

BÖLÜM-8 HİDROJEN ENERJİSİ

8.1 HİDROJEN ENERJİSİ

Hidrojen 1500'lü yıllarda keşfedilmiş, 1700'lü yıllarda yanabilme özelliğinin farkına varılmış, evrenin en basit ve en çok bulunan elementi olup, renksiz, kokusuz, havadan 14.4 kez daha hafif ve tamamen zehirsiz bir gazdır. Güneş ve diğer yıldızların termonükleer tepkimeye vermiş olduğu ısının yakıtı hidrojen olup, evrenin temel enerji kaynağıdır. Hidrojen (H₂) gazı tipik olarak yaklaşık -253°C'de (-423°F veya 20 K) sıvılaştırılarak depolanmaktadır. Sıvı hidrojenin hacmi gaz halindeki hacminin sadece 1/700'ü kadardır. Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir (Üst ısıl değeri 140.9 MJ/kg, alt ısıl değeri 120,7 MJ/kg). 1 kg hidrojen 2.1 kg doğal gaz veya 2.8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Ancak birim enerji başına hacmi yüksektir. Hidrojen doğada serbest halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunur. En çok bilinen bileşiği ise sudur.

Isı ve patlama enerjisi gerektiren her alanda kullanımı temiz ve kolay olan hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı enerji sistemlerinde, atmosfere atılan ürün sadece su ve/veya su buharı olmaktadır. Hidrojen petrol yakıtlarına göre ortalama 1.33 kat daha verimli bir yakıttır. Hidrojenden enerji elde edilmesi esnasında su buharı dışında çevreyi kirletici ve sera etkisini artırıcı hiçbir gaz ve zararlı kimyasal madde üretimi söz konusu değildir. Hidrojen gazı farklı yöntemlerle elde edildiği gibi su, güneş enerjisi veya onun türevleri olarak kabul edilen rüzgâr, dalga ve biyokütle ile de üretilebilmektedir.

Araştırmalar, mevcut koşullarda hidrojenin diğer yakıtlardan yaklaşık üç kat pahalı olduğunu ve yaygın bir enerji kaynağı olarak kullanımının hidrojen üretiminde maliyet düşürücü teknolojik gelişmelere bağlı olacağını göstermektedir. Bununla birlikte, günlük veya mevsimlik periyotlarda oluşan ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin hidrojen olarak depolanması günümüz için de geçerli bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Bu tarzda depolanan enerjinin yaygın olarak kullanılabilmesi -örneğin toplu taşıma amaçları için yakıt piline dayalı otomotiv teknolojilerinin geliştirilmesine bağlıdır.

Dünyanın giderek artan enerji gereksinimini çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak sağlayabilecek en ileri teknolojinin hidrojen enerji sistemi olduğu bugün bütün bilim adamlarınca kabul edilmektedir.

Hidrojen enerjisinin insan ve çevre sağlığını tehdit edecek bir etkisi yoktur. Kömür, doğalgaz gibi fosil kaynakların yanı sıra sudan ve biokütleden de elde edilen hidrojen, enerji kaynağından çok bir enerji taşıyıcısı olarak düşünülmektedir. Elektriğe 20. yüzyılın enerji taşıyıcısı, hidrojene 21. yüzyılın enerji taşıyıcısı diyen çevreler vardır. Hidrojen yerel olarak üretimi mümkün, kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilen, taşınması sırasında az enerji kaybı olan, ulaşım araçlarından ısınmaya, sanayiden mutfaklarımıza kadar her alanda yararlanacağımız bir enerji sistemidir.

Hidrojen içten yanmalı motorlarda doğrudan kullanımının yanı sıra katalitik yüzeylerde alevsiz yanmaya da uygun bir yakıttır. Ancak dünyadaki gelişim hidrojeninin yakıt olarak kullanıldığı yakıt pili teknolojisi doğrultusundadır.

1950'lerin sonlarında, NASA tarafından uzay çalışmalarında kullanılmaya başlayan yakıt pilleri, son yıllarda özellikle ulaştırma sektörü başta olmak üzere sanayi ve hizmet sektörlerinde başarı ile kullanıma sunulmuştur. Yakıt pilleri, taşınabilir bilgisayarlar, cep telefonları gibi mobil uygulamalar için kullanılabilirliği gibi elektrik santralleri için de uygun güç sağlayıcılardır. Yüksek verimlilikleri ve düşük emisyonları nedeniyle, ulaşım sektöründe de geniş kullanım alanı bulmuşlardır.

8.2 HİDROJEN ÜRETİMİ

Hidrojen enerji sisteminin yeni olmasına karşın hidrojen üretimi yeni değildir. Şu anda dünyada her yıl 500 milyar m³ hidrojen üretilmekte, depolanmakta, taşınmakta ve kullanılmaktadır. En büyük kullanıcı payına kimya sanayii, özellikle petrokimya sanayii sahiptir.



Şekil-8.1

Ülkemizde Suni Gübre Sanayii (25.000m³), bitkisel yağ (margarin) üretimi (16.000m³), petrol arıtım evleri (rafineri) (1.200m³), petrokimya endüstrisi (30.000m³), hidrojene hayvansal yağ üretimi (200-300m³) ve çeşitli yerlerde kullanılmak üzere basınçlı silindirlerde gaz veya sıvı hidrojen üretimi (6.000m³) sadece sanayide kullanılmak üzere yapılmaktadır. Enerji üretimi amacıyla ticari boyutlu hidrojen üretimi mevcut değildir. Hidrojenin üretim kaynakları bol ve çeşitlidir. Fosil yakıtlardan elde edilebildiği gibi güneş, rüzgar, hidrolik enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile suyun elektrolizi yolu ile üretimi, biyokütleden üretimi ve biyolojik proseslerle üretimi mümkündür. Günümüzde hidrojen ağırlıklı olarak doğal gazdan buhar reformasyonu sonucu elde edilmektedir. Suyun elektrolizi bilinen bir yöntem olmakla beraber ekonomik hale getirilmesi konusunda çalışmalar, gene benzer şekilde güneş enerjisinden biyoteknolojik yöntemlerle hidrojen üretimi konusunda araştırma-geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

8.3 HİDROJENİN DEPOLANMASI

Hidrojenin belki de en önemli özelliği, depolanabilir olmasıdır. Bilindiği gibi, günümüzde büyük tutarlarda enerji depolamak için hala uygun bir yöntem bulunmuş değildir. Eğer bugün hidroelektrik santrallerinden elde edilen enerjinin depolanması mümkün olsaydı, enerji sorununu bir ölçüde çözmek mümkün olabilirdi. Ancak, elektrik enerjisi için bilinen en iyi depolama yöntemi hala asitli akümülatörlerden başka bir şey değildir. Hidrojen gaz veya sıvı olarak saf halde tanklarda depolanabileceği gibi, fiziksel olarak karbon nanotüplerde veya kimyasal olarak hidrür şeklinde depolanabilmektedir.

Hidrojen uygun nitelikli çelik tanklarda gaz veya sıvı olarak depolanabilir. Ancak gaz olarak depolamada yüksek basınç nedeniyle tank ağırlıkları problem yaratmaktadır. Hidrojen gazını depolamanın belki de en ucuz yöntemi, doğal gaza benzer şekilde yer altında, tükenmiş petrol veya doğal gaz rezervuarlarında depolamaktır. Maliyeti biraz yüksek olan bir depolama şekli ise, maden ocaklarındaki mağaralarda saklamaktır.

Hidrojen petrole göre 4 kat fazla hacim kaplar; hidrojenin kapladığı hacmi küçültmek için hidrojeni sıvı halde depolamak gereklidir. Bunun için de yüksek basınç ve soğutma işlemine ihtiyaç vardır. Sıvılaştırılmış hidrojen yüksek basınç altında çelik tüpler içinde depolanabilir. Bu yöntem orta veya küçük ölçekte depolama için en çok kullanılan yöntemdir. Ancak büyük miktarlar için oldukça pahalı bir yöntemdir. Çünkü hidrojen enerjisinin yaklaşık ¼'ü sıvılaştırma işlemi için harcanmalıdır. Bir diğer pratik çözüm ise, sıvı hidrojenin düşük sıcaklıktaki tanklarda saklanmasıdır. Uzay programlarında, roket yakıtı olarak sürekli şekilde kullanılan sıvı hidrojen bu yöntemle depolanmaktadır. Dünyadaki en büyük sıvı hidrojen tankı, Kennedy Uzay Merkezinde olup 3400 m³ sıvı hidrojen alabilmektedir. Bu miktar hidrojenin yakıt olarak değeri 29 milyon Mega Jule veya 8 milyon kW-saat'e karşılık gelmektedir.

