

T.C.
MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ ANABİLİM DALI

FOTOVOLTAİK PİLE BESLEMESİ YAPILAN
HİDROJEN PEM YAKIT PİLİ SİSTEMİNİN
VERİMLİĞİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEDAT YASLAN

TEMMUZ 2014

MUĞLA

T.C.
MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ ANABİLİM DALI

FOTOVOLTAİK PİLE BESLEMESİ YAPILAN
HİDROJEN PEM YAKIT PİLİ SİSTEMİNİN
VERİMLİĞİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEDAT YASLAN

TEMMUZ 2014

MUĞLA

MUGLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEZ ONAYI

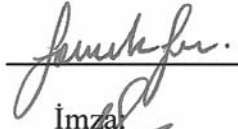
SEDAT YASLAN tarafından hazırlanan **FOTOVOLTAİK PİLLE BESLEMESİ YAPILAN HİDROJEN PEM YAKIT PİLİ SİSTEMİNİN VERİMLİĞİ AÇISINDAN İNCELENMESİ** başlıklı tezinin, 18/07/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Enformatik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans derecesi için gerekli şartları sağladığı oybirliği ile kabul edilmiştir.

TEZ SINAV JURİSİ

Doç. Dr. Faruk ŞEN (Jüri Başkanı)

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:



Yrd. Doç. Dr. Hüseyin GÜRÜLER (Danışman)

Enerji Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

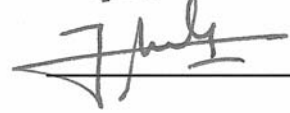
İmza:



Doç. Dr. İbrahim KULA (Üye)

Kimya Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:

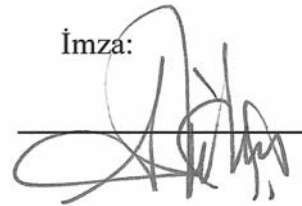


ANA BİLİM DALI BAŞKANLIĞI ONAYI

Doç. Dr. Ali KEÇEBAŞ

Enerji Ana Bilim Dalı Başkanı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:



Savunma Tarihi: 18/07/2014

Tez çalışmalarım sırasında elde ettiğim ve sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgelerin tarafımdan bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde edildiğini; akademik ve bilimsel etik kurallarına uygun olduğunu beyan ederim. Ayrıca, akademik ve bilimsel etik kuralları gereği bu tez çalışması sırasında elde edilmemiş başkalarına ait tüm orijinal bilgi ve sonuçlara atıf yapıldığını da beyan ederim.

Sedat YASLAN

18/07/2014

ÖZET
FOTOVOLTAİK PİLE BESLEMESİ YAPILAN HİDROJEN PEM YAKIT
PİLİ SİSTEMİNİN VERİMLİĞİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

Sedat YASLAN

Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin GÜRÜLER

Temmuz 2014, 67 sayfa

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından polimer elektrolit membranlı (PEM) bir yakıt pilinin ürettiği elektriğin verimliliği ve güç araştırmaları yapılmıştır. Bu bağlamda DC elektriksel analizler (yük testi, güç, akım ve gerilim testleri) ile verimlilik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

H₂/O₂ ve H₂/Hava olarak iki farklı beslemeli PEM yakıt hücresinden alınan ölçümler kullanılarak gerilim-akım ve güç-akım grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen verilerle yakıt hücresinin optimum güç ürettiği bölgeler tespit edilmeye çalışılmış ve iki farklı beslemeli yakıt pilinin verimleri Gibbs serbest enerjisi ile hesaplanmış, çıkan değerlerin gerçeği ne derece yansıttığını bulmak için de H₂/O₂ beslemeli yakıt hücresine bir miktar elektrik enerjisi verilmiş, sonra sistemden alınan elektrik enerjisi bulunarak sistemin gerçek verimi hesaplanmıştır.

Güç-Akım grafiklerinden H₂/O₂ beslemeli yakıt hücresinin ürettiği azami gücün 55,9 mW, H₂/Hava beslemeli yakıt hücresinin ürettiği en fazla güç ise 50,5 mW olarak tespit edilmiştir. H₂/O₂ beslemeli yakıt pilinin verimi %33-61 arasında değişirken, azami güç ürettiği değerdeki veriminin %33 olduğu hesaplanmıştır. Yine aynı paralelde H₂/Hava beslemeli yakıt pilinin veriminin ise %32-62 değerleri arasında değişirken azami güç ürettiği değerdeki veriminin yine %31 olduğu hesaplanmıştır. Sistemin gerçek verimi ise PEM yakıt hücresine ait verilen ve alınan enerjilerin ölçümü sonucunda yaklaşık %29 olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: PEM, hidrojen yakıt hücresi, elektriksel analiz, verimlilik

ABSTRACT
**INVESTIGATION OF THE PHOTOVOLTAIC BATTERY SUPPLIED
HYDROGEN PEM FUEL CELL SYSTEM IN TERMS OF THE
EFFICIENCY**

Sedat YASLAN

Master of Science (M.Sc.)

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Hüseyin GÜRÜLER

July 2014, 67 pages

In this study, the researches for the efficiency and power of PEM FUEL CELL were performed. In this context, electrical analysis and calculations of efficiencies were carried out.

The charts of voltage-current and power-current were drawn via different measurements were taken from feeding by H_2/O_2 and H_2/Air PEM fuel cell. The optimal power producing parts of the fuel cell's were detected by looking at these charts. Fuel cell, which is working by two different feeding methods efficiency was calculated by Gibbs free energy. A different work was done to find out what about the fact of the values that reflect the degree of H_2/O_2 fed to the fuel cell with amount of electric energy. Then, actual efficiency of the system was calculated by finding the electric energy received from the system.

It is detected from the power-current charts that the maximum power of H_2/O_2 and H_2/Air feeding fuel cells are 55.9 mW and 50,5 mW respectively. The performance of H_2/O_2 feeding Fuel Cell is changed between 61%-33%. The efficiency when producing the maximum power was 33%. Similarly, H_2/Air feeding Fuel Cell's performance value is changed between 62%-32%. The real efficiency is 29,02% efficiency when producing the maximum power was 31%. The actual efficiency of the system was calculated to be approximately 29% as a result of the measurement of the energy given and received to PEM Fuel Cell.

Keywords: PEM, Fuel Cell, Electrical Analysis, Efficiency

Sevgili Eşime

ÖNSÖZ

Bu çalışmamda bana, yardımını esirgemeyen, sıcak yaklaşımıyla sabırla yol gösteren, tez danışmanım, Sayın Yrd. Doç.Dr. Hüseyin GÜRÜLER'e teşekkür ederim.

Çalışma süresince özveri ve fedakârlıkta bulunarak sabırla beni destekleyen çok değerli eşime ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1.GİRİŞ	1
2. HİDROJEN ENERJİSİ	4
2.1. Hidrojenin Özellikleri.....	4
2.2. Hidrojen Eldesi.....	6
2.2.1. Sudan hidrojen eldesi	6
2.2.2 Fosil yakıtlardan hidrojen eldesi	8
2.4. Hidrojenin Depolanması, Taşınması ve Güvenliği	12
2.4.1. Hidrojeni depolama yöntemleri	12
2.4.2. Hidrojenin taşınması	17
2.4.3. Hidrojenin güvenliği	18
2.5. Hidrojen enerji sistemi programları	19
2.6. Yakıt Pillerinin Geleceği.....	23
2.7.Hidrojen ve Yakıt Pili Maliyetleri.....	23
2.8. Hidrojenin Çevresel Etkileri.....	24
3. YAKIT PİLLERİ	27
3.2 Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi	28
3.2. Yakıt Hücresi Çeşitleri, Sınıflandırılması Yapısal Bileşenleri Ve Çalışma Prensipleri.....	31
3.3. Kullanılan Elektrolit Çeşidine Göre Yakıt Hücreleri	33
3.3.1. Fosforik asitli yakıt hücresi.....	33
3.3.2. Katı oksit yakıt hücresi	35
3.3.3. Erimiş karbonat yakıt hücresi	37
3.3.4. Doğrudan metanol yakıt hücresi	40
3.3.5. Alkali yakıt hücresi	41
3.3.6. Proton değişim zarlı yakıt hücresi.....	44

3.4.Yakıt Pillerinin Üstünlükleri	45
4. PEM YAKIT HÜCRESİNİN VERİMLİLİK HESABI VE PERFORMANSI	47
4.1. PEM Yakıt Hücresinin Verimlilik Hesabı.....	47
4.2. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresinin Performansı	48
5. BULGULAR.....	51
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Hidrojen özellikleri	5
Çizelge 2.2. Hidrojen, benzin ve metanın karşılaştırmalı yakıt özellikleri	6
Çizelge 2.3. Enerji sistemlerinde ortaya çıkan kirletici miktarları.....	25
Çizelge 3.1. Yakıt hücresi çeşitlerinin karşılaştırmalı temel özellikleri	32
Çizelge 5.1. Hidrojen/oksijen beslemeli PEM yakıt hücresinin azalan yük dirençlerine göre ölçülen A, V ve hesaplanan P değerleri.	51
Çizelge 5.2. Hidrojen/hava beslemeli PEM yakıt hücresinin azalan yük dirençlerine göre ölçülen A, V ve hesaplanan P değerleri.	53
Çizelge 5.3. PEM yakıt hücresine zamana bağlı verilen elektrik enerjisine ve üzerinden geçen akım şiddetine ait değerler.....	56
Çizelge 5.4. PEM yakıt hücresinden zamana bağlı olarak alınan enerji ve ürettiği akım değerleri.	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kısmi oksijenlenme öbek resmi Steinberg, Cheng (1998).	10
Şekil 2.2. Kömür gazlaştırılması öbek resmi Steinberg, Cheng (1998).....	10
Şekil 2.3. Doğal gazlardan buharlaştırma ile H ₂ elde edilmesi öbek resmi Steinberg, Cheng (1998).	11
Şekil 2.4. Karbon nano tüpün temsili büyültülmüş şekli.	16
Şekil 2.5. Siemens'in 250 kW'lık gaz türbinli, yakıt hücreli bir kojenerasyon sisteminin görüntüsü	20
Şekil 2.6. Atmosferik CO ₂ Derişiminin Hidrojene Geçiş Değişimi	26
Şekil 3.1. 1839 yılında Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi.	29
Şekil 3.2. FAYH genel yapısı.	34
Şekil 3.3. KOYH genel yapısı.	37
Şekil 3.4. EKYH genel yapısı.	39
Şekil 3.5. DMYH genel yapısı.	41
Şekil 3.6. AYH genel yapısı.	43
Şekil 3.7. PDZYH genel yapısı.	44
Şekil 4.1. Yakıt pili ideal ve gerçek voltaj-akım karakteristiği	48
Şekil 5.1. PEMYH ölçümlerini almak için kurulan devrenin şematik gösterimi.	49
Şekil 5.2. PEM yakıt pili deney düzeneği	50
Şekil 5.3. Hidrojen/oksijen beslemeli PEM yakıt hücresinin azalan yük dirençlerine göre V/A grafiği	52
Şekil 5.4. Hidrojen/oksijen beslemeli PEM yakıt hücresinin azalan yük dirençlerine göre P/A grafiği.	52
Şekil 5.5. Hidrojen/hava beslemeli PEM yakıt hücresinin azalan yük dirençlerine göre V/A grafiği	54
Şekil 5.6. Hidrojen/Hava beslemeli PEM yakıt hücresinin azalan yük dirençlerine göre P/A grafiği.	54
Şekil 5.7. PEM yakıt hücresine zamana bağlı verilen elektrik enerjisine ait akım zaman grafiği	57
Şekil 5.8. PEM yakıt hücresinden zamana bağlı olarak alınan enerjiye ait akım zaman grafiği	

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

F	Faraday sabiti
F _{yh}	Yakıt hücresini besleyen yakıtın gücü
H ₂	Hidrojen
I	Akım
m	Hidrojenin moleküler ağırlığı
n	Reaksiyona dahil olan elektronların sayısı
NO _x	Azot oksit türevleri
P _{yh}	Elektriksel güç çıkışı
qH ₂	Elektrokimyasal reaksiyonda hidrojenin tüketim oranı
R	Yük direnci
V	Yakıt hücresinin ürettiği voltaj
ΔH	Entalpi
η_{yh}	Yakıt hücresinin verimi
AYH	Alkali Yakıt Hücresi
°C	Derece celsius
cm	Santimetre
cm ²	Santimetre kare
s	Saniye
DMYH	Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi
EKYH	Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi
F°	Fahrenheit derece
FAYH	Fosforik Asit Yakıt Hücresi
g	Gram
J	Joule
K	Kelvin
kg	Kilo gram
KOYH	Katı Oksit Yakıt Hücresi

km	Kilo metre
kW	Kilo watt
m ³	Metre küp
mm	Mili metre
J	Joule
MW	Mega watt
PDZYH	proton değişim zarlı yakıt hücresi
PEM	Proton exchange membrane
PDZYP	Proton değişim zarlı yakıt pili
yy	Yüzyıl

1.GİRİŞ

Evrenin oluşumu, günümüzde kabul edilen teoriye göre; büyük bir enerji patlaması ve enerjinin maddeye dönüşümü ile olmuştur. İçinde hala patlamaların ve yanmanın gerçekleştiği güneş %73.46 oranında hidrojen bulundurmaktadır. Enerjiden maddesel ortama geçişini tamamlamış dünyamızda ise hidrojen (H_2) biatomik gaz halinde bulunur.

Hidrojen dünyada en çok bulunan üçüncü elementtir. Yeryüzündeki hidrojen; su, hidrokarbonlar gibi kimyasal bileşiklerin içinde bulunur. Hidrojen atomu ve H_2 molekülü uzayın maddesel ortamında bolca bulunduğu halde dünyada H_2 eldesi ve saflaştırılması için çeşitli işlemler gerekmektedir.

Günümüzde kullanılan enerjinin büyük bölümü fosil yakıtlardan (kömür, petrol ve doğal gaz gibi) sağlanmaktadır. Fosil yakıtların sebep olduğu hava kirliliği ve dünyanın ekolojik dengesine verdiği zararlar son yıllarda daha iyi anlaşılmıştır. Dünyadaki fosil yakıt kaynakları hızla tükenmektedir. Gelecekte giderek artan enerji ihtiyacının nasıl karşılanacağı insanları araştırmaya sevk eden bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda hidrojeni önemli kılan sahip olduğu enerji ve bu enerjini kullanımında çevreyi kirletmemesidir. Diğer taraftan iklim değişikliği küresel ısınma gibi olumsuz çevresel etkilerin ciddi bir şekilde artması CO_2 salınımı gibi bazı tedbir, planlama ve yaptırımları ülkeler için gerekli kılmaktadır. Sanayileşmenin, ulaşım araçları sayısının ve şehirlerdeki nüfusun artışı sebebiyle enerji talebindeki artış enerji kaynaklarının sınırlılığı, fosil yakıtlara talebin artması ve enerjiye erişimin getirdiği maliyet gibi birçok sorun ve kaygıyı beraberinde getirmektedir. TÜİK verilerinde göre; 2014 Nisan ayı sonu itibarıyla trafiğe kayıtlı araç sayısının 17,3 milyon olması ve geçen yılın aynı ayına göre artışın yüzde 13,6 olması, 2008 Türkiye Nüfus ve Sağlık Araştırması revize edilen kesin sonuçlarına göre 2015'te nüfusun %11,4 artması ve 2025 yılında nüfusun 85,4 milyon civarı olarak beklenmesi, Türkiye'deki şu an kullanılan enerji kaynaklarının yetersiz kalması, ithalatın artması

ile cari açığın fazlalaşması ve ithalatı gerçekleştirildiği ülkeler ve enerji hatlarının geçtiği ülkelerdeki siyasi belirsizlikler de bunu doğrular niteliktedir . (Anonim, 2014a)

Fosil yakıtlara alternatif olan diğer yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgar, jeotermal, hidroelektrik, biokütle ve nükleer enerji gözükmektedir. Fakat bu kaynaklardan hiçbirisi fosil yakıtların en önemli kullanım alanı olan içten yanmalı motorların kullanıldığı ulaşım araçlarına uygun değildir. Bundan dolayı yeni enerji arayışının ürünü olarak suyun bileşenlerini sentezleyen yakıt pilleri ortaya çıkmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş pilleri, gündüz gece zamanına ve mevsimlere ve bulutlara göre farklılık gösteren ışık şiddetine bağlı olarak elektrik enerjisi üretirler. Bir rüzgâr türbinininden alınacak elektrik enerjisi de, rüzgâr hızına dolayısıyla iklim şartlarına bağlıdır. Fakat yakıt pilleri, iklim şartlarından bağımsız, gereksinim duyulan yerde kesintisiz olarak enerji üretimine olanak sağlayabilmektedirler. Bu durum da hidrojen gazını yenilenebilir enerji kaynakları içinde özel bir yere sahip kılar. Bu nedenlerle yakıt hücreleri ile ilgili olarak, hızla artan bir biçimde, araştırma ve geliştirme (AR-GE) çalışmaları yapılmaktadır.

Hidrojen içten yanmalı motorlarda olduğu gibi yakıt olarak kullanılabilir. Ancak daha verimli olarak proton değişimli bir üniteye yakıt olarak kullanılmakta ve elektrik enerjisi elde edilmektedir. Bu proton değişimli ünite (PEM) yakıt pili-yakıt hücresi olarak tanımlanmaktadır. Bağımsız ve menkul enerji üretimine olanak sağlayan yakıt hücreleri, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de giderek önem kazanarak ulaşım araçları ve sabit uygulamaları için potansiyel bir güç kaynağı olarak oldukça dikkat çekmektedir. Şu anda gelinen noktada hidrojenli araçların seri üretimi mümkündür. Artık çalışmaların yönü maliyetin düşürülmesine, hidrojenin taşınmasına, depolanmasına, altyapıya ve dolum istasyonlarına doğru kaymıştır.

Yakıt pilleri, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip enerji dönüşüm teknolojileridir. Termal yolla buhar eldesi ve depolanması veya mekaniklikten dolayı enerji kaybının yaşandığı türbin kullanılmadan, sadece kimyasal reaksiyon ile elektrik enerjisi üretilir. H_2 ve O_2 arasındaki elektrokimyasal reaksiyon ile elde edilen ve toplam verimlilikleri % 80'lere kadar ulaşabilen yakıt pilleri, aküler gibi

kısa süreli değil, sürekli çalışan piller veya elektrokimyasal makinalar olarak da bilinir.

Bu çalışmanın amacı, gelecekte fosil yakıtların yerini alacak birinci alternatif yakıt türü olarak düşünülen hidrojen enerjisi ve bu enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan yakıt pilleri hakkında elektriksel ve verimlilik analizleri gerçekleştirmektir.

Tezin ikinci bölümde hidrojenin özellikleri, hidrojenin elde yöntemleri, hidrojenin depolanması, taşınması ve güvenliğine yer verilmiştir. Üçüncü bölüm yakıt pillerine ayrılmıştır. Bu bölümde yakıt pillerinin çalışma prensipleri ve üstünlükleri hakkında genel bilgi verilmiş, kullandıkları elektrot esas alınarak sınıflandırılmış, yakıt pillerinin karakter özellikleri ve çalışma şekilleri ortaya konulmuştur. Dördüncü bölümde üzerinde yoğun şekilde çalışmalar yapılan PEM yakıt piline yer verilmiştir. PEM yakıt pillerinin kimyasal olarak çalışma sistemi, elektrot yapısı, incelenmiştir. Beşinci bölümde PEM yakıt pili sistemi üzerinde gerçekleştirilen elektriksel ölçüm ve hesaplamalar verilmiş grafikler çizilerek güç analizi yapılmıştır. Deneysel çalışmada elektroliz yoluyla hidrojen elde edilmiş ve bu hidrojen kullanılarak PEM yakıt pilinden alınan enerjinin zamana göre grafiği çıkarılmış gerçek verimi bulunmuştur. Tezin son bölümünü oluşturan altıncı bölümde ise çalışmaya ilişkin değerlendirme ve sonuçlar aktarılmıştır.

2. HİDROJEN ENERJİSİ

Yaşamımızın vazgeçilmez bir parçası olan enerji son tüketiciye "yakıt" ve/veya "elektrik" biçiminde sunulmaktadır. İkincil enerji olan elektriğin, çeşitli kullanım avantajlarının bulunmasına karşın, teknoloji elektriğe bağlı olduğu kadar, yakıtta da bağlı olarak gelişmiştir. Birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesi ile elde edilen ikincil enerjilere, "enerji taşıyıcısı" da denir. Elektrik 20.yy'a damgasını vuran bir enerji taşıyıcısı olmasına karşın hidrojen 21.yy'a damgasını vuracak bir enerji taşıyıcısıdır (Ün, 2003 b).

Hidrojen bir doğal yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak su, fosil yakıtlar ve biokütle gibi değişik hammaddelerden üretilen organik olmayan bir yakıt türüdür. Hidrojen aşağıda sıralandığı gibi çeşitli avantajlara sahip bir *enerji taşıyıcısıdır*.

2.1. Hidrojenin Özellikleri

Hidrojen bir proton ve bir elektrona sahip bir elementtir. Evrende %90'dan fazla hidrojen bulunmaktadır. Güneş ve diğer yıldızların termonükleer tepkimeye vermiş olduğu ısının yakıtı da yine hidrojen olup, evrenin temel enerji kaynağıdır. Hidrojen, periyodik tabloda 1A grubunda olmasına karşın ametaldır. Kokusuz ve renksiz olan hidrojen gazı oksijenle birleştiğinde canlılar için en önemli madde olan su elde edilmektedir.

