

YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİNDEKİ GELİŞMELER VE TAŞITLARA UYGULANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Ramazan ŞENOL, İbrahim ÜÇGÜL

SDÜ YEKARUM

Mustafa ACAR

SDÜ Makina Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Bu çalışmada yakıt pilleri ve taşıtlara uygulanması incelenmiştir. Ayrıca yakıt pilleri ailesinden olan polimer elektrolit plakalı yakıt pilleri ve bu pillerin bileşenleri tartışılmıştır. Çalışmanın son kısmında normal bir taşıt için bir yakıt pili güç hesabı örnek olarak yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen enerjisi, yakıt pilleri, yakıt pilli taşıtlar

ABSTRACT

In this study, fuel cells and their application on vehicles are examined. Also, The Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell which is a member of fuel cell family and components of these cells are discussed. At the end of this study, power of fuel cell which is needed for a normal vehicle, is calculated as an example.

Keywords: Hydrogen energy, fuel cells, fuel cell vehicles

Giriş

İnsanoğlu, sürekli olarak artan enerji ihtiyacını karşılamak için en verimli ve en ekonomik çözüm yollarını ararken, çağın ve geleceğin enerji kaynağının hidrojen olacağına dair inanç, her geçen gün artmaktadır. 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 dönemlerde 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 [1].

Enerji ve çevresel politikadaki çabalar sayesinde

yakıt pilleri ulaşım alanında söz sahibi bir konuma gelmektedir. Araçlarda, spor amaçlı taşıtlarda, kamyonlarda, minibüslerde ve uçaklarda tüketilen enerjinin yaklaşık olarak %97'si halen petrol kökenli kaynaklardan karşılanmaktadır [2]. Çevresel şartlar ve çevrimin durumu gibi parametreler taşıtın yakıt performansını etkilemektedir[3]. 21. yüzyılda hidrojen enerjili taşıtların ticarileştirilmesindeki yarış, Çin, Almanya, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri gibi çeşitli uluslararasıdaki çok güçlü bir rekabet ortamını ortaya çıkarmıştır [4]. Otomobil imalatçıları, yolcu taşıtları için çekiş gücü sağlayacak direkt hidrojen, polimer elektrolit yakıt pilli sistemlerini geliştirmektedirler [5]. Yakıt pilli sistemleri tasarlanırken, farklı tiplerdeki sistemlerin atalet ihtiyaçları da göz önünde bulundurulmalıdır. Mekanik bileşenler, hızlanma, yavaşlama ve bileşenlerin mekanik ataletleri sisteme uygun cevap vermelidir. Tipik bir yolcu taşıtının (1850 kg) 0

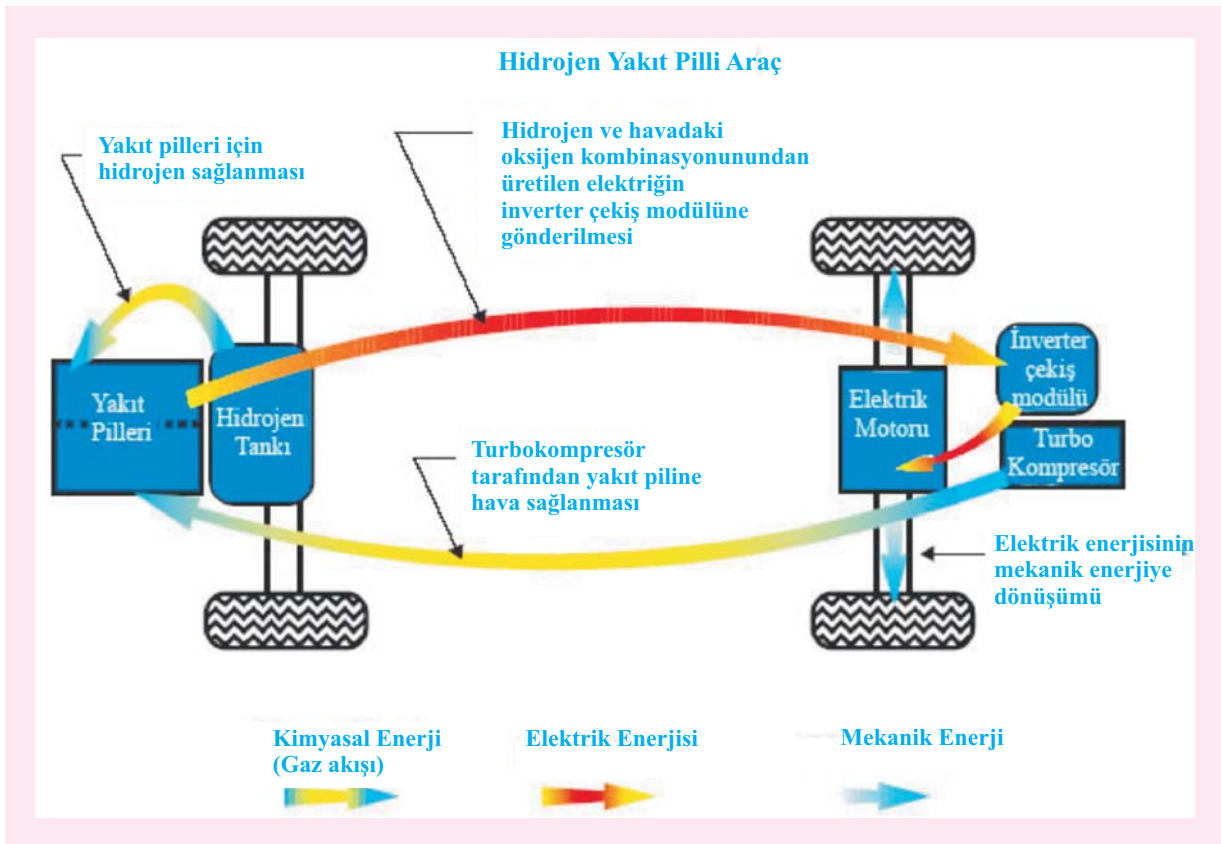
km'den 85 km hıza çıkabilmesi için yaklaşık 500 kJ veya 500 kW'luk bir enerjiye ihtiyacı vardır [6]. Yakıt pillerinin kontrolü, dizaynı ve optimum çalışma durumu için süreksiz hareket durumlarında akım, gerilim ve güç değişikliklerini tam olarak anlayabilmek gerekir. Bu dinamikler konut ve otomotiv uygulamaları için önemlidir. Süreksiz çalışma durumu; ani güç gereksiniminin olduğu durumların ya da taşıtın hızlanması veya yavaşlaması şartlarının bir sonucu olarak ortaya çıkabilir [7].

