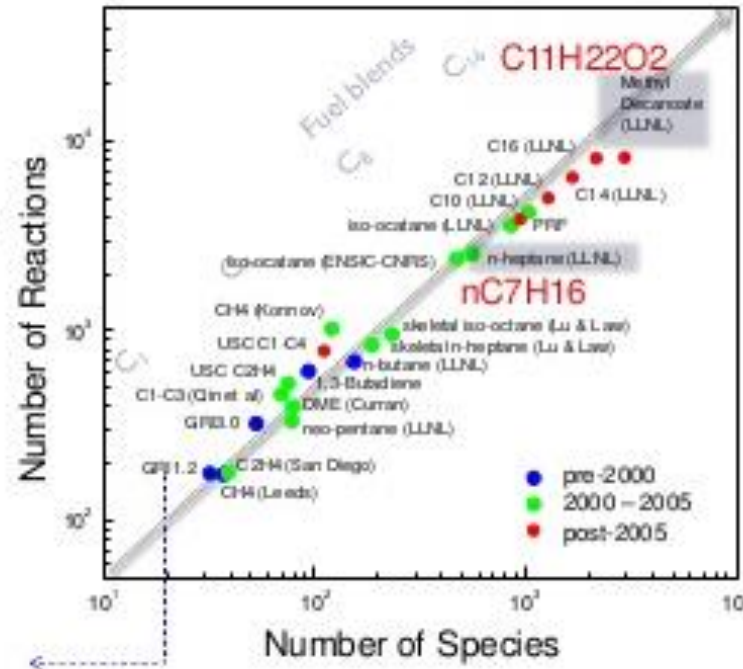


GENEL REAKSIYON

- Overall reaction where fuel and oxidizer reacts to form product
 - $Fuel + a Ox \rightarrow b Prod$
- Fuel consumption rate: $\frac{d[C_f]}{dt} = -k(T)[C_f]^m[C_{ox}]^n$
 - $C_i \rightarrow$ Molar concentrations (kmol/m³); $i = f$ or ox
 - $K(T) \rightarrow$ Rate constant; Strong function of temperature
 - m and $n \rightarrow$ Reaction order; Not necessarily integers for global reactions
- In reality, many reactions involving many intermediate species take place to form products
 - Individual reactions are called elementary reactions
 - Some elementary reactions may produce some intermediate species
 - Some elementary reactions may involve free radicals like O, OH, H, etc.
 - Collection of elementary reactions is called reaction mechanism

REAKSIYON MEKANİZMASI

- Tens of species and hundreds of reactions
- Each species participate in a series of reaction steps
 - Produced in some steps and destroyed in some other steps
- Chain reactions
 - Produce radical species
 - For global reaction: $A_2 + B_2 \rightarrow 2AB$
 - **Chain initiation:** Starts forming radicals
 - **Chain propagation:** Forming other radicals
 - **Chain branching:** Forming two radicals
 - **Chain termination:** Forming products



ARRHENIUS REACTION RATE

- Reaction rate for elementary reactions is derived from molecular collision theory
- Elementary reaction: $A + B \rightarrow C + D$
 - Reaction rate, $R = k(T) T^{\beta} [C_A][C_B]$
 - Rate coefficient, $k(T) = A \exp\left(\frac{-E_a}{R_u T}\right)$
 - $A \rightarrow$ Pre exponential factor
 - $E_a \rightarrow$ Activation energy
- This form of reaction rate is called Arrhenius form
 - Originally proposed by **Jacobus Henricus van 't Hoff**
 - **Svante Arrhenius** provided the physical justification and interpretation
 - Term T^{β} is added later by other researchers



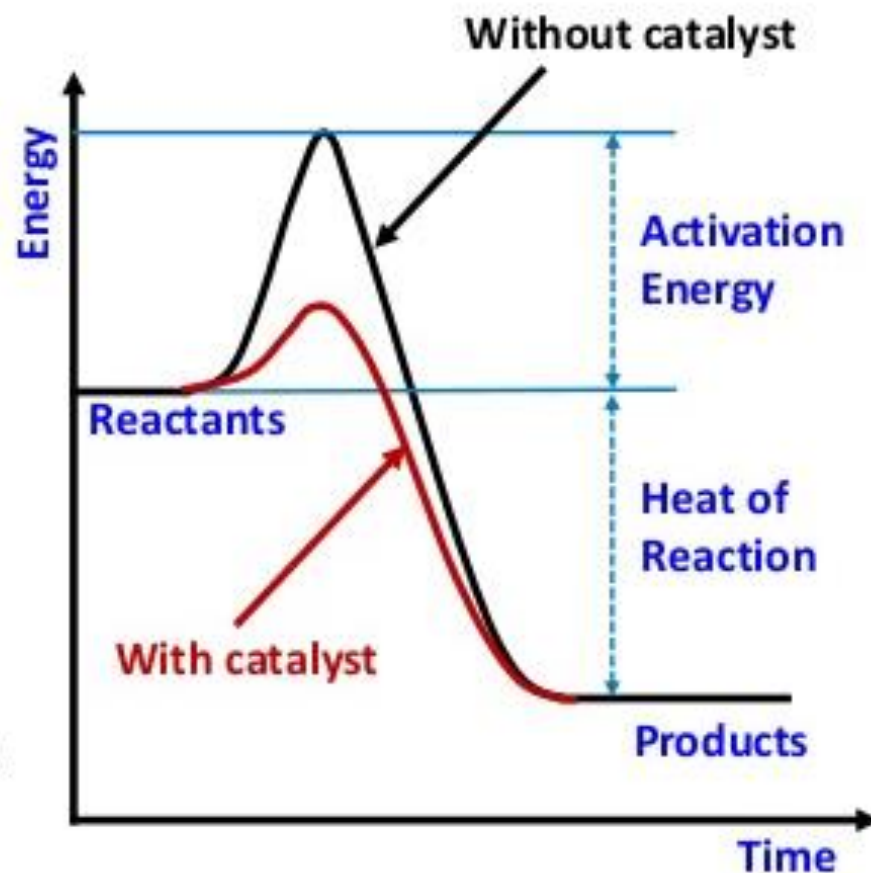
Jacobus Henricus van 't Hoff



Svante Arrhenius

ACTIVATION ENERGY

- Reaction will take place when the kinetic energy of the colliding molecules is larger than a threshold energy
- This threshold energy is called Activation energy
- Effect of catalyst
 - Catalyst is not consumed in reactions
 - Increases the frequency of successful collisions
 - Changes the relative orientation of the reactant molecules
 - Reduces the intra-molecular bonding within the reactant molecules
 - Provides an alternate pathway



NELERİ MODELLEYEBİLİRİZ?

- **Engines:** Gas-turbines, IC, ...
- **Burners:** Furnaces, Boilers, Gasifiers, ...
- **Safety:** Fires, Explosions, Dispersion, ...
- **Surface chemistry:** Catalysis, CVD, ...
- **Materials:** Synthesis, Polymerization, ...
- and many more...