Doğada hidrojenin 3 izotopu vardır. Bunlar: Protium, Döteryum (deuterium) ve Tritium (tritium) dur. 1/5000 oranında hidrojen atomunun çekirdeğinde bir de nötron bulunur. Bu durumdaki hidrojen atomuna döteryum adı verilir. D ile sembolize edilen ve ağır hidrojen olarak da bilinen döteryum (^2H), hidrojenin önemli bir izotopu olup, okyanuslarda büyük miktarda bulunur ve bu izotopun zenginleştirilmesi ve oksijenle

birleştirilmesinden elde edilen suya da “ağır su” denilir. Hidrojenin çok daha az bulunan ve T ile sembolize edilen trityum (^3H) izotopu ise çekirdeğinde iki nötron bulundurmaktadır (Türe, 2001).

Çizelge 2.1. Hidrojen özellikleri

		Birimi
Molekül Ağırlığı	2.016	Kg/Kmol
Yoğunluğu	0.0838	Kg/m ³
Üst Isıl Değer (Kütlesel)	141.9	MJ/Kg
Üst Isıl Değer (Hacimsel)	11.89	Mj/m ³
Alt Isıl Değer (Kütlesel)	119.9	MJ/Kg
Alt Isıl Değer (Hacimsel)	10.05	Mj/m ³
Kaynama Sıcaklığı	20.3	K
Sıvı Yoğunluğu	70.8	Kg/m ³
Kritik Noktadaki Sıcaklık	32.94	K
Kritik Noktadaki Basınç	12.84	Bar
Kritik Noktadaki Yoğunluk	31.40	Kg/m ³
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı	858	K
Havada Tutuşma Limitleri	4-75	% Hacimsel
Havadaki Stokiometrik Karışım	29.53	% Hacimsel
Havadaki Alev Sıcaklığı	2318	K
Difüzyon Katsayısı	0,61	Cm ² /s
Özgül Isısı	14.89	KJ/Kg.K

Hidrojenin molekül ağırlığı 2,016 akb olup en hafif elementtir. Yoğunluğu havanın 1/14’ü (Normal şartlar altında 0,08376 kg/m³) olup, doğal gazın 1/9’u kadardır. Hidrojen çoğu yakıttan daha yüksek enerjiye sahip bir moleküldür. Hidrojenin enerji kapasitesi 141,9 MJ/kg olup benzinin neredeyse 3 katına eşittir.

1 Atmosfer basınç ve -252,87°C’a (20,28°K) soğutulduğunda sıvı hale gelen hidrojenin yoğunluğu ise benzinin yoğunluğunun(~0,72gr/cm³)1/10 kadar olmaktadır. Hidrojen gazının ısı değeri metreküp başına yaklaşık 12 MJ olarak verilmiştir. Sıvı hidrojenin ısı değeri ise metreküp başına 8400 MJ veya kilogram başına 120 MJ olarak bulunmuştur (Türe, 2001).

Hasılı, Hidrojen enerjisi, güneş enerjisi devam ettiği sürece, dünyanın enerji sorununu çözmek için kullanılacaktır. Ayrıca okyanuslardan elde edilecek hidrojen tutarı, milyarlarca yıl yetecek enerjiyi devamlı olarak üretebilecek niteliktedir. Hidrojenin yakıt olarak bazı özellikleri benzin, metan gibi yakıtlarla karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.2.’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Hidrojen, benzin ve metanın karşılaştırmalı yakıt özellikleri

Özellik	Birimler	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk	(kg/m ³)	4.40	0.65	0.084
Hava içindeki difüzyonu	(cm ² /s)	0.05	0.16	0.61
Sabit basınçta özgül ısısı	(J.g/K)	1.20	2.22	14.89
Hava da ateşlenme sınırı	(%hacim)	1.0-7.6	5.3-15.0	4.0-75.0
Havada ateşlenme enerjisi	(mJ)	0.24	0.29	0.02
Ateşlenme sıcaklığı	(°C)	228-471	540	585
Hava da alev sıcaklığı	(°C)	2197	1875	2045
Patlama enerjisi	(g.TNT . k/j)	0.25	0.19	0.17

2.2. Hidrojen Eldesi

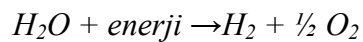
Evrenin en bol elementi Hidrojen olmasına rağmen atmosferdeki derişimi milyonda birden daha da azdır. Doğada fosil yakıtlar gibi yüksek derişimde bulunmamaktadır. Hidrojen çoğu kimyasal bileşiklere kimyasal bağla bağlıdır. Bu nedenle büyük ölçekli kullanımı için bitkiler, su, kömür veya doğal gaz gibi kaynaklardan özütlenmektedir. Özütleme sürecinde önemli miktarda enerji tüketildiğinden, hidrojen bir enerji kaynağı olmaktan çok bir enerji taşıyıcısı olarak düşünülmektedir. Bu noktada hidrojenin nasıl üretildiği büyük önem taşımaktadır (Ün, 2003b). Aşağıda hidrojen eldesi metotlarından bahsedilecektir.

2.2.1. Sudan hidrojen eldesi

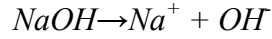
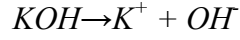
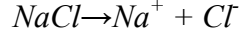
Dünyadaki en büyük hidrojen kaynağı su olarak bilinmektedir. Hidrojen elde edilmesinde su önemli bir kaynak olarak görülmektedir. Sudan hidrojen elde yöntemleri aşağıda belirtilmektedir.

- **Electrolysis:**

Elektroliz en çok bilinen, kullanılan ve fosil yakıtlardan hidrojen elde etme yöntemi uygulamasından 50 yıl önce kullanılan bir yöntemdir. Suyun elektrolizi, suyu oksijen ve hidrojene ayırmak anlamına gelir. Burada suya (1.75-2.05V) arasında gerilim uygulanır ve sonuçta ürün olarak H₂ ve O₂ molekülleri oluşur. Aşağıda suyun elektroliz kimyasal tepkime denklemi verilmiştir.

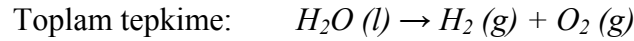
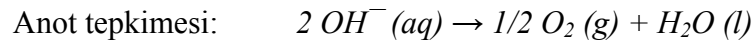
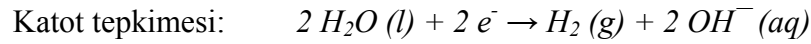


İki mol H₂O'nun elektrolizi sonucu iki mol H₂ bir mol O₂ oluşur. Elektrolizde anot ve katot arasında oluşan elektron akımı ile hidrojen oluşturulur. Su içine KOH (potasyum hidroksit, baz), NaOH (sodyum hidroksit, baz), NaCl (sodyum klorür) gibi suda kolayca iyonlaşabilen iyonik yapıli bileşikler ilave edilerek,



çözeltilinin elektrik iletkenliğı arttırılır.

Sudaki elektrolizin işlem basamakları ise;



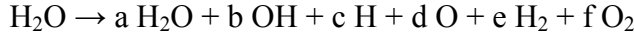
Elektroliz devrelerini kullandıkları elektrolite göre sınıflandırılabilir. Yakıt hücrelerinde suyun analizi ve sentezi yapılabilir. Aynen yakıt hücrelerinde olduğu gibi istenen kapasiteyi elde edebilmek için birçok hücre birbirine bağlanabilir Yakıt hücrelerinde düz seri bağlandıkça gerilim paralel bağlandıkça alınan akım arttırıla bilinir (Kruse, 2002).

- **Thermolysis (Doğrudan ısıl ayrıştırma):**

Su, 2000°K üzerinde kendiliğinden hidrojen ve oksijen atomlarına ayrışmaya başlar. Ancak ısı arttıkça verimlilik artar 2000K %1, 2500K %8.5, 3000K %24. Çok yüksek sıcaklıklarda verimli sonuçlar elde edilmesi bu yöntemin en büyük dezavantajıdır (Baykara ve Bilgen, 1989).

Direk ısıl ayrışmanın düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi için su içerisine kimyasal maddeler katılması gerekmektedir. Su içerisine kimyasal maddeler karıştırılarak düşük ısılarda direk ısıl ayrışma gerçekleştirilmesine termokimyasal dönüşüm denir.

1960'lerden beri kullanılan bir yöntemdir. Ancak verimliliğin istenen düzeyde olması için 2000-3000 kez işlemin tekrarlanması gerekebilmektedir (Engels, 1987).



- **Photolysis (güneş ışığı ile elektroliz):**

Bu foto işlem genellikle güneş ışığını kullanarak su veya biokütleden hidrojen üreten süreçlerdir ve üç ana kategoriye ayrılır. Bunlardan birincisi olan fotobiolojik teknikler bazı bakteri (siyanobakteri), alg (yosun: *Chlamydomonas reinhardtii*) ve bitkiler ile fotosentez döngüsüne dayanır. Fotobiolojik hidrojen üretiminin verimi sadece %1-5 arasındadır. Diğer foto süreç olan fotokimyasal süreçler, sentetik molekülleri kullanarak doğal fotosentezi taklit eder. Bu teknik sadece %0,1 verimlidir. Üçüncü foto süreç olan foto elektrokimyasal süreçte yarı iletken maddeler ışığa maruz kaldığında gerilim farkı meydana getirir ve buda suyun hidrojen ve oksijene parçalanmasını sağlar. Günümüzde hidrojen araştırma programlarının çoğu foto süreçlerden oluşmaktadır (Dinçer, 2002; Ün, 2003 b).

- **Radiolysis:**

Bu metotta nükleer reaktörde üretilen yüksek enerjili parçacıkların çarpışması ile su molekülleri parçalanır. Üretilen hidrojen ve oksijen atomları tekrar su oluşturmak üzere çok çabuk bir araya geldikleri için radyoliz verimi %1 civarındadır (Dincer, 2002; Ün, 2003 b).

- **Solar Hydrogen**

Bu yöntemde fotovoltaiik hücreler kullanılarak güneş ışığından üretilen elektrik ile su elektroliz edilir. Genellikle solar hidrojen terimi rüzgâr gibi diğer yenilenebilir kaynaklı elektrikle suyun elektrolizinden elde edilen hidrojen için de kullanılmaktadır. Fosil yakıt yerine yenilenebilir enerji kaynağının kullanımı çevresel yararından dolayı oldukça ilgi çekmektedir (Dinçer, 2002; Ün, 2003 b).

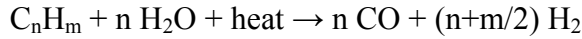
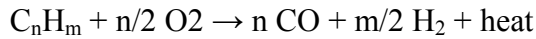
2.2.2 Fosil yakıtlardan hidrojen eldesi

Hidrojen enerjisi fosil yakıtlara alternatif olarak görülmektedir, ancak hidrojen üretiminde belli bir yeri de fosil yakıtlar almaktadır. Bilindiği üzere fosil yakıtlar içerisinde saf kömür hariç hidrokarbonlar bulunmaktadır. Bu yakıtlardan Hidrojen

çekilip analiz edilebilir. Bu kısımda fosil yakıtlardan hidrojen gazı elde etme yöntemleri yer alacaktır.

- **Hidrokarbonların kısmi oksidasyonu:**

Kısmi oksijenleme doğal gazlardan buharlaştırmanın gerçekleştirilemediği neftyağından daha ağır hidrokarbonlarda (etanol ve benzinde) kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde hidrojen hidrokarbonların katalitik olmayan kısmi oksidasyonundan (örneğin gazifikasyon) elde edilir. Bu teknikte sıkıştırılabilen veya pompalanabilen hidrokarbon kaynağı kullanılmaktadır. Genel olarak kısmi oksijenleme üç basamakta gerçekleştirilir. İlk basamak gaz sentezlenmesi, ikinci basamak su gaz değişimi üçüncü basamak ise gaz saflaştırmasıdır. Bu işlem sırasında sıcaklık 1150-1315°C ye kadar çıkmaktadır. İşlem verimliliği %50 olup hidrojen maliyeti 4\$/GJ dür ve saf oksijen gereklidir (Dincer 2002; Ün, 2003b).

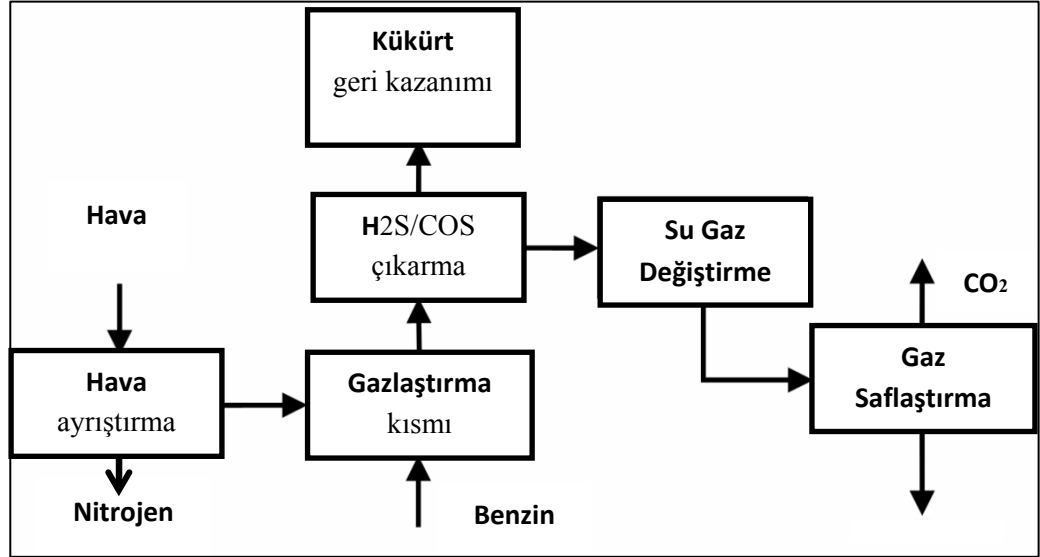


(artık fueloil de $n=1$ ve $m=1.3$)

Bu dönüşümü kullanan iki ticari teknolojidenden biri Texaco gazifikasyon diğeri Shell gazifikasyon sürecidir.

- **Doğal gazlarda ısı parçalaması:**

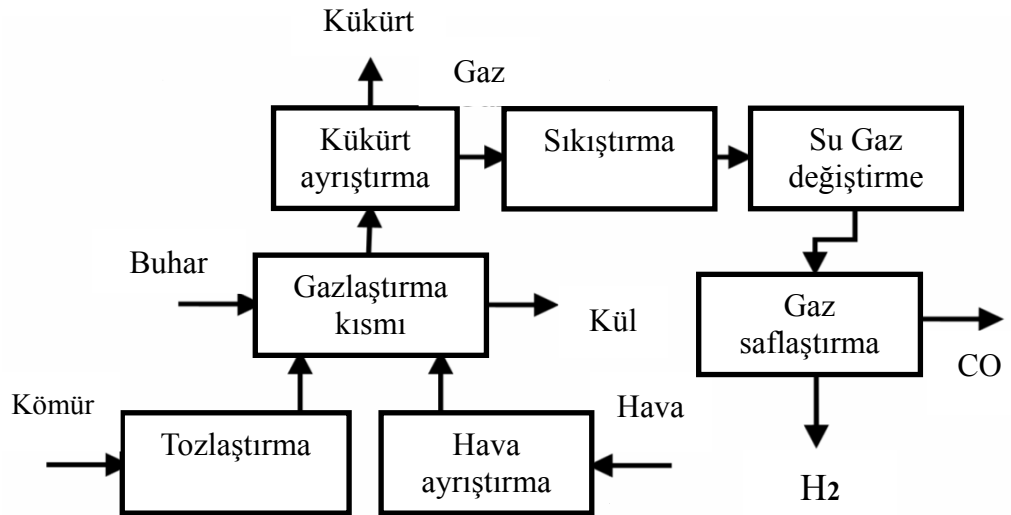
Doğal gaz 1400°C kadar sıcak hava ile ısıtılır ve hava akımı kesilir. Metan gazı bu sıcaklıkta ayrılır. Daha sonra ısı 800°C ye düşürülür ve hidrojen ayrıştırılır. Bu işlemde CO₂ oluşmaz.



Şekil 2.1. Kısmi oksijenlenme öbek resmi (Steinberg ve Cheng, 1998)

- **Kömür gazlaştırması (Koppers-Totzek process):**

Toz haline getirilen kömür sıcak buhar yardımıyla yakılarak kül haline getirilir ve kükürtün ayrışması sağlanır oluşan ürün su ile saflaştırılarak karbonmonoksit ve hidrojenin ayrıştırılması sağlanır. Bu işlemde verimlilik %97 olup hidrojen maliyeti 12\$/GJ dir.

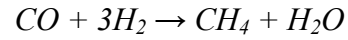
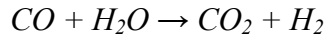
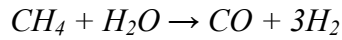


Şekil 2.2. Kömür gazlaştırması öbek resmi (Steinberg ve Cheng 1998)

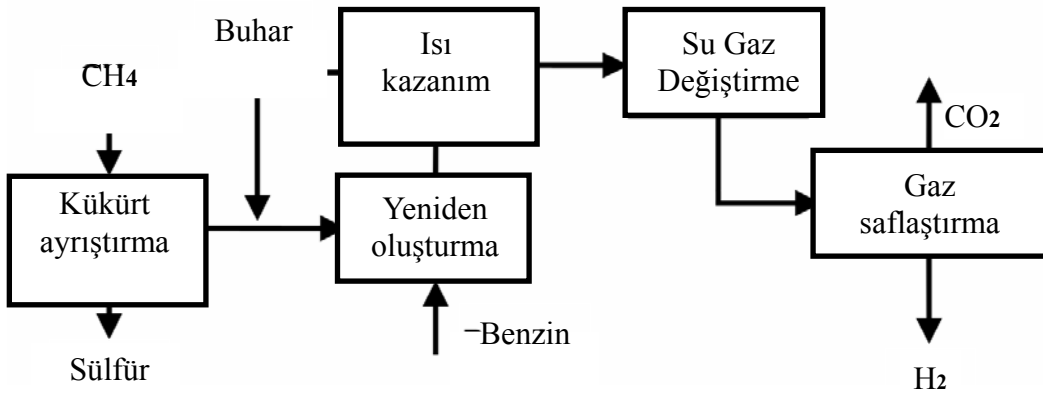
- **Buhar iyileştirme:**

Doğal gazın buhar iyileştirmesi, halen hidrojen üretmek için en ucuz yoldur ve dünyadaki hidrojen üretiminin yarısını kapsamaktadır. 3-25 bar basınçlı bir reaktörde, metan gazı bir katalizör eşliğinde 700-1000°C'daki buhar ile beslenir. İşlem verimliliği %65-75 olup hidrojen maliyeti 6\$/GJ'dur. Reaksiyon işlemlerinin bir parçası olan doğal gaza ek olarak, reaksiyonu gerçekleştirecek enerjiyi elde etmek için fazladan 1/3 doğal gaz kullanılır. Verimi arttırmak için hali hazırda yeni yöntemler geliştirilmektedir ve ısıtma işlemini maksimize etmek, iyileştirmeyi 85%'in üzerine çekmeyi bununla birlikte hala bir kar sağlamayı mümkün kılmaktadır

Doğal gaz, başlıca metan ile bazı daha ağır hidrokarbonlar ve CO₂'nin bir karışımından oluşur. Metan yüksek sıcaklıkta buhar uygulanması ile hidrojen ve karbon oksitler oluşturur. Doğal gazlardan buharlaştırma en etkili ve verimli hidrojen elde etme yöntemidir. İlk basamak gaz sentezlenmesi, ikinci basamak su gaz değişimi üçüncü basamak ise gaz saflaştırmasıdır. Kimyasal reaksiyonun formülü;



Toplam tepkimede bir mol metanla dört mol hidrojen üretilir (Kruse, 2002).



Şekil 2.3. Doğal gazlardan buharlaştırma ile H₂ elde edilmesi öbek resmi (Steinberg ve Cheng 1998).

- **Atık Gazların Saflaştırılması:**

Petrol rafinerileri ve bazı kimyasal tesisler gibi birçok endüstrinin atık akımlarında hidrojen derişimi yüksektir. Bu gazların toplanması ve saflaştırılması uygulanır. Atık gazdan elde edilen hidrojen yine endüstride kullanılır. Bu uygulama mevcut hidrojen pazarının önemli bir ögesidir, ancak gelecekte hidrojenin yaygın kullanımında talebi karşılayacak yeterlilikte değildir (Dinçer, 2002; Ün, 2003).

- **Yerinde Kısmi Oksidasyon:**

Benzin veya dizel gibi geleneksel yakıt kullanılan kısmi oksidasyon süreci doğrudan %30 hidrojen gazı ve %20 karbonmonoksit verir. Daha sonra karbonmonoksit su buharı ile tepkimeye girerek yakıt hücresinde kullanıma hazır hidrojen ve karbondioksit gazı oluşturur (Dinçer 2002; Ün, 2003 a).