Polimer elektrolit yakıt pilleri, çeşitli endüstriyel uygulamalara, taşımacılık sektörüne ve konut teknolojilerine uygulanmasında büyük bir potansiyele sahiptir. Bu uygulamaların çoğalmasıyla

çevreye verilen zararın azalması ve ekonominin gelişmesi umut edilmektedir [8].

Tipik bir yakıt pilinin güç yoğunluğu 200Wh/lt'dir. Bu, akülerin güç yoğunluğunun yaklaşık 10 katıdır. Bu yüzden örnek olarak elektrikli araçlarda veya acil durumlar için güç kaynağı olarak ya da 500 kW'luk bir güç kaynağı olarak kullanılabilirler. Bu doğa dostu, yüksek verimli enerji kaynağı gelecek vaat etmekle birlikte yakıt pili güç sistemi kurulmasının yüksek maliyeti, yaygın kullanımını sınırlayan temel sebeplerden biridir [9].

Yakıt pillerinin taşıtlara uygulanması hususunda firmaların geldiği noktaları şöyle özetleyebiliriz. General Motors, "Precept" isimli modelinde 100



Şekil 1. Direkt hidrojen Polimer Elektrolit Yakıt Pili ile Sıfır Emisyonlu Taşıt, P2000, Ford Motor Şirketi [12].

KW'lık PEM yakıt hücresini kullanmıştır. Araç 100 km/h hızına 9 saniyede ulaşırken 800 km'lik bir menzile sahiptir. Ford firması ise “FORD FOCUS FCV” ve “P2000” modellerini geliştirmiştir (Şekil 1). Nissan ise “Xterra FCV” modelini üretmiştir. Daimler-Chrysler ise 2002 yılında yakıt pilli otobüsü geliştirmiştir ve otobüs 300 km menzile sahip olup saatte 80 km hızla gidebilmektedir.

Gelecek için Pazar beklentileri konusunda; aralarında Ford, Daimler-Chrysler, Hyundai, PSA/Renault/Nissan, Honda, BMW, FIAT, Toyota, GM/Mitsubishi gibi pek çok firma ve konsorsiyum çeşitli çalışmalar yürütmektedir.

YAKIT PİLLERİ

Bir yakıt hücresi elektro-kimyasal olarak kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Bununla birlikte dışarıdan sürekli yakıt beslendiğinde elektrik üretimini sürdürebilen böyle bir sistem konvansiyonel güç üretim sistem olarak değerlendirilebilmektedir. Yakıt hücresi, yakıt (hidrojen) ve oksitleyicinin (hava) kimyasal enerjisini doğrudan elektrik ve ısı formunda kullanabilen enerjiye çeviren güç üretim elemanıdır. Yakıt hücreli araçlar, yakıt olarak büyük çoğunlukla hidrojen kullanıldığından, yakıt araca ya direkt hidrojen olarak veya araçta hidrojene dönüştürülen bir hidrojen taşıyıcısıyla verilmektedir. Eğer araca hidrojen direkt verilmek istenirse, metal hidrid (ısıtıldığında içerdiği hidrojeni salan karma bir metaldir) gibi birçok yollarla saklanıp depolanmaktadır. Alternatif olarak, metanol de hidrojen taşıyıcısı olarak kullanılabilir.

Hidrojen metanolün araç üzerinde işlenmesi ile (reforming) elde edilir (metanol bir katalizör yardımıyla, hidrojen ve karbondioksit gaz karışımı üretmek üzere buhar ile reaksiyona girer). Yakıt işlemcisi (reformer) sistemi karmaşık hale getirilmesine rağmen, metanol hidrojenin taşınması ve depolanması kolay olan bir sıvı yakıttır. Fiyat yanında, tüketicilerin büyük ilgisini çeken yakıt hücreli arabaların en önemli nitelikleri, yakıt ekonomisi, performans, yeniden yakıt alma zamanı ve yakıt alma işlemi arasındaki gidilen mesafedir (menzil) [10].

Batarya beslemeli elektrikli taşıtlarda gerekli olan üç dört saatlik batarya şarj süresi yerine, yakıt hücreli arabalar konvansiyonel taşıtlara benzer biçimde bir yakıt istasyonunda birkaç dakika içinde yeniden yakıt depolanabilmektedir. Yakıt hücreli arabanın iki yakıt alma arası gidebileceği mesafe kullandığı yakıt tipine bağlıdır. Hidrojen taşıyıcı olarak metanol kullanıldığında bu mesafe benzinli araçta hemen hemen aynıdır. Eğer depolu hidrojen yakıt olarak kullanılırsa, iki yakıt alma arası mesafe daha düşük olur, çünkü hidrojenin enerji yoğunluğu daha düşüktür. Günümüzdeki yakıt hücreli taşıtlar ile bu mesafenin kabul edilebilir sınırlar içinde kalması, hidrojenin yüksek dirençli hafif malzemeli bir depo içinde yüksek basınçla depolanması ile sağlanabilmektedir. 400 km'lik bir mesafe için gerekli hidrojen, 500 atmosferde karbon fiber kaplı 132-152lt ve 82 kg ağırlığındaki alüminyum bir depo ile sağlanabilmektedir [10].

Hidrojenin araçlarda depolanması hususunda üç

ayrı yöntemden bahsetmek mümkündür. Bunlar; hidrojenin basınçlı gaz olarak depolanması, hidrojenin sıvı olarak depolanması ve hidrojenin metal hidrid şeklinde depolanması olarak sıralanabilir. Bu üç metot içerisinde en ekonomik olanı hidrojenin basınçlı gaz olarak depolanmasıdır ancak hidrojenin enerji yoğunluğunun düşük olması ve taşıt boyutlarına bağlı olarak basınçlı kapların belirli boyutlarda yapılma zorunluluğu sebebi ile depolanan hidrojen miktarı ağırlık olarak yetersiz kalmaktadır. Basınçlı kapların emniyetli olması gerektiğinden kap içerisindeki hidrojen miktarının az olmasına karşın kabın boş ağırlığı fazla olmakta bu durum küçük boyutlardaki taşıtlar için önemli sorunlar ortaya çıkarmakta ve bir depo yakıt ile gidilebilecek mesafe kısalmaktadır. Hidrojenin sıvı olarak depolanması hususunda ise sıvı hidrojenin bilinen yakıtlar içerisinde kaynama noktasındaki yoğunluğu en küçük ve özgül itme kuvvetinin en yüksek olması sebebi ile daha çok roketlerde, süpersonik ve hipersonik uzay araçlarında kullanılmaktadır. Hidrojenin metal hidrid şeklinde depolanması, küçük miktarlardaki hidrojenin depolanmasında önerilen bir yöntemdir. Hidrojen hidrid metallerle veya bu metallerin alaşımlarıyla kimyasal birleşim oluşturarak depolanır. Hafif kütleli olan metal hidridler tercih edilmektedir. Hidridlere ısı verildiğinde hidrojen serbest kalmaktadır. Hidrid oluşturan metaller ve alaşımlar, bir süngerin suyu absorblaması gibi hidrojeni absorbe ederler. Gaz hidrojen katı metallerin kafes şeklindeki iç yapılarına nüfuz edecek kristal yapının çeşitli yerlerine bağlanır [11].