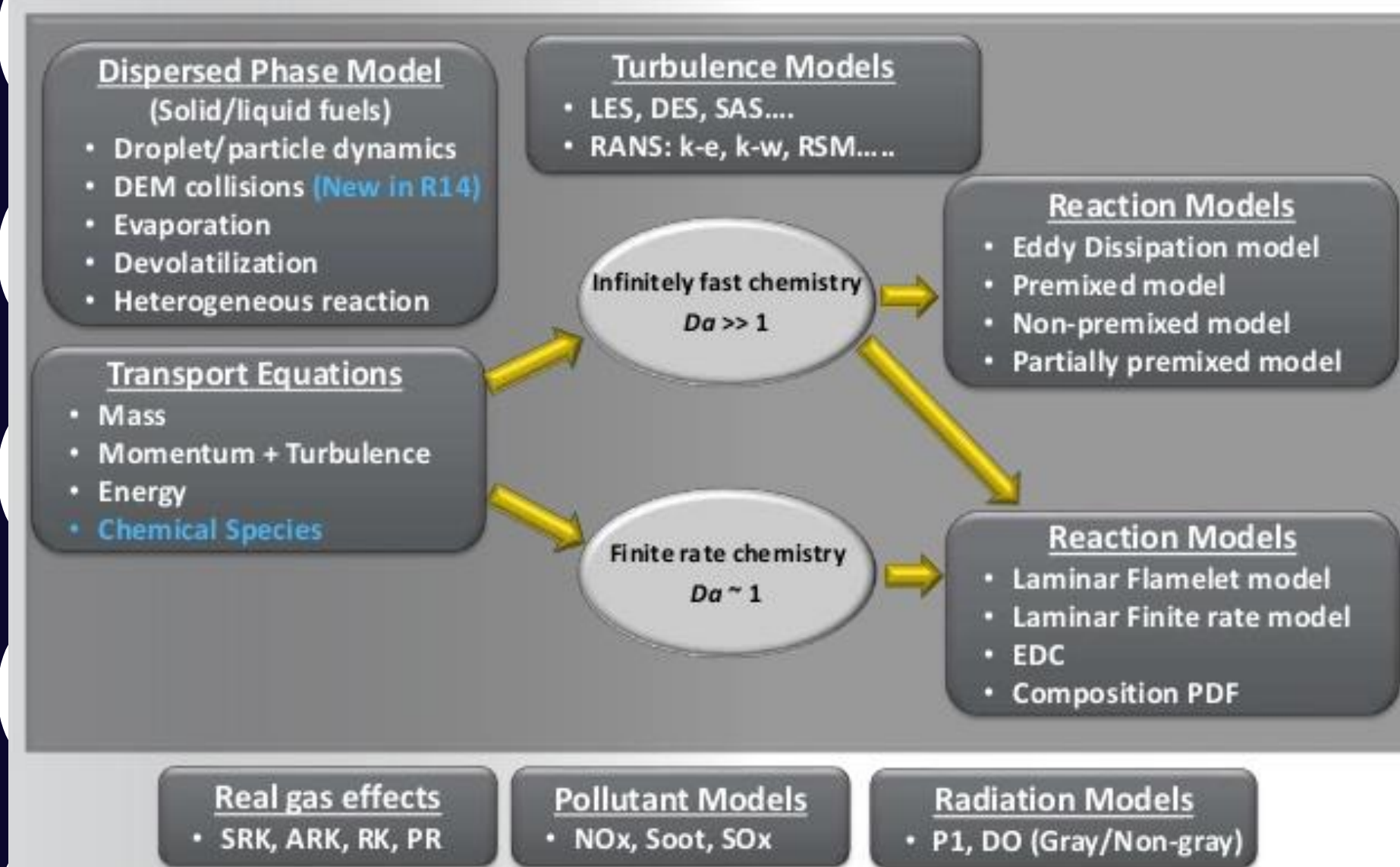


YANMADA AKIŞLARI NEDEN MODELLİYORUZ?

- Devices are very complex
 - Complex geometry, complex BCs, complex physics (turbulence, multi-phase, chemistry, radiation,...), complex systems, ...
- Tool to gain insight and understanding
- Reduce expensive experiments
- Eventually design!



YANMANIN MODELLEMESİ



CFD SİMÜLASYONLARI

Computational fluid dynamics :-

Computational fluid dynamics, usually abbreviated as **CFD**, is a branch of **fluid mechanics** that uses numerical methods and algorithms to solve and analyze problems that involve **fluid flows**.

CFD process Consists of Three Primary Steps

Pre-Processing

This is the first step of CFD simulation process which helps in describing the geometry in the best possible manner.

Solver

fluid & material properties, flow physics model, and boundary conditions are applied with the help of solver by using a computer.

Post-Processing

The final step is to analyze the results with different methods like contour plots, vector plot, streamlines, data curve etc.,

Advantages of cfd

1. It provides the flexibility to change design parameters without the expense of hardware changes.
2. It has a faster turnaround time than experiments.
3. It guides the engineer to the root of problems, and is therefore well suited for trouble-shooting.
4. It provides comprehensive information about a flow field, especially in regions where measurements are either difficult or impossible to obtain.

❖ CFD is one of the branches of fluid mechanics that uses numerical methods and algorithms to solve and analyze problems that involve fluid flows.

❖ Computer are used to perform the millions of calculations required to simulate the interaction of fluid and gases with the complex surfaces used in engineering.

❖ However, even with simplified equations and by using high speed super computers, only approximate solutions can be achieved in many cases.

❖ More accurate codes that can accurately and quickly simulate even complex scenarios such as supersonic or turbulent flows are an on going area of research.

REAKSIYON MEKANİZMALARI

a-) Detailed Mechanisms

- Hundreds of species
- From hundreds to thousands of reactions
- As much as fundamental information
 - Necessary reactions and species likely to occur
 - Rate parameters of elementary reactions
 - Thermodynamic data

b-) Skeletal Mechanisms (Simplified Mechanism)

- Less numbers of species
- Less numbers of reactions
- Similar results without loss of information

c-) Reduced Mechanisms (Simplified Mechanism)

MEKANİZMALARI BASİTLEŞTİRME TEKNİKLERİ

Mechanism simplification techniques can be classified in to two categories:

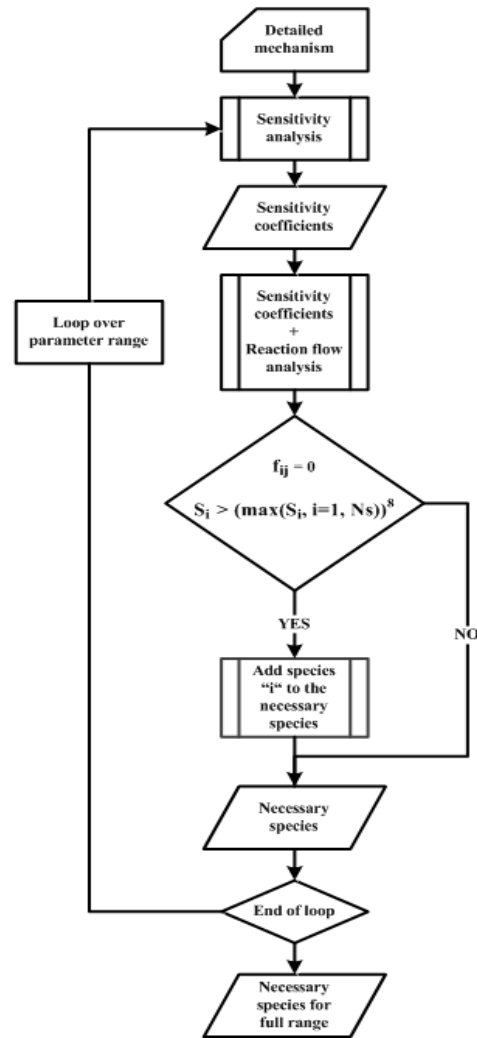
1-) Skeletal Reduction Techniques

- Sensitivity Analysis
- Reaction Flow Analysis
- Necessity Analysis
- Directed Relation Graph (DRG)
- DRGEP, DRGSA, DRGASAEP

2-) Lifetime Analysis

- Computational Singular Perturbation (CSP)
- Intrinsic Low Dimensional Manifolds (ILDM)

Necessity Analysis with Simultaneously Combined Sensitivity and Reaction Flow Analyses



Flow chart of the calculation procedure of necessity analysis method

Necessity Analysis with Simultaneously Combined Sensitivity and Reaction Flow Analyses

- Sensitivity analysis

$$\frac{dc_i}{dt} = F_i(c_1, \dots, c_s; k_1, \dots, k_R)$$

$$i = 1, 2, \dots, S$$

$$c_i(t = t_0) = c_i^0$$

$$S_{A,j} = \sum_{k=1}^{N_R} \left| \frac{d[A]}{dr_k} \frac{v'_{kj}}{c_j} r_k \right|$$

- Reaction flow analysis

$$f_{ij}^a = \frac{\sum_{k=1}^{N_R} r_k v'_{jk} v'_{ik} \frac{n_j^a}{\Delta n_k^a}}{\sum_{k=1}^{N_R} r_k v'_{ik}}$$

$$c_{ij}^a = \frac{\sum_{k=1}^{N_R} r_k v'_{jk} v'_{ik} \frac{n_j^a}{\Delta n_k^a}}{\sum_{k=1}^{N_R} r_k v'_{ik}}$$

$$\Delta n_k^a = \sum_{i=1}^{N_s} v'_{ik} n_k^a$$

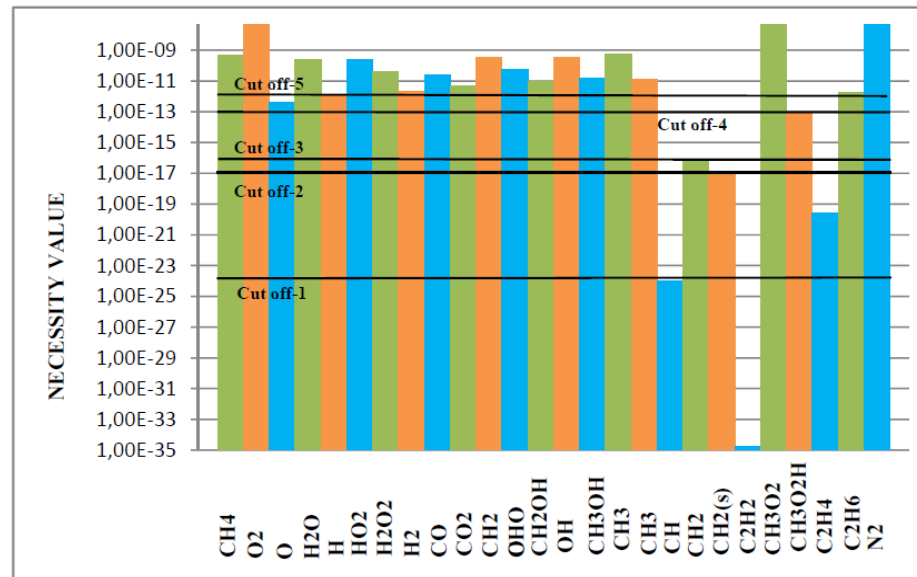
Necessity Analysis with Simultaneously Combined Sensitivity and Reaction Flow Analyses

$$f_{ij} = \sum_{a=1}^{N_a} \left(\sum_{k=1}^{N_R} \left| r_k v'_{jk} v''_{ik} \frac{n_j^a}{\Delta n_k^a} [S_{(i,k)} + S_{(j,k)}] \right| + \sum_{k=1}^{N_R} \left| r_k v''_{jk} v'_{ik} \frac{n_j^a}{\Delta n_k^a} [S_{(i,k)} + S_{(j,k)}] \right| \right)$$

$$c_{ij} = \sum_{a=1}^{N_a} \left(\sum_{k=1}^{N_R} \left| r_k v'_{jk} v''_{ik} \frac{n_j^a}{\Delta n_k^a} [S_{(i,k)} + S_{(j,k)}] \right| + \sum_{k=1}^{N_R} \left| r_k v''_{jk} v'_{ik} \frac{n_j^a}{\Delta n_k^a} [S_{(i,k)} + S_{(j,k)}] \right| \right)$$

$$N_i = \max(f_{ij}, c_{ij})$$

- Implementing cutoff levels and obtaining skeletal mechanisms:



BİR UYGULAMA

➤ Results of the DETCHEM^{BATCH} code simulation

Initial parameters of batch simulation for C/O=2.0

Parameter	Value	Parameter	Value
Volume (m ³)	2.83 E-06	Pressure (Pa)	101325
Diameter (m)	0.019	Temperature (K)	998.26
Radius (m)	9.50 E-03	C/O	2.0
Length (m)	1.00 E-02	Simulation Time (s)	4.2 E02
Area (m ²)	2.83 E-04		

Initial parameters of batch simulation for C/O=0.8

Parameter	Value	Parameter	Value
Volume (m ³)	2.83 E-06	Pressure (Pa)	101325
Diameter (m)	0.019	Temperature (K)	1374.85
Radius (m)	9.50 E-03	C/O	0.8
Length (m)	1.00 E-02	Simulation Time (s)	4.2 E-02
Area (m ²)	2.83 E-04		