2.4. Hidrojenin Depolanması, Taşınması ve Güvenliğı

2.4.1. Hidrojeni depolama yöntemleri

Yakıt pillerindeki gelişmeyle birlikte hidrojenin dağıtımı ve depolanmasına daha fazla önem verilmiştir. Suyun elektrolizi ile hidrojen elde edilmesi ve uygun bir tank içerisinde depolanarak ihtiyaç duyulduğunda kullanılması düşünülmektedir. Fakat hidrojenin depolanması bir problem teşkil etmektedir. Burada tankın boyutları, basınç dayanımı, imal edileceğı malzeme gibi bir çok unsurun hesaba katılarak göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Bu sorun çözüldüğünde H₂ fosil yakıtların yerini alabilecektir. Böylece enerji taşıyıcısı olarak hidrojen sanayide, evlerde, taşıtlarda ve uzay çalışmalarında çok daha fazla kullanılacaktır.

Hidrojenin depolanmasında genel manada iki farklı amaçlı depolama olarak düşünülebilir. Bunlardan birincisi büyük miktarlarda hidrojenin dağıtım sisteminde depolanması ikincisi ise hidrojenin küçük ölçekli olarak son kullanım için depolanmasıdır.

Hidrojen dağıtım sisteminde depolanması gaz veya sıvı şekilde olabilir. Gaz hidrojen depolanması genellikle doğal gazın tükendiği yeraltı mağaralarında yapılmaktadır. Hidrojenin diğer gazlara göre sızma özelliği daha çok olmasına karşın bu teknik ile depolamada sızıntı problem oluşturmamaktadır. Bu teknik ile depolamaya örnek şehir gazının (hidrojen içeren karışım) mağarada başarı ile depolandığı Fransa verilebilir. Ayrıca, hidrojenden daha fazla sızma eğilimli olan helyum gazı Teksas, Amarillo yakınında tükenmiş doğal gaz mağarasında depolanmaktadır. Bu teknikte gazın mağara içerisine ve sonra da mağaradan dışarıya pompalanması için kullanılan enerji önem taşımaktadır. Bu tip depolamaya alternatif yüksek basınçlı tanklarda depolamadır.(Dinçer 2002; Ün, 2003 a)

Hidrojenin dağıtım sisteminde sıvı olarak depolanmasında, sıvı hidrojen taşınım tanklarına benzer tanklar kullanılır. Örneğin Kennedy Uzay Merkezinde fırlatma alanının yanında 3217m^3 hacminde küre kullanılır ve bu tanktan uzay mekiğine $38\text{m}^3/\text{dk}$ hıza kadar aktarım olabilmektedir. Sıvılaştırma tesislerinde ise depolama genellikle 1514m^3 hacminde vakum-izole küresel tankta yapılır.(Dinçer 2002; Ün, 2003a)

Son kullanımda hidrojenin depolanması ile ilgili dört ana teknik mevcuttur. Bunlar sıkıştırılmış gaz, karyojenik sıvı, metal hidrit ve karbon adsorpsiyonudur. Günümüzde en çok uygulanan sıkıştırılmış gaz ve karyojenik sıvıdır. Metal hidrit yöntemi gelişmiş bir yöntem olmasına karşın rekabet edebilir düzeyde olabilmesi için daha fazla araştırma gereklidir. Karbon adsorpsiyonu ise henüz olgunlaşmış bir teknik değildir, ancak araştırma - geliştirme çalışmalarının sonunda hedefler gerçekleştirilirse uygulanabilir yöntem olarak öngörülmektedir. Hidrojenin son kullanımda depolama tekniklerinde ise her bir uygulama için farklılıklar vardır. Örneğin, araçlarda yakıt olarak hidrojen gazının kullanılmasında en önemli sorun hidrojenin depolanmasıdır. Bunun nedeni ise hidrojen gaz formunda oda sıcaklığı ve basıncında aynı eşdeğer enerji miktarına sahip bir gazdan 3000 kat daha fazla yer kaplar. (Dinçer 2002; Ün, 2003a). Bundan dolayıdır ki hidrojenin araçta kullanılması için yüksek basınçla sıkıştırma, sıvılaştırma veya diğer yüksek hidrojen yoğunluklu teknikler gereklidir.

- **Sıkıştırılmış Gaz Olarak Hidrojen Depolanması:**

Bu depolama oda sıcaklığında yüksek basınca dayanıklı tankta yapılmaktadır. Hidrojen çelik tüplerde 200–250 atm basınçta depolanırsa çelik tüpün kütlesi Hidrojenden 100 kat daha ağır olmaktadır. Sıkıştırılmış gaz depolamada tankın ağırlığına dolayısıyla tankın tipine bağlı olarak ağırlıkça %1 ila %7 hidrojen depolanmaktadır. Daha hafif, dayanıklı ve ağırlıkça daha fazla hidrojen depolayabilen tanklar vardır. Çelik tüplerle kıyaslandığında kütlesi 3 defa azalmıştır. Ancak kütlesinin düşürülmesine rağmen halen pahalıdır. Daha hafif ve dayanıklı kompozit malzeme kullanılan tanklarda bu oran %11,3'e ulaşmaktadır Doldurma istasyonunda hidrojen gazının sıkıştırılması için yakıtın enerji içeriğinin %20'si kadarı harcanır (Karatepe vd., 2008).

Prototip aşamasında olan otomobillerin büyük kısmı 350 bar basınçlı hidrojen tankları taşımaktadır. ABD Chino-California da 350 bar basınçlı Hidrojen dolumu yapan bir istasyon 2005 yılı içerisinde faaliyete geçmiştir.

- **Karyojenik (Dondurulmuş) Sıvı Depolama:**

Hidrojenin sıvı olarak depolanması da mümkündür. Ancak hidrojen -253°C de buharlaşmaya başlamaktadır. Sıvı halde depolanan hidrojenin büyük tanklarda (10 Milyon m^3 civarı) günde yaklaşık % 0,1'i küçük ve taşınabilir tanklarda ise günde % 2-3'ü buharlaşma ile kaybedilmektedir.

Sıvılaştırma tekniğinde hidrojen atmosfer basıncında, 20 K'de oldukça iyi izole edilmiş tankta depolanmaktadır. Hidrojen sıvı halde olduğundan, eşdeğer ağırlıktaki gazolinden 3 kat fazla enerji içerir ve eşdeğer enerji içerdiği durumda da 2,7 kat fazla hacim gerektirir. Bu teknik tank ve yalıtım dâhil ağırlıkça %16 hidrojen depolar. Ayrıca, sıvılaştırma yakıtın enerji içeriğinin %40'ı kadarını gerektirir. Diğer bir dezavantaj yalıtıma rağmen tanka ısının sızmasıdır. Sızma sonucunda hidrojen kaynar. Ancak basınçlı tank kullanılarak bu problem çözülebilir ama bu da ağırlığı ve boyutu artırır (Dinçer, 2002; Ün, 2003 a).

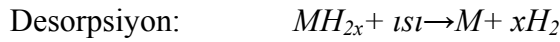
- **Metal Hidrit Sistemi ile Depolama**

Hidrojen depolanması için Metal Hidritlerden faydalanılması düşünülmüş (Hidrojenin kimyasal tepkime ile ağır metallere tutturularak depolanması), ancak

kütle ağırlığı yüksek olduğu için uygun olmamıştır. MgH_2 depolama yoğunluğu 0,07 kgH_2 / kg 'dır.

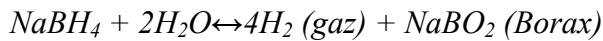
Bu teknikte hidrojen granüler metallerin atomları arasındaki boşluğa depolanır. Bu amaçla çeşitli metaller kullanılmaktadır. Kullanım sırasında da ısıtma ile hidrojen salınır. Metal hidrit sistemleri güvenilir ve az yer kaplar, ancak ağırdır ve pahalıdır. Araştırma aşamasında olan uygulamalarda ağırlıkça %7 hidrojen depolanabilmektedir. Sıkıştırılmış gaz veya karyojenik sıvı depolamanın aksine metal hidrit yeniden doldurulmada çok az enerji gerektirir. Ancak yakıtın dışarıya salınımı için enerji harcanır. Düşük sıcaklıkta metal hidrit depolanmasında bu enerji yakıt hücresinin veya motorun atık ısısından sağlanabilir. Yüksek sıcaklık metal hidrit depolaması daha ucuz olmasına rağmen, aracın enerji tüketiminin yarısı metalden hidrojeni açığa çıkarmak için harcanır.

Tepkimeler



şeklindedir. Burada M, metal, element veya metal alaşımı temsil etmektedir (Dinçer, 2002; Ün, 2003 a).

Günümüzde Bor mineralinden metal hidritlerde olduğu gibi Hidrojen depolama amacıyla faydalanma yönünde çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu amaçla $LaNi_5$ ve $NaBO_2$ genel adlarıyla üçüncül Lantan Nikel alaşımı ve Sodyum Borat kullanımı denenmiştir. 2,5 atm. Ve 25°C sıcaklıkta saf $LaNi_5$ sıvı hidrojenden iki kat sıkıştırılmış gaz hidrojenden 12 kat fazla hidrojen depolayabilmektedir. Enerji yoğunluğu olarak ise sıvı hidrojenden 1,1 kat sıkıştırılmış gaz hidrojenden de 9 kat fazladır (Wyczalek, 2002)



Hidrojenin Sodyum Borat kullanılarak depolanması kimyasal denklemi yukarıdaki gibidir.

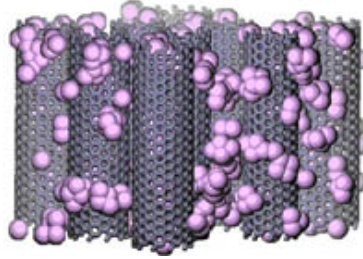
- **Karbon Adsorpsiyon Tekniği:**

Bu teknik hidrojeni basınç altında oldukça gözenekli süperaktif grafit yüzeyine depolar. Bazı uygulamalarda soğuk ortam bazılarında oda sıcaklığı gereklidir. Mevcut sistem ağırlıkça %4 hidrojen depolar. Bu verimin %8'e çıkması beklenmektedir. Bu teknik sıkıştırılmış gaz depolamaya benzer, ancak burada basınçlandırılmış tank, grafit ile doldurulur. Grafitler ek ağırlık getirmesine rağmen aynı basınçta ve tank boyutunda daha fazla hidrojen depolanabilmektedir (Dinçer, 2002; Ün, 2003 a).

- **Cam Mikrokürelerde Depolama:**

Küçük, içi boş, çapları 25 - 500 mm arasında değişen ve duvar kalınlıkları ~1mm olan cam küreler kullanılır. Bu mikroküreler 200-400 °C'de hidrojen gazı ile doldurulur. Yüksek sıcaklıkta cam duvarlar geçirgenleşir ve gaz kürelerin içine dolar. Cam oda sıcaklığına soğutulduğunda, hidrojen kürelerin içine hapsolür. Kullanılacağı zaman kürelerin ısıtılması ile hidrojen tekrar açığa çıkar (Dinçer, 2002; Ün, 2003 a).

Karbon Nano Tüpler:



Şekil 2.4. Karbon nano tüpün temsili büyültölmüş şekli

Karbon nanotüpler, üzerlerindeki mikroskobik gözeneklerde ve yapıları içinde karbon depolayabilen, iki nanometre boyutunda tüplerdir. Karbonu soğurma ve serbest bırakmada metal hidritlere benzerlikleri ile birlikte avantajları depolayabildikleri hidrojen miktarındadır. Karbon nano tüpler kendi ağırlıklarının %4,2 ila %65'e kadarını hidrojen olarak depolayabilmektedirler.

Karbon yapılı malzemelerde, özellikle karbon nanotüp ve nano fiberler de, depolama teknolojisi küçük bir hacimde çok fazla miktarda hidrojen depolamaya olanak

tanıldığı için gelecek vaat etmektedir. Özellikle yüksek saflıkta nanotüp veya nano fiberlerin ucuz bir şekilde elde edilmesi ile ilgili araştırmalar yoğun olarak devam etmektedir. Bu umut verici teknolojiadaki çalışmalar karbon nanotüplerin üretim tekniklerini geliştirip maliyetlerini düşürerek ticari olarak elverişli hale gelmeleri üzerine yoğunlaşmıştır. Yakın bir gelecekte bu yöntemin çok daha önem kazanacağı açıktır.

Araştırılan diğer teknikler gelişme aşamasındadır. Demir tozu ve suyun kullanıldığı bir teknikte yüksek sıcaklıkta pas ve hidrojen üretilmektedir. Metal hidrit tekniğine benzer şekilde metal yerine sıvı hidrokarbon veya diğer kimyasalların kullanıldığı teknikte mevcuttur (Ün, 2003 a).

2.4.2. Hidrojenin taşınması

Hidrojen gazı, doğal gaz veya hava gazına benzer olarak borular aracılığıyla kolaylıkla ve güvenli olarak taşınabilmektedir. Doğal gaz için kurulan yeraltı boru dağıtım ağının içeride çok az bir değişiklik ile hidrojen için de kullanılması olanaklıdır. Boru hatları dışında, basınçlı gaz olarak veya sıvılaştırılarak tankerlerle taşınabilir. Çift çeperli yalıtılmış, 25 m³ hacmindeki tanklara konulan sıvılaştırılmış hidrojen, karayolu ile yine benzer şekilde 130 m³ hacminde tanklara konulan sıvı hidrojen ise demiryolu ile taşınabilmektedir

Hidrojen sıvı halde yukarıda belirtilen şekillerde taşınabildiği gibi, metal hidritlere emdirilerek, yani depolanmış şekilde de taşınabilir. Burada hidrojen metal hidritlerle beraber taşınacağı için, taşıma maliyeti daha yüksek olmaktadır

Doğal gazla karşılaştırıldığında, hidrojenin yoğunluğunun düşük olması nedeniyle, aynı boru hattında hacimce üç kat fazla hidrojen taşımak olanaklıdır. Aynı hacimdeki doğal gaz yaklaşık üç kat fazla ısıtma gücüne sahip olduğundan, sonuçta 1 atm basınçta pompalanan hidrojen ile doğal gaz aynı miktarda ısı enerjisi vereceklerdir. Hidrojenin yüksek basınçta taşınarak ekonomik olması için çalışmalar sürmektedir.

Hidrojenin boru ile taşınmasına Texas'ta (ABD) petrol endüstrisi tarafından kullanılmakta olan ve 80 km uzunluğa sahip boru şebekesi ile Almanya'da Ruhr havzasında 1938 yılında işletmeye açılan ve bugün 15 atmosfer basınçta hidrojen taşımaya devam eden 2004 km'lik boru hattı örnek olarak gösterilebilir (Türe, 2001).

2.4.3. Hidrojenin güvenliği

Hidrojen esas olarak diğer yakıtlardan daha az güvenli değildir. Hidrojenin farklı karakteristikleri farklı güvenlik donanımları ve farklı prosedürler izlemeyi gerektirir, ancak bütün yakıtlar bir kaza potansiyeli taşır; yanıcı olmasalardı yakıt olarak kullanılamazlardı. Hidrojen dünyada halen petrol ve kimya endüstrisi gibi yerlerde güvenle ve rutin olarak kullanılmaktadır. ABD’de de doğal gaz yaygın olarak kullanılabilir olmadan önce bir yakıt (şehir gazının bir bileşeni olarak) olarak kullanılmıştır. Şehir gazı bazı ülkelerde halen kullanılmaktadır. Bununla birlikte hidrojenin güvenlik değeri propan ve metan (doğal gaz) arasındadır.

Hidrojenin özkütlesinin havaya göre az olmasından dolayı sızıntı durumunda yere yakın bir tabaka oluşturmaktansa yükselerek atmosferde dağılmaya çalışır. Bu ise iyi havalandırılmış sistemlerde güvenliği arttırmaktadır. Düşük yoğunluklu olması aynı zamanda verilen bir hacim için bir hidrojen patlamasının diğer yakıtlarından daha az enerji ortaya çıkaracağını ifade eder ve gazolin veya doğal gaz ile karşılaştırıldığında, bir patlama oluşturmak için hidrojen daha yüksek konsantrasyonlara ihtiyaç duyar, yani sadece bir kıvılcım yetmez. Bununla birlikte yüksek konsantrasyonlarda hidrojenin düşük alev alma ve ateşlenme sıcaklıkları özellikle garajlar gibi kapalı mekânlarda kaçakları belirgin bir yangın tehlikesi haline getirmektedir. Görünmez ve kokusuz olduğundan, benzin ve diğer yakıtların çoğuna nazaran kaçak hidrojenin tespiti daha zordur. Yanan hidrojenin alevi dahi görünmezdir. Doğal gazda yapıldığı gibi bir koku ya da bir renklendirici ya da her ikisini de hidrojene katmak pratik bir çözüm olabilir. Ancak bu katkı maddeleri seçilirken çevreye ve hidrojenin kullanılacağı araçlara verilecek zararlar dikkate alınmalıdır. Örneğin bu katkılar bir yakıt hücresinin verimini ve/veya kullanım ömrünü azaltabilir (Dinçer, 2002).

Yukarıda tartışılan yangın ve patlama hasarları, yakıtların çoğunda temel güvenlik sorunudur. Bazı durumlarda, hidrojeni yüksek basınç veya düşük sıcaklıklarda depolamak ile ilgili başka güvenlik sorunları da olabilir. Bu sorunlar doğru donanım tasarımı ve işletim prosedürleri ile en aza indirgenebilir ve hidrojenin yanıcılığından daha az kaygılanılması gereken konular olması gerektiği üzerinde bir fikir birliği mevcuttur (Dinçer, 2002).

2.5. Hidrojen enerji sistemi programları

Japon WE-NET programı (Japon Ticaret ve Endüstri Bakanlığı tarafından desteklenmektedir.) en iddialı ve büyük projelerden biridir. 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 santralı Rokko adasının elektrik ve ısı ihtiyacını karşılamakla birlikte, kapasiteleri 50 ile 500 MW arasında değişen yüzlerce yakıt pilli tesis bulunmaktadır. Yatağan termik santralindeki 3 ünite rantabl çalıştığında 630MW'lık güce çıktığını bilmek karşılaştırma için iyi bir örnek olacaktır. Sadece Tokyo'da şehrin elektrik ihtiyacının 40.000 kW'lık bölümü hidrojen enerji sistemlerinden sağlanmaktadır. Japonya'da Tokyo Electric Company'nin yanı sıra 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, Sulzer Innotec, dünyada yakıt hücreli sistemleri kullanan ve gelişimi için çalışmalar yapan şirketlerden bazılarıdır.

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. ABD'de yılda 9 milyon tonun üzerinde hidrojen üretilmekte ve hidrojen gazı nakil hatlarının uzunluğu 1200 kilometre kadardır. ONSI Corp. adında bir Amerikan firması 200 kW enerji sağlayan fosforik asit tipi (PC25) yakıt pilinin pazarlamasını yapmaktadır (Anonim, 2014b).

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



Şekil 2.5. Siemens'in 250 kW'lık gaz türbinli, yakıt hücreli bir kojenerasyon sistemi (Anonim, 2014b).

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 (Anonim, 2014b).

Almanya'da Münih havaalanında çalışan otomobil ve otobüslerin hidrojen enerjisi kullanması yönündeki projenin yanı sıra 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. Avrupa ve Kanada arasındaki Euro-Quebec diğer uluslararası 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 (Anonim, 2014b).

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.

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. İşbirliği 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 araştırma yapmaları 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 yanı sıra, General Motors, Ford, Chrysler, Toyota, Honda, BMW, Renault yakıt pilleri ile çalışan otomobilleri ticari anlamda üretmek çabasıındadırlar. 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 (Anonim, 2014b).

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-Ansoldo'nun ve MAN firmasının SL202 otobüsleri, Kanada demiryollarının Lokomotifi 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, krank 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 krank 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 hythane adlı yakıt ile çalışan yeni bir otobüs 1993 yılından beri Montreal'de (Kanada) denemektedir. 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 kullanılabilir. İçin, yüksek hızlı supersonik uçaklar için ideal bir yakıt olarak görülmektedir (Anonim, 2014b).

Amerika'nın Duffy Boats firması elektrikle çalışan ilk tekneyi geçtiğimiz aylarda üretmişlerdir. Herbiri 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 (Anonim, 2014b).

2.6. Yakıt Pillerinin Geleceği

Gelecekte içten yanmalı motorların yerini hidrojen yakıtlı elektrikli motorların alacağı veya en azından rakip olacağı öngörülebilir. Bu bağlamda otomotiv sektöründeki çalışmalar ilk örnek imalatların yapılması ile seri üretim aşamasına kadar gelmiş durumdadır. Hali hazırda üretilen yakıt pilli araçlardan 2008 yılında General Motors (Gm) Hidrojenle alışan 100 Adet Chevrolet Equinox Fuel Cell Model Araçları piyasaya sürmesi, Yine Hondanın 2008 yılında FCX Clarity’i kiralama amaçlı hizmete sunması, California’da 2016 sonu itibariyle 40 H₂ dolum istasyonunun kurulması planlanması ve 200 milyon dolar fon onaylanması. Hyundai 2015 yılında 1.000 Tuscon yakıt hücresel elektrikli araç üretmeyi hedeflemesi ve 2025 yılı itibariyle 3,3 milyon yakıt pilli aracın olması beklenmektedir (Anonim, 2014c).

