



# Mühendislik Fakültesi

## Kimya Mühendisliği Bölümü

***KMB 245-Enerji Teknolojileri***

***Dr. Öğr. Üyesi, İsa DEĞİRMENCI***

# Yakıt Pilleri



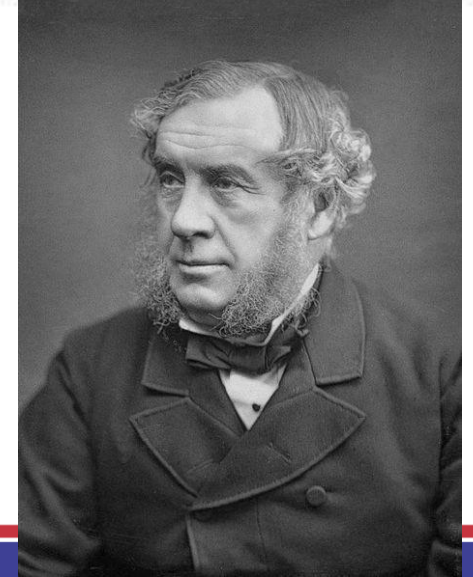
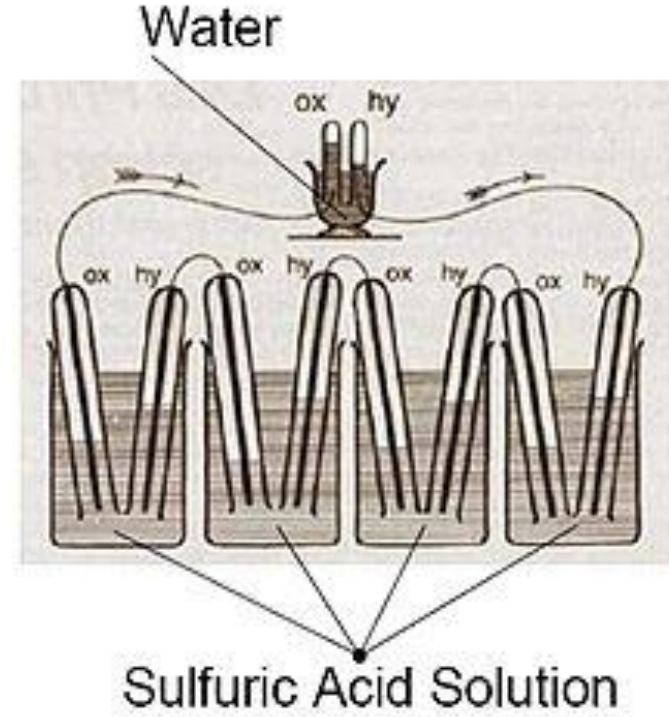
# Tarihçesi

1839 da William R. Grove tarafından gerçekleştirilmiştir. Enerji/kütle oranı düşük olduğundan ilgilenilmemiştir.

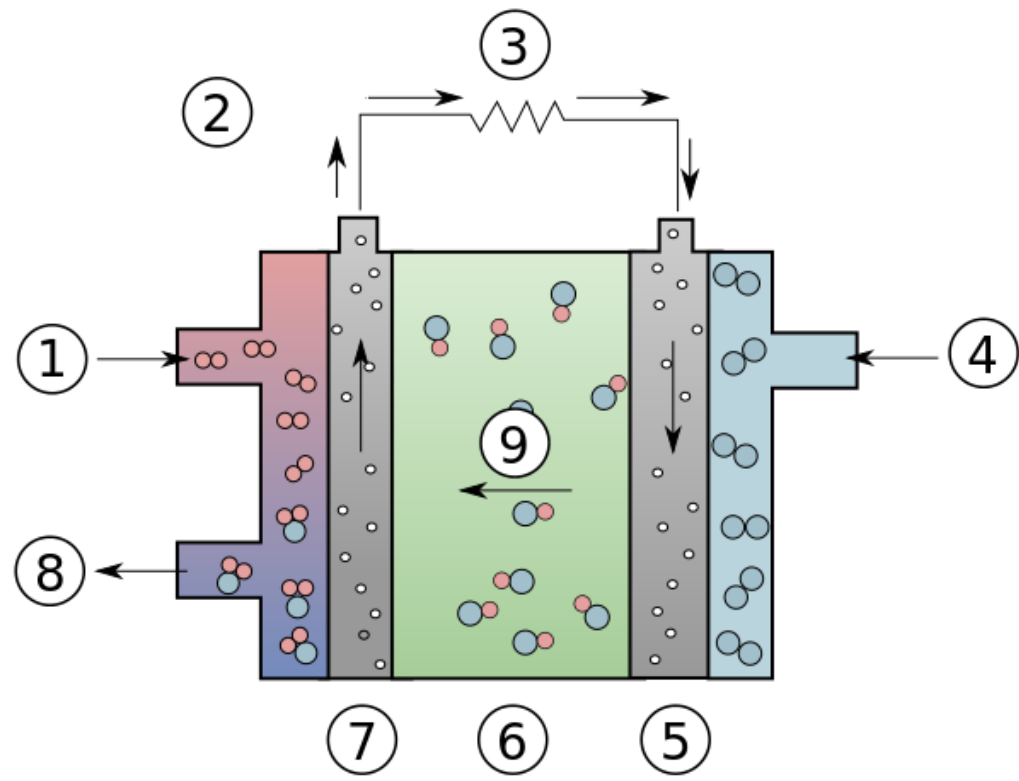
$H_2$  ve  $O_2$ 'i birleştirerek elektrik enerjisi üreten ilk kişidir.

Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için öncelikli olarak buharın  $H_2$  ve  $O_2$ 'e ayrıştırılması gerektiğini göstermiştir (elektroliz).

Günümüzde kullanılan fosforik asit yakıt hücrelerinin çalışma prensibi hemen hemen aynıdır.



İlk başarılı çalışma 1932  
de Thomas Bacon  
tarafından  
gerçekleştirilmiş.  
5kW'lık bir modülü  
çalıştırdı.  
Bu modülü uzay  
çalışmalarında kullanıldı.



### Alkaline Yakıt Hücresi

- |                                  |                   |
|----------------------------------|-------------------|
| 1: Hidrojen $H_2$                | 2: Elektron akışı |
| 3: Direnç                        | 4: Oksijen $O_2$  |
| 5: Katot                         | 6: Elektrolit     |
| 7: Anot                          | 8: $H_2O$         |
| 9: Hidroksil iyonları ( $OH^-$ ) |                   |

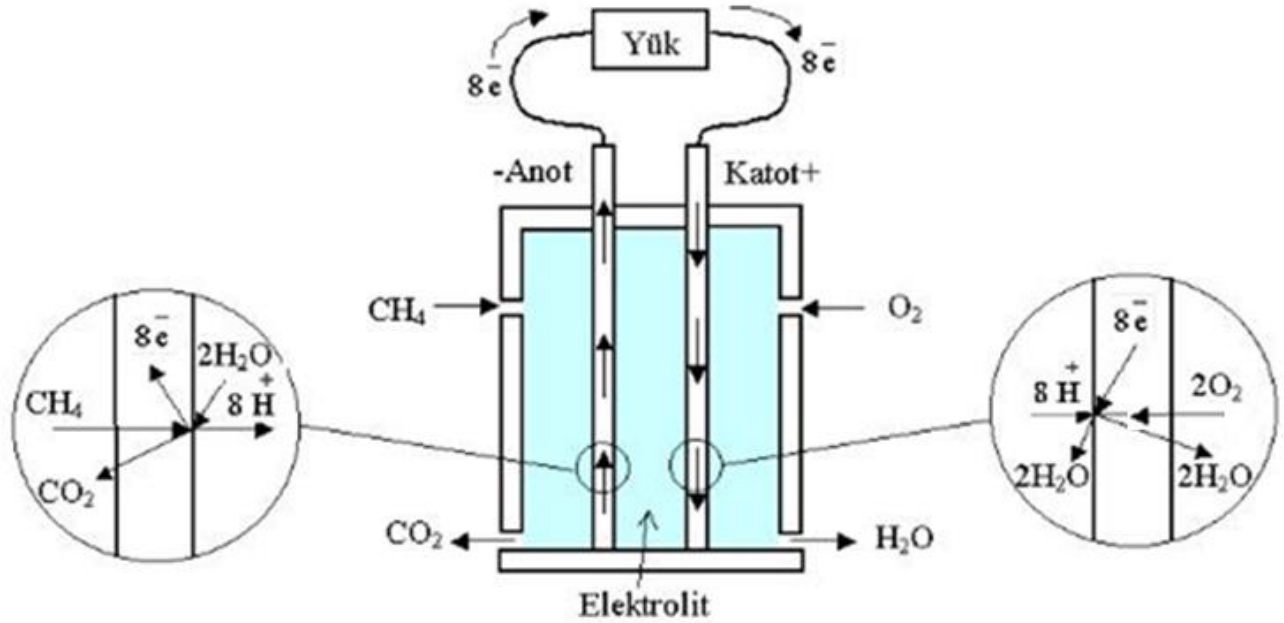
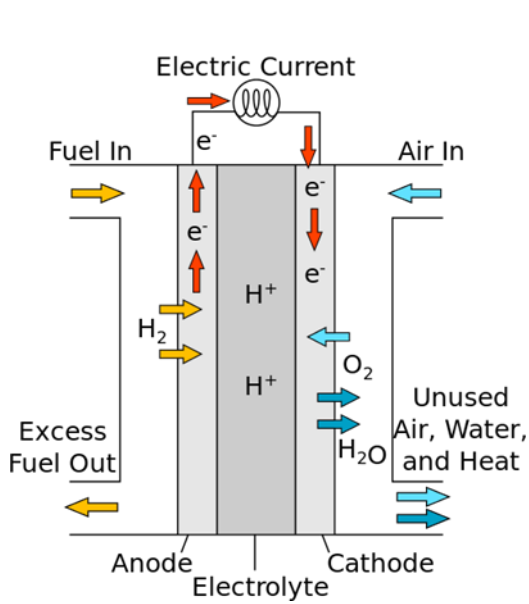


