



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PEM YAKIT HÜCRESİNDE HİDROJEN GAZINDAKİ NEM ORANINA BAĞLI
OLARAK ELEKTRİK ÜRETİMİNDEKİ DEĞİŞİMİN İNCELENMESİ**

Berat Fırat DALĞIÇ

YÜKSEK LİSANS

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Ağustos, 2019

BATMAN

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Berat Fırat DALĞIÇ tarafından hazırlanan "PEM YAKIT HÜCRESİNDE HİDROJEN GAZINDAKİ NEM ORANINA BAĞLI OLARAK ELEKTRİK ÜRETİMİNDEKİ DEĞİŞİMİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışması 05/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği /oy çokluğu ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Arzu EKİNCİ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Selman AYDIN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Davut SEVİM

İmza

.....
.....
.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK
FBE Müdürü



TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

BERAT FIRAT DALĞIÇ

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

PEM YAKIT HÜCRESİNDE HİDROJEN GAZINDAKİ NEM ORANINA BAĞLI OLARAK ELEKTRİK ÜRETİMİNDEKİ DEĞİŞİMİN İNCELENMESİ

Berat Fırat DALĞIÇ

**Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selman AYDIN

2019, 57 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Arzu EKİNCİ

Dr. Öğr. Üyesi Davut SEVİM

Dr. Öğr. Üyesi Selman AYDIN

Dünyanın artan enerji ihtiyacını doğayı kirletmeden ve yenilenebilir bir şekilde sürekli olarak sağlayabilecek enerjilerden hidrojen enerjili sistemler olduğu günümüzde birçok bilim adamı tarafından bildirilmektedir. Hidrojen enerjisini en ekonomik ve en verimli kullanan teknolojilerden biri ise yakıt pili teknolojisidir. Bu amaçla yakıt pilleri üretimi son yıllarda otomotiv sektörünün yarattığı ihtiyaçların da etkisiyle büyük önem kazanmaktadır.

Bu tezde anot ve katot nem düzeyinin PEM yakıt pilinin performansının alınan verimi üzerinden deneysel çalışma ile incelenmiştir. Deneyin anot ve katot bölümlerinde sırasıyla saf hidrojen ve oksijen gazları kullanılmıştır. Yapılan deney standı ve deney için 9 cm² aktif alana sahip 6 hücreli 35 watt gücünde bir yakıt pili kullanılmıştır. PEM yakıt pillerinde nemlendirme başta olmak üzere sıcaklık ve su birikimi, kullanılan hidrojen debisi, oksijen debisi ve pil sıcaklığı kontrol altında tutularak sağlanabilmektedir. Yapılan deneysel çalışmada debi ve hat sıcaklığı sabit tutularak yakıt pili nemlendirme oranını kademeli olarak artırılarak %30 - % 35 - % 40 - % 45 - % 50 - % 55 - % 60 - % 65 - % 70 'deki değerlerinde alınan sonuçların voltaj, amper ve watt üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Deneysel çalışma sonucunda nemlendirme oranının PEM yakıt pilinin performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Artan nemlendirme sıcaklığıyla birlikte kurulan sistemin performansını önemli ölçüde artırmıştır ve nominal değerler bulunmuştur. Fakat % 60 'dan sonraki nemliliğin üzerindeki değerlerde ise performans belirli bir süre sabit kaldıktan sonra düştüğü gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nem, Hidrojen, Oksijen, Pem Yakıt Pili

ABSTRACT

MS THESIS

THE INVESTIGATION OF THE CHANGE IN ELECTRICITY GENERATION IN THE PEM FUEL CELL DUE TO HYDROGEN GAS HUMIDITY

Berat Fırat DALĞIÇ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY**

**THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENERGY SYSTEMS
ENGINEERING**

Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Selman AYDIN

2019, 57 Pages

Jury

Assist. Prof. Dr. Arzu EKİNCİ

Assist. Prof. Dr. Davut SEVİM

Assist. Prof. Dr. Selman AYDIN

Today, many scientists have reported that there are hydrogen-powered systems that can provide the world's growing energy needs continuously and without renewing the nature. One of the most economical and efficient technologies that use hydrogen energy is fuel cell technology. For this purpose, the production of fuel cells has gained importance in recent years with the effect of the needs created by the automotive sector.

In this thesis, anode and cathode moisture levels were investigated by experimental study on the obtained efficiency of PEM fuel cell performance. Pure hydrogen and oxygen gases were used in the anode and cathode sections of the experiment, respectively. The test stand and a 6 cell 35 watt fuel cell with 9 cm² active area were used for the test. Temperature and water accumulation, especially humidification in PEM fuel cells, can be achieved by keeping the hydrogen flow, oxygen flow and battery temperature under control. In the experimental study, the fuel cell humidification rate is gradually increased by keeping the flow and line temperature constant. 30% - 35% - 40% - 45% - 50% - 55% - 60% - 65% - 70% of the results obtained in the voltage, amperage and their effects on watts.

As a result of the experimental study, humidification rate has a significant effect on the performance of PEM fuel cell. With the increased humidification temperature, the performance of the installed system increased significantly and nominal values were found. However, it is observed that the performance decreases after a certain period of time in the values higher than 60%.

Keywords: Moisture, Hydrogen, Oxygen, Pem Fuel Cell

ÖNSÖZ

Yenilenebilir enerji yöntemlerinin en önemlilerinden biri olan ve son yıllarda en çok gelişimi olan yakıt pilleri üzerinde çalışmama vesile olan ve bu Yüksek lisans tez çalışmamda emeği olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Selman AYDIN' a, bu çalışmanın ortaya çıkmasında gösterdiği ilgiden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Adem YILMAZ' a, yaptığımız çalışmanın deneysel düzeneğinin kurulmasında katkısı olan Yunus Zengin'e ve TÜBİTAK Yenilenebilir Enerji Enstitüsünde bizden yardımını esirgemeyen Dr. Emin OKUMUŞ hocama, manevi destekleriyle yaşadığım tüm problemlerde yanımda olan sevgili aileme teşekkürü borç bilirim.

Berat Fırat DALĞIÇ

BATMAN-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. HİDROJEN ENERJİSİ.....	7
3.1. Hidrojenden Enerjisi Nereelerde Kullanılır?	7
3.2. Hidrojen Gazı.....	8
3.3. Hidrojen Enerji Sistemlerinin Avantajları	8
3.4. Hidrojen Enerji Sistemlerinin Dezavantajları.....	9
3.5. Hidrojen Depolama.....	9
3.6. Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanımı	10
4. YAKIT PİLLERİ.....	12
4.1. Yakıt Pili Tarihi	12
4.2. Yakıt Pillerinin Avantajlar ve Dezavantajları.....	14
4.3. Yakıt Pili Çalışma Şekli.....	15
4.4. Yakıt Pili Çeşitleri	17
4.4.1. Doğrudan Metanollü Yakıt Pili (DMFC).....	18
4.4.2. Alkali Yakıt Pili (AYP)	19
4.4.3. Fosforik Asit Yapıdaki Yakıt Pilleri (FAYP)	20
4.4.4. Erimiş Karbon Yakıt Pilleri (EKYP)	21
4.4.5. Katı Oksit Yapıdaki Yakıt Pilleri (KOYP)	22
4.5. Proton Geçirgen Membranlı Yakıt Pili (Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili) (PEMYP)	23
4.5.1. Elektrolit Membran.....	26

4.5.2. Gaz Difüzyon Tabakası	27
4.5.3. Elektrotlar	27
4.5.4. Akım Toplanan Plakalar	28
5. METERYAL METOD	30
5.1. Proton Geçirgen Membranlı Yakıt Pili Sisteminin Kurulumu	30
5.1.1. Deney Düzenineğinin Tasarımı	32
5.1.2. Deney Cihazları	33
5.1.3. Deneyin Yapılışı	39
5.1.4. Deneyin Yapılış Aşamaları	39
5.2. Yakıt Pili Verim Hesabı ve Denklemleri	40
5.2.1 P.E.M. Yakıt Hücresi verim hesabı ve performansı	40
5.2.2. PEM Yakıt Pillerinde Elektrik Enerjisi Üretimi	41
5.2.3. Yakıt Hücresi Açık Devre Enerji Gerilimi	42
5.2.4. Gerçek Yakıt Hücre Potansiyeli - Polarizasyon Eğrisi	43
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	45
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	64

SİMGELER

Al	:Alüminyum
Atm	:Atmosfer
PtCuFe/C-611	:Katalizör
PtAgFe/C-611	:Katalizör
CH₃OH	:Metanol
CO	:Karbonmonoksit
CO₂	:Karbondioksit
CO₃	:Karbonat
g/cm³	:Gram/Santimetreküp
H⁺	:Hidrojen İyonu
H₂	:Hidrojen
H₂O	:Su
kPa	:Kilo paskal
kW	:Kilowatt
mA	:Miliamper
mg	:Miligram
mm	:Milimetre
mW	:Miliwatt
MW	:Megawatt
N₂	:Azot
Ni	:Nikel
O₂	:Oksijen
OH	:Hidroksit
Pt	:Platin
V	:Volt
W	:Watt
W/ cm°K	:Watt/Santimetre Kelvin
W/cm²	:Watt/Santimetrekare
Mm	:Mikrometre
°C	:Santigrat Derece
e⁻	:Elektron

KISALTMALAR

AYP	: Alkali yakıt pili
DMYP	: Doğrudan metanol yakıt pili
EKYP	: Erimiş karbonat yakıt pili
FAYP	: Fosforik asit yakıt pili
MEA	: Membran elektrot düzeneği
KOYP	: Katı oksitli yakıt pili
OİR	: Oksijen İndirgenme Reaksiyonu
PEMYP	: Polimer elektrolit membranlı yakıt pili
PEMFC	: Proton-exchange membrane fuel cell

1. GİRİŞ

Yaşadığımız gezegende kullanılan enerji kaynaklarının birçoğu yenilenemeyen ve gezegenimizi kirleten fosil kökenli yakıtlar oluşturmaktadır. Bunları başlıca ele alırsak petrol türevli yakıtlar, kömür ve doğalgaz gibi yanıcı ve doğaya yüksek oranda karbon salınımı yaparak onu kirleterek enerji alabildiğimiz yakıtlardır. Bu yakıtların çoğu sınırlı rezervlere sahip oldukları bildirilmektedir. Son yıllarda ise bu yakıtların rezervlerinin sınırlı olmasından ve doğayı kirletip bunun sonuçları olarak kanser vb. türde hastalıkların çoğalmasından dolayı ilerde oluşabilecek daha büyük felaketlere ve de enerji kıtlığına çözüm amaçlı alternatif yollara girilmiştir.

Günümüzde bu alternatif yolların en önemlisi artık yenilenebilir enerji kaynakları olmuştur. Bu kaynakların en önemli özelliği kullandığımız enerjinin kaynağı yenilebilir özellikte olması ve de doğayı kirletmemesidir. Bunları örneklendirirsek şayet en önemlileri daha doğrusu günümüzde kullanılabilir olanlar diyelim biz buna, bunlar güneş, rüzgar, jeotermal, hidroelektrik, biyoenerji ve son olarak bizim deney düzeneğimizde kullandığımız ve tüm dünyada şu an en çok çalışma yapılan enerji türü hidrojen enerjisi.

Hidrojen enerjisinin en az yakıt tüketerek yani en verimli kullandığımız teknoloji ise yakıt hücresi başka bir deyişle yakıt pili teknolojisidir. Bu yakıt pili teknolojisi kullandığı az yakıtla göre verdiği enerji yüksekliğinden dolayı son yıllarda astronomik çalışmalarda enerji ihtiyacının büyük etkisiyle çok fazla önem kazanmaktadır.

Yakıt pilleri, diğer çalışan enerji sistemlerine oranla çalışma sistemi de çok basit ve kompakttır. Yakıt pilleri hidrojen ve oksijen gazlarının yanmasına gerek duymadan sadece kimyasal bir reaksiyon sonucunda doğrudan bir elektrik akımı vermektedir. Bu reaksiyon sonucunda ürün olarak ise saf su ve düşük bir ısı açığa çıkmaktadır. Bu ısı yakıt pilinin yüzey ısısı olarak açığa çıkmaktadır. Bu şekilde çalışması yakıt pilini çevreci ve içeriğinde hareketli bir parça olmadığından sadece gazların girişi ve çıkışı olduğundan dolayı sessiz ve en önemlisi güvenli olduğu bildirilmektedir. Bir adet yakıt pili hücresinin gerilimi yaklaşık 0,9 – 1 volt aralığında olduğundan dolayı daha fazla enerjiyi üretmek için seri veya paralel bağlayarak birden çok yakıt pili hücresi kullanılmalıdır. Literatür çalışmalarından bu yakıt pili yığın yakıt pili olarak isimlendirilir. (Şenaktaş 2005)

Yakıt hücreleri teknolojisinin araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda yeni bulunan en önemli teknoloji Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi yani PEM Yakıt Hücresi diye kısaltılmış hali olarak literatürde geçmektedir. PEM Yakıt Pillerinin en önemli avantajlarından biriside taşınabilir bir güç haline gelmesidir bu bize ulaşım ve enerji santralleri açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. PEM Yakıt Pillerini diğer yakıt hücreleri ile kıyasladığımızda boyut olarak daha küçük ancak verimi daha yüksek, ağırlık olarak daha hafif, hareketli parçaların olmayışı ve çok basit bir çalışma sistemi olması ile diğer yakıt hücrelerine oranla  ne geçmektedir. Bu avantajlardan dolayı son 20 yılda otomotiv sektöründe kullanılan birçok hidrojen yakıtlı araç, PEM yakıt pillerini kullanmaktadırlar. Yani kısaca özetlemek gerekirse son yıllarda yapılan tüm  alışmalar PEM Yakıt Pilleri üzerinden gerçekleşmektedir.

PEM Yakıt Hücresinin kuru olan membran ile çalışılması durumunda, gözenekli bir yapı oluşmakta ve membranda bozulmayı hızlandırdığı bildirilmektedir. Bundan dolayı membrana verilen hidrojen ve oksijen gazlarının nem oranı yükseldiği zaman, membranın dayanıklılığı artacak ve yakıt pilinin performansına büyük etkileri olduğu bildirilmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmamızda gazların nemlili inin yakıt pili performansına etkileri üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Choi (2017), yapılan bu çalışmada PEM (Proton Elektrolit Membran) yakıt pilinin su ve termal şeklini geliştirmiştir. Yakıt pilinin en önemli noktalarından birisi olan nemliliğini kontrol altına almak için yeni bir tesisat (BOP) sistemlerinden birisi olan bir kabarcık nemlendirici sistemini kurmuşlar. Sonuç olarak ise önerilen bulanık kontrol sisteminin PEM yakıt pilinin çıkış gücündeki verimi güçlü bir şekilde yükselttiğini göstermektedir.

Wang ve ark., (2003) yaptığı çalışmada değişik işletme parametrelerinin PEM yakıt hücresi performansı üzerine etkisini, katot tarafında hava ve anot tarafında saf hidrojen kullanarak, deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler, farklı yakıt hücresi işletme sıcaklıkları, farklı katot ve anot nemlendirme sıcaklıkları, farklı işletme basınçlarının PEM yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisini V-I eğrileri ile göstermişlerdir.

İçingür Y., (2011), yaptığı bu çalışmada, benzer çalışmalar yapmış olup arabalarda kullanılabilirliği uygun olan, PEM yakıt pillerinin verimini yükselten sıcaklık, basınç ve nemlendirme parametreleri ile bir çalışma yapmış. Çalışmasında iki tane yakıt pili tasarlamıştır, biri alüminyum biri ise paslanma çelikten olup bu yakıt pilinde nafion 115 membran kullanmıştır. Yaptığı deneyde alüminyum olan da maksimum alabildiği 2,98 volt, paslanmaz çelikte ise maksimum alabildiği 3,12 volt olarak elde etmiştir.

Eker (2012), yaptığı çalışmada, Fluent PEMFC modülünü kullanmıştır. Bu modülü kullanarak simülasyon ve deneysel çalışmalar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile nemlendirme kabının sıcaklığının, hidrojen ve oksijen debisinin verim üzerinde etkileri karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda nemlendirme sıcaklığının yakıt pilinin verimi üzerinde büyük bir değişken olduğu görülmüştür. Artan nemlendirme sıcaklığı sistemin verimini ciddi olarak artmıştır. Fakat bir düzeyden sonra sabit kaldığı gözlemlenmiştir ve sonrasında ise yükseldikçe verimin düştüğü görülmüştür.

Yılmaz Ulu (2010), yaptığı bu deneysel çalışmada hibrit güneş enerjili bir sistem kurmuştur. Sistemde kullandığı ekipmanlar, ürettiği enerjinin analiz hesaplamaları ile detaylı incelemiştir. Deneyin sonucunda elektrolizörün performansı %54.4 olmuştur. Enerji gücü ise %28.1 - %42.2 aralığında olduğunu gözlemlemiştir.

Çenk (2006), laboratuvar ortamında deneysel çalışmasında, bordan yaptığı sodyum bor hidrürü direkt kullanılması ile enerjiyi üretmiştir. Dayanıklılığı güçlü olan ve iletkenliği iyi derecede olan farklı plaka ve pipo üretimi incelenmesi konusunda öneriler sunmuştur.

Kaplan (2008) , yapmış olduğu bu deneysel çalışmasında, kullandığı membran Nafion 115 , anot ve katot ise 304 paslanmaz çelik tel ve katalizör için de bakır tel kullanmıştır buda bakır tel ile yüksek iletkenliği yakalamak istemesinden dolayı bu şekilde tasarlamıştır. Yakıt pilinden alabildiği gücü incelemiş ve de katalizör olarak kullandığı bakır katalizörün güç değeri platin değerine göre daha da düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Ateş (2008) yapmış olduğu bu çalışmasında, yapay sinir ağıları sistemli bir algoritma tasarlamıştır ve bu algoritma kontrol dahilinde olup hibrit bir yakıt hücresi/ultra-kapasitör aracın enerji sistemini gerçekleştirilmektedir. Yapmış olduğu bu kontrol algoritması ile bir yakıt pilinin içeriği için en uygun bir düzenli hal uygulanması tasarlanmaktadır. Ve bu tasarım ultra-kapasitörün güç seviyesinin kontrolünü gerçekleştirmesi, bu amaçla da araç öncelikle enerji tasarrufu sonrasında ise performansının artırılmasını hedeflenmektedir. Yapılan tasarımda taşıt uygulamaları için tasarlanan hibrit bir PEM Yakıt Pili sisteminde, uygulanan kontrol sistemi ile yakıt pili sistemi gerekli yük ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla kullanılırken anlık yük değişimlerine cevaplamak ve fren sisteminden elde edilen enerjiyi geri kazanmak amacıyla kullanılmıştır.

Keskin (2014), yapmış olduğu çalışmasında enerji kontrol sisteminin PEMYP/BAT araç sistemine entegresini içeren bir sistem gerçekleştirilmiştir. Yapılan uygulamada piller ani yük farklılıklarını karşılayabilmek ve frenlemede oluşan fazla enerjiyi geri kazanma üzerine tasarlanmıştır. Çift taraflı DC-DC dönüştürücü ile ekstra bir maliyet getirmiştir bu sistem ancak bu maliyet sistemin verimlilik ve performans değerlerini ciddi bir şekilde arttırdığını tespit etmiştir.

Bilen (2015), yapmış olduğu bu çalışmasında saf su kullanıp daha ekonomik bir şekilde hidrojen üretimi sağlayarak yüksek verimli bir elektrolizör yapmıştır. Elektrolizör kısmında elektrotların arasındaki mesafe ve elektrot sistem yüzey alanının fazlalaştırması ile üretimi yapılan hidrojen miktarının arttığını teorik hesaplamalarda tespit etmiştir. Yapılan deneylerde de bu durum görülse de elektrotlar arasındaki mesafenin çok büyük olduğu değerlerde iletkenliğin azaldığı ve buna bağlı olarak üretim miktarının düştüğü tespit edilmiştir.

Efendioğlu (2013), yapmış olduğu proje için elde ettiği verilerle birlikte "Merkezi Bileşik Tasarım Yanıt Yüzey Yöntemi" isimli çalışmanın bölümlerinden biri olan "Yüz Merkezli Bileşik Tasarım Yöntemi" kısmına uygun bir şekil de veri sistemi hazırlayıp ve bu verileri programda yerine koymuştur. Sonuç olarak ise $\alpha=0,05$ anlamlılık olarak "Oran" faktörünün "Güç Yoğunluğu" nu yüksek bir şekilde etkilemiştir.

İ.Türe (2006), yapmış olduğu çalışmada, foto voltaik sistemlerden elde edilen hidrojenin %10 verimle çalışabilen foto elektroliz pili ile çalışan hidrojen sisteminin analizi ekonomik olarak karşılaştırmıştır. Hidrojen üretiminde foto elektroliz yenilebilir enerji kaynakları arasında en verimli ve de en ekonomik üretim olarak görülmüştür. Bu verimin yüksek olması ve ekonomik olması güneş enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine çevirimini sağlayan foto voltaik sistemlerle birlikte elektroliz sistemini bir yarı iletken foto elektrot kullanarak birleştirmesi ve yapılanları tek bir sistem olarak tasarlamasıdır. Yenilenebilir ve doğa dostu olan hidrojen enerjisine geçiş için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı çok büyük önemlidir ve bu alanda daha çok çalışma yapılmalıdır.

Alniak, Karakaya ve Ark. (2008), yurtdışında yaptıkları bu çalışmada hidrojen gazının stoklama tanklarının üretimi çalışma yaptıkları görülmüştür. Ancak şu an ülkemizde bu tür çalışmalar ticari olarak hiç bir kimlik kazanamamış ve tasarlanan birçok çalışma deneysel proje aşamasında kalmıştır. Bu çalışmada temel olarak alüminyumdan üretilen yüksek bir basınca dayanıklı hidrojen gazı stoklama tankının üretimi incelenmiş olup bu tankların imal etme yöntemleri ve kullanım yerleri ile ilgili birçok örnek verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda ise üç adet farklı Alüminyum 6000 serisi ile farklı boyutlarda olan alüminyum tanklar elde edilmiştir. Üretim - imalat aşamasında yaşanan birçok zorluklara rağmen tasarlanan tanklar hidrostatik bir basınç testine koyulacaktır. Bunun dışında uygun malzeme, stok tankı formu gibi konularda çalışmalar devam edilmektedir.

Muhtarlıoğlu (2012), yaptığı çalışmada teknolojinin gelişmesiyle bireylerin taşınabilir ve hafif elektronik cihazlara olan ihtiyaçlarının artmasından dolayı güneş enerjisini elektrik enerjisine direkt çevirebilen ve akıllı telefonlarımızı şarj eden powerbankler şarj eden doğa dostu bir sistem tasarlamıştır. Bu sistem güneş panelleri, şarj kontrol kısımları ve de pillerden oluşmaktadır. Güneş paneli güneş enerjisini DC olarak elektrik enerjisine çevirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş ve yapısı, güneş enerjisinden faydalanma teknolojileri, Türkiye'nin güneş enerjisi

potansiyeli açıklanmıştır. Güneş pili sistemini oluşturan elemanlar açıklanmış olup bu elemanlar kullanılarak bir şarj cihazı sistemi geliştirilmiştir. Tasarlanan sistem güneş paneli yardımıyla güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Güneş panelinin, ürettiği enerjiyi depolayamaması sebebiyle güneş ışığının olmadığı veya yetersiz olduğu zamanlarda sistemden yararlanılabilmesi amacıyla pil kullanılmıştır. Akünün aşırı şarj ya da deşarj durumlarında zarar görmesini engelleyen ve sistemin gerilim değerini sabit tutan şarj denetim birimleri eklenmiştir.

Silver (2008), yapmış olduğu çalışmada PEM yakıt pilinin katot kısmındaki O₂ kimyasal reaksiyonunun elektro katalizinde kullanabilir etkili ve ucuz bir katalizörün sentezi yapılmıştır. Bu sentezlenen çalışmada katalizörlerin PtCuFe/C-611 ve PtAgFe/C-611 katalizörlerinin PEM yakıt pili katot kısmında alternatif bir katalizör sunulmuştur.

Şimşek (2010), yaptığı çalışmada polisilikon güneş pillerinin modellemesi ve simülasyonu alanında araştırma yapılmıştır. Literatürde yer alan yayınlar gözden geçirilerek foto voltaik güneş pili hücresi modeli ortaya konmuştur. Ayrıca mevcut meteorolojik bilgilerin yorumlanarak derlenmesiyle küçük bir veri bankası oluşturulmuş, bu veriler kullanılarak seçili bir konum için panelin yerle yapması gereken uygun değer açısı hesaplanmıştır. Nümerik hesapları gerçekleştiren MATLAB dosyaları ve fonksiyonları LABVIEW ortamına taşınmış, meteorolojik veri bankasını da okuyabilen kullanıcı dostu bir ara yüz iletim parametrelerin yarı gerçek zamanlı kontrol edilebildiği bir yazılım araştırmacılara sunulmuş ve sağlanan sonuçlar tartışılmıştır.

