



T.C.

NIĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SALINIMLI AKIŞLARIN PEM YAKIT HÜCRESİ
PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

VURALCAN HAMMUTOĞLU

Temmuz 2019

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SALINIMLI AKIŞLARIN PEM YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSI ÜZERİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

VURALCAN HAMMUTOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

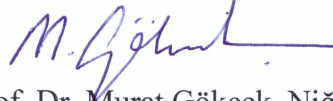
Prof. Dr. Yahya Erkan AKANSU

Temmuz 2019

Vuralcan HAMMUTOĞLU tarafından Prof. Dr. Yahya Erkan AKANSU danışmanlığında hazırlanan “Salınımlı Akışların PEM Yakıt Hücreleri Performansı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Başkan : Prof. Dr. Yahya Erkan AKANSU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye : Prof. Dr. Murat Gökçek, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU, Karadeniz Teknik Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Vuralcan Hammutoğlu

ÖZET

SALINIMLI AKIŞLARIN PEM YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

HAMMUTOĞLU, Vuralcan
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman :Prof. Dr. Yahya Erkan AKANSU

Temmuz 2019

PEM yakıt pilleri sistemlerinin kullanımındaki en büyük engellerden biri kanallarındaki su birikimi ve sonucunda doğurduğu performans düşüştür. Bu sistemlerin daha verimli çalışabilmesi için su birikimini azaltmak amacıyla birçok araştırma yapılmaktadır. Kanal tasarımı, gaz nemlendirme oranı, sıcaklık değişiklikleri ve bu çalışmanın da konu aldığı giriş gazlarının akış tipi araştırma dalları arasındadır. Bu çalışmada PEM yakıt hücreleri katot kısmına verilen standart debilerde ikmal edilen hava yerine sentetik jet aktuatörleri kullanılarak elde edilen salınlı akışların hücre performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. Literatürdeki yer alan piston-silindir, hoparlör ve piezoelektrik aktuatörlü çalışmalar ile bu tez çalışmasının da parçası olduğu plazma aktuatörünün incelendiği proje çalışmasının sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu konuda literatürde yapılan araştırmalarda yakıt hücresinin nominal çalışma debilerinden daha düşük değerlerinde kayda değer etkilerinin olduğu ifade edilmektedir. Plazma aktuatörlü salınlı akış durumunda nominal stokiyometri oranlarında güç yoğunluğunda önemli bir etki oluşmazken daha düşük oranlarında %12'ye varan iyileşmeler görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: PEM yakıt pili, plazma sentetik jet, salınlı akış

SUMMARY

STUDY OF THE EFFECTS OF OSCILLATING FLOW ON PEM FUEL CELL PERFORMANCE

HAMMUTOĞLU, Vuralcan
Niğde Ömer Halisdemir University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Superviser :Prof. Dr. Yahya Erkan AKANSU

July 2019

One of the biggest obstacles in PEM fuel cell systems is the flooding of channels and the performance drop it causes as a result. There are a lot of studies to improve the efficiency of these systems by reducing the flooding. Channel design, gas moisturing ratios, temperature differences and the subject of this study gas flow types are among the research subjects. In this study, the effects on performance of the cell was investigated by changing the standart flow rates in the cathode channel to plasma synthetic jet actuator induced oscillating flow type. The results of the studies with piston-cylinder, woofer, piezoelectric and the subject of this study the plasma actuators were analyzed and compared. Studies indicate that worthy results were taken when the fuel cell was operated below the nominal flow rates. In the state of plasma actuated oscillating flow with nominal stoichiometry rates, there was no significant change in power density, however at lower ratios 12% increase was observed.

Keywords: PEM fuel cell, Plasma synthetic jet, oscillating flow

ÖN SÖZ

Yakıt pilli sistemlerinin kesintisiz ve hatasız çalışmasını sağlayan en önemli koşullardan biri anot ve katot girişlerinden gaz akışının istenilen debilerde akmasını sağlamaktadır. Hidrojen üretimi ve depolanmasındaki büyük sıkıntılarından kurtulmak amacıyla, yakıt hücrelerinin hidrojen tüketimini azaltma çalışmaları yapılmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmaların önemli bir kısmı da katot hava nüfuzunu daha verimli hale getirerek, su birikimini azaltmak ve sonuç olarak anot kısmına verilen hidrojen gazının hücre aktif alanı boyunca düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamaktır. Bu etkiyi oluşturmak için kullanılan yöntemlerden biride katot akışının salınımlı hale getirilmesidir. Salınımlı akış kullanımı ayrıca havanın gaz difüzyon tabakasına geçişine de yardımcı olmaktadır. Bu amaçla literatürde kullanılan piston-silindir, hoparlör ve piezoelektrik tabanlı aktuatörlerinden farklı olarak, bu çalışmada plazma sentetik jet aktuatörleri ile salınımlı akışın etkileri üzerinde durulmuştur.

Bu tez çalışması, 213M179 numaralı “PEM Yakıt Pillerinde Plazma Sentetik Jet Kullanılarak Yakıt Pili Performansının İyileştirilmesi” isimli TÜBİTAK projesinden üretilmiş olup, bursiyer öğrencisi olarak çalıştığım bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde finansal destek sağlayan TÜBİTAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın yürütülmesi esnasında bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Yahya Erkan AKANSU’ ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, sadece öğrenim hayatımda değil, tüm hayatım boyunca maddi ve manevi olarak beni destekleyen aileme ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ	xii
SİMGE VE KISALTMALAR	xiii
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Yakıt Pili	2
1.2 Yakıt Pili Çeşitleri	5
1.2.1 Hidrojen polimer elektrolit yakıt pili	6
1.2.2 Doğrudan methanol yakıt pili	7
1.2.3 Katı oksik yakıt pilleri	7
1.2.4 Erimiş karbonat yakıt pilleri	7
1.2.5 Fosforik asit yakıt pilleri	7
1.2.6 Alkalin yakıt pilleri	8
1.2.7 Diğer yakıt pilleri	8
1.3 Polimer Elektrolit Yakıt Pilleri	8
1.3.1 Membran	9
1.3.2 Elektrot	10
1.3.3 Gaz difüzyon tabakası	12
1.4 Sentetik Jet	12
1.4.1 Piston tipi sentetik jet aktüatörü	13
1.4.2 Hoparlöt tipi sentetik jet aktüatörü	13
1.4.3 Piezoelektrik tipi sentetik jet aktüatörü	14
1.4.4 Plazma sentetik jet aktüatörü	15
1.5 Salımlı Akış ile Akış Yapılarının Kontrolü	15
1.6 Tezin Amacı	1

BÖLÜM II SENTETİK JET AKTÜATÖRÜ KULLANARAK OLUŞTURULAN	
SALINIMLI AKIŞLARIN YAKIT PİLLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.	18
2.1 Piston-Silindir Mekanizmalı Sentetik Jetin Yakıt Piline Uygulanması.....	18
2.2 Akustik Hoparlöt ile Üretilen Sentetik Jetin Yakıt Piline Uygulanması	23
2.3 Piezoelektrik Aktüatörleri Yakıt Piline Uygulanması	27
2.4 Plazma Sentetik Jetin Yakıt Piline Uygulanması	32
BÖLÜM III PLAZMA SENTETİK JETİN YAKIT PİLİNE UYGULANMASI.....	33
3.1 Deney Düzenegi.....	33
3.1.1 Plazma sentetik jet aktüatörü.....	34
3.1.2 PEM yakıt pili ve PSJ aktüatör bağlantı çeşitleri.....	36
3.2 Yakıt Pili Test Düzenegi	40
BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA	42
BÖLÜM V SONUÇLAR.....	50
KAYNAKLAR	52
ÖZ GEÇMİŞ	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Yakıt pili tipleri (Mench, 2008).....	6
Çizelge 2.1. Literatürde kullanılan yakıt pili sentetik jet uygulamaları.....	18
Çizelge 3.1. Farklı jet aktüatör başlıklarının boyutları (Seyhan, 2015).....	35
Çizelge 4.1. PEM yakıt pillerinin katot kısmında sentetik jetleri etkileri.....	49



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Suyun elektrolizi. Su elektrik akımı geçişi yardımıyla hidrojen-oksijene ayrılıyor (a) ve (b) küçük bir akım oluşuyor, oksijen ve hidrojen birleşiyor. (Larminie ve Dicks, 2003)	2
Şekil 1.2. Elektrot reaksiyonları ve asit elektrolitli yakıt pilinin yük akışı (Larminie ve Dicks, 2003)	4
Şekil 1.3. Yakıt pili ve stak şeması (Costamagna ve Srinivasan, 2001)	4
Şekil 1.4. Pem yakıt pili çalışma prensibi (Barbir, 2013)	9
Şekil 1.5. Üç faz bölgesi gösterimi (Bladergroen vd., 2012)	11
Şekil 1.6. Sentetik jet aktüatörü: (a) akışkan emme fazı, (b) akışkan üfleme fazı ve vorteks oluşumu (Mohseni ve Mittal, 2015)	13
Şekil 1.7. Piston-silindir mekanizmalı jet oluşturma mekanizması (Cater ve Soria, 2002)	14
Şekil 1.8. Hoparlör tipi sentetik jet aktüatörü (Rylatt ve O'Donovan, 2013)	14
Şekil 1.9. Plazma jet aktüatörü şeması ve devresi (Narayanaswamy vd., 2010)	15
Şekil 2.1. Choi vd. (2010a) araştırmasının deney düzeneği	19
Şekil 2.2. Choi vd. (2010b) araştırmasında kullanılan anot kör uç yakıt pili deney düzeneği	21
Şekil 2.3. Hwang vd. (2010) araştırmasındaki düzeneğin şeması	22
Şekil 2.4. Kim vd. (2008) araştırmasında kullandıkları deney düzeneği	24
Şekil 2.5. Han vd. (2012) araştırmasında kullanılan deney düzeneği	25
Şekil 2.6. Seo vd. (2014) araştırmasında kullanılan düzenek.....	28
Şekil 2.7. Seo vd. (2014) araştırmasında kullanılan yakıt pili ve sentetik jetin gösterimi	29
Şekil 2.8. Ma vd. (2013) araştırmasında kullanılan PZT stağın deney düzeneği	30
Şekil 2.9. Ma vd. (2017) araştırmasında kullanılan ikili hücrenin gösterimi	31
Şekil 2.10. Seyhan ve Akansu (2019) araştırmasının test düzeneği	32
Şekil 3.1. Plazma sentetik jet aktüatörü besleme sistemi (Akansu vd., 2017)	35
Şekil 3.2. Plazma sentetik jetin yakıt piline uygulanmasında kullanılan tüm sistemlerin gösterimi	40

Şekil 4.1. Farklı debilerde 40° C hücre sıcaklığında polarizasyon eğrileri (Akansu vd., 2017)	43
Şekil 4.2. Farklı debilerde 40° C hücre sıcaklığında güç-akım eğrileri (Akansu vd., 2017)	43
Şekil 4.3. Sabit 3.5 Ldk hava debisinde farklı hidrojen debilerinde polarizasyon eğrileri (Akansu vd., 2017)	44
Şekil 4.4. Sabit 3.5 Ldk hava debisinde farklı hidrojen debilerinde güç-akım eğrileri (Akansu vd., 2017)	44
Şekil 4.5. Plazma açık ve kapalıyken sabit debilerde ve farklı sıcaklıklarda polarizasyon eğrisi (Akansu vd., 2017)	45
Şekil 4.6. Plazma açık ve kapalıyken sabit debilerde ve farklı sıcaklıklarda güç-akım eğrisi	45
Şekil 4.7. Plazma açık ve kapalıyken sabit debilerde akım-zaman grafiği (Akansu vd., 2017)	46
Şekil 4.8. Aktüatörün açık ve kapalı olduğu durumlar için polarizasyon ve güç-akım eğrisi (Seyhan ve Akansu, 2019)	47
Şekil 4.9. Plazma sentetik jetin açılıp kapatıldığı (30 s kapalı-5 s açık- 5s kapalı-5 s açık- 30 s kapalı) akım-zaman gösterimi (Akansu vd., 2017)	48

FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. (a) Sentetik jet CAD gösterimi, (b) buji, (c) sentetik jet aktüatörü ve (d) aktüatörün yüksek voltaj transformatöre bağlanması (Akansu vd., 2017)	34
Fotoğraf 3.2. PEM yakıt pili parçaları; (a) gasketler ve membran, (b) tutucu plakalar, (c) akış kanalları ve (d) akım toplama plakaları (Akansu vd., 2017)	36
Fotoğraf 3.3. PEM yakıt pilinin montaj yapılmış hali	37
Fotoğraf 3.4. Plazma sentetik jetin yakıt piline akış kanalından bağlanmasının yan (a) ve önden (b) gösterimi	37
Fotoğraf 3.5. Plazma sentetik jetin yakıt piline Plektsiglas kanal ile uygulamasının üst (a), ön (b) ve yan gösterimi (c)	38
Fotoğraf 3.6. Plazma sentetik jetin yakıt piline katot tutucu plakasına entegre uygulamasının bağlanmadan öncesi(a), tutucu plakada (b) ve montaj edilmiş (c) gösterimi	39
Fotoğraf 3.7. Plazma sentetik jetin yakıt piline akış kanalından bağlanmasının yan (a) ve önden (b) gösterimi	39
Fotoğraf 3.8. Debi kontrolörü (a) ve tüm düzenek (b) (Akansu vd., 2017)	40

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler

Açıklama

μ	Mikron
A	Kesit alanı
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
geq	Gram karşılığı
λ	Su doyma oranı
d	Çap
Re	Reynolds sayısı
W_o	Womersley sayısı
V_{pp}	Pikten pike voltaj
A	Amper
W	Watt

Kısaltmalar

Açıklama

PSJA	Plazma Sentetik Jet Aktüatörü
MEA	Membrane Electrode Assembly (Membran elektrot birleşimi)
PEM	Proton Exchange Membrane (Proton değişim membranı)
KOYP	Katı oksit yakıt pili
DMYP	Doğrudan metanol yakıt pili
EW	Equivalent Weight (Eşdeğer ağırlık)
PSEPVE	Perflorosülfonat sülfonilflörür etil propil vinil eter
TFE	Tetraflor etil
ZNMF	Zero-net mass-flux (sıfır-net kütle-akısı)
PZT	Piezoelektrik özellikler gösteren seramik perovskit malzeme
MFC	Mass flow controller (kütle debisi kontrolörü)
MFM	Mass flow meter (kütle debisi ölçer)
SLPM	Standart litre per minute (standart dakika başına litre)

BÖLÜM I

GİRİŞ

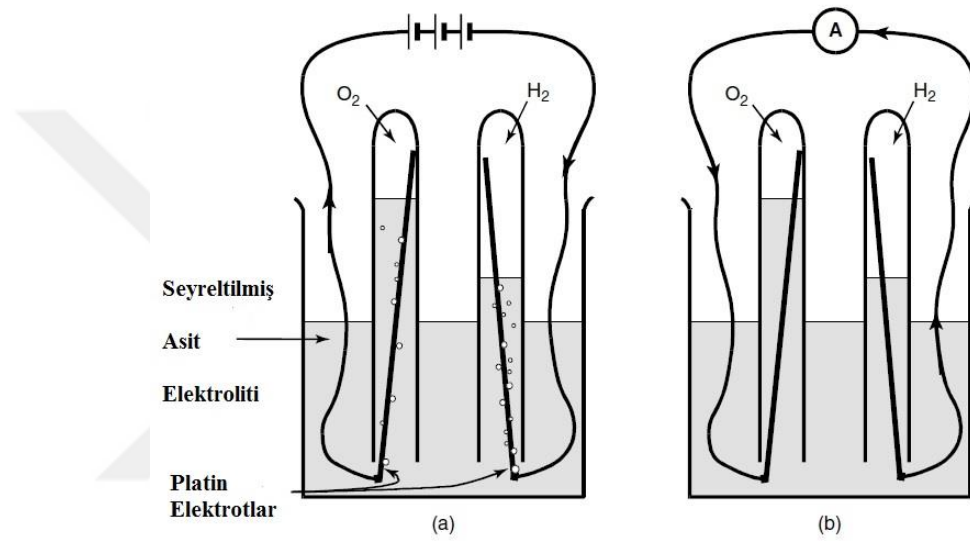
Dünyada yaygın olarak kullanılan enerji sistemlerinin en önemli sıkıntılarında biri bu sistemlerde kullanılan yakıtlarının sınırlı olmasıdır. Sınırlı yakıtların kullanıldığı bu sistemlerin çoğunlukla verimlerinin yüksek olmaması önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Fosil yakıtların enerji potansiyellerinin yüksek olması düşük verimde çalışan sistemlerin uzun süredir kullanılmasına imkan sağlamaktadır. Yakıt hücreleri doğalgaz gibi fosil yakıtlar kullansa da büyük bir çoğunluğu hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtlar kullanmaktadır. Doğalgaz gibi karbon bazlı yakıtların kullanılması hücrenin CO zehirlenmesine ve MEA üzerinde karbon birikimine yol açmaktadır (Mench, 2008). Her ne kadar hidrojen üretimi ve depolanması zor olsa da hidrojen yakıtı kullanan PEM (Proton exchange membrane/ Proton Değişim Membranı) yakıt pili sistemlerinin kullanımı tercih edilmektedir. Taşımacılıkta ve küçük sistemlerde yaygın olarak kullanılan PEM yakıt pillerinde yakıt tüketimini daha verimli bir duruma getirmek için birçok araştırmalar yapılmaktadır.