- **Yakıt Pili:** Herhangi bir yakıtın kimyasal enerjisini, bir elektro-kimyasal süreç aracılığıyla, doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren aparatlardır.
- Yakıt pillerinin enerji dönüştürme verimleri, diğer enerji dönüştürme biçimlerine oranla çok daha yüksektir.

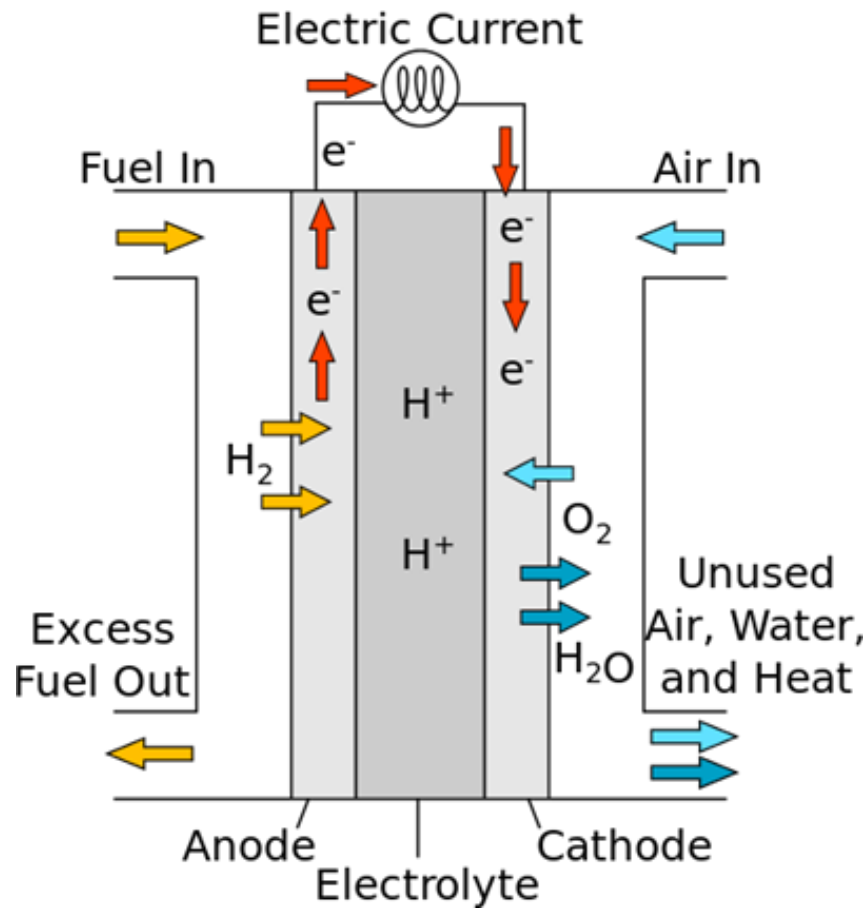
# Çalışma prensibi

- Elektrik enerjisi, elektrotlardan birine verilen gaz yada sıvı yakıt ile öbür elektrota verilen oksijen veya hava arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkar.
- **Anotta yükseltgenme** meydana gelir.
- **Katotta indirgenme** meydana gelir.
- Bu işlem esnasında elektrotlarda, elektrolitte, katalizörde değişim olmaz.