Oral (2005), yaptığı çalışmada seçilen bazı temel parametrelerin Proton dönüşüm zarfı (PEM) yakıt piline uygun oluşturulan etkilerinin teorik olarak tasarlanan bir model üstünde belirleyerek ve sonuçları ele alınarak optimum değer aralığını belirlemek için tasarlanmıştır. Sonuç olarak hava basıncı tasarlanan model üzerinde en etkili performans veren parametre olduğu gözlemlenmiştir fakat kompresörün devreden çıktığı yaklaşık 1 bar basınçta alınan performansta ciddi düşüş gözlemlenmiştir. 1 bar basınçtan sonraki değerlerde ise alınan performansta % 55 - % 76 değerlerinde ciddi bir artış oluşmuştur. Ulaşılan bu performans seviyeleri; modeldeki en iyi seviyeler olup, hava basıncının modeldeki en etkili parametre olduğunu göstermiştir.

Akbulut (2007), yaptığı çalışmada bu çok düşük emisyonlu sistemin tasarımı ve analizleri sunulmuştur. Sistemin, kontrol edilebilirliğini ve beklenen geçici durumlarını ortaya çıkarmak için MATLAB Simulink ile benzetimi yapılmıştır. Çıkış gerilimindeki değişimleri ayarlamak için uygun kontrol ve güç elektroniği

mekanizmaları ana hatlarıyla anlatılmıştır. Ultra kapasitör ya da diğer kısa süreli enerji depolama cihazları geliştikçe, bu tür sistemlerin kullanımı artacaktır.

3. HİDROJEN ENERJİSİ

Hidrojen gazı, yakıt pilleri çalışmalarında kullanılan doğada bulunan en basit element ve en fazla bulunan gazlardan olduğu bildirilmektedir. Doğadaki en hafif element olan hidrojen havadan 14,4 kez daha hafiftir. Kokusuz, saydam, renksiz ve tadı yoktur hidrojenin. Geleceğin yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılan hidrojen sistemlerdeki elektronlar için çok iyi bir tamamlayıcı olduğu bildirilmektedir. Periyodik tablonun ilk sırasında bulunan hidrojen en küçük atomlu elementtir. Yaşadığımız gezegende hidrojen suda, canlıların vücudunda ve fosil maddelerde bulunmaktadır. Güneşin yapısında en çok bulunan element hidrojen olduğu bilinmektedir. Kimyasal reaksiyona girme özelliği aktif olduğunda dolayı saf bir element olarak bulmak zordur. Evrenin en temel enerji kaynağıdır hidrojen. Hidrojen enerjisi ise bileşik halde bulunan gaz haldeki hidrojenin işlenip ve dönüştürülebilmesiyle oluşmaktadır. Enerji kaynağı olarak doğal halde bulunmamasına karşın yenilenebilir enerji kaynakları arasında olmaktadır. Üretilme şekli çeşitli enerji kaynakları kullanılarak su ve fosil yakıtlardan üretilen sentetik bir enerji yakıtıdır. Üretimi çeşitli yollarla olmaktadır, bunlar; buhar yolu ile, atıl gazların saf hale getirilmesi ile, elektroliz yolu ile, termo-kimyasal prosesleri ile olmaktadır. Hidrojen enerjisi kullanılan yakıtlar içerisinde birime düşen 120,7 kJ/kg ile en yüksek verim veren enerjilerden olduğu bildirilmektedir. Hidrojenin sıvı hale getirilme sıcaklığı $-252,77^{\circ}\text{C}$ dir ve hacmi ise gaz hacmine oranla 1/700 kadardır. Sıvı hidrojenin ısı değeri ise 141,9 MJ/kg dir, bu değer petrol türevli yakıtlara göre 3,2 kat fazladır. (Özil ve ark. 2013) .

3.1. Hidrojenden Enerjisi Nerelerde Kullanılır?

Günümüz şartlarında hidrojeni enerji şeklinde kullanmak için iki yöntem vardır bunlar yakma ve yakıt pili şeklinde olmaktadır. Bu kullanım yöntemleri hidrojenin enerjisinin kullanım yerlerini göstermektedir.

- Yakma Yolu ile Enerji Elde Etme: Hidrojen yakılabilir bir yakıttır. Petrol türevli yani benzin ve doğal gaz gibi yakıtlara göre daha az yakıt ile daha fazla enerji

elde edilebilir. Endüstriyel teknolojiler için türbin ve otomobiller için ise içten yanmalı motorlar yapılmaktadır. Benzinli bir araçta ortalama olarak 65 lt benzin yakarken hidrojen kullanılırsa aynı mesafe için bu yakıt 17 kg'a denk gelmektedir. Bu da verimin ne denli yüksek olduğunu göstermektedir.

- Yakıt Pili Yolu ile Enerji Elde Etme: Yakıt pilleri yöntemi hidrojen elde etme yöntemlerinden biri olan elektroliz sisteminin tam olarak tersi gibi çalışan enerji yöntemidir. Hidrojen ve oksijen (hava) kimyasal reaksiyon oluşturularak elektrik enerjisi üretilir. Yakmaya yoluna göre verimi çok daha fazla olmakla birlikte daha yaygın olarak kullanılan yöntem yakıt pili yöntemidir.

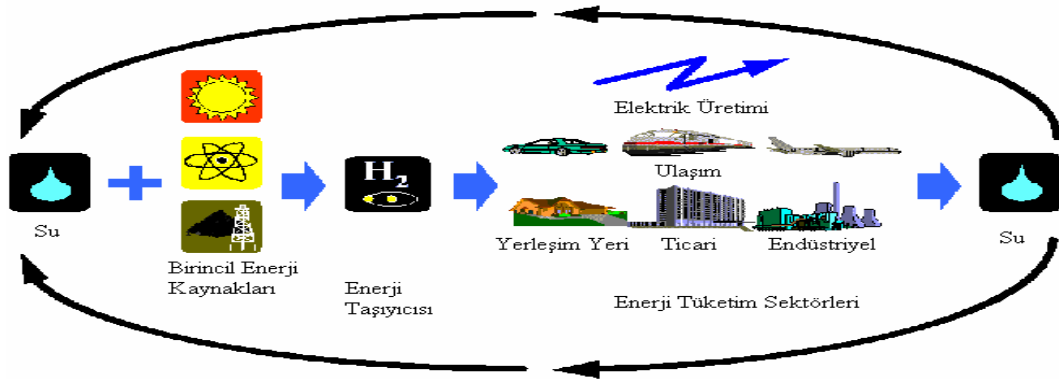
1950 yıllarının sonlarına doğru NASA tarafından da kullanılmaya başlandı. Son dönemlerde ulaştırma hizmetlerinde de çok popüler olmaya başlayan bu teknoloji bununla birlikte birçok sektörde de başarı ile kullanılmaya başlanmıştır.

3.2. Hidrojen Gazı

Hidrojen gazı doğada bulunan elementler arasında periyodik cetveldeki ilk elementtir. Çekirdeğinde bir proton ve orbitalin de ise bir elektron bulunmaktadır. Evrende en fazla bulunan element hidrojen gazıdır.

3.3. Hidrojen Enerji Sistemlerinin Avantajları

- Hidrojeni güneş enerjili sistemler ile direkt olarak üretimi yapılabilmektedir. Hidrojen yüksek verim alınarak elektrik enerjisine çevrilebilir ve bunun tersi olarak elektrik kullanılarak da üretilir.
- Hidrojen fosil yakıtlı enerjilere göre verimi %39 daha fazla olmaktadır.
- Hidrojen maddenin 3 hali olarak depolanabilir. Gaz fazında, sıvı fazında ve katı fazda metal hibrit olarak depolanabilir.
- Hidrojen üretim aşamalarında, taşıma süresinde ve depolama şeklinde hiçbir şekilde havayı kirletmez ve çevreye zarar vermez. Kimyasal reaksiyon sonucunda ise sadece az miktarda ısı ve su üretir ürün olarak (Şenaktaş 2005).



Şekil 3.1. Hidrojen enerji sisteminin şematik gösterimi (Ün, 2003).

3.4. Hidrojen Enerji Sistemlerinin Dezavantajları

- Doğada element olarak çok fazla bulunmasına karşın hidrojen enerji kullanım aşamasında gaz fazında yüksek oran saf olmak zorundadır. Bu saflaştırma aşamaları süreç maliyetini artırmaktadır. Hidrojen enerjisi için üretilen saf hidrojen üretim maliyeti fosil yakıtlı üretimlere göre 5 kat daha yüksektir. Kullanılan yakıt pil sistemleri ise fosil yakıtlı motorlara göre 10 kat daha pahalıdır.
- Hidrojen enerjili sistemlerde enerjinin üretildiği yakıt pilleri ve depolamak için kullanılan tanklar hacimce çok büyük yerler kaplamakta ve bu fosil yakıtlara oranla 4 kat daha fazla olmaktadır. Bundan dolayı ise hacim küçültmek için sıvı fazda depolamak gerekmektedir bu ise yüksek bir basınç ve soğumaya ihtiyaç gerektirir (Şenaktaş 2005).

3.5. Hidrojen Depolama

Hidrojeni enerji olarak kullanımda güvenli ve alınan verimi düşürmeden etkin bir şekilde depolamak gereklidir. Taşınabilir sistemlerde ağırlık çok önemlidir. Hidrojen katı halde nano tüpler ile ve hidrürle depolanmakta, sıvı ve gaz fazında ise saf bir şekilde tanklarda depolanmaktadır. Hidrür şeklinde katı halde metallerde olur, hidrür şeklinde depolama sıvı halde de olabilir bu sodyum bor bileşiğinde olur. Enerji dünyasında en büyük problem enerjiyi depolayamama problemi olmaktadır bu ise hidrojenin enerjisini daha da önemli hale getirmiştir. Bu durumu açıklamak gerekirse şayet bugün en büyük enerji kaynaklarımızdan biri olan hidroelektrik santrallerinde

Üretilen enerji büyük oranda depolanmış olsaydı enerji problemi kalmazdı çoğu ülkenin. Bu konuda ise ar-ge çalışmaları devam etmek ve bir nevi hidrojen enerjisini de baştan aşağı değiştirecek bir çözüm üzerine çalışılmaktadır. Özetle bu çalışma da belirli yoğunluktaki enerjinin ihtiyaç fazlasını suyun elektroliz şekli ile hidrojen üretimi yapmakta ve bu enerjiyi depolayıp başka sistemler elektrik enerjisine çevirmek üzerine olmaktadır (şenaktaş 2005).

3.6. Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanımı

Hidrojen enerjisi kullanılabilirliği üst düzey olan bir enerji eşidir ve hemen her yerde kullanabilmekteyiz bu enerjiyi. Bu enerji tüm ısıtma sistemlerine kolaylıkla entegre edilebilmektedir. Ancak ısıtma sistemlerine nazaran hidrojen enerjisini taşıt teknolojilerinde kullanmak daha önemlidir. Bu sınırlı rezervlere sahip petrol türevli yakıtlar açısından hidrojen enerjisine büyük önem kazandırmaktadır. Çünkü bu enerji çeşidi şu an kullandığımız otomobil, otobüs ve uçaklarda kullandığımız fosil yakıtlı enerjilere göre çevreye karbon salınımı yapmadan ve daha büyük verim vererek çalışmaktadır. Bu yüksek verim ve karbon salınımının olmaması taşıt teknolojisinde üretim yapan şirketleri bu konuda büyük çalışmalar yapmaya ve üretime geçmeye teşvik etmiştir. Hatta bazı şirketler seri üretime bile geçmeye başlamıştır. şekil 3.2 ‘ de seri üretime geçmiş olan bir otomobil görmekteyiz.



şekil 3.2 Seri üretime geçen ilk hidrojenli araç olan Toyota - Mirai (<http://www.hurriyet.com.tr/> 2015

Erişim tarihi: 07.01.2019)

Bu enerji verimi ve karbon salınımı yapmaması şekil 3.3 ‘ de görüldüğü gibi karbon salınımı en yüksek olan otobüslerde de tercih edilmeye ve üretime geçmeye başlamıştır.



Şekil 3.3 Hidrojenle çalışan Toyota Hino otobüsü (www.yesillojistikciler.com 2015, Erişim tarihi: 09.05.2019).

Hidrojen enerjisinin Nasa tarafından ilk olarak uçaklarda kullanıma geçtiği bilindiği üzere bunun üzerinden yıllar sonra ticari olarak kullanılmaya başlanan ve üretilmiş olan uçağımızı görüyoruz şekil 3.4 ‘ de.



Şekil 3.4 Dünyada ilk kez hidrojenle çalışan HY-4 uçağı (www.haberturk.com, 2016, Erişim tarihi: 02.04.2019).

4. YAKIT PİLLERİ

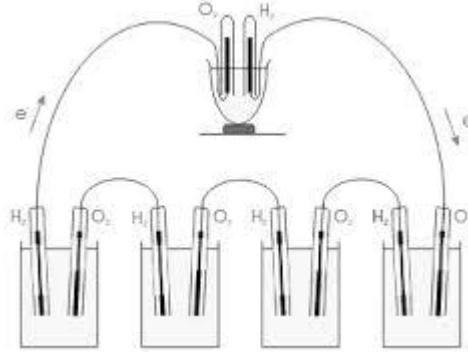
Yakıt pilleri, diğer sistemlerin aksine kimyasal enerjiyi direkt olarak elektriğe çeviren elemanlardır. Yakıt pilleri karbon salınlı fosil yakıtların yapmış olduğu gibi yakıtı yakmak yerine yakıtı direkt oksijenle birlikte elektrokimyasal reaksiyona sokarak enerji üreten pil çeşididir. Kullanılan yakıt hidrojendir. Bunun yanında başka gazlarda kullanılabilir yakıt pillerinde ancak hidrojen kadar verimli olmadığından dolayı tercih edilmemektedir. Bunlar doğal gaz, etanol, metanol ve metandır.

4.1. Yakıt Pili Tarihi

Yakıt pilleri teknolojik gelişimlerine baktığımızda aslında yaklaşık olarak 155 yıllık bir tarihi bulunmaktadır. İlk olarak William Robert Grove tarafından 1838 yılında ters elektroliz işlemi düşüncesi olarak ortaya çıkmıştır yakıt pili kavramı. William Robert Grove kendi soyadını verdiği çalışmasında Grove hücresi olarak isimlendirilen sulu-hücre pilini bulmuştur. Bu yakıt pili 1,8 Volt gerilim ve 12 Amper ise akım üretmiştir, materyali ise çinko sülfat içerisinde çinko elektrot ve nitrik asit içerisinde ise platin elektrot bulunmaktadır. William Robert Grove iki elektrottan birini oksijen ve hidrojen birini ise sülfürik asit kabına daldırılan iki adet platin elektrotu düzenli hale getirdiği şekilde bu kurduğu elektrotlar arasında sabit bir akım olabileceğinin farkında olmuştur. Kullanılan kapların sızdırmazlığı sağlanarak hem gazları hem de suyu tutmuş olmaktadır. Grove, akım oluştuğu zamanda her iki tüpte de su seviyesinin arttığını gözlemlemiştir (Bıykoğlu, 2003).

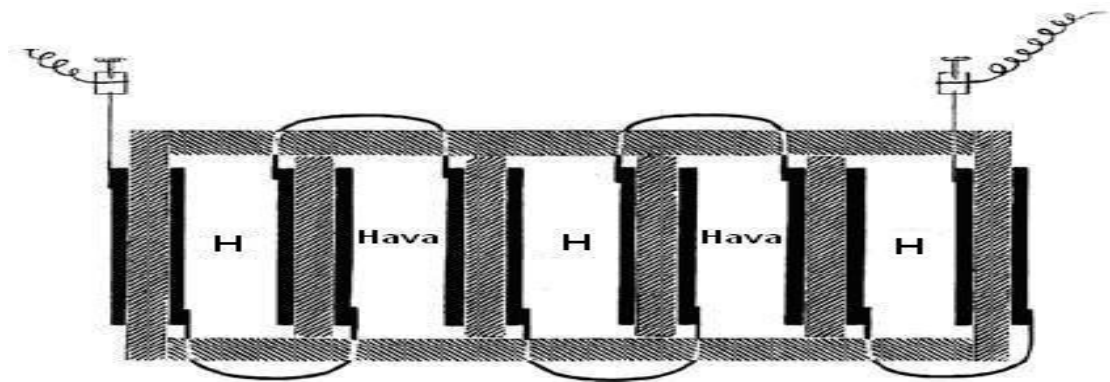
1800’de ise William Nikolas ve Anthoney Carlisle adlı iki İngiliz bilim adamı farklı bir teori ortaya koymuşlardır. Teorileri elektrik aracılığı ile suyun oksijen ve hidrojene iki ayrı gaz olarak ayrılabilceğini ispatlamış olmaktadır. Ancak su ve elektrik üretmek için hidrojen ve oksijen gazın nasıl birleştireceklerini çözememişlerdir. Grove ise bileşimini ayarlayabildiği birkaç elektrotu bir seri devre ile bağlayarak suyun ayrıştırılmasını etkileyebileceğini görmüştür. Buna gaz bataryası adını vermiştir. İlk

üretilen Yakıt Pili olarak adlandırabileceğimiz sistem şekil 4.1’de gösterilen aygıt ile üretmiştir. (Yıldızbilir, 2006).



Şekil 4.1. W. R. Grove’ın ürettiği yakıt pili (American History, 2010)

Grove’un yapmış olduğu çalışmalaradan sonra bu alanda birçok bilim adamı Yakıt pili ile ilgili farklı çalışmalar yapmıştır. Lord Rayleigh 1882 yılında platin elektrotların performansını yükseltmek için birçok çalışma yapmıştır. Bu çalışma için katı elektrottaki gaz ve sıvı maddeler arasındaki işlem yüzey alanını arttırıp hidrojen gazının yanında bir de kömür gazı kullanarak da denemiştir. 1889’da ise kimyager olan Ludwing Mond ve Carl Langer birlikte yaptıkları çalışmalar Grove’un çalışmalarının geliştirmek üzerine olup oksijen yerine havayı, hidrojen yerine ise kömür gazı kullanıp 1,50 Watt güç ve %50 performansla çalışabilen Yakıt pili geliştirmişler. Yakıt pilinden 1,48 Volt gerilim almayıp planlarken bu gerilim 0,970 Volt olmuştur. Şekil 4.2’de Ludwing Mond ve Carl Langer’in tasarlamış oldukları yakıt pilini göstermektedir.



Şekil 4.2. Ludwing Mond ve Carl Langer’in tasarımı yaptıkları yakıt pili. (Yıldız bilir, 2006)

Friedrich Wilhelm Ostwald ise 1893 yılında yakıt pillerinin çalışma şeklinin daha da anlaşılabilir olup basite indirmek için bir çok tasarım yapmıştır. Bu tasarımlar anot ve katot, elektrolit, elektrot, ve oksitleyici maddelerin amaçlarını deneysel bir şekilde göstermiştir. 1894 yılında ise kömür içerikli yakıtlarla çalışabilen elektrokimyasal yakıt pil üretmiştir.

Francis Tomas Bacon 1932 yılında hidrojen-oksijen hücre ve alkalın elektrolit tabanlı ilk çalışabilir yakıt pilini imal etmiştir. Ekonomik olmamasına karşın Pratt&Whitney şirketi bu tasarımın çok iyi olduğunu fark etmiş ve Francis Bacon'un imal ettiği yakıt pilini Apollo uzay mekiğinde kullanmak amaçlı lisansını çıkarmıştır.

1950 yılların sonlarına doğru ise NASA uzay mekiklerinde kullanmak amaçlı kompakt elektrik üretme fikri oluştu. NASA, Yakıt Pili teknolojisine çok büyük destek verip şu ana kadar çeşitli bir çok çalışma yapmıştır ve çalışmaları halen devam etmekte olup Yakıt Pili ile çalışmalara ar-ge olarak büyük destek olmaktadır.

21. Yüzyılda yaşadığımız bu zamanlarda ise Yakıt Pilleri şu an kullandığımız enerji kaynaklarının yerine geçip evlerde, arabalarda, cep telefonu vb. bir çok enerjiye ihtiyaç duyduğumuz her alanda kullanabilir olmasını beklemekteyiz.

4.2.Yakıt Pillerinin Avantajlar ve Dezavantajları

Yakıt pili Lityum iyon pile ve akülere göre birçok avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında dezavantajları da mevcuttur.

Yakıt pili kullanımının avantajları:

- Yakıt pilleri enerji dönüşümünde yüksek verime sahiptirler, sessiz çalışırlar ve fosil yakıtlara bağımlı olmamaları nedeniyle büyük ilgi çekmektedirler.
- Şebekeden bağımsız elektrik üretebilirler.
- Yakıt pillerinin normal pil veya akü de olduğu gibi şarj etme zorunluluğumuz olmamaktadır.
- Tepkime sonucu atık olarak sadece su ve ısı açığa çıkarmaları nedeni ile doğaya zarar vermezler.

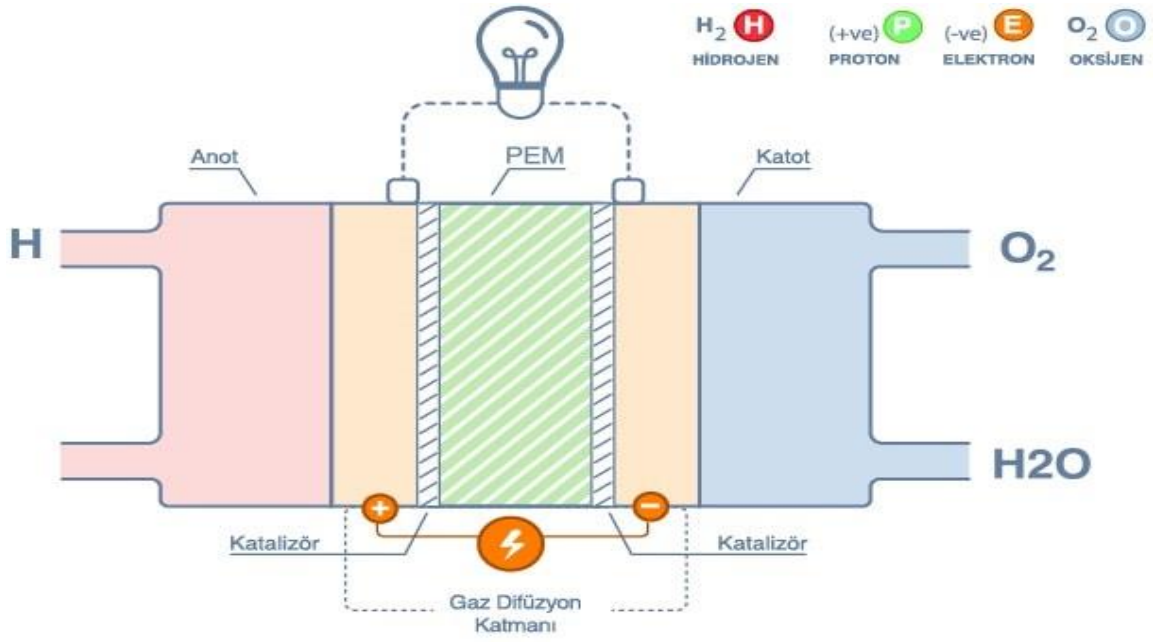
Yakıt pillerinin bazı dezavantajları:

- Yakıt Pilleri doğru akım (DC) gerilim üretirler. Evlerde ve Ofislerde kullanılabilirlikleri için ise doğru akımı alternatif akıma çeviren cihazlara gereklidir.
- Kullanılan hava ve yakıt pompaları gibi elemanlar ile çalıştıklarından dolayı ürettikleri enerjinin küçük bir kısmı da olsa bu enerjiyi bunları çalıştırmak amaçlı kullanmak zorundadırlar.
- Yakıt pilleri içerisinde kullanılan membran çok narin ve çabuk bozulduğundan ve de fiyatı çok yüksek olduğundan dolayı genel olarak maliyeti yükseltmektedir.