2.7.Hidrojen ve Yakıt Pili Maliyetleri

Kıyaslama amacıyla, hidrojen maliyeti olarak bir litre benzinin eşdeğeri kadar enerji veren hidrojenin maliyeti verilecektir. Baz olarak kullanılan benzinin maliyeti ise 0.3\$/lt (1.25\$/gallon) olarak alınmıştır.

Doğalgazdan buharla reaksiyon yöntemi ile elde edilen gaz haldeki hidrojenin maliyeti 0.53\$/lt.b.e. (litre benzin eşdeğeri)’dir. Ancak doğalgaz fiyatları stabil olmadığından, doğalgaz ithal bir kaynak olduğundan ve bu üretimde hava kirliliğı yine söz konusu olduğundan, hidrojenin elektrolizle üretiminin fiyatları daha önemlidir.

Elektrolizle hidrojen üretiminde, kullanılan elektriğın fiyatı, maliyeti doğrudan etkilemektedir. Elektrik fiyatını 3 cent/kWs olarak kabul edersek bunun hidrojen maliyetine etkisi 0.42 lt.b.e.’dir. Elektroliz cihazının fiyatının 800 \$/kW olması durumunda bunun hidrojen maliyetine katkısı diğeri işletme giderleri ile beraber 0.26 lt.b.e. olmaktadır. Hidrojenin genel olarak sıvı halde taşınıp depolanması uygun olmaktadır. Hidrojenin sıvı hale getirilmesi ise 0.1\$/lt.b.e. bir yük getirmektedir. Böylece elektrolizle üretilen sıvı hidrojenin maliyeti 0.78 \$/lt.b.e.’dir.

Eğer hidrojen, hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorda kullanılacaksa, bu motor benzin motoruna göre daha verimlidir. Ayrıca hidrojen motoru organik asit ve karbon depozitleri üretmediğinden benzin motoruna kıyasla daha uzun ömürlüdür. Benzinin çevreye yaydığı kirliliğin maliyeti de hesaba katıldığında (ve hidrojen motorunun birim maliyetinin seri üretim durumunda benzin motoru ile aynı olacağı göz önüne alındığında) hidrojenin maliyeti benzin ile rekabet eder duruma gelmektedir.

Eğer hidrojen, yakıt pilinde elektrik üretimi için kullanılacaksa verimlilik daha da artmaktadır, çünkü içten yanmalı motorun %30 verimliliğine karşı yakıt pilinin verimliliği %60'dır. Ancak buna karşın yakıt pillerinin hâlihazırdaki maliyetleri çok yüksektir. Arabalar için üretilen 5000 saat ömürlü yakıt pillerinin yaklaşık maliyeti 300\$/kW'dır.

'Freedom Car' programında yürütülen AR-GE faaliyetlerinin sonucu olmak üzere hidrojen, yakıt pili ve hidrojen motorunun birim maliyetleri için belirli hedefler konmuştur. Hidrojenin maliyeti ile ilgili hedef, elektroliz cihazının daha verimli bir hale getirilmesi ve diğer hidrojen elde etme yöntemlerindeki gelişmelerle hidrojenin pazar fiyatının 2010 yılında 0.4\$/lt.b.e. olmasıdır. 'Freedom Car' programının, teknolojik gelişme ile beraber seri üretim sayesinde elde edilmesi hedeflenen yakıt pili maliyeti ise 2010 yılı için 45 \$/kW, 2015 yılı için ise 30\$/kW'dır. Ayrıca yakıt pilli arabalar için gereken elektrik tahrik düzenleri ve elektrik bataryasının 2010 yılı fiyat hedefi 32\$/kW'dır. Hidrojen motorlu modellerde ise hidrojen motoru ve hareket iletim sisteminin 2010 yılı hedef maliyeti 45\$/kW, 2015 yılı hedef maliyeti ise 30\$/kW'dır (Yıldırım, 2011).

2.8. Hidrojenin Çevresel Etkileri

Hidrojen kullanımı çok temiz bir yakıttır. Hidrojenin yanması veya yakıt hücresinde tüketilmesi sonucu son ürün olarak sadece su üretilir. Yanma yüksek sıcaklıkta olursa havadaki azot ve oksijenden NO_x oluşabilir. Bu sorun diğer yakıtlarla aynıdır ve kontrol edilebilir. Diğer yakıtların aksine hidrojen elementlerden üretilen kirleticiler içermez. Bu nedenle de SO₂, CO, CO₂, uçucu organik kimyasallar oluşmaz. Çizelge 2.3.'de farklı enerji sistemlerinden üretilen kirleticilerin miktarları görülmektedir.

Çizelge 2.3. Enerji sistemlerinde ortaya çıkan kirletici miktarları (Ün, 2003 a).

Kirletici	Fosil Yakıt Sistemi (kg/GJ)	Kömür/Sentetik Fosil Sistem (kg/GJ)	Solar-Hidrojen Sistemi (kg/GJ)
CO ₂	72,40	100,00	0
CO	0,80	0,65	0
SO ₂	0,38	0,50	0
NO _x	0,34	0,32	0,10
HC	0,20	0,12	0
Partikül Madde	0,09	0,14	0

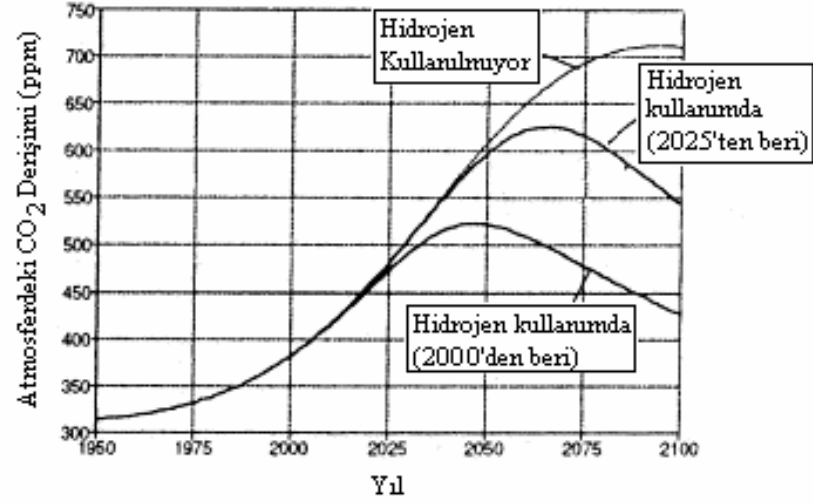
Hidrojenin fosil yakıt kullanarak buhar iyileştirme ile üretilirse oluşacak karbondioksit miktarı fosil yakıt direkt yakıldığında oluşacak emisyon miktarından yüksektir. Ayrıca buhar iyileştirmede kükürt gibi fosil yakıtın içerdiği safsızlıklarda kirletici emisyonu neden olmaktadır. Elektroliz yöntemi kullanıldığında ise elektroliz işleminin sürebilmesi için gerekli elektriğin ne şekilde temin edildiği önem taşımaktadır. Hidrojenin biokütleden, solar enerjiden veya diğer yenilenebilir kaynaklardan üretimi emisyon miktarının azaltır (Ün, 2003a).

Uçaklarda hidrojenin kullanımı sonucunda oluşacak su buharı emisyonu tehlikeli olabilir. Ortalama yükseklik ve enleme bağlı olarak buz bulutları oluşur ve bu bulutlarda sera etkisine ve ozon tüketimine neden olurlar. NO_x oluşumu ise alev sıcaklığına ve zamana bağlıdır. Hidrojen geniş bir aralıkta alev alma sıcaklığına sahip olduğundan NO_x emisyonu motor tasarımları değiştirilerek azaltılabilir (Ün, 2003a).

Dünyada deniz ve nehirlerden su buharlaşması yılda yaklaşık 5.10^{14} m³'dür. Eğer günümüzde insanlığın toplam enerji tüketimi olan 11TW hidrojen ile sağlanırsa yıllık su buharlaşması yaklaşık $2,5.10^{10}$ m³ olur. Bu değer doğal buharlaşmanın 1/20000'idir (Ün, 2003a).

Hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkileri düşünüldüğünde, fosil yakıt yerine hidrojen kullanılması ile fiziksel sağlık şartlarında da iyileşmeler olacaktır. Enerji üretimi sırasında CO₂ emisyonunun azalması veya atmosferdeki CO₂ derişiminin düşürülmesi sağlanabilir. Atmosferdeki CO₂ derişiminin düşürülmesi teknik ve ekonomik olarak solar fotosentez ile sağlanabilir. Şekil 2.7.'de günümüzde ve 2030 yılında elektrik motorlu ve hidrojen motorlu araçların spesifik CO₂ emisyonları gösterilmektedir. Atmosferde CO₂ derişimi 2050 yılında 520 ppm'e ulaşacaktır.

Ancak hidrojen kullanılırsa bu senaryo değişebilecektir. Ancak şekil 2.6.'dan da görüleceği gibi solar hidrojene geçiş 25 yıl gecikirse karbon dioksit 2070 yılında yaklaşık 620 ppm'e kadar yükselir. Eğer hidrojene geçiş 2050 yılında olursa bu geisin hiç pozitif etkisi olmaz (n, 2003a).



Sekil 2.6. Atmosferik co₂ derişiminin hidrojene geçiş değişimi (n, 2003 a).

3. YAKIT PİLLERİ

Yakıt hücreleri, günümüzde, verimli, ekonomik, sessiz ve çevreyle uyumlu yeni bir enerji üretim teknolojisi olarak giderek daha geniş uygulama ve kullanım alanı bulmaktadır. Yakıt hücreleri yanma olmaksızın ve herhangi bir ara eleman kullanmadan girdi olarak kullanılan yakıtın kimyasal enerjisini elektrik ve ısı formunda kullanılabilir enerjiye çeviren güç elemanlarıdır. Yakıt hücresi çalışma prensibi 1889'da keşfedilmesine rağmen 1960'lardaki uzay programlarına kadar güç üretiminde kullanılmamıştır. Yakıt hücresi teknolojisi son yıllarda Amerika'da ve Japonya'da devlet ve özel sektör desteğiyle önemli gelişme göstermiştir (Anonim, 2014c).

Elektrik üretimini, yakıtle sürekli olarak beslendiğinde sürdürebilen böyle bir sistem, konvansiyonel bir güç üretim sistemi olarak düşünülebilir, ancak yakıt hücreli güç sistemleri dönen kısımları olmaması nedeniyle konvansiyonel güç sistemlerinden farklıdır.

Hidrojen (H_2) ve oksijen (O_2) arasındaki elektrokimyasal ekzotermik reaksiyon ile elde edilen ve toplam verimlilikleri % 80'lere kadar ulaşabilen yakıt pilleri, sürekli çalışan piller veya elektrokimyasal makineler olarak da bilinir.

Her ne kadar çalışma prensipleri benzer olsa da, çalışma koşulları ve uygulama alanları farklılık göstermektedir.

- Polimer elektrolit zar ve fosforik asit yakıt hücresinde, protonlar katoda elektrolit içinden geçerek su ve ısı oluşturacak şekilde oksijen ve elektronlarla bileşirler.
- Alkalın, eriyik karbonat ve katı oksit yakıt hücrelerinde ise, negatif iyonlar elektrolit içinden geçerek hidrojenle bileşip su ve elektronları oluşturdukları anoda doğru hareket ederler.

Hücresinin anot tarafındaki elektronlar elektrolit içinden pozitif yüklü katoda geçemezler; hücrenin diğer tarafına ulaşmak için bir elektrik devresi üzerinden dolanarak hareket etmeleri gerekir. Elektronların bu hareketi bir elektrik akımıdır.

Atık olarak su ve ısı çıkması ve özellikle minimum seviyedeki emisyonları yakıt pillerinin avantajlıklarındandır. İçten yanmalı motorlarda, toplam kontrol edilemeyen emisyonlar 2370 ppm, gaz türbinli sistemlerde 120 ppm olduğu halde, yakıt hücreli sistemlerde sadece 5 ppm'dir (Anonim, 2014e).

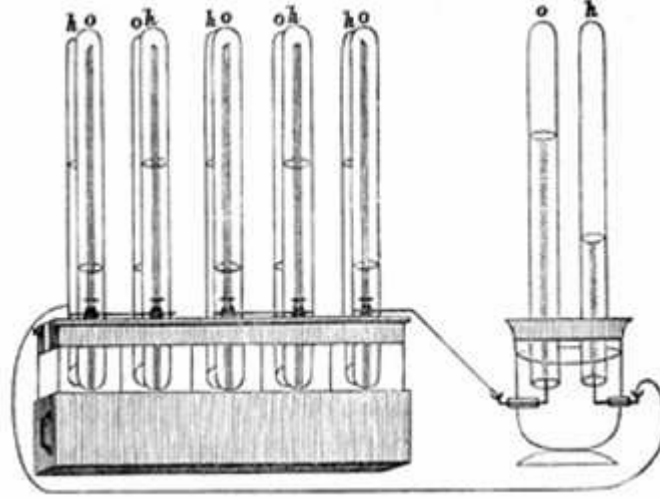
Yakıt pilleri, boyutlarının küçük olması, yüksek verimle çalışmaları ve atık ısılarının kullanılabilir olmasının yanı sıra;

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

gibi özellikleri nedeniyle de diğer güç sistemlerine göre daha üstündürler.

3.2 Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Yakıt pili, ilk olarak 1839 yılında suyun elektrolizi konusunda çalışmalar yapan Sir William Grove tarafından elektrokimyasal bir tepkime olarak ortaya konmuş ve gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. 1839 yılında Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi

Yakıt hücresi terimi ise ilk olarak 1889'da Ludwing Mond ve Charles Langer tarafından Grove'un çalışmaları tekrarlanarak ortaya konmuştur. Mond ve Longer oksijen kaynağı olarak havayı, hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazını kullanarak 1,5 watt güç üreten ve %50 çalışma verimine sahip bir yakıt hücresi geliştirmişlerdir. 1894'de Wilhelm Oswalt kömür türevli yakıtlar ile çalışan bir elektrokimyasal hücre yapmıştır.

1923 yılında Haldane rüzgâr enerjisi ve elektroliz yöntemiyle hidrojen elde edilerek sıvı hidrojen olarak depolanabileceğini ve yakıt olarak kullanılabileceğini öngörmüştür. Bu öngörü 15 yıl sonra (1938 yılında) Sikorsky tarafından teknik detayları ile ortaya konmuş ve hidrojenin havacılıkta potansiyel yakıt olacağını da belirtmiştir (Haldane, 1923).

1920'lerin başında Lawaczek hidrojen ile çalışan motor, araba ve tren kavramının ana hatlarını ortaya koymuştur. Bu kavrama göre elektroliz yardımıyla hidrojen elde edilecek ve böylece enerji doğal gazlar gibi hidrojen boru hatları ile taşınabilecekti.

1920-1930 döneminde konu üzerine çalışmalar devam etmiştir. Aynı dönemde Eren ve ekibindeki mühendisler pek çok araç motorunu multi-fuel sistem, yani hem benzin hem de hidrojen kullanabilir hale getirmiştir (Lawaczek, 1932, Eren,1933).

İlk başarılı yakıt pili 1932 yılında Francis Bacon'un çalışmaları sonucu ortaya çıkmıştır. Bacon, Mond ve Langer 1959 yılında bir kaynak makinesine güç sağlayan

5 kW pratik bir sistem kurmayı başarmışlardır. Bacon'un pili daha sonra modifiye edilerek Amerikan uzay programında kullanılmıştır (Hoffmann, 1981).

1950'lerin sonunda NASA (Amerikan Ulusal Uzay Dairesi) insanlı uzay araştırmaları için panellere güç sağlamak üzere araştırmalar başlatmıştır. Nükleer reaktörlerin riskli olması, pillerin ve akülerin çok ağır ve kısa ömürlü olmaları nedeniyle NASA enerji kaynağı olarak yakıt pillerine önem vermiştir. Yakıt pilleri Apollo ve Gemini uzay mekiklerinde güvenli olarak elektrik ve su sağlayarak uzay çalışmalarındaki önemlerini ortaya koymuşlardır.

1952'de Bacon ve arkadaşları 5 kW'lık güç üreten bir yakıt hücresi yapmışlardır. Aynı yılın sonlarında Harry Karl Ihring 20 beygir gücünde bir yakıt hücresiyle çalışan traktör tasarlamışlardır. Bu buluş günümüzdeki modern yakıt hücresiyle çalışan makinelerin başlangıcı olmuştur.

Güneş enerjisi kaynaklı hidrojen ekonomisi kavramı ilk olarak 1962 yılında Bockris tarafından ortaya konmuştur. 1965 yılında Justi tarafından geliştirilerek şematize edilmiş, 1970 yılında Bockris ve Triner tarafından hidrojen ekonomisi olarak isimlendirilmiş, 1971 yılında Bockris ve 1972 yılında Bockris ve Appleby tarafından formülize edilmiş, 1972 yılında Gregory tarafından ölçülmüştür (Bockris, 1975).

1972 yılında Marchetti Nükleer Hidrojen sistemini ortaya attı. Bu sistemde izole edilmiş bir adada nükleer enerji kullanılarak üretilen hidrojen sıvılaştırılmış olarak gemilerle taşınacak ve kullanılacaktı (Marchetti, 1970).

Bockris 1962 yılında Amerikan şehirlerinin Güneş enerjisi kaynaklı hidrojen ile desteklenmesi için plan hazırlamıştır. Bu plana göre yüzer fotovoltaik paneller oluşturulacak, elektroliz ile deniz suyundan hidrojen üretilerek boru hatları ile şehirlere nakledilecekti. Japonlar tarafından PORSHE (Planned Ocean Raft System for the Hydrogen Economy) adlandırılan benzer bir kavram 1979 yılında Escher ve Ohta tarafından ortaya konmuştur (Ohta, 1979).

1974 yılında Veziroğlu ilk uluslararası hidrojen enerji konferansını düzenlemiştir. THEME (The Hydrogen Economy Miami Energy Conference) konferansında herhangi bir ana enerji kaynağı ile hidrojen üretimi ve fosil yakıtlar yerine kullanılabilirliği tartışılmış, fosil yakıtların tükenmesi ve bu yakıtların kullanılması

ile oluşan evre kirliliği ile ilgili soruların cevaplanmasına çalışılmıştır (Veziroğlu, 1974).

Önceleri hidrojen gazından içten yanmalı motorlarda olduğu gibi yakıt olarak kullanılması düşünölürken yapılan araştırmalar sonucunda yakıt pilleri icat edilmiş ve geliştirilerek hidrojeni yakmadan kullanmanın daha verimli olduğu tesbit edilmiştir. Günümüzde ise her geçen gün önemi daha da artmaktadır. Yakıt hücresi teknolojisi son yıllarda Amerika’da ve Japonya’da devlet ve özel sektör desteğiyle önemli gelişme göstermiştir.

3.2. Yakıt Hücresi eşitleri, Sınıflandırılması Yapısal Bileşenleri Ve alışma Prensipleri

Yakıt hücreleri, bir yakıtın (hidrojen zengini gaz karışımından hidrojen) ve bir oksitleyicinin (havanın oksijeni) kimyasal enerjisini sürekli olarak elektriğe ve ısıya eviren cihazlardır. Yakıt hücresi, yakıtın ısıl değerine bağlı olarak, %40 ile %70 arasında değişen yüksek bir yakıtı güce dönüştürme verimine sahiptir. Yakıt hücresi çalışma prensibi, su elektrolizinin tam tersidir. Tek bir yakıt hücresi bir elektrolit ve iki katalizör-kaplı elektrottan (gözenekli bir anot ve katot) oluşur.

Yakıt pilleri kullandıkları yakıtı, elektrolit cinsine ve çalışma sıcaklığına göre aşağıdaki gibi sınıflandırıla bilinir.

Yakıt pillerinin kullandıkları yakıtı göre:

- Proton geçiren polimeri zarlı yakıt Pili (PEMYP)
- Direk metanol yakıt pili (DMYP)
- Alkali yakıt pili (AYP)
- Fosforik asit yakıt pili (FAYP)
- Erimiş karbonatlı yakıt pili (EKYP)
- Katı oksitli yakıt pili (KOYP)

- Rejeneratif yakıt pili (RYP)
- Silindirik yakıt pili (SYP)

Yakıt pillerinin çalışma sıcaklıklarına göre:

- Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (0-1000C)
- Orta sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (100-5000C)
- Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (500-10000C)

Genelde benzer çalışma prensibine sahip bu yakıt hücrelerinin bir karşılaştırması Çizelge 3.1.'de verilmiştir. (Anonim, 2014d, 2014f).

Çizelge 3.1. Yakıt hücresi çeşitlerinin karşılaştırmalı temel özellikleri

Parametre	AYH	FAYH	KOYH	EKYH	PEMYH
İşletim sıcaklığı (°C)	80	200	1000	650	85
Platin Kullanımı	Yok	Var	Yok	Yok	Var
Güç Yoğunluğu(W/kg)	35-105	120-180	15-20	30-40	350-1500
Verim(%)	42-73	40-47	45-50	50-57	40-60
Atık Isı Kullanımı	Yok	Sınırlı	Var	Var	Yok
H2 Yakıt Kaynağı	Saf H2	İslenmiş metanol, doğal gaz	Doğal gaz	Doğal gaz	İslenmiş metanol, doğal gaz
Ticari Kullanımı	Uzay Çalışmaları	Tic. Uyg.(Oteller hastaneler vs.)	Tic. Uyg.(Sanayi uygulamaları elektrik santralleri)	Elektrik santralleri	Ulaşım araçları, askeri Sistemler

Yakıt hücresi için gerekli olan hidrojen zengin gaz, doğal gaz, nafta, biyogaz veya kömür benzeri bir ticari yakıtın dönüştürülmesi ile elde edilir. Elektrokimyasal olarak güç üreten yakıt hücreleri, aktif hücre yüzeyinin her biri (10,76 m²) için yaklaşık

olarak 100 kW-200 kW 'lık güç üretirler. Hücre grubu içindeki her bir hücre, 1 V'tan daha az bir gerilim üretir. (Anonim, 2014d).