PEM yakıt pillerinin çalışması esnasında ortaya çıkan en büyük sıkıntılardan biri su birikimidir. Yüksek sıcaklıklarda çalışan diğer yakıt pili çeşitlerinde su buharlaşarak veya sıcaklıktan dolayı oksidantın(hava/oksijen) su taşıma oranının yüksek olması sayesinde katot kısmında su birikimi az görülmektedir. PEM yakıt pillerinde ise membranın çalışabilmesi için gerekli olan nem oranını sağlanması nedeniyle katot kanallarında su birikimi oluşmaktadır. Bu problemi ortadan kaldırmak amacıyla yakıt pillerinde kanal tasarımı ve akış tipleri konusunda araştırmalar yapılmaktadır. Literatürde, farklı çeşitlerde oluşturulan sentetik jetler kullanılarak katot akışını salınımlı hale getirmek süratiyle performansının artırılmasına çalışılmaktadır. Bu çalışmada ise literatürdeki kullanılan sistemler arasında sık görülmeyen plazma sentetik jet kullanarak katot akışını değiştirip su birimini azaltmak ve performans değişikliklerini incelemek hedeflenmiştir. Bu çalışmada PEM yakıt pilleri, sentetik jetlerin yakıt piline olan etkileri ve çalışma konusu olan plazma sentetik jetin yakıt piline olan etkisi, PEM yakıt pilinin çalıştırma prosedürü, plazma sentetik jetin hava akışına verilmesi ve sentetik jet kullanımı için standart hücre tasarımının değiştirilmesi durumları incelenmiştir. Bu bölümde yakıt

pilinin çalışma prensipleri, yakıt pili çeşitleri, salınımlı akış oluşturma yöntemleri ve tezin amacı alt başlıklar halinde sunulmuştur.

1.1 Yakıt Pili

Yakıt pilleri yakıtların kimyasal enerjilerini elektrik akıma çeviren enerji dönüştürücüleridir. Yakıt pillerinin ilk örneği araştırmacı William Grove tarafından 1839 da Şekil 1.1 (a) ve (b)'de görüldüğü gibi tasarlanmıştır.



Şekil 1.1. Suyun elektrolizi. Su elektrik akım geçişi yardımıyla hidrojen-oksijene ayrılıyor (a) ve (b) küçük bir akım oluşuyor, oksijen ve hidrojen birleşiyor. (Larminie ve Dicks, 2003)

Şekil 1.1 (a)'da su içinden elektrik akım geçirilerek hidrojen ve oksijene ayrılır. Şekil 1.1 (b)'de güç kaynağı ampermetre ile değiştirilir ve küçük bir akım oluşur. Elektroliz tersine çevrilmiş olur, hidrojen ve oksijen birleşir ve elektrik akımı oluşturulur (Larminie ve Dicks, 2003).

Yakıt pillerine bakmanın başka bir yolu ise hidrojenin basit bir reaksiyonla yakıldığını varsayarak (1.1) denklemi ile göstermektir.



Yanmadaki gibi ısı enerjisi yerine bu reaksiyon sonucu elektrik enerjisi ortaya çıkar. Şekil 1.1’de yapılan deneysel çalışmada bir yakıt pilinin basit prensipleri görülebilir, ama oluşan akım düşüktür. Düşük akımın oluşmasındaki sebeplerden bazıları şunlardır.

1. Gaz, elektrot ve elektrolit arasındaki düşük temas alanı. Elektrotun, elektrolitten çıktığı küçük çemberden oluşması.
2. Elektrotlar arasındaki uzun mesafe. Elektrolitin elektrik akımını zorlaştırması.

Bu problemlerin önüne geçebilmek için, elektrotlar genellikle düz yapılı ve aralarında ince tabakalı elektrolit kullanılır. Elektrotların yapıları gözeneklidir. Bu yapı sayesinde bir taraftan elektrolit diğer taraftan ise gaz içinden geçebilmektedir. Bu yapının amacı elektrot, elektrolit ve gaz aralarında maksimum temas sağlayabilmek içindir (Larminie ve Dicks, 2003).

Hidrojen ve oksijen arasındaki reaksiyonun nasıl elektrik akımı oluşturduğunu ve elektronların nereden geldiğini anlayabilmek için her bir elektrotta gerçekleşen reaksiyonları göz önüne almamız gerekmektedir. Farklı yakıt pili çeşitlerinde detaylar değişmekle birlikte Grove’un tasarladığı temel yakıt pilini örnek alarak anot ve katot kısımlarındaki asidik elektroliti incelenebilir. Asidik elektrolit yakıt pilinin anot kısmında, hidrojen gazı iyonize olup elektron ve H^+ iyonları oluşturur.

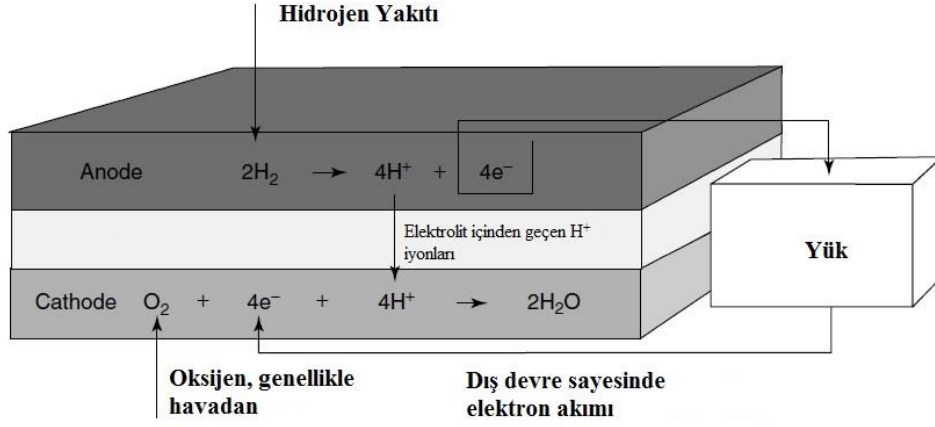


Bu reaksiyon enerji ortaya çıkarır. Katot kısmında oksijen, elektrottan gelen elektronları ve elektrolitten gelen H^+ iyonlarını alarak su oluşturmaktadır.



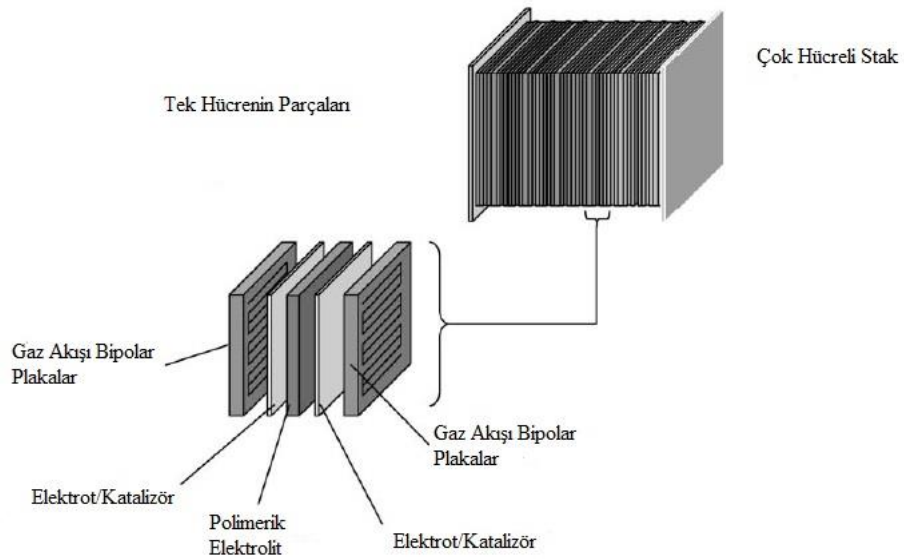
Bu 2 reaksiyonun sürekli çalışabilmesi için, anot kısmında oluşturulan elektronların elektrik devresi sayesinde katot kısmına geçmesi zorunludur. H^+ iyonları ise elektrolit içinden geçmelidir. Asit boşta gezen H^+ iyonlarıyla dolu bir akışkandır ve bu aktarım için uygundur. Bazı polimer malzemeler hareketli H^+ iyonlarını barındırırlar. Bu malzemelere proton değişim membranları denir. (1.2) ve (1.3) reaksiyonlarında görüldüğü gibi sistemin dengede kalabilmesi için her bir oksijen molekülü için 2 hidrojen molekülü

gerekmektedir. Şekil 1.2’te gösterildiği gibi elektrolitin sadece H^+ iyonlarının aktarımına izin vermesi gereklidir.



Şekil 1.2. Elektrot reaksiyonları ve asit elektrolitli yakıt pilinin yük akışı gösterimi (Larminie ve Dicks, 2003)

Eğer elektronlar, dış devreden geçmeden elektrolit içinden geçerse, yük sayesinde enerji elde edilememektedir. Yakıt pillerinin modern uygulamaları bu temel elektrot-elektrolit prensibi üzerine kurulu sistemlerden oluşmaktadır. Sistem tasarımındaki ilerlemeler arasında sızdırmazlığı arttırmak, reaksiyon bölgesinde akım toplama verimi, birkaç yakıt pilini birleştirmek, akım toplama mekanizmalarını geliştirmek gibi birçok araştırma yapılmıştır. Şekil 1.3’de PEM yakıt pili tek hücreli ve çok hücreli (stak) tipleri gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Yakıt pili ve stak şeması (Costamagna ve Srinivasan, 2001)

Tek hücrenin içerisinde anot ve katot kısımlarında gözenekli gaz difüzyon tabakalı elektrotlar, proton aktarımı yapan elektrolit, anot ve katot katalizör tabakaları ve gaz akışı alanlarına sahip elektron toplayıcılar bulunur. Çok hücreli sistemler ise elektron toplayıcı bipolar plakalar olarak kullanılır.

Tek bir hücre ile teorik olarak istenilen akım ve güç değerlerine ulaşılabilir. Bunu sağlamak için elektrot aktif alanını genişletmek ve reaktant akış oranlarını arttırmak gereklidir. Tek hücreli yakıt pillerinin çıkış voltaj değerleri reaksiyona giren bileşenlerin temel elektrokimyasal potansiyelleri ile sınırlıdır ve çalışma koşulları 1 V değerinin altındadır. Daha yüksek voltaj değerlerinde çalışabilmek için birçok hücreyi seri bağlayarak istenilen çalışma koşulları elde edilebilir. Duruma göre seri-paralel kombinasyonu gerektiren sistemler bile tasarlanabilir (Mench, 2008).

1.2 Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pilleri çeşitlerini sınıflandırmak için kullanılan en temel unsur elektrolit malzemesi tipidir. Bir KOYP (Katı oksit yakıt pili) katı seramik oksik elektrolitine sahiptir ve PEMYP esnek polimer elektrolit ile çalışmaktadır. Bu genelleme dışında kalan yakıt pili tipleri biyolojik süreçler sayesinde çalışan sistemlerdir. Kullanılan elektrolit tipini dikkate almaksızın bu hücrelere biyolojik yakıt pilleri veya mikrobial yakıt pilleri denir. Elektrolite göre sınıflandırmanın ötesinde yakıt pillerini alt sınıflara ayıran ikinci unsur kullanılan yakıt türüdür (örneğin hidrojen PEMYP ve doğrudan metanol PEMYP). Çizelge 1.1’de yaygın olarak kullanılan yakıt pillerinin çalışma sıcaklığı ve elektrolit malzemeleri verilmiştir.

Her yakıt pilinin belirli bir uygulamada kullanılmasını sağlayan avantajları vardır. Düşük sıcaklıkta çalışan alkalın ve PEM yakıt pillerinin en büyük avantajları hızlı başlama süreleri ve yüksek verimleridir. Bu sıcaklıklarda hücrelerin çalışabilmesi için pahalı katalizörler ve hücrenin çevreyle arasındaki düşük sıcaklık farkı sonucu oluşan atık ısı gidermede yardımcı olacak ısı değiştiriciler gereklidir. Katı oksit ve erimiş karbonat yakıt pilleri gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan sistemlerin düşük maliyetli saf malzeme ve çevreyle olan yüksek sıcaklık farkı nedeniyle atık ısı giderme kolaylığı gibi avantajları bulunmaktadır. Fosforik asit yakıt pilleri 150-200 °C arasında çalışabilen sistemlerdir ve bu durumda yüksek ve düşük sıcaklıkta çalışan sistemlerin avantajlarından

faaydalanılabilir, fakat sistem yapısının sınırlamaları bu alandaki çalışmaları yavaşlatmıştır (Mench, 2008).

1.2.1 Hidrojen polimer elektrolit yakıt pili

20-100 °C arası sıcaklıklarda çalışan polimer elektrolit yakıt pilleri içten yanmalı motorlara alternatif olarak düşünölmektedir. Otomotiv, sabit uygulamalar ve taşınabilir güç kaynakları sistemlerinde bataryanın yerini almayı hedeflemektedir. H₂ PEM yakıt pili saf hidrojen ile veya yakıt reformasyon sürecinden oluşturulan seyreltilmiş hidrojen karışımı ile çalışmaktadır. Stakların güç yoğunluğu 1.3 kW/L'yi geçebilmektedir.

Çizelge 1.1. Yakıt pili tipleri (Mench, 2008)

Yakıt Pili Türü	Elektrolit Malzemesi	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Avantaj/Dezavantajlar	Uygulamala Alanı
Alkali Yakıt Pili	Potasyum hidroksit	60-250	Yüksek Verim, düşük oksijen reaksiyon kaybı/ Saf oksijen ile çalışma zorunluğu	Uzay uygulamaları
Fosforik Asit Yakıt Pili	Fosforik asit	160-220	% 1-2 CO toleranslı, kullanılabilir atık ısısı/ Düşük güç yoğunluğu, platin katalizör kullanımı, uzun başlama süresi	Sabit güç kaynakları
Katı Oksit Yakıt Pili	Yitriya Stabilize Zirkoniya	600-1100	CO toleranslı, yakıt esnekliği, kullanılabilir atık ısısı/ uzun başlama süresi, elektroliti 600°C altında aktif olmaması	Sürekli sabit kojenerasyonlu güç uygulamaları
Erimiş Karbona Yakıt Pili	Erişim alkali metal karbonatları	600-800	CO toleranslı, yakıt esnekliği, kullanılabilir atık ısısı/ Elektrolitin katot katalizörü çözölmesi, uzun başlama süresi, elektrolit bakımı	Sürekli sabit kojenerasyonlu güç uygulamaları
Polimer Elektrolit Yakıt Pili	Esnek per florosülfonik asit polimer	30-100	Düşük çalışma sıcaklığı, yüksek verimi, hızlı başlama süresi/ Pahalı katalizör, ısı ve su yönetimi	Taşınabilir, otomotiv ve sabit uygulamalar

1.2.2 Doğrudan metanol yakıt pili

Sıvı yakıtlı doğrudan metanol yakıt pilleri genellikle lityum iyon bataryaların taşınabilir uygulamalarda yerini alması için en uygun sistemlerdir. DMYP sistemleri daha az yardımcı sistemler gerektirmektedir ve H₂ PEMYP'e göre daha sade sistemler tasarlanabilir. Sıvı yakıt taşınması depolama açısından kolaylık sağlamaktadır. Li iyon bataryalarla performans bakımından karşılaştırılabilir seviyededir ve gravimetrik enerji yoğunluğu 120-160 Wh/kg ve volumetrik yoğunluğu 230-270 Wh/L şeklindedir (Mench, 2008).

1.2.3 Katı oksit yakıt pilleri

Katı oksit yakıt pilleri yüksek sıcaklıkta çalışan ve katı seramik elektrot kullanan sistemlerdir. Çalışma sıcaklığı 800-1000 °C arasındadır ve yeni gelişmeler sayesinde 500 °C civarında çalıştırılabilmektedir. Bu sıcaklıklarda daha basit sızdırmazlık sistemleri ve daha çeşitli malzemeler kullanılabilir. Sızdırmazlık elemanı olarak cam kullanılır. Operasyon verimi 220 kW kojenerasyon sistemleri için %60 değerlerine kadar yükselebilmektedir (Service, 2000).

1.2.4 Erimiş karbonat yakıt pilleri

Erimiş karbonat yakıt pillerinin dünyada birçok uygulaması bulunmaktadır. FuelCell Energy şirketinin 250 kW güç ünitesi bulunmaktadır. Doğalgaz ve kömür bazlı yakıtların anot kısmında reforme eden megawatt seviyelerinde güç üretebilen sistemler dünyada bulunmaktadır. Teorik elektrik dönüşüm ve kojenerasyon verimleri sırasıyla %50 ve %85'lere ulaşabilmektedir. Asya'da Hitachi ve Toshiba gibi şirketler birçok prototip üniteler geliştirmiştir. Bu alanda sistemler geliştirmek için Avrupa ve Güney Kore bazlı araştırma endüstri kurumları bulunmaktadır (Yokokawa ve Sakai, 2010).