İdeal şartlar altında, Carnot çevriminin teorik termodinamik türevi, bir ısı makinesine verilen toplam ısının tamamının mekanik enerjiye dönüşemediğini, ısının bir kısmının atıldığını göstermektedir. İçten yanmalı bir motorda, yüksek sıcaklıktaki (T_1) bir kaynaktan ısı alınır ve belirli bir bölümü mekanik enerjiye dönüşürken ısının geri kalanı düşük sıcaklıkta (T_2) bir ısı alıcı üzerinden atılır. Kaynak ve ısı alıcı arasındaki daha büyük değerlerdeki sıcaklık farkı, daha fazla verim demektir.

$$\text{Maksimum Verim} = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1}$$

Burada T_1 ve T_2 sıcaklıkları Kelvin derece olarak verilir. Çünkü yakıt pilleri kimyasal enerjiyi direkt olarak elektrik enerjisine çevirirler. Dolayısıyla bu proses ısının mekanik enerjiye dönüşümünü içermez. Yakıt pili verimliliği nispeten düşük sıcaklıklarda çalışıldığı zaman (ör. 80 °C) Carnot limitlerini aşabilir.

- Yakıt pili sistemi elektrokimyasal bir çevrim düzeneğidir. Bu düzenekler, yakıtı güce çeviren içten yanmalı motorlara göre 2-3 kat daha fazla bir verime sahiptir.
- Bir yakıt pilinin nihai ürünleri; elektrik enerjisi, su ve ısıdır.
- Yakıt olarak hidrojen kullanılmış ise emisyon olarak sadece su ortaya çıkar.

Yakıt pilinin anot bölümünden yakıt olarak giren hidrojen, platin katalizörde elektron ve protonlarına (iyonlarına) ayrışır. Hidrojen iyonları membrandan

geçerek katot bölmesinde oksijen ve elektronlarla birleşerek nihai ürün olarak suyu oluşturur. Membrandan geçemeyen elektronlar bir dış devre yardımıyla (bir elektrik motoru ya da diğer elektriksel yükler) anottan katota doğru geçer (Şekil 2). Böylece bir hücre yardımıyla elektrik üretimi sağlanmış olur. Tek bir yakıt hücresinin gerilimi yaklaşık olarak 0,7 Volt'tur. Bu değer bir lamba ya da araba için oldukça düşük bir değerdir. Hücrelerin seri olarak birleştirilip yığınların oluşturulduğu durumlarda bu 0,7 V değeri, yığındaki seri bağlı hücre sayısı ile doğru orantılı olarak artacaktır.

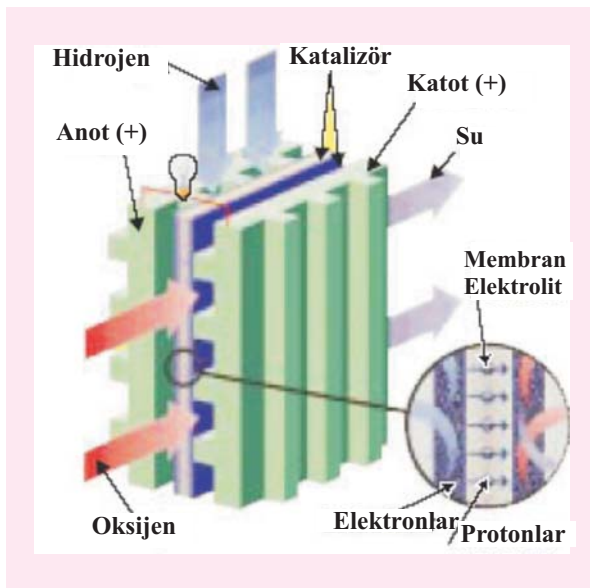
Yakıt pilleri, içten yanmalı motorlar ve aküler aynı genel amaca yönelik çalışırlar yani hepsi de enerjiyi bir formdan başka bir forma dönüştürürler. İçten yanmalı motorlar, yakıtın havadaki oksijenle yakılarak kimyasal enerjinin tahliyesi sonucunda yüksek sıcaklıktaki patlamalar yüzünden gürültülü çalışırlar. Klasik olarak içten yanmalı motorlar, bir güç üretim tesisinde yakıtın kimyasal enerjisinin ısı

enerjisine dönüştürülerek mekanik bir enerji üretimi ve elektriksel bir gücün eldesinde kullanılırlar.

Yakıt pilleri ve aküler elektrokimyasal aygıtlar olup kimyasal enerjiyi direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu yüzden verimleri daha yüksektir. İçten yanmalı motorlarda ise ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümü söz konusudur ve bu dönüşüm Carnot çevrimiyle sınırlı olduğundan verimleri daha düşüktür.

Dünya üzerinde pek çok kişi tüm elektrikli taşıtların akülerle çalıştığı gibi yanlış bir varsayıma sahiptir. Oysaki gerçekte elektrikli bir taşıt ya akülerle ya da yakıt pilleri ile çalışmaktadır. Aküler ve yakıt pillerinin ortak yönleri ise; her ikisi de kimyasal enerjiyi yüksek bir verimde elektrik enerjisine dönüştürürler ve hareketli parçalarının olmayışı sebebi ile minimum bakım masrafı gerektirmeleridir. Elektrikli taşıtlarda depolama elemanı olarak şarj edilebilir aküler kullanılmaktadır. Yakıt pili ile çalışan elektrikli taşıtlarda ise yakıt, araç yakıt tankında harici olarak depolanırken gerekli olan hava ise atmosferden temin edilir. Bu tür uygulamalarda elektrokimyasal aygıtın akü mü yoksa yakıt pili mi olacağına seçimi uygulamanın özelliklerine bağlı olarak seçilmelidir. Geniş ölçekli uygulamalarda yakıt pilleri akülere göre daha avantajlıdır. Örneğin; küçük hacimli boyutları sayesinde daha az yer kaplamaları, daha hafif olmaları, hızlı bir biçimde yakıt beslemesi yapabilmeleri ve uzun ömürlü olmaları bu tür uygulamalarda yakıt pillerini akülere göre daha avantajlı kılmaktadır.