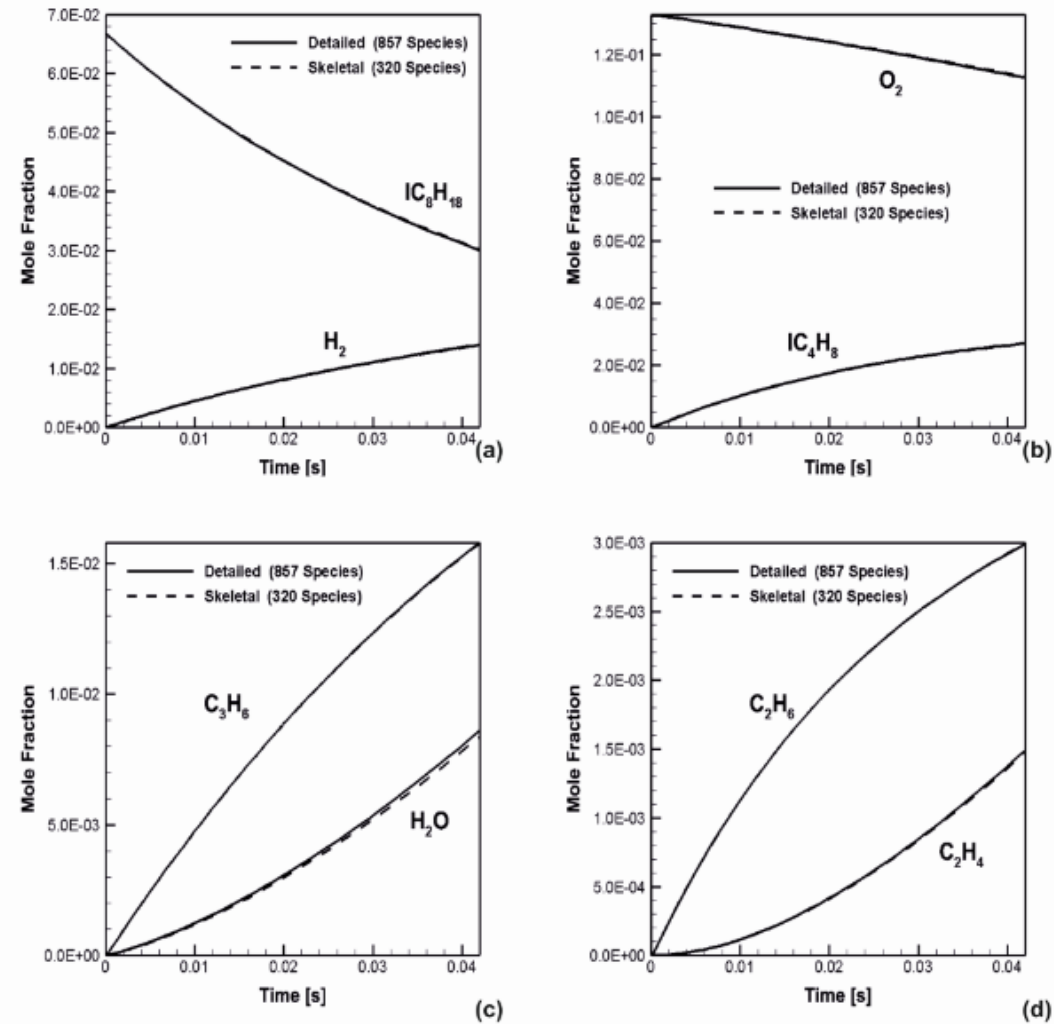
Initial mole fractions for

Species	Mole Fraction	Species	Mole Fraction
IC ₈ H ₁₈	6.67E-02	N ₂	8.00E-01
O ₂	1.33E-01		

Initial mole fractions for

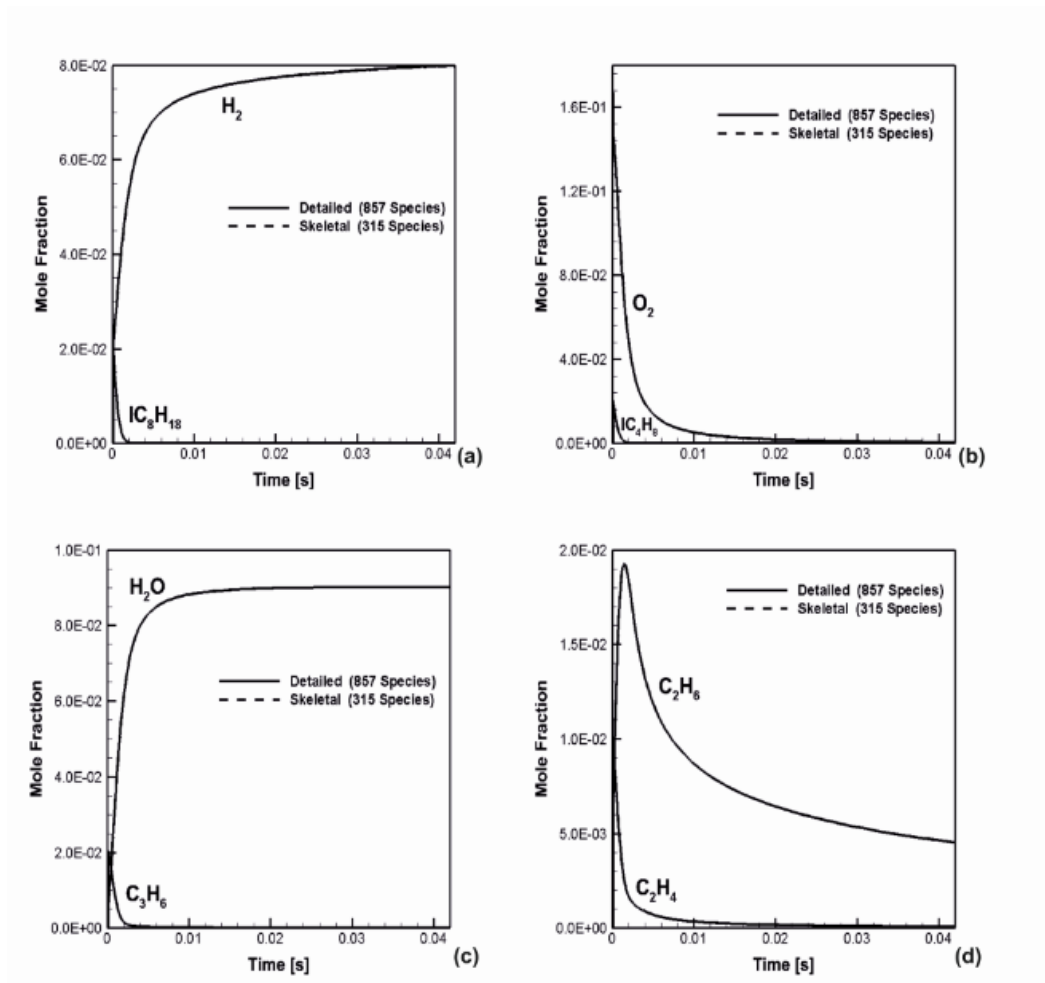
Species	Mole Fraction	Species	Mole Fraction
IC ₈ H ₁₈	3.33E-02	N ₂	8.00E-01
O ₂	1.67E-01		

Results



Numerically predicted species distribution in CPOX of i-octane as a function of time in the batch reactor: C/O=2.0, 998.26 K: (a) IC_8H_{18} and H_2 . (b) O_2 and IC_4H_8 . (c) C_3H_6 and H_2O . (d) C_2H_6 and C_2H_4 .