- Diğer pillerde etkin maddeler kimyasal tepkime verip bir süre sonra tükenirken, yakıt pillerinde sürekli yakıt takviyesi mümkün olduğundan harcanma olmaz.





- Anoda gelen yakıt, anot üzerinde H<sup>+</sup> iyonu ayırır.
- H<sup>+</sup> iyonu önce elektrolite geçer. Sonra da elektrolitten katoda ulaşırlar.
- Bu esnada elektronlar da, bir elektrik devresi üzerinden motora gönderilirler.
- Katotta H<sup>+</sup> iyonu oksijen ile birleşip su buharı oluşturur.
- Kullanılan yakıta bağlı olarak farklı yan ürünler de elde edilebilir.



**Anod:**  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$  ( $E^0 = 0,00 \text{ V}$ )

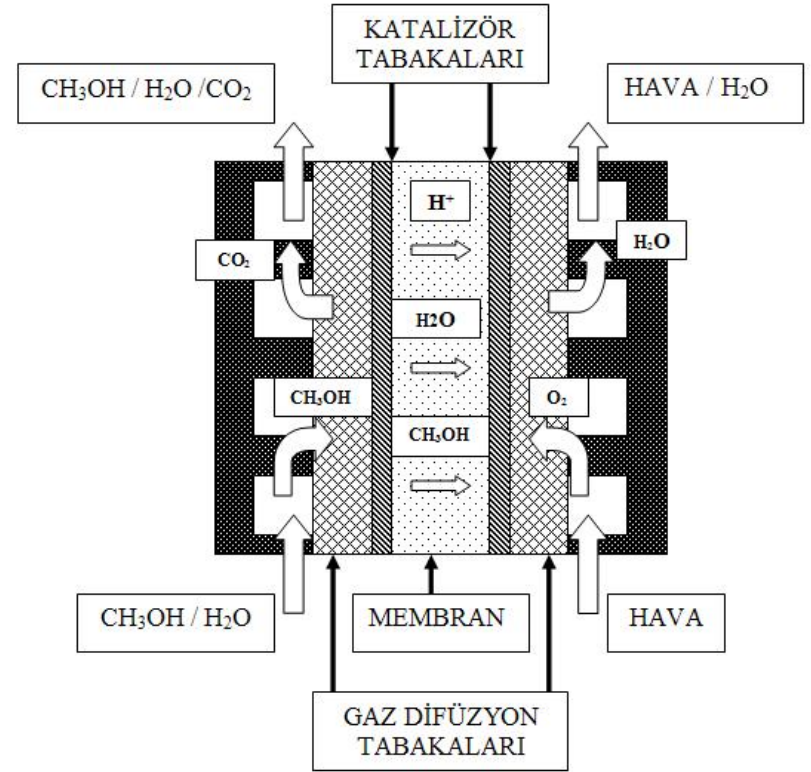
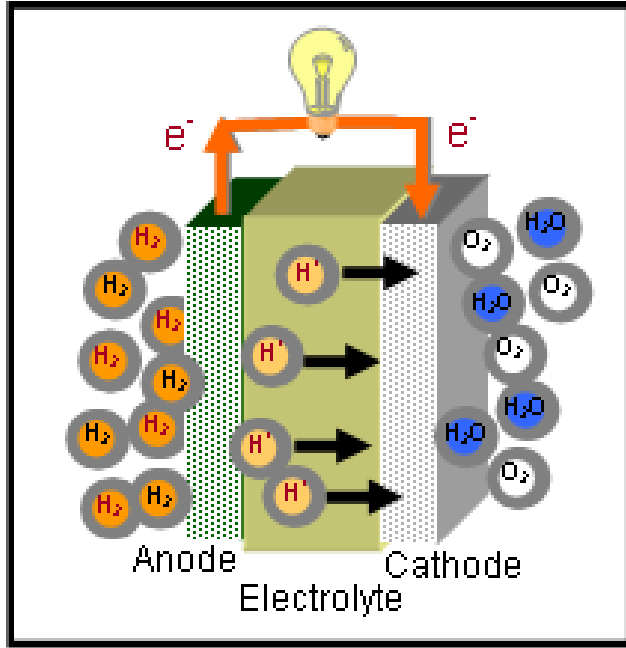
**Katod:**  $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$  ( $E^0 = 1,23\text{V}$ )