3.3. Kullanılan Elektrolit Çeşidine Göre Yakıt Hücreleri

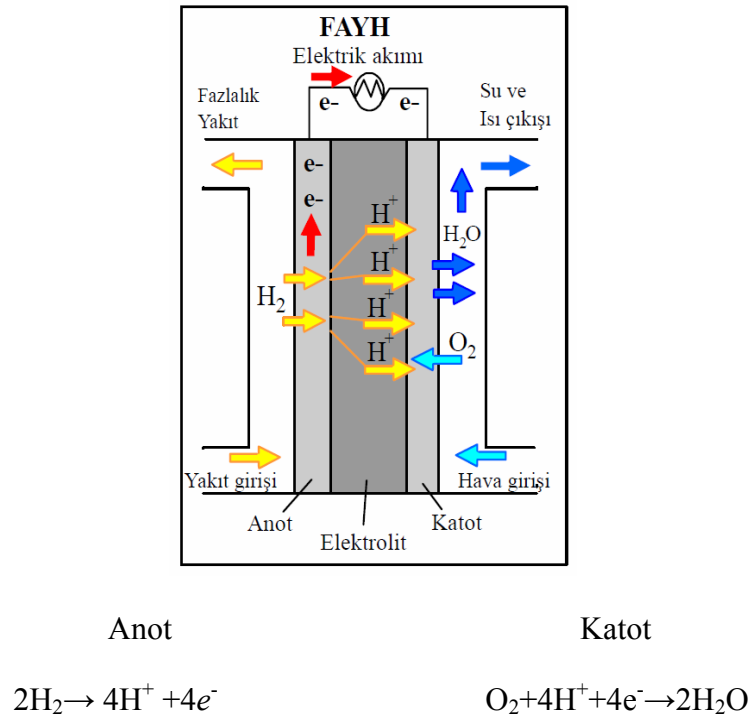
3.3.1. Fosforik asitli yakıt hücresi

Bilim insanları yakıt pili teknolojisinin başından beri asitleri elektrolit olarak kullanmaya çalışmışlardır. Ancak fosforik asit kötü bir elektriksel iletken olduğundan çok çekici değildir ve diğer tür yakıt pillerine göre geliştirilmeleri çok daha zordur. Ancak 1961 yılında G. V. Elmore ve H. A. Taner yeni bir deney yapmış ve %35'i fosforik asit, kalan %65'i ise silisli kum olan bir elektrolit kullanmışlardır. Ayrıca yaptıkları pilde saf oksijen yerine hava oksijen kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu pil başarılı bir şekilde 6 ay boyunca çalışmıştır. Pilin akım yoğunluğu 90 mA/cm² ve gerilimi 0,25 voltur. Ayrıca 1960'ların ortasında Allis-Chalmers firması Amerikan ordusunda kullanılmak üzere 5 kW'lık bir fosforik asitli yakıt pili üretmiştir (Türker vd.,2004).

1970'lerde Los Alamos National Laboratory mühendisleri ilk kez fosforik asitli bir yakıt piliyle çalışan bir golf arabası üretmiştir. 1994 yılında ABD'nin Georgetown kentinde ilk fosforik asitli yakıt pilleriyle çalışan otobüsler devreye girmiştir. Fosforik asit yakıt pillerinin ulaşım araçlarında kullanımı en uygun opsiyon olarak gözükmektedir. Buna rağmen 10 yıldır fosforik asitli yakıt pilleri sabit enerji kaynağı olarak da kullanılmaktadır. New York'ta Times Square üzerindeki Conde Nast Building ONSI Corp.'un fosforik asit yakıt pilleriyle enerjisini sağlamaktadır. Ayrıca yine New York'ta Yonkers Waste Treatment Plant, 200 kW'lık ONSI üniteleriyle beslenmektedir (Türker vd.,2004).

Fosforik asit yakıt hücreleri elektrolit olarak sıvı fosforik asit kullanır, asit teflon kaplı bir silikon karpit matriks içinde ve platin bir katalizör ihtiva eden gözenekli karbon elektrotlar arasında bulunur. Fosforik asit yakıt hücreleri (FAYH) 150-200°C civarında çalışırlar.

FAYH yakıt hücrelerinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri Şekil 3.2.'de gösterildiği gibidir. Pozitif yüklü hidrojen iyonları elektrolit üzerinden anottan katoda doğru geç ederler. Anotta oluşan elektronlar bir dış devre üzerinden, yol boyunca elektriksel güç sağlayarak, hareket ederler ve katoda dönerler. Burada elektronlar, hidrojen iyonları ve oksijen, daha sonra hücreden uzaklaştırılacak olan suyu oluşturur. Elektrotlardaki platin katalizör reaksiyonu hızlandırır. Elektrotlar etrafında karbondioksit (CO₂) oluşumu elektrotlarda kirlenmeye neden olur (Anonim, 2014g).



Şekil 3.2. FAYH genel yapısı

FAYH'lerin bir avantajı 200 °C'de yaklaşık 1,5 yüzdelik CO konsantrasyonunda çalışmaya olanak sağlamalarıdır. Diğer bir avantaj sudur, konsantre edilmiş fosforik asit elektrolit suyun kaynama sıcaklığı üzerinde çalışabilir, diğer asit elektrolitlerde iletim için suya ihtiyaç duymaları bakımından bir kısıtlama vardır. Bununla birlikte, asit hücre içindeki diğer bileşenlerin korozyona karşı dayanıklı olmasını gerektirir. Yakıt hücresi için gerekli hidrojen dış bir reformerde hidrokarbon bir yakıttan ayrıştırılır. FAYH'lerin verimi %40-50 civarındadır, ancak kaybedilen ısı bir yeniden dönüştürme (cogeneration) sisteminde kullanıldığında bu %80'lere kadar

çıkabilir. 200 kW'a varan kapasitelerdeki FAYH' ler ticari kullanımdadır ve 11 MW'lık üniteler test edilmektedir. (Anonim, 2014g).

3.3.2. Katı oksit yakıt hücresi

Katı oksit ve erimiş karbonat yakıt pillerinin tarihsel gelişimi beraber devam etmiştir. 1930'ların sonunda İsviçreli bilim adamı Emil Baur ve arkadaşı H. Preis zirkonyum, itriyum, seryum, lantanyum ve tungsten gibi katı oksit elektrolitler kullanarak deneyler yapmışlardır. Bu çalışmalarda tasarımı elektriksel açıdan yeterince iletkenliği sağlayamamış ve elektrolitlerle aralarında karbonmonoksitin de bulunduğu çeşitli gazlar arasında istenmeyen reaksiyonlar meydana gelmiştir.

1940'ta Rus bilim adamı O. K. Davtyan, iletkenliği artırıcı çalışmalar yaptı ancak istenmeyen kimyasal reaksiyonları engelleyemedi. 1950'lerin sonlarında katı oksit yakıt pilleri çalışmasına Lahey'deki Central Technical Institute'de, Pensilvanya'daki Consolidation Coal Company'de ve New York'taki General Electric tesislerinde hız verildi. 1959'da katı elektrolitlerin yüksek elektriksel iç direnç, erime, ve yarı iletkenlikten kaynaklanan kısa devre olayları gibi problemler yarattığı belirlendi. Bu yüzden erimiş karbonat yakıt pillerinin daha avantajlı olduğu kabul edildi. Ancak katı oksit pillerden herkes ümidini kesmedi. Örneğin 1962 yılında Westinghouse araştırmacıları zirkonyum oksit ve kalsiyum oksit kullanan bir pili test ettiler. Son olarak ta dünyada artan enerji ihtiyacı ve tırmanan enerji fiyatları üzerine birçok şirket yeniden katı oksit yakıt pilleri konusundaki çalışmalarına hız verdi (Türker vd.,2004).

Erimiş karbonat yakıt pilleri gibi katı oksit yakıt pilleri de çok yüksek sıcaklıklarda faaliyet göstermektedir ve bunlar da genelde büyük sabit santrallerde kurulur. Yine yüksek sıcaklıktan dolayı açığa çıkan ısı kojenerasyonda kullanılmaya uygundur.

Katı oksit yakıt pilleri de diğer tipler gibi oldukça temizdir. Ürettikleri doğru akımın alternatif akıma çevrilmesi için inverter sistemleri gereklidir. Basit yapıları ve temiz olmaları kentlerde kullanımını cazip kılmıştır. Örneğin Tokyo'da 25 kW'lık üniteler halen çalışmaktadır.

Nisan 2000'de ABD Enerji Bakanlığı National Fuel Cell Research Center and Southern California Edison'da kurulacak bir katı oksit yakıt pili mikrotürbin

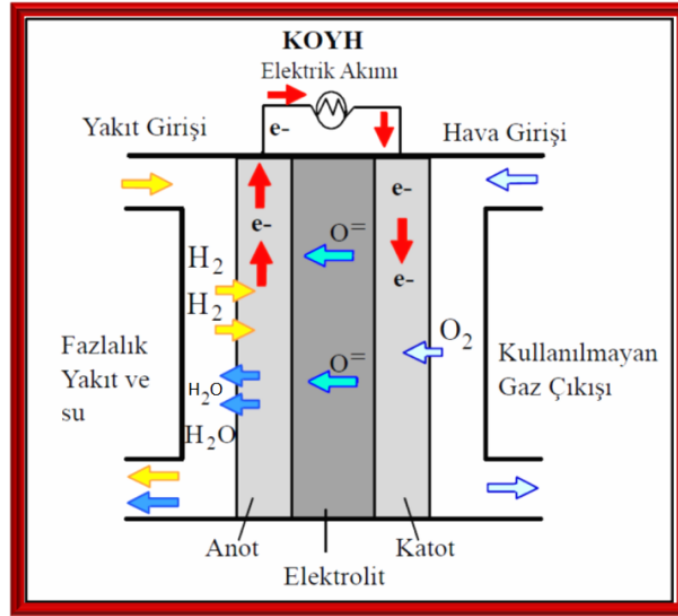
kojenerasyon tesisini duyurdu. Tesisin yakıt pili Siemens Westinghouse tarafından ve tribün ise Northern Research and Engineering Corporation tarafından üretildi. Tesiste doğal gaz yakıtlı katı oksit yakıt pilinden 220 kW enerjinin yaklaşık %55 verimle elde edilmesi planlanmaktadır. Katı oksit yakıt pilleri konusundaki ortaklığını sürdüren Siemens-Westinghouse 2002 yılı itibarıyla toplam 1 MW yakıt pili ve kojenerasyon tesisini kullanıma açmışlardır (Türker vd.,2004).

Bir katı oksit yakıt hücresi (KOYH) sıvı bir elektrolit yerine sert seramik bir elektrolit kullanır ve 1000 °C'a ulaşan sıcaklıklarda çalışır. Zirkonyum oksit ve kalsiyum oksidin bir karışımı kristal bir örgü oluşturur, bununla birlikte başka oksit kombinasyonları da elektrolit olarak kullanılmaktadır. Katı elektrolitin her iki yanı özel gözenekli elektrot malzeme ile kaplanmıştır. Bu yüksek çalışma sıcaklığında, oksijen iyonları (negatif bir yük ile birlikte) kristal örgü içinden göç ederler. Hidrojen ihtiva eden gaz bir yakıt anot üzerinden geçirildiğinde negatif yüklü bir oksijen iyonu akısı yakıtı oksitlemek üzere elektrolit üzerinden hareket eder. Oksijen katotta havadan sağlanır. Anotta üretilen elektronlar, dış bir yük üzerinden, yol boyunca bir elektriksel güç üretecek şekilde devreyi tamamlarlar. KOYH yakıt hücrelerinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri Şekil 3.3.'de verilmiştir. Çalışma verimleri %60'lara kadar ulaşabilir. Sistemden atılan ısının yakalanıp iyileştirilmesinin tasarlandığı uygulamalarda ortalama yakıt kullanımı verimleri %80-85'e ulaşabilir (Anonim, 2014f, 2014g).

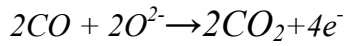
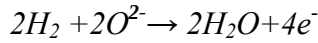
Yüksek sıcaklıkta çalışmaları kıymetli katalizör kullanımını ortadan kaldırır, böylelikle maliyet düşer. Bu aynı zamanda KOYH'lerin yakıtı dâhili olarak reforme etmelerine olanak tanır, bu da birçok tür yakıtın kullanımını olanaklı kılar ve sisteme bir reformer katmakla ilgili maliyeti ortadan kaldırır. KOYH'ler aynı zamanda sülfüre en dirençli yakıt hücresi türleridirler; diğer hücrelerin kullandığı sülfürden kat kat daha fazlasının kullanılmasına izin verirler. Bununla birlikte, kendisi de yakıt olarak kullanılabilecek olan karbon monoksit (CO) tarafından da kirletilmezler. Bu da KOYH'lerin kömürden üretilmiş gazları kullanmasına izin verir (Anonim, 2014f).

Yüksek sıcaklıklarda çalışmanın dezavantajları da mevcuttur. Bu yavaş başlama zamanları ile sonuçlanır ve ısıyı kaybetmemek ve kullanıcıyı korumak için belirgin bir ısı muhafaza gerektirir ki bu da konut uygulamaları için uygun olabilir ancak

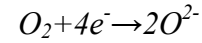
ulaşım ve küçük ulaşım araçları için kabul edilebilir değildir. Yüksek alışma sıcaklıkları aynı zamanda malzemeler üzerine katı dayanım kısıtlamaları getirir. Hücre alışma sıcaklıklarında düşük maliyetli, yüksek dayanımlı malzemelerin geliştirilmesi bu teknolojinin yüzleştiği başlıca meydan okumadır. (Anonim, 2014f).



Anot



Katot



şekil 3.3. KOYP nin genel yapısı

3.3.3. Erimiş karbonat yakıt hücresi

Erimiş karbonat ve katı oksit yakıt pilleri yüksek sıcaklıkta çalışan pillerdir. Bu yüzden bu iki tip yakıt pilinin tarihsel gelişimi de yaklaşık olarak beraber yürümüştür. 1930'larda Emil Baur ve H. Preis, İsviçre'de katı oksit elektrolitlerle yüksek sıcaklıkta deneyler yapmışlardır. Bu deneylerde elektrolitler ve gazlar arasında istenmeyen kimyasal reaksiyonlar ve elektriksel iletkenlik problemleriyle karşılaşmışlardır. 1950'lerin sonlarında ise Hollandalı bilim adamları G. H. J. Broers ve J. A. A. Ketelaar katı oksit yerine erimiş karbonat elektrolit kullanma üzerinde çalışmışlardır. 1960 'da 6 ay süreyle çalışan ve lityum, sodyum, potasyum karbonat karışımı elektrolite sahip yakıt pilini duyurmuşlardır. 1960'ların ortalarında Birleşik

Devletler Silahlı Kuvvetleri Mobil Ekipmanlar Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Texas Instruments tarafından geliştirilen erimiş karbonat yakıt pillerini test etmiştir. Bu piller olumlu sonuçlar vermiştir ve 100-1000 W arası güç üretmişlerdir (Türker vd., 2004).

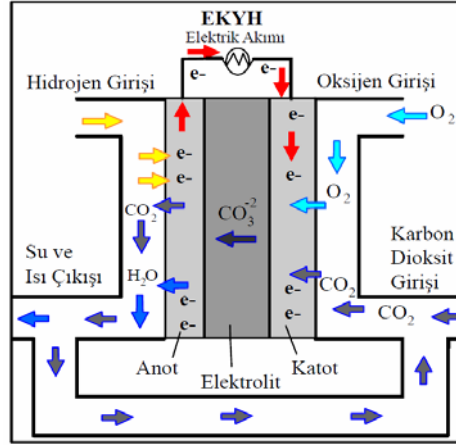
Erimiş karbonat yakıt pilleri çok yüksek çalışma sıcaklıklarına ihtiyaç duyduğundan ancak sabit, büyük santrallerde yerleşimleri mümkün olmaktadır. Yüksek çalışma sıcaklığı, açığa çıkan yüksek ısının kojenerasyonla yeniden kullanımına olanak tanımaktadır. Bu ısı, ısıtmada, endüstriyel olarak veya daha çok elektrik üretmek için kullanılabilir.

1990'ların başında Japonya'daki Ishikawajima Heavy Industries 1000 W gücünde erimiş karbonat yakıt pili tesisini 10000 saat boyunca kesintisiz çalıştırmayı başarmıştır. Power Corporation of Illinois, 1997 yılında Miramar Deniz Kuvvetleri Hava Üssünde 250 kW 'lık erimiş karbonat yakıt pili tesisini kurmuştur. Tesis sürekli olarak 160 MWh üretim yapmakta ve çıkan buhar da hava üssünde kullanılabilir. Miramar'da kapasite 300 kW'a çıkarılarak ticari santral olarak kullanımı düşünülmektedir.

Yakın gelecekte enerji kaynaklarının azalmasıyla birlikte erimiş karbonat yakıt pili santralleri önemli bir elektrik üretim yolu haline gelecek gibi gözükmemektedir (Türker vd.,2004).

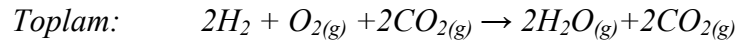
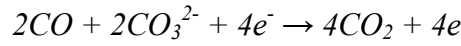
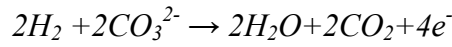
Erimiş karbonat yakıt hücreleri (EKYH) günümüzde doğal gaz ve kömüre-dayalı elektrik santralleri için, elektrik üretimi, endüstriyel ve askeri uygulamalar için geliştirilmektedir. EKYH'ler gözenekli, kimyasal olarak reaksiyona girmeyen (inert) seramik lityum alüminyum oksit (LiAlO_2) bir matris içerisinde tutulan bir eriyik karbonat tuz karışımından oluşan bir elektrolit kullanan yüksek-sıcaklıklı yakıt hücreleridir. 650°C (kabaca 1200°F) ve üstü sıcaklıklarda çalıştıklarından, maliyeti düşürecek şekilde, anotta ve katotta değerli-olmayan metaller katalizör olarak kullanılabilir. Bu sıcaklığa kadar ısıtıldıklarında, karbonat tuzları erir ve karbonat CO_3^{2-} iyonlarını anottan katoda iletirler. Anotta hidrojenin iyonlarla reaksiyona girmesi sonucu su, karbondioksit ve elektron açığa çıkar. Elektronlar dış bir devre üzerinden hareket ederler, yol boyunca elektriksel güç sağlarlar ve katoda dönerler. Burada havadan gelen oksijen ve anottan geri dönen karbondioksit CO_3^{2-} iyonlarını

oluşturmak üzere reaksiyona girerler böylece elektrolit tazelenir ve yakıt hücresi üzerinden akım taşınır. EKYH yakıt hücrelerinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri Şekil 3.4.'te verilmiştir(Anonim, 2014f, 2014g).

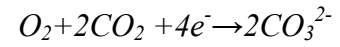


Şekil 3.4. EKYH genel yapısı

Anot



Katot



Elektrolit tabakasının iki kısmında bulunan her elektrotta bir gaz kanalı oluşturulmuştur. Elektrottaki reaksiyondan önce temel gazlar reformlama prosesiyle hidrojen gazına dönüştürülür ve H₂ yakıt olarak sisteme beslenmektedir. Bu prosesi içeren erimiş karbonat yakıt pilinin şematik görünümü Şekil 3.4. te gösterilmektedir.

Alkalin, fosforik asit ve polimer elektrolit zarlı yakıt hücrelerinden farklı olarak, EKYH'ler daha yüksek enerji-yoğunluklu yakıtlardan hidrojen elde etmek için bir harici reformer kullanımını gerektirmez. EKYH'lerin çalıştığı yüksek sıcaklıklar nedeniyle, bu yakıtlar yakıt hücresinin kendi içinde dahili-reformasyon denilen bir işlem aracılığıyla gerçekleşir, bu aynı zamanda maliyeti de düşürür. Erimiş karbonat yakıt pilleri karbon monoksit ve karbon dioksit zehirlenmesine karşı dayanıklıdır ve

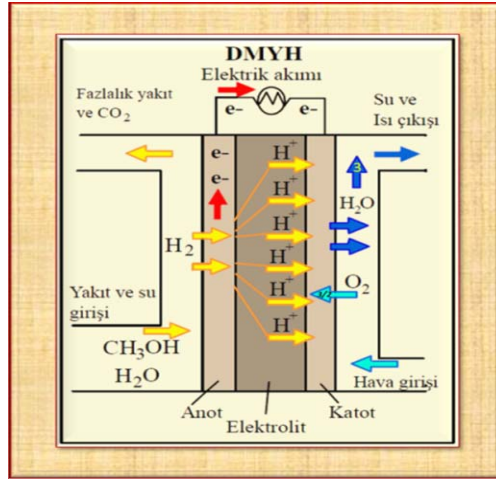
hatta karbon oksitleri yakıt olarak kullanabilmektedir. Bu yüzden söz konusu hücreler kömürden üretilen gaz yakıtlar için çekici hal almıştır. Bu yakıt hücreleri diğer yakıt hücresi tiplerine kıyasla safsızlıklara karşı daha dirençli olduklarından, kömürün dönüştürülmesi ile ortaya çıkan kükürt gibi safsızlıklara dirençli hale getirildikleri varsayıldığında kömür gibi kirli fosil yakıtların hidrojen oluşturmak üzere iç iyileştirilmesinin yapılabileceğine inanılmaktadır. EKYH'ler platinden daha az pahalı olan nikelden yapılmış katalizörlerle iyi şekilde çalışır. EKYH'ler %60'a kadar verim sergilerler ve bu kayıp sıcaklık yeniden üretim için kullanıldığında %80'lere kadar çıkabilir. Halen kullanımda olan üniteler 2 MW'a kadar güç üretirler, ancak 50 MW'dan 100 MW'a kadar güç üretecek kapasiteye sahip üniteler için tasarımlar mevcuttur. (Yıldırım, 2011, Anonim 2014f).