4.3. Yakıt Pilinin Çalışma Şekli

Yakıt pili karbon salınım yapmayarak yani doğaya zarar vermeyen en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir bunun yanında yüksek bir performansta çalışıp elektrokimyasal bir reaksiyon doğrultusunda direkt olarak elektrik enerjisi üretirler. Bu reaksiyon esnasında karbon salınımlı makinelerdeki gibi yanma süreci yoktur. Yakıt pilleri, bir elektrolitle birlikte bunu alttan ve üstten bir şekilde saran katot ve anot olarak iki elektrottan oluşurlar. Anot tarafına yakıt yani hidrojen elektrotu ve katot tarafına ise oksijen veya hava elektrotu denilir. Kullanılan hidrojen ve oksijen gazları farklı elektrotların içinden geçerek güç, su ve de düşükte olsa ısı üretirler. Yakıt pilleri, kimyasal enerjiyi direkt elektriğe çevirdiğinden dolayı prensip olarak akümülatör veya pile benzemektedir. Akü ve pillerde enerjiyi kullanılmadan önce deşarj edilmesi gerekmektedir. Yakıt pili ise akü ve pillerden farklı olarak enerjileri bitmez ve deşarja gerek olmamaktadır. Dış kaynaklardan enerji sağlandığı müddetçe elektrik üretilebilir. Gerilim değeri arttırılmak istendiğinde hücreler seri olarak bağlanır ve istenen değer elde edilebilir. Bununla birlikte hücrenin üretebileceği akım yüzey alanına bağlı olduğundan, bu değer arttırılmak istendiğinde yakıt pilinin alanı arttırılır.

Yakıt pillerimizin çalışma prensibi elektroliz reaksiyonunun tersi gibi olan bir kimyasal reaksiyondur. Suyu elektroliz ederken elektrik enerjisi uygulanarak oksijen ve hidrojene ayrıştığına göre, mantıksal olarak bu işlem ters yönde düzenlendiği takdirde, yani hidrojen ve oksijen reaksiyonu sonucunda su ve ısı elde edilirken, elektrik enerjisi de ortaya çıkmaktadır. Saf hidrojen yerine yakıt pillerinde hidrokarbonlar da kullanılabilir. Çünkü hidrokarbonlardan hidrojen elde edebiliriz, ancak zorunluluktan kullanır hidrokarbonlar çünkü performansı çok düşürür.



Şekil 4.3 PEM Yakıt Pili Çalışma Prensibi (www.tesisat.org)

Yakıt pilindeki gazların yönelim yolu ise hidrojeni ele alırsak anot kısmından ilerler oksijen (hava) ise katot kısmından ilerler. Bir katalizör yardımı ile kullandığımız hidrojen katot yoluna farklı yollardan giderek bir elektron ve bir proton olarak ikiye ayrılır. Proton su oluşumundan önce elektroliti yolunun içerisinde geçtiği zaman elektronlar ise katot kısmına dönerek oksijen ile hidrojenle birleşip bir elektrik akımı oluştururlar. Yakıt pilinde katotta olan oksijenin indirgenmesi ile anotta bulunan hidrojenin katalitik oksidasyonu ve elektrotların arasında bir potansiyel fark oluşturur. Fakat bu farkı bazen bir dış devrede kullanabilir, bu da elektrotlar arasında bulunan ve hücre yalıtımını sağlayan elektrolit, iyonik kütle ve şarj aktarımına izin verdiği takdirde olur. Kullanıldığı zaman ise ürün olarak bize su verir ve bu kimyasal reaksiyonun enerjisi, kutuplaşma olarak ve direnç kaybı dolayısıyla, elektriği ve ısıyı serbest bırakır.

Yakıt pilinin iki çıkış elektrotundan elektrik enerjisi hücreden alınır. Buradan alınan elektrotların yarattığı elektrik enerjisi doğru akım (DC) olarak alınır. Doğru akım aldığımız için alınan toplam verimimizin yüksek olacağından dolayı alınan elektriksel verim de bayağı yüksek olur.

4.4. Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt türü, oksitleyici türü, kullanılan yakıtın yakıt pilinin işlenişi, elektrolit tipi, işletme sıcaklığı, yakıtın besleme şekli gibi parametre değişimi gibi farklı türleri ortaya çıkarmaktadır. Yakıt pili uygulamasında ise yakıt pili sıcaklığı, elektrolit tipi ve kullanılan yakıt cinsine göre sınıflandırırız. Sonuç olarak yakıt pillerini altıya ayırabilmekteyiz;

- Doğrudan metanol yakıt pili (DMFC)
- Alkali yakıt pili (AYP)
- Fosforik asit yakıt pili (PAFC)
- Erimiş karbonatlı yakıt pili (MCFC)
- Katı oksitli yakıt pili (SOFC)
- Polimer elektrolit yakıt pili (PEMFC)

Yakıt pillerinin ömürleri ve hücre sıcaklıkları pilin üretiminde kullanılan malzemelere bağlıdır. Hücre sıcaklığının aynı vakitte kullanılan yakıt açısından da önemli bir rolü vardır. Ayrıca kullanılan yakıtın cinsine göre de kimyasal reaksiyon hızlarını da artırabilecek katalizörler seçilebilir. Yüksek sıcaklıkta katalizöre gerek yoktur zaten sıcaklığı kimyasal reaksiyonu hızlandırma için yeterli olmaktadır ve ucuz katalizörler kullanabiliriz ancak düşük sıcaklıklarda bunu söylemek mümkün değildir. Çünkü düşük sıcaklıklarda kimyasal reaksiyonumuz çok düşük olur ve oluşacak kimyasal reaksiyonu hızlandırmak için ve performansı artırmak için katalizör olarak maliyeti çok yüksek olan

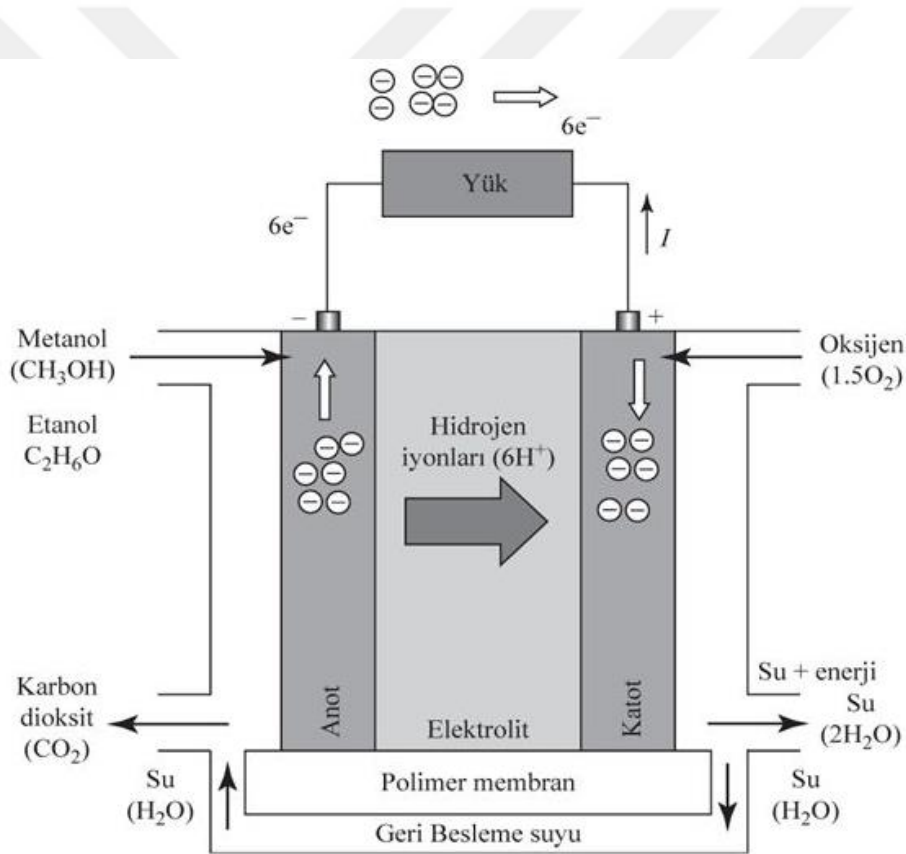
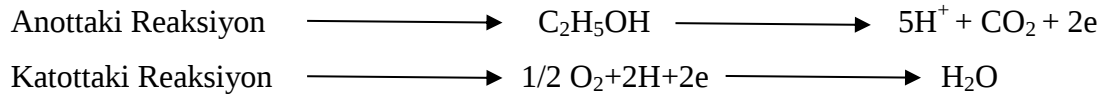
platin kullanmak zorunda kalırız. Buda hiç ekonomik olmamaktadır. Çizelge 4.4.1’de burada bahsettiğimiz yüksek ve düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4.1 Yakıt Pillerinin Karşılaştırılması

	Proton Değişim zarlı Yakıt Pili	Doğrudan Metanollü Yakıt Pili	Alkali Yakıt Pili	Fosforik Asit Yakıt Pili	Erimiş Karbonat Yakıt Pili	Katı Oksit Yakıt Pili
Elektrolit	Polimer iyon Değişimi zarı	Katı Polimer ya da sıvı alkalın	Potasyum hidroksit	Fosforik asit	Li / K Karbonat	Satbilize Zirkonyum
İşlem Sıcaklığı	40-80°C	50°C-90°C	65°C-220°C	150°C-210 °C	650 °C	600°C-1000°C
Katalizör	Platin	Pt veya Pt/Ru	Platin	Platin	Nikel	Perovskites
Taşıyıcı Gaz	H ⁺	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ⁻²	O ⁻²
Verim	%35-60	%35-40	%50-70	%35-50	%40-55	%45-60
Anot Yakıt	H ₂ (Hidrokarbon)	Su içerisinde CH ₃ OH	Gerekmez	H ₂	H ₂ (Hidrokarbon) CH ₄ (Metan)	H ₂ (Hidrokarbon) CH ₄ (Metan)
Isı yönetimi	Soğutucu	Soğutucu	Soğutucu	Kojenerasyon	Kojenerasyon	Kojenerasyon
Uygulama Alanları	Taşıtlar, Askeri Sistemler		Uzay Mekiği Tasarımları	Ticari Uygulamalarda (Ofisler, Oteller, Hastaneler)	Elektrik Santralleri	Sanayi alanlarında ve Elektrik Enerji Santralleri

4.4.1. Doğrudan Metanollü Yakıt Pili (DMFC)

Bu yakıt pillerinde kullanılan membranın yapısı polimerdir ve kompakt basit yapılıdır. Çalışma sıcaklığı 50°C - 90°C dir. % 40-45 civarı bir verimle çalışırlar. Çalışma prensibi anot kısmında çözelti şeklinde olan sıvı sulu metanol hidrojen gazının protonlarıyla polimer membrandan katot kısmına birlikte geçerler. Bu taşınma işlemi olurken anotta hidrojenden kopmuş metanol karbondioksit'e dönüp anot kısmından çıkar. Hidrojenin iyonları dış kısımdan bağlanmış olan teller aracılığıyla anottan katota geçiş yapar ve bunun sonucunda bir enerji açığa olur.



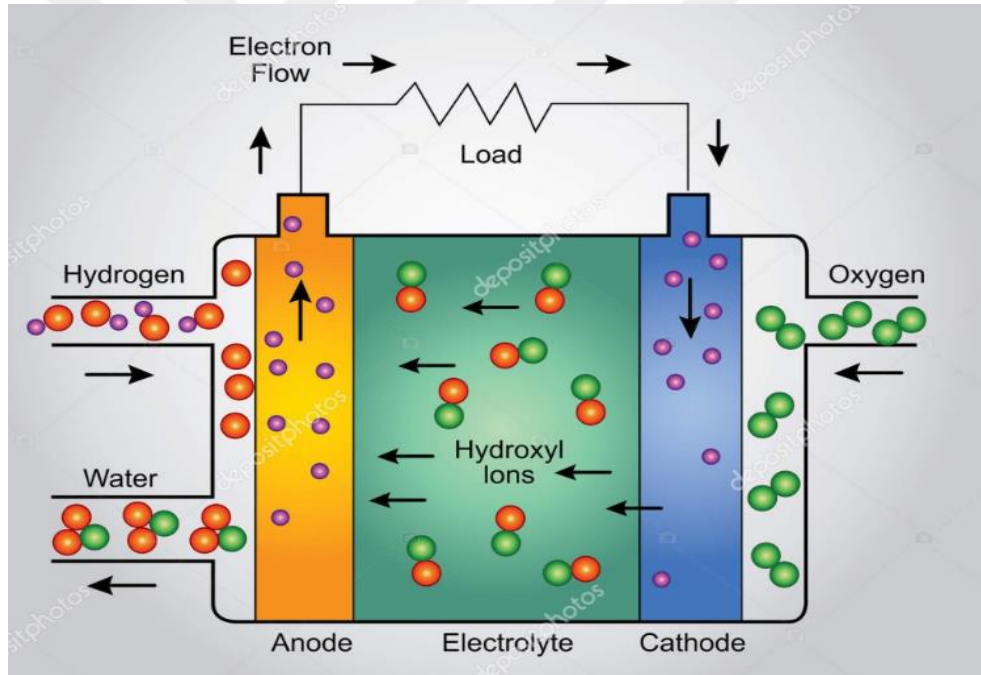
Şekil 4.4 Doğrudan Metanollü Yakıt Pili (slideplayer.biz.tr)

4.4.2. Alkali Yakıt Pili (AYP)

Alkali yapıdaki yakıt pillerinin çalışma sıcaklığı 65-220 °C'dir. Bilinen en eski yakıt pili alkali yakıt pilidir. Apollo uzay mekiğinde de kullanılmış olan alkali yakıt pili Nasa'nın

tercih ettiği yakıt pillerindendir.. Elektrolit olarak KOH yani potasyum hidroksit kullanır. Alınan verim %70 civarındadır. Alkali pilin en büyük dezavantajı Saf hidrojen ve saf oksijen kullanılmasıdır çünkü membranlarda oluşan karbondioksit birikimi olmaktadır bu da alkali ortamda potasyum karbonat oluşturur. Bu oluşum ise verimi oldukça düşürmektedir. Oluşan reaksiyon aşağıdaki gibi olmaktadır;

- Anottaki Reaksiyonu $\longrightarrow \text{H}_2 + 2(\text{OH})^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
- Katottaki Reaksiyon $\longrightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \longrightarrow 2(\text{OH})^-$
- Toplam Reaksiyon $\longrightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$



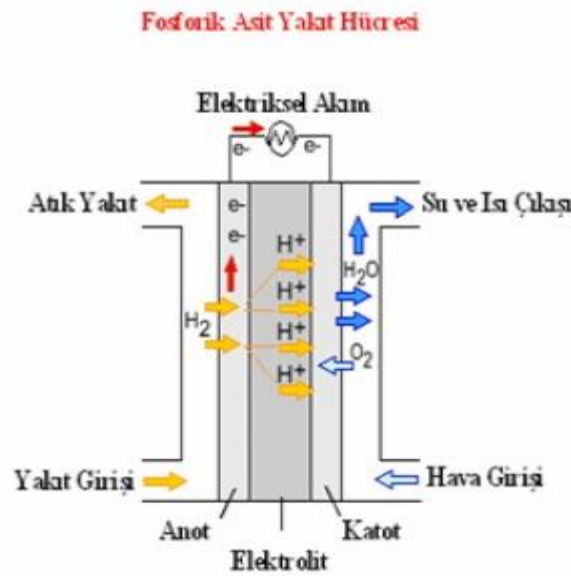
Şekil 4.5. Alkali Yapıdaki Yakıt Pillerini Çalışma Şeması (tr.depositphotos.com)

4.4.3. Fosforik Asit Yapıdaki Yakıt Pilleri (FAYP)

Fosforik asit yapıdaki yakıt pilleri sıvı fosforik asit kullanılır elektrolit olarak. Fosforik asitlerden alınan verim %40-42 aralığındadır. Çalışma sıcaklığı ise 155°C - 205°C aralığında olmaktadır. Anot ve katot kısmında katalizör amaçlı kimyasal reaksiyonu

artırmak için platin kullanılmaktadır. Fosforik asit yapılı yakıt pillerinde su yönetimi problem olmamaktadır çünkü işletilen sıcaklıkta yeterli iyonik iletkenliğe sahip olmaktadır. Bu fosforik asit yakıt pilinde kullanılan yakıt doğalgaz ve LPG olmaktadır. Karbon monoksit birikimi bazen bu yakıt pillerinde sorun yaratmaktadır ancak genel olarak sorunsuz bir yakıt pilidir. Oluşan reaksiyon aşağıdaki gibi olmaktadır.

- Anottaki Reaksiyon $\longrightarrow 2H_2 \longrightarrow 4H^+ + 4e^-$
- Katottaki Reaksiyon $\longrightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2O$
- Toplam Reaksiyon $\longrightarrow 2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$

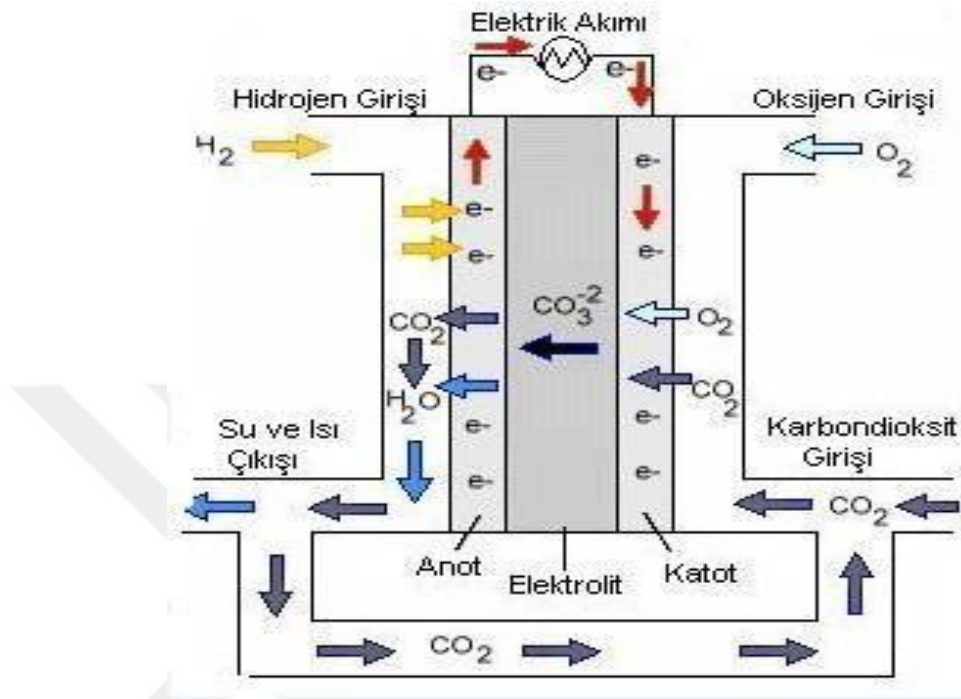


Şekil 4.6. Fosforik Asit Yapıdaki Yakıt Pili'nin Çalışma Şekli (slideplayer.biz.tr)

4.4.4. Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (EKYP)

Erimiş karbonat yapılı yakıt pilleri anot tarafında nikel malzeme katot tarafında ise nikel oksit malzeme kullanılır. Kullanılan elektrolit ile lityum, sodyum ve potasyum alkali karbonatın birleşmesi ile oluşmaktadır. 650°C sıcaklığı civarındadır çalışma sıcaklığı. Elektrolitin içerisinden geçerek karbonat hidrojen ile birleşip karbondioksit ve su oluşturmaktadır. Bu yakıt pilinden alınan performans %50 verimdir. Kısımlar içerisindeki nikel erimiş karbonat yakıt pilinin yüksek sistem sıcaklığı sayesinde reaksiyonlar yeterli düzeyde artırılır. Oluşan reaksiyon aşağıdaki gibi olmaktadır.

- Anottaki Reaksiyon $\longrightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_3 \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$
- Katottaki Reaksiyon $\longrightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CO}_3^{2-}$
- Toplam Reaksiyon $\longrightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$



Şekil 4.7. Erimiş karbonat yapıdaki yakıt pilinin çalışma şeması (Appleby ve Foulkes, 1989)

EKYP'nin artıları;

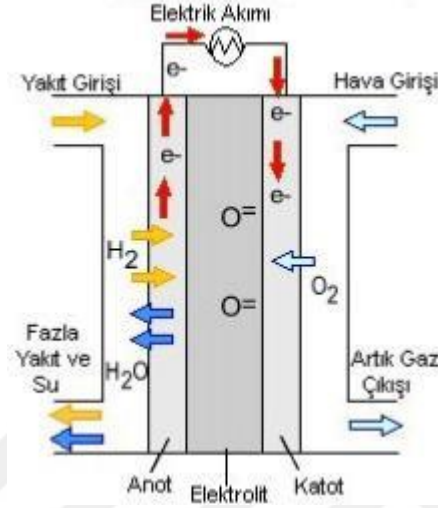
- Kullanılan Yakıtı içinden dönüştürebilme özelliği,
- Maliyeti düşük bir nikel katalizör,
- Yakıt olarak karbonmonoksit kullanabilmesi

EKYP'nin eksileri;

- Erimiş karbonat yapıdaki elektrolitin yüksekçe aşındırması
- Kükürtteki düşük derecede tolerans,
- Elektrolitlerde oluşan sızıntılar,
- Yüksek sıcaklıkta çalışmak için o sıcaklığı kaldıran malzeme gerekliliği.

4.4.5. Katı Oksit Yapıdaki Yakıt Pilleri (KOYP)

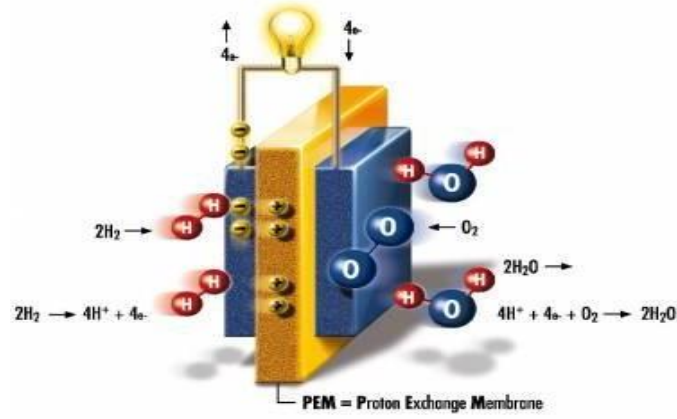
Anot kısmı metal nikelden oluşmaktadır, katot kısmı ise lantan manganit maddesinden oluşmaktadır. Yaklaşık 1000 °C civarından çalışmaktadır. Katı gözeneksiz İttriyum(3) Oksit (Y_2O_3) den oluşan zirkonyum oluşturmaktadır elektrolitini. Katı bir elektrolit üstünden O^{2-} iyonları anot kısmına geçer ve anot kısmında Karbon monoksit ve Hidrojen içeren yakıt ile birleşip elektronları üretirler.



Şekil 4.8. Katı Oksit Yapıdaki Yakıt Pillerinin Çalışma Şeması (Appleby ve Foulkes, 1989)

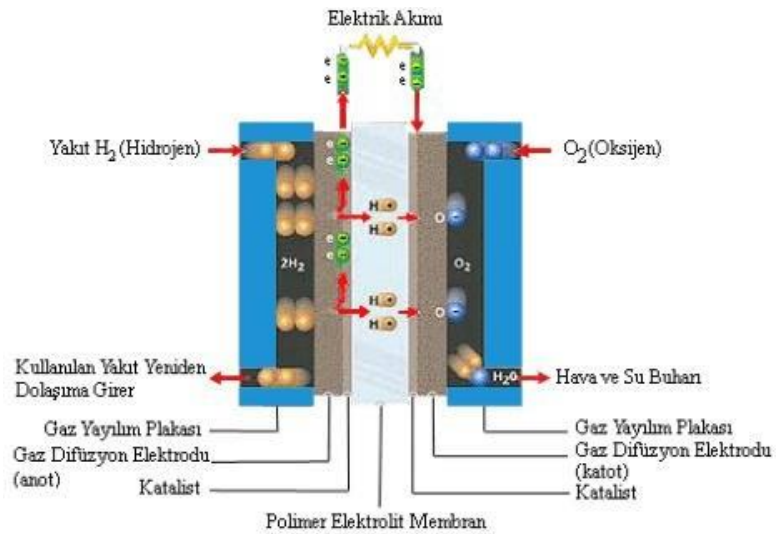
4.5. Proton Geçirgen Membranlı Yakıt Pili (Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili) (PEMYP)

Proton geçirgen veya değişim membranlı yakıt pilleri diğer isimleri ile “Polimer Elektrolit Yakıt Pilleri” veya “Katı Polimer Yakıt Pilleri” olarak adlandırılır. Bilimde birçok ismi olan bu yakıt pillerine kısaca “PEM Yakıt Pili” denir. Proton geçirgen membranlı yakıt pilleri içerik olarak katot, anot ve aralarında iyonların iletimini sağlayan bir zardan oluşur. Bu zara membran denir ve bu membran en önemli organlardan biri olup iki farklı yani anot ve katot diye adlandırdığımız gazların direkt olarak birbiri ile temasını engeller. Anot kısmında hidrojen yakıtı kullanılır, katot kısmında ise oksijen veya hava kullanılır genellikle. Bu anot ve katot kısımlarından oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucu bir potansiyel farklılık oluşturur.