$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$  **Toplam  $E^0 = +1,23\text{V}$**



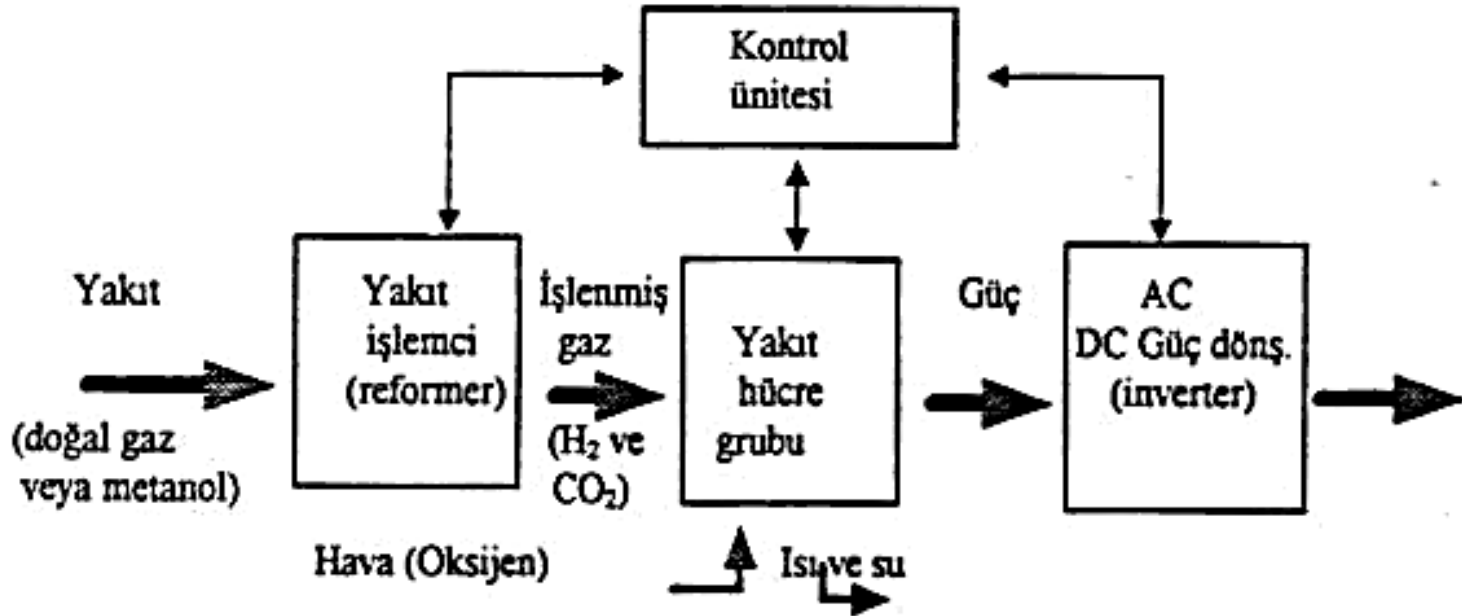


# Yakıt Pili elemanları



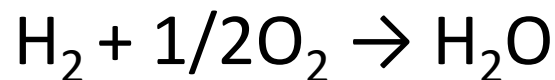
- Yakıt pili modülü (stack)
- Doğal gaz, LPG ve diğer yakıtları Hidrojen'e dönüştüren bir yakıt işlemcisi (Reformer)
- DC->AC gerilimine çeviren güç dönüştürücüsü (inverter)
- Sistemin tüm işleyişini denetleyen kontrol sistemi.