Yakıt pili ve elektrik motoru arasında bulunan güç elektroniği devresi, gerilim değerinin



Şekil 2. Basit Bir Yakıt Pili'nin Bileşenleri [12].

yükseltmesi için doğru akım motorlarında DC/DC çeviriciye, Alternatif akım motorlarında ise DC/AC eviriciye ihtiyaç duyulur. Ayrıca kontrol için mikroişlemci/dijital sinyal işlemcisine, aşırı yüklenme şartları ve rejeneratif frenleme için batarya depolama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır [13].

Polimer elektrolit plakalı yakıt pilleri (PEM), yakıt pili ailesinin beş farklı üyesinden bir tanesidir.

Yakıt pillerini üç ana grup altında sınıflandırmak mümkündür. Bunlar; çalışma sıcaklığı, kullanılan elektrolit çeşidi ve kullanılan hidrojenin elde edilme şeklidir (Tablo 1).

Çalışma sıcaklığına göre yakıt pilleri;

- a) Düşük çalışma sıcaklığında çalışan yakıt pilleri (25-100 °C)

- b) Orta çalışma sıcaklığında çalışan yakıt pilleri (100-500 °C)
 c) Yüksek çalışma sıcaklığında çalışan yakıt pilleri (500-1000 °C)
 d) Çok yüksek çalışma sıcaklığında çalışan yakıt pilleri (1000 °C üzeri)

Kullanılan elektrolit çeşidine göre yakıt pilleri;

- a) Sıvı elektrolitler
 b) Erimiş elektrolitler
 c) Katı elektrolitler

Kullanılan hidrojenin elde edilme şekline göre yakıt pilleri;

- a) Direkt sağlanan hidrojeni kullanan yakıt pilleri
 b) Dolaylı olarak hidrojen sağlanan yakıt pilleri
 b-i Biyokimyasal gazlardan elde edilen hidrojeni kullanan yakıt pilleri

Tablo 1. Yakıt Pili Çeşitleri ve Özellikleri [1]

	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 Yitria (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, Fossil 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

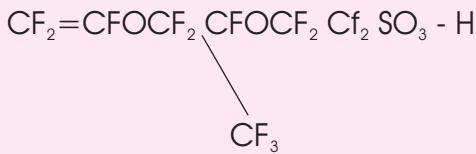
b-ii Reformler yoluyla elde edilen hidrojeni kullanan yakıt pilleri olarak sınıflandırılabilirler [14].

Polimer Elektrolit Plakalı (PEM) Yakıt Pilleri

Bundan on yıl öncesine kadar yakıt pili ile çalışan taşıtlar bir bilim kurgu gibi görünmekteydi. Yakıt pillerindeki son gelişmeler ile taşımacılık işlerinde polimer elektrolit plakalı yakıt pillerinin kullanımı mümkün olabilmektedir. Bu tip yakıt pilleri proton değişim plakalı yakıt pilleri olarak bilindiği gibi katı polimer elektrolit yakıt pilleri (SPE) veya basitçe polimer elektrolit yakıt pili olarak da bilinmektedir. Yakıt pilinin ortasında bir polimer elektrolit plaka bulunur.

Polimer Elektrolit Plaka

Klasik bir elektrolit, suda bulunan pozitif ve negatif iyonlarına çözülmüş bir materyaldir. Bu su eriyiği elektriksel olarak iletkenidir. Elektrolitlerde üretici firmalara bağlı olarak çeşitlilikler görülmekteyse de en yaygın olarak kullanılan DuPont tarafından üretilen Nafion™ dur (Şekil 3). Bu Nafion™ gıdaları korumak için kullanılan plastik sargıya benzetilebilir. Tipik membran materyali plastik sargılara göre daha dayanıklı olup kalınlıkları 50 -175 mikron arasında değişmektedir.



Şekil 3. Nafion Zarin Basit Kimyasal Yapısı [15].

Bugün üzerine yazı yazmak için kullandığımız kâğıdın kalınlığı yaklaşık 25 mikrondur. Yani polimer elektrolit membranlar, 2 ila 7 adet kâğıdın kalınlığı kadar bir kalınlığa sahiptir.

Plaka içinde sadece pozitif iyonlar bulunur ve bu iyonlar membran boyunca serbest olarak hareket edebilirler. Polimer elektrolit plakalı yakıt pillerinde, bu pozitif iyonlar hidrojen iyonları ya da protonlardır. Hidrojen iyonları plaka içerisinde sadece bir yönde, anottan katoda doğru, hareket edebilirler. Bu durum yakıt pilinin temel çalışma prensiplerinden biridir. Bu iyonik hareketin olmadığı bir yakıt pilinde devre, açık devre yani akımın akmadığı devre olarak nitelendirilebilir. Polimer elektrolit plaka çok ince bir yapıya sahip olmasına rağmen etkili bir gaz ayırıştırıcıdır. Plakalar hidrojen yakıtı, oksidant havadan ayrı tutabilme kabiliyetine sahip olup bu özellik yakıt pilinin çalışma verimine esas oluşturmaktadır. Polimer elektrolit plaka iyonik iletken olmasına rağmen elektronları geçirmez. Polimer elektrolit plaka organik doğası gereği elektronik yalıtıcıdır. Bu durum ise yakıt pilinin çalışmasının diğer bir esasıdır. Plakadan geçemeyen elektronlar harici bir devre yardımıyla hücrenin diğer tarafına (katot) alınır ve devrelerini tamamlarlar.

Elektrotlar

Tüm kimyasal reaksiyonlar iki ayrı tepkimeden oluşur; yükseltgenme reaksiyonunun vuku bulunduğu anot ve indirgeme reaksiyonunun vuku bulunduğu katot. Anot ve katot birbirlerinden elektrolit plaka ile ayrılır. Yükseltgenme reaksiyonunda, gaz haldeki hidrojenin ürünü hidrojen iyonlarıdır. Bu iyonlar

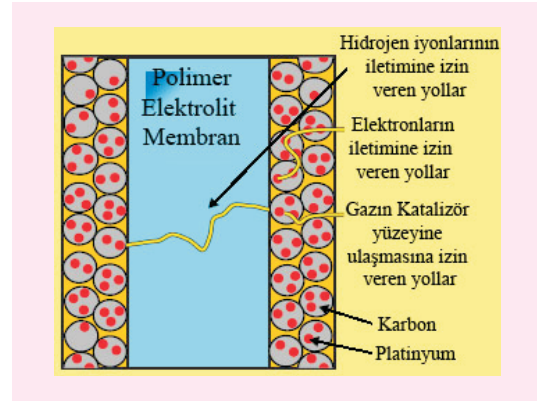
membrandan geçerek katoda ulaşır. Elektronlar ise harici bir devre ile katoda ulaşır. İndirgeme reaksiyonunda, katoda atmosferden sağlanan oksijen, hidrojen iyonları ve elektronlar su formuna dönüşür ve atık ısı meydana çıkar. Bu iki yarım reaksiyon, Polimer elektrolit plakalı yakıt pilinde düşük çalışma sıcaklığında (80°C) oldukça yavaş vuku bulur. Böylece her yarım reaksiyonun oranını artırmak için hem anot hem de katotda katalizör kullanılır. Platin, katalizör olarak her elektrotta da iyi bir şekilde çalışabilecek pahalı bir materyaldir. Tüm bu reaksiyonun en son ürünleri, elektriksel güç, su ve atık ısıdır. Yaklaşık 80°C'deki bir yakıt pili yığı, sıcaklığından dolayı soğutma ihtiyacı duyar. Bu sıcaklıkta katotta ortaya çıkan su ürünü hem sıvı hem buhar durumundadır. Bu su ürünü hava akımı yardımıyla yakıt pilinin dışına taşınır.