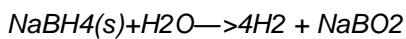
Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucu hidrojen karbon nanotüplerde de depolanabilmektedir. Karbon nanotüpler kısaca grafit tabakaların tüp şekline dönüşmüş halidir. Çapları birkaç nanometre veya 10-20 nanometre mertebesinde, boyları ise mikron seviyesindedir.



Şekil-8.2

Hidrojen kimyasal olarak metallerde, alaşımlarda ve ara metallerde hidrür olarak depolanabilmektedir. Metal hidrürler hidrojen depolamak için çok uygun bir yöntem olmasına karşın, kendi ağırlıkları ciddi sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle son 10 yıldır yüksek depolama kapasiteleri nedeniyle alüminyum ve bor içeren karmaşık hidrürler yoğun olarak çalışılmaktadır. Bor içeren karmaşık hidrürler sıvı koşullarda kullanılması nedeni ile de önem taşımaktadır. Bor esaslı sistemler ana olarak sodyum bor hidrürü esas almaktadır. NaBH₄, katı halde ağırlıkça %10,5 hidrojen içermektedir.

Çözelti halinde, sodyum bor hidrür, aşağıdaki reaksiyona göre hidrojenini vermekte ve sodyum metaborata dönüşmektedir.



H₂O ve NaOH ilavesi ile sodyum bor hidrürün sıvı içerisindeki miktarı ağırlıkça %20-35 arasında olabilmekte, bu da sistemde ağırlıkça % 4.4-7.7 arasında hidrojenin depolanmasına olanak vermektedir.

Sodyum bor hidrürde hidrojen depolamanın en önemli üstünlüğü depolanan hidrojenin oda sıcaklığında geri alınabilmesi ve geri alımın katalizör yardımı ile kolaylıkla kontrol edilebilmesidir. Sodyum bor hidrürün hidrojen amaçlı kullanımında en önemli darboğaz, oluşan metaboratın tekrar NaBH₄ dönüştürülmesidir.

8.4 HİDROJEN ENERJİSİ TEKNOLOJİSİNİN DÜNYADA GELİŞİMİ

Daha önce de belirtildiği gibi hidrojenden, yakıt pili teknolojisi ile elektrik elde edilmektedir. Bugüne kadar, yakıt pillerini çeşitli yönleriyle inceleyen 200'den fazla araştırma NASA tarafından desteklenmiştir. Bugün, Apollo ve Space Shuttle görevlerinde güvenli olarak elektrik (ve su) sağlamış olmaları nedeniyle, yakıt pilleri uzaydaki rollerini ispatlamış bulunmaktadır.

Bu başarılar, 1960'larda, yakıt pillerinin dünyanın enerji problemlerinin tümüne çözüm olabileceği tahminlerine yol açmış ve 1970'li yıllarda çalışmalara başlanmış, 2000'li yıllarda ülkelerin enerji politikalarında önemli yer tutmaya başlamıştır.

ABD Başkanı G.W. Bush 28 Ocak 2003 tarihinde yaptığı bir konuşmada hidrojen enerjisini hürriyet yakıtı olarak tanımlamış ve bu alandaki çalışmalara destek amacıyla 1.7 milyar dolarlık bir kaynak ayrıldığını söylemiştir. ONSI Corp. adında bir Amerikan firması 200 kW enerji sağlayan fosforik asit tipi (PC25) yakıt pilinin pazarlamasını yapmaktadır.

Japonya'da WE-NET (World Energy Network) projesi ile Tokyo metropolitan bölgesinde hidrojen kullanımı ile oluşacak azot oksit emisyonundaki azalma potansiyeli araştırılmaktadır. WE-NET Programı Japonya'nın Uluslar Arası Ticaret ve Endüstri Bakanlığınca desteklenmektedir. Bu programda Japonya hidrojen enerji sistemini geliştirmek üzere 2020 yılına kadar 4 milyar \$'lık bir bütçe ayırmıştır. Gelecekte de Pasifik denizinin ekvator bölgesinde yapay bir adada solar radyasyon kullanarak deniz suyundan elektrolizle hidrojen üretmeyi planlamaktadırlar.

Halen Japonya'da Tokyo Electric Company tarafından kurulan 11 MW'lık elektrik santrali Rokko adasının elektrik ve ısı ihtiyacını karşılamakla birlikte, kapasiteleri 50 ile 500 MW arasında değişen yüzlerce yakıt pilli tesis bulunmaktadır. Sadece Tokyo'da şehrin elektrik ihtiyacının 40.000 kW'lık bölümü hidrojen enerji sistemlerinden sağlanmaktadır.

Japonya'da Tokyo Electric Company'nin yanısıra Sanyo, Hitachi, Toshiba, Kawasaki, Fuji Electric, Kansai Electric, Amerika'da, Westinghouse, Institute of Gas Technology (IGT), Unocal, San Diego Gas and Electric, Avustralya'da Ceramic Fuel Cell Ltd, Avrupa'da Siemens KWU, Dornier System, Sulter Innotec, dünyada yakıt hücreli sistemleri kullanan ve gelişimi için çalışmalar yapan şirketlerden bazılarıdır.



Şekil-8.3

Siemens Kaliforniya'da 200 konutun elektrik ve ısı ihtiyacını karşılamak üzere 250kW'lık gaz türbinli, yakıt hücreli bir kojenerasyon sistemi kurmuştur.

Avrupa merkezli Alstom, Asya merkezli Japon Ebara firmaları ile ortak çalışan Kanada'nın Ballard firması PEM tipi yakıt pili kullanan, 250 kW elektrik, 230 kW ısısal güce sahip jeneratörleri satışa sunmuştur.

Honda araştırma ve geliştirme bölümü doğal gazdan yakıt pilli araçlar için hidrojen üreten, elde edilen elektriğin ve sıcak suyun yine üretildiği evde kullanımını sağlayan 'Hidrojen Ev Enerji İstasyonu' (HES) adlı proje başlatmıştır. Proje çerçevesinde California'da deneysel amaçlı kurulan evde çalışmalar hidrojen üretimi, depolanması ve yakıt olarak kullanılması gerçekleştirilecektir.

Uluslararası potansiyel yakıt pili pazarı (Sadece 'sabit cihazlar' için) 2030 yılı için 45 milyar Euro olarak tahmin edilmektedir. Hedef fiyat, tüm sistem için kW başına 1000 Euro'dur (1000 Euro/kurulu kW).

Almanya'da Münih havaalanında çalışan otomobil ve otobüslerin hidrojen enerjisi kullanması yönündeki projenin yanısıra Neurenburg yakınlarında mini bir hidrojen enerji sisteminin kurulduğu bir program yürütülmektedir. Solar-Wasserstoff-Bayern burada güneş hidrojen tesisi, depolama sistemi ve hidrojen kullanma sistemleri kurmuştur. Almanya ayrıca Suudi Arabistan ile ortak yürüttüğü Hysolar programı ile Suudi Arabistan'ın Riyad yakınında güneş hidrojen üretim tesisi kurmayı planlanmaktadır. Suudi Arabistan hidrojeni ihraç edecektir.

Avrupa ve Kanada arasındaki Euro-Quebec diğer uluslar arası başarılı programdır. Bu programda nispeten ucuz olan hidrogüçten üretilerek Kanada'dan Avrupa'ya ithal edilecek sıvı hidrojenin deniz aşırı taşınımı, depolanması ve kullanım alanları araştırılmaktadır.

İzlanda'da hükümet, üniversiteler, taşıma şirketleri, fabrikalar ve çok uluslu otomobil ve petrol şirketleri konsorsiyumu oluşturulmuş ve 2030 yılına kadar İzlanda'nın tamamen hidrojen enerjisine geçmesi planlanmıştır. Dünyanın ilk hidrojen dolum istasyonu Shell tarafından İzlanda'da açılmıştır.

Bunlara ilave olarak İspanya'da INTA solar hidrojen tesisi, İtalya, Almanya, Norveç'te SAPHYS küçük ölçekli fotovoltaik-hidrojen enerji sistemi ve Almanya'da PHOEBUS pilot tesisi gibi birçok proje yürütülmektedir.



Şekil-8.4

Ayrıca araçların %65'inin skoter (küçük motosiklet) olduğu Tayvan'da yakıt hücreli skoter kullanımı desteklenmekte ve ZES (sıfır emisyonlu skoter) Asya Pasifik Yakıt Pili Teknolojisi Ltd. ve Kwang-Yang Motor Co. işbirliği ile üretilmektedir.

Brezilya ve Güney Amerika'da en büyük hidrogüç tesisi Haipu'dur. Burada elektrolitik hidrojen gazı üretilmektedir.