Halen kullanılmakta olan EKYH'lerin başlıca dezavantajı kararsızlıktır. Bu hücrelerin çalıştıkları yüksek sıcaklıklar ve korozyona neden olucu elektrolit, elektrolit bileşenlerinin ömrünü kısaltarak bozulmalarını ve korozyonunu hızlandırır. Bilim insanları halen performansı azaltmadan hücre ömrünü arttırıcı yakıt hücresi tasarımları yanında bileşenler için korozyona-dirençli malzemeleri araştırmaktadırlar. (Anonim, 2014f).

3.3.4. Doğrudan metanol yakıt hücresi

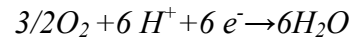
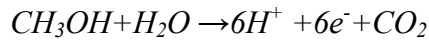
Yakıt hücrelerinin çoğu yakıt hücresi sistemine doğrudan verilebilecek ya da metanol, etanol ve hidrokarbon gibi hidrojen zengini yakıtların yakıt hücresi içinde hidrojene reforme edilmesi ile hidrojenle beslenir. Doğrudan metanol yakıt hücreleri de (DMYH) buharla karıştırılan ve doğrudan yakıt hücresi anoduna beslenen saf metanol ile çalışır. Böyle bir yakıt hücresinin çalışma prensibi ve kimyasal reaksiyonları Şekil 3.5.'de verilmiştir. Doğrudan metanol yakıt hücreleri, metanol, benzin ve mazottan daha düşük olsa da hidrojenden daha büyük yakıt yoğunluğuna sahip olduğundan diğer yakıt hücrelerinde tipik olan yakıt depolanması sorunlarından birçoğuna sahip değildir. Metanol aynı zamanda benzin gibi bir sıvı olduğundan taşınması kolaydır ve günümüzdeki mevcut alt yapıya uygun olarak kamu kullanımına açılabilir. Saf hidrojenle çalışan yakıt hücreleri ile karşılaştırıldığında doğrudan metanol yakıt hücresi teknolojisi göreceli olarak daha yenidir ve DMYH

araştırma ve geliştirmeleri diğerk yakıt hücrelerinin kabaca 3-4 yıl gerisindedir. (Anonim, 2014f).



Anot

Katot



şekil 3.5 DMFH nin genel yapısı

3.3.5. Alkali yakıt hücresi

Alkalın yakıt pili 1902'lerden beri tanımlanmaktadır. Fakat Cambridge'de Bacon tarafından değışken güç üniteleri olarak 1940 ve 1950'lerde doğruluğı tespit edilmiştir. PEM yakıt pili NASA'nın ilk insanlı uzay aracı için seçilmiş olmasına rağmen, Apollo misyonlarıyla aya insan taşıyan araçlarda kullanılan yakıt pilleri alkalın yakıt piliydi. Bu uygulamadaki alkalın yakıt pilinin başarısı ve Bacon tarafından yüksek güçte çalışan yakıt pillerinin gösterimi; 1960'lardan 1970'lere kadar alkalın yakıt pillerinin birçok deney ve gelişmelerine yol açmıştır. Alkalın yakıt pilleri, zirai traktörlerde, güç arabalarında, kıyıda uzakdaki denizcilik teçhizat ve botlarına güç sağlamada, fork lift araçlarının sürülmesi gibi yerlerde kullanılmıştır. Bu sistemlerin bazıları demonstrasyon olarak oldukça iyi çalışmalarına rağmen, maliyet, güvenilirlik, kullanım kolaylığı, karmaşık yapı ve emniyet gibi diğerk zorluklar kolaylıkla çözülememiştir. Bu geniş mühendislik problemlerini çözmek için girişimlerde bulunulduğı zaman; yakıt pillerinin rakip

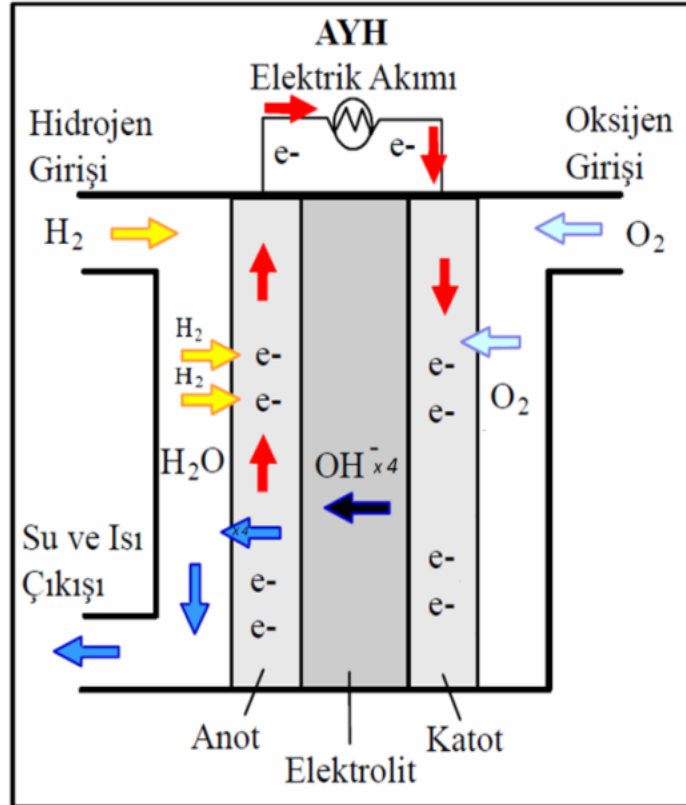
enerji dönüşüm teknolojileri ile rekabet edemediği görülmüştür ve araştırma ve gelişmeler azaltılmıştır. Son zamanlarda, PEM yakıt pilindeki gelişmeler, alkalın yakıt pillerindeki ilginin azalmasına neden olmuştur ve şu an çok az sayıda şirket veya araştırma grubu bu alanda çalışmaktadır. Alkalın yakıt pili dünyasında uzay programı parlayan bir yıldız olarak kalmıştır. Apollo sistemi, uzay mekiği uydu araçları için geliştirilmiş ve ilerletilmiştir. Alkalın yakıt pilleri, uzay programındaki başarılarından dolayı, 20. yüzyılın son yarısından sonra yakıt pili teknolojik gelişmesinin sürekliliğinde çok büyük bir rol oynamıştır.

Alkalın yakıt pilleri, nispeten önem kaybetmesine rağmen, AFC üzerindeki çalışmalar devam etmektedir. ABD, Kanada ve Avrupa'daki birkaç şirket AFC üretimi ve gelişimi üzerinde çalışmaktadırlar. Bunun sebebi, AFC'nin diğer yakıt pili türlerinin üzerinde bir takım açık ve temel avantajlara sahip olmasıdır. AFC'nin ilk önemli avantajı, katottaki aktivasyon aşırı geriliminin genellikle bir asit elektrolitten daha az olmasıdır. Bu durum, düşük sıcaklıklı yakıt pillerinde en önemli gerilim kaybıdır. Alkalın sisteminde oksijen ilerlemesinin çok hızlı bir şekilde azalmasının nedeni açıkça anlaşılamaz. Fakat bunu gözlemlemek uzun zaman alır. Sisteme bağlı diğer önemli avantaj da maliyettir. Potasyum hidroksitten daha ucuz olan çok az standart kimyasallar vardır. Alkalın, aslında çok düşük maliyette bir metaldir. AFC'nin elektrot maliyeti herhangi bir diğer tip hücreden daha azdır ve daima böyle olacaktır. Aynı zamanda elektrotlar, özellikle katot, değersiz metallerden yapılabilir ve özellikli ve değerli materyaller gerekli değildir. Böylece AFC elektrotları, diğer yakıt pili türlerindeki gibi oldukça ucuzdur.

AFC'lerin son avantajı, AFC'lerin genellikle iki kutuplu tabakalara sahip olmamalarıdır. Bu tabakalar PEMFC'nin maliyetine önemli bir katkıda bulunur. Maliyet azalmasında bir fayda sağlanmakla beraber, PEMFC ile karşılaştırıldığında, bu durumun, düşük reaksiyon yoğunluğunun önemli bir nedeni olduğu söylenebilir. Sonuç olarak; AFC'ler genellikle oldukça karmaşık sistemler iken genellikle PEMFC'den biraz daha az karmaşık oldukları not edilmelidir. Örneğin AFC de su yönetimi problemi daha kolaylıkla çözülmüştür (Dicks ve Larminie, 2000).

Alkali yakıt hücreleri (AYH)'ler geliştirilen ilk yakıt hücresi teknolojilerindendir ve birleşik devletler uzay programında uzay mekiklerin üzerine monte edilmiş olarak

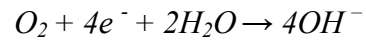
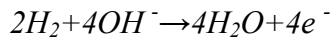
elektrik enerjisi ve su üretmek için yaygın olarak kullanılan ilk tip yakıt hücreleriydiler. Bu yakıt hücreleri elektrolit olarak potasyum hidroksit'in sulu çözeltisini kullanırlar ve anot ve katotta değersiz-metallerin birçoğunu elektrolit olarak kullanabilirler. AYH yakıt hücrelerinin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri Sekil 3.6.'da verilmiştir. Yüksek-sıcaklık AYH'ler 100°C ve 250°C (212°F ve 482°F) arasındaki sıcaklıklarda çalışırlar. Bununla birlikte, yeni AYH



tasarımları yaklaşık 23°C ve 70°C (74°F ve 158°F) arasındaki daha düşük sıcaklıklarda çalışırlar.

Anot

Katot



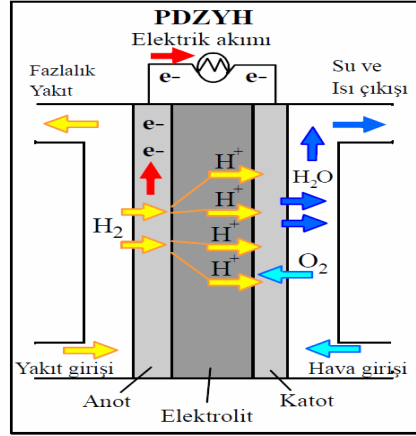
Şekil 3.6. AYH genel yapısı.

AYH'lerin yüksek performansı hücre içinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonların içinde bulundukları süreç yüzündendir. Bunlar aynı zamanda uzay uygulamalarında %60'a varan verimlilikler göstermiştir.

Bu yakıt hücresi türlerinin dezavantajı karbondioksit (CO_2) tarafından kolayca kirletilmeleridir. Havadaki çok küçük miktardaki CO_2 bile, hücre içerisinde kullanılan hem hidrojen hem oksijeni saflaştırmamızı zorunlu kılacak şekilde, bu hücrelerin çalışmasına etki eder. Bu saflaştırma işlemi pahalıdır. Kirlenmeye karşı bu duyarlılık aynı zamanda hücre ömrüne etki ederek maliyete katkıda bulunur (Anonim, 2014f).

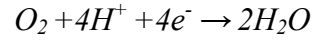
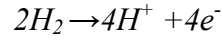
3.3.6. Proton değişim zarlı yakıt hücresi

Proton değişim zarlı yakıt hücresi (PDZYH) ince, geçirgen bir tabaka şeklindeki polimer bir elektrolit ile çalışır. Bu zar küçük ve hafif olmakla birlikte düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 80°C yada 175°F civarında) çalışır. Diğer elektrolitler 1000°C 'ye varan sıcaklıklar gerektirir. Reaksiyonu hızlandırmak için zarın her iki tarafında da platin katalizör kullanılır. Hidrojen atomları anotta iyonize olur, ve pozitif yüklü protonlar gözenekli zarın bir tarafından difüzyona uğrar ve katoda geç ederler. Elektronlar anottan katoda dış bir devre üzerinden akar ve yol boyunca elektriksel güç üretirler. Katotta elektronlar, hidrojenin protonları ve havadan gelen oksijen, su oluşturmak üzere bir araya gelirler. PDZYH'nin çalışma prensibi ve kimyasal tepkimeleri Şekil 3.7.'de verilmiştir. Bu yakıt hücresinin çalışması için proton değişim zarlı elektrolit üzerinden hidrojen protonlarının içinden geçmesine izin vermeli ancak elektronların ve daha ağır gazların geçişine izin vermemelidir. Bir PDZYH'nin verimi %40–50'lere ulaşır. Metanol ve benzin gibi yakıtlardan hidrojen üretmek için harici bir reformerde ihtiyaç vardır. Halen 50 kW kapasiteye sahip üniteler kullanımdadır ve 250 kW kadar güç üretebilecek olanları geliştirilmektedir (Anonim, 2014g).



Anot

Katot



Şekil 3.7. PDZYH genel yapısı

3.4.Yakıt Pillerinin Üstünlükleri

Günümüzde bütün yakıt pilleri tipleri için en önemli dezavantaj, maliyettir. Yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojenin kullanılması, hidrojen elde edilmesindeki güçlükler nedeniyle dezavantaj gibi gözükmemektedir. Fosil yakıtlar tükendikçe, hidrojenin dünyanın en büyük yakıt ve enerji vektörü olacağı düşünüldüğünde bu dezavantaj avantaja dönüşecektir.

Yakıt pillerinin avantajları, kombine ısı ve güç sistemlerinde (geniş ve küçük boyutlu uygulamaların her ikisi için) ve özellikle araçlar gibi hareketli güç sistemlerinde ve taşınabilir Notebooklarda, mobil telefonlar ve askeri haberleşme araçları gibi elektronik teçhizatlarda etkilidir. Bu alanlar, yakıt pillerinin kullanıldığı en geniş sahalardır. Burada en önemli amaç, birkaç wattlık sistemlerden megawatlara kadar yakıt pili gücünün geniş çapta uygulama alanı bulmasıdır. Bu bakımdan yakıt pilleri, enerji dönüştürücüler olarak her yönleriyle üstün özellikler taşırlar (Dicks ve Larminie, 2000).

Elektrik üretimini, sürekli olarak yakıt beslendiğinde sürdürebilen böyle bir sistem, konvansiyonel bir güç üretim sistemi olarak düşünülebilir, ancak yakıt hücreli güç sistemleri dönen kısımları olmaması nedeniyle konvansiyonel güç sistemlerinden farklıdır.

Yakıt hücreleri konvansiyonel sistemlere göre aşağıdaki üstünlüklere sahiptir:

- Verim; Enerji üretim verimi oldukça yüksektir, Yakıt pilleri genelde piston veya türbin tabanlı yakıt motorlarından daha verimlidir. Küçük sistemler büyük sistemler kadar verimli olabilirler.
- Olumsuz Çevresel etkileri çok azdır. Düşük emisyonu sahiptirler.
- Sessizlik; Ekstra yakıt işleme teçhizatıyla bile yakıt pilleri oldukça sessizdirler. Bu durum hem taşınabilir güç uygulamaları hem de ısı ve gücün birleştirildiği bölgesel güç üretiminde oldukça önemlidir.
- Farklı tipte yakıtlarla çalışabilir (doğal gaz, LPG, metanol, nafta),
- Ekzost (atık) ısının yeniden kullanım imkânı vardır,
- Basitlik; Hareketli parçaları olsa da bu parçaların az olmasıyla yakıt pillerinin yapıları çok basittir, bu durum uzun süreli ve oldukça güvenilir sistemlere yön gösterebilir. Ayrıca modüler olup montaj süreleri kısadır.
- Çok yüksek miktarda soğutma suyu (deniz suyu gibi gerektirmez),
- Güvenilir bir sistemdir,
- İşletim karakteristiği uygulamada kolaylıklar sağlar,
- Geleceğe yönelik olarak gelişme potansiyeli oldukça yüksektir (Anonim, 2014d).

4. PEM YAKIT HÜCRESİNİN VERİMLİLİK HESABI VE PERFORMANSI

PEM yakıt pilinin çalışma performansını değerlendirmek için, sistemdeki elektriksel devreye dirençler bağlanmış ve değişik direnç değerlerinde devreden geçen akımlar ile yakıt pilinin bu dirençlerde oluşturduğu gerilim değerleri kaydedilmiştir. Bu bulgular kullanılarak sistemin farklı akım ve gerilimlere karşılık gelen güç değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar kullanılarak devreden geçen akımın değişmesi ile PEM yakıt pilinin sağladığı gerilim ve güç değerleri çizilen grafiklerde değerlendirilmiştir.

Yine sistemin kullanılabilir gerilim değerlerini ürettiği bölgeler yakıt hücresinin Volt/Akım grafiğinden bulunarak bu voltaj değerleri için sistem veriminin en fazla ve en az değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca sisteme belli bir miktar elektrik enerjisi verilmiş ve elde edilen hidrojen gazı ile alınan elektrik enerjisi ölçülerek sistemin gerçek verimliliği bulunmuştur.

4.1. PEM Yakıt Hücresinin Verimlilik Hesabı

Herhangi bir yakıt hücresinin verimi, Eşitlik 6,1’de gösterildiği üzere her ikisi de

$$\eta_{yh} = \text{elektriksel güç çıkışı (P}_{yh}) / \text{yakıt girişi (F}_{yh}) \quad (6.1)$$

Elektriksel çıkış gücü ise Eşitlik 6,2’deki gibi basitçe gerilim (V) ve akım (I)’ın çarpımıdır.

$$P_{yh} = V \cdot I \quad (6.2)$$

Yakıt girişi, genelde entalpi (ΔH) ya da yüksek ısıtma değeri olarak verilen, (Watt cinsinden) yakıt (hidrojen) tüketim oranı (g/s cinsinden) ve bunun enerji içeriğinin

bir çarpımıdır. Hidrojenin yüksek ısıtma değeri 142,000 J/g'dır. Elektrokimyasal reaksiyonda hidrojenin tüketim oranı (g/s cinsinden)



Faraday yasası uyarınca Eşitlik 6.4 ile belirlenir,

$$q\text{H}_2 = mI / nF \quad (6.4)$$

burada m, hidrojenin molekül ağırlığı (2,016); I, akım (Amper); n, reaksiyona dahil olan elektronların sayısı (2) ve F, Faraday sabitidir (96,450 C/mol). Böylece yakıt giriş gücü Eşitlik 6,5'deki gibi olur. (Barbir ve Gomez, 1997; Al-Baghdadi ve Al-Canabi, 2005).

$$F_{yh} = q\text{H}_2 \cdot \Delta H = m \cdot \Delta H \cdot I / n \cdot F \quad (6.5)$$

Eşitlik 6,3'deki elektrokimyasal tepkime $m\Delta H/(nF)$ 1,482 V'luk bir değere sahiptir. Buna, elektrokimyasal tepkime Eşitlik 6.3 sonucu ortaya çıkan azami elde edilebilir enerji (hem elektriksel hem termal) ile ilgili tersinir potansiyel adı verilir. Böylece, 6.1, 6.2, 6.4 ve 6.5 eşitlikleri birleştirilerek, yakıt hücresi verimi basitçe Eşitlik 6.6'daki gibi asıl çalışma voltajı ve 1,482 V'un oranı olur. (Barbir ve Gomez, 1997; Al-Baghdadi ve Al-Canabi, 2005).

$$\eta_{yh} = V/1,482 \quad (6.6)$$

4.2. Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresinin Performansı

Bir yakıt hücresi kimyasal enerjiyi mükemmel bir şekilde elektrik enerjisine çeviriyor olsaydı, yakıt hücresinin ideal voltajı 25°C ve 1 atmosferde 1,23 volt olurdu. Yakıt hücresi 80°C sıcaklığı civarına kadar ısıtıldığında ideal hücre voltajı 1,18 volta kadar düşer. Bununla birlikte hücre voltajını daha da aşağılara düşüren birçok faktör mevcuttur. Hücre dışında ölçülen voltaj elektriksel verim için iyi bir

ölçüttür; voltaj düşerse, elektriksel verim de düşer ve su ile ısı oluşumu için çok daha fazla kimyasal enerji harcanmış olur.