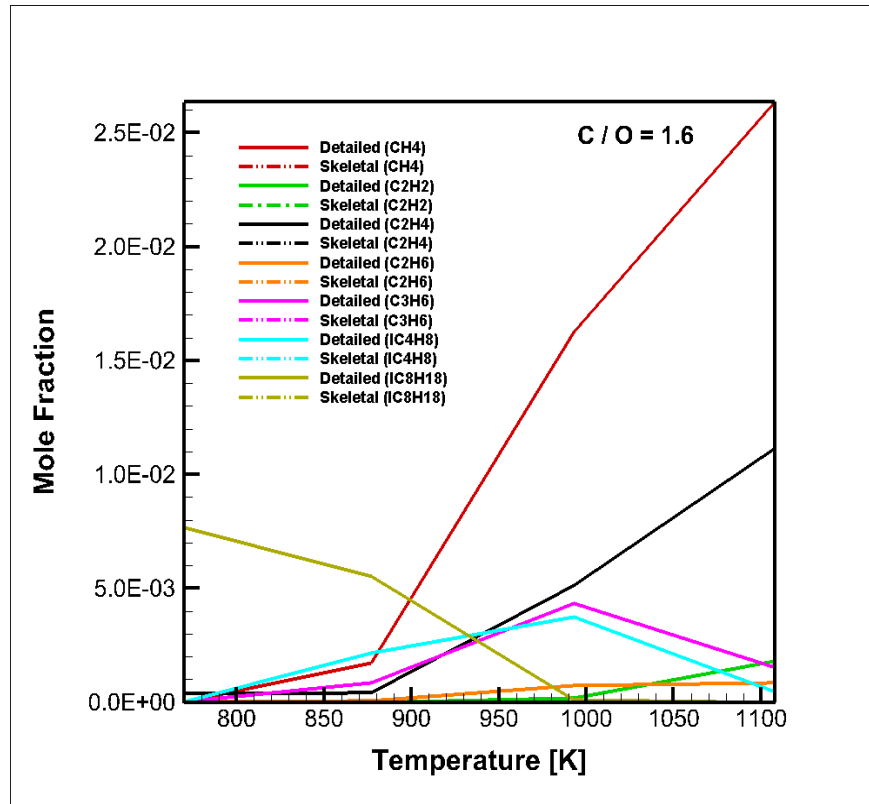
Results



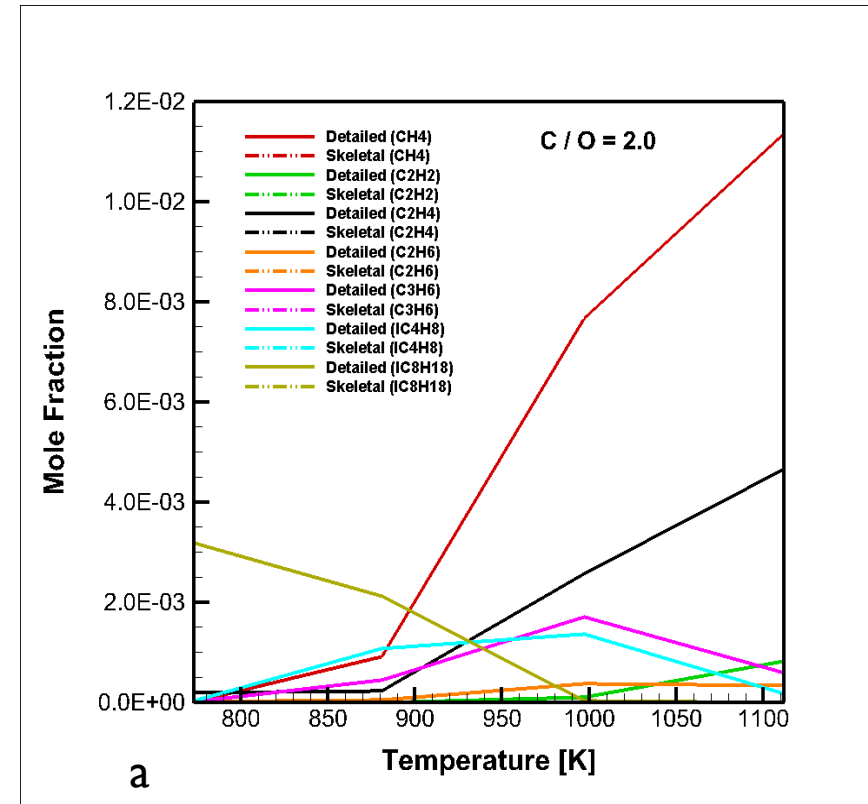
Numerically predicted species distribution in CPOX of i-octane as a function of time in the batch reactor:

C/O=0.8, 1374.85 K: (a) IC_8H_{18} and H_2 . (b) O_2 and IC_4H_8 . (c) C_3H_6 and H_2O . (d) C_2H_6 and C_2H_4 .

Results



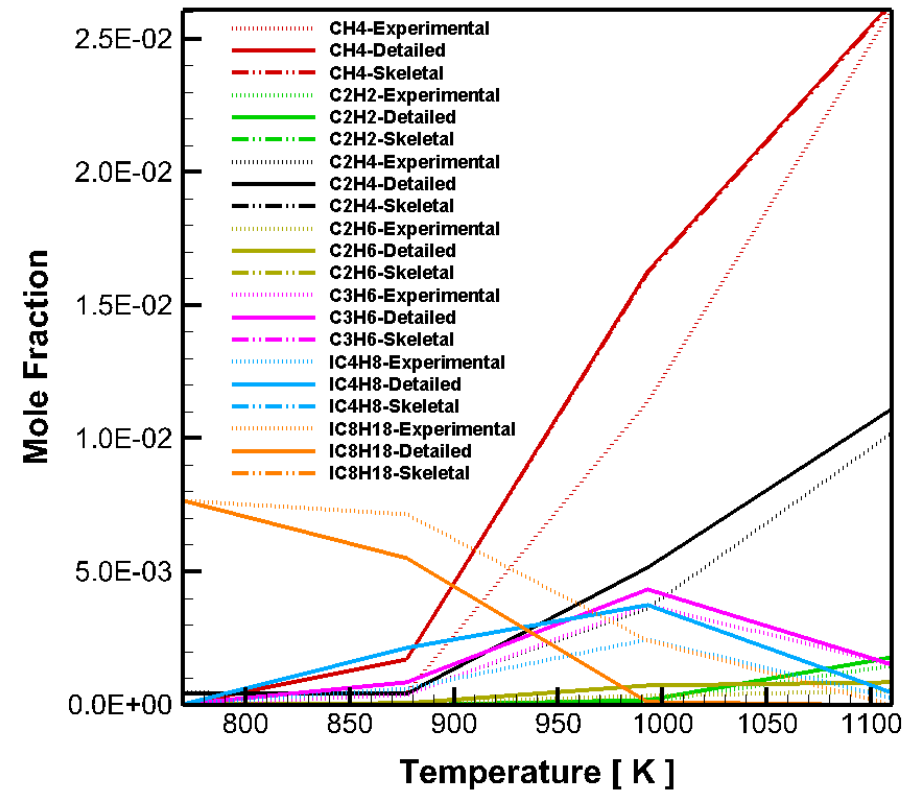
b



a

- a) Numerically predicted distribution of some important species as a function of gas temperature at one exact position in the channel (20 mm) for (a) $C/O = 1.6$ and (b) $C/O = 2.0$