1.2.5 Fosforik asit yakıt pilleri

Gözenekli silikon karbit seramik matris içerisinde yüksek konsantreli fosforik asitten oluşan mobil(akışkan) elektrolit ile 160-220 °C arasında çalışmaktadır. New York'taki Verizon arama-iletme merkezi 200 kW güç seviyesinde fosforik asit dizini sayesinde

çalışmaktadır. Atık ısı geri kazanımını ele alarak sistem verimleri %80 seviyelerine kadar yükselebilmektedir. Kojenerasyon sistemlerinde birleşik verim %87 seviyesine kadar ulaşmaktadır (Mench, 2008)

1.2.6 Alkalın yakıt pilleri

Alkali yakıt pilleri su içinde potasyum hidroksik çözeltisi kullanan akışkan elektrolitli sistemlerdir. Uzay uygulamalarında yardımcı güç kaynağı olarak kullanılmıştır. Otomotiv uygulamaları arasında Union Carbide'ın tasarladığı 32 dizinli 5 kWe kapasitesinde General Motors'un 6 kişilik kamyonu ve K.Kordesch tarafından geliştirilen 6 kWe kapasitesinde kurşun-asit hibrit hücreli alkalın yakıt pili uygulamaları bulunmaktadır (Warshay ve Prokopius, 1990).

1.2.7 Diğer yakıt pilleri

Polimer elektrolit kullanan yakıt pillerinin doğrudan metanol uygulamaları haricinde doğrudan alkol çözeltileri kullanan taşınılabilir uygulamaları mevcuttur. Doğrudan alkol bazlı yakıt pilleri arasında dimetil eter (Mench vd., 2004), etilen glikol, dimetil oksalat gibi çeşitler bulunmaktadır (Peled vd., 2001).

Yakıt pillerinde farklı bir yaklaşım biyolojik sistemlerden oluşur. Biyoloji bazlı yakıt pilleri kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine biyokatalizörler sayesinde çevirme gerçekleştirmektedir. Mikrobiyal yakıt pilleri ve enzim bazlı yakıt pilleri olarak ikiye ayrılırlar (Mench, 2008). Mikrobiyal yakıt pillerinde bakteriler organik malzemelerden anaerobik oksidasyon ile elektrik üretmektedir (Liu vd., 2004). Katalizör aktiviteleri ve protonların taşınması biyolojik enzimler ve mediyatörler tarafından yapılmaktadır (Katz vd., 2010).

1.3 Polimer Elektrolit Yakıt Pilleri

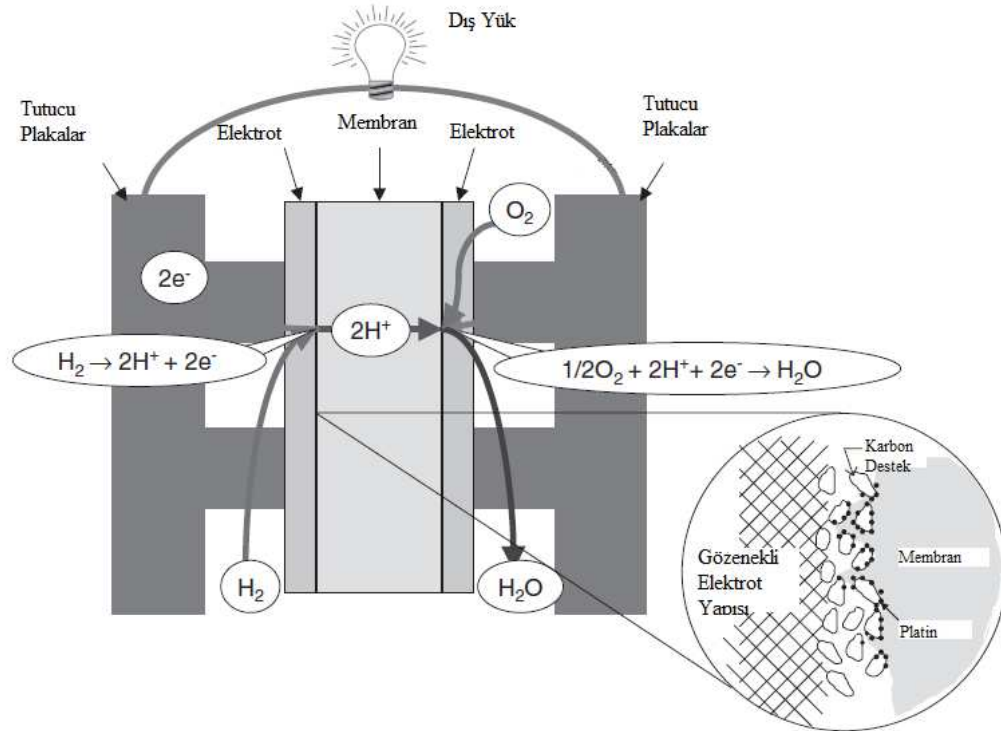
Tez çalışması sırasında polimer elektrolit kullanan yakıt pilleri üzerinde çalışmalar incelenmektedir. Yakıt pili anlatımı tamamlanmadan önce bu sistemlerin nasıl çalıştığı konusuna değinmek gerekmektedir.

PEM yakıt pili temelinde gazları geçirmeyip sadece proton geçişlerine izin veren polimer membran bulunmaktadır. Elektrolit görevi yapan membran için gözenekli ve elektriksel iletkenliği olan elektrotlar arasında sıkıştırılmıştır. Bu elektrotlar karbon dokuma veya karbon fiber kağıttan yapılmaktadır. Gözenekli elektrot ve polimer membran arasında katalizör parçacıklardan oluşan karbon üzerine platin desteği bulunmaktadır (Şekil 1.4).

1.3.1 Membran

En çok kullanılan membran malzemesi Nafion™'dur ve Dupont tarafından tasarlanmaktadır. Nafion membranlar farklı şekil ve kalınlıklarda bulunmaktadır. N harfi ve 3-4 rakam ile gösterilir. İlk 2 rakam eşdeğer ağırlığın 100'e bölümü yazılır ve son rakam/rakamlar membranın mills cinsinden gösterilir (1 mill=1/1000 inç=0.0254 mm). Nafion 2, 3.5, 5, 7 ve 10 mills (50, 89, 127, 178, 254 µm) kalınlıklarında bulunmaktadır. Nafion N117 çeşidi 1100 eşdeğer ağırlıklı ve 7 mills (0.178 mm) kalınlığındadır. Polimer membranlar için eşdeğer ağırlığın (EW = equivalent weight) gram karşılığı (geq⁻¹) olarak gösterimi (1.4) denklemi sayesinde hesaplanmaktadır.

$$EW \text{ (geq}^{-1}\text{)} = 100 * n + 446 \quad (1.4)$$



Şekil 1.4. Pem yakıt pili çalışma prensibi (Barbir, 2013)

Denklemdaki n katsayısı PSEPVE (Nafion malzemesi: perflorosülfonat sülfonilflörür etil propil vinil eter) monomeri üzerindeki ortalama TFE (tetraflor etil) gruplarının sayısına eşittir (Doyle ve Rajendran, 2010)

Polimer membranların proton aktarımı, yapısına ve su içeriğine bağlıdır. Membran içerisindeki su miktarı genellikle her gram kuru polimer ağırlığı içerisindeki gram su miktarı şeklinde yapılmaktadır. Bir başka gösterim şekli ise (1.5) denklemindeki gibi sülfonik asit grupları içerisindeki su molekülleri oranıyla hesaplanabilir (Barbir, 2013).

$$\lambda = N(H_2O)/N(SO_3H) \quad (1.5)$$

Su alımı membranda şişmeye sebep olmaktadır ve oranlarının değişmesini sağlamaktadır. Yakıt pili tasarımı ve montajı için bu önemli bir faktördür. Bu problemi önleyebilmek için güçlendirilmiş Nafion membranları üretilmiştir. Bu membranlar standart hallerine göre daha güçlü, boyutsal kararlılık bakımından iyi, düşük gaz geçirgenliği ve yüksek iletkenliği göstermektedir (Cleghorn vd., 2010).

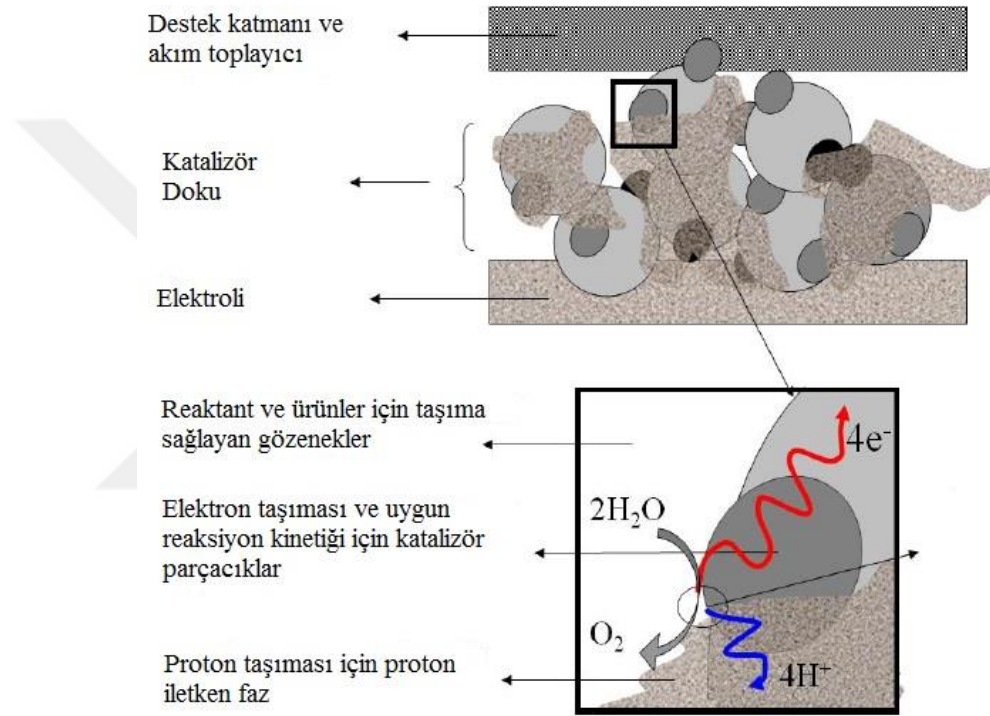
Polimer membranların en önemli özellikleri proton iletkenlikleridir. Membranların iletkenliği, su oranı ve sıcaklığa bağlıdır. Proton iletkenliği, sıcaklık ile yüksek bir eğimde artmaktadır ve suya batırılmış membranda 80 °C sıcaklıkta 0.18 S/cm iletkenliğe ulaşmıştır. $\lambda=5$ değerinin üstünde neredeyse lineer bir ilişki söz konusudur. $\lambda=5$ değeri altında su alımı düşüktür ve sülfonik yan zincirler ucunda su birikimleri yeterli değildir. $\lambda=14$ değerinde membran su buharı ile dengelenmiş durumdadır ve iletkenlik 0.06 S/cm değerindedir (Zawodzinski vd., 1993).

1.3.2 Elektrot

Yakıt pili elektrotları iyonomer membran ve gözenekli, iletken alt katman arasına sıkıştırılan ince katalizör tabakadır. Elektronlar katalizör parçacıkları sayesinde hareket eder ve bu parçacıkların alt katmanlara elektriksel olarak bağlanması önemlidir. Protonlar iyonomer içinden hareket eder ve katalizörün iyonomer ile temasta olması gerekir. Son olarak reaktant gazlar sadece boşluklar içinden hareket eder.

Gazların tepkime bölgelerine hareket edebilmesi için elektrotları gözenekli olması gerekmektedir. Şekil 1.5’de gösterildiği gibi bu reaksiyonlar üç faz bölgesinde gerçekleşmektedir (iyonomer, katı ve boşluk fazları).

PEM yakıt pillerinde oksijen redüksiyonu ve hidrojen oksidasyonu için en sık kullanılan katalizör platindir. Genellikle platin dokusu ince ve reaksiyonu oluşması istenilen bölgelerde yoğun kullanılmaktadır. Eşit oranda kullanıldığı ve uygun kalınlıktaki bir katalizör tabakasında yüksek Pt dolumu voltaj artışına sebep olmaktadır.



Şekil 1.5. Üç faz bölgesi gösterimi (Bladergroen vd., 2012)

Pt yüzeyi alanı ele alınarak akım yoğunluğu test edildiğinde polarizasyon eğrileri aynı seviyede bitmektedir. Yakıt pili performansı geliştirilmesindeki püf nokta, Pt dolumunu arttırmaktan ziyade katalizör tabakasındaki Pt kullanımını yükseltmektir.

Katalizör yüzeyinin aktif alanı tabakaya iyonomer katılımı ile iyileştirilebilir. Alkol ve su karışımı içerisinde bir çözelti ile boyanarak veya katalizör tabakası oluştururken katalizör ve iyonomer karışımı yapılarak bu birleşimler oluşturulabilir. Membran ve katalizör tabakaların birleşimine MEA (membrane electrode assembly/membran elektrot birleşimi) denir. MEA oluşturma bir yolu katalizör tabakasını gaz difüzyon tabakası(karbon

doku veya karbon kağıt) adı verilen gözenekli alt katmana yerleştirip, sıcak pres ile membrana yapıştırmaktır. İkinci yol ise katalizör tabakasını direk membran üzerine uygulamak ve gaz difüzyon tabakasının eklemesi ayrı bir adım olarak ele almaktır (Barbir, 2013).

1.3.3 Gaz difüzyon tabakası

PEM yakıt pillerinde gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası ve gaz akış kanalları arasındadır. Yapısı, katalizör kullanımı ve hücre performansını etkiler. Katalizör tabakaya gaz transferi sağlarken aynı zamanda bu tabaka için fiziksel destek oluşturmaktadır. Ayrıca, membrana suyun ulaşmasını sağlar ve böylece iyonik iletkenliğini artırır. Katalizör aktiviteleri sonucu oluşan suyun membran/katalizör tabakası birleşiminde uzaklaşmasını sağlamaktadır. Gaz difüzyon tabakaları tek katmanlı cinslerinde makro gözenekli alt katmandan oluşur. Çift katmanlı cinsinde ise karbon doku veya karbon kağıttan oluşan makro-gözenekli tabaka üzerine ince karbon katman eklenerek tasarlanmaktadır (Park vd., 2012).

1.4 Sentetik Jet

Jet akışı, bir akışkan akımının etrafındaki sabit veya hareket halindeki bir başka akışkanla karışması sonucu oluşan akış tipine denir. Bu tarz akışlar doğal olarak ve mühendislik uygulamalarında görülmektedir. Sıkıştırılamayan jetler için akış özellikleri Reynold sayısına bağlıdır (1.6). Pulsu akışlar için Womersley sayısı kullanılır (1.7).

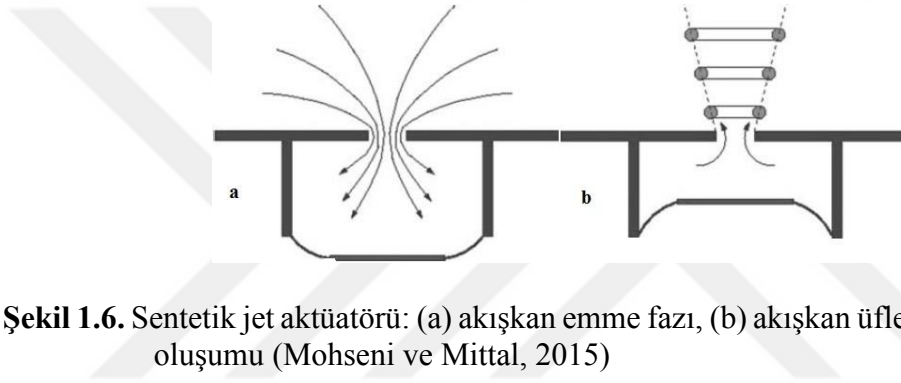
$$Re \equiv Ud/\nu \quad (1.6)$$

$$Wo \equiv \omega d^2/\nu \quad (1.7)$$

Akışkan yoğunluğu ρ , karakteristik hız U , açısal frekans ω , karakteristik ölçek L ve kinematik viskozite ν ile gösterilmektedir. Akış sıkıştırılabilir özellikler gösterdiğinde (genellikle $M>0.3$), jet akışı özellikleri Mach sayısı tarafından etkilenmektedir (1.8).

$$M \equiv U/c \text{ (c = ses hızı)} \quad (1.8)$$

Şekil 1.6’da görülen sıkıştırılamayan jet etrafındaki akışkanı kullanır ve sentetik jet olarak adlandırılır. Sentetik jetler, nozul veya orifis çıkışlarındaki akışkanın anlık ve periyodik emme-üfleme süreçleri sonucunda oluşur. Bir tam döngü sonucunda net akı oluşmadığından, sentetik jetler sıfır-net kütle-akı (ZNMF = zero-net mass-flux) jeti olarak da adlandırılır. Sentetik jetler doğal olarak darbelidir ve periyodik olarak çalışabilir. Etkileri ise sürekli üfleme ve darbeleri jetlerden farklıdır. Boyut, ağırlık ve güç kullanımını azaltmak verimli sentetik jet tasarımı için önemlidir. Genellikle jetin momentumunu (veya debisini) yükseltmek hedeflenir. Sentetik jetler oluşturmak için piezoelektrik, elektromanyetik (solenoid), akustik (hoparlör) ve mekanik (piston-silindir) etmenler kullanılabilir (Mohseni ve Mittal, 2015).