Petrol şirketlerinin enerji ortamı olarak hidrojene bakışları kuşku dolu olsa da son yıllarda bu bakış açısı değişmektedir. Bu şirketlerden Londra'da Royal Dutch Shell, Shell Hidrojen adını verdikleri şubelerine hidrojen konusunda araştırmaları için 500 milyon \$ yatırım yapmıştır. BP'de benzer bir girişimde bulunmuştur.

Ulaşım sektöründe, yakıt pili ile çalışan araçların geliştirilmesi, petrol tüketimini azaltacağı gibi, araçlardan kaynaklanan hava kirliliğini de minimum düzeye indirecektir. Yakıt pilli otobüs üretimini gerçekleştiren Kanada'nın Ballard Şirketinin yanısıra, General Motors, Ford, Chrysler, Toyota, Honda, BMW, Renault yakıt pilleri ile çalışan otomobilleri ticari anlamda üretmek çabasındadırlar. 1993'ten bu yana çok sayıda prototip araç üretilmiştir. Alman Daimler Chrysler'in ürettiği, yakıt pilini Ballard'dan sağladığı, NECAR4 (sıvı hidrojenle çalışır) ve metanol dönüştürücülü NECAR5, General Motors'un Opel, 'Zafira' adı verilen ve 75 kW'lık Ballard 'tescilli' yakıt pili taşıyan aracı, Ford tarafından üretilen 'Think FC5'ler, Toyota'nın RAV-4 ve Fine-N'i, Nissan Renessa ve Mitsubishi, Daihatsu, Honda ve Mazda ortaklığı Demio FCEV, Renault'un 30 kW Nora cell kullanan Lagunası prototiplere birer örnektir.



Şekil-8.5

Taşıtlarda hidrojenin içten yanmalı motorlar veya yakıt pilleri aracılığıyla kullanımı konusunda da, Daimler-Benz şirketinin sıfır salınımlı minübüs'ü, BMW, Dodge, Buick, Suzuki firmalarının deneme otomobilleri, Macchi-Ansaldo'nun ve MAN firmasının SL202 otobüsleri, Kanada demiryollarının Lokomotifleri ile Almanya, Avustralya ve Kanada donanmaları için imal edilen deniz altılar sayılabilir. Mercedes-Crysler firması, büyük şehirlerde çevre kirliliğini önlemek için, 30 adet hidrojen ile çalışan 70 kişilik toplu taşıma araçlarını 10 Avrupa başkentinde, her türlü iklim ve arazi şartlarında denemektedir. Bu araçlarda sistem elektrik motoru ile hareket eder, motor, piston, grank ve şanzıman yoktur.

General Motor hidrojen enerji teknolojisinin kullanıldığı, 20 cm kalınlığında, 120 cm eninde, 240 cm boyunda bir platform ile dört tekerden oluşan bir otomobil üretimi projelendirmiştir. Projeye göre bu platforma sahip olan kişi istediği kaportayı takarak otomobilini kullanabilecektir. Bu otomobillerde içten yanmalı motor, piston ve grank bulunmadığından bunun yerine her tekerleğin göbeğinde 20 kW'lık müstakil elektrik motorları arabaya gerekli hareketi sağlayıp, yüksek emniyet içinde sistemin süper kompakt bir yapıya kavuşmasına olanak sağlanmaktadır.

Bunların dışında, %15-20 hidrojen ve %80- 85 doğal gaz karışımından oluşan hytane adlı yakıt ile çalışan yeni bir otobüs 1993 yılından beri Montreal'de (Kanada) denenmektedir. Hidrojen, uzun yıllardır uzay mekiği ve diğer tüm roketlerde rakipsiz bir yakıt olarak kullanılmaktadır. Ancak, bunların dışında uçaklarda ilk kullanımı 1956 yılında B-57 Canberra deneme uçağında gerçekleştirilmiştir. Sovyetler Birliği de 1988 yılında Tupolev-155 deneme uçağında yakıt olarak hidrojen kullanmıştır. Dünya Enerji Ajansı Hidrojen Programı çerçevesinde yürütülen çalışmalarda, Airbus tipi uçakların yakıt olarak hidrojen kullanması 2007 yılında başlayacaktır. Hidrojenin ticari uçaklarda yaygın kullanımı konusunda Avrupa Airbus konsorsiyumu ile Almanya-Rusya ortak çalışmaları sürmektedir. Sıvı hidrojen doğrudan veya dolaylı olarak motorları ve dış yüzeyi soğutmak için de kullanılabilirliği için, yüksek hızlı supersonic uçaklar için ideal bir yakıt olarak görülmektedir.

Amerika'nın Duffy Boats firması elektrikle çalışan ilk tekneyi geçtiğimiz aylarda üretmişlerdir. Her biri 1.5 kW gücünde 4 yakıt piliyle hareketlendirilmiş olan bu tekne yakın gelecekte, sahillerde, nehirlerde, kanal ve boğazlarda yani ulaşımın su üzerinde yapıldığı her yerde taksi görevini görecektir.

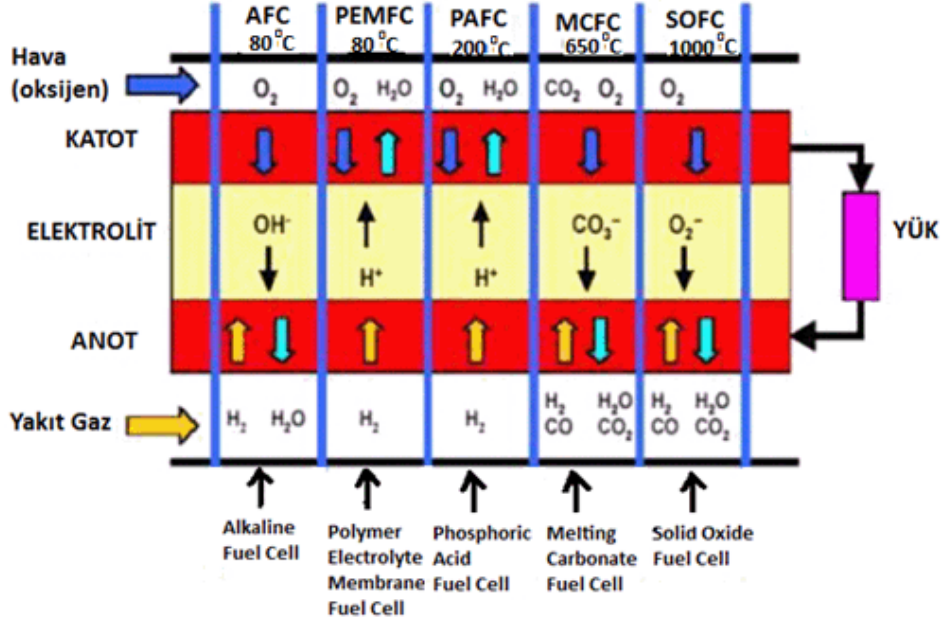
8.5 YAKIT PİLLERİ

Yakıt pilleri, temiz, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip enerji dönüşüm teknolojileridir.

Bir buhar kazanı veya türbin kullanılmadan, sadece kimyasal reaksiyon ile elektrik enerjisi üretilir. Hidrojen (H₂) ve oksijen (O₂) arasındaki elektrokimyasal reaksiyon ile elde edilen ve toplam verimlilikleri % 80'lere kadar ulaşabilen yakıt pilleri, sürekli çalışan piller veya elektrokimyasal makineler olarak da bilinir. Yakıt pilleri, bünyesinde kullanılan elektrolitin cinsine göre çeşitli isimler alır.

- Fosforik asit yakıt pili
- Katı oksit yakıt pili
- Erimiş karbonat yakıt pili
- Polimer elektrolit yakıt pili(PEM)
- Alkali yakıt pili

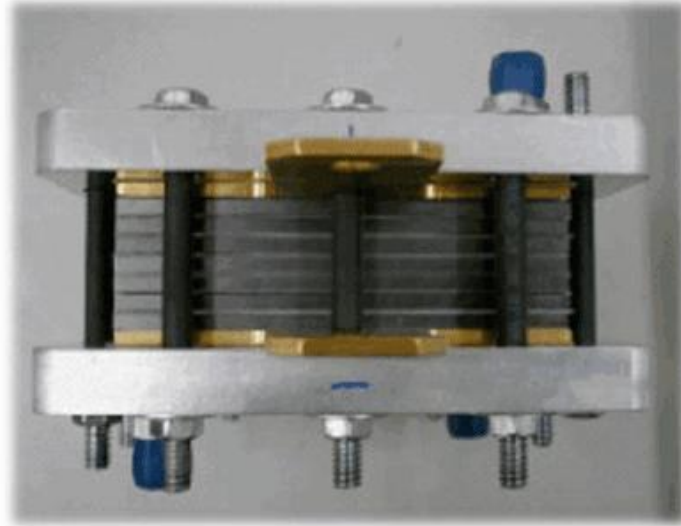
Her ne kadar çalışma prensipleri benzer olsa da, çalışma koşulları ve uygulama alanları farklılık göstermektedir. Aşağıdaki tabloda yakıt pili çeşitlerinin temel özellikleri verilmiştir. Atık olarak su ve ısı elde edilmesi ve özellikle minimum seviyedeki emisyonları yakıt pillerini avantajlı kılar. İçten yanmalı motorlarda, toplam kontrol edilemeyen emisyonlar 2370 ppm, gaz türbinli sistemlerde 120 ppm olduğu halde, yakıt hücreli sistemlerde sadece 5 ppm'dir.