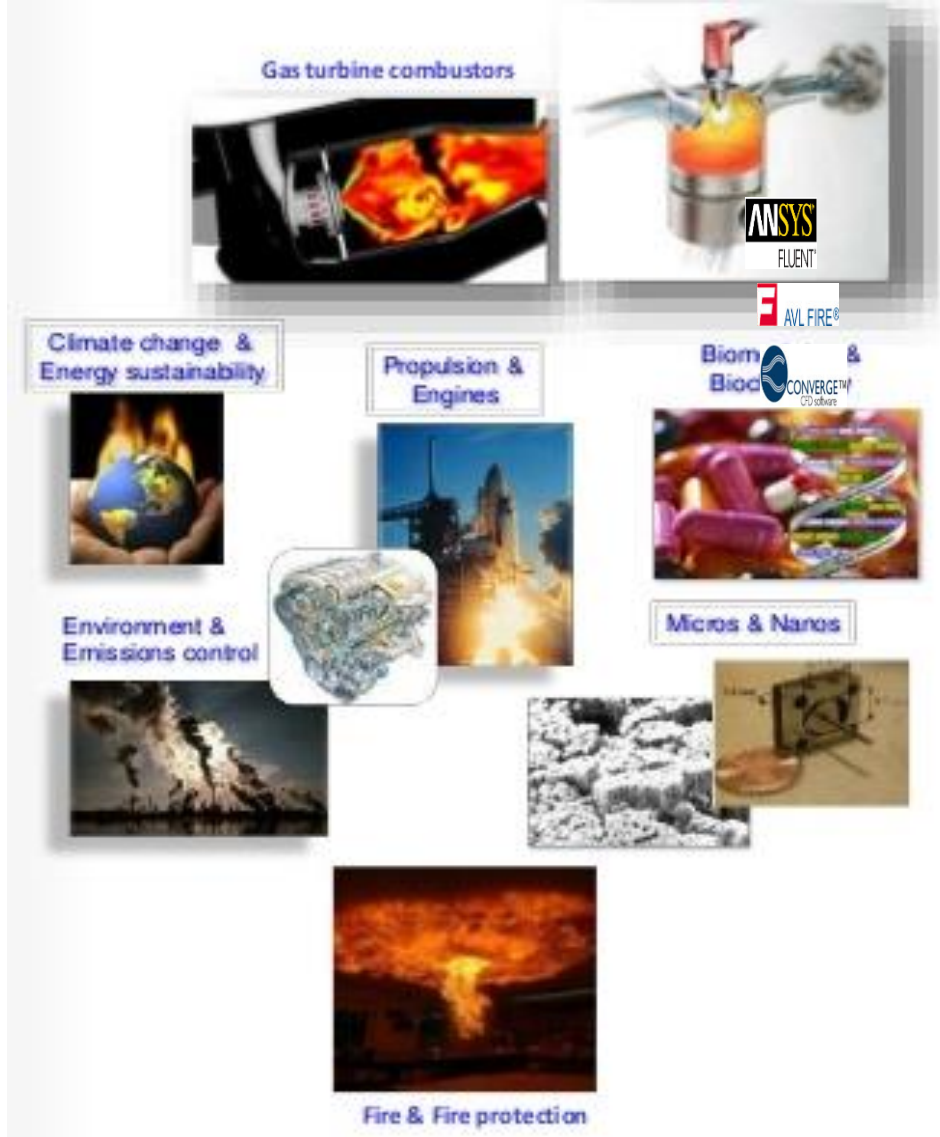
Results



Numerically predicted and experimentally measured distribution of some important species as a function of gas temperature at one exact position in the channel (20 mm): C/O=1.6

Experimental results: Kaltschmitt, T., Maier, L., Hartmann, M., Hauck, C., Deutschmann, O., Influence of gas phase reactions on catalytic reforming of isooctane. Proceedings of the Combustion Institute 2011. 33:3177-83

NELERİ MODELLEYEBİLİRİZ?



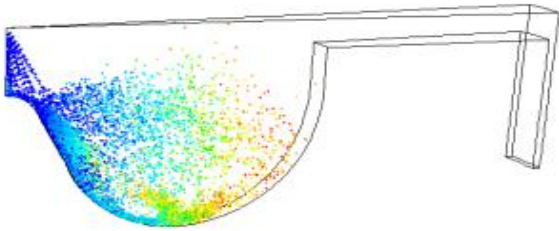
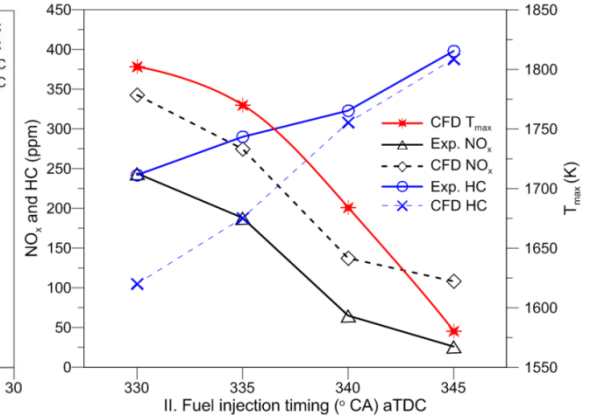
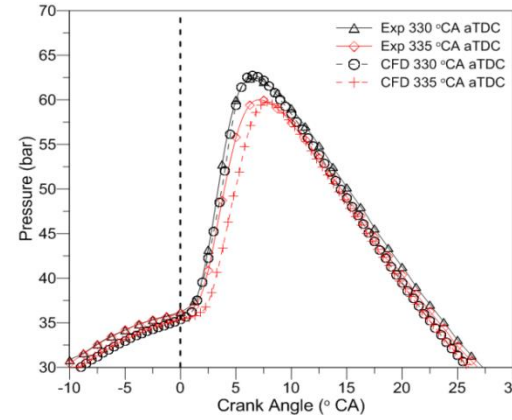
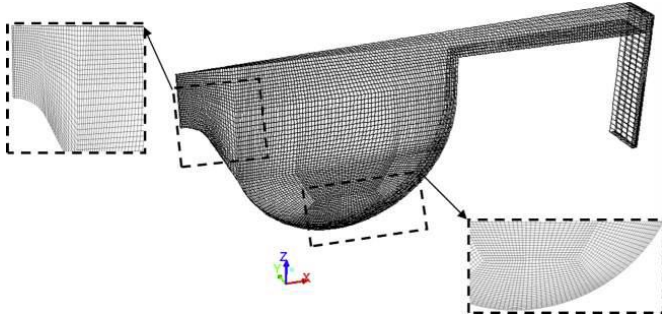
TİCARİ YAZILIMLAR