Yakıt Pilleri ve “Platinyum”

Her elektrotta vuku bulan yarım reaksiyonlar sadece platinyum katalizör yüzeyinde yüksek bir oranda gerçekleşebilmektedir. Bu tür uygulamalar için Platinyum eşsizdir. Çünkü o, elektrot proseslerinde kolaylık gerektiren H ve O arasındaki bağlanma reaktifliği için yeterlidir. Örneğin; anot prosesinde, H₂ molekülleri tepki verdiğinde hidrojen atomlarının bağlanmasında platinyum yüzeye ihtiyaç duyulur. Anoddaki prosesinde bu H atomlarına optimize (ne çok zayıf ne de çok güçlü) bir bağlantı gerekir ve bu iyi bir katalizörün en önemli özelliği olmalıdır. Polimer elektrolit plakalı yakıt pili için en iyi katalizörü yapmak pahalı olup platin katalizör için maliyet azaltma çabaları sürmektedir. Bunu başarmanın en iyi yollarından

biri, mümkün olan en yüksek yüzey alanı ile katalizör plakası yapmaktır.

Her elektrot çok küçük platin parçacıkları ile bağlanmış olan gözenekli geçirgen karbon içerir (Şekil 4). Elektrot, oldukça gözenekli bir yapıda olup gazlar her elektrottan difüzyon ile katalizöre ulaşır. Platin ve karbonun her ikisi elektronları iyi iletir, böylece elektronlar elektrot boyunca serbestçe hareket edebilir. Platin parçacıklarının boyutlarının küçük oluşu (yaklaşık 2 nanometre çapında) sonucu platinin toplam yüzey alanı oldukça geniştir. Platinin toplam kütesinin küçük olduğu durumda bile, küçük parçacık sayısının oldukça fazla olması nedeni ile toplam yüzey alanı çok geniştir. Bu geniş platin yüzey alanı elektrot reaksiyonlarına müsaade eder. Katalizördeki bu yüksek dağılım bir yakıt pilinde elektron akışının (akım) sağlanmasında önemlidir.



Şekil 4. Gözenekli Elektrotlu Polimer Elektrolit Plaka [12].

Su ve Yakıt Pili Performansı

Bir Polimer elektrolit plakalı yakıt pilinin verimli çalışmasında, suyun idaresi önemlidir. Gazların nemliliği dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir. Suyun az olması, membrandan H⁺ iyonlarının iyi iletilmesini önler ve pilde damlacıklar oluşur [12]. Elektrolitin iyonik iletkenliği membranın tam doygun

olduğu durumda daha yüksektir ve bu durumda akım geçişine gösterilen direnç düşük iken tüm sistemin verimi yüksektir [16]. Eğer katoda hava akımı geçişi yavaş ise, katotta ortaya çıkan suyun tamamı yakıt pilinin dışına hava tarafından taşınmaz ve katotta “taşkın” oluşur. Pil performansı zarar görür. Çünkü yeterli miktarda oksijen katottaki katalizör bölgesine ulaşamamıştır.

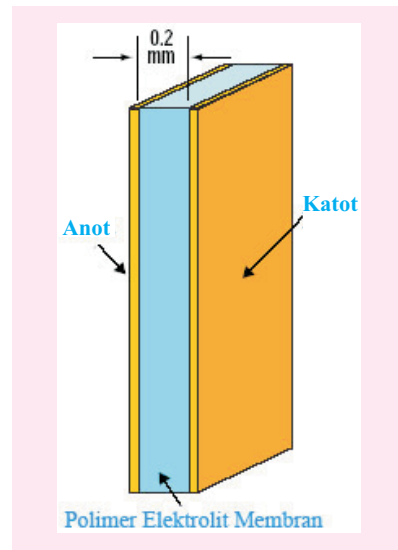
Bir Membran / Elektrot Takımı Yapımı

Membran/elektrot takım yapısı oldukça çeşitlidir. Katalizör malzemesi için, uygun miktarda katalizör (karbon üzerine dağılmış platin tozu) ile alkol içinde çözülmüş membran malzemesi eriyiğinin birlikte dikkatlice karıştırılması sonucunda sıvı formda “mürekkep” hazırlanır. Hazırlanan mürekkep katı membranın yüzeyine farklı yollarla uygulanabilir. En basit metot membranın kuru katı parçası üzerine katalizör “mürekkebin” direkt olarak boyanmasıdır. Islak katalizör katmanı ve membran katalizör katmanı kuruyuncaya kadar ısıtılır. Daha sonra membran ters çevrilerek aynı işlem tekrarlanır. Membranın iki yüzeyi de artık katalizör katmanıdır. Kuru membran / elektrot takımı hafifçe kaynamakta olan seyreltik asit çözeltisi içine daldırılarak hafif nemli olması sağlanır. Son aşama damıtılmış su içinde dikkatli bir çalkalama işidir. Membran / elektrot takımı, yakıt pili sisteminin içine eklenmek için artık hazırdır.

Membran Elektrot Takımı

Anot/membran/katot kombinasyonu membran/elektrot takımı olarak da bilinir. Polimer elektrolit plakalı yakıt pillerinde membran/elektrot

takımlarının gelişimi çeşitli jenerasyonlardan geçmiştir. Orijinal membran/elektrot takımı 1960'lı yıllarda Gemini uzay programı için yapılmış ve membran alanı için cm^2 başına 4 mg platinyum (4 mg/cm^2) kullanılmıştır. Günümüz teknolojisi ile platinyum değeri 4 mg/cm^2 'den yaklaşık $0,5 \text{ mg/cm}^2$ 'ye kadar indirilmiştir (Şekil 5).