Şekil-8.6 Yakıt pili çeşitleri

Yakıt pilleri, boyutlarının küçük olması, yüksek verimle çalışmaları ve atık ısılarının kullanılabilir olmasının yanı sıra aşağıdaki özellikleri nedeniyle de diğer güç sistemlerine göre daha üstündürler.

- Modüler olmaları
- Kullanıcıya yakın inşaa edilebilmeleri
- Yakıt olarak saf hidrojenin yanı sıra doğal gaz, metanol veya kömür gazlarının kullanılabilmesi
- Sessiz çalışmaları
- Minimum seviyede kükürt oksit ve azot oksit emisyonları->İnşaa edilecek alanda çok az çevre kısıtlamaları gerektirmeleri ve kısa sürede inşaa edilebilmeleri.
- Katı atık problemlerinin olmaması

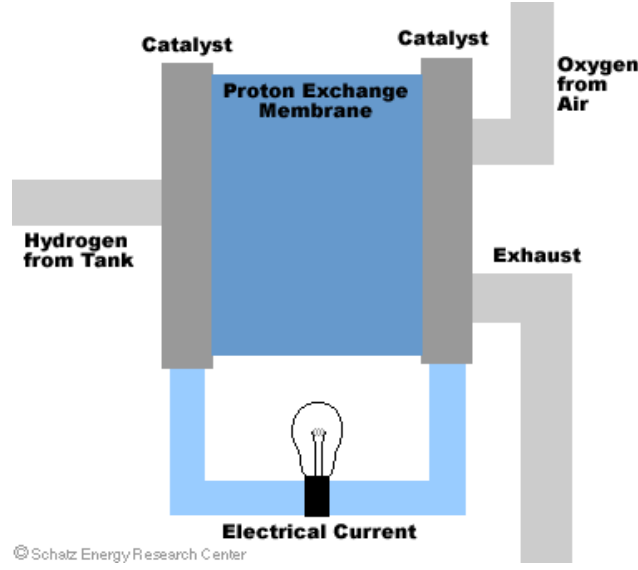


Şekil-8.7 Yakıt pili

Çalışma prensibi

Bir yakıt pilinde gaz yakıtlar (genelde hidrojen) anot tarafından oksitleyici gazlar (genelde oksijen) ise katot tarafından verilir. Anotta yükseltgenme(elektron bırakma) reaksiyonları katotta ise indirgenme(elektron alma) reaksiyonları gerçekleşir. Toplam reaksiyon sonucunda ürün olarak su ve ısı ortaya çıkar. Çıkan suyun kimyasal potansiyeli hidrojen ve oksijenin kimyasal potansiyellerinin toplamından düşük olduğundan dolayı toplam kimyasal potansiyel farkı hidrojen ve oksijende su

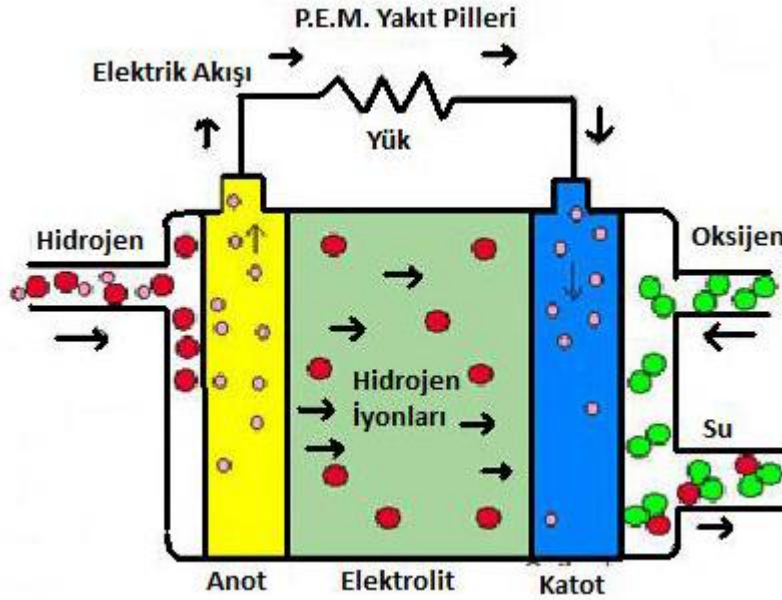
oluşması (reaksiyonun gerçekleşmesi) yönünde itici bir güç oluşturmaktadır. Elektrokimyasal reaksiyonlar elektrotlarda meydana gelir ve bir elektrik akımı ortaya çıkar.



Şekil-8.8 Yakıt pilinin iç yapısı

Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells) PEMFC

Bu tip yakıt pillerinde elektrolit iyon değişim membranıdır (floranmış sülfonik asit polimer veya diğer benzer bir polimer). Düşük sıcaklıklarda çalışır (yaklaşık 90°C), yüksek güç yoğunluğuna sahiptir ve otomobiller gibi hızlı ilk çalışma gerektiren yerlerde kullanılabilir. Membran, anot ve katotta kimyasal reaksiyonlar için katalizörlerle irtibatlıdır. Düşük sıcaklıkta çalışması sebebiyle pahalı katalizörler (genelde Platin) gereklidir. CO, katalizörü zehirleyebilir ve kalıcı bir zarar verebilir olmasından dolayı kullanılacak hidrojen CO içermemelidir.



Şekil-8.9 Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili

Anot reaksiyonu: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

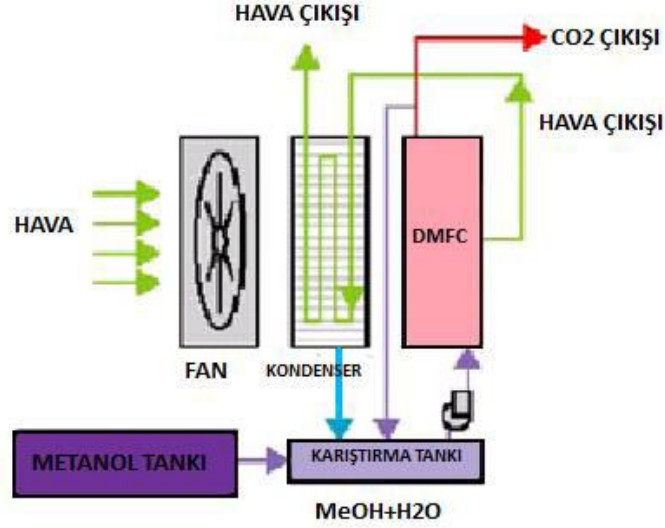
Katot reaksiyonu: $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

Doğrudan Metanollü Yakıt Pilleri (Direct Methanol Fuel Cells) DMFC

Son yıllarda büyük bir geliştirme gösteren bu tip yakıt pillerinde elektrolit olarak PEM yakıt pillerinde olduğu gibi polimer membran kullanılır. Yakıt pili sisteminde fazla yardımcı elemana ihtiyaç duyulmaz ve PEM yakıt pillerine göre daha basit bir yapıdadır. Anota metanol ve su bileşimi verilir. Anot katalizörü, hidrojeni bu eriyikten direkt olarak alır. Bir yakıt ıslah ediciye gerek duyulmaz. Yüksek çözünürlüklü yakıtın düşük basınç altında tutulabilmesi sebebiyle hidrojen depolamada karşılaşılan problemler yoktur. 50 – 90°C aralığında çalışır. % 40'lara ulaşan verimlere sahiptir.