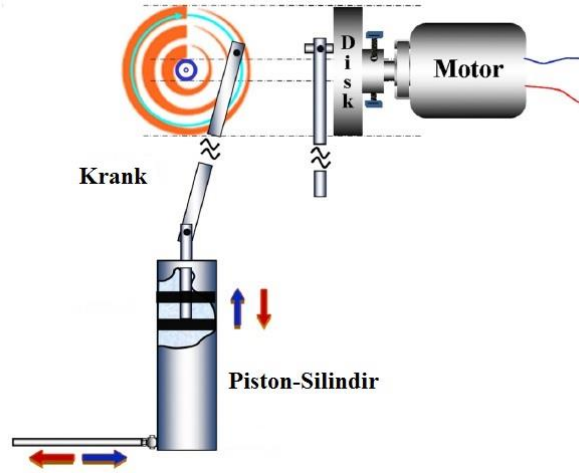
Şekil 1.6. Sentetik jet aktüatörü: (a) akışkan emme fazı, (b) akışkan üfleme fazı ve vorteks oluşumu (Mohseni ve Mittal, 2015)

1.4.1 Piston tipi sentetik jet aktüatörü

Piston tipi sentetik jet aktüatörlerinde birçok araştırma yapılmıştır. Georgia Institute of Technology’de 21.2 mm çapında, 18.4 mm rotası ve 6.49 cm³ kavite boşluğu olan bir sentetik jet aktüatörü geliştirilmiştir. Emme ve üfleme süreçlerindeki jet hızlar süpersonik seviyelerine ulaşmıştır. Bir piston-silindir mekanizmalı sentetik jet oluşturma ve test sistemi örneği Şekil 1.7’de verilmiştir (Liu vd., 2016)

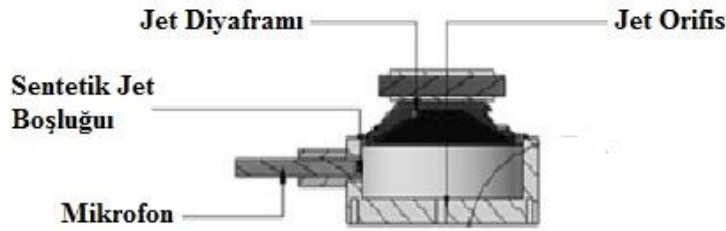
1.4.2 Hoparlör tipi sentetik jet aktüatörü

Sentetik jet üretmenin bir başka yolu ise hoparlör yardımıyla oluşturulan sistemlerdir. Şekil 1.8’te görüldüğü gibi jet diyaframı olarak akustik hoparlör kullanılmıştır. Ara kısımdaki boşluk ve diğer ucundaki orifis ile mekanizma tamamlanmıştır. Boşluğun çapı 76 mm ve derinliği 30 mm, orifisin çapı 5mm ve 10 mm uzunluğundadır.



Şekil 1.7. Piston-silindir mekanizmalı jet oluşturma mekanizması (Hwang vd., 2010)

Sentetik jet aktüatörü, Thurlby Thandar Instruments TG315 tarafından oluşturulan ve Kemo MO 034 40 W tarafından güçlendirilen sinüzoidal sinyal ile çalıştırılan Visaton FR8 8 Ω akustik hopörler ile oluşturulmaktadır (Rylatt ve O'Donovan, 2013).



Şekil 1.8. Hoparlör tipi sentetik jet aktüatörü (Rylatt ve O'Donovan, 2013)

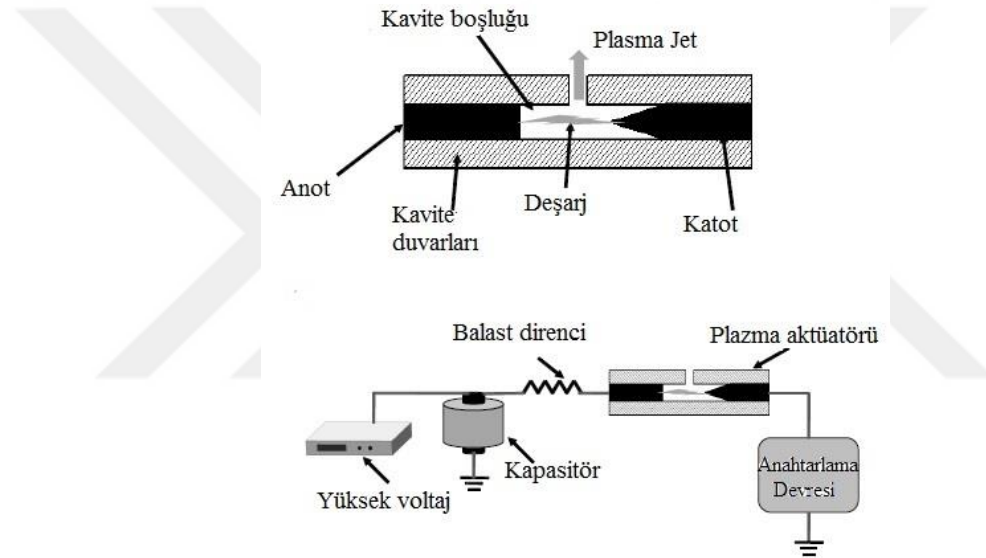
1.4.3 Piezoelektrik tipi sentetik jet aktüatörü

Piezoelektrik malzemeler voltaj değişimlerini fiziksel harekete kolaylıkla geçirebildiği için sentetik jet kullanımı için uygun sistemler oluşturmaktadır. Mane vd. (2005), test ettiği komposit bir piezoelektrik seramik katman ve aktüatör tiplerine bağlı olan farklı malzemelerden oluşan ilave katmanlar bulunmaktadır. Bimorf çeşidi Pizeo Sysmtems Inc. tarafından tasarlanan T216-A4NO-573X isimli model. Nikel elektrotlar içeren iki birleşik piezoelektrik katmandan oluşmaktadır. Thunder aktüatör üreticisinin tasarladığı gerilmiş ve eğik monomorf 0.254 mm kalınlığında paslanmaz çelik, 0.254 mm kalınlığında 5A tipi PZT (piezoelektrik özellikler gösteren seramik perovskit malzeme) ve 0.0254 mm gözenekli bakırdan oluşan bir başka aktüatör test edilmiştir. Araştırmadaki son aktüatör NASA Langley Research Center tarafından tasarlanan RFD'dir. İçerisinde

bakır elektrot dolaşan Kaplon filmler tarafından sıkıştırılan PZT katmanından oluşmaktadır. Piezoelektrik sensörler yakıt pili sistemlerinin katot kısımlarına veya akış kanalları içerisine yerleştirilmesi kolay olduğundan yakıt pilinde birçok uygulaması bulunmaktadır.

1.4.4 Plazma sentetik jet aktüatörü

Küçük boşluklarda plazma oluşturarak sentetik jet oluşturma yöntemi üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Narayanaswamy vd. (2010) yaptıkları çalışmanın şeması ve devresi Şekil 1.9’te gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Plazma jet aktüatörü şeması ve devresi (Narayanaswamy vd., 2010)

2.4 mm çapında silindirik kavite seramik plakadan yapılmıştır ve elektrotlar (2.4 mm çapında) zıt taraflardan yerleştirilmiştir. Böylece elektrotlar tarafından sınırlanan bir boşluk oluşmuştur. Elektrotlar arasındaki uzunluk farklı kavite hacimleri oluşturmak için 5-11 mm arasında değişebilmektedir. 1.8 mm çapında bir delik kavitenin orta noktasından delinmiştir. 0.22 μ F değerinde bir kapasitör, DC güç kaynağı (Spellman, SL2PN1200) ile elektron arası deşarj olana kadar yüklenmiştir. Digital geçikme generatörü (Berkeley Nucleonics model 500B) ve güç MOSFET anahtarı (STMicroelectronics model STP4N150) sayesinde şarj-deşarj döngüsü kilohertz oranlarında tekrarlanmıştır. Deşarj akımları 1.2-11 A arasında test edilmiştir. 2 A deşarj akımında 5 kHz puls frekansı elde

edilmiştir. Ekip, deşarj anında ortaya çıkan anlık plazma jet yapısını Schlieren Metod'u ile görüntülenmiştir (Narayanaswamy vd., 2010).

1.5 Salınlı Akış ile Akış Yapılarının Kontrolü

Literatürde salınlı, darbeli ve sentetik jet akış yapılarının incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Salınlı akış tiplerin difüzyona etkileri Watson (1983) tarafından incelenmiştir ve gaz değişimi üzerindeki farklılıkları inceleyen araştırma Joshi vd. (1983) tarafından yapılmıştır. Özellikle PEM yakıt pillerinde bağlanan hücre sayısı arttığında sistemin istenilen sıcaklıkta çalışabilmesi için reaksiyon sonucu oluşan atık ısı yönetimi önemlidir. Yapılan araştırmaların büyük bir oranı tek hücreli sistemlerde olmasına rağmen Kurzweg'in (1985) ısı iletimi üzerine yaptığı araştırma, bu tezde incelenecek sistemlerde etkili olduğu düşünülmektedir. Yakıt pillerinde sentetik jet aktuatörleri kullanılarak salınlı akış oluşturma uygulamalarına yönelik literatürde yapılan çalışmalara bu tezin 2. Bölümünde detaylı olarak yer verilmiştir.

1.6 Tezin Amacı

Yakıt pili sistemleri tasarımında istenilen değerleri elde edebilmek için hücrenin her kısmında iyileştirmeler yapılmaktadır. Parçaların fiziksel boyutları ve şekillerinin değiştirilmesinden, gazların akış tiplerine kadar birçok alanda araştırma yapılmaktadır. Hücrenin anot ve katot kısımlarındaki gazların aktif bölgede bulunan elektrot kısımlarına istenilen ölçülerde dağılabilmesi için verilen gaz akışlarının debisi, basıncı ve şeklinin uygun olması gerekmektedir. Teorik olarak istenilen akımı elde etmek için belirli bir miktar gaz kullanımı hesaplanmasına rağmen, gaz kayıpları ve özellikle katot kısmındaki su birikimi bu değerlere ulaşmamıza engel olmaktadır. Gazların bipolar plaka kanallarından gaz difüzyon tabakası ağına geçişine yardım edebilmesi için sentetik jet aktuatörleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada salınlı ve ZNMF akışlı çalışmaların irdelenerek, yakıt pili su tahliyesi ve performansı üzerine etkilerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, özellikle plazma temelli sentetik jet aktuatörlerinin PEM yakıt pillerinde kullanılmasına yönelik olarak 213M179 numaralı TÜBİTAK projesi için geliştirilen

aktüatör sistemlerin tasarımları ve elde edilen sonuçların literatürle karşılaştırılması yapılmıştır.



BÖLÜM II

SENTETİK JET AKTUATÖR KULLANARAK OLUŞTURULAN SALINIMLI AKIŞLARIN YAKIT PİLLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Bu bölümde yakıt pillerinin farklı bölgelerinde sentetik jet aktüatörlerinin sistemlere entegre edildiği literatürdeki çalışmalara yer verilmiştir. Kullanılan aktüatör tipine ve etki amacına göre yakıt pilinin farklı bölümlerine eklenen sistemlerin tasarımları ve uygulanma şekilleri incelenmiştir. Piston-silindir mekanizmalı, piezoelektrik, hoparlör ve plazma aktüatörlü tiplerdeki sentetik jetler ile oluşturulan salınımlı akışların hücrelerin çalışma parametrelerine etkileri sunulmuştur.

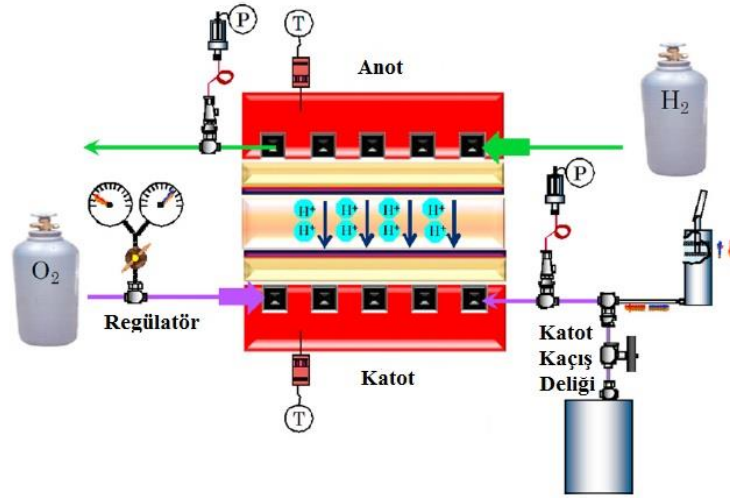
Çizelge 2.1. Literatürde kullanılan yakıt pili sentetik jet uygulamaları

Aktüatör tipi	Çalışma	Uygulama Yeri	Amaç
Piston	Choi vd. (2010a)	Katot çıkışı	Su tahliyesi
Piston	Choi vd. (2010b)	Anot çıkışı	Su tahliyesi
Piston	Hwang vd. (2010)	Katot girişi	Performans artışı
Hoparlör	Kim vd. (2008)	Katot girişi	Performans artışı
Hoparlör	Han vd. (2012)	Katot kanal girişi	Performans artışı
Hoparlör	Schafer (2011)	Kanallara dik	Difüzyon artışı
Piezoelektrik	Yang vd. (2006)	Katot plaka parçası	Performans artışı
Piezoelektrik	Seo vd. (2014)	Katot plaka parçası	Performans artışı
Piezoelektrik	Ma vd. (2013)	Katot ve anot plaka	Performans artışı
Piezoelektrik	Ma vd. (2017)	Katot ve anot plaka	Performans artışı
PSJA	Seyhan ve Akansu (2019)	Katot girişi	Performans artışı

2.1 Piston-Silindir Mekanizmalı Sentetik Jetin Yakıt Piline Uygulanması

Piston-silindir mekanizmalı sistemlerin yakıt pillerine uygulanmasında anot veya katot kısımlarını kör uç olarak kullanıp mekanizmanın emme-üfleme özelliğini kullanarak oksidantın ve yakıtın daha verimli kullanılması hedeflenmektedir. Bir başka çalışmada ise aynı mekanizma ile katot girişine ikmal edildiği sistem test edilmiştir. Bu üç araştırmanın deneysel düzeneği bu bölümde incelenecektir.