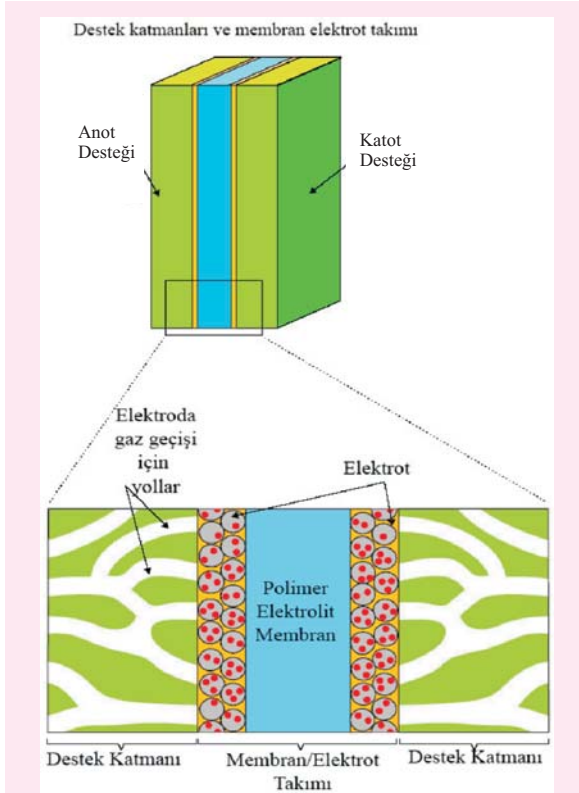


Şekil 5. Membran / Elektrot Takımı[12].

Membran/elektrot takımındaki membranın kalınlığı membranın tipine göre değişiklik gösterir. Katalizör katmanının kalınlığı, her elektrotta ne kadar platinyum kullanıldığına bağlıdır. Katalizör katmanı yaklaşık $0,15 \text{ mgPt/cm}^2$ içermekte ve katalizör katmanının kalınlığı 10 mikron civarı olup bu değer bir yaprak kağıdın kalınlığının yarısından daha azdır. Bu durum, membran/elektrot takımı için yaklaşık 200 mikron ya da 0,2 mm kalınlık değeri ile oldukça şaşırtıcıdır. Bu durumda membran/elektrot takımının her santimetre karesi için yaklaşık 0,5 amperden daha fazla akım ve anot katot arası 0,7 volt'luk bir gerilim eldesi söz konusudur.

Destek Katmanları

Yakıt pilinin donanımları olan; destek katmanları, akış alanları ve akım kollektörleri, bir membran/elektrot takımından elde edilebilecek maksimum akıma göre tasarlanmalıdır. Destek katmanları diye bilinen katmanlardan birisi anotta diğeri ise katotta bulunur ve genellikle gözenekli karbondan ya da karbon örtüden yapılıdır. Kalınlıkları tipik olarak 100-300 mikron (4 ila 12 yaprak kağıt) arasındadır. Destek katmanları, anottan çıkışta ve katoda girişte elektronları geçirebilen, karbon gibi bir malzemeden yapılmalıdır. Destek materyalinin gözenekli yapısı membran/elektrot takımındaki katalizöre her reaktan gazın etkili difüzyonu sağlamalıdır. Destek katmanları yakıt pilinin çalışması süresince suyun idaresini de



Şekil 6. Bir Membran/Elektrot Takımının Genişletilmiş Kesit Görüntüsünde Yapısal Detaylarının Görünümü[12].

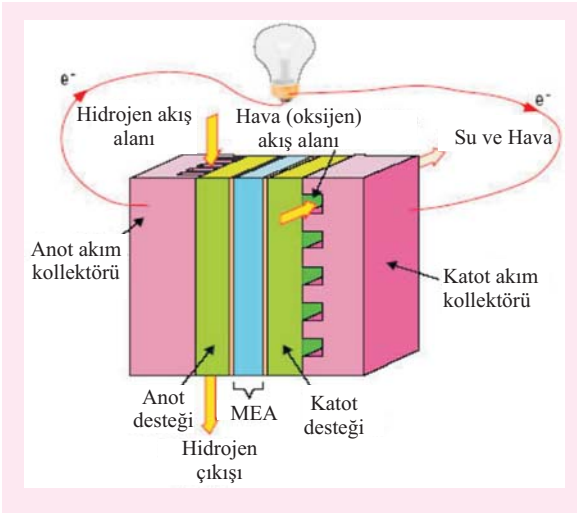
desteklemektedir. Suyun miktarının oldukça düşük veya oldukça yüksek olması pilin çalışmasını durdurabilir. Doğru seçilmiş destek materyali membran/elektrot takımı için gerekli miktarda su buharına izin vermelidir ve böylece membranın nemliliğini koruması sağlanmalıdır. Destek materyali katotta oluşan sıvı haldeki suyun pil dışına atılmasını ve katotta taşkın oluşmamasını sağlar (Şekil 6).

Akış Alanları/Akım Kollektörleri

Plakanın, akış alanı ve akım kollektörü gibi iki ayrı görevi vardır (Şekil7). Tekli bir yakıt pilinde, bu iki plaka pil yapımının son elemanıdır (Şekil 8). Hafif ağırlıkta, güçlü, gaz sızdırmaz kompozit plakalar geliştirilmiş olmasına rağmen genellikle



Şekil 7. Akış Alanları ve Akım Kollektörleri [12]Detaylarının Görünümü[12].



Şekil 8. Tekli Bir Polimer Elektrolit Plakalı Yakıt Pili [12]

kullanılmakta olan grafit ya da metaller gibi elektron iletken malzemelerdir.

Her plakanın ilk görevi gaz akış alanını sağlamaktır. Plakanın destek katmanına bakan yüzüne kanallar açılmıştır. Kanallar yakıt pilinin girişinden çıkışına reaktan gazın taşınmasında kullanılır. Örneğin plakadaki akış alanı, kanalların genişliğine ve derinliğine bağlı olarak membran/elektrot takımının aktif alanı boyunca reaktan gazların dağılımında oldukça etkilidir. Akış alanı tasarımı, membrana su sağlanmasında ve suyun katottan uzaklaştırılmasında etkilidir. Her plakanın ikinci görevi ise akım kollektörü olmasıdır. Akış alanlarının ve akım kollektörlerinin eklenmesi ile Polimer elektrolit plakalı yakıt pili tamamlanmış olur. Artık gerekli olan tek eleman yükün bağlı olduğu dış devre elemanıdır.