Anot reaksiyonu: $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{H}^+ + \text{CO}_2 + 6\text{e}^-$

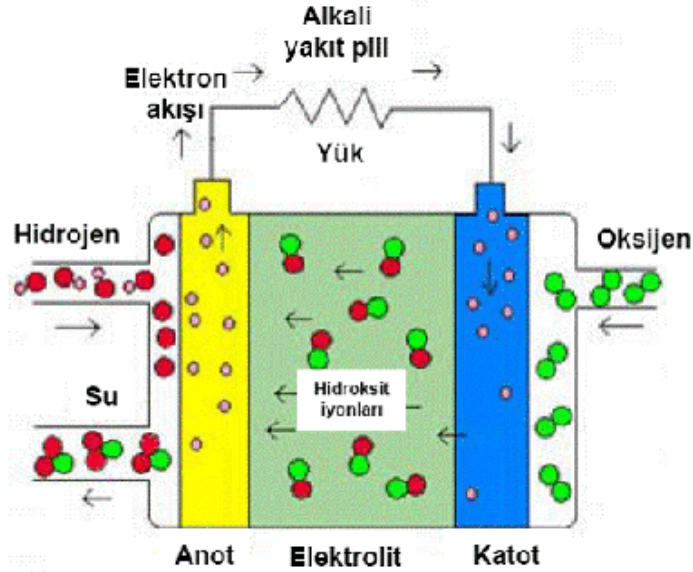
Katot reaksiyonu: $3/2\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$



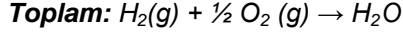
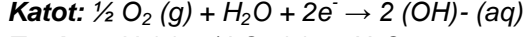
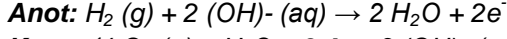
Şekil-8.10 Doğrudan metanollü yakıt pili

Alkali Yakıt Pilleri (Alkaline Fuel Cells) AFC

En eski ve en basit yakıt pilidir. NASA tarafından uzay uygulamalarında kullanılmıştır. % 70'e varan verimlere ulaşabilirler. Bu tip yakıt pilinde elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) kullanılır. İçerdiği KOH miktarına göre çalışma sıcaklığı değişir. % 85 KOH içerenleri yüksek sıcaklıklarda (~250°C), % 35–50 KOH içerenleri ise daha düşük (<120°C) sıcaklıklarda çalışır.

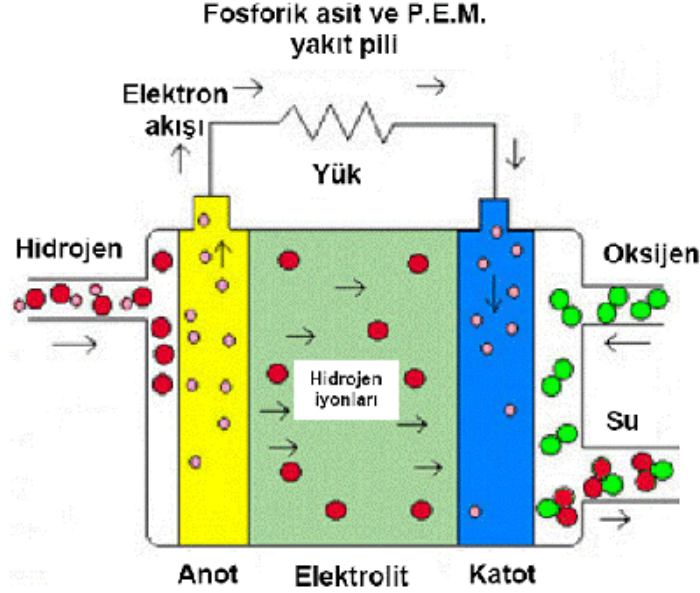


Şekil-8.11 Alkali yakıt pili

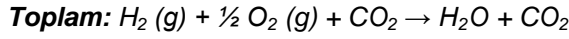
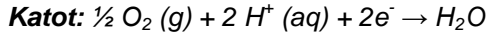
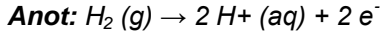


Fosforik Asit Yakıt Pilleri (Phosphoric Acid Fuel Cells) PAFC

Elektrolit olarak sıvı fosforik asit kullanılır. 150 – 220 °C gibi orta düzeydeki sıcaklıklarda çalışır. Su anda % 41 verimle elektrik üretimi için çalışan sistemleri mevcuttur.

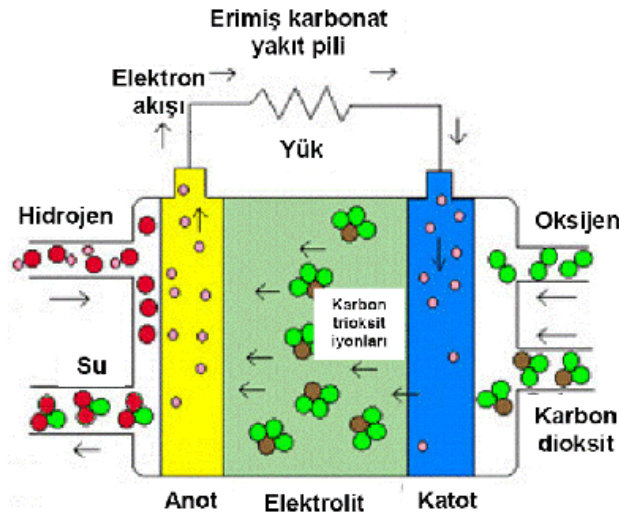


Şekil-8.12 Fosforik asit yakıt pili

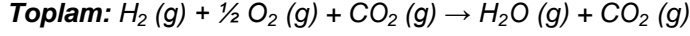
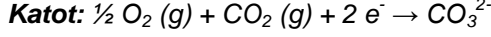
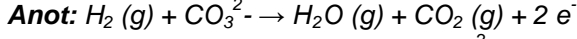


Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (Melting Carbonate Fuel Cells) MCFC

Bu tip yakıt pilinde elektrolit, lityum alüminyum oksit (LiAlO₂) ve seramik kalıp içerisinde tutulan erimiş alkali karbonatlardan oluşur. 600 – 700 °C sıcaklıkları arasında çalışır. Yüksek sıcaklıklarda çalıştığından dolayı katalizör olarak pahalı materyallere gerek yoktur. Anotta nikel ve katotta Nikel oksit kullanılır. Erimiş karbonat yakıt pilleri % 50'lere varan verimlere ulaşabilirler.

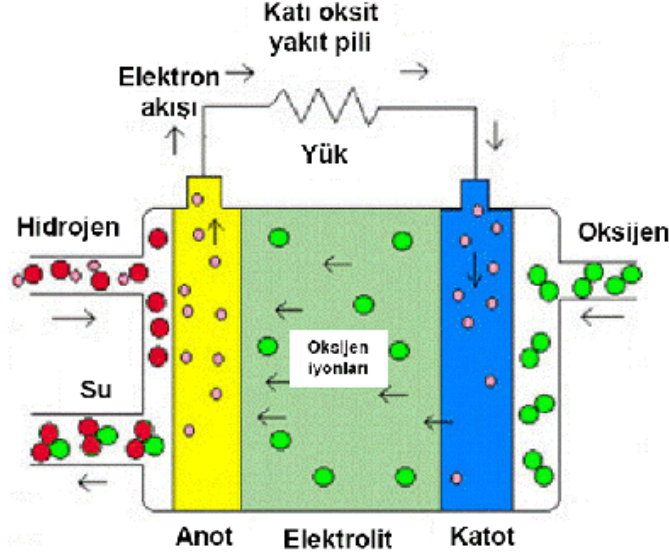


Şekil-8.13 Erimiş karbonat yakıt pili

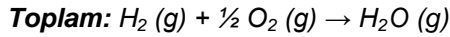
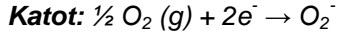
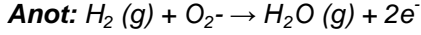


Katı Oksitli Yakıt Pilleri (Solid Oxide Fuel Cells) SOFC

Bu tip yakıt pilinde elektrolit, katı, gözeneksiz ve Y_2O_3 içeren zirkonya'dan oluşmaktadır. Saf zirkonya yalıtkan olduğu halde Y_2O_3 ilavesi ile iletkenlik özelliği gösterir. Atmosfer basıncında yaklaşık $1000^\circ C$ sıcaklıklarda çalışır. İnce zar teknolojisine sahip daha düşük sıcaklıklarda çalışan modelleri de mevcuttur. Atık gazların yüksek sıcaklıklarda olması sebebiyle kojenerasyon uygulamaları için uygundur. Yüksek sıcaklık sebebiyle pahalı katalizörlerin kullanılması gerekmez ve yakıt, pil yığını içerisinde ıslah edilebilir. Elektrik verimleri %50 ye kadar çıkabilir.