Şekil 4.9. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilinin Kimyasal Reaksiyon Şeması

PEM Yakıt piline bağladığımız üreteçler aracılığı ile elektron hareketliliği yapılır ve enerji olarak elektrik üretmiş oluruz. Kullandığımız oksijen katot kısmındaki elektronlarla membranlardan gelen hidrojen ile kimyasal reaksiyon sonucunda ise su ve ısı üretmiş olur. Şekil 4.9 ve 4.10 da görüldüğü gibi hidrojen yakıt pilinin anot kısmında bulunan yoldan geçerek gözenekli bir yapıda olan elektrota gelir. Hidrojen yüzeyden geçtiği sırada platin aktif yüzey alanı ile teması sonucunda bir elektronunu verir ve iyonlaşır. İyon haline dönen H₂, elektrot kısmından elektrolite geçip katoda geçer ve bu esnada aktif yüzey alanında hidrojenin verdiği elektronlar dış devre kısmından katot tarafına direkt geçerken bir enerji olarak elektrik açığa çıkarırlar. Bunun sonucunda yukarıdaki paragrafta yazıldığı gibi katot kısmından geçip gözenekli elektrota ulaşır hava veya oksijen elektrolit ara kısmına gelir. Elektrolit yüzeyinde dış devre kısmından gelen elektronlarla birlikte elektrolitten geçip hidrojen ve oksijenle birleşip kimyasal reaksiyon sonucunda su oluşur. (Sarıdemir, 2003)



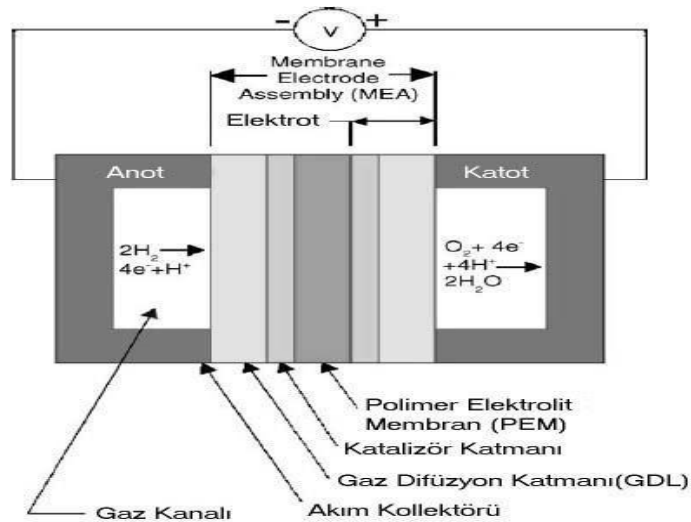
Şekil 4.10. Proton Geçirgen Membranlı Yakıt Pili

PEM Yakıt Pili Anot ve katot kısmında oluşan kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibi olmaktadır:

- Anotta Gerçekleşen Kimyasal Reaksiyon: $H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^-$ ($E_r = 0V$)
- Katot Gerçekleşen Kimyasal Reaksiyon: $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2O$ ($E_r = 1,3 V$)

Kimyasal reaksiyon sonucu oluşan su katot kısmında olan kanal ve borular aracılığı ile dışarı çıkar. Proton Geçirgen Membranlı Yakıt Piliinde bulunan membranların içeriği elektrolit yapıda olan asidik flor bulunduran sülfonik asit benzeri iyon değiştirebilen malzemeden oluşmaktadır. Polimer membranın başlıca işlevi PEM Yakıt pilindeki protonun anot kısmından katot kısmına geçebilmesini sağlayıp ve katot kısmında üretilen suyu anot kısmına geçmesini engellemektir. PEM Yakıt pilinde kullanılan membranın en önemli görevi anottaki ve katottaki gaz değişimini sınırlandırıp ve yalıtkan olmak zorundadır. Membranlar ayrıca yüksek kararlı bir reaksiyon için ince ve hafif olmalıdır. (Sarıdemir, 2003).

Proton Geçirgen Membranlı Yakıt Pilini oluşturan elemanlar şekil 4.10 ve 4.11 'da şematik olarak detaylı gözükmemektedir. PEM Yakıt Pilini oluşturan elemanların hepsinin kendince çok farklı görevleri bulunmaktadır. Bu elemanlar proton geçirgenli membran, gaz difüzyon katmanı (GDL) ve katalizör kısmındaki elektrotlardan olmaktadır.

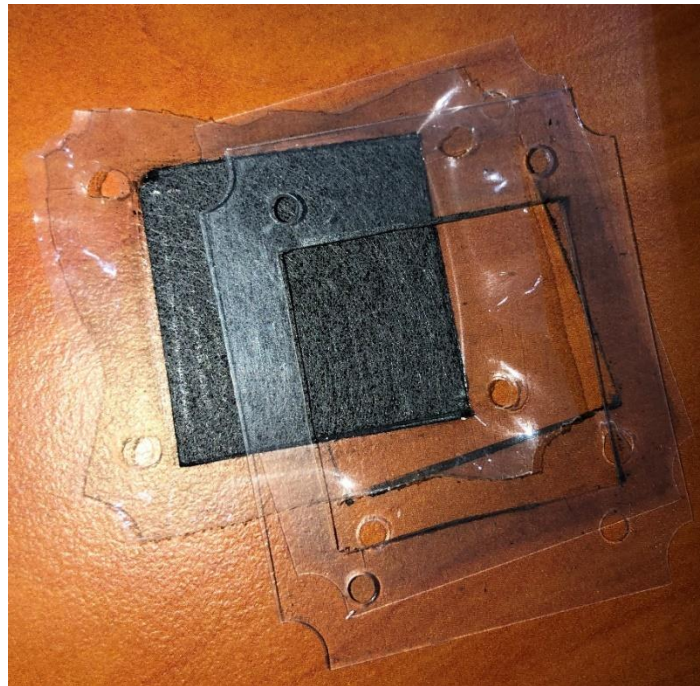


Şekil 4.11. Proton Geçirgen Membranlı Yakıt Pili Bölümleri (Aydın, 2007)

PEM yakıt piller düşük sıcaklıklarda çalışması sebebiyle ani yük değişimlerine kolay uyum sağlarlar. Sıvı elektrolite sahip pillerde görülen malzeme sorunlarına PEM yakıt pillerinde rastlanmaz. Taşımacılık sektöründe de faydalı yönleri vardır. Yakıt tanklarından tekerlere verim %55 seviyelerindedir ve diğer fosil yakıtla çalışan araçlara göre yüksektir. Bu verim benzinli araçlarda %30, dizel araçlarda ise %40 civarındadır (Chinannai ve ark., 2019).

4.5.1. Elektrolit Membran

Elektrolit Membranın William T.Grubb tarafından 1959 yılında ilk tasarımı yapılmıştır. Membranın bugün kullandığımız yakıt pilleri sisteminde olan “perfluorosulfonic” asidik polimer yapıyı geliştirmiştir. Membran, proton iletimini engelleyerek dış çevrim vasıtasıyla elektronların iletimini sağlar. Anot ve katotlardaki H_2 ve O_2 gazlarının yakıt pilinin içinde birbirine karıştırmasını önler. Şu an yaygın olarak bilimde kullandığımız membran cinsi Dupont’un üretmiş olduğu Nafion cinsidir. Membran kalınlıkları 12-254 μm aralığındadır. Kullanılan membranın yüksek derecede bir proton iletkenlik özelliğinde olmalıdır. Membranların ömrü uzun ve yüksek sıcaklığa dirençli ve sürekli çalışabilir olmalıdır. Membranların maliyeti yüksek ve dayanılabilirliği düşük olması dolayısıyla ekonomik olarak büyük eksi yaratmaktadır (Ulusoy, 2012)

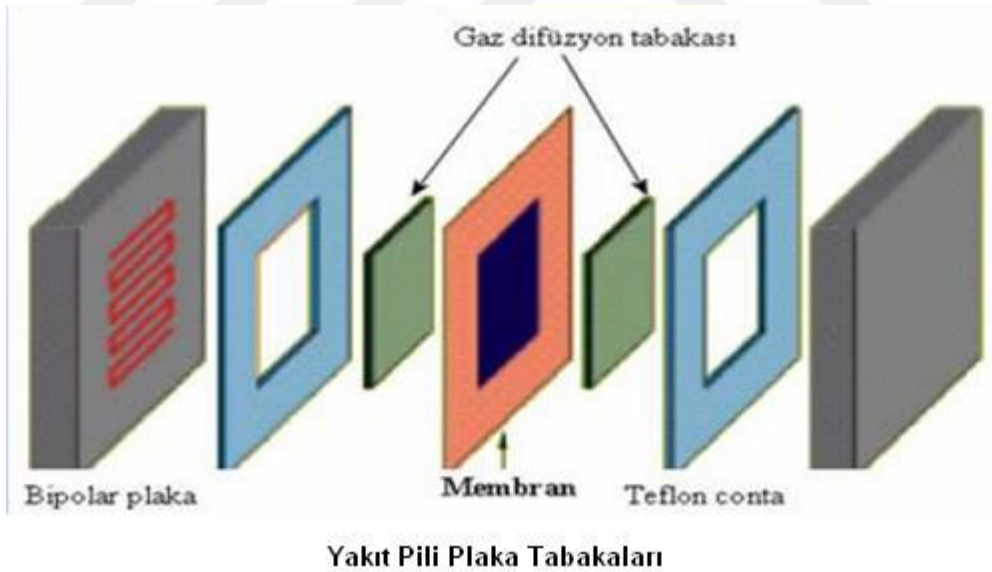


Şekil 4.12. Deney esnasında kullanılan delinmiş bir elektrolit membran

Membran protonun iletkenne dönüştürülmesi amacıyla sulandırılmalıdır. Proton değişim membranlı yakıt pillerindeki transferin en büyük önemi yer değiştiren iyonların suyu membranların uç noktalarına taşımasıdır. Taşıma işlemi suyun azaldığı bölümlerde çok güçlü direnç yaratmaktadır. Bu şekilde iyonlaşıp bu iyonları değiştirebilen membranın yakıt pillerinin hücrelerinde elektrolit şeklinde kullanılıp ve membranın dehidrasyonun üzerinde büyük etkisi vardır. (Öğüt, 2005).

4.5.2. Gaz Difüzyon Tabakası

Gaz difüzyon tabakalarının başlıca görevleri yakıt pili sistemindeki oluşan suyun taşınmasını sağlayıp, akış yüzey tabakaları arasındaki ısı teması gerçekleştirmektir. Bu tabakanın en önemli görevi ise talep edilen yüksek ısıl iletkenliği sağlayıp, gözeneklilik, uyumlu mekanik düzen ve de maliyetinin düşük olmasıdır. Gaz difüzyon tabakası su geçirgenliği hiç olmayan “politetra fluoroetilen” adlı bir materyal içermektedir ve tabaka sayesinde oluşabilecek su önlenmektedir. Bu tabaklarda sinter ya da ağ tipi malzemelerde tercih edilebilir (Carcadea ve ark., 2019).



Şekil. 4.13. Gaz Difüzyon Tabakası Kullanıldığı Yerin Şeması (Harun Girgin, 2009)

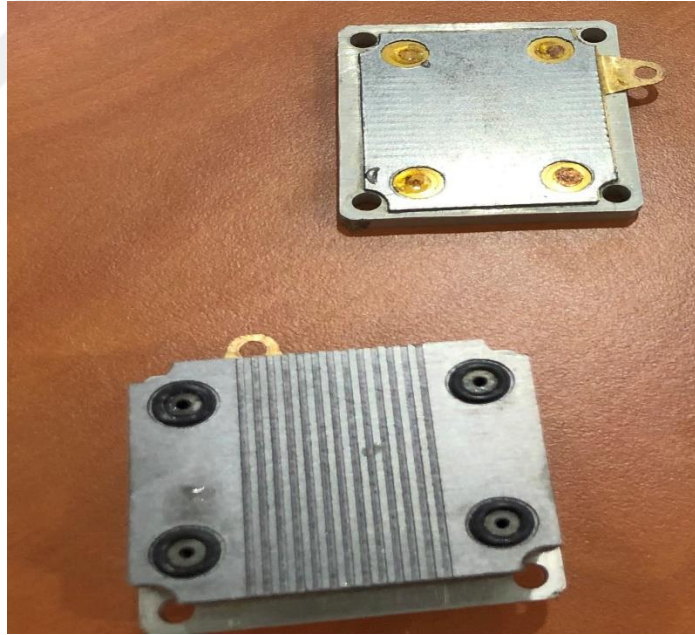
4.5.3. Elektrotlar

Elektrotlar gaz difüzyon tabakası ve katalizör birleşimi ile oluşurlar. Kimyasal Reaksiyon anot katalizör katmanı ve katot katalizör katmanlarında gerçekleşmektedir.

Elektrotlar farklı cinsteki malzemelerden üretimi yapılabilir. Hidrojen saf olarak kullanılma durumunda platin çok iyi bir performans vermektedir. Hidrojen dışındaki gazları kullanıldığı zamanda ise rutenyum çok başarılı performans vermektedir. Bu elektrotların tasarım aşamasındaki en önemli aşma iletkenlik durumudur ve kalınlığında ince bir şekilde olması iletkenliği artırmaktadır.

4.5.4. Akım Toplanan Plakalar

Akım toplayıcı plakalar membran elektrot düzeneği (MEA) ve gaz difüzyon tabakaları aralarında konumlanır. Yakıt ve oksitleyici geçişi bu plakalar sağlarlar. Sistemde üretilmiş olan suyu yakıt pili sisteminden atılmasını fiziki köprü ve desteklemesinin yanında elektriksel yapıdaki pilleri kısmen yapıştırmış ve birleştirmiş olur. İki adet farklı yüzey alanına sahip olduğundan dolayı çift kutuplu plakalar olarak adlandırılmaktadırlar. (Aydın, 2007).



Şekil 4.14. Deney esnasında kullanılan akış plakaları

Genel kanal seçenekleri 6 adettir, bunlar aşağıdaki gibidir;

- Paralel şekilde gaz yolları,
- Serpantin tarzı akış yüzeyi,
- Aynalı akış yüzeyi,

- Parçalı akış yüzeyi,
- Akış kanal olmayan gaz difüzyon tabakası,
- Metal ağ akış yüzeyi

Serpantin yollu plakalar “Ballard Power Systems” şirketi taraflı patenti alınmış bir akış alanı seçeneğidir. Serpantin yollu plakalar akış kanalı başlangıcından sonuna doğru sürekli bir şekildedir. Serpantin plakaların avantajı akış yolu üzerinde su damlaları gibi engellerin akışı engellememiş olmasıdır. Tıkanmış olan bir serpantin yolunda gazlar akım toplayan plakadan geçmekte zorlanır ve de yan kanal ile birleşip gözenekli olan yüzeye doğru geçiş yapar. Oluşan tıkanıklık yüzünden artacak bir basınç düşümü olacak ancak aktif yüzey kaybı olmamaktadır. Serpantin akış kanalında bu tıkanıklık ölmüş bir bölge yaratacaktır, bu engel dolayısıyla plakalar bölge içerisinde tepki bulunmayarak etken olmayacaktır. (Aydın, 2007).

5. METERYAL METOD

Son dönemlerde özellikle son 15 – 20 yılda, PEM yakıt pilleri üzerinde birçok çalışma yapılmaktadır. Yakıt pilinin verimini etkileyen gazların nemliliği, basınç, sıcaklık ve debi gibi parametrelerin değişiminde ve buna bağlı kullanılan membran, katalizör, gaz difüzyon akış katmanı, akış kanal farklılıkları vb. birçok parametre yakıt hücresinin verimini ve performansında ciddi gelişimler sağladığı belirtilmektedir.

Ancak PEM yakıt pilinin kurumuş olan membran ile çalışılması durumunda, gözenekli bir yapı oluşmaktadır. Bu da membran da bozulmayı hızlandırdığı bildirilmektedir. Bundan dolayı membrana verilen hidrojen ve oksijen gazlarının nemliliği yükseldiği zaman, membranın dayanıklılığı artacak ve yakıt pilinin performansına büyük etkileri olduğu bildirilmektedir.

Bunun dışında fazla su anot borularının ve katot borularının gözenekliliğini tıkayıp gaz transfer direncini arttırıp performans düşmesine neden olur. Bu tarz yakıt pillerinde enteresan olan durum ise gazları hem nemlendirip hem de hücreler arasında biriken suyu uzaklaştırmak gereklidir. Nemlendirme sıcaklıklarının ideal düzeyde sabitlemesi için tüm sistem koşulları için oldukça zor bir işlemdir. PEM yakıt pillerinin verimi yüksek bir performans verebilmesi için su yönetimi de çok önemlidir. Yapılan düzenekler için optimum parametreler bulunmalıdır (Barbir ve Gomez, 1997).

Bu nedenle bu tez çalışmamızda gazların nemliliğinin yakıt pili performansına etkileri üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu deneysel çalışma parametrelerini TÜBİTAK-MAM Yenilenebilir Enerji bölümündeki bilgisayar destekli ortamda test edip alınan sonuçlar Batman Üniversitesi Teknoloji Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında tasarladığımız sistemle ne gibi farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Bu yapılan sistemde nemlilik üzerine çalışmalar yapmaktayız ve nem parametresinin performans ve alınan verimde ne gibi değişiklikler meydana getireceğini görmekteyiz.

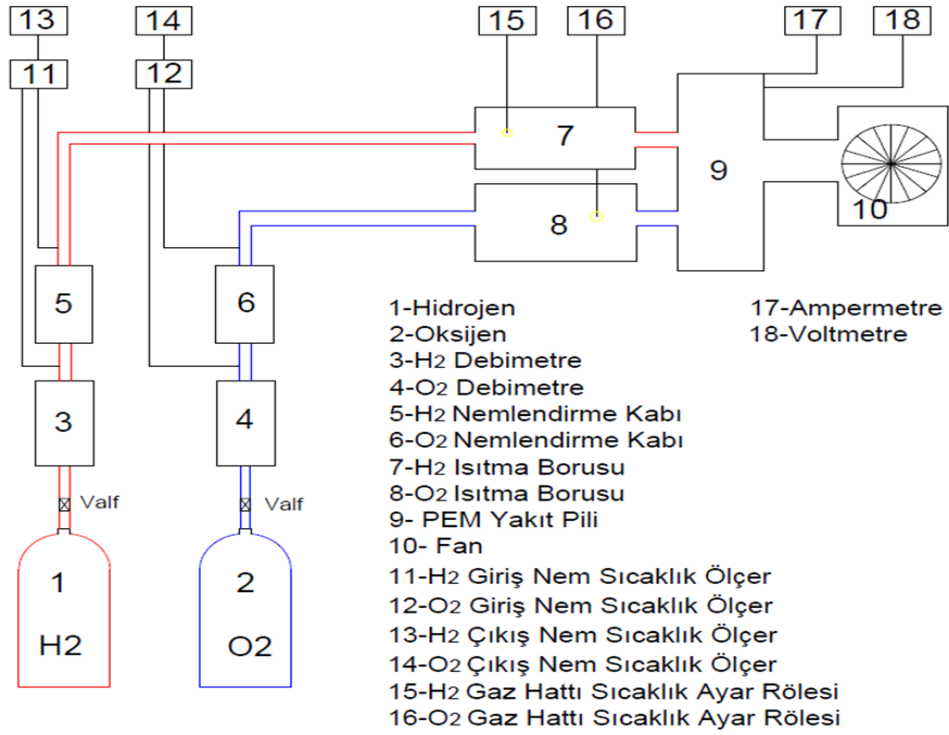
5.1. Proton Geçirgen Membranlı Yakıt Pili Sisteminin Kurulumu

Son dönemlerde PEM yakıt pilleri ile ilgili yapılmış çalışmalar, deneyler, projeler ve imalat aşamasındaki sistemler büyük bir artıştır. Bu nedenden dolayı PEM yakıt hücresine etki eden parametrelerin performansa etkilerinin bilgisayar ortamında simülasyonlar eşliğinde nasıl verim vereceğini görebilmekteyiz. Bu nedenle bizim elde ettiğimiz sonuçları tam olarak net bir şekilde değerlendirme fırsatını bulmaktayız.

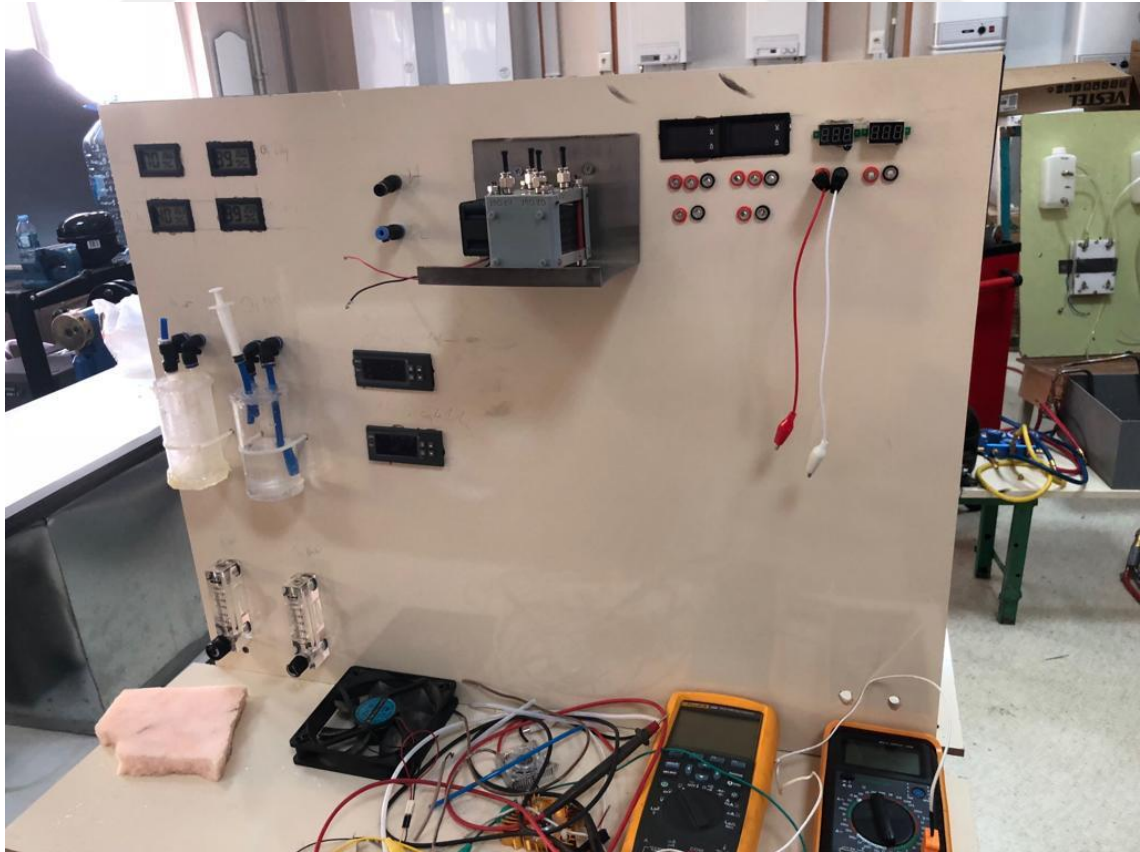
PEM yakıt pilindeki kullanılan gazların nemlendirme sıcaklıkları zamana bağlı üreteceği güç, akım ve gerilim değerlerini ölçüm cihazları ile tespit edilmiştir. Bu ölçümler ile ilgili nemlendirme üzerine incelemeler yapıp bunun performansına etkisini inceleyip grafik ve tablo halinde sonuçlandırılmıştır. Deney ise Batman Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Laboratuvarlarında kurulan sistem ile yapılmış olup, Tübitak Yenilenebilir Enerji laboratuvarında test edilmiştir. Öncelikli olarak PEM yakıt hücresi kurulumu yapıp sistem göre uygun düzeyde hidrojen ve oksijen verilerek bu gazları nemlendirip deney sonuçlandırılmıştır. Çalışma esnasında söz konusu reaksiyon sonucunda veriler ölçülecek bu verilere dayalı grafikler oluşturulmuştur. Grafikler bize nemlendirme sıcaklığının PEM yakıt pilinde maksimum güç alınan dereceyi belirlemiştir.

Bu gösterilen deney için genel kurulum tabloları. Bu yakıt pili, maksimum değeri 35 W olan değişken bir güç talebi üretebilir ve toplam elektrot alanına sahip 24 MEA hücresinden oluşur. 45 cm² Yakıt hücresi performanslarının ölçümü DC elektronik yük kullanılarak değiştirilmekte veriler kaydedilmektedir. Çalışmada Fuel Cell teknolojisiyle üretilen PEM yakıt hücresi kullanılmıştır.