Choi vd.'nin (2010a) yaptığı çalışmada, farklı durumlar için katot kör uç modunda voltaj değişikliğinin periyodik karakteristikleri incelenmiştir. Temizleme frekansını düşürmesi amacıyla katot çıkışına puls etkisi oluşturan sistem entegre edilmiştir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi yakıt besleme sistemi, gaz temizlemesi için solenoit valf ve puls oluşturan sistem bulunmaktadır. Puls etkisinin katot kanalındaki su buharı yayılması üzerindeki değişiklikleri incelemek amacıyla anot kanalı tamamen açık bırakılmış ve debisi belirlenen akım için gerekli olan miktarın 1.5 katı kadar kütle akış kontrolörü ile ayarlanmıştır. Oksijen akışı ise basınç regülatörü ile 1.3-1.7 bar arasında kontrol edilmiştir ve çıkış kısmında solenoit valfi ile kapatılmıştır. Hücre ısıtıcılar sayesinde 70°C'de çalışmaktadır. 25 cm² aktif alana sahip tekli serpantin kanallar kullanılmıştır. Anot kısmında grafit ve katot kısmında altın kaplamalı bakır plakalar tercih edilmiştir. 0.53 mg/(cm²) Pt yüklü 25 cm² aktif alanlı Nafion 112 MEA kullanılmıştır. Puls oluşturma sistemi alüminyum disk, 5 W değerinde D.C. motor, dönüş hızı kontrolörü ve paslanmaz çelikten oluşan 4.6 mm çaplı piston-silindir mekanizmasından oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Choi vd. (2010a) araştırmasının deney düzeneği

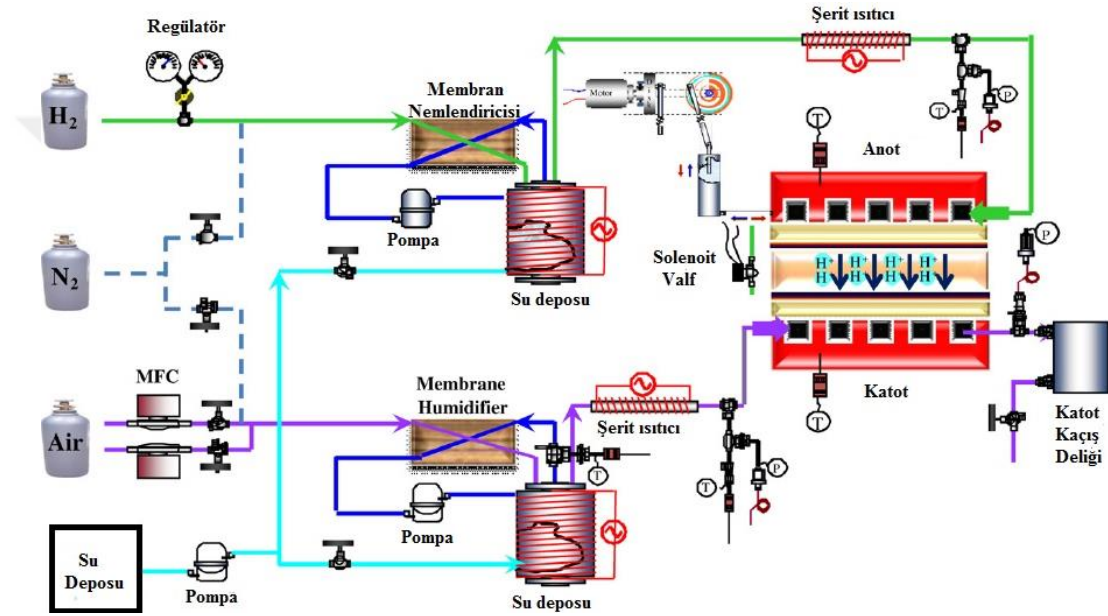
Katot kanalı sonunda oluşan su birikimi nedeniyle puls oluşturma sistemi ve solenoit valf T montaj şeklinde bağlanmıştır. Solenoid valf hücrenin çalışması esnasında kapalı durumdadır. Hücre içindeki su birikmesi voltaj düşüşüne sebep olmaktadır. Bu düşüş ardından valf açılmakta ve biriken su tasarlanan mekanizma sayesinde boşaltılmaktadır. Voltaj değerleri istenilen seviyeye geri döndüğünde valf tekrar kapanır ve sistem çalışmaya devam eder.

Voltaj değişikleri elektronik yük (Kitetsu 664 WA) sayesinde algılanabilmektedir ve gazların nem oranlarının hesaplanması için higrometre (Yamadake, FDB) kullanılmıştır. Bu tasarımda piston-silindir mekanizması kullanarak katot kör uç yakıt pilinde su boşaltımı aşamasındaki voltaj düşüklüklerini önlemek hedeflenmiştir. Katot kısmında oluşan suyun büyük oranda kullanılan oksijen nemine bağlı olduğundan öncelikle farklı akım yoğunluklarında voltaj azaltmaları test edilmiştir. 1.5 bar çalışma basıncında 0.6-1.8 A/(cm²) akım yoğunluğu değerleri arasındaki voltaj değişim aralıklarından iki temizleme aralığı arasında yüksek akım yoğunlukları azalmıştır. Aynı akım yoğunluğunda farklı çalışma basınçlarında çalıştırıldığında ise yüksek basınç oranlarında ortalama temizleme aralığı azalmıştır. Yüksek basınç gaz difüzyon tabakasındaki oksijen konsantrasyonunu arttıracığından daha fazla hidrojen molekülü ile tepkimeye girmesi sonucu daha fazla su oluşmakta ve bu nedenle temizleme fazı daha sık meydana gelmektedir. Temizleme aşamasında puls etkisi oluşturan piston-silindir mekanizması devreye girdiğinde keskin voltaj düşüşlerinin yerine daha yavaş salınımlı bir azalma görölmektedir.

Salınımın olmadığı durumda voltajda %6-7'lik ani bir düşüş yaşanırken mekanizma etkisi sonucu daha uzun süre yüksek voltaj değerlerinden faydalanılmıştır. 1.5 bar ve 1.4 A/(cm²) çalışma parametrelerinde puls etkisi (frekans: 3Hz, genlik: silindir boşluğunda 20 mm) sonucu voltaj farklılıkları incelenmiştir. İki temizleme fazı arasındaki ortalama süre puls etkisi olmadan 55 s olurken, puls etkisi ile 120 s sürmektedir. Temizleme süreleri arasındaki süre artması, katot kör uç tipi yakıt pillerinde daha az oksijen kaybına sebep olmaktadır. 1 A/(cm²), 1.5 bar ve 20 mm puls genliği değerlerinde 0.5-3 Hz aralığındaki voltaj farklılıkları test edilmiştir. Frekans yükseldiğinde tüm akım yoğunluklarında temizlemeler arasındaki süre artmıştır. Puls frekansı yükseldiğinde su buharı akış yönünde genişçe dağılmaktadır ve su buharının bağıl nem oranı doymuş seviyelere gelmesi güçleşmektedir. Sonuç olarak katot çıkışında su birikimi daha yavaş olmaktadır ve aktif alanı kaplamamaktadır. 1 A/(cm²), 1.5 bar ve 2 Hz değerlerinde 10-40 mm puls genliği arasındaki hücre voltajı değişiklikleri test edilmiştir. Yüksek puls genliklerinde temizleme aralıkları artmıştır. Yüksek genlik değerleri su buharı ve su damlalarının düzenli dağılmalarını sağlamaktadır.

Choi vd.'nin (2010b) yaptıkları bir başka araştırmada anot kısmında kör uç kullanarak yakıt verimini yükseltmeyi amaçlamışlardır. Katot kısmında oluşan suyun bir kısmının

anot kısmına geçerek oluşturduğu sıkıntıları aşmak için temizleme süreci esnasında atık su ile bir miktar gaz kaybolmaktadır. Anot kör uç tipi sistemlerde bu kaybı engellemek için puls mekanizması geliştirilmiş ve hücre üzerinde test edilmiştir. Şekil 2.2’te görülen sistem Choi vd. (2010a) deney düzeneğinin bir değişik versiyonudur. Bu çalışmada katot çıkışı açık bırakılıp hava debisi istenilen akım için gerekli olan miktarın 2 katına ayarlanmıştır. Hidrojen giriş basıncı 1.2 bar değerinde tutulup çıkışı solenoid valf sayesinde kapatılmaktadır. Hücre sıcaklığı 65 °C’de tutulmaktadır. Puls oluşturma sistemi ve bağlantı biçimi Choi vd.’nin (2010a) araştırması ile aynı şekilde tasarlanmıştır.

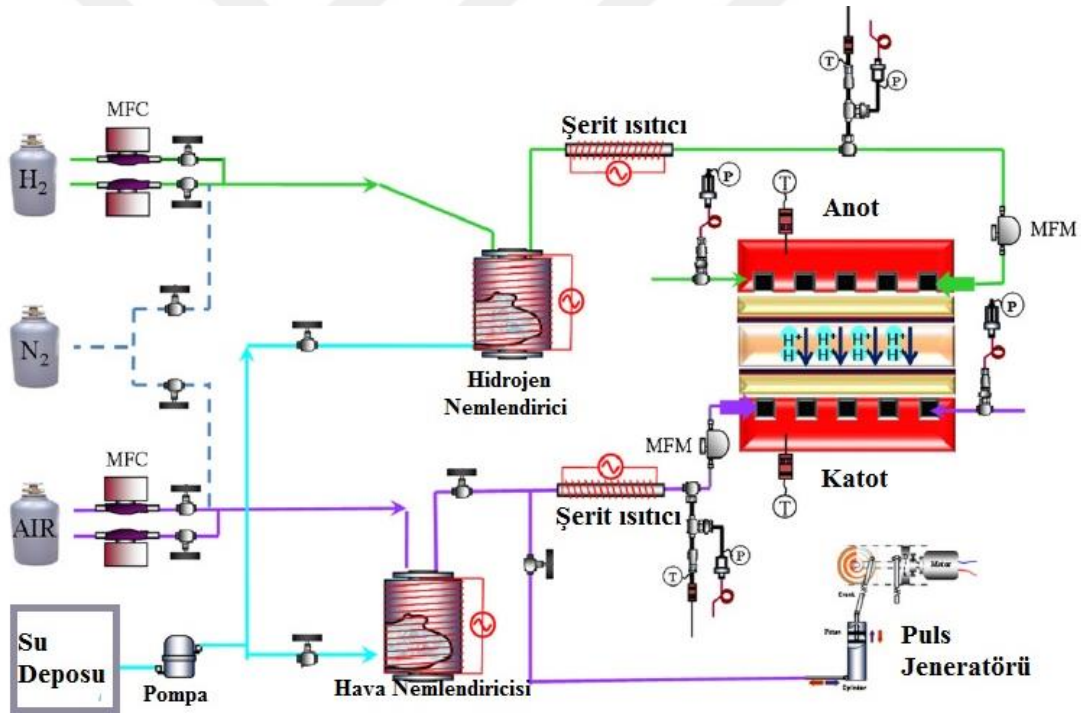


Şekil 2.2. Choi vd. (2010b) araştırmasında kullanılan anot kör uç yakıt pili deney düzeneği

Bağlantının aynısı bu çalışmada anot kısmına yerleştirilmiştir. Nemlendirilmiş hava ve hidrojen, 0.45 V sabit voltaj değerinde çalıştırılmıştır. Dengeli bir değer aldıktan sonra polarizasyon eğrileri alınmıştır. Bir önceki araştırma benzer şekilde anot kısmı çalışma süresince kapalı halde bulunur ve voltaj değerinin maksimum seviyenin %95'ine düştüğünde valf açılır (piston-silindir mekanizması devreye girer). Bu çalışmada da ortalama temizleme aralıkları farklı puls frekanslarında incelenmiştir. Anot kör uç yakıt pili sisteminde piston-silindir mekanizması kullanarak yakıt verimini arttırmak hedeflenmiştir. 1.4 A/(cm²), 2.0 stokiyometri hava oranı, 65 °C çalışma sıcaklığı ve 1.2 bar basınç şartlarında deneyler yapılmıştır. Hidrojen ve hava nemlendirilmiştir. Yapılan deneylerde puls etkisi olmadan elde edilen temizleme aralığı 161 s'dir ve puls etkisi ile 387 s'ye ulaşmıştır. Buna bağlı olarak voltaj düşüş karakteristiği değişmiştir.

0-8 Hz frekans değerleri arasında $1.4 \text{ A}/(\text{cm}^2)$, 1.2 bar ve 20 mm genlik değerlerinde temizleme fazında %71 oranında hidrojen kurtarımı sağlamıştır. Sabit genlikte puls frekansı arttırıldığında tüm akım yoğunluklarında ortalama temizleme aralığı yükselmiştir. Genlik artışı ile temizleme aralığı artmıştır, fakat yakıt verimi için bu durum puls jeneratör kısmında güç kullanımına sebep olacağından faydalı bulunmamıştır.

Hwang vd.'nin (2010) yaptığı araştırmada yakıt pilinin katot kanallarındaki akışı, salınımlı akışa çevirerek kütle transferi iyileştirmeleri hedeflenmiştir. Araştırma kapsamında bu sistemlerin taşınabilir uygulamalar için elverişli olup olmadığı test edilmiştir. Salınımlı akışın etkilerini tespit etmek için Şekil 2.3'teki gibi bir kurulum hazırlanmıştır. Bu araştırma kapsamında kullanılan yakıt pili hava soğutmalıdır.



Şekil 2.3. Hwang vd. (2010) araştırmasındaki düzeneğin şeması

Bu çalışmada hidrojen debisi kütle akış kontrolörü tarafından ayarlanmakta, nemlendirmesi ise kabarcık tipi nemlendirici sayesinde sağlanmaktadır. Difüzyon oranları arasında farkı test edebilmek için sabit akış ve salınımlı akış testleri yapılmıştır. Sabit akış durumunda hava, hidrojen tarafında olduğu gibi kütle akış kontrolörü ve nemlendiriciden geçirilerek sisteme katılmaktadır. Salınımlı akış durumunda ise piston-silindir mekanizması ile oluşturulan sistem kullanılmaktadır. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi

salınımlı akış farklı bir yol izlemektedir. Sistemin açısal hızı motorla ve süpürme uzunluğu ise disk yer değişimi sayesinde kontrol edilmektedir. Hücre içerisinde Dupont tarafından üretilen Nafion 212 tipindeki MEA kullanılmaktadır. Gaz difüzyon tabakaları karbon kağıttan olup, iki tarafta $0.4 \text{ mg}/(\text{cm}^2)$ Pt yüklü karbon katalizör destekleri kullanılmıştır. Hava kanalları girişine manifold yerleştirilip yalıtımı yapılmıştır. Hücre aktif alanı 61.3 cm^2 büyüklüğündedir. Anot gaz kanalları tekli serpantin şeklindedir ve katot kanalları 27 adet paralel kanaldan oluşmaktadır. Hücre sıcaklık sıkıştırma plakalarına yerleştirilen ısıtıcılar sayesinde 30°C ile 40°C arasında ayarlanmaktadır.

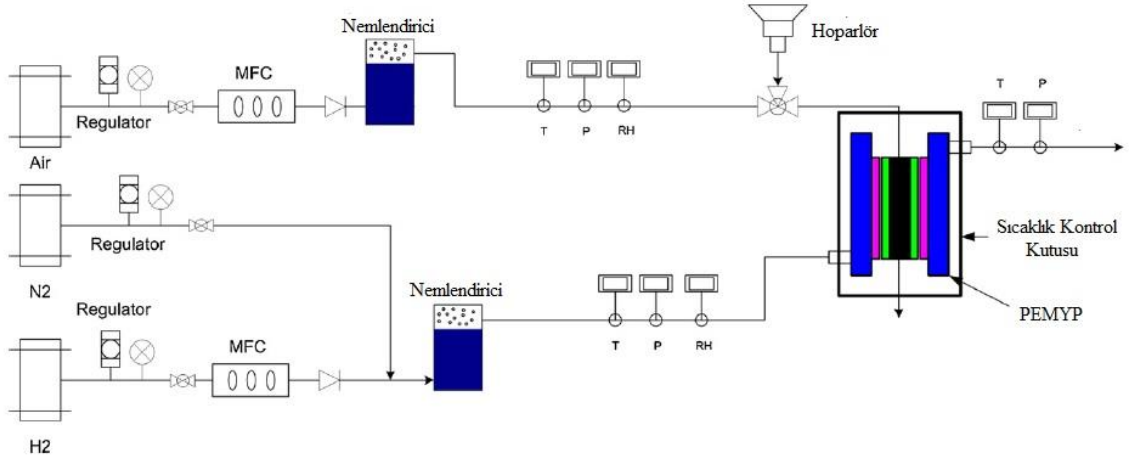
Salınımlı akış testlerine geçmeden önce 0.14 L/dk - 0.55 L/dk debiler arasında 2'den büyük stokiometri oranına sahip yakıt pilinin polarizasyon eğrisi verilmiştir. Salınımlı akıştaki frekansın etkisini görebilmek için farklı frekanslarda ve süpürme boşluklarında yakıt pili performans testleri yapılmıştır. Farklı süpürme mesafelerinde elde edilen sonuçlar frekans artışının maksimum güç yoğunluğu artışına sebep olmuştur. Bu bulgular sonucunda hava beslemesinin piston-silindir mekanizmasıyla yapılabileceği tespit edilmiştir. Süpürme mesafesinin yakıt pili üzerindeki etkisini daha detaylı bir biçimde incelemek için 0.0116 m (4.502 Hz)- 0.0595 m (4.457 Hz) arasında deneyler yapılmıştır. Maksimum güç yoğunluğu $18.9 \text{ mW}/(\text{cm}^2)$ değerinden 0.0595 m süpürme mesafesinde $115.4 \text{ mW}/(\text{cm}^2)$ değerine ulaşmıştır.

2.2 Akustik Hoparlör ile Üretilen Sentetik Jetin Yakıt Piline Uygulanması

Hoparlör kullanılarak üretilen sentetik jet aktüatörlerinin hava soğutmalı yakıt pilleri üzerine literatürde mevcut bulunan 2 uygulama incelenmiştir. Çalışmaların her ikisinde de katot akışını değiştirmek amaçlanmıştır. İlk çalışmada katot akışına hücreye girmeden önce sentetik jet uygulaması eklenmiştir. İkinci çalışmada ise katot kısmına verilen hava bir kanal yardımıyla sağlanıp, bu kanalın akış tipini sentetik jet ile değiştirmesi hedeflenmiştir.