Şekil-8.14 Katı oksit yakıt pili



8.6 YAKIT PİLİ ELEMANLARI

1. Polimer Elektrolit Membran
2. Gaz Difüzyon Katmanı
3. Katalizör
4. Elektrotlar
5. Bipolar Tabakalar

Polimer Elektrolit Membran (Polymer Electrolyte Membrane)

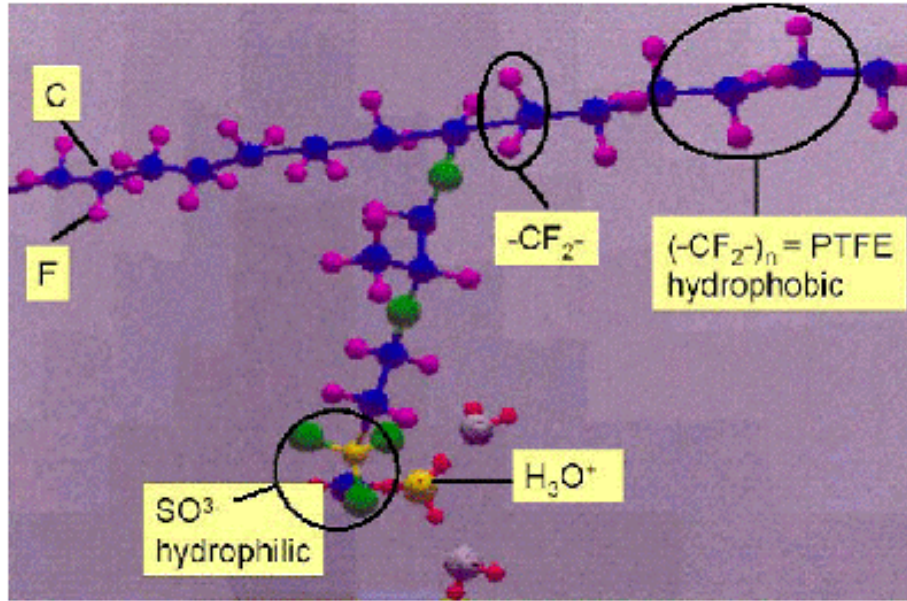
Membran, PEM yakıt pilinde proton iletimine izin vererek çevrimin tamamlanmasını ve elektron iletimini engelleyerek elektronların dış çevrim vasıtasıyla iletilmesini sağlar. Bu sebeple membran proton iletimine karşı iyi iletken, elektriğe karşı yalıtıcıdır. Ayrıca Yakıt pilinde hidrojen ve oksijenin doğrudan bir birine karışmasını engeller.

Membran, bir polimer kalıp içerisinde negatif iyonların tutulduğu bir asidik elektrolit olarak karakterize edilebilir. En geniş kullanılan membran materyali Nafion® dur. Bu materyalin polimer yapısı poli(tetrafluoroetilen) bir omurga içerir. Bu omurga, uçları sülfonik asit gruplarla biten yan zincirlere sahiptir.

Kalınlıkları 51µm - 254 µm arasında değişir.



Şekil-8.15 Kalınlıklarına ve yapılarına göre Nafion membranlar



Şekil-8.16 Nafion Membranının Atomik Yapısı

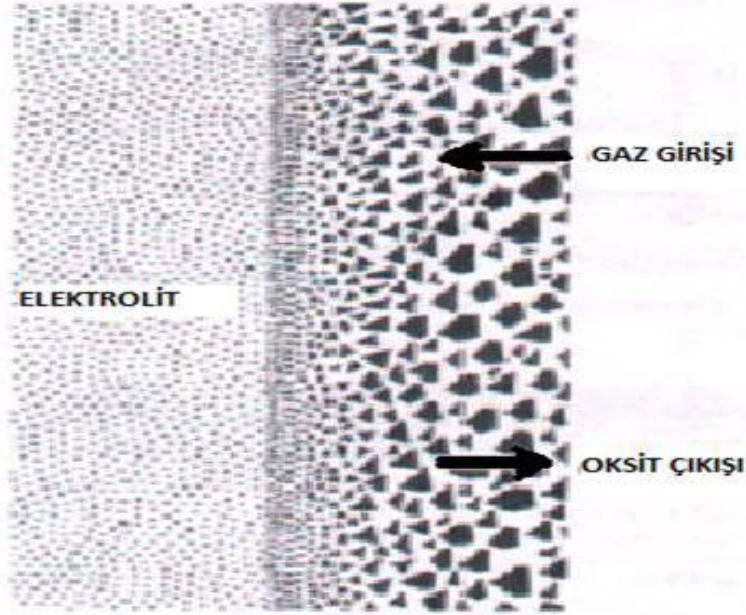
Polimer elektrolitli membran proton iletken olmak için sulandırılmalıdır. Bu sebeple yakıt pilinin çalışma sıcaklığı suyun kaynama noktasının altında olmalıdır. Membranın tutabileceği su miktarı membranın önemli özelliklerini (iletkenlik, gaz geçirgenliği ve mekanik özellikler) belirler. Membranın en büyük dezavantajı sonlu bir iyon iletim oranına sahip olmasıdır. Ayrıca membran direnci direnç kayıpları içerisindeki en büyük dirençtir. Bu direnç sıcaklığa ve sulama oranına göre değişiklik gösterebilir. Membranın diğer bir dezavantajı da yakıt ve oksitleyici gazların karşıt geçişleridir. Bu durumda hidrojen ve oksijen bir dış akım üretmeden reaksiyona girer ve performans düşer.

Elektrolit sadece çözülmüş tepkenleri elektrota iletmez aynı zamanda elektrotlar arasında iyonik şarjı sağlayarak pil elektrik çevrimini tamamlar. Aynı zamanda yakıt ve oksitleyici gaz akımlarının doğrudan birbirlerine karışmaması için arada bir duvar oluşturur.

Gaz Difüzyon Katmanı (Gas Diffusion Layer) GDL

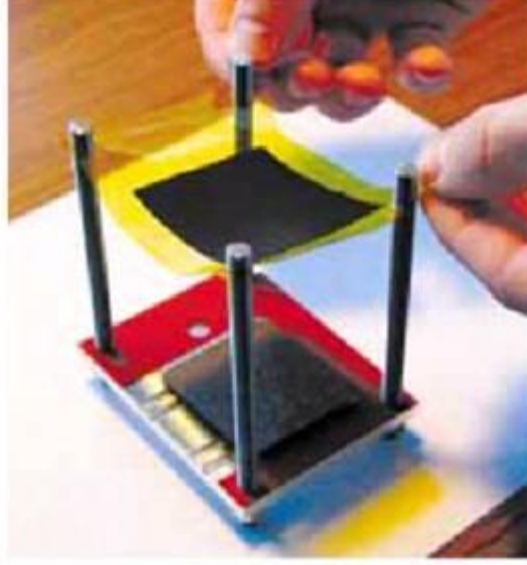
Bir yakıt pilinde polimer membran - katalizör ile bunlarla iki taraftan temas halinde bulunan gözenekli gaz difüzyon katmanları sandviç görünümünde bir yapı oluşturur. Gaz difüzyon katmanlarının görevleri, tepkimeye girecek gazların, suyun iletiminin sağlanması ve elektrotlar-akış alanı plakaları arasında elektronik ve ısıl temasın sağlanmasından oluşmaktadır. Ayrıca pil için mekanik destek sağlar. Bir gaz difüzyon katmanından istenilen özellikler ise, yüksek elektrik ve ısıl iletkenlik, yüksek gözeneklilik, iyi kimyasal, mekanik uyum ve düşük maliyettir. Gaz difüzyon katmanında materyal olarak karbon esaslı kâğıtlar, keçeler ve kumaşlar kullanılabilir.

Makro gözenekten mikro gözeneğe doğru değişen bir kombinasyon iyi performans sağlar.



Şekil-8.17 Gaz difüzyon katmanının yapısı

Bu katman, poli tetrafluoroetilen gibi su sevmez (hydrophobic) bir materyal içerir. Bu materyalin görevi gaz difüzyon katmanının gözenekleri arasında su birikintilerinin oluşmasını önlemektir. Böylece gazlar, katalizör alanları ile serbestçe temas kurabilirler. Genelde kalınlıkları 300–400µm arasında değişmektedir. Gaz difüzyon katmanına katalizör tutturularak gaz difüzyon elektrotu diye bilinen yapıyı oluştururlar. Bu uygulama, değerli materyallerin efektif olmayan kullanımı ve elektrot ile membran arasında zayıf temas oluşturması sebebiyle yerini seri üretime daha uygun olan ince film elektrotlarına bırakmıştır. Geleneksel karbon esaslı gaz difüzyon katmanlarına ek olarak sinter veya ağ tipi metalik materyaller de kullanılabilir. Metalik materyal kullanılması durumunda karbon kağıtlarda olduğu gibi destek konulması gerekmez. Ayrıca gaz difüzyon katmanları basınç altında olduğundan materyaller kolayca deforme olabilirler. Bu deformasyon düşük gözeneklilik ve daha zayıf kütle transferine neden olur. Metalik materyal kullanılması durumunda yüksek basınçlarda performansta düşme olmadan çalışır. Fakat metalik materyallerin de iletkenliklerinin az olması ve ucuz metallerde korozyon oluşması gibi problemleri vardır.