# Güç Üretim Sistemi Ve Elektro-kimyasal tepkimeler



**Anod:**  $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$  ( $E^0 = 0,00 \text{ V}$ )

**Katod:**  $1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  ( $E^0 = 1,23\text{V}$ )



**Toplam  $E^0 = +1,23\text{V}$**



# Avantajları

- %60'ın üzerine çıkan verimleri elde etmek mümkün (Benzin motorlarının 2 katı gibi bir verim)
- Yüksek güç yoğunluğu (2MW'lık istasyon 20m<sup>2</sup>'lik alana kurulabilir.) Ev yakınlarına istasyon kurma imkanı.
- Farklı yakıtlarla çalışabilirlik.
- Atık ısı kojenerasyon ile geri kazanılabilir.
- Şebeke ile birlikte yada ayrı çalışılabilir.
- Düşük sıcaklık ve basınçta çalışma.
- Modüler yapıdadır.
- Katı atık ve gürültü sorunu yok
- Düşük egzoz emisyonları,
- Sera gazları yerine su buharı çıkışı,
- Isı kaybının minimize edilmiş olması.



# Dezavantajları

- Diğer yenilenebilir enerji kaynaklara göre 4 kat maliyetlidir.
- $H_2$  üretmek için yüksek oranda enerjiye ihtiyaç duyulur.
- Yüksek maliyetli araçlar, yüksek maliyetli yakıtlar ve yakıt istasyonu yoksunluğu
- «Yeterli verimle  $H_2$  üretemeyeceği, taşıyamayacağı, depolayamayacağı ve yanıcı olması nedeniyle yakıt hücreli arabalar hiçbir zaman ticari olamayacaklardır.»

(Elon Musk, 2015)



# Kullanılan Yakıtlar

- **Metanol** ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )
- **Etanol** ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ )
- **Doğal Gaz** [ $\text{CH}_4$ (%70-90 Metan),  $\text{C}_2\text{H}_6$ (%5-15 Etan),  $\text{C}_3\text{H}_8$ (Propan),  $\text{C}_4\text{H}_{12}$ (Bütan)]
- **LPG** [ $\text{C}_3\text{H}_8$ (%30 Propan),  $\text{C}_4\text{H}_{12}$ (%70 Bütan)]
- $\text{H}_2$



# Yakıt Pillerinin Sınıflandırılması

- Çalışma Sıcaklıklarına göre
- Kullanılan Elektrolit çeşitlerine göre
- Kullanılan Hidrojenin elde Edilme şekline göre



# Çalışma Sıcaklıklarına göre

- Düşük sıcaklıklarda çalışan (25-100 °C)
- Orta sıcaklıklarda çalışan (100-500 °C)
- Yüksek sıcaklıklarda çalışan (500-1000 °C)
- Çok yüksek sıcaklıklarda çalışan (1000 °C üzeri)
  - Düşük sıcaklık yakıt pilleri, yakıt olarak Hidrojen ve katalizör olarak da platin (pahalı) gerektirir
  - Yüksek sıcaklık yakıt pilleri, hidrokarbon yakıt ve daha ucuz katalizör gerektirir



# Kullanılan Elektrolit çeşitlerine göre

- Sıvı elektrolitler
- Erimiş elektrolitler
- Katı elektrolitler
- **Sıvı elektrolitler**, düşük ve orta çalışma sıcaklıklarında
- **Erimiş elektrolitler**, yüksek çalışma sıcaklıklarında
- **Katı elektrolitler**, çok yüksek sıcaklıklarda



## Kullanılan Hidrojenin elde Edilme şekline göre

- 1- Direkt sağlanan hidrojeni kullanan yakıt pilleri
- 2- Dolaylı olarak Hidrojen sağlanan yakıt pilleri
  - A-) Biyokimyasal Gazlardan elde edilen Hidrojeni kullanan Yakıt Pilleri
  - B-) Reformer yoluyla elde edilen Hidrojeni kullanan yakıt pilleri