Kim vd.'nin (2008) yaptığı araştırmada, bir yönde hareket eden katot akışına hoparlörlü sentetik jet kullanarak puls etkisi verilmiştir (Şekil 2.4). Yeni oluşan akış tipinin hücre içerisindeki oksijen ve sıcaklık dağılımını iyileştirmesi düşünülmüştür. Yakıt pili verimi düşmesine rağmen darbeli (puls) akışın eklenmesi sonucu güç ve akımda artış görülmüştür. Darbeli akışın frekans ve genliği değiştirilerek PEM yakıt pili üzerindeki

performans değerleri incelenmiştir. 25 cm² aktif alanlı 14 paralel ve düz kanaldan oluşan 10 hücreli yakıt pili tercih edilmiştir. Heliocentris Energiesysteme GmbH firmasının NP50 model PEMYP stağı kullanılmış olup, yakıt pili yığının hava beslemesi akışa puls ekleyerek hücreye ulaştırılmıştır. Akış tipini değiştirmek için 8 inç hoparlör (Sammi, SR-08B100) seçilmiştir. Bir fonksiyon jeneratörü (HP-33120A) yardımı ile belirli bir frekansta sinüzoidal dalga oluşturulmuştur.



Şekil 2.4. Kim vd. (2008) araştırmasında kullandıkları deney düzeneği

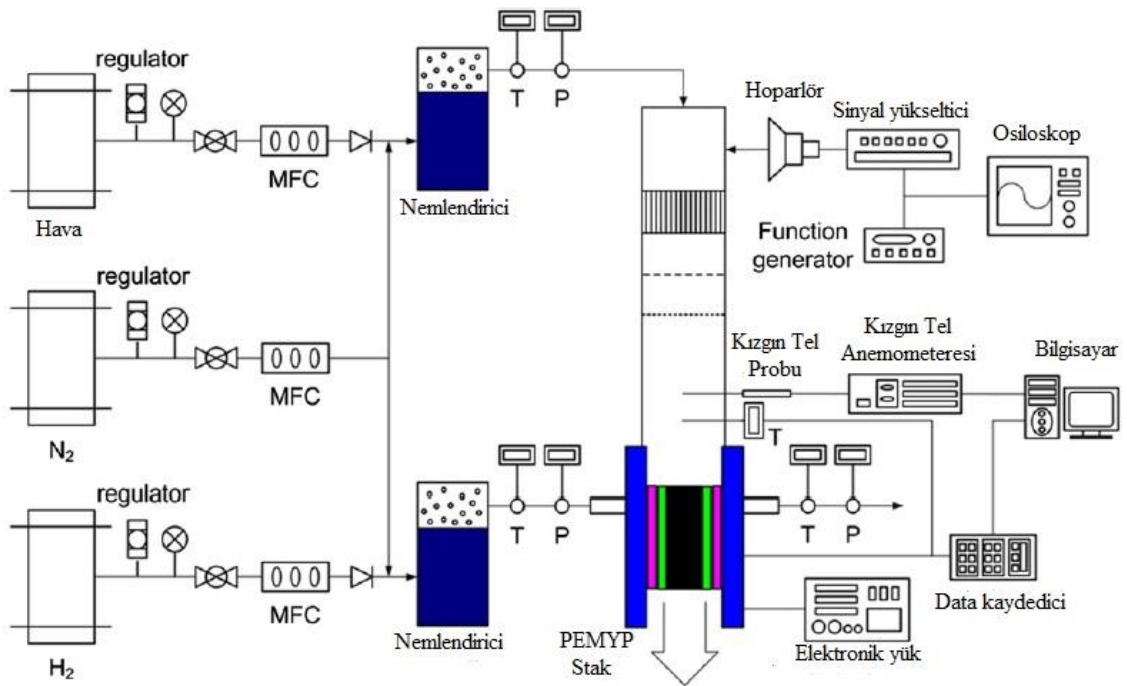
Anot kısmındaki azot ile temizleme yapıldıktan sonra hücre yaklaşık 30 dakika boyunca 3 A değerinde çalıştırılmıştır. Hücreyi istenilen değerlerin alınacağı seviyeye getirdikten sonra farklı puls frekanslarında incelemeler yapılmıştır.

Araştırmada katot girişine verilen akış hoparlör tipi sentetik jet aktüatörü ile değiştirilmiş ve yakıt pili performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Salınımlı akışın etkileri incelemeye önce standart değerlerde incelenen polarizasyon eğrileri anot ve katot gaz sıcaklıklarının sırasıyla 50 ve 30 °C olduğu durumlarda test edilmiştir.

Katot akışı üzerinde puls etkisini incelemek için yapılan deneylerde anot debisi 1 L/dk, statik çalışma sıcaklığı 50°C ve nem oranı %50 oranına sabitlenmiştir. Puls etkisinin olmadığı durumda maksimum güç 7 A akımda yaklaşık 34 W değerindedir. Puls eklendikten sonra 12 A akımda 55 W değerine kadar çıkmıştır. Puls etkisi düşük voltajlarda yakıt pili performansını çok etkilememektedir. Sabit 30 Hz puls frekansında genlik 0.1'den 10 V_{pp} değerlerine yükseldiğinde sınırlayıcı akım ve güç yükselmektedir. Sabit 10 Hz puls frekansı ve 10 V_{pp} genlikte farklı debilerde de incelemeler yapılmıştır.

Akış salınımları, 10, 20 ve 30 L/dk debilerde sırasıyla %62, %13 ve %5 maksimum güç artışı sağlamıştır.

Han vd.'nin (2012) yaptıkları araştırmada puls etkisinin katot akışındaki değişikliklerini incelemek için 10 hücreli PEM yakıt pili stağı kullanılmıştır. $Re = 77$ değerinde sınırlayıcı akım yoğunluğunda %40 ve maksimum güç yoğunluğunda %35.5 artış görülmüştür. Düşük Reynolds sayılarında genel performans artışı daha etkin olmaktadır. Yakıt pilinin katot kısmına verilen gaz Şekil 2.5'de görüldüğü gibi pleksiglas kanal yardımıyla verilmiştir ve akış yapısı hoparlör tipi sentetik jet aktüatörü ile değiştirilmiştir.



Şekil 2.5. Han vd. (2012) araştırmasında kullanılan deney düzeneği

Bir önceki araştırmada (Kim vd., 2008) olduğu gibi 10 hücreli 25 cm² aktif alanlı NP50 PEM yakıt pili kullanılmıştır. Kütle akış kontrolörleri yardımıyla, hidrojen yakıt piline verilmektedir. Hava, yakıt piline ulaşmadan önce 60x56x870 mm boyutlarında pleksiglas kanal içinden geçmektedir ve bu esnada hoparlör sayesinde akış yapısı değiştirilmektedir. Hava kanalına 3 kademeli elek örtüsü ve düzenli giriş akışı oluşması için petek tipi akış düzenleyicisi eklenmiş ve $Re = 135$ değerinde % 0.68 türbülans şiddeti elde edilmiştir. Pleksiglas kanala yapısal titreşim aktarımını engellemek için esnek tüp ile SR-08B100 model hoparlör tipi aktüatör kanala takılmıştır. HP-34401A fonksiyon jeneratörü ve Inkel AX7030G sinyal yükseltici kullanılmıştır. Yükseltilmiş sinyal LeCroy LY342 model

osiloskopa aktarılarak istenilen frekans ve voltaj değerleri görüntülenmiştir. Katot kanalına ulaşmadan önce darbeli akışın frekansı, genliği ve akış hızı kızgın tel anemometresi (Dantec Streamline System) ile ölçülmüş ve dengeli bir hal aldıktan sonra Yokogawa, DS 400 veri toplama cihazı ile alınmıştır. Hücre çalıştırılıp alınan değerler sabitlendikten sonra elektronik yük (Daegil Electronics Co., EL-500P) ile polarizasyon eğrileri alınmıştır.

Bu araştırmada farklı Womersley ve Reynolds sayılarında yakıt pili performans testleri yapılmıştır. NP50 PEM yakıt pili stağının 0.0025m puls genliği, 30 °C anot giriş sıcaklığı, 35 °C katot giriş sıcaklığında %70 anot ve %80 katot bağıl nem oranlarında farklı Womersley değerlerinde polarizasyon eğrileri oluşturulmuştur. Katot akışının Reynolds sayıları 77-135 arası değiştirilen sistemin hidrojen debisi 2 L/dk ve stak sıcaklığı 50 °C'dir. Düşük Womersley sayılarında V_{stak} iyileştirmesi çok etkili değildir, fakat Womersley sayısı yükseldiğinde özellikle polarizasyonun konsantrasyon kaybında azalma göstermektedir.

Katot kanallarındaki su dağılımı sayesinde W_o sayısı yükseltildiğinde sınırlayıcı akım yoğunluğu ve maksimum güç yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Sabit ve puls etkisi olmayan akışta sınırlayıcı akım $0.6 \text{ A}/(\text{cm}^2)$ ve güç yoğunluğu $2.26 \text{ W}/(\text{cm}^2)$ değerindedir. W_o sayısı 6.55 değerinde akım ve güç yoğunluğu sırasıyla $0.74 \text{ A}/(\text{cm}^2)$ ve $2.54 \text{ W}/(\text{cm}^2)$ değerlerine yükselmiştir. Reynolds sayısının yükselmesi ile darbeli akışın etkisinde azalma görülmüştür.

Schafer ve Allen (2011) yaptıkları araştırmada titreşim yardımıyla yakıt pillerinin akış kanallarında biriken su parçacıklarının gizli enerjilerini kullanarak kanal dışına atılmasını sağlamaya çalışmışlardır. Gaz akışına akustik basınç dalgaları uygulanarak, akışkan yüzeylerin doğal frekanslarda titreşmelerinin sağlanması hedeflenmiştir.

Kare kesitli ve dairesel kesitli iki tip kanal test edilmiştir. Kare kesitli kanal iki ince akrilik plakanın, Toray marka T060 gaz difüzyon tabakasını sıkıştırması sonucunda oluşmaktadır. Kanal uzunluğu 15 cm ve içerisine enjekte edilen su yaklaşık 11 cm uzunluğuna ulaşmaktadır. Kullanılan gaz difüzyon tabakası 0.23 mm kalınlığındadır. Kanallarda küçük delikler sayesinde su gaz difüzyon tabakasına ulaştırılmıştır ve tabakanın üst kısımlarında su parçacıkları oluşturulmuştur. Dairesel kesitli kanal ise

polimer malzemeden yapılmıştır. Çapı 1.93 mm ve kanal uzunluğu 12 cm olarak tasarlanmıştır. Tahrikli ve tahrik olmaksızın 3 set veri toplanmıştır. Yüksek su enjeksiyonu oranlarında akış hareketlendirme etkisinin azaldığı görülmüştür. Akış hareketlendirmesi düşük su enjeksiyon oranlarında 1 mm kare kanallar için %60 ve 1.93 çaplı dairesel kanal için %80 oranında etki oluşturmuştur.

2.3 Piezoelektrik Aktüatörlerin Yakıt Piline Uygulanması

Piezoelektrik malzemelerin sentetik jet yapımı için uygun olduğu bir önceki bölümde gösterilmiştir. Küçük yapısı sayesinde sistemlere istenilen bölgelerden entegre edilebilmektedir. Yakıt pilleri uygulamalarda genel olarak katot kısmına bitişik bir şekilde bağlanmaktadır. Çalışmanın birinde ise tutucu plakanın yerini alan bir sistem olarak tasarlanmıştır. Bu uygulama ile alakalı 4 araştırma bu bölümde incelenecektir.

Yang vd. (2006) araştırmasında mikro yakıt pili uygulamasına diyafram (PZT bimorf) kullanarak hava beslemesi yapılmıştır. Sistem diyafram hava pompası boşluk ve aktüatör yapısından oluşmaktadır. Aktüatör yapısı 2 bimorf ve çekvalfler ile donatılmış diyaframdan oluşmaktadır. 60mm x 16mm x 2 mm boyutlarında boşluğu olan hava pompası diyaframı tasarlanmıştır. Diyaframın dört bir tarafı sabitlenmediği için hareket piston-silindir mekanizmasına benzerdir. Plastik filmden çekvalfler yapılmıştır. 5 çekvalf grubu ve her grupta 4 çekvalfden oluşan bir sistem oluşturulmuştur. Araştırmada doğrudan metanol yakıt pillerinde piezoelektrik sentetik jet kullanımının simülasyonunu ve deneysel çalışmalarını içermektedir. Yapılan simülasyonlar 124 Hz frekansta çalışan aktüatör rezonanstayken ortalama akış hızı en yüksek değeri almaktadır. 20 V değerinde çalışan aktüatörün maksimum ortalama akış hızı 0.184 m/s olarak elde edilmiştir. Sistemin küçük olması sonucu pompanın iç hava akımı hızı hesaplaması zorlaşmaktadır. Ortalama hacimsel debisini hesaplayabilmek için denklem 3.1 kullanılmaktadır.

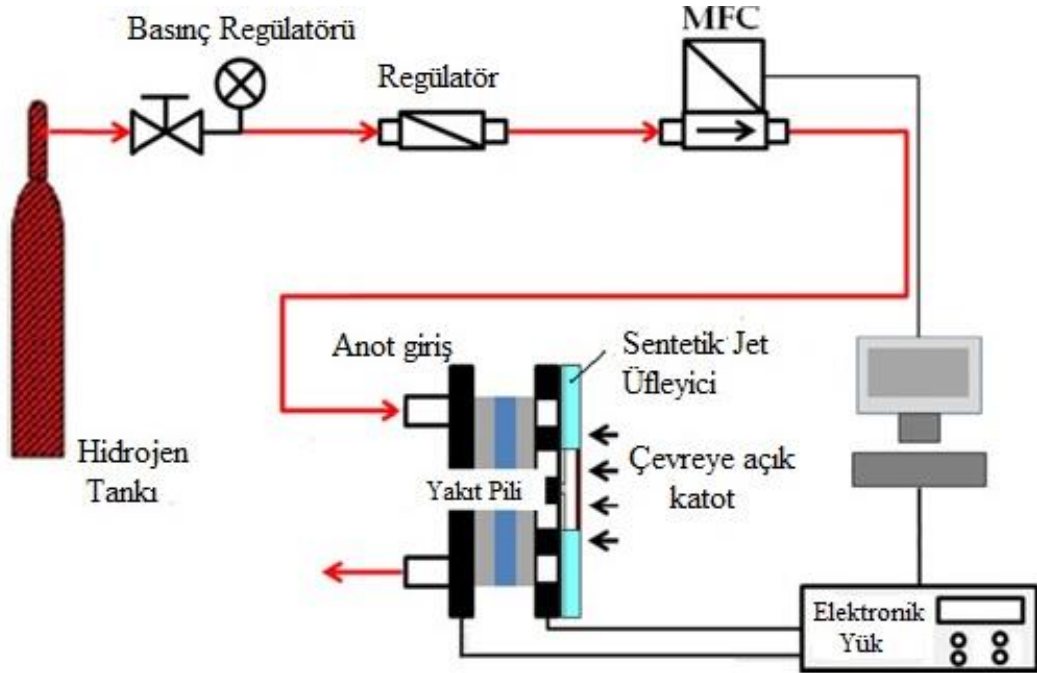
$$Q = 2 \cdot 60 \cdot v \cdot A \quad (3.1)$$

Denklemdaki v pompanın ortalama akış hızı ve A kanalın ortalama kesit alanı olarak verilmiştir. Deneysel ve simülasyon gösterimlerinde 20 V sürme voltajında pompa kanalındaki ortalama akış hızı 0.188 m/s ve diyafram genliği 0.00041 m maksimum seviyededir. Denklem (3.1) yardımıyla ortalama kesit alanı $3.78 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ olarak

kullanıldığında ortalama hacimsel debi 85.3 mL/dk şeklindedir. Deneysel ve simülasyon sonuçları arasındaki farkın sızdırma faktörü ve sönümleme oranları arasındaki eşitsizliklerden kaynakladığı düşünülmüştür. 20 V değerinde 3.18 mW güç kullanımı tespit edilmiştir. Sistem PZT malzemeleri ile tasarlandığı için güç kullanımı düşüktür.