Şekil-8.18 Gaz difüzyon katmanı

Katalizör (Catalyst)

Yakıt hücrelerinde seçilen katalizörün yakıtı hidrojene dönüştürme kapasitesi, yakıt pilinin performansını ve verimini doğrudan etkilediğinden bu sistemlerde katalizörün önemi çok büyüktür. En az katalizör kullanımı için elektrokimyasal aktivitenin en yüksek olacak şekilde değerlendirilmesi gereklidir. Genel olarak katalizörlerin uzun ömürlü, yüksek verimli ve hücre başına en az miktarda kullanılabilir olması istenmektedir.

Yakıt hücrelerinde iki katalizör tabakası mevcuttur ve bu tabakalar membran-elektrot sistemi (MEA) için kritik bir rol oynar. Bu tabakaların yokluğunda MEA fonksiyon gösteremez. Elektro katalizörler, bu önemli görevi yerine getirebilmek için bazı özelliklere sahip olmak zorundadırlar. Yakıt hücresinin anodunda, yakıtın elektrokimyasal oksidasyonu için yüksek aktivitenin sağlanması gerekirken hücreyi binlerce saat çalıştırmak için katalizör tabakasının gerekli dayanıklılık ve kararlılıkta olması da gereklidir. Ayrıca elektro katalizörler direnci minimuma indirmek için iyi bir elektriksel iletkenliğe sahip olmaları yanında, ekonomik ve büyük miktarlarda kolay üretilebilir olmaları da gerekir.

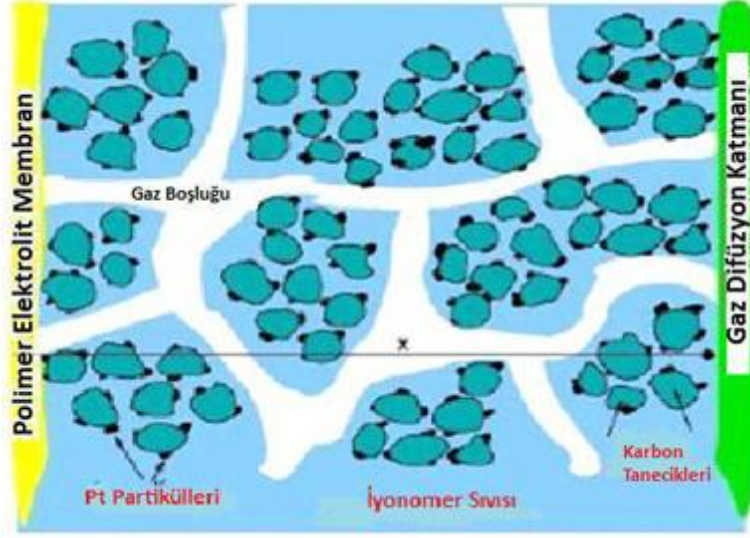
Katalizör Dizaynı, Seçimi ve Özellikleri

Katalizörlerde önemli olan unsurların başında aktif merkezler gelmektedir. Bu aktif merkezlerin sayısı ve dağılımı katalizör tepkimeleri için son derece önemlidir. Yakıt hücrelerindeki katalizörlerde yeterli sayıda aktif merkez mevcut olmalı ve bunların sayısı maksimuma ulaşmalıdır. Diğer önemli unsurlar, yüksek elektriksel iletkenlik, iyonomer ile iyi bir etkileşim, gaz geçişi kolaylığı, reaktantlar, ürünler ve elektrolitlerle temasta kararlılıktır. Yapılan araştırmalar aktiflik hem de kararlılık açısından en iyi katalizörlerin platin ve platin içeren katalizörler olduğunu göstermektedir.

Elektrotlar

Gaz difüzyon katmanı, katalizör katmanı ve bağlayıcı ile beraber elektrotları oluştururlar. Elektrokimyasal reaksiyonlar anot ve katottaki katalizör yüzeyleri üzerinde gerçekleşir. Katalizör ve bağlayıcı yapısı membrana veya difüzyon katmanına tutturulabilir. Her iki durumda da membran ve katalizör partiküllerinin temas derecesi uygun proton hareketi için önemlidir. PEM yakıt pilleri düşük sıcaklıklarda çalıştığı için yeterli reaksiyon derecesine ulaşmak ve aktivasyon kayıplarını azaltmak için elektrotlar değerli materyaller içerir. Saf hidrojen kullanılması durumunda platinyum çok iyi performans gösterir. Farklı gazlar içermesi durumunda bu gazlara karşı toleransın artması için diğer değerli materyallerin kullanılması gerekir. Bunlar arasında en çok kullanılanı Rutenyum'dur. Elektrotların değerli materyal içermeleri sebebiyle elektrot tasarımında ana amaç düşük metal içeriğine ulaşmaktır.

Bu sebeple ince film elektrotları iyi bir çözüm sunar. İnce film elektrotu Nafion bağlı olarak çok iyi proton iletici olduğu için iyi performans gösterir.



Şekil-8.19 Elektrot Yapısı

İnce film elektrotu, şekilde görüldüğü gibi büyük karbon tanecikleri üzerine tutturulmuş küçük platinyum partiküllerinin oluşturduğu yüzey alanı ve proton iletimi için bir gözenekli katmandan oluşmaktadır. Tipik elektrot kalınlıkları mikrometreler seviyesindedir. Platinyum içerikleri ise 0,1–0,4 mg/cm² arasında değişmektedir. Elektrot, membran yüzeyine spreyle yapılarak, çıkartma yapılarak (decalling) veya diğer uygun üretim metotları ile yerleştirilir.

Membran ve elektrotları içeren yapı membran – elektrot assembly (MEA) şeklinde isimlendirilir. MEA'nın yapısı kullanılan membran tipine bağlı olarak birkaç on mikrometreden yüzlerce mikrometreye kadar değişir.

Elektrokimyasal reaksiyonlar elektrotlarda meydana gelir ve bir elektrik akımı ortaya çıkar. Gözenekli elektrotun olduğu bölgede tepkenler (reactants), elektrolit ve katalizör arasında üç fazlı bir arayüz kurulur. Bu ara yüzler bir yakıt pilinin performansında önemli rol oynar. Özellikle sıvı elektrolitli yakıt pillerinde bu ara yüz daha önemlidir. Bu ara yüzde gözenekli elektrot, katalizör ve sıvı elektrolit temas halindedir. Eğer gözenekli elektrot fazla miktarda elektrolit içeriyorsa elektrot yüzebilir ve elektrot tarafındaki gazların reaksiyon bölgesine geçmesini engeller. Bu durum elektrotun performansını düşürür. Az miktarda elektrolit içermesi durumunda elektrot kuru kalır ve reaksiyon oranı azalır. Bu sebeple gözenekli elektrot yapısının gaz fazında elektrot ve elektrolit arasında hassas bir ayarın bulunması gereklidir.

Yakıt pilindeki gözenekli elektrotun görevleri

- 1- Gaz ve su iyonizasyon ve deiyonizasyon reaksiyonlarının oluşabileceği bir yüzey alanı sağlar.
- 2- Elektronlar oluştuğunda elektronları ara yüzden dışa veya ara yüze doğru iletir. Bu sebeple elektrot elektrik iletkenliği iyi olan bir maddeden yapılmalıdır.
- 3- Hacimli gaz ve elektroliti ayırarak bir fiziksel duvar oluşturur.

Bipolar Tabakalar (Bipolar Plates)

Birleşik hücreleri oluşturmak için en iyi ve en geliştirilmiş yöntem bipolar plakalardır. (iki kutuplu iletken tabakalar). Bipolar tabakanın bir yüzeyi hücrenin anot tabakası iken diğer yüzeyi katot tabakasını oluşturmaktadır. Her iki yüzeyde de yakıt (saf hidrojen, sulu metanol çözeltisi vs.) ve oksijen için akış kanalları bulunmaktadır. Bu kanallar sayesinde yakıt ve oksijen düzgün dağılımlı olarak aktive alan üzerine dağılmaktadır. Bu düzgün dağılım sayesinde hücre performansı ve verimi artmaktadır. Fakat bipolar tabakanın kullanımında yakıt ve oksijenin birbirine karışmamasına dikkat edilmelidir. Aksi

takdirde hücre performansı ve verimi olumsuz yönde etkilenir. Bipolar tabakalar sayesinde herhangi bir bölgeye bağlı kalmadan tüm yüzeyden elektrik toplamak mümkündür.