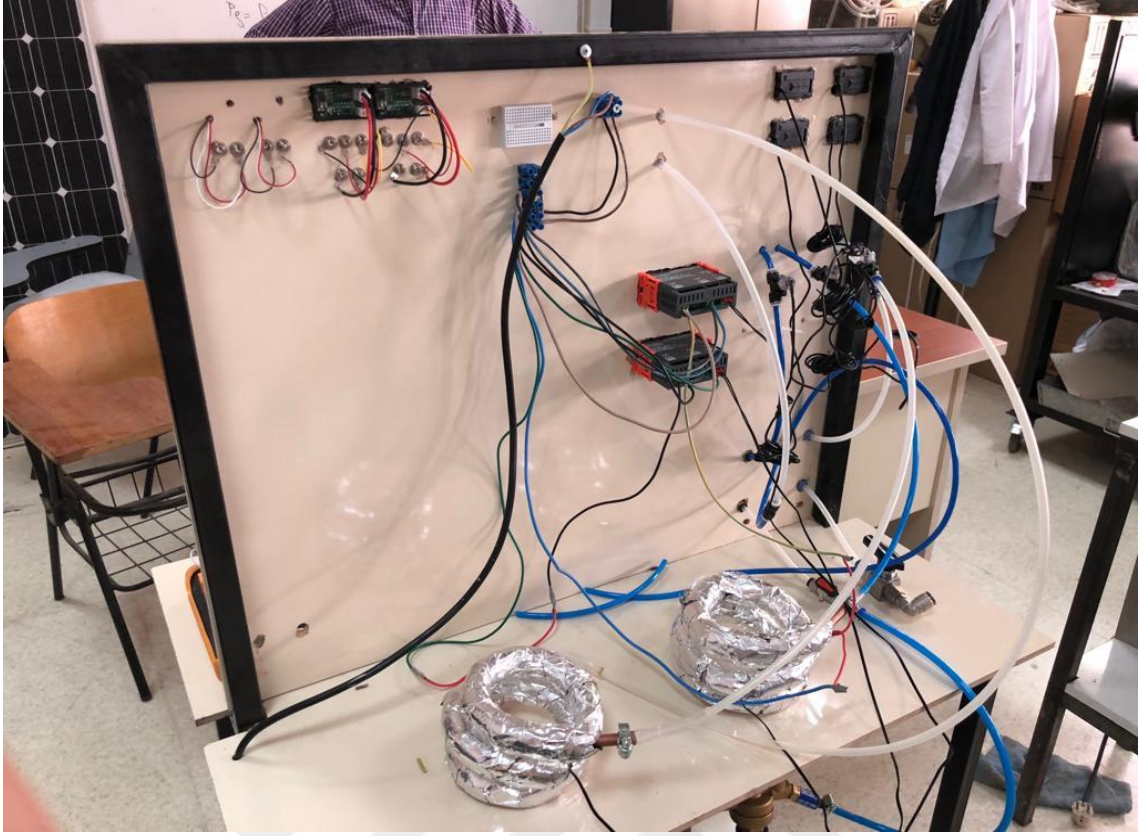
5.1.1. Deney Düzeneğinin Tasarımı



Şekil 5.1. Deney düzeneğindeki PEM yakıt pili sisteminin şematik görünümü



Şekil.5.2. Sistemin önden görünümü



Şekil.5.3. Sistemin arkadan görünümü

5.1.2. Deney Cihazları

5.1.2.1. Veri Kayıt Cihazı ve Datalogger

Veri kayıt cihazı belirli zaman aralıklarında değişkenlerimiz olan sıcaklık, nem ve basınç parametrelerini kayıt zamana bağlı grafiksel olarak kayıt eden cihazdır. Bu deneyde hem Datalogger hem de Tübitak tesisinde kullanılan veri kayıt cihazı kullanılmıştır. Bu cihazlarda istenilen tüm veriler kayıt altına alınıp grafiksel olarak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.4. Deneylerde kullanılan Datalogger



Şekil 5.5. Tübitak mam tesisindeki veri kayıt ve test cihazı

5.1.2.2. Ampermetre

Sistemde kullanılan amperi ölçüp kayıt altına almamıza yarayan cihazımızdır.

5.1.2.3. Voltmetre

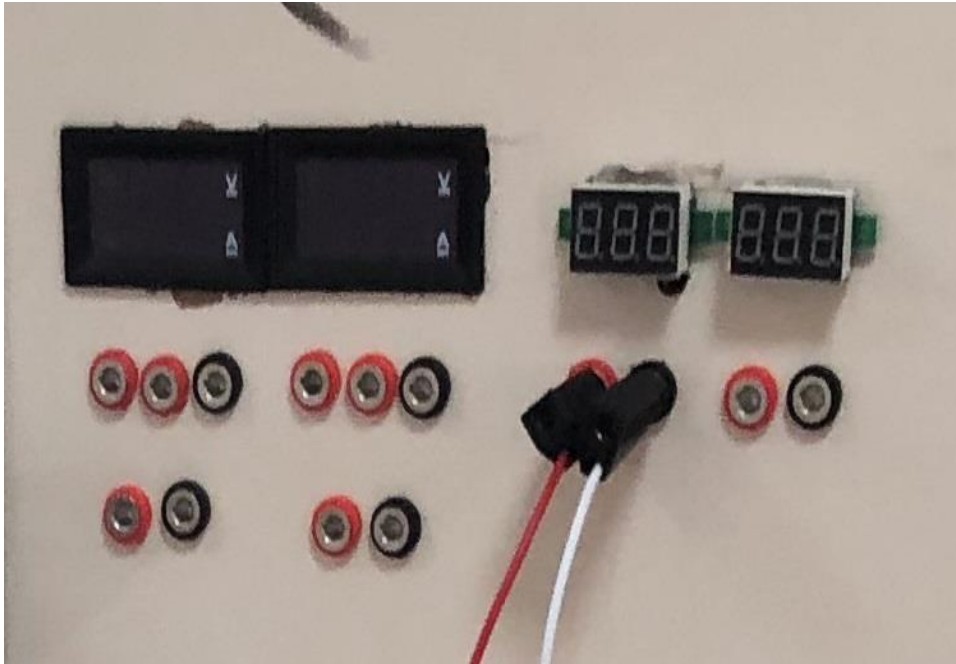
Sistemde kullanılan gerilimi ölçüp değişkenleri görmemize imkan veren ölçüm cihazıdır.

5.1.2.4. Termometre

Deneyde sıcaklığın kademe kademe yükseldiğini alçaldığını gösteren ölçüm cihazıdır.

5.1.2.5. Nemölçer

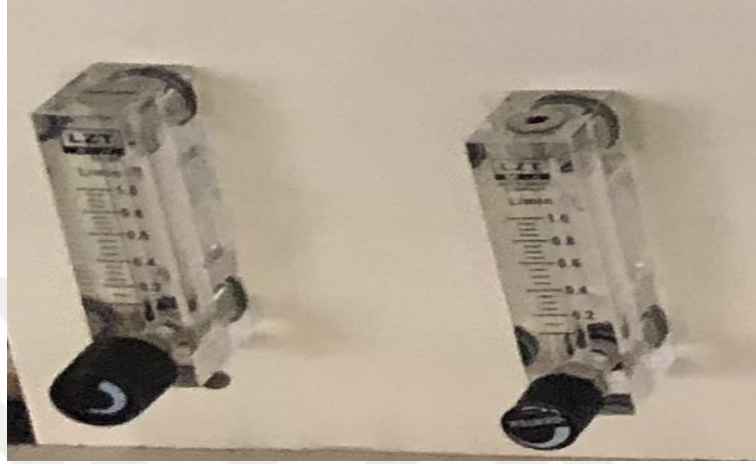
En temel higrometre çeşidi psikrometre diye adlandırılan, biri daima ıslak tutulan iki kabın içindeki termometreler aracılığıyla ölçüm yapan alettir. Islak olan kaptaki termometre buharlaşmadan kaynaklanan ısı kaybı sonucu daha az sıcaklık değerleri göstermekte normal kaptaki termometrenin gösterdiği sıcaklık değerleriyle karşılaştırılması sonucu ortamın nemi hesaplanmaktadır.



Şekil 5.5. Voltmetre-Nemölçer-Termometre-Ampermetre

5.1.2.6. Debimetre

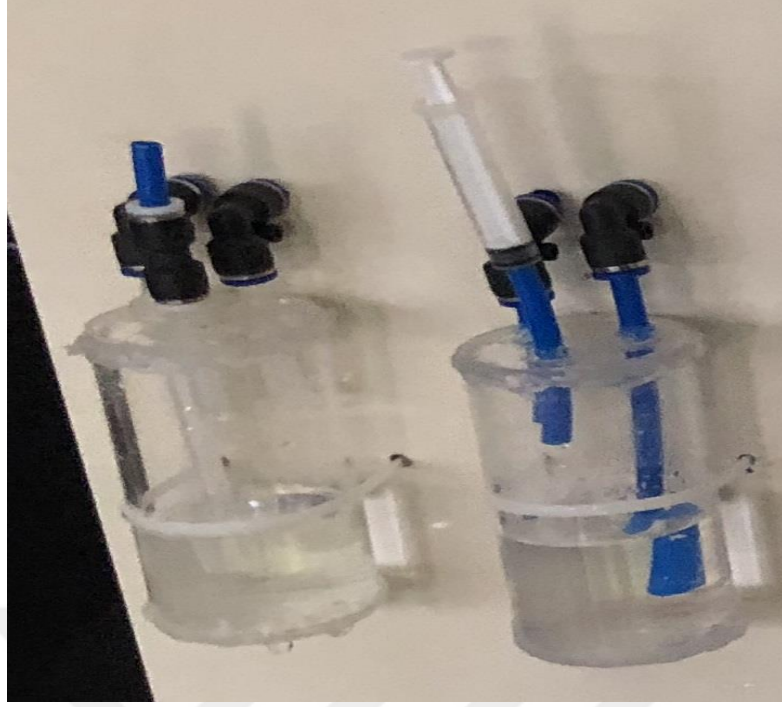
Yakıt pilimizde anot ve katot gazlarının istediğimiz dk/l değerinde sisteme verilmesini sağlayan ölçüm cihazıdır.



Şekil 5.6. O₂ ve H₂ gazlarının hacimsel debisini ölçen debimetre

5.1.2.7. Nemlendirme kabı

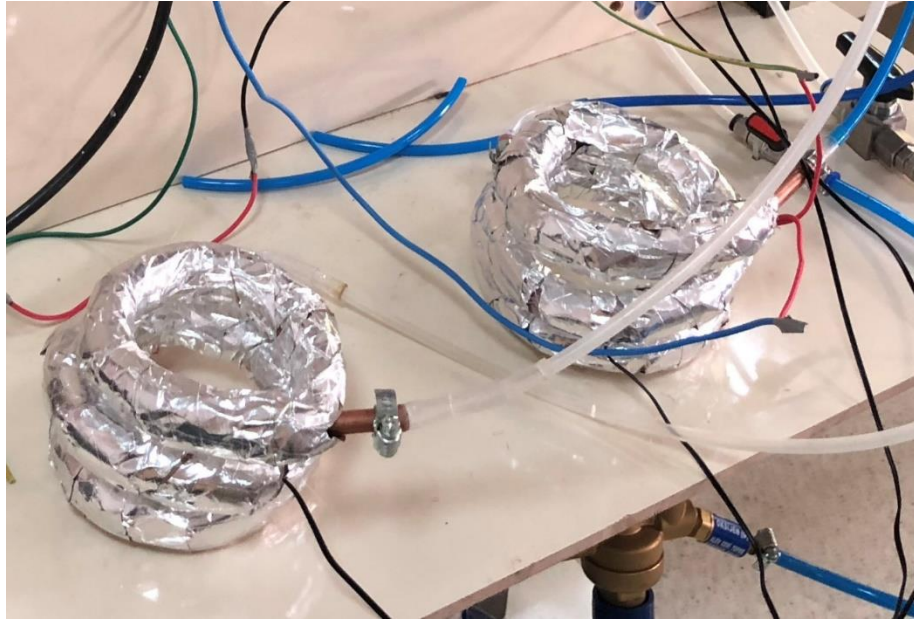
Hidrojen ve oksijen gazının anot ve katot giriş kısımlarındaki gazların nemini artırıp azaltmak amacıyla plastik malzemeden yapılmış silindire benzeyen kabı hava boşluğu da olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 5.7. Nemlendirme kabı

5.1.2.8. Isıtma borusu

10 mm çapındaki 100cm uzunluğundaki bakır borunun üzerine ısı bantları ile sarılıp, ısı kaybı olmaması için üzeri izolasyon malzemesi ile kaplandı.



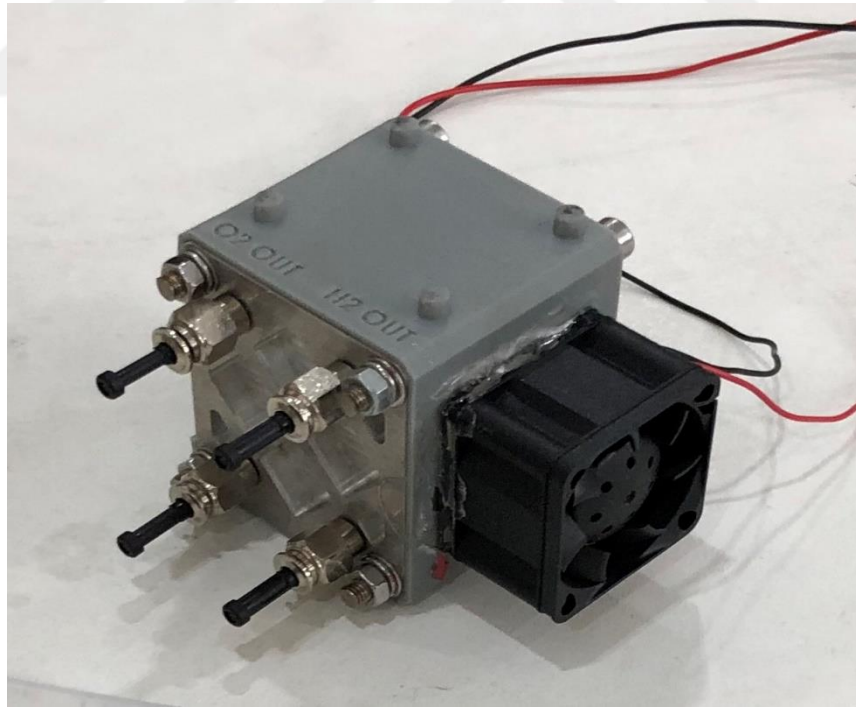
Şekil 5.8. Isıtma borusu

5.1.2.9. Sıcaklık ayar rölesi

Isıtma borusunun göbeğine termometre teli bağlanıp istenilen sıcaklıkta sabitlemek için kullanılan kontrol cihazıdır.



Şekil 5.9. Sıcaklık ayar rölesi



Şekil 5.10. Deneylerde kullanılan 6 hücreli yakıt pili ve fanı

5.1.3. Deneyin Yapılışı

Bu proje Batman Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Yenilenebilir Enerji Sistemleri laboratuvarında proje ekibi tarafından temin edilen ekipmanlar ve malzemeler deney standı üzerine kurulumu başarılı bir şekilde yapıldı. Ancak sistemin çalışma esnasında bazı olumsuzluklar dolayısıyla deneyin bir kısmını Ankara Tübitak Yenilebilir Enerji laboratuvarında testin tüm aşamaları başarı ile tamamlandı.

5.1.4. Deneyin Yapılış Aşamaları

- 1- Sistemin tasarımı bilgisayar ortamında öncelikle tasarlandı.
- 2- Alınacak Malzemelerin listesi çıkarıldı.
- 3- Bazı malzemeler Çin pazarından bazı malzemeler Türkiye pazarından temin edildi.
- 4- Oksijen ve hidrojen tüpleri BATMAN – TPAO laboratuvarından temin edildi.
- 5- Oksijen ve hidrojen tüplerinden debimetrelere pnomatik borularla bağlantılar yapıldı.
- 6- Oksijen ve hidrojen debimetre çıkış noktalarından boru bağlantılarıyla nemlendirme tüplerine bağlantıları yapıldı.
- 7- Oksijen ve hidrojen nemlendirme tüplerinin giriş ve çıkış noktalarına elektronik nemölçer bağlantısı yapıldı.
- 8- Oksijen ve hidrojen nemlendirme tüpü çıkış borularını bağlayacağımız bakır borular temin edilip gerekli bükümleri yapıldı.
- 9- Oksijen ve hidrojen nemlendirme tüpü çıkış borularının bükümü sonrası ısı bandı ve izole malzeme ile kaplanıp gerekli elektrik bağlantıları yapıldı.
- 10- Oksijen ve hidrojen ısı bantlı bakır boruların içerisine elektronik termometre ve sıcaklığı ayarlayıp sabit tutmak için kullanılan ısı ayar rölesi takıldı.
- 11- Bu bakır boruların çıkış noktalarına yani oksijen ve hidrojenin çıkış yerleri PEM yakıt piline bağlandı.
- 12- PEM yakıt pili iletim devresine voltmetre ve ampermetreyi ölçme amaçlı datalogger ve ölçme cihazları takıldı
- 13- PEM yakıt pili sıcaklığını ayarlamak amaçlı bir fan takıldı.
- 14- Sistem hazır hale getirilip çalıştırıldı.

5.2. Yakıt Pili Verim Hesabı ve Denklemleri

5.2.1 P.E.M. Yakıt Hücresi verim hesabı ve performansı

Proton değişim zarlı yakıt hücreleri hidrojen ve oksijen gazını katalizör kullanarak içerisinde kimyasal tepkimeye sokan ve bu tepkime sonucunda elektrik ve ısı enerjisinin yanında ürün olarak su üreten sistemlerdir. Böyle bir yakıt hücresinin çalışma performansını incelemek için, sistem değişken bir RL yük direncinin bulunduğu bir devreye bağlanmış ve değişik direnç değerleri için devreden geçen akımlar ile yakıt hücresinin bu direnç değerlerinde oluşturabileceği gerilim değerleri kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak sistemin farklı akım ve voltaj değerleri için sağladığı güç değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler kullanılarak sistemden geçen akımın değişmesi ile sistemin sağlayabildiği voltaj ve güç değerleri “Fuel Cell 3” programı kullanılarak grafikler elde edilmiştir. Son olarak sistemin kullanılabilir gerilim değerleri ürettiği bölgeler yakıt hücresinin akıma karşı voltaj grafiğinden tespit edilerek bu voltaj değerleri için sistemin veriminin azami ve asgari değerleri hesaplanmıştır.

Verim Hesabı:

Herhangi bir yakıt hücresinin verimi, Eşitlik 5.1’ de gösterildiği üzere her ikisi de aynı birimde olacak şekilde, elektriksel çıkış gücü ve yakıt girişi arasındaki orandır.

$$\eta_{yh} = \frac{\text{Elektriksel güç çıkışı (Pyh)}}{\text{yakıt girişi (FyH)}} \quad 5.1$$

eşitlik 5.1 e göre % Verim elde edilir.

Elektriksel çıkış gücü ise Eşitlik 5.2’deki gibi basitçe gerilim (V) ve akım (I)’ ın çarpımıdır

$$P_{yh} = V.I \quad 5.2$$

.... W değerinde sonuç elde edilir.

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 5.4 ile belirlenir,

$$q_{H_2} = \frac{mI}{nF}$$

5.4

Burada m, hidrojenin moleküler 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 5.5'deki gibi olur (Barbir ve ark., 2005).

$$F_{yh} = q_{H_2} \cdot \Delta H = \frac{m\Delta H}{nF} I \quad 5.5$$

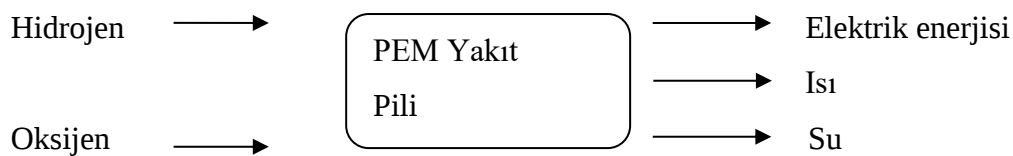
Eşitlik 5.3'deki elektrokimyasal tepkime $m\Delta H/(nF)$ 1,482 V'luk bir değere sahiptir. Buna, elektrokimyasal tepkime eşitlik 5.3 sonucu ortaya çıkan azami elde edilebilir enerji (hem elektriksel hem termal) ile ilgili tersinir potansiyel adı verilir. Böylece, 5.1, 5.2, 5.4 ve 5.5 eşitlikleri birleştirilerek, yakıt hücresi verimi basitçe Eşitlik 5.6'daki gibi asıl çalışma voltajı ve 1,482 V' un oranı olur. (Barbir ve ark., 2005)

$$\eta_{yh} = \frac{V}{1.482}$$

5.6

5.2.2. PEM Yakıt Pillerinde Elektrik Enerjisi Üretimi

PEM yakıt pilinden alınmış olan elektrik enerjisi sistemce ölçülen akım, gerilim ve zaman da akış değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu açığa çıkan elektrik enerjisini kaynağı oksijen ve hidrojenin kimyasal reaksiyonla birleşerek ürettiği enerjidir. Aşağıdaki şema da özetlenmiştir bu reaksiyon



Bu oluşan kimyasal reaksiyonda ortaya çıkan enerji kimyasal reaksiyona giren Hidrojen - Oksijenin ve üretilen ürünlerin Gibbs Enerji farkıdır.

Bir kimyasal reaksiyon da oluşan Gibbs serbest enerji seviyelerindeki değişim:

$$“\Delta G = G_f (\text{ürünler}) - G_f (\text{reaktantlar}) = \Delta H - T\Delta S \text{ (T:[Kelvin])}” \quad 5.7$$

PEM yakıt pillerinde ortaya çıkan enerjinin formülü:

$$“\Delta g^-_f = g^-_f (\text{ürünler}) - g^-_f (\text{reaktantlar})”$$

$$“\Delta g^-_f = (g^-_f)_{H_2O} - (g^-_f)_{H_2} - 1/2 (g^-_f)” \quad 5.8$$

Çizelge 4.1. Δg^-_f reaksiyonları için $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$ sıcaklık değerleri (Barbir ve ark., 2005)

Üretilmiş olan Faz	Sıcaklık °C	Δg^-_f (kJ _{mol} ⁻¹)
Sıvı	25	-237,2
Sıvı	80	-228,2
Gaz	80	-226,1
Gaz	100	-225,2
Gaz	200	-220,4
Gaz	400	-210,3
Gaz	600	-199,6
Gaz	800	-188,6
Gaz	1000	-177,4

5.2.3. Yakıt Hücresi Açık Devre Enerji Gerilimi

Eğer yakıt hücresinde hiç enerji kaybı yoksa yani sistemler tersinir ise Gibbs serbest enerji sisteminin tamamı elektrik enerjisine dönüşür. Bu ideal duruma göre tersinir açık devre gerilimi bulunur.

Bir yakıt hücresinde üretilen her su molekülü ve kullanılan her hidrojen molekülü için Elektron devreden geçer yani kullanılan 1 mol hidrojen için 2N elektron geçer.(N Avagadro sayısıdır $6,022 \times 10^{23}$ Molekül/Mol) Bir elektronun yükü $-e(1,602 \times 10^{-19}$ coulombs/elektron) ise toplam transfer edilen yük:

$$-2Ne = -2F \text{ coulombs}$$

F:faraday sabitidir ve değeri 96485 coulombs/ elektron-mol
5.9

E:Yakıt hücresinin gerilimi ise, yapılan elektriksel iş:

$$\text{Elektriksel} = \text{yük} \times \text{gerilim} = -2FE \text{ joules}$$

Eğer sistem tersinir ise yapılan iş Gibbs serbest enerjine eşit olacaktır.