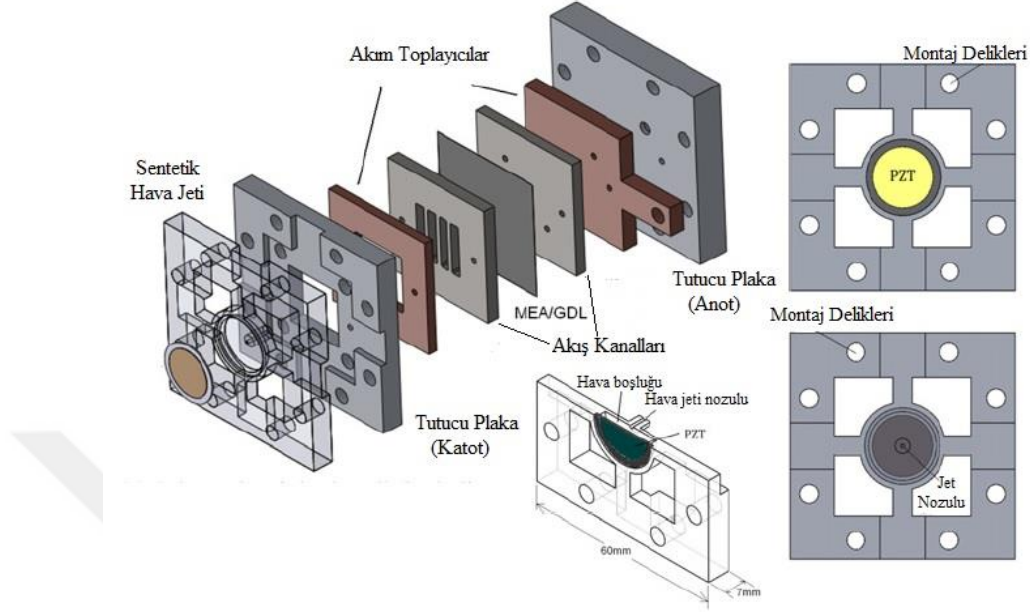
Seo vd.'nin (2014) yaptıkları araştırmada mikro ölçekte solunumlu sentetik jet üretilmiştir ve bir açık hava PEMYP sisteminin katot kısmına hava beslemesi yapılabilmesi için kullanılmıştır (Şekil 2.6). Hücre katot kısmındaki tüm parçalarda çevredeki havadan yararlanmak için boşluklar bulunmaktadır. Şekil 2.7'de gösterilen yakıt pili sisteminin MEA anot kısmında, Sigracet GDL10-BB karbon kağıt gaz difüzyon tabakası ve 0.3 mg/(cm²) Pt yüklü PRIMEA MEA serisi 5510 kullanılmıştır. Katot tarafında aynı Pt yüklü tabaka ve 2 farklı gaz difüzyon tabakası olarak Sigracet PGP 30 AA #18802 ve #19802 karbon yaprak malzemeleri tercih edilmiştir. Solunumlu sentetik jet PZT diyafram aktüatörü, küçük silindirik boşluk, giriş-çıkış kanalları ve pompa gövdesinden oluşmaktadır.

Aktüatör içerisinde, 18 mm genişliğinde ve 3 mm derinliğinde hava boşluğu bulunmakta ve 0.76 cc hacim oluşturmaktadır. Şekil 2.7' te görüldüğü gibi bir PZT diyaframı 20 mm



Şekil 2.6. Seo vd. (2014) araştırmasında kullanılan düzenek

çapında ve 0.5 mm kalınlığından oluşan paslanmaz çelik solunum gövdesine yerleştirilmiştir.



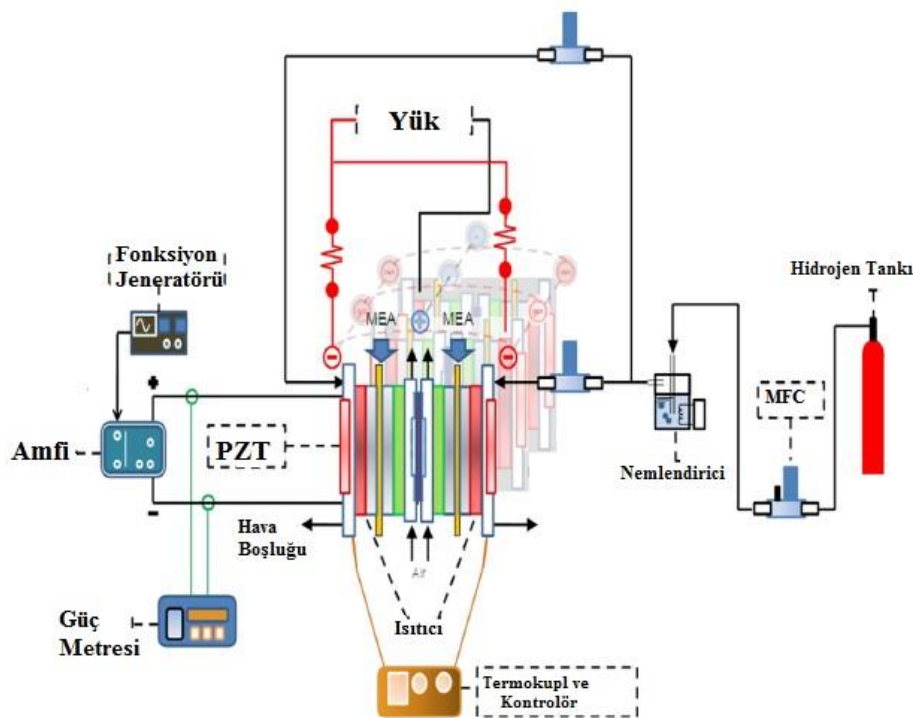
Şekil 2.7. Seo vd. (2014) araştırmasında kullanılan yakıt pili ve sentetik jetin gösterimi

Kurşun zirkonat titanattan oluşan piezoelektrik malzeme 0.2 mm kalınlığında ve paslanmaz çelik diyaframın bir kısmına kaplanmıştır. PEM yakıt pili üzerindeki sentetik jet uygulaması piezoelektrik malzemenin farklı frekanslarda ve akış kanallarının farklı boşluk oranlarında test edilmiştir.

Katot tutucu plakası üzerine piezoelektrik sentetik jet yerleştirilerek hava beslemesini bu sistem sayesinde sağlanmaya çalışmıştır. Sistem analizlerine geçmeden önce sentetik jetin farklı frekans ve hava deliği boyutlarında oluşturduğu debi hesaplanmıştır. Diyafram frekansları yükseldikçe sentetik jetin debisi de maksimum bir değere kadar yükselmektedir. Bu değer üzerindeki frekanslarda debi düşmeye başlar. 1, 2 ve 3mm hava deliği çapları için debiler sırasıyla 500, 830 ve 1300 cc/min olarak elde edilmiştir. Sinüs dalga giriş voltajı kullanarak 1 mm lüle çapında ses incelemeleri yapılmıştır. İstenilen debilerde çalışılmak istense de yüksek frekans ve voltaj değerlerinde ses şiddeti yükselmiştir. % 61 katot açıklık oranına sahip yakıt pilinde sentetik jet havalandırmalı, taşınım tipi ve fan üflemleri tiplerin polarizasyon eğrileri karşılaştırılmıştır. Sentetik jet hava üfleme ve CPU soğutmasında kullanılan fan ile tasarlanan sistemlerde standart solunumlu yakıt pillerine göre %40 maksimum güç yoğunluğu artışı görülmüştür. Bu tür

Taşıyım tipi standart bir yakıt pilinin voltajı 1 saat sonra %27 oranlarında düşerken, üflemleri bir sisteminki ise %7 azalma göstermektedir. Güç yoğunluğu oranlarına bakıldığında fanlı sistem 400 mA/(cm²) akım yoğunluğunda 188 mW/(cm²) değeri ile sentetik jet üfleyicisine göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Güç kullanımları karşılaştırıldığında sentetik jet 3 V, 80 mA ve 550 Hz değerlerinde 0.3, Fan ise 12 V ve 0.1 A değerinde 1 W kullanmaktadır.

Ma vd.'nin (2013) araştırmasında 3 L-PZT-D tipi ikili hücre içeren ve 24 cm² aktif alana sahip bir yakıt pili test edilmiştir. 10° difüzör açısı, 5.63 mm kanal yolu ve 1 mm genişliğinde kanal boşluğuna sahiptir. PZT-stağın performansını en iyi duruma getirebilmek için farklı parametrelerle test edilmiştir. PZT titreşim frekansı, hücre sıcaklığı, anot bağlı nem oranı, elektrik devresi ve anot giriş modülleri incelenmiştir. PZT stağın performansı yıpranmış membranlar ile denenmiştir. Deney düzeneği Şekil 2.8'da görülmektedir.

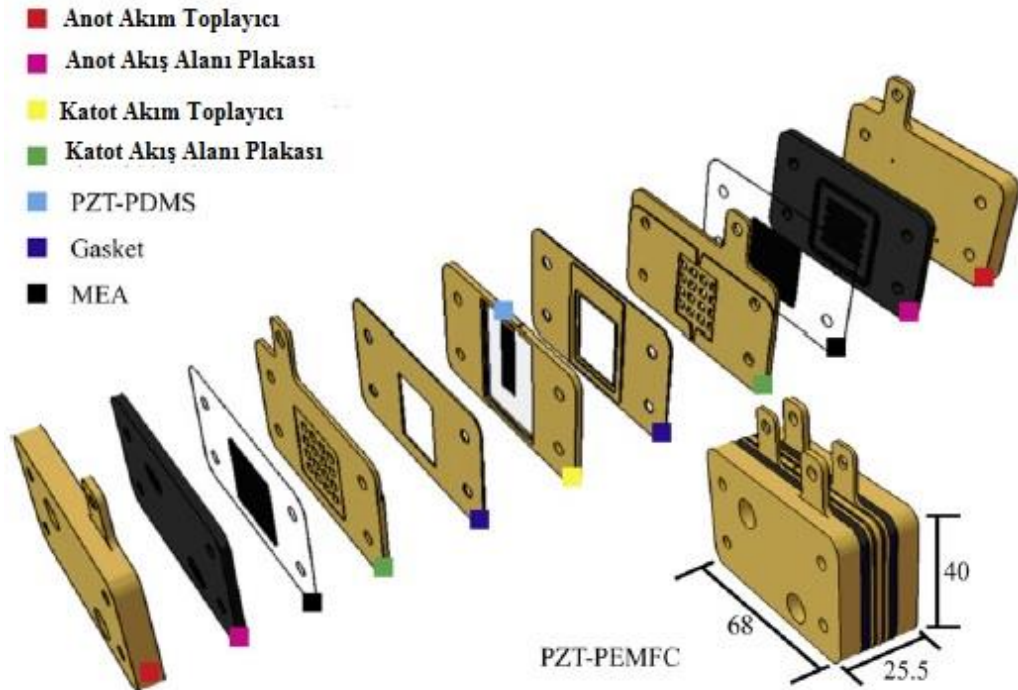


Şekil 2.8. Ma vd. (2013) araştırmasında kullanılan PZT stağın deney düzeneği

İkili hücre performansının en iyi verileri 60 Hz PZT titreşim frekansı 50°C hücre sıcaklığı ve 30° C hidrojen sıcaklığında elde edilmiştir. Farklı devre modelleri incelendiğinde en yüksek güç yoğunluğu paralel bağlamada 0.1874 W/(cm²) ve kasket bağlantıda 0.1765 W/(cm²). Farklı anot giriş modellerinde maksimum güç yoğunluğu paralel akışta 0.1874 W/(cm²) ve seri akışta 0.1652 W/(cm²). PZT stağın güç kullanımı paralel akışta 3.8627 W ve kasket bağlantıda 3.5699 W olarak ölçülmüştür.

Ma vd.'nin (2017) diğer bir araştırmalarında bir önceki yakıt pilini geliştirerek daha düşük hacim ve kütleli altın kaplamalı alüminyum 6061 kullanan bir yakıt pili stağı geliştirilmiştir. Oluk şeklinde tasarlanan PZT aktüatörü homojen dağılmayan hava beslemesini iyileştirmesi amaçlanmıştır. Şekil 2.9'da görülen PZT stağı piezoelektrik malzeme kalınlığı 0.5 mm kalınlığındadır. Bu araştırma için kullanılan difüzör açısı 15°, kanal yolu 13.13 mm ve kanal açıklığı 1 mm genişliğindedir. Nafion 212 membran ve BM 70/25/200M piezoelektrik aktüatör kullanılmıştır.

Bakırdan yapılan malzemenin alüminyum ile değiştirilmesi maliyet, ağırlık ve hacim bakımından daha uygun bir sistem tasarımı sağlamıştır. Piezoelektrik aktüatörün sayesinde hücrenin her iki tarafında üretme potansiyelini arttırmıştır. Böylece açık devre



Şekil 2.9. Ma vd. (2017) araştırmasında kullanılan ikili hücrenin gösterimi

2.4 Plazma Sentetik Jet Aktüatörlerinin Yakıt Piline Uygulanması

The schematic diagram illustrates the experimental setup for the PEMFC system. It includes the following components and their interconnections:

- Gas Supply:** Three blue cylinders labeled Air, N₂, and H₂ are connected to the system via pipes and valves.
- Flow Control:** Two blue flow meters are used to measure the flow rates of the gases.
- Humidification:** Two blue humidifiers are used to humidify the gases before they enter the PEMFC.
- PEMFC Stack:** The Proton Exchange Membrane Fuel Cell stack is the central component, receiving the humidified gases.
- Electrical Load and Control:** The PEMFC is connected to a MOSFET, which is controlled by a signal generator. The MOSFET is connected to a transformer, which in turn is connected to an electronic load. A low voltage power supply is also connected to the MOSFET and the electronic load.
- Measurement and Monitoring:** An oscilloscope is connected to the signal generator to monitor the control signal. A computer is connected to the electronic load to monitor the system's performance.
- SPSJ Actuator:** A red arrow points from the SPSJ actuator to the PEMFC stack, indicating its role in the system.

Yüksek debilerde sentetik jetin etkisi katot girişine gelmeden önce sönümlenmiştir. 0.1 SLPM hidrojen ve 0.3 SLPM hava debisi ile çalışan sisteme PSJA kullanarak yapılan deneylerde % 11 güç çıkışı artışı elde edilmiştir. Kısa sürelerde sentetik jetin açılıp kapatıldığı durumlarda katot akış kanallarında gaz difüzyon artışı ve su birikimi azalması sebebiyle ani akım değişimleri görülmüştür.

BÖLÜM III

PLAZMA SENTETİK JETİN YAKIT PİLİNE UYGULANMASI

Bu tez çalışması 213M179 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olup proje çalışmalarının bir kısmını içermektedir. Bu bağlamda, proje sonuç raporunda (Akansu vd., 2017) ve proje sonuç raporundan yapılan makale çalışmasında (Seyhan ve Akansu, 2019) sunulan şekil ve ifadelerin bir kısmına burada da yer verilmiştir. Proje kapsamında, plazma sentetik jet aktuatörünün yakıt piline uygulanması; uygun sentetik jet aktuatörünün geliştirilmesi ve yakıt piline uygulanması olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada farklı sentetik jet oluşturmak üzere DBD ve Corana deşarj yöntemleri ile yüzey ve hacim plazması oluşturma teknikleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış olup, yüksek hızlı sentetik jet oluşumu için hazır buji kullanılarak oluşturulan aktuatörün en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Bu bağlamda farklı buji tipleri ve orifis deliklerinin bulunduğu buji başlıkları tasarlanmıştır. Proje kapsamında geliştirilen 3 buji tipi ve 7 farklı başlık boyutlarında oluşturulan 21 aktuatör yapısı, farklı fiziksel özelliklerdeki 4 çeşit yüksek voltaj kaynağında farklı sürüm frekans ve voltaj aralıklarında ayrı ayrı test edilmiştir. Bu testler sonucunda en iyi birkaç PSJ aktuatör düzenlemesi belirlenmiştir. Elde edilen sentetik jet hız dağılımlarına ait veriler, proje sonuç raporunda (Akansu vd., 2017) ve proje kapsamında gerçekleştirilen yüksek lisans tez çalışmasında (Seyhan, 2015) detaylı olarak bulunmaktadır.

İkinci aşamada ise PSJ aktuatörün PEM yakıt piline uygulanması gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında projenin ikinci kısmında yer alan hücrenin katot kısmına gelen akışı değiştirecek şekilde ve hücrenin katot tutucu plakasına PSJ aktuatörün montaj edilmesine yönelik çalışmalara ve yakıt pili performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Bu bölümde PSJ aktuatörünün tek hücreli yakıt piline uygulanmasında kullanılan deney düzeneği ve ölçüm cihazları hakkında bilgilere yer verilmiştir.

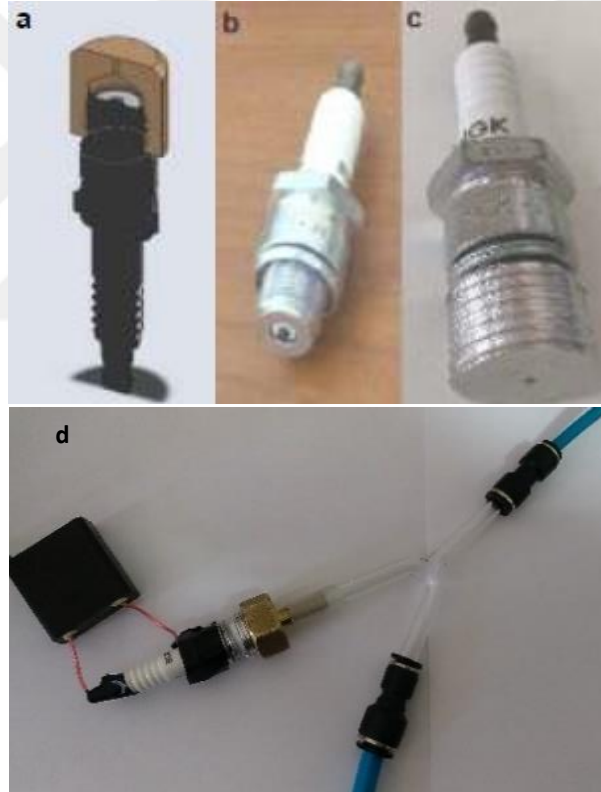
3.1 Deney Düzeneği

Deneyisel çalışmalar Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Atmosferik Plazma Araştırma Laboratuvarında (APAL)

gerçekleştirilmiştir. Ayrıca TUBİTAK 213M179 nolu projesinin desteği kapsamında temin edilen yakıt pilleri ve test cihazları kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

3.1.1 Plazma sentetik jet aktuatörü

Projenin birinci aşamasında PSJ aktuatörü geliştirilmiş olup, B3-M4-G1 model sistemin yakıt pili deneylerinde kullanılmasına karar verilmiştir. Buradaki B3, incelenen 3. buji tipi olan NGK firmasının ürettiği BUHW-2 model buji tipini ifade etmektedir. Fotoğraf 3.1’de buji tipindeki plazma sentetik jet aktuatörünün tasarım ve montaj fotoğrafları görülmektedir. Buji tarafından oluşturulan plazma ve küçük hacmi oluşturan başlığın orifisi sayesinde sentetik jet sistemi elde edilmektedir.