Hücre voltajının azalması ile ilgili başlıca kayıplar şunlardır:

•**Aktivasyon kayıpları**

Aktivasyon enerjisi hücrede meydana gelen reaksiyonların sürdürülebilmesi için gerekli enerjidir. Bu katalizörün bir sonucudur. İyi bir katalizör kullanıldıkça daha az aktivasyon enerjisine gerek kalır. Platin çok iyi bir katalizör olarak iş görüyor olsa da daha iyi katalizör görevi görecekt malzemeler bulmak için çalışmalar sürmektedir. Bir yakıt hücresinden elde edilebilecek güç yoğunluğu için sınırlayıcı koşul reaksiyonun meydana gelebileceği süredir. Katot reaksiyonu (oksijenin indirgenmesi), anotta geçen reaksiyondan yaklaşık 100 kat daha yavaş olmaktadır, böylelikle güç yoğunluğunu belirleyen unsur katot reaksiyonu olmaktadır.

•**Yakıt geçişleri ve iç akımlar**

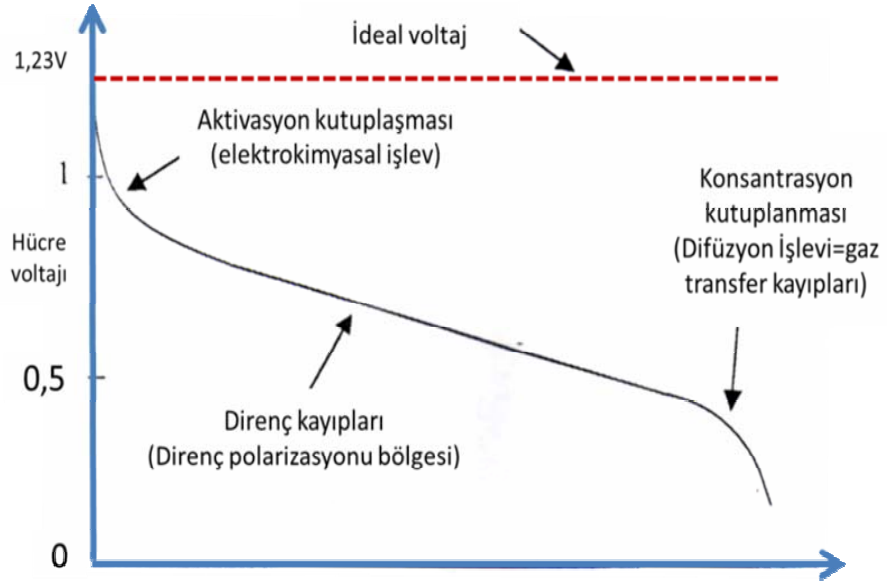
Yakıt geçişleri ve iç akımların nedeni elektroliti elektronlarını dış devreye bırakmadan doğrudan doğruya anottan katoda geçen ve böylelikle yakıt hücresinin verimini azaltan yakıtın bir sonucudur. Yani H_2 gaz basıncı iyi ayarlanarak, hidrojenin tamamının O_2 le birleşmesi sağlanmalıdır.

•**Omik kayıplar:**

Omik kayıplar yakıt hücresinin değişik bileşenlerinin dirençlerinin bir bileşkesidir. Bunlar elektrot malzeme direncini, elektrolit zarın direncini ve birçok bağlar arası direnci içermektedir.

•**Konsantrasyon (kütle taşınım) kayıpları:**

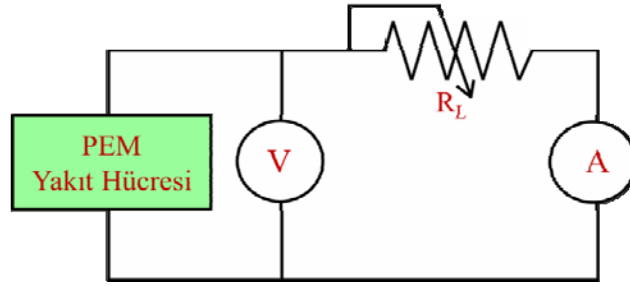
Bu kayıplar elektrotlarda hidrojen ve oksijen gazları konsantrasyonlarının azalmasından meydana gelmektedir. Örneğin, reaksiyonun sürebilmesi için katalizör bölgelerinde anında yeni gazların gelmesi gerekmektedir. Katotta suyun oluşması ile özellikle yüksek sıcaklıklarda katalizör bölgeler tıkanabilir ve oksijenin geçişini engelleyebilir. Bu durumlarda fazlalık suyun uzaklaştırılması önem kazanmaktadır, bu yüzden bu kayıpların adı kütle taşınım kayıpları olarak da bilinmektedir



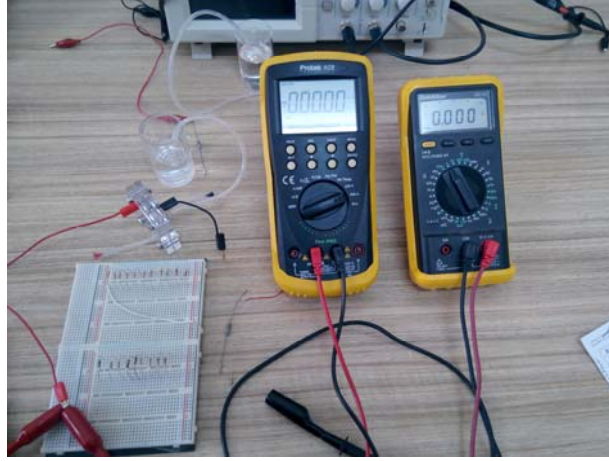
Şekil 4.1. Yakıt pili ideal ve gerçek voltaj-akım karakteristiği

5. BULGULAR

Bu bölümde ölçüm alımı ve ölçüm sonuçları verilecektir. PEM yakıt hücresinin verimliliğini incelemek için kurulan elektrik devresine çeşitli değerlerde dirençler ve ölçümler için devreye seri ampermetre ve paralel olarak voltmetre Şekil 5.1.'de gösterildiği gibi bağlanmıştır. Yük direnci olarak 0,33 Ω ve 98300 Ω arası çok sayıda dirençler takılmıştır. Deney sonuçlarının sağlıklı alınabilmesi için potansiyometrenin çevrilmesinden kaynaklı mekanik gerilmenin neden olacağı direnç sapmaları göz önünde bulundurularak sabit dirençler kullanılmıştır.



Şekil 5.1. PEMYH ölçümlerini almak için kurulan devrenin şematik gösterimi



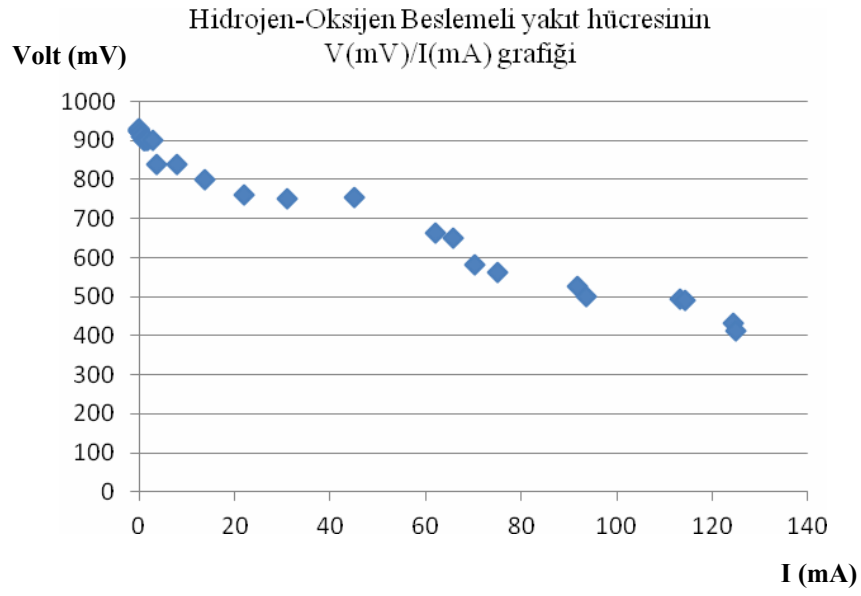
Şekil 5.2. PEM yakıt pili deney düzeneği

Değişik dirençlerde devreden geçen akımlar ile direncin uçlarında oluşan gerilimler kaydedilmiştir. Burada direncin uçlarındaki gerilim yakıt hücresinin anot katot arasındaki potansiyel farktır. Kaydedilen veriler kullanılarak devrenin farklı gerilim ve akım değerleri için gücü bulunmuştur. Kurulan sisteme ait akım, gerilim ve güç değerleri çizilerek yorumlanmıştır. Grafiklerden yola çıkılarak sistemde kullanılan PEM yakıt hücresinin optimal çalışma voltajı tesbit edilmiştir.

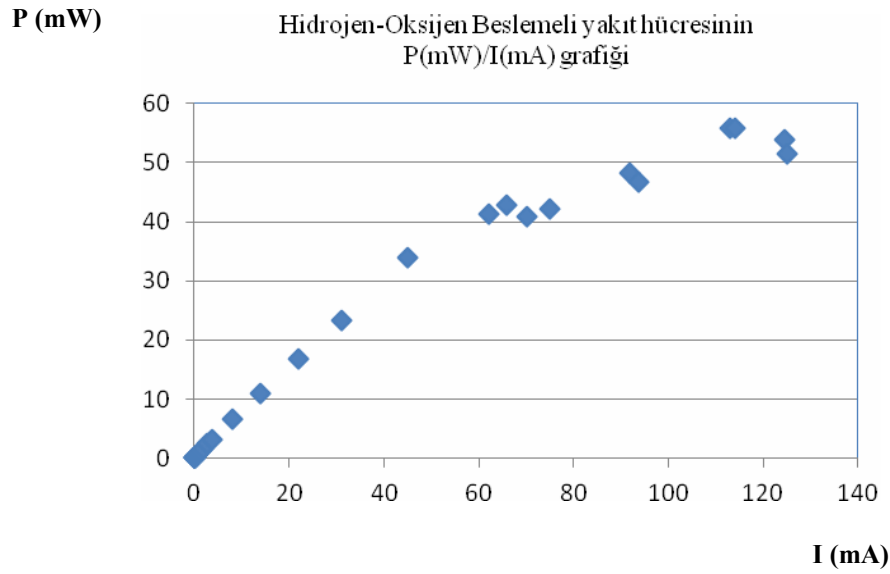
Düzeneğe önce 98300 Ω direnç bağlanmış ve çoktan aza doğru direnç değerleri 0,33 Ω 'kadar düşürülmüştür. Her direnç değeri için voltmetre ve ampermetredeki değerler kaydedilmiştir. Bu veriler ile Eşitlik 6.2' kullanılarak her direnç değeri için PEM yakıt hücresinin ürettiği elektriksel güç hesaplanmıştır. Direnç değiştirilerek yapılan bu ölçüm aşamaları ve hesaplamalar hem hidrojen/hava hem de hidrojen/oksijen beslemeli PEM yakıt hücreleri için yinelenmiş, bunlar için ayrı ayrı çizelgeler oluşturulmuş ve grafikleri çizilmiştir. Çizelge 5.1.'de hidrojen/oksijen beslemeli PEM yakıt hücresinin ölçüm sonuçları verilmiş ve bu verilerle yakıt hücresinin Şekil 5.3.'de V/A grafiği ve Şekil 5.4'te P/A grafiği çizilmiştir. Çizelge 5.2.'de ise hidrojen/hava beslemeli PEM yakıt hücresinin ölçüm sonuçları verilmiş ve bu veriler kullanılarak PEM yakıt hücresinin Şekil 4.4 V/A grafiği ve Şekil 4.5'de P/A grafiği çizilmiştir.

Çizelge 5.1. Hidrojen/oksijen beslemeli PEM yakıt hücresinin azalan yük dirençlerine göre ölçülen A,V ve hesaplanan P değerleri

Hidrojen/Oksijen beslemeli PEM			
R (Ω)	I (mA)	V(mv)	P(mW)
98300	0,0093	923	0,008584
80900	0,0113	923	0,01043
67300	0,0137	925	0,012673
47300	0,0193	928	0,01791
32930	0,028	927	0,025956
21770	0,0424	926	0,039262
14880	0,06	930	0,0558
9980	0,08	930	0,0744
5040	0,16	920	0,1472
2190	0,4	910	0,364
1520	0,55	910	0,5005
988	0,9	900	0,81
819	1,07	900	0,963
681	1,3	900	1,17
611	1,44	900	1,296
500	1,77	900	1,593
319,5	2,77	900	2,493
222,8	3,79	840	3,1836
100,2	8	840	6,72
55,7	13,8	800	11,04
31,9	22	760	16,72
21,3	31	750	23,25
10	50,85	720	33,975
9	62,05	664	41,2012
8	65,85	649	42,73665
5	70,19	582	40,85058
4	74,97	562	42,13314
3	91,77	525	48,17925
2	93,67	500	46,835
1,6	113,1	493	55,7583
1	114,16	490	55,9384
0,6	124,44	433	53,88252



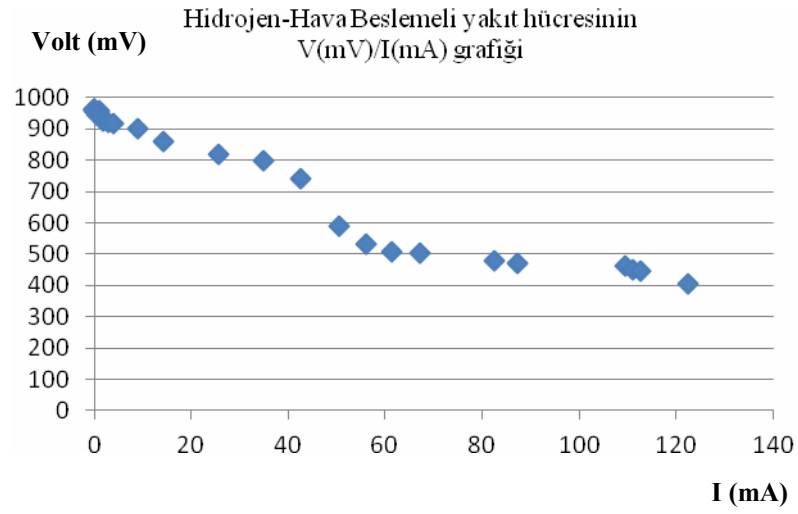
Şekil 5.3. Hidrojen/oksijen beslemeli PEM yakıt hücresinin azalan yük dirençlerine göre V/A grafiği



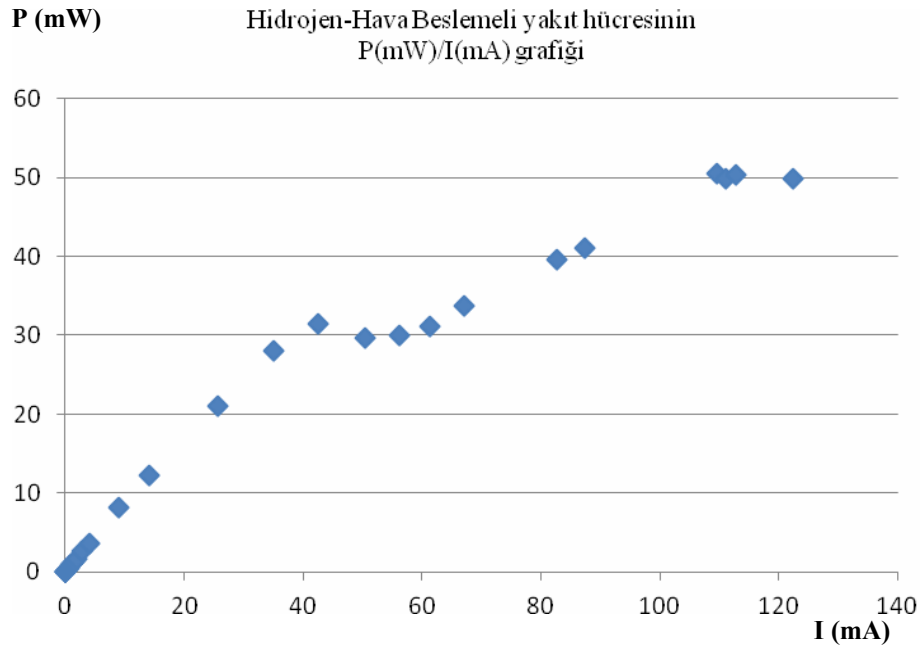
Şekil 5.4. Hidrojen/oksijen beslemeli PEM yakıt hücresinin azalan yük dirençlerine göre P/A grafiği

Çizelge 5.2. Hidrojen/hava beslemeli PEM yakıt hücresinin azalan yük dirençlerine göre ölçülen A,V ve hesaplanan P değerleri

Hidrojen/Hava beslemeli PEM			
R (Ω)	I (mA)	V(mv)	P(mW)
98300	0,0096	962	0,009235
80900	0,0117	962	0,011255
67300	0,0141	961	0,01355
47300	0,02	961	0,01922
32930	0,029	961	0,027869
21770	0,042	960	0,04032
14880	0,0637	959	0,061088
9980	0,945	958	0,90531
5040	0,184	957	0,176088
2190	0,414	955	0,39537
1520	0,582	947	0,551154
988	0,855	947	0,809685
819	1,02	942	0,96084
681	1,19	939	1,11741
611	1,5	935	1,4025
500	1,83	926	1,69458
319,5	2,85	922	2,6277
222,8	4	918	3,672
100,2	9	901	8,109
55,7	14,2	860	12,212
31,9	25,6	820	20,992
21,3	35	800	28
10	42,5	740	31,45
9	50,41	590	29,7419
8	56,16	534	29,98944
5	61,25	509	31,17625
4	67,08	503	33,74124
3	82,6	479	39,5654
2	87,33	470	41,0451
1,6	109,57	461	50,51177
1	111,05	449	49,86145
0,6	112,75	447	50,39925



Şekil 5.5. Hidrojen/hava beslemeli PEM yakıt hücresinin azalan yük dirençlerine göre V/A grafiği



Şekil 5.6. Hidrojen/hava beslemeli PEM yakıt hücresinin azalan yük dirençlerine göre P/A grafiği.

Hidrojen/oksijen beslemeli PEM yakıt hücresine ait grafikler incelendiğinde kullanılabilir güç aralığının 2,77mA' e karşılık 900mV olduğu ve 114,16 mA'e karşılık 493mV arası olduğu anlaşılmıştır. Bu değerlere ait verimin Eşitlik 6.6'dan

$$\eta_{yh} = V/1,482 = 0,900/1,482 = 0,607 = \%61$$

$$\eta_{yh} V = V/1,482 = 0,493/1,482 = 0,332 = \%33$$

%61 ve %33 arasında olduğu tesbit edilmiştir. PEM yakıt hücresinin en fazla güçle çalıştığı 55,9384mW değerine karşılık oluşturduğu gerilimdeki (490mV) verimi ise

$$\eta_{yh} V = V/1,482 = 0,490/1,482 = 0,330 = \%33$$

olarak bulunmuştur.

Bu sefer Hidrojen/Hava beslemeli PEM yakıt hücresine ait grafikler incelendiğinde ise kullanılabilir güç aralığının 4,00mA' e karşılık 918mV olduğu ve 82,6 mA'e karşılık 461mV arası olduğu anlaşılmıştır. Bu değerlere ait verimin Eşitlik 6.6'dan

$$\eta_{yh} = V/1,482 = 0,918/1,482 = 0,619 = \%62$$

$$\eta_{yh} V = V/1,482 = 0,479/1,482 = 0,3232 = \%32$$

%62 ve %31 arasında olduğu tesbit edilmiştir. PEM yakıt hücresinin en fazla güçle çalıştığı 50,5118mW değerine karşılık oluşturduğu gerilimdeki (461mV) verimi ise

$$\eta_{yh} V = V/1,482 = 0,461/1,482 = 0,3111 = \%31$$

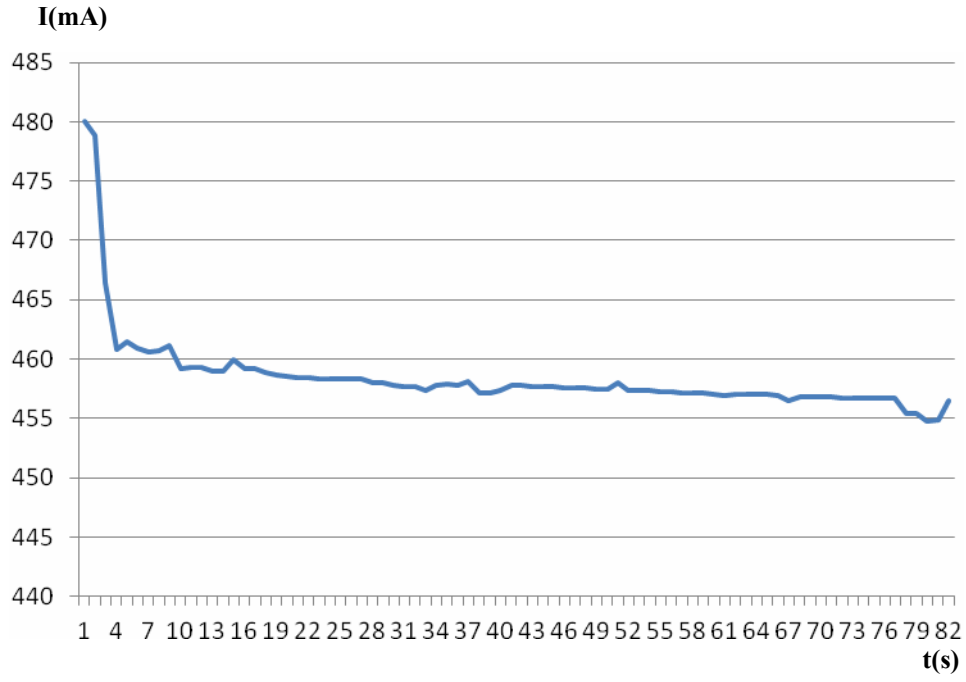
olarak bulunmuştur.