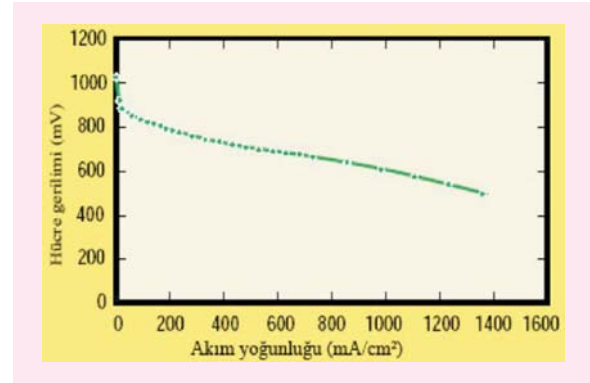
Polimer Elektrolit Yakıt Pilinde Verim, Güç ve Enerji

Bir yakıt pilinde enerji çevrimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\text{Yakıtın Kimyasal Enerjisi} = \text{Elektrik Enerjisi} + \text{Isı Enerjisi}$$

Tekli bir ideal H₂/hava yakıt pili sıfır akımda (açık

devre durumu), 80°C ve 1 atm gaz basıncında 1,16 V sağlamalıdır. Bir yakıt pilinin 0,7 volt'ta çalışması yakıttan elektrik gücüne dönüştürülebilecek mevcut maksimum faydalı enerjinin yaklaşık %60'ının üretilmesi demektir. Eğer aynı pil 0,9 volt'ta çalıştırılırsa maksimum faydalı enerjinin yaklaşık %77,5'i elektriğe dönüşür. Geriye kalan enerji ise (%40 veya %22,5) ısı olarak ortaya çıkar. Bir yakıt pilinin karakteristik performans eğrisi, pil uçlarındaki doğru akım gerilimi ile toplam akım yoğunluğunun membran alanına bölümü ile verilir (Şekil 9).



Şekil 9. Hidrojen/hava Polimer Elektrolit Plakalı Yakıt Pilinde Gerilim ve Akım Yoğunluğu Grafiği [12].

Bir pilin gücü (P, Watt) pilin uçlarındaki gerilim ile (V, Volt) ürünün akımının (I, Amper) çarpımıdır ($P=V \cdot I$). Ayrıca enerji cinsinden güç ($P=E/t$) olup birimi Watt-saat'tir. Bir t periyodu sonunda mevcut güç $E = P \cdot t$ olur. Yüksek spesifik güç ve güç yoğunluğu ulaşım uygulamalarında önemlidir. Ağırlığı minimize etmek ve yakıt pilinin hacmini minimize etmek önemli olduğu kadar maliyetin minimize edilmesi önemlidir. Bir yakıt pili prosesinde mevcut-maksimum gerilimin tahmin edilmesi, prosesdeki reaktanların başlangıç durumu (H₂+1/2O₂) ile son durumu (H₂O) arasındaki enerji farklılığının değerlendirilmesini içerir. Spesifik

sıcaklıkta ve basınçta bir hidrojen/hava yakıt pili reaksiyonu ($H_2 = 1/2O_2 = H_2O$) için maksimum pil gerilimi (ΔE), $E = \frac{-\Delta G}{n \cdot F}$ şeklinde hesaplanır. Burada ΔG ; reaksiyon için Gibbs serbest enerjisi değişimi, n ; reaksiyondaki her mol H_2 için elektron mol sayısı ve F ; faraday sabiti (96,487 Coulombs ve Joules/Volt) dir.

1 atm sabit basınçta yakıt pili prosesinde (her mol H_2 için) gibbs serbest enerji değişimi; reaksiyon sıcaklığı (T), reaksiyondaki entalpi (ΔH) ve entropi (ΔS) değişikliklerinden hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}\Delta G &= \Delta H - T \cdot \Delta S \\ &= -285,800 \text{ J} - (298 \text{ K}) \cdot (-163,2 \text{ J/K}) \\ &= -237,200 \text{ J}\end{aligned}$$

1 atm basınç ve 25°C'deki (298 K) bir hidrojen/hava yakıt pili için hücre gerilimi 1,23 Volttur.

$$\begin{aligned}\Delta E &= -\Delta G / n \cdot F \\ &= -(-237,200 \text{ J}) / (2 \cdot 96,487 \text{ J/V}) \\ &= 1,23 \text{ V}\end{aligned}$$

Bir yakıt pilinin çalışma sıcaklığı oda sıcaklığından daha yukarı çıkacak olursa (80 °C veya 353 K) ΔH ve ΔS değerleri çok az değişirken sıcaklık 55 °C değişir. Böylece mutlak ΔG değeri artar. İyi bir tahmin için ΔH ve ΔS değerlerinin değişmediği varsayılır.

$$\begin{aligned}\Delta G &= [-285,800 \text{ J/mol} (353 \text{ K}) \cdot (-163,2 \text{ J/mol K})] \\ &= -228,200 \text{ J/mol}\end{aligned}$$

Böylece maksimum pil gerilimi standart 1 atm şartı için 25 °C'de 1,23 volttan 80 °C'de 1,18 volta azalmış olur.

$$\begin{aligned}\Delta E &= [(-228,200 \text{ J}) / (2 \cdot 96,487 \text{ J/V})] \\ &= 1,18 \text{ V}\end{aligned}$$

Hesaplama saf oksijen yerine hava, kuru gaz yerine nemli hava ve hidrojen kullanılırsa hidrojen/hava yakıt pilinden elde edilebilecek maksimum gerilim değeri 1 atm basınç ve 80 °C'de 1,16 volta düşer.

Tipik şartlar altında; 1 atm basınç ve 80 °C'de 0,7 V ve 0,6 A/cm² akım üreten ve toplam akımı 60 A olan 100 cm²'lik bir yakıt pilinin çalışması ele alındığında, bu pilde üretilen atık ısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

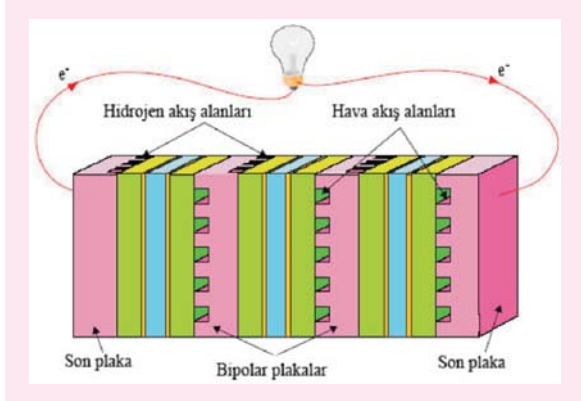
Isıl Güç = Toplam Güç Elektriksel Güç

$$\begin{aligned}P_{\text{ısı}} &= P_{\text{toplam}} - P_{\text{elektriksel}} \\ &= (V_{\text{ideal}} \cdot I_{\text{pil}}) - (V_{\text{pil}} \cdot I_{\text{pil}}) \\ &= (V_{\text{ideal}} - V_{\text{pil}}) \cdot I_{\text{pil}} \\ &= (1,16 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) \cdot 60 \text{ A} \\ &= 0,46 \text{ V} \cdot 60 \text{ Coulombs/sn} \cdot 60 \text{ sn/dk} \\ &= 1650 \text{ J/dk}\end{aligned}$$

Dakikada 2,5 J elektrik üreten bir pilde her dakikada yaklaşık 1,7 kJ atık ısı üretilmektedir.