- CFD
 - Ansys
 - AVL Fire
 - Converge
- Stochastic Reactor Modelling (SRM)
- Chemkin + CFD
- Fire Dynamics Simulator (FDS) / PyroSim

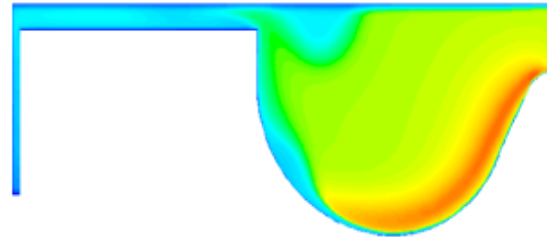


SİMÜLASYONLAR

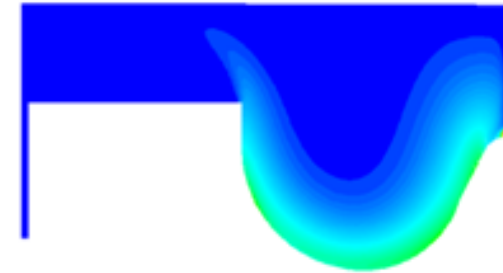
- HCCI MOTORLAR: ÇOK BOYUTLU (CFD)



Yakıt partikülleri



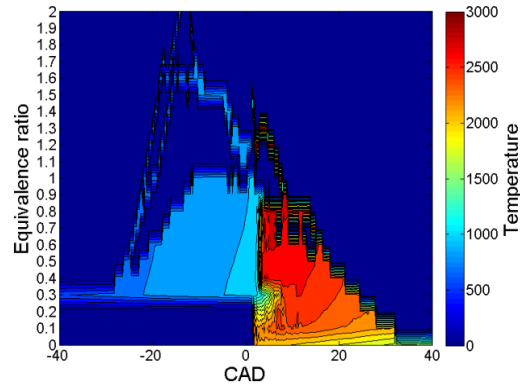
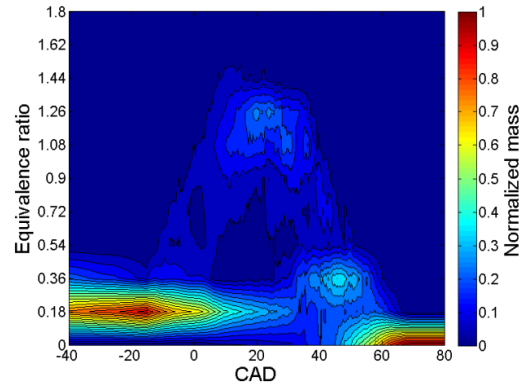
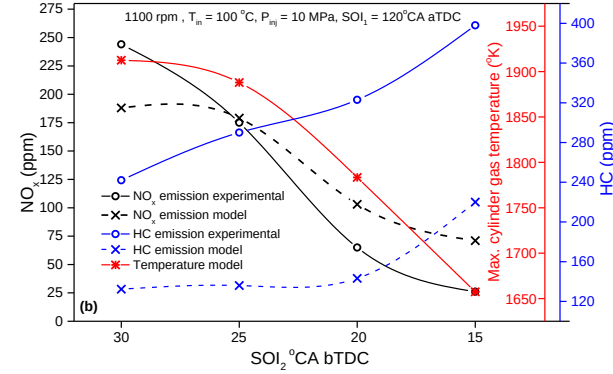
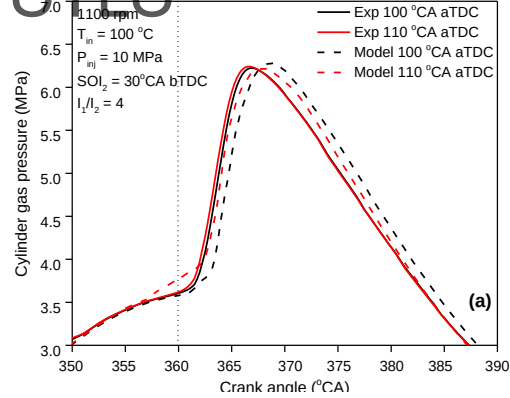
Silindir içi sıcaklık değişimi



NOx emisyonu oluşumu

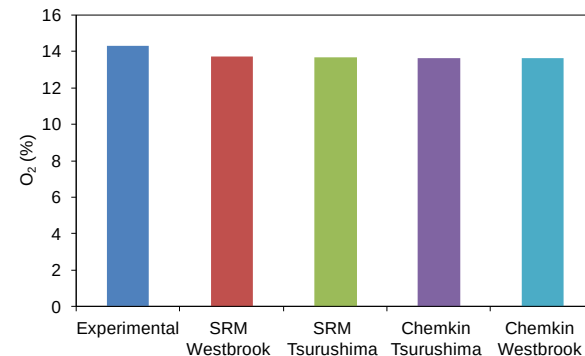
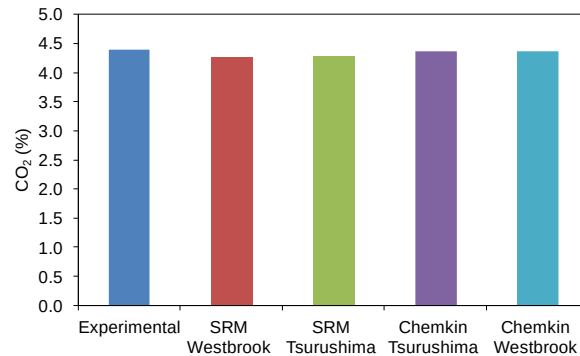
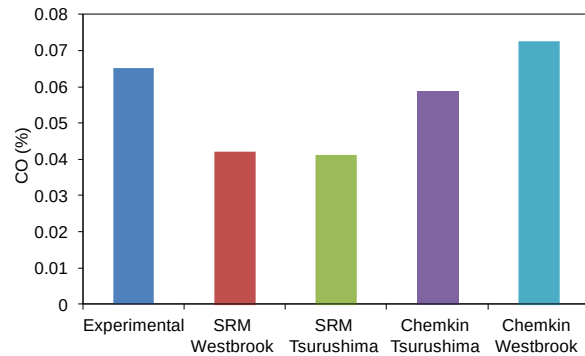
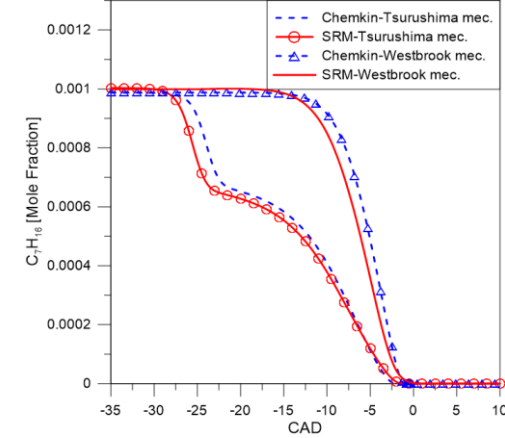
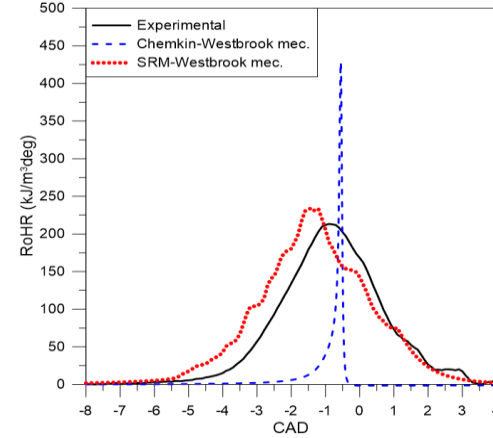
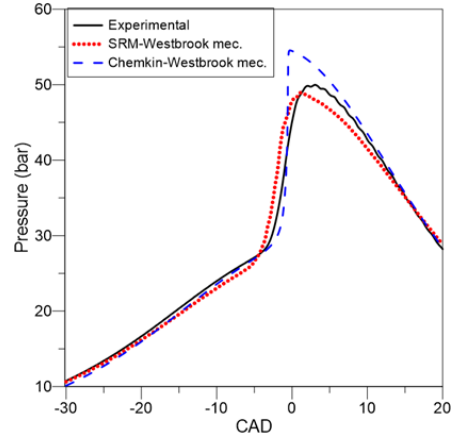
SİMÜLASYONLAR