Yapılan teorik hesaplamaların dışında Hidrojen/oksijen beslemeli PEM yakıt hücresi için zamana bağlı reel ölçümler gerçekleştirilmiş, suyun elektrolizi için pil, geçen akım şiddetinin ölçüm değerlerini almak için de iç direnci 1ohm olan ampermetre bağlanmıştır. Daha sonra 81saniye boyunca her bir saniyede geçen akım şiddeti Çizelge 5.1.'de olduğu gibi kaydedilmiş, sonuçta $E = I^2 R t$ 'den sisteme verilen toplam elektrik enerjisinin 17,2346J olduğu hesaplanmıştır. Aynı işlem her bir saniyede PEM yakıt pilinden elektrik enerjisi alınırken de yapılmış Çizelge 5.3.'de olduğu gibi

kaydedilmiş ve toplam alınan elektrik enerjisinin 5,00178J olduğu bulunarak PEM yakıt hücresinin veriminin %29,02 olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3. PEM yakıt hücresine zamana bağlı verilen elektrik enerjisine ve üzerinden geçen akım şiddetine ait değerler.

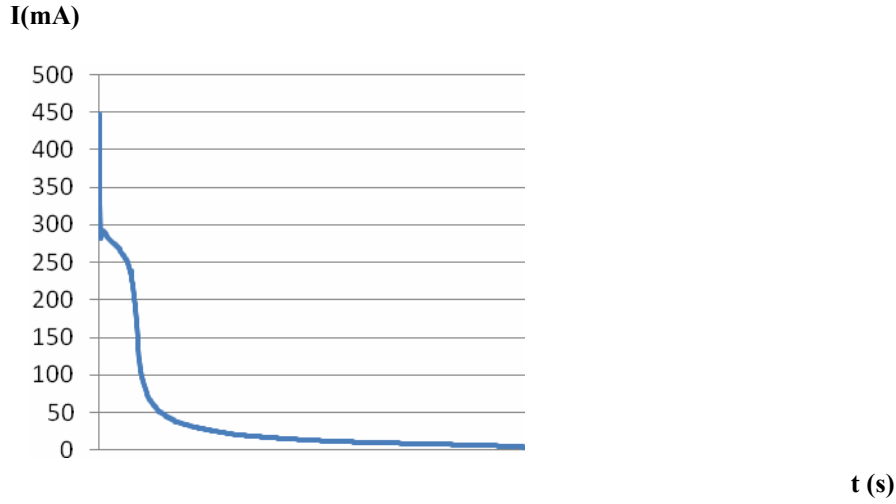
Elektroliz	mA	EE=joule	Elektroliz	mA	EE=joule	Elektroliz	mA	EE=joule
0	480	0,2304	27	458,04	0,2098006	55	457,26	0,2090867
1	478,89	0,2293356	28	457,99	0,2097548	56	457,18	0,2090136
2	466,42	0,2175476	29	457,8	0,2095808	57	457,15	0,2089861
3	460,81	0,2123459	30	457,73	0,2095168	58	457,11	0,2089496
4	461,48	0,2129638	31	457,73	0,2095168	59	457,08	0,2089221
5	460,88	0,2124104	32	457,33	0,2091507	60	456,97	0,2088216
6	460,56	0,2121155	33	457,78	0,2095625	61	457,06	0,2089038
7	460,67	0,2122168	34	457,85	0,2096266	62	457,03	0,2088764
8	461,12	0,2126317	35	457,84	0,2096175	63	457,03	0,2088764
9	459,22	0,210883	36	458,06	0,209819	64	456,98	0,2088307
10	459,25	0,2109106	37	457,17	0,2090044	65	456,95	0,2088033
11	459,3	0,2109565	38	457,18	0,2090136	66	456,49	0,2083831
12	459	0,210681	39	457,4	0,2092148	67	456,82	0,2086845
13	459,02	0,2106994	40	457,79	0,2095717	68	456,84	0,2087028
14	459,91	0,2115172	41	457,78	0,2095625	69	456,85	0,2087119
15	459,22	0,210883	42	457,73	0,2095168	70	456,83	0,2086936
16	459,22	0,210883	43	457,7	0,2094893	71	456,66	0,2085384
17	458,89	0,21058	44	457,65	0,2094435	72	456,72	0,2085932
18	458,67	0,2103782	45	457,61	0,2094069	73	456,72	0,2085932
19	458,59	0,2103048	46	457,56	0,2093612	74	456,74	0,2086114
20	458,46	0,2101856	47	457,53	0,2093337	75	456,67	0,2085475
21	458,47	0,2101947	48	457,51	0,2093154	76	456,71	0,208584
22	458,31	0,2100481	49	457,48	0,209288	77	455,41	0,2073983
23	458,29	0,2100297	50	457,99	0,2097548	78	455,36	0,2073527
24	458,37	0,2101031	51	457,37	0,2091873	79	454,77	0,2068158
25	458,31	0,2100481	52	457,35	0,209169	80	454,84	0,2068794
26	458,33	0,2100664	53	457,31	0,2091324	81	456,48	0,208374
			54	457,27	0,2090959	Toplam :		17,234661



Şekil 5.7. PEM yakıt hücresine zamana bağlı verilen elektrik enerjisine ait akım zaman grafiği

Çizelge 5.4. PEM yakıt hücresinden zamana bağlı olarak alınan enerji ve ürettiği akım değerleri. Ek-1’de sunulmuştur

H2 Tüketim süresi(s)	mA	EE=joule (alınan enerji)
0	448	0,200704
1	326,41	0,106543488
2	281,9	0,07946761
3	285,91	0,081744528
4	291,62	0,085042224
5	291,62	0,085042224
6	291,62	0,085042224
...	...	...
...	...	.
1314	0,05	2,5E-09
Toplam alınan enerji(J)=		5,001781501



Şekil 5.8. PEM yakıt hücresinden zamana bağlı olarak alınan enerjiye ait akım zaman grafiği

Alınan veriler sonucunda Çizilen akım-voltaj grafiklerinde üç bölgeyi sayılabilecek bir eğri oluşmuştur. Bu grafik bölgelerinden birincisi yakıt hücresi akım ürettikçe voltajdaki düşüş bölgesidir. Bu grafik bölgesindeki gerilim düşmesinin en önemli nedeni; PEM yakıt hücresi akım üretmeye başladığında hücre içinde kimyasal reaksiyonların sürdürebilmesi için ürettiği gücün bir miktarının bu kimyasal reaksiyonların oluşmasına harcanmasıdır. Bu bölgeye **aktivasyon bölgesi** denir. PEM Yakıt hücreleri bir devreye bağlanmadığında anot ve katot elektrotları arasında 1 voltun da biraz üstünde gerilim oluştururlar. Eğer bir devreye bağlanırsa geçen akım şiddetine göre gerilimde düşüş görülür. Hidrojen/oksijen beslemeli PEM yakıt hücresinde bu düşüş değeri 0,900V değerine kadar sürerken hidrojen/hava beslemeli yakıt hücresi için bu değer 0,918V olarak gözlenmiştir.

Bu değerlerden itibaren yakıt hücresinin ürettiği akım artmaya başlamış ve gerilimdeki düşüş devam etmiştir. Yük direncinin değeri azaltıldıkça akım artmaktadır ancak bununla birlikte yakıt hücresinin geriliminde de hızlı düşme gözlenmektedir. Bu bölgede akımdaki artış ve gerilimdeki düşme doğru orantılıya yakın olarak değişmektedir. Ohm kanunundaki; bir elektrik devresinde iki nokta arasındaki iletken üzerinden geçen akım, potansiyel farkla doğru; iki nokta

arasındaki dirençle ters orantılıdır ilkesine benzerlik gösterdiğinden bu bölgeye **omik bölge** denir.

Bu bölgedeki gerilim düşmesinin nedeni ise elektrolitin iyonik direnci olmak üzere, karbon örgüler, grafit gaz akış plakaları gibi hücre bileşenlerinin gösterdiği elektronik dirençlerin toplamından kaynaklanmaktadır.

Omik gerilim düşmeleri hidrojen/oksijen beslemeli yakıt hücresi için 0,493 V değerine kadar, hidrojen/hava beslemeli yakıt hücresi için ise 0,461 V değerine kadar gözlemlenmiştir.

Omik bölgeden sonraki kayıpları **difüzyon kayıpları** bölgesi takip etmektedir. Bunun nedeni direncin aşırı düşmesinden kaynaklı geçen akım şiddetinin ve kimyasal tepkimelerin artması dolayısıyla katot tarafında ürünün (H_2O) yoğunluğunun artması bundan dolayı kimyasal sentez reaksiyonunu zıt yönde yani elektroliz reaksiyonu olarak zorlamasıdır. Yakıt hücresi bu bölgede oluşan su yoğunluğu farkını yenmek için geriliminin geri kalan kısmını bu iş için harcar.

Daha sonrasında ise yakıt hücresinde oluşan elektriksel potansiyel farkın tamamı bu kayıpları yenmek için harcıdığından anlamlı büyüklükte bir gerilim oluşmaz.

PEM yakıt hücresinin P/A grafiklerinden H_2/O_2 beslemelisinin ürettiği en fazla güç değerinin 55,9384mW olduğu ve H_2 /hava beslemelisinin ise en fazla üretebileceği güç değerinin 50,5118mW olduğu tespit edilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada kimyasal enerjiden yanma olmadan direkt elektrik enerjisi elde etme yöntemi kullanılan PEM yakıt hücresi incelenmiş ve farklı kimyasal beslemelerle (Hidrojen/oksijen ve Hidrojen/Hava) yakıt hücresinin çalışma karakteristikleri çıkarılmıştır. Farklı yük dirençleri için PEM yakıt hücrenin ürettiği akım ve gerilim değerleri kaydedilmiş, bu verilerle PEM yakıt hücresinin akım-voltaj, akım-güç grafikleri çizilmiş ve bu grafiklerden yakıt hücresinin hangi akım ve gerilimde nasıl bir verimle çalıştığı Gibbs serbest enerjisi kullanılarak araştırılmış, sonuçların gerçeği ne kadar yansıttığını bulmak için de reel olarak yakıt hücresine ölçülerek bir miktar enerji verilmiş ve alınan enerji ölçülerek gerçek verimliliği bulunmuştur.

PEM Yakıt hücresinin verimi oluşturabildiği elektriksel potansiyel farkla (gerilim) doğru orantılıdır. Hidrojen/oksijen beslemeli PEM yakıt hücresinde aktivasyon bölgesinin bittiği kullanılabilir gücün üretilmeye başlandığı omik bölgenin ilk kısmındaki verimi %61 son kısmında ise %33 arasında olduğu, en fazla güç üretebildiği değerdeki veriminin ise %33 olduğu bulunmuştur. Hidrojen/hava beslemeli PEM yakıt hücresinde ise kullanılabilir gücün olduğu omik bölgede verimin %62 ile %31 arasında değiştiği ve en fazla elektriksel gücün üretildiği değerdeki verimin %33 olduğu gibbs serbest enerji formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Buradan da anlaşılabileceği üzere PEM yakıt hücrelerinde saf O₂ veya hava kullanılması çok fark etmemektedir.

Yapılan gerçek ölçümlü verimlilik hesabında ise verimin en az %29,022 olduğu bulunmuştur. Ancak grafikteki eğimli alanlar hesaba katıldığında verimin %29,022'dan daha büyük olduğu sonucu çıkarılabilir.

Gibbs serbest enerjisi kullanılarak yapılan verim hesaplarında verimin yüksek çıkmasının bir etkeni de hidrojen dolumunun yinelenmesi dolayısıyla basınç düşmesinden etkilenmemiş olması, uzun süreli H₂ tüketimi olmadığından aktivasyon, omik ve gaz transfer kayıplarından az etkilenmiş olmasıdır.

PEM yakıt hücrelerinin verimlilikleri bağlandığı devrenin çektiği akıma göre değişkenlik göstermektedir. Çözüm olarak Bu tür sistemlerden stabil bir verimin alınabilmesi için kondansatör veya akü gibi ek takviye edici üniteler kullanılabilir.

Yakıt pillerinin güç üretim sistemleri olarak kullanılması ve bu sistemlerin verimlerinin artırılması yönünde; hücre içi kayıpların azaltılması pahalı olan platin yerine daha aktif ve ucuz olan bir katalizörün bulunması, depolanması ile ilgili olarak da kompozit tüpler, yakıtın (hidrojenin) eşit basınç ve oranda pillere dağıtılması üzerinde çalışmalar yapılmalıdır. Olumlu sonuç veren çalışmalarla, yakıt pillerinden elektrik elde etme maliyeti düşürülebilir ve yaygın olarak kullanılmaları gerçekleştirilebilir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının artmasıyla birlikte özel sektörün ürettiği enerjiyi her zaman aktif kullanamayacağı ihtimal dâhilindedir. Bu durumda ürettiği enerjiyi en iyi depolama yöntemi H₂ olacaktır. İster bunu tekrar %40'a varan verimlilikte elektrik enerjisi olarak satabileceği gibi, isterse desülfürizasyon ve hidrokraking işlemlerinin yapıldığı Rafinerilere, Düz cam üretimi yapan fabrikalara, Isı işlemlerinde koruyucu ve reaktif bileşenin ihtiyaç duyulduğu yerlere,, ekipmanlarının soğutulması için enerji santrallerine, bitkisel yağların (doymamış yağların) katılaştırılması için margarin üretim fabrikalarına, roket yakıt karışımlarında kullanılmak üzere aselsana, Ticari gübrelere azot bağlanmasında gübre fabrikalarına, metanol, amonyak ve hidroklorik asit gibi bileşiklerin elde edilmesi için kimya sanayiine, yılda 5840 tane ravinsonde balonlarını şişirmek için DMİGM'ne gibi ilgili sektörlerle yüksek kalitede hidrojen gazı satılabilir.

Enerji üretiminin, tüketiminin, depolanmasının ve naklinin ülkeleri etkileyen bir unsur olduğu kesindir. Enerjide dışa bağımlılığımızı azaltmaya etkisi olacak hidrojen enerjisi anlamında Türkiye'de yakıt hücreleri üzerine pratik uygulamalar yapılarak üretim teknolojisinin kazandırılması önemli bir hedef olarak belirmektedir.

Son olarak günümüzde temiz, sürekli enerji kaynaklarına ve enerjinin depolanmasına ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Yakıt pillerinin gelecekte kullanım alanları tahmine göre uzun yıllar gündemde ve kullanımda kalacağı ve pek çok gelişmelere açık olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonim 2014 a, Haber Bülteni, TÜRKİYE İSTATİSTİK KURUMU
<http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=15899> erişim: 29.04.2014.
- Anonim 2014b, Hidrojen Enerjisi Teknolojisinin Dünyada Gelişimi, ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü,
http://www.eie.gov.tr/teknoloji/h_teknolojisi.aspx, erişim: 27.04.2014.
- Anonim 2014c, Fuel-Efficient Cars Hybrid, Electric and Alternative-Fuel Vehicles presented by the Chicago Tribune <http://cars.chicagotribune.com/fuel-efficient/news/chi-hydrogen-or-electric-vehicles> erişim: 27.06.2014.
- Anonim 2014d, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu,
<http://www.tubitak.gov.tr/btpd/btspd/platform/enerji/altgrup/verimlilik/bolum4.pdf>, erişim: 15/04/2014
- Anonim, 2014e, Yakıt Pilleri, ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/hidrojen/yakit_pilleri.html erişim: 01.05.2014.
- Anonim 2014f, ENERGY DEPARTMENT, Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji Ofisi
http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html,
erişim:20.04.2014.
- Anonim 2014g, U.S.A. Smithsonian Enstitüsü, Amerika tarihi arşivi
<http://americanhistory.si.edu/fuelcells/so/sofcmain.htm>, erişim: 27.04.2014.
- Baykara,S.Z. and Bilgen,E., “An Overall Assessment of Hydrogen Production Solar Water Termolysis”, Int.J.Hydrogen Energy, 14:881-889 (1989).
- Bockris,J.O’M., “Energy: The Solar-Hydrogen Alternative”, Australia and New Zealand Book Co., Sydney, 125-218 (1975).
- Dicks A., Larminie, J., ‘Fuel Cell Systems Explained’, John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, İngiltere, (2000).

- Dincer, I., 2002, "technical, Environmental and Ez rgetic Aspects of Hydrogen Energy Systems", International Journal of Hydrogen Energy, Volume 27, p. 265-285.
- Engels,H. "Thermochemical Hydrogen Production", Int.J.Hydrogen Energy,12:291-295 (1987).
- Eren,R.A. and W.H.Compell, "Hydrogen: A Commercial Fuel for Internal Combustion Engines and Other Purposes", Journal of Institute of Fuels, 6(29):7-18 (1933)
- F. Barbir, T.Gomez, (1997), Efficiency and Economics of Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells, Int. J. Hydrogen Energy. 22, 1027-1037.
- Haldane,J.B.S, "Daedalus or Science and the Future", Truber and Company Ltd., London, 72-110 (1923)
- Hoffmann,P., "The Forever Fuel: The Story of Hydrogen.", Westview Pres, Boulder, Col., 244-251 (1981)
- Kruse B., Grinna S., Buch C., (2002), Hydrogen - Status and possibilities, Bellona Foundation, 52 p.
- Lawaczek,F., "Technick", Eher Varlag, Munich, 21-45 (1932)
- M. A. R. S. Al-Baghdadi, H. A. S. Al-Janabi, 2005, Optimization Study of Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Turkish J. Eng. Env. Sci. 29, 235-240.
- Marchetti,C., "Proteus vs. Procrustes", Lecture at Cornell University, Ithaca, New York, 318-357 (1970).
- Karatepe, N., Özyuğuran A., vd, (2010), "Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 10. Enerji Kongresi Karbon Yapılı Malzemelerin Hidrojen Depolanmasında Kullanımı", 30 Kasım, Maslak, İstanbul, 416s.
- Ohta,T., "Solar-Hydrogen Energy Systems", Pergamon Pres, Oxford, 225-248 (1979).

Steinberg,M. and Cheng,H.C., “Moden and Prospective Technologies for Hydrogen Prduction from Fossil Fuels”, Oxford, 2:699-740 (1998).

Türe, İ.E., (2001), “Hidrojen Enerjisi”, Temiz Enerji Vakfı Yayınları, Ankara, 30 s.

Türker, B., İnan, A., Trabulus, S., (2004), Yakıt Pili Çeşitleri, Kasım, 3E Electrotech-Enerji, Elektrik, Elektronik Teknolojileri Dergisi, Sayı: 126.

Ün, Ü.T., 2003a, “21. Yüzyılın Enerjisi: Hidrojen”, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, İzmir. ,

Ün, Ü.T., 2003b, “Hidrojen Enerjisi: Depolanması, Güvenliği, Çevresel Etkisi ve Dünyadaki durumu”, Mühendis ve Makina, Cilt: 44, sayı: 525.

Veziroğlu, T.N., “Proceedings of the Hydrogen Economy Miami Energy Conference(THEME)”, Clean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL, 2:90-124 (1974).

Wyczalek, F.A., “The End of Petroleum”, 37th IECEC, IECEC 20102, 775- 781 (2002).

Yıldırım, Y., Çev 346 Yakıt Pilleri Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (2011).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Ad Soyad : Sedat Yaslan
Uyruk : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Aydın 14/02/1977
Medeni Hali : Evli
E-posta : yaslansedat@hotmail.com

Eğitim

Alınan Derece	Aldığı Kurum/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lise	Ordu Teknik Lisesi (Bilgisayar/Elektronik)	1994
Lisans	Dicle Üniversitesi Fen - Ed. Fak. Kimya bölümü	1998

İş Tecrübesi

Yıl	Yer	Pozisyon/görev
1999	Ağrı .İlköğretim Okulu	Md.Y. Öğretmen
2001	Ağrı .İlköğretim Okulu	Okul Md. V.
2002	Muğla Türdü 100.Yıl O.O.	Fen ve Teknoloji Öğretmeni

Aldığı Ödüller:

2 adet teşekkür belgesi, Kurumuna yaptığı katkılardan dolayı 1 adet şilt.(23 Nisan İ.O. ve Türdü 100 Yıl O.O.)

Sertifikaları

Oymakbaşı, Eğitim Koçluğu PAUSEM, Motorlu taşıtlar sınav sorumluluğu,

Yayınlar

- 1.Mikrobiyoloji ve Bağışıklama Kitabı, 978-605-4536-25-3 Eylül 2011
- 2.Biyokimya, matbaa sertifika:16613 Eylül 2013
- 3.Tıbbi Etik ve Meslek Tarihi, matbaa sertifika:16613 Eylül 2013

Bilimsel Faaliyetler

1. 2009 Muğla Okullar Arası Bilim Şenliği Bitkilerde Kök Sürünümünün Hızlandırılması
2. 2010 Muğla Okullar Arası Bilim Şenliği Vakumlu Çift Cam (Muğla'yı temsilen).