# Yakıt pili kimyasalları

	Fosforik Asit Yakıt Pili	Katı Oksit Yakıt Pili	Erimiş Karbonat Yakıt Pili	Polimer Elektrolit Yakıt Pili	Alkali Yakıt Pili
<b>Elektrolit</b>	Fosforik Asit	Çinko üzerine tutturulmuş Yittria (YSZ)	Karbonat	Polimer iyon değişim filmi	Potasyum hidroksit
<b>Elektrolitteki Taşıyıcı</b>	H <sup>+</sup>	O <sub>2</sub> <sup>-2</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>
<b>Hücre Materyali</b>	Karbon	Seramik vb.	Ni, Paslanmaz Çelik, vb.	Karbon	Karbon
<b>Güç Yoğunluğu (W/kg)</b>	120-180	15-20	30-40	350-1500	35-105
<b>Yakıt Türü</b>	H <sub>2</sub> , Hidrokarbonlar, Fosil yakıtlar	H <sub>2</sub> , Hidrokarbonlar	H <sub>2</sub> , Hidrokarbonlar	H <sub>2</sub> , Hidrokarbonlar	H <sub>2</sub>
<b>Sıcaklık</b>	200 °C	1 000 °C	600-700 °C	80 °C	80 °C
<b>Güç Üretim Verimi</b>	% 37-42	% 60-70	% 45-60	% 60	% 42-73
<b>Uygulama Alanları</b>	Ticari Uyg. (Oteller, Hastaneler vs)	Ticari Uyg., Sanayi Uyg., Elektrik Santralları	Elektrik Santralları	Ulaşım Araçları, Askeri Sistemler	Uzay Çalışmaları

# Yakıt Pili Hesaplamaları

## Toplam elektriksel iş

$$-W_{tr} = -\Delta G = n_e \cdot F \cdot \varepsilon$$

## pilin ideal verimi;

$\eta_i = \Delta G_f^\circ / \Delta H_f^\circ$  ile hesaplanabilir .

$\Delta G$  : sıvı ürünlerin oluşum Gibbs enerjisi değişimi, kJ/kmol

$\Delta H_f^\circ$  : sıvı ürünlerin oluşum entalpisi, kJ/kmol dur.



$$-W_{tr} = -\Delta G = n_e \cdot F \cdot \varepsilon$$

### Pilin elektrik potansiyeli $\varepsilon$ ;

$$\varepsilon = -\Delta G / Q_e$$

dış devreden geçen elektrik yükü  $Q_e$  ;

$Q_e = e N_A n_e$  eşitlikleriyle hesaplanabilir.

$e$  : elementer yük ( $1,6022 \times 10^{-19}$  coulomb/elektron),

$N_A$  : avogadro sayısı ( $6,022 \times 10^{23}$  elektron/mol)

$n_e$  : elektron mol miktarı,

ve Faraday sayısı;

$F = e \cdot N_A = 96485 \text{ J.mol}^{-1} \cdot \text{Volt}^{-1}$  (veya  $\text{C.mol}^{-1}$ ) yazılırsa,

( $1 \text{ Volt} = \text{J/C}$  veya  $1 \text{ C} = 1 \text{ J/Volt}$ )

### pilin elektrik potansiyeli (volt olarak);

$$\varepsilon = -W_{tr} / 96485 \cdot n_e = -\Delta G / 96485 \cdot n_e$$



# Örnek

Katot (indirgenme) :  $1/2\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$

Anot (yükseltgenme) :  $\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

Toplam tepkime :  $\text{H}_2(\text{g}) + 1/2\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{s})$   $\Delta\text{G} = -237,13\text{kJ/mol}$

**pilin elektrik potansiyeli (volt olarak);**

$$\begin{aligned}\varepsilon &= -W_{\text{tr}} / 96485.n_e = -\Delta\text{G} / 96485.n_e \\ &= 237,18 \times 10^3 \text{J.mol}^{-1} / (96485 \text{J.mol}^{-1}.\text{Volt}^{-1} .2) = \\ &1,23\text{V}\end{aligned}$$



# Yakıt pillerinin verimlerinin artırılması

- a. Gaz yakıtı-elektrot-elektrolit temas yüzeylerinin artırılması (ör. gözenekli elektrot kullanımı),
- b. Elektrotlarla birlikte veya elektrotlar üzerinde katalistlerin kullanımı,
- c. Daha uygun elektrolitin bulunması,
- d. Basıncın artırılması,
- e. Sıcaklığın artırılması,
- f. Uygun yakıtın ya da yakıt değişikliğinin sağlanması,