- SRM: 0 BOYUTLU



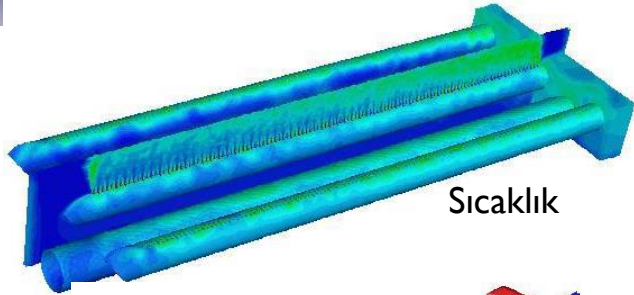
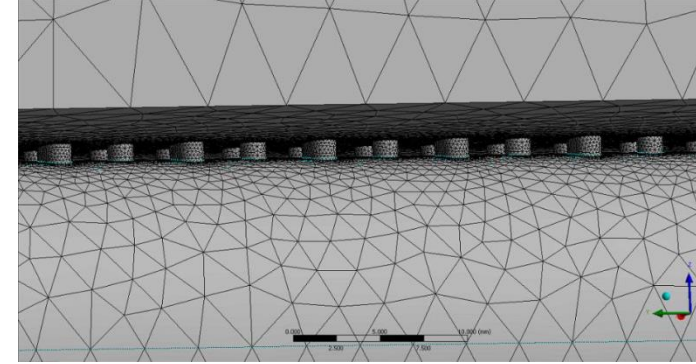
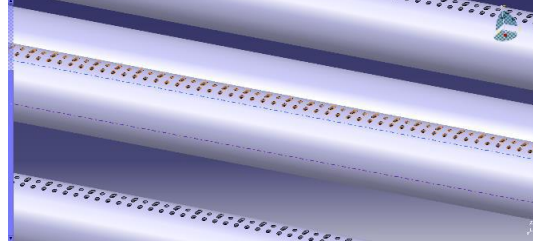
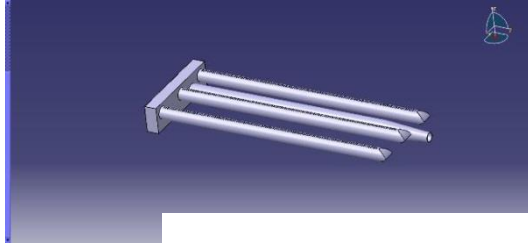
Eküvalans oranı dağılımının (solda) ve sıcaklığın (sağda) normalize edilmiş stokastik partiküllere (reknlendirilmiş) göre değişimi

YAZILIM KARŞILAŞTIRMALARI

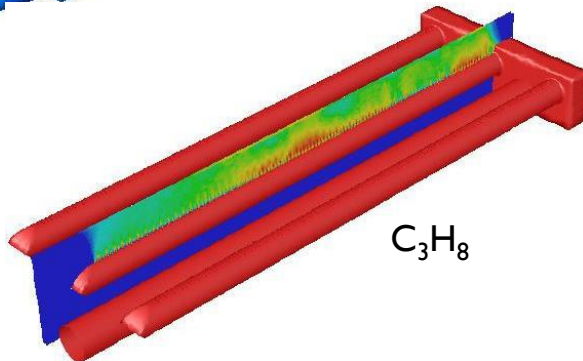


YANMA SİMÜLASYONLARI UYGULAMALARI

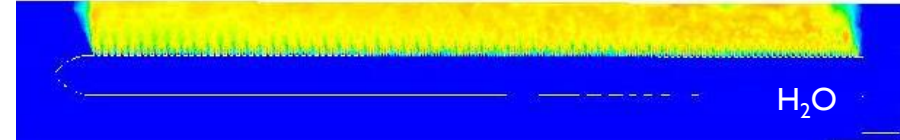
- BRÜLÖRLER



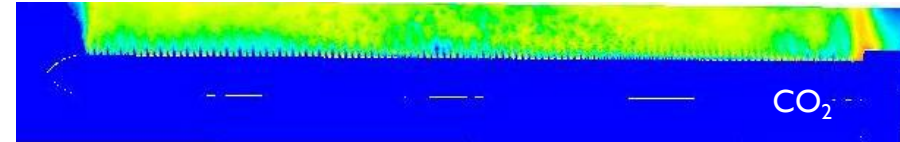
Sıcaklık



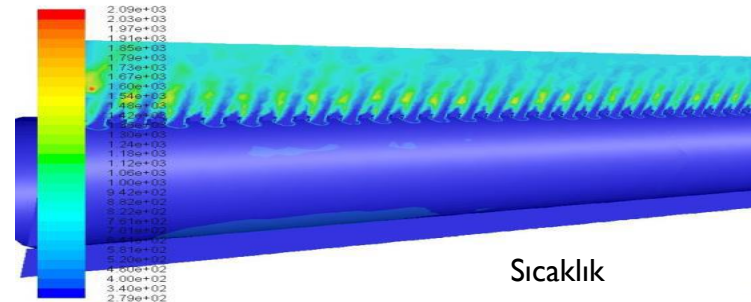
C_3H_8



H_2O



CO_2



Sıcaklık

YANGIN SİMÜLASYONLARI

FDS VE PYROSİM