Açık devre gerilimi:

$$\Delta g^-_f = -2F.E \quad E = \frac{\Delta g^-_f}{-2F}$$

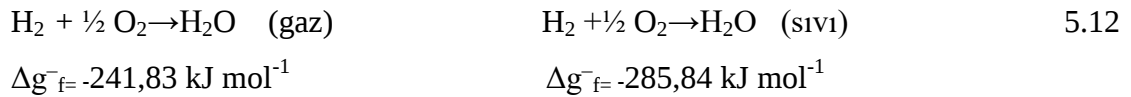
5.10

Yakıt Hücresinin Teorik Enerji Üretimi:

Yakıt pili teorik verimi genellikle bir mol yakıttan elde edilen elektrik enerjisinin tepkimenin entalpisine oranı olarak tanımlanır.

$$\text{Olası maksimum verim} = \frac{\Delta g^-_f}{\Delta h^-_f} \quad 5.11$$

Burada dikkat edilmesi gereken Hidrojenin yanması ile oluşan suyun sıvı veya gaz olmasıdır.(Çalışma sıcaklığına bağlı olarak)

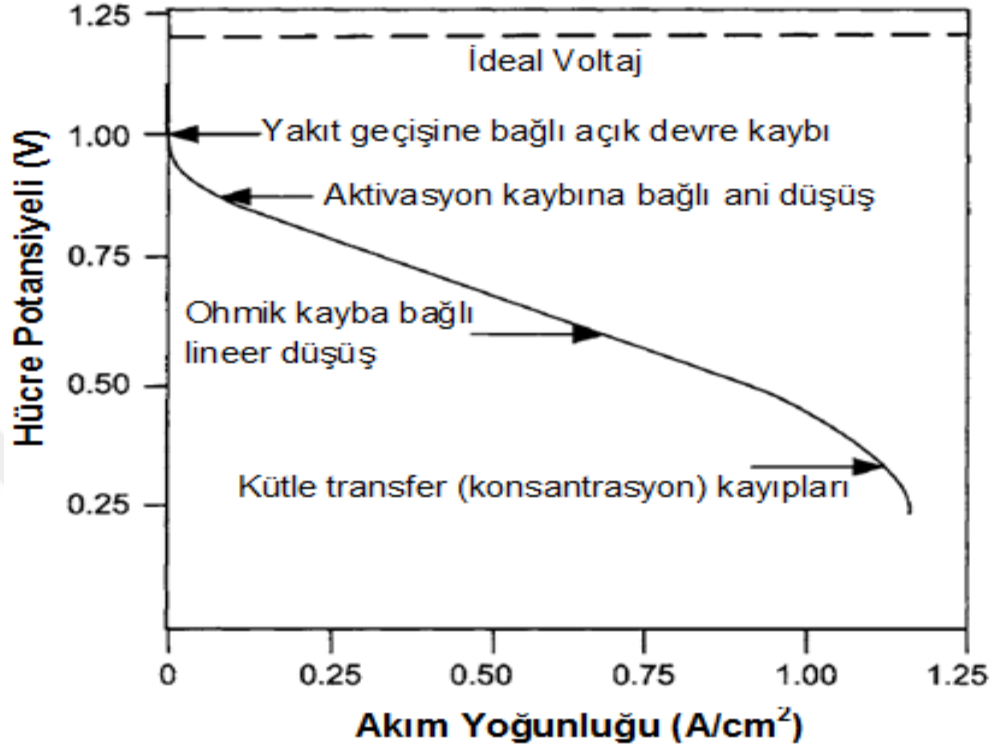


5.2.4.Gerçek Yakıt Hücre Potansiyeli - Polarizasyon Eğrisi

Gerçek hücre potansiyeli (V_{cell}), teorik hücre potansiyelinden aktivasyon (ΔV_{act}), ohmik (ΔV_{ohm}) , yoğunlaşma (ΔV_{conc}) kayıplarının çıkarılması sonucu elde edilir.

$$E_{cell} = E_r - (\Delta V_{act} + \Delta V_{conc}) \text{ a } (\Delta V_{act} + \Delta V_{conc}) - \Delta V_{ohm}$$

Aktivasyon, ohmik ve yoğunlaşma kayıplarının, teorik hücre geriliminden çıkarılarak elde edilen hücre polarizasyon eğrisi Şekil 5.11.'de verilmiştir.



Şekil 5.11. Yakıt hücresindeki voltaj-akım polarizasyon eğrisi (Yubai ve ark., 2019)

Anot ve katot aktivasyon kayıpları aynı olarak değerlendirilir ancak kayıpların çoğunluğu oksijen indirgenme reaksiyonundaki yavaşlık nedeniyle katot da meydana gelmektedir.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde PEM yakıt pilinin neme bağlı değişimi için kurduğumuz düzeneğin, nemin verim üzerindeki etkileri görülebilmesi amacıyla kullanılan PEM yakıt hücresi sistemimizin deney yöntemi ve deneyde elde ettiğimiz sonuçlar anlatılmıştır.

Batman Üniversitesi Teknoloji Fakültesi laboratuvarında kurulumunu yapmış olduğumuz PEM yakıt pili deney düzeneğini uzun bir süre çalıştırıp, kararlı bir hale getirdikten sonra Hidrojen ve Oksijen gazının debimetre vasıtasıyla kademeli bir şekilde sisteme verilir, sistemin enerji parametreleri gözlenmiştir. Bu gözlem verileri kayıt altına alınarak grafik haline getirilip, aynı zamanda bu Fuel Cell 3 ticari programı sayesinde ayrıntılı bir şekilde incelenmiş, nemin yanı sıra debi, sıcaklık, hat sıcaklığı ve en uygun nominal değerler bulunmuştur.

PEM yakıt pilimizin normal boyutu 3×3 cm², 6 adet hücreden oluşan yakıt pilidir. Ancak yapılan deneyde 5 adet yakıt hücresinin membranların yanıp delinmesi sonucu 1 adet hücre üzerinden devam edilmiştir bu deneyde.

PEM Yakıt Hücresi Sıcaklığı: 41°C

Amper 1,8 A

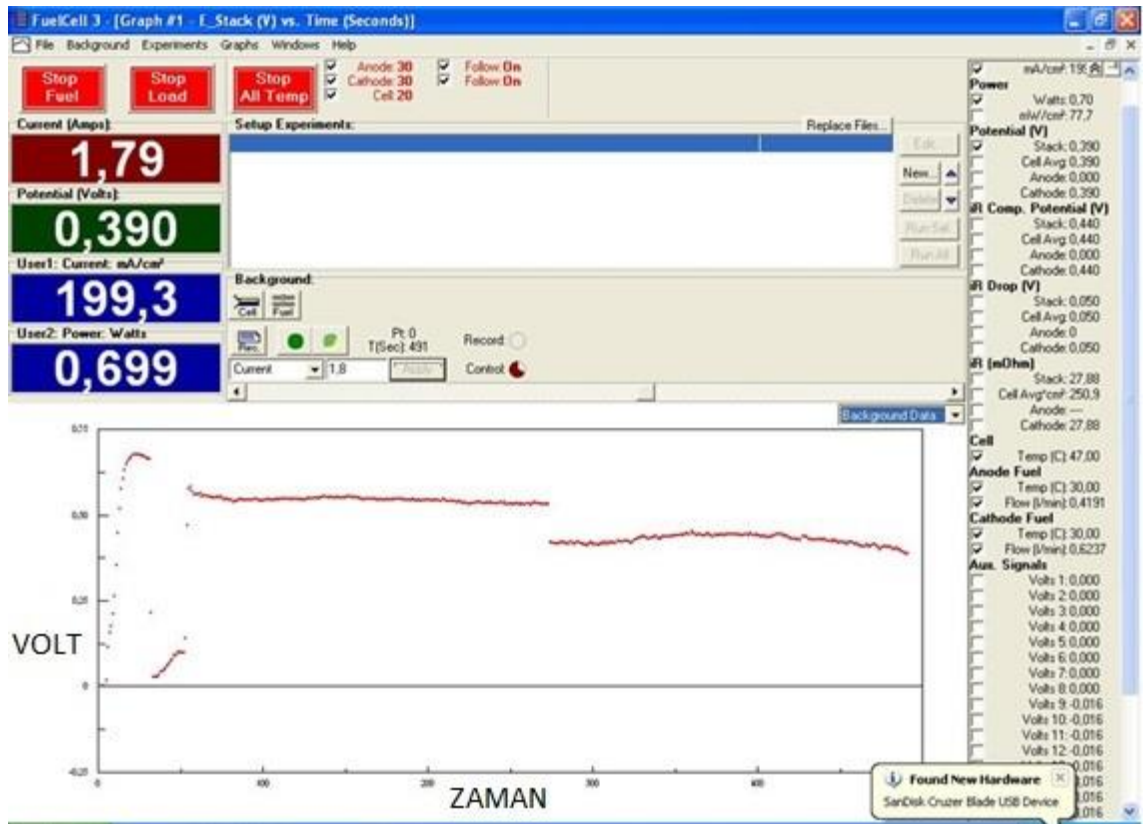
Hidrojen (H₂):300 ml/dk

Oksijen (O): 500 ml/dk

değerleri en ideal konumda sabit bir konuma getirildikten sonra hidrojen ve oksijen kanallarının nem sıcaklıkları kademeli ancak sabit bir şekilde artırılarak yakıt hücresinin verimi grafiksel sonuçları alınmıştır. Batman Üniversitesi Teknoloji Fakültesi laboratuvarında PEM yakıt pili deney standında kullanmış olduğumuz 6 hücreli yakıt pilini yapılan deneylerde başlangıçta da bahsettiğimiz gibi 5 hücresinin yanması sonucunda değerlerimizin doğruluğunu test etme ve doğrulama amaçlı yakıt pilimizin tek hücreli halini TÜBİTAK'ın Ankara'daki Yenilenebilir Enerji Laboratuvarına götürülmüş olup, test esnasında sadece bu iş için kullanılan Yakıt Pili Sisteminde teste edilmiştir. Batman Üniversitesinde kendi kurduğumuz sistemimizdeki değerlerle hemen

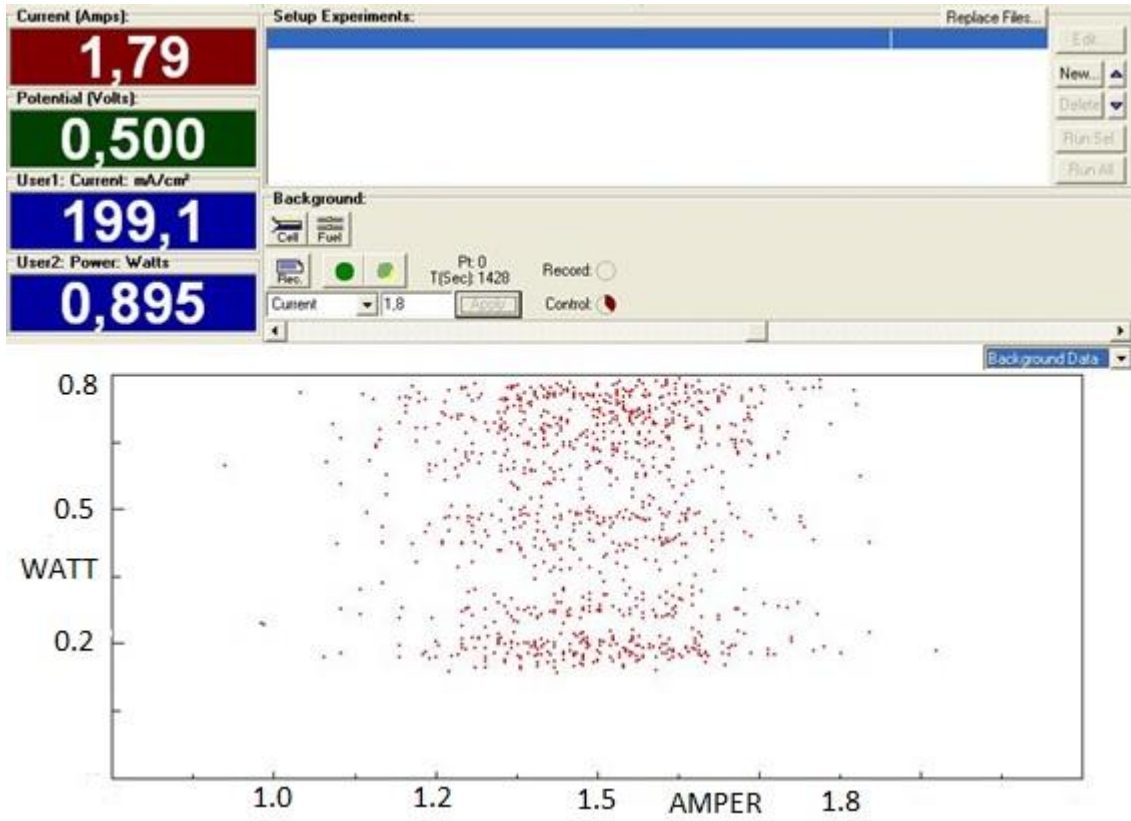
hemen aynı veriler elde edilmiştir. Deneyimiz Nem oranı sırasıyla %30 - %35 – %40 – %45 – %50 – %55 – %60 – %65 – %70 değerleri ile olmuştur. Aşağıda göreceğimiz sonuçlar sırasıyla nominal değerlerimiz üzerinden aldığımız grafik sonuçları olmaktadır.

Şekil 6.1’de ilk deneyimiz başlamış ve yakıt pilli hidrojen debisi 0,3 l/dk oksijen debi 0,5 l/dk hücre sıcaklığı 41 °C sabit tutulup çalıştırılmıştır. Bu grafiğimiz volt grafiğimiz olmuş olup kararlı hale getirmek için ilk çalıştırma grafiğimiz olmaktadır. Bu şekilde bir gün boyunca çalıştırılmış olup kararlı hale geldikten sonra kademeli bir şekilde diğer sonuçlarımız da sonuçlandırılmaktadır.



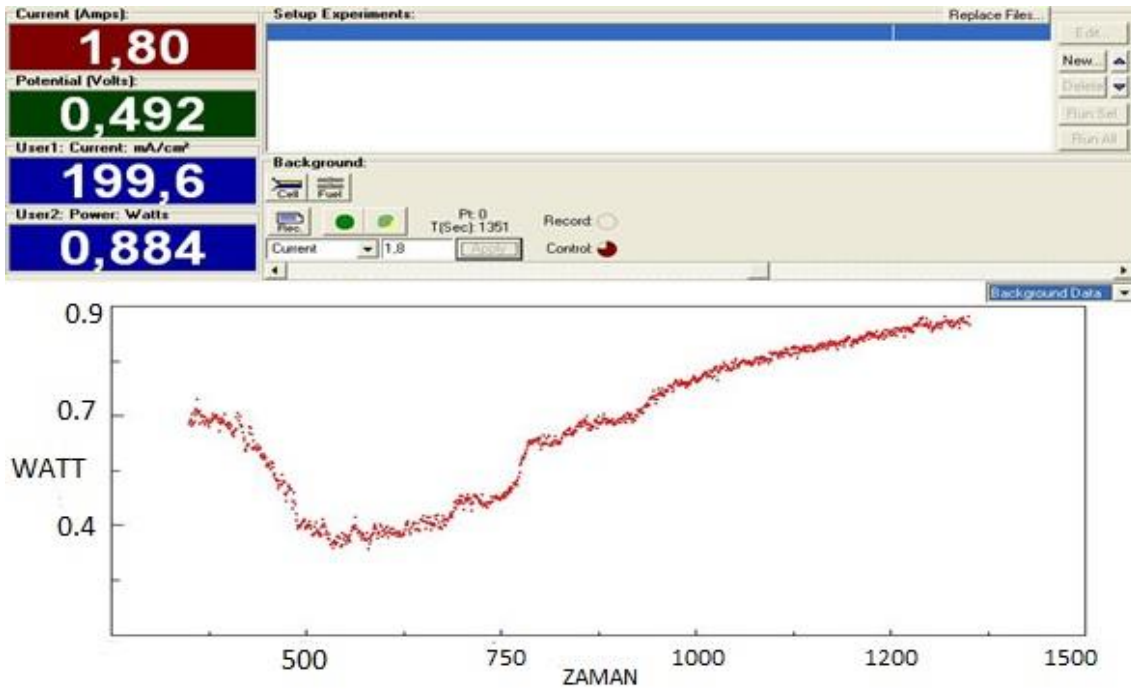
Şekil 6.1. Fuel Cell 3: Nem: %30 iken V:0,390 W:0,699 – volt – zaman grafiği

Aşağıdaki Şekil 6.2 de görüldüğü üzere yakıt hücremizi nem hariç diğer tüm değerleri sabit tutularak nem değerini % 35 çıkarılmıştır. Volt değerimiz 0,500 V ve watt değerimiz ise 0,895 W bulunmuştur. Grafiğimiz ise Amperin sabit tutularak yakıt pilimizin verdiği watt değerinin artış grafiği olmaktadır.



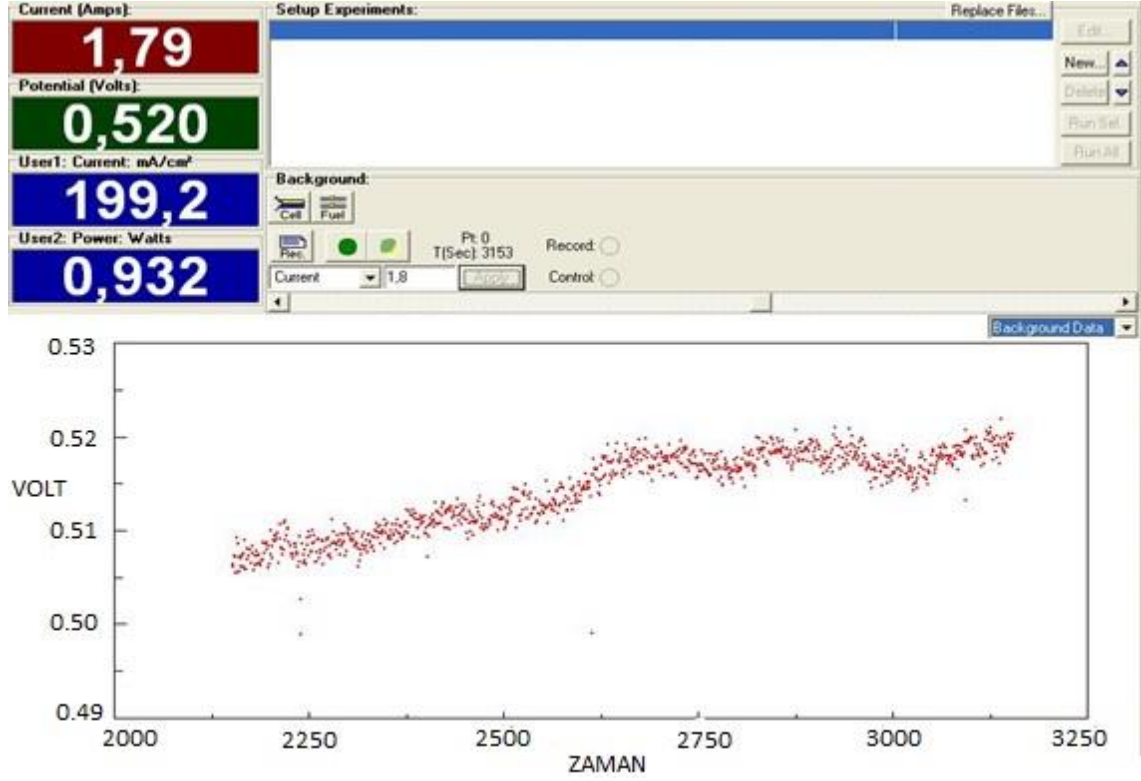
Şekil 6.2. Fuel Cell 3: Nem:%35 iken V:0,500 W:0,895 – watt - amper grafiği

Şekil 6.3 de gördüğümüz ise watt değerimizin zamana bağlı olan değişim grafiğidir. Bu süreçte Watt değerimiz nem sıcaklığının artış oranına bağlı olarak artmaya devam etmektedir.



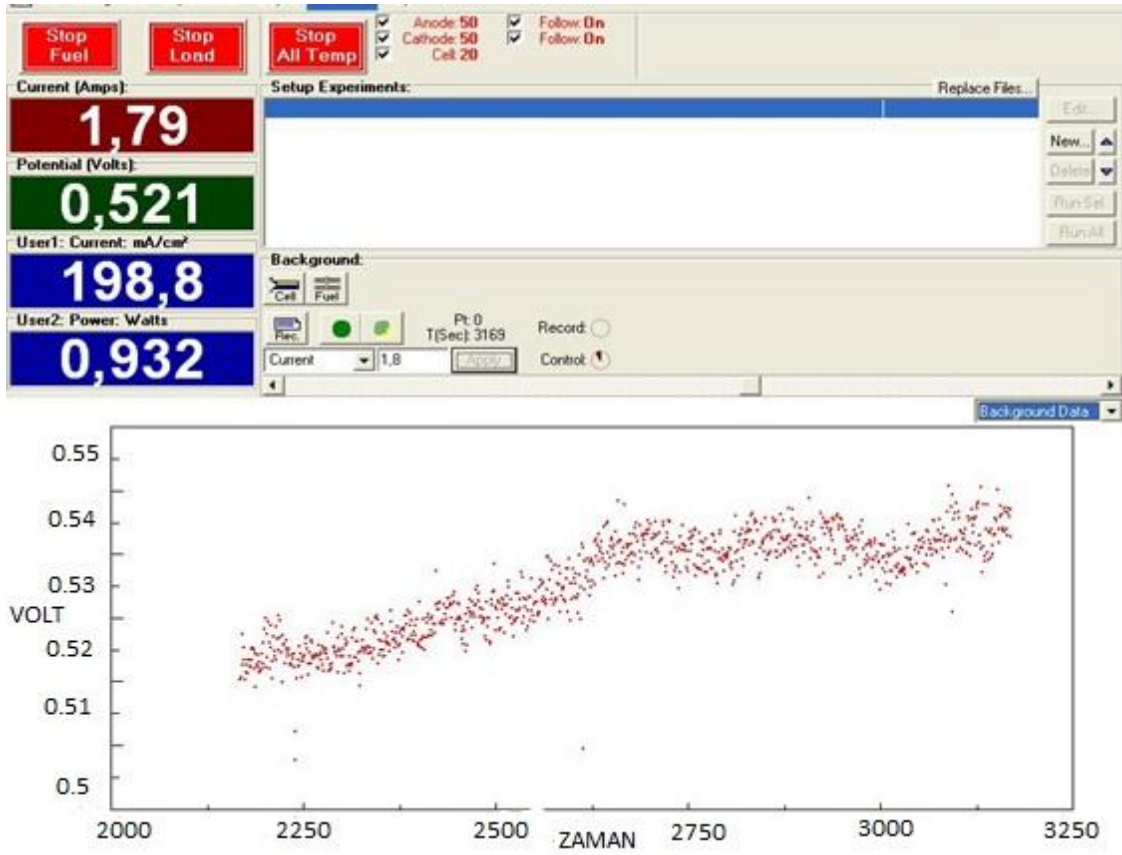
Şekil 6.3. Fuel Cell 3: Nem:%35 iken V:0,492 W:0,884 – watt – zaman grafiği

Şekil 6.4 grafiğimizde ise volt değerimizin zaman bağı ve nem değerimizin % 50 olduğu andaki alınan grafiğimizdir.



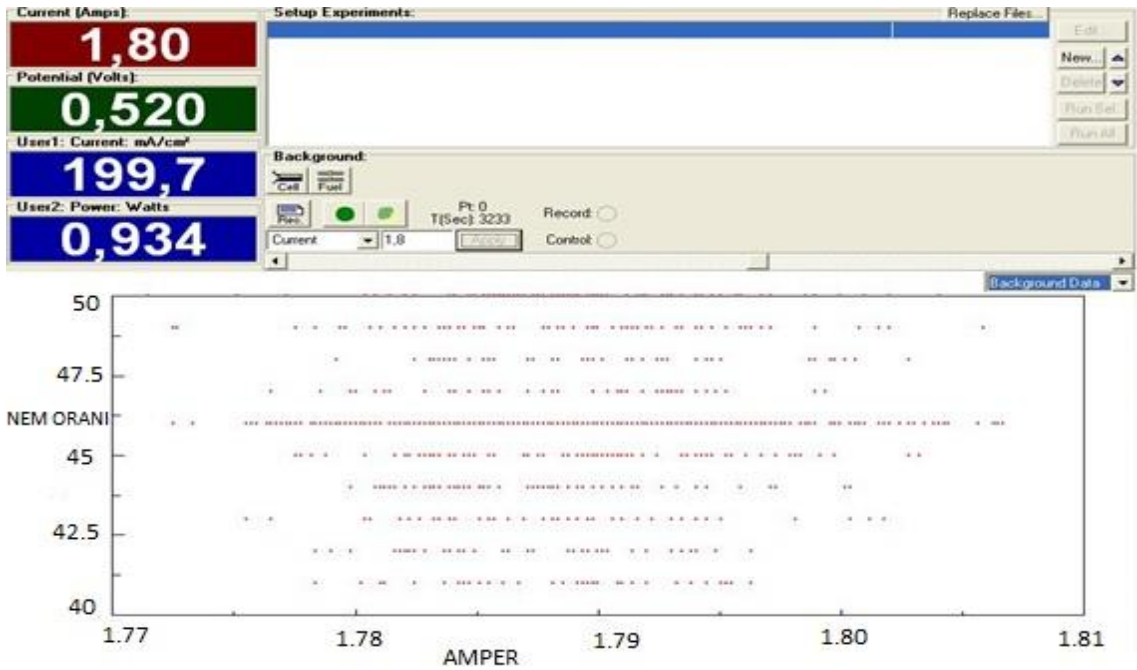
Şekil 6.4. Fuel Cell 3: Nem:%50 iken V:0,520 W:0,932 – volt – zaman grafiği

Şekil 6.5 grafiğimizde ise nem değerimizin % 50 de sabit olduğu andaki, zamana bağı değişimi gösterilmiş, buradan da anlaşılacağı üzere volt değerimizin belirli bir aralığı kadar gelip orada sabit bir şekilde devam ettiği gözlenmiştir ve bu gözlem bizim yaptığımız deneyin aslında en önemli bulgumuz olmuştur. Çünkü volt değerimizin bir noktaya kadar çıkıp o noktada inişli çıkışlı ancak genel bir bakışla sabit bir şekilde ilerlemesini görülmektedir. Daha detaylı bir şekilde diğer grafiklerde açıklanmaktadır.