Polimer Elektrolit Plakalı Yakıt Pili Yığını

Yakıt pilleri %100'den daha düşük bir verimde çalıştıkları için bir pilin çıkış gerilimi 1,16 V'tan daha azdır. Pek çok uygulamada bu değerden daha yüksek değerlere ihtiyaç duyulur (örneğin ticari bir elektrik motoru 200-300 V'a ihtiyaç duyar). Gerekli olan bu gerilim değeri yakıt pillerinin birbirine seri olarak bağlanması (Şekil 10) ile elde edilebilir ve ortaya çıkan bu sisteme "yığın" adı verilir (Şekil 11). Yığının tüm hacmini ve ağırlığını azaltmak için iki adet akım kollektörü yerine sadece bir adet plaka kullanılır. Bu tip plakalara "Bipolar plaka" denilir.



Şekil 10. İki Bipolar Plakalı ve İki Son Plakalı Üç Hücreli Bir Yakıt Pili Yığını. [12]



Şekil 11. Polimer Elektrolit Plakalı Yakıt Pili Yığını. [12]

Bipolar plakanın gaz geçirmez malzemeden yapılması önemlidir. Gaz ayrışımı olmazsa, elektronlar direkt olarak hidrojen-den oksijene geçer ve bunlara “atık” denilir. Bu atık elektronlar faydalı elektrik işi için harici devreye alınamaz. Bipolar plaka da elektriksel olarak iletken olmalıdır. Çünkü bipolar plakanın anot kısmındaki elektronlar, bipolar plakanın katod kısmına iletilmelidir. İki son plaka, bir dış devre yardımıyla birbirine bağlanır. Bir yığın birkaç pilden yüzlerce ya da daha fazla seri bağlanmış bipolar plakadan oluşabilir. Büyük güç gerektiren uygulamalar için çok sayıda yığın seri ya da paralel bağlanabilir.

YAKIT PILLİ MOTOR

Yakıt pili yığınları, bir yakıt pili motorunun içine entegre edilmelidir. Bu yakıt pili motoru, ağırlık ve

hacim bakımından araba motorları için standart olarak uygun olan boşluğa sığabilmelidir. Motorun çalışmasında emisyonun sıfır ve yakıt pilinin yüksek verimli olması önemlidir. Sonuç olarak, tüm bu gereksinimler yüksek hacimdeki imalatlarda, düşük dizayn maliyeti ve pahalı olmayan parametreler olarak karşılanabilmelidir (Şekil 12).



Şekil 12. Sıvı Metanolün Yakıt Olarak Kullanıldığı Bir Yakıt Pili Motor Diyagramı [12].

SONUÇ

Teknolojik gelişmeler, çevreye zarar vermemesi, hareketli parçasının olmamasından dolayı sessiz çalışması ve diğer elektrikli araçlara göre daha avantajlı olmasından dolayı yakıt pilleri ve taşıtlara uygulanabilirliğindeki rekabet artık açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Çağımızın ve geleceğin enerjisi olan hidrojene ülkemizde de gereken önemin verilmeye başlandığı görülmektedir. Bu alandaki gelişmelerin sürmekte olduğu şu günlerde, normal taşıtlara uygulanabilirliğinin yaygınlaşması ve kullanmakta olduğumuz taşıtların çevreye verdiği zararların bu sistemler vasıtasıyla sıfıra indirilmesi umut edilmektedir.

KAYNAKÇA

1. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü
<http://www.eie.gov.tr/>
2. **Romm, J.**, “The Car and Fuel of The Future”, Energy Policy, Article In Pres, www.elsevier.com
3. **Haraldsson, K., Alvfors, P.**, “Effects of Ambient Conditions on Fuel Cell Vehicle Performance”, Journal of Power Sources 145 (2005) 298306, www.elsevier.com
4. **Solomon, B.D., Banerjee, A.**, “A Global Survey of Hydrogen Energy Research, Development and Policy”, Energy Policy 34 (2006) 781792 www.elsevier.com
5. **Ahluwalia, R.K., Wang, X.**, “Direct Hydrogen Fuel Cell Systems For Hybrid Vehicles”, Journal of Power Sources 139 (2005) 152164, www.elsevier.com
6. **Pischinger, S., Schönfelder, C., Ogrzewalla, J.**, “Analysis of Dynamic Requirements For Fuel Cell Systems For Vehicle Applications”, Journal of Power Sources Xxx (2005) XxxXxx, Article In Pres, www.elsevier.com
7. **Kim, S., Shimpalee, S., Van Zee, J.W.**, “The Effect of Stoichiometry on Dynamic Behavior of A Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) During Load Change”, Journal of Power Sources 135 (2004) 110121, www.elsevier.com
8. **Hayashi, A., Kosugi, T., Yoshida, H.**, “Evaluation of Polymer Electrolyte Fuel Cell Application Technology R&Ds Bygert Analysis”, International Journal of Hydrogen Energy 30 (2005) 931 941 www.elsevier.com
9. **Kulaksız, A.A., Akaya, R.**, “Yakıt Pili Sistemlerinde Güç Elektroniği Uygulamaları”, II.Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi Bildiri Kitabı, 26-27-28 Mayıs 2004 Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
10. **Soylu, Ş., Karabektaş, M., Ermiş, K.**, “Otomobiller İçin Alternatif Enerji Kaynaklarının İncelenmesi”, II.Ulusal Ege Enerji Sempozyumu Ve Sergisi Bildiri Kitabı, 26-27-28 Mayıs 2004 Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
11. [Http://gesk.yildiz.edu.tr](http://gesk.yildiz.edu.tr)
12. **Thomas, S., Zalowitz, M.**, “Fuel Cells Green Power”, Los Alamos National Laboratory in Los Alamos, New Mexico.
13. Elektrikli Araçlar, TÜBİTAK MAM Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze, 2003
14. **Acaroğlu, M.**, “Alternatif Enerji Kaynakları”, Atlas Yayın Dağıtım, Temmuz 2003, İstanbul.
15. **Kellegöz, M., Özkan, İ.**, “Pem (Proton Değişim Zarlı) Yakıt Hücrelerinin Çalışma İlkesi ve Uygulama Alanları”, II.Ulusal Ege Enerji Sempozyumu Ve Sergisi Bildiri Kitabı, 26-27-28 Mayıs 2004, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
16. “Fuel Cell Handbook (Fifth Edition)”, U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy , National Energy Technology Laboratory, October 2000.

Daha Etkin Bir

ODA için

Üyelik

Aidatlarımızı

ÖDEYELİM