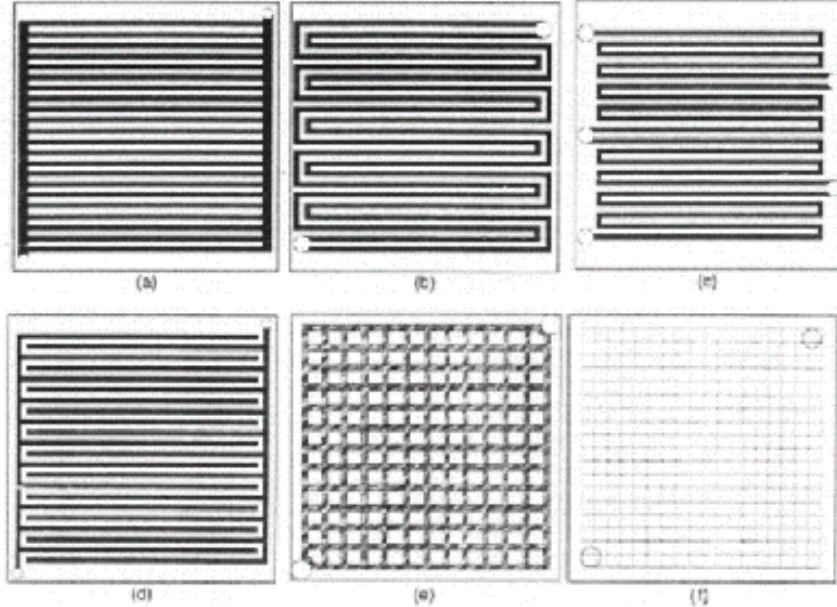
Bipolar tabakalar yakıt pilinin önemli bir elemanıdır ve geliştirilmeleri çok önemlidir. Üç tip malzeme bu geliştirme çalışmalarının içindedir. Bunlar paslanmaz çelik, titanyum ve karbon/grafit kompozitlerdir. Bunların içindeki en iyi iletkenliğe sahip olan karbon/grafit kompozitlerdir. Paslanmaz çelik ve titanyum direk döküm yolu ve tavlama ile plaka haline getirilirken grafit kompozitleri genellikle yüksek basınç altında sıkıştırma (presleme) ve enjeksiyon yöntemiyle imal edilirler. Karbon kompozitlere karşın metal bipolar tabakalar yüksek potansiyelli, maliyet düşürücü ve güç yoğunluğunu arttırabilme olanağı sağlarlar. Metal bipolar tabakaların kanalları takım tezgahları (freze, dik işleme, CNC vs.) ile imal edilebilirler. Karbon kompozitler ise yüksek elektrik iletkenliğine sahip tabakalardır. Yüzey üzerindeki kanallar toz metalürjisine uygun olarak kalıp yardımıyla sıkıştırılarak oluşturulur.

Bipolar tabakaların yapıldığı malzemelerin seçiminde iyi elektrik ve ısı iletimi, gaz geçirgenliği, yeterli, mekanik dayanıklılığı ve kimyasal dengesi, yüksek hacimli imalat yöntemlerinde uygun ve ucuz olmaları, korozyona karşı dayanıklılık ve düşük yoğunluk gibi parametreler malzeme seçiminde önemlidir.

Bipolar tabakaların görevleri

1. Oksijen ve yakıtın aktive alanlara uniform bir şekilde dağılmasını sağlamak
2. Aktif alanlardan ısının atılmasını sağlamak
3. Hücreden hücreye akımın iletilmesini sağlamak
4. Gaz ve yakıtın sızıntısının önlenmesi

Bipolar tabakalar yüzeylerinde tipik akış kanallarına sahiptir. Kanal geometrisi kullanılan sisteme ve ihtiyaca göre anot ve katotta farklı olabilir. Elektrotların üzerindeki akış doğrultusu bağlantı içinde her birinde farklı olabilir. Bipolar tabakaların akış alanı geometrilerinin seçimi ve optimizasyonları yakıt pilinin performansını oldukça etkiler. Temel geometri seçimine ilave olarak kanal boyutları ve kanallar arasındaki akış serpantinleri iyice düşünülerek hesaplanmalıdır. Aksi takdirde rastgele seçimler beklenen hücre verimi ve performans artışını sağlamak yerine tam tersi düşürme etkisi yaratabilir.



Şekil-8.20 Bipolar tabakalarda kullanılan çeşitli kanal tipleri a)Paralel gaz kanalları, b)Serpantin tipi akış kanalı, c)Mirrored akış alanı, d)Parçalı akış alanı, e)Akış kanalsız gaz difüzyon katmanı, f)Metal ağ akış alanı

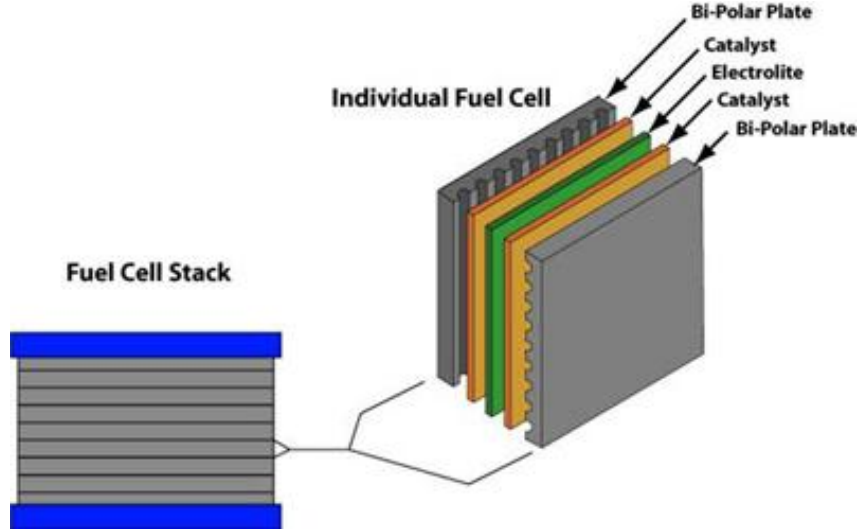


Şekil-8.21 Grafite Bipolar Plakalar



Şekil-8.22 Metalik Bipolar Plakalar

Genel anlamda güç üretim sistemlerinin güç üretimleri devamlı ve bu üretime karşılık olarak da güç yoğunlukları yüksektir. Yakıt pilleri yakıtın beslenmesi ile devamlı olarak güç üreten ve güç yoğunlukları yüksek sistemlerdir. Bu yüksek güç yoğunlukları tekil hücrelerde çok düşük olup (0,1 – 1 V arasında) birleşik hücreler (stack) sayesinde bu değer yükseltilebilmektedir.



Şekil-8.23 Yakıt pili iç yapısı

1839'da keşfedilmiş, 1932'de üzerinde gelişmeler sağlanmış ve 1952 yılında NASA tarafından uzay çalışmalarında enerji sağlayıcı olarak kullanılan yakıt pilleri, 1960'lı yıllarda ilk yakıt hücreli traktör yapımı ile kara ulaşımında kullanıma sunulmuş 1980'li yıllarda yakıt hücreli tren, 1990'lı yıllarda yakıt hücreli denizaltı ve uçak ile gelişim göstermiş son yıllarda kara araçlarında ve güç santrallerinde yaygın araştırma ve uygulama konusudur.

TABLO-8.1 Yakıt pillerinin karşılaştırılması

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

8.7 HİDROJENİN TAŞINMASI

Hidrojen gazı, doğal gaz veya hava gazına benzer olarak borular aracılığıyla her yere kolaylıkla ve güvenli olarak taşınabilmektedir. Hidrojen boru ile taşınmasına, Texas'da petrol sanayi tarafından kullanılmakta olan ve 80 km uzunluğuna sahip boru şebekesi ile Almanya'da Ruhr havzasında 1938 yılında işletmeye açılan ve bugün 15 atmosfer basınç altında hidrojen taşımaya devam eden 204 km'lik boru hattı örnek olarak gösterilebilir. Basınçlı hidrojenin, çelik tüpler içine yerleştirilerek taşınması, bu güne kadar geliştiren bir çok deneme amaçlı hidrojenle çalışan taşıtta kullanılan yöntem olmuştur. Burada görülen en büyük sorun çelik tüplerin kendi ağırlıklarıdır. Benzinli bir otomobil ortalama olarak 65 litre (47kg) benzin almakta olup, bu da enerji olarak 17 kg hidrojene karşılık gelmektedir. Hidrojeni sıvı olarak depolamak ağırlık sorununu çözmekle birlikte, tank hacmi ve maliyet artmaktadır. Diğer bir sorun ise, hidrojenin gaz haline geçmesi ile oluşan kayıplar ve yakıt ikmali zorluğudur.

8.BÖLÜM KAYNAKLARI

<http://www.eie.gov.tr/teknoloji/hidrojen.aspx>

http://www.hidronerji.com.tr/?olay=yakit_pili