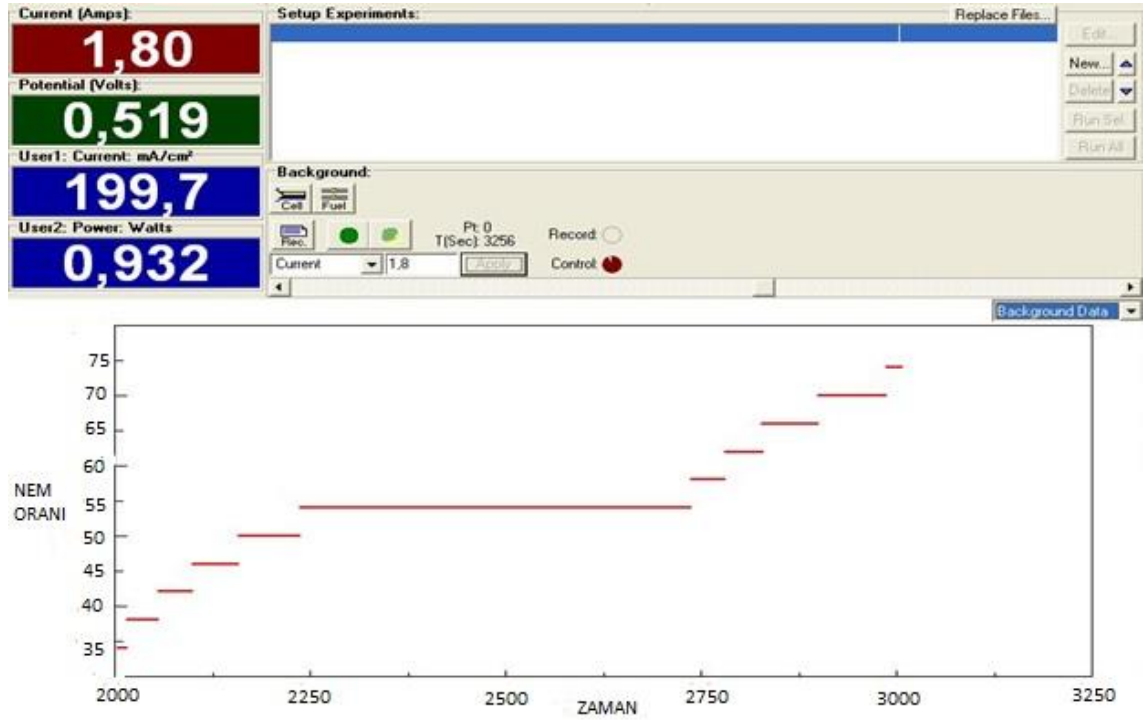
Şekil 6.5. Fuel Cell 3: Nem:%50 iken V:0,521 W:0,932 – volt – zaman grafiği

Şekil 6.6’da ise Nem – Akım grafiği görülmekte olup ve nem değerinin yükselişi ile beraber akım değerinin artışı görülmektedir. Buna başlı olarak volt ve watt değerlerimizin artışına neden olmaktadır.



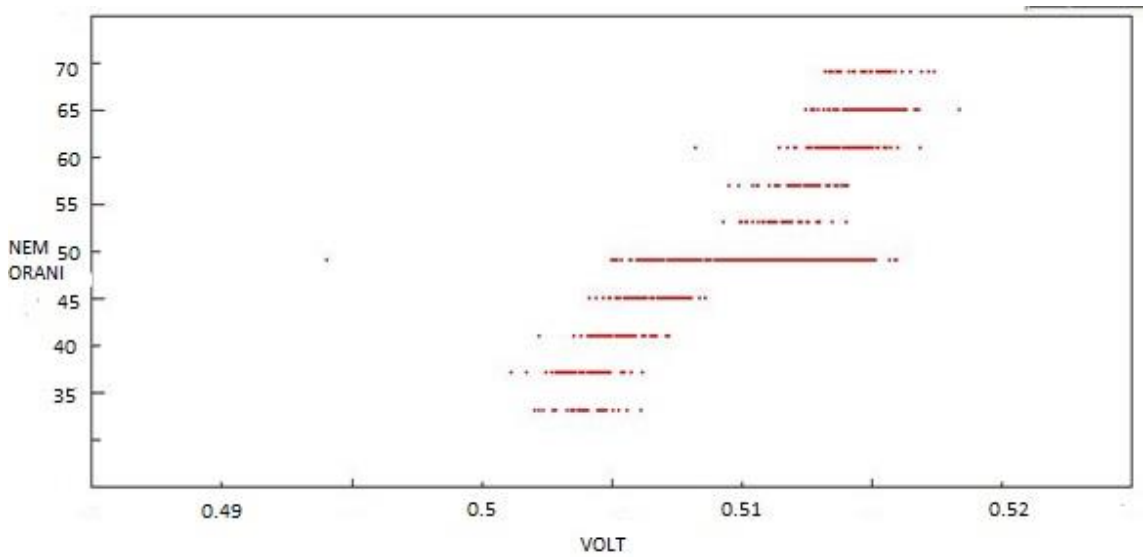
Şekil 6.6. Fuel Cell 3: Nem:%50 iken V:0,520 W:0,934 – nem – akım grafiği

Şekil 6.7 grafiğimizde ise nem değerimizin zaman bağlı değişimi görülmektedir.



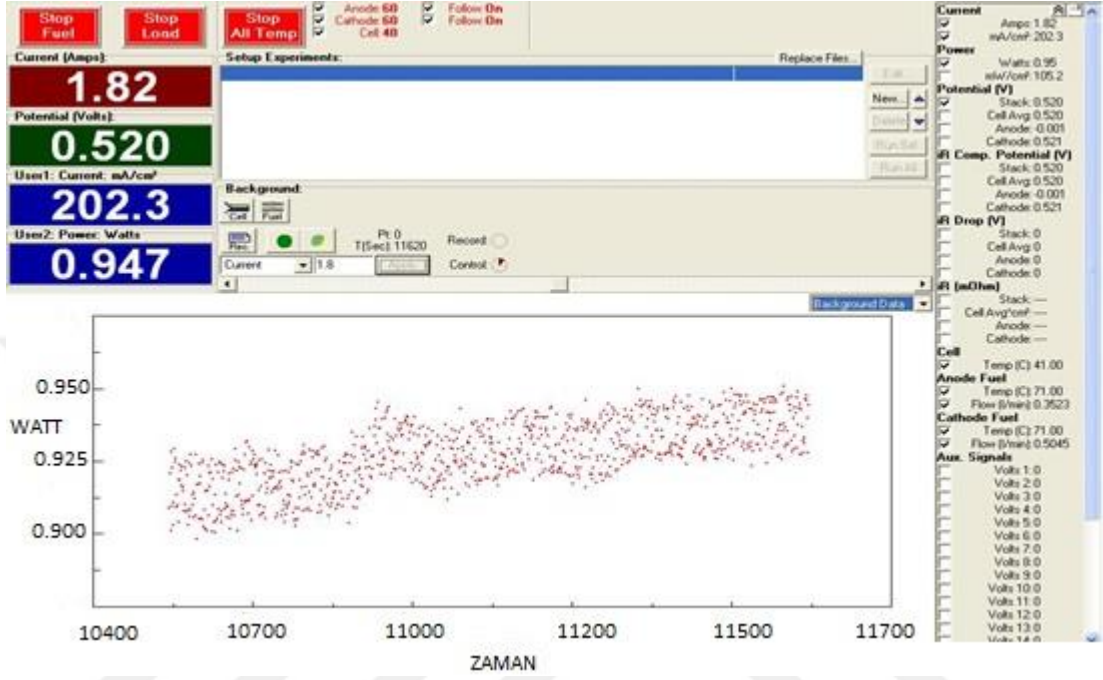
Şekil 6.7. Fuel Cell 3: Nem:%50 iken V:0,519 W:0,932 – nem – zaman grafiği

Şekil 6.8 de ise Nem değerimizin Voltaj değerimizle olan grafiğini görmekteyiz. Burada nem değerlerimiz % 45 – 55 aralığında bir değişimde olup volt değerlerimiz ise 0.5 ve 0.530 değerleri arasında gidip gelmektedir.

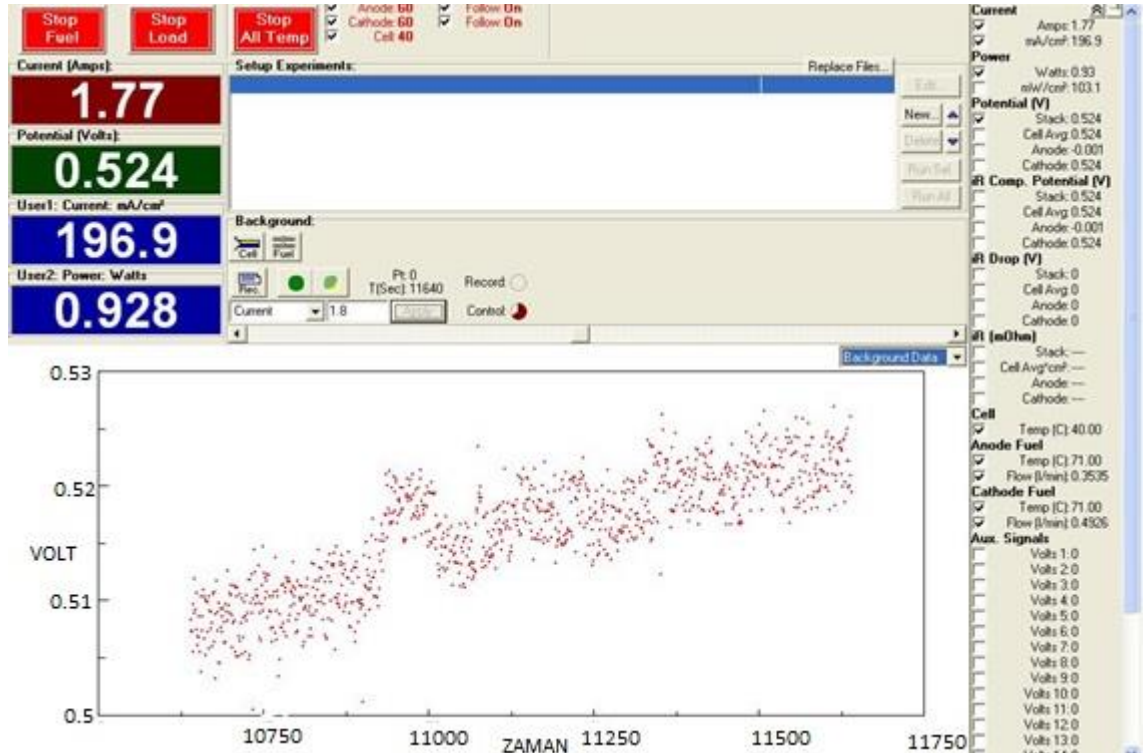


Şekil 6.8. Fuel Cell 3: Nem:%50 iken V:0,519 W:0,936 – volt – nem grafiği

Şekil 6.9 ve 6.10 da sağ taraftaki değerlerde görüldüğü üzere nominal hidrojen ve oksijen değerlerimizin olduğu görülmekte ve buna binaen maksimum nem değerimizle yani %70 ile başlangıç değerimizin olduğu %30 arasında olan bir grafiğimizin sonucuyla karşı karşıyayız. Burada ki en önemli olay watt değerimizin bir nevi volt değerimizin bir değere kadar çıkıp oradan sonra daha çok çıkmamasını görüyoruz.

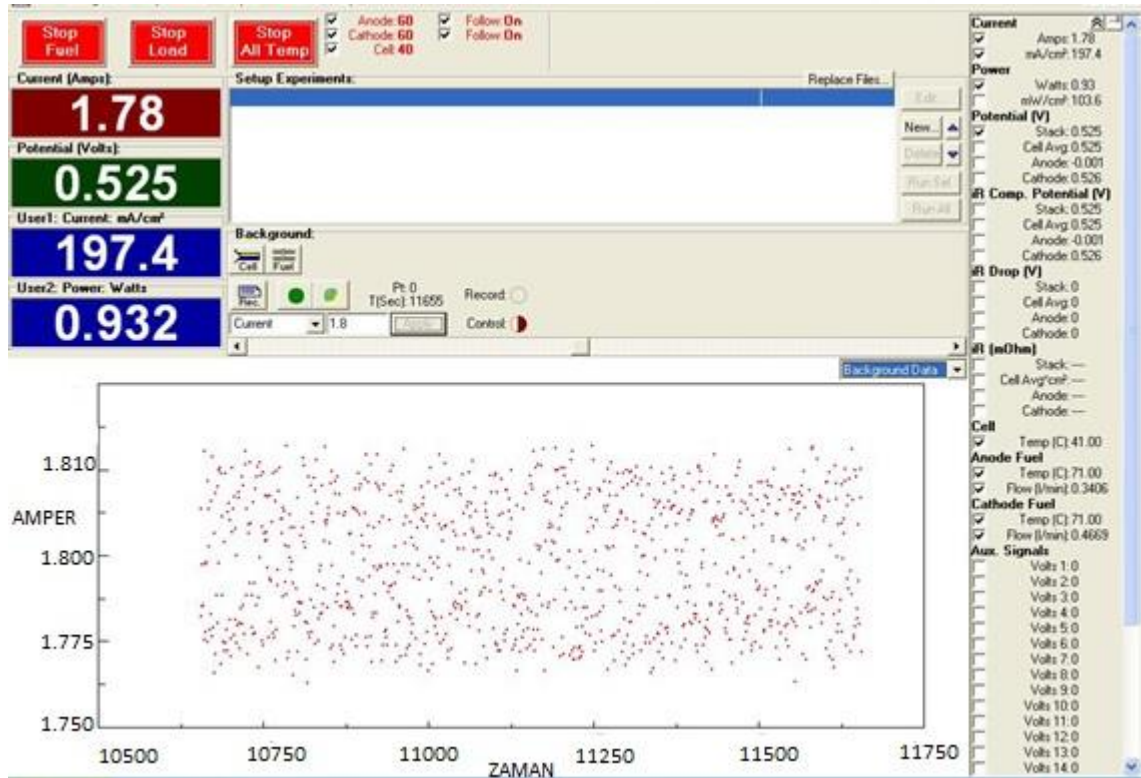


Şekil 6.9. Fuel Cell 3: Nem:%70 iken V:0,520 W:0,947 – watt – zaman grafiği

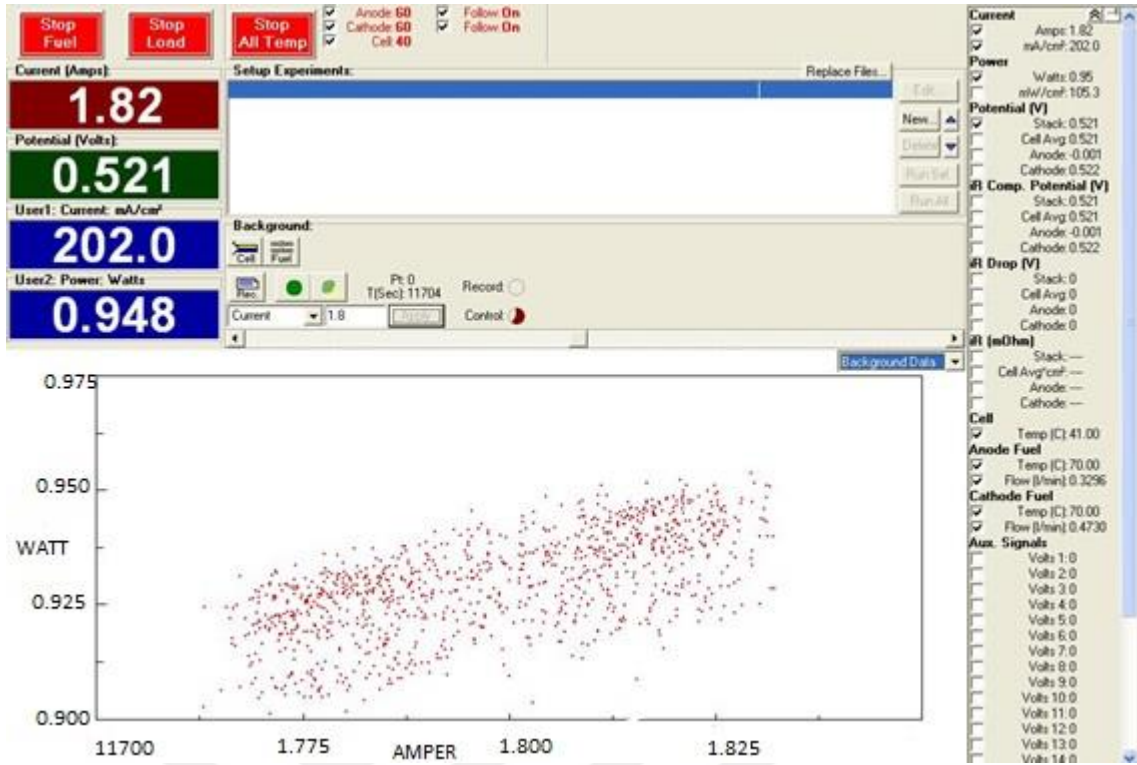


Şekil 6.10. Fuel Cell 3: Nem:%70 iken V:0,524 W:0,928 – volt – zaman grafiği

Şekil 6.11 ve 6.12 Fuel Cell 3 programında elde ettiğimiz son grafikleri görüyoruz. Bu grafiklerde Akım – Zaman ve Akım – Watt grafikleridir. Görüldüğü üzere yakıt sıcaklığımız 40 C^o, Oksijen debimiz 0,5 (l/min), Hidrojen debimiz 0,3 (l/min) olduğu görülmektedir. Voltaj değerimizin düştüğü ve buna binaen ona bağlı olan Watt değerimizinde düştüğünü görüyoruz. Son grafiğe kadar gelen süreçte tüm dalgalanmaları bu grafiklerde görmekteyiz. Maksimum değerine çıkıp inip sonra tekrar çıkıp ve sabite bağladığını yani nem değerini %60 en yüksek güç değerimizi alıyoruz. Bu değerlerimiz 0.514 Volt, 1.8 Amper ve 0.954 Watt olduğunu görüyoruz. Bu değerleri ilerki grafiklerde kendi oluşturduğumuz grafiklerle destekleyeceğiz.



Şekil 6.11. Fuel Cell 3: Nem: %70 iken V:0,525 W:0,932 – akım – zaman grafiği



Şekil 6.12. Fuel Cell 3: Nem:%70 iken V:0,521 W:0,948 – akım – watt grafiği

Tek hücreden oluşan PEM yakıt pilimizi deney sonuçlarına doğru geldiğimizde değerlerimizin tam olarak net sayılarla neler olduğunu tespit ettik. Bunları grafiksel olarak çıkardığımızda ise grafikte gördüğümüz değerleri elde ettik.

Nemin etkisi incelenirken:

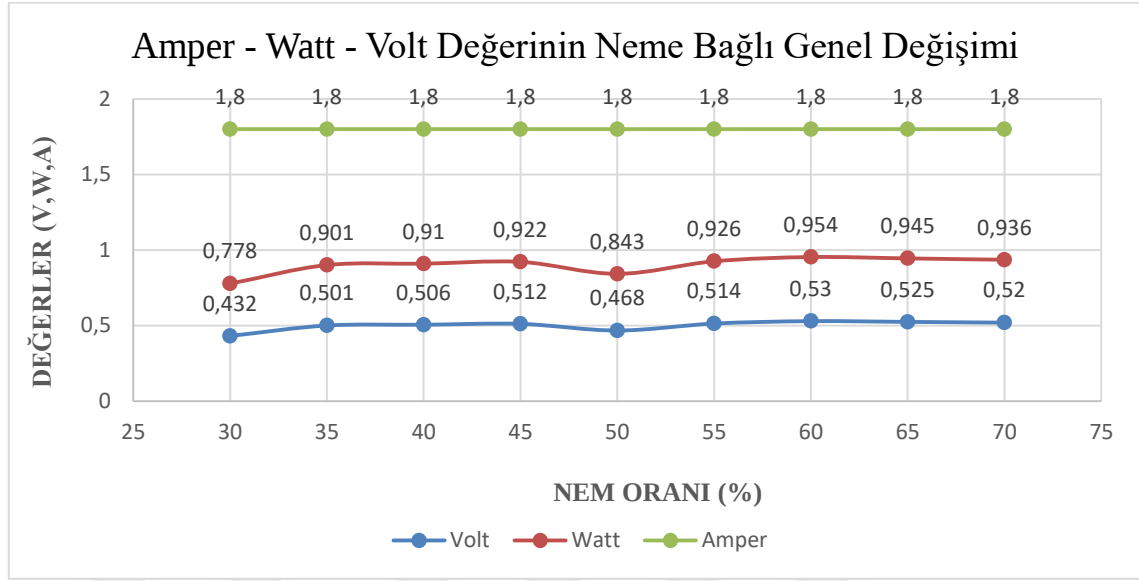
Anot giriş gaz debisi (H_2) : 0,300 l/min

Katot giriş gaz debisi (O_2) : 0,580 l/min

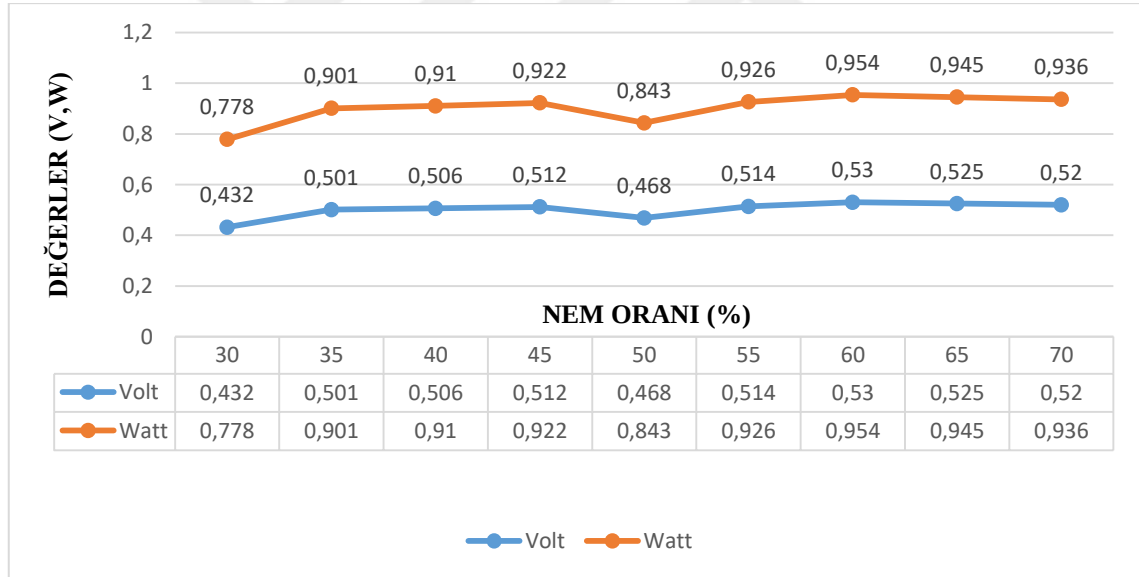
Amper: 1.8 A değerlerinde sabit tutulmuştur.

Watt, volt ve nem değerlerimizin kademe kademe artırınca ise sayısal net sonuçlarımızı elde ettik. % 30 'de 0,432 V – 0,778 W olduğunu görmekteyiz. % 35 ' de ise 0,501 V – 0,901 W değerini almaktayız burada yakıt pilimizin kararlı hale gelip veriminin bir anda yükselmesini görmekteyiz. Bu bizim için en önemli anekdot olmaktadır. Çünkü yaptığımız deney esnasında 24 saat çalıştırıp kararlı hale getirmek için uğraştığımız yakıt pilimizin bir anda verim vermeye başlaması doğru bir iş yaptığımızın göstergesi olduğunu görmüş bulunmaktayız. % 35 ve %40 arasında sabit bir şekilde ilerleme almaktayız. %45 de ise 0,922 V – 0,512 W değerlerini almış bulunmaktayız bu tekrar bir artışa çıktığımızın göstergesi oluyor. Ancak %50 bir anda hafif düşüş

gözlemlemekteyiz bu yakıt hücremizin diğer artış için zıplama noktası gibi bir noktayı işaret ediyor ve bundan sonraki artışımız nominal değerimize bir tık daha yaklaşıyor.



Şekil 6.13. PEM yakıt hücresi nem değişimine bağlı volt ve watt grafiği



Şekil 6.14. PEM yakıt hücresi nem değişimine bağlı volt, amper ve watt grafiği

%55 de ise sıçrama noktamızı görülmektedir. Membranlar arasındaki yoğunlaşma sonucu biriken su tükenmek üzere olduğundan yakıt hücresi tam verimle çalışmaya başlamaktadır. Bu nem oranında değerlerimiz 0,514 V – 0,926 W olmaktadır. Bu nem oranından sonra en iyi verim aldığımız nominal değerimiz Şekil 6.14’te görülmektedir. Bugüne kadarki aldığımız en iyi verim değerini %60’ta almaktayız. Bu bize hücre içerisindeki suyun tamamen tükendiğini ve tam verim aldığımızı göstermektedir. Bu noktadaki değerlerimiz 0,530 V – 0,954 W olmaktadır. %60 ‘den sonra aldığımız

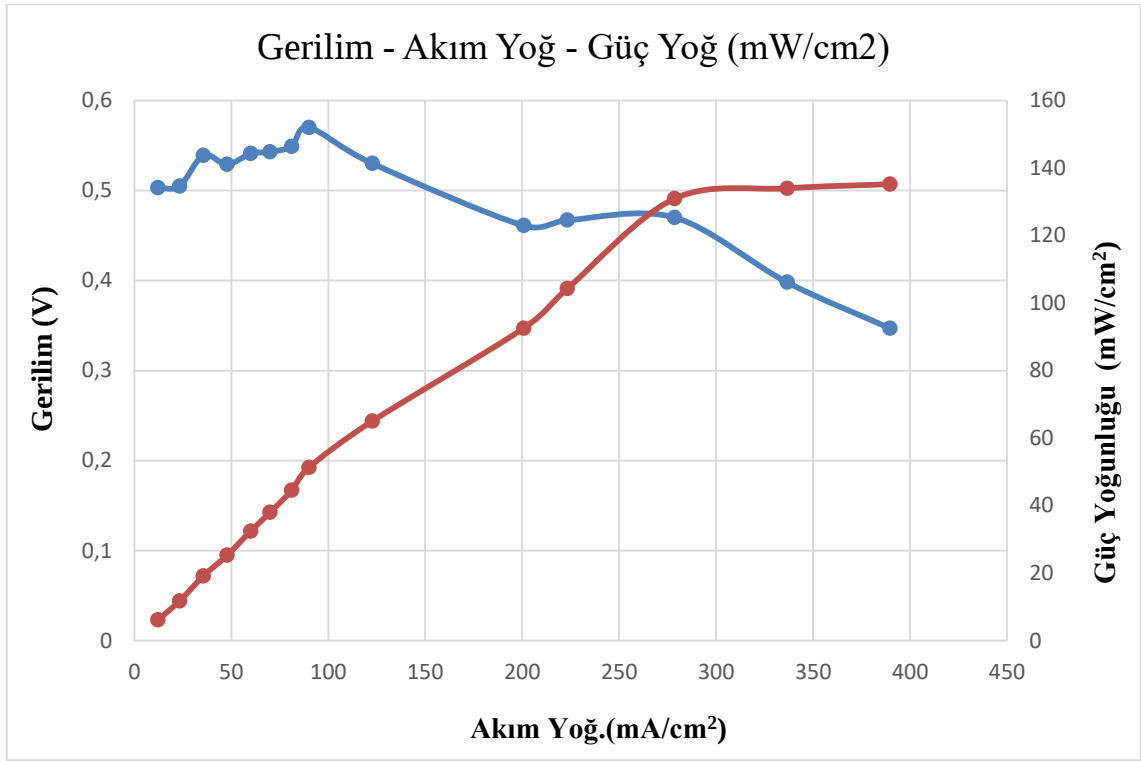
değerler % 65 ve %70 değerleridir. % 65'deki değerler 0,525 V – 0,945 W olmaktadır. %75'de ki değerler ise 0,52 V – 0,936 W olmaktadır. Ancak bu değerler de gördüğümüz şey şudur ki, hücrenin sabite döndüğünü stabil bir şekilde çalıştığını ve bundan sonraki ekleme yaptığımız hiç bir nem oranında büyük bir değişim olmayacağı görülmektedir.

Son olarak ise Çizelge 6.1 de ve Şekil 6.14 de aldığımız verilere göre cm^2 üzerine düşen volt, amper ve watt değerlerini görmekteyiz.

Çizelge 6.1. PEM yakıt hücresi nem değişimine bağlı cm^2 üzerine düşen volt, amper ve watt değerleri

Gerilim (V)	Akım (Amp)	Güç (W)	mA/cm^2	Gerilim (V)	W/cm^2
0,503	0,11	0,05533	12,22222	0,503	6,147778
0,505	0,21	0,10605	23,33333	0,505	11,78333
0,539	0,32	0,17248	35,55556	0,539	19,16444
0,529	0,43	0,22747	47,77778	0,529	25,27444
0,541	0,54	0,29214	60	0,541	32,46
0,543	0,63	0,34209	70	0,543	38,01
0,549	0,73	0,40077	81,11111	0,549	44,53
0,57	0,81	0,4617	90	0,57	51,3
0,53	1,105	0,58565	122,7778	0,53	65,07222
0,461	1,807	0,833027	200,7778	0,461	92,55856
0,467	2,01	0,93867	223,3333	0,467	104,2967
0,47	2,507	1,17829	278,5556	0,47	130,9211
0,398	3,03	1,20594	336,6667	0,398	133,9933
0,347	3,507	1,216929	389,6667	0,347	135,2143

Sonuç olarak Şekil 6.14. de nemlendirme oranına bağlı olarak volt değerimiz düştükçe elde edilen akım yoğunluğu artarken, yine polarizasyon eğrimizden görüldüğü nemlendirmenin düşük olmasından kaynaklanan performans düşüklüğü gözlemleniyor. Polarizasyon eğrimizde bağımsız parametre olarak pil sıcaklığı, nemlendirme oranı, katot ve anot yakıt debisi değerleri seçilmiştir. Bunlara karşın yakıt pilinden çekilen maksimum akım bağımlı değişken (cevap) olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak; Nemlendirme oranının - Pil sıcaklığının güç yoğunluğuna etkisi incelenmiştir ve polarizasyon eğrisi olarak sonuçlandırılmıştır.



Şekil 6.14. PEM yakıt hücresinde nem değişimine bağlı cm² üzerine volt, amper ve watt Polarizasyon eğrisi

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yaptığımız çalışmalar neticesinde PEM yakıt pillerinde nem parametresinin üretilen elektriğin performansına etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada Batman Üniversitesi ve TÜBİTAK Yenilenebilir Enerji laboratuvarlarında yapılan ortak deneyler sonucunda yakıt hücresini kararlı hale getirmek için belirli sürelerde art arda testler yapılmıştır. Bu testler sonucunda 5 yakıt hücresi membranı hücre içerisinde su birikmesinden yani yüksek nemlilik dolayısıyla delindi ve kullanılamaz hale gelindi. Bununla ilgili detaylı şekil ve resimler ekte bulunmaktadır. Bu aşamadan sonra deneyler tek hücreli PEM yakıt pili ile TÜBİTAK Yenilenebilir Enerji Laboratuvarında sürdürülmüştür.

Deneyler esnasında sabit tuttuğumuz anot giriş gaz debisi (H_2) : 0,300 l/min, katot giriş gaz debisi (O_2) : 0,580 l/min Amper: 1.8 A değerlerinde sabit tutulduktan sonra nem oranları sırasıyla %30 - %35 - %40 - %45 - %50 - %55- %60 - %65 - %70 değerlerine kademeli bir şekilde yükseltilmiştir. Bu aldığımız değerlerde watt sonuçlarından, ilk önce iyi bir 0,123 W'lık bir artıştan sonra bir sabitlik ve sonrasında 0,021 W'lık bir artış tespit edilmiştir. Daha ve sonrasında bir sıçrama noktasında düşüş gerçekleşmiştir. En yüksek aldığımız verim % 60 da 0,954 Watt gerçekleşmiştir. Bu değer yapılan deneyler esnasından aldığımız en yüksek elektriksel güç değeridir. Ancak plakalar yani membran içerisindeki su oluşumunu önlenmesi takdirde bu verimin artacağı düşünülmektedir. Çünkü su oluşumu meydana geldikçe tüm hücreler birbirine bağlı olduğundan dolayı herhangi bir hücredeki aksaklık tüm yakıt hücresini etkilemekte ve bu da watt ve volt değerlerini alınmaya engel olmaktadır. İstenilen verimin elde edilmesi için öncelikte güçlü membranlarla çalışılmalı, su oluşumu engellemeli ve bu öneriler dikkate alınırsa yakıt pilinin enerji verimini daha da yükselteceği ve deneylerde ciddi katkılar vereceği düşünülmektedir.

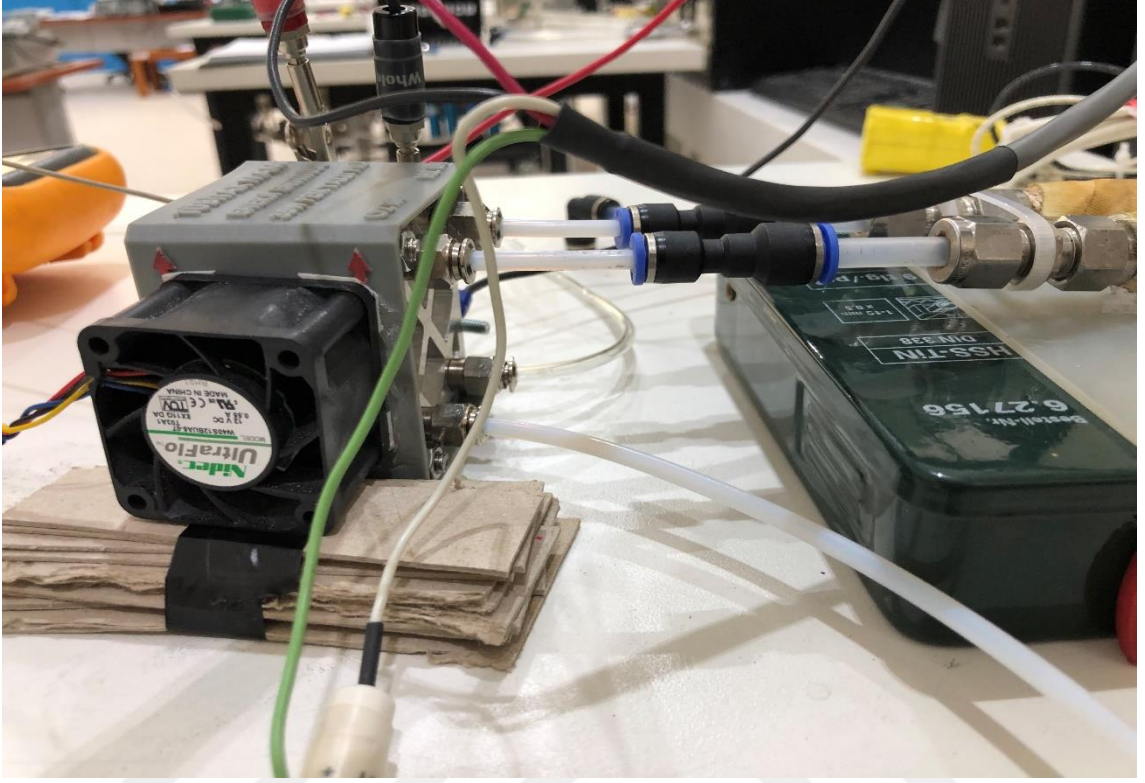
KAYNAKLAR

- Akfıdan, T., 2010, Bir hibrit (yakıt pilli & güneş pilli) enerjili aracın modellenmesi, simülasyonu ve prototip uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ateş, Y., 2008, Hibrit Yakıt Hücresi/Ultra-Kapasitörlü Taşıt Güç Sisteminin Yapay Sinir Ağları İle Kontrolü Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Almak, O., OUR A., Karakaya, Ç., Ertürk, M., Güneş İ., 2008, Yüksek basınca dayanıklı kompozit hidrojen tankı imalatının incelenmesi 5 VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008 17-19 Aralık, İstanbul.
- Aydın, M., 2007, Pem Yakıt Pilinin İki Boyutlu Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 94s
- Akbulut, B., 2007, Yakıt pilli hibrit santraller, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Barbir, F., 2005, Barbir F., 2005, "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", Elsevier Academic Press, USA, ISBN-13:978-0-12-078142-3.
- Biliroğlu, Ali Ö., 2009, Seri hibrit elektrikli araçların modellenmesi ve kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bıykoğlu, A., 2003, "Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri Bugünkü Durumu", G.U Journal of Science , 16(3):523-542.
- Bilen, G., 2015, Keskin elektroliz yöntemi ile 20 m³/h kapasiteli hidrojen üreticinin tasarımı ve gözenekli elektrot malzemelerinin parametrelere etkisinin araştırılması, Makale.
- Chinannai, M. F., Lee, J., Ju, H., 2019, Numerical study for diagnosing various malfunctioning modes in PEM fuel cell system, ScienceDirect.
- Carcadea, E., Varlam, M., Marinoiu, A., Raceanu, M., Ismail, M.S., Ingham, D.B., 2019, Influence of catalyst structure on PEM fuel cell performance e A numerical investigation, ScienceDirect
- Choi, M., 2017, Performance increase for an open-cathode PEM fuel cell with humidity and temperature control, Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea
- Çelik, C., 2006, Doğrudan sodyum bor hidrüllü yakıt pilinde proses parametrelerinin verim üzerine etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

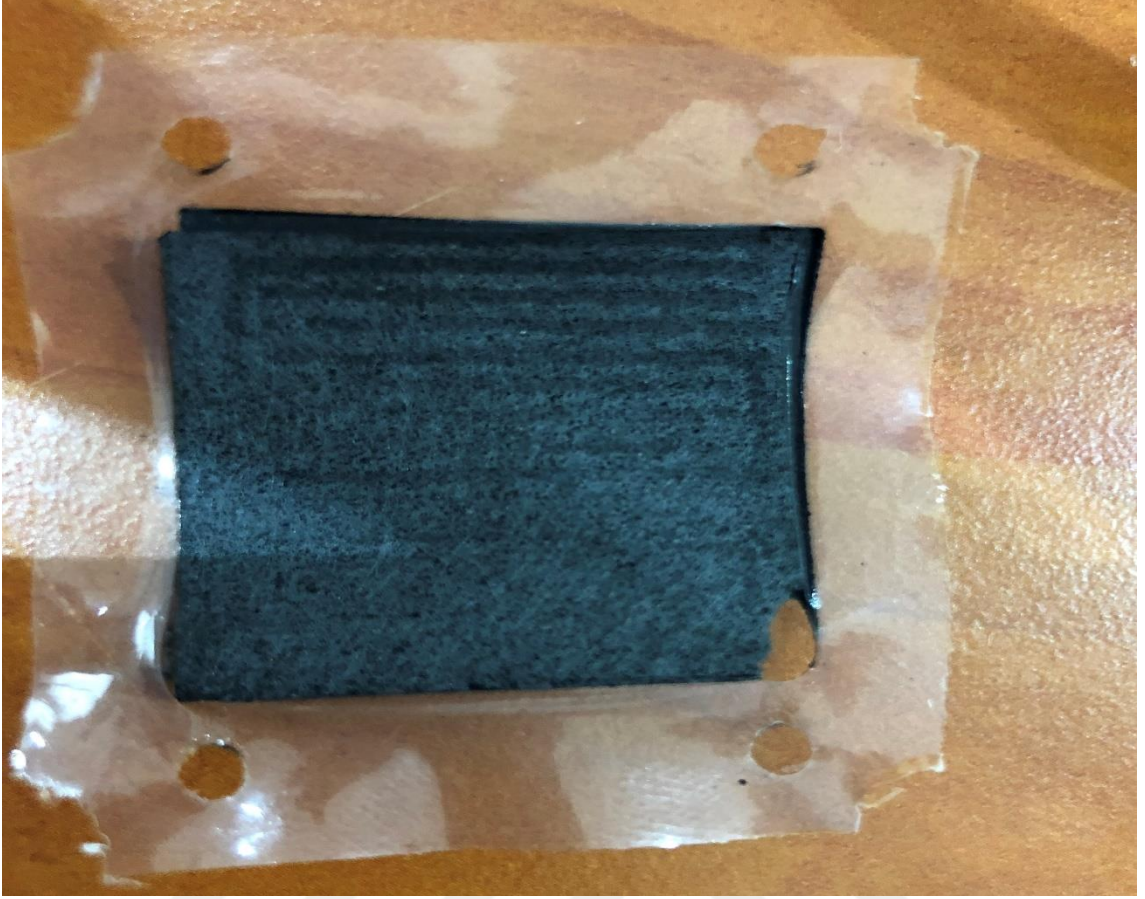
- Doğu, İ., 2014, Güneş enerjisi destekli PEM elektrolizlerinde hidrojen üretiminin deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Efendioğlu, D., 2013, PEM yakıt hücresi performansının deney tasarımı kullanılarak optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Eker, E., 2012, PEM tipi yakıt hücrelerinde ısı ve su yönetiminin modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Gümüšoğlu, T., 2012, PEM Yakıt hücresi performansını etkileyen parametreleri optimasyonu, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- İçingür, Y., 2011, Bir polimer elektrolit membran yakıt pilinde kullanılmak üzere gaz akış plakaları tasarımı ve denenmesi, Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi, Cilt:14, s 31-34.
- İ.Türe, E., 2006, Fotoelektroliz yoluyla hidrojen üretimi, Türkiye 10. enerji kongresi, 417-421.
- Kahraman, H., 2014, Sıkıştırma basıncının PEM yakıt pili performansına etkisi, Makale, Sakarya Üniversitesi, 1008-1016.
- Keskin, F., 2014, Yakıt pilli-bataryalı hibrid bir elektrikli araçta enerji yönetiminin sağlanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kireç, L., 2009, Taşıtlar için alternatif enerji sistemi olan polimer elektrolit membrann yakıt pili yapımı ve parametrik olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kaplan, R., 2008, İmal edilen ve ticari PEM tipi yakıt hücrelerinin performanslarının kıyaslanması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 55 s.
- Muhtarlıoğlu, T. K., 2012, Güneş Enerjisini Elektrik Enerjisine Çeviren Çevre Dostu Sistemin Tasarlanması , Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Oral, E., 2005, Hidrojen Yakıtlı Proton Dönüşüm Zarlı Yakıt Pili Ve Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Obut, S., 2010, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile proton değişim membranlı yakıt hücresinin modellenmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Öğüt, E., 2005, Sülfolanmış Polistiren Membran Sentezi Ve Karakterizasyonu Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 112 s.
- Özil, E., Şişbot, S., Özpınar A., Olgun B., 2013 , Elektrik Enerjisi Teknolojileri ve Enerji Verimliliği, Kitap , İstanbul.

- Şenaktaş, B., 2005, Hidrojen enerjisi, üretimi ve uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Sarıdemir, S., 2003, Gelecekte Taşıtlarda Yaygın Olarak Kullanılması Düşünülen PEM Yakıt Pilleri İçin Membran Geliştirilmesi Ve Denenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 116 s.
- Silver, G., 2008, Pem Yakıt Hücresi Katodunda Kullanılmak Üzere Platin Bazlı Üçlü Katalizörlerin Sentezi, Karakterizasyonu Ve Elektrokatalitik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Ulusoy, I., 2012, Yakıt hücresi sisteminde elektrokimyasal ve mikrobiyolojik yaklaşım ile elektron transfer mekanizmasının incelenmesi, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.
- Yıldızbilir, F., 2006, "Yakıt Pili İle Elektrik Enerjisi Üretimi", Yüksek Lisans Tezi , Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yılmaz Ulu, E., 2010, Güneş-Hidrojen hibrit enerji sisteminin deneysel ve teorik enerji, ekserji ve elektromanyetik analizi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Yubai, L., Zhifu, Z., Xianglei, L., Wei-Tao, W., 2019, Modeling of PEM fuel cell with thin MEA under low humidity operating condition, ScienceDirect.
- Wang,L., Husar, A., Zhou, T., Liu, H., 2003, A parametric study of PEM fuel cell performances, International Journal of Hydrogen Energy, 28, pp. 1263-1272.

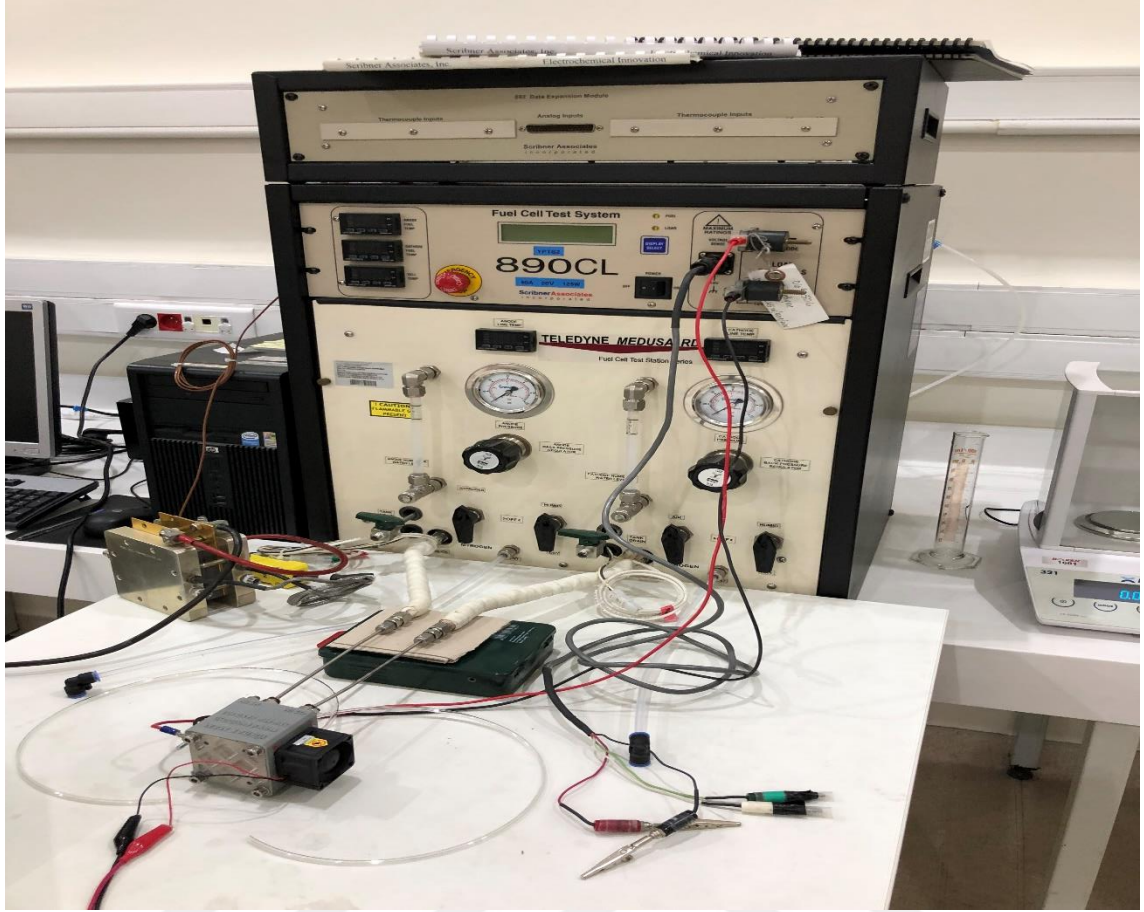
EKLER



Ek 1. Yakıt pili deney sistemi



Ek 2. Sistemde kullanılmış delinmiş membran



Ek 3. Yakıt pili deney sistemi



Ek 4. Membran ve Plak

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Berat Fırat Dalğıç
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : 10/09/1990
Telefon : 05063616373
Faks : -
e-mail : bfiratdalgic@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Batman Anadolu Lisesi	2008
Üniversite	: Mersin Üniversitesi – Makine Mühendisliği	2014

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2018	Ömer Yusuf OSGB	Makine Mühendisi
2017	Esssante	Makine Mühendisi
2017	Tigerled	Makine Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Bakım Onarım, Güneş Otomobilleri, Elektrikli Otomobiller

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

Dalğıç B. F. , Aydın S., Yılmaz A., (2018) Güneş Arabası Tasarımının Performansa Etkisi Effect Of Solar Car Design On Performance International Engineering and Technology Symposium, Batman/Türkiye.

Yılmaz, A., Aydın, S., Yakut, R., **Dalğıç, B.F.** (2019) The Effects Of Solar Car Design On Performance, Engineering Sciences, 14(1), 46-54.