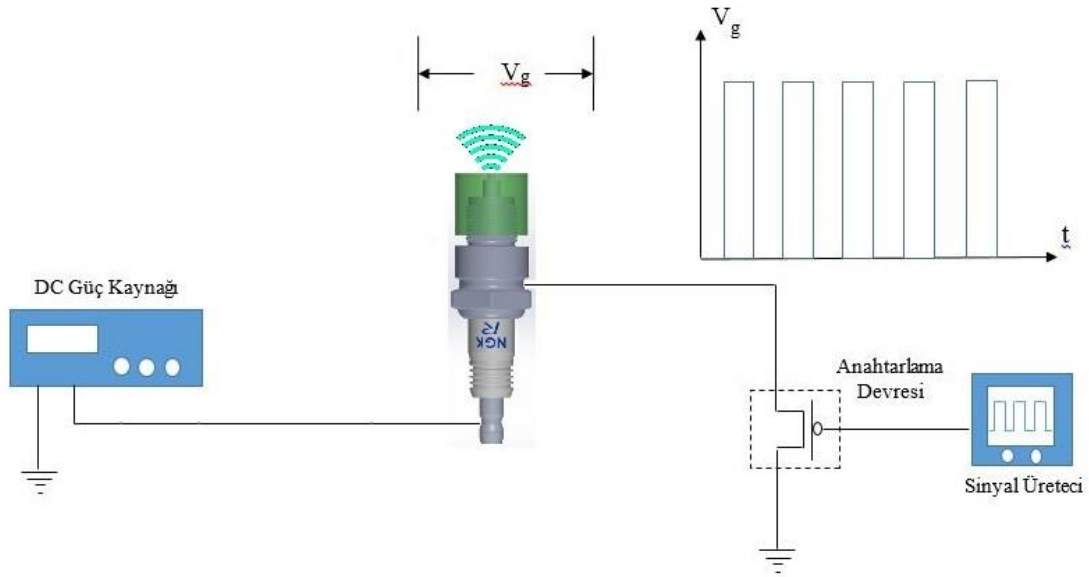
Fotoğraf 3.1. (a) Sentetik jet CAD gösterimi, (b) buji, (c) sentetik jet aktüarörü ve (d) aktuatörün yüksek voltaj transformatöre bağlanması (Akansu vd., 2017)

M4 kısaltması ise, Çizelge 3.1’de görülen farklı aktüatör başlıklarından 4 nolu buji başlığını ifade etmektedir. Buradaki 7. modelde başlık ve orifis çapı aynı olup başlık hacmi oluşmamaktadır. PSJ aktüatörünün geliştirilmesinde dört farklı güç kaynağı kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Farklı jet aktüatör başlıklarının boyutları (Seyhan, 2015)

Buji Başlığı	İç Çap(mm)	Derinlik(mm)	Orifis Çapı(mm)	Hacim(mm ³)
1. Model	4,4	4,65	2	70,70
2. Model	4,75	5	1,5	88,6
3. Model	6,35	4,7	1,5	148,8
4. Model	6,35	1,6	1,5	50,7
5. Model	6,35	3,5	1,5	110,8
6. Model	4	4	2	50,2
7. Model	4	4	4	-

Bunlar “Transformatörlü güç kaynağı”, “Nanopuls generatör”, “Audio amfisi” ve “Tüplü monitör” olup sırası ile G1, G2, G3 ve G4 olarak simgelendirilmiştir (Akansu vd., 2017). Yakıt pili uygulamasında G1 numaralı “MOSFET anahtarlı voltaj transformatörü” kullanılmıştır. Bu güç kaynağının kullanıldığı tüm deneylerde giriş voltajı 3V düşük voltaj güç kaynağı ile giriş voltajında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de aktüatör besleme sisteminin devre şeması görülmektedir.

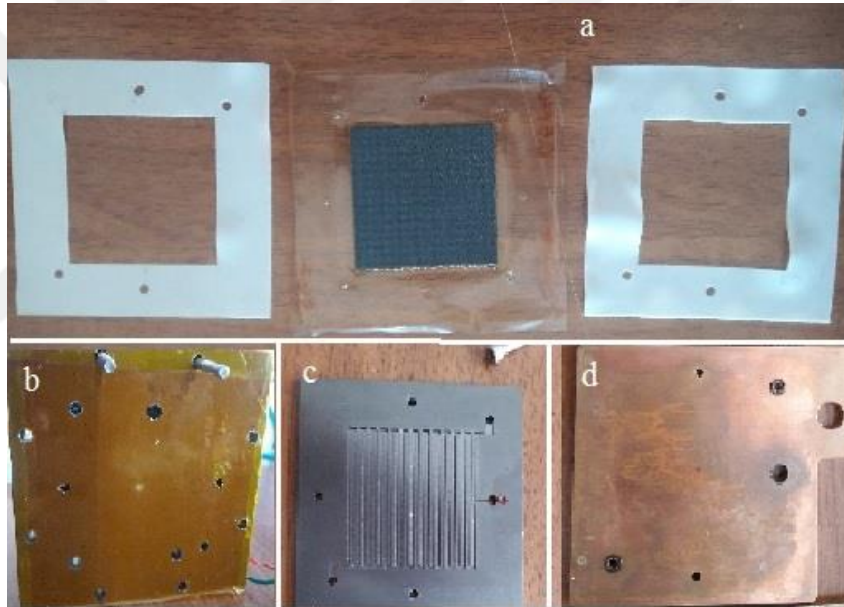


Şekil 3.1. Plazma sentetik jet aktüatörü besleme sistemi (Akansu vd., 2017)

Sinyal takipleri için Tektronix TDS2012B ve TDS2022 modeli osiloskoplar kullanılmıştır. Akım değerleri ölçümü Fluke 80i-110s AC/DC akım probu ile yapılmıştır. Nano puls tetikleme işleminde STMicroelectronics P4N150 markalı MOSFET anahtarı ve AATech AWG-1010 sinyal jeneratörü kullanılmıştır.

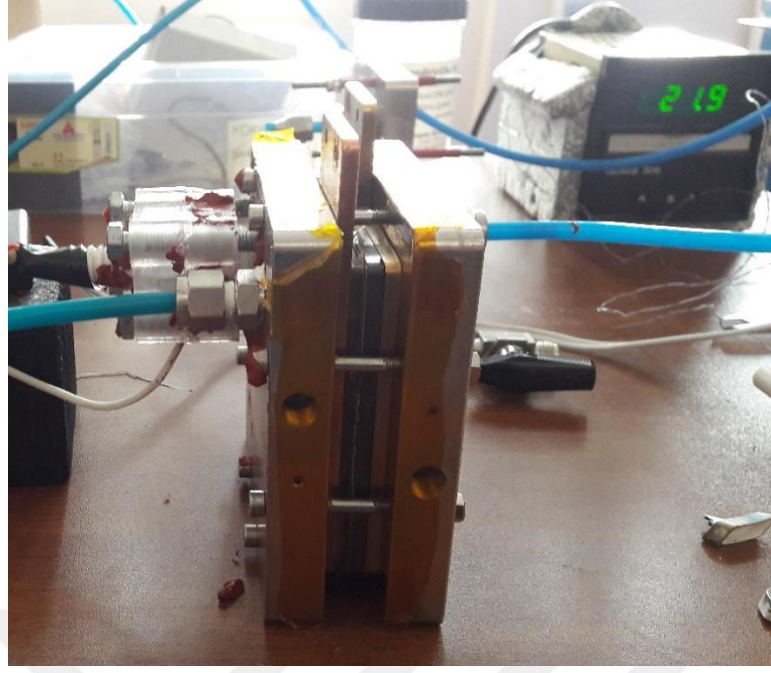
3.1.2 PEM yakıt pili ve PSJ aktuatör bağlantı çeşitleri

Araştırmada kullanılan yakıt pili 25 cm^2 aktif alanlı 5 katmanlı Nafion 115 membranından oluşmaktadır. Gaz sızdırmazlığı için gasketler ve elektriksel yalıtım için myler ve Kapton bandı kullanılmıştır. Akış kanalları tekli veya üçlü serpantin şeklinde olan iki yakıt pili hücresi oluşturulmuştur. Yakıt pilinin parçaları Fotoğraf 3.2’te ve montajı yapılmış hali Fotoğraf 3.3’te görülmektedir. Yakıt pili montajı yapıldıktan sonra ısıtıcılar ve termokupl yardımıyla ölçümleri yapılmıştır. Deneyler yapılmadan önce membranların aktivasyon işlemleri yapılmıştır (Akansu vd., 2017). Deneyler sonucu elde edilen en iyi sentetik jet parametreleri ile yakıt piline uygulamaları farklı debilerde ve farklı jet aktivasyon aralıklarında test edilmiştir.



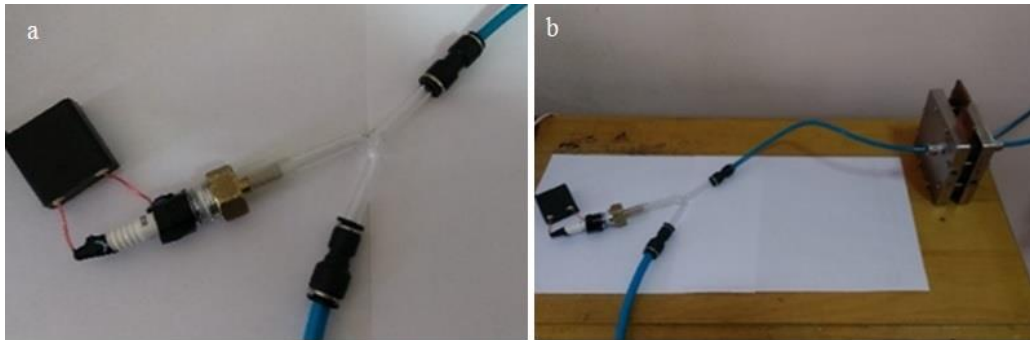
Fotoğraf 3.2. PEM yakıt pili parçaları; (a) gasketler ve membran, (b) tutucu plakalar, (c) akış kanalları ve (d) akım toplama plakaları (Akansu vd., 2017)

Proje kapsamında bağlantı yapılarının geliştirilmesine yönelik araştırmalar özellikle bu tez çalışmasında üzerinde durulmuştur. Fotoğraf 3.4’de sentetik jetlerin yakıt pillerine bağlanmasına yönelik yapılan, Y tüpü bağlantısı, Fotoğraf 3.5’te pleksiglas kanallı bağlantı, Fotoğraf 3.6’da Katot tutucu plakasına direkt entegre bağlantısı ve Fotoğraf 3.7’de akış kanalına yandan bağlantı tasarımları görülmektedir. PSJ aktuatörünün yüksek voltaj kullanması ve yakıt pilinin patlayıcı hidrojen gazını kullanması nedeniyle ilk önce yakıt pilinin uzağında katot akışına salınım vermesi için Y tüpü bağlantısı kullanılmıştır.



Fotoğraf 3.3. PEM yakıt pilinin montaj yapılmış hali

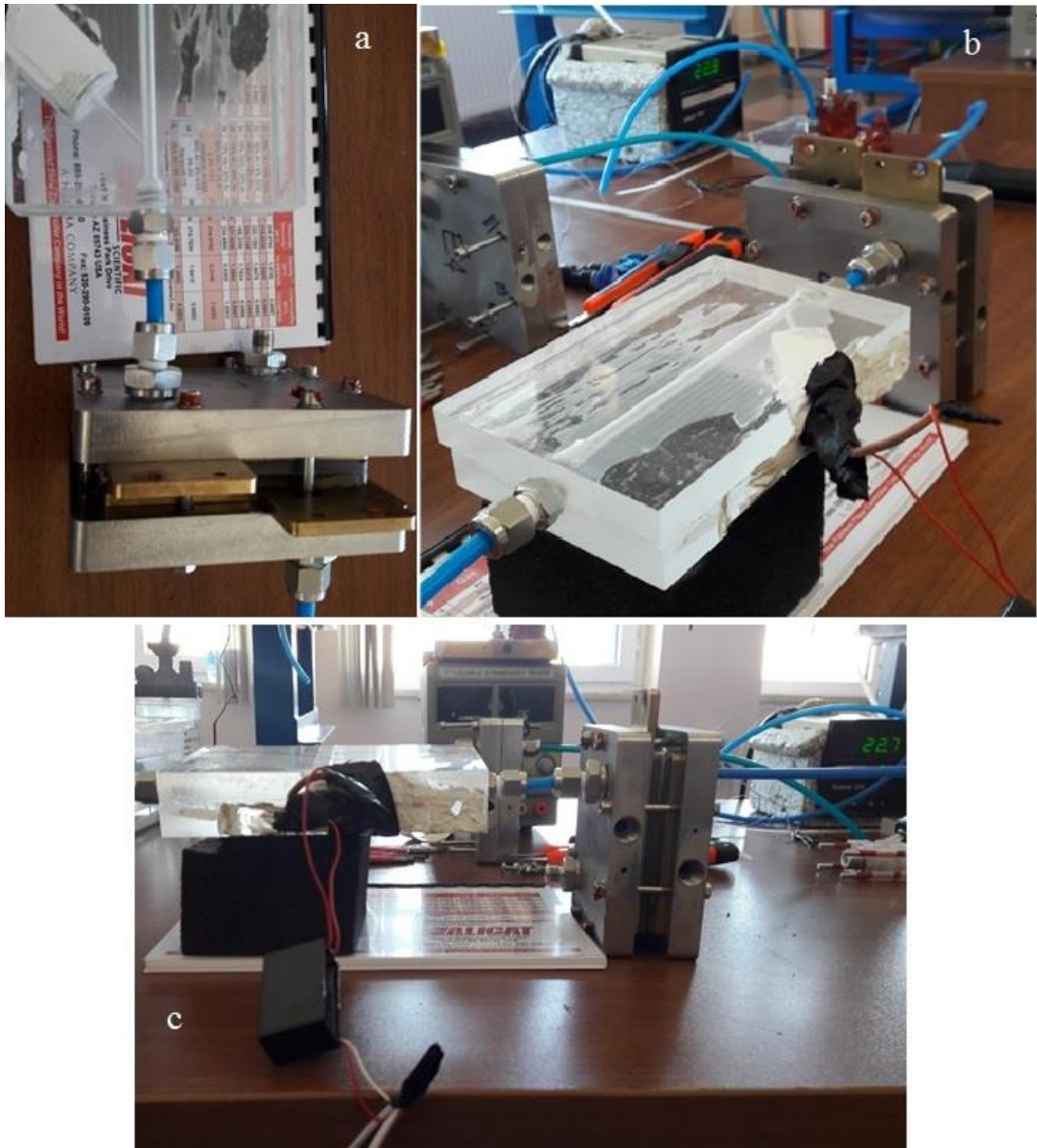
Ancak yakıt pili akış kanalının çok uzağında olması nedeniyle oluşan salınımın sönümlenmesi yakıt pili performansında herhangi bir etki oluşturmamıştır. Bunun üzerine yakıt piline daha kısa mesafede pleksiglas plaka içerisine açılan daha küçük kanallarla aradaki hacmin küçültülmesi ve salınımın sönümlenmeden katot gaz difüzyon tabakasına ulaşması amaçlanmıştır. Ancak sızdırmazlık problemleri, jetin yandan verilmesi ve pleksiglas kanalda oluşan salınımın hala yüksek hacimli geçişi nedeniyle istenilen etki elde edilememiştir. Bunun üzerine aradaki hacmi minimize etmek için PSJ aktuatör katot tutucu plakasına doğrudan bağlanmıştır. Bunun için tutucu plakanın üzerine aktuatörün gireceği şekilde dairesel bir oyuk açılmış ve sadece 1mm çapında delik ile jetin katot birinci akış kanalına dik gelecek şekilde yerleştirilmiştir.



Fotoğraf 3.4. Plazma sentetik jetin yakıt piline Y rakoru ile uygulama gösterimi; rakorun katot bağlanması (a) ve hücreye bağlanması (b) (Akansu vd., 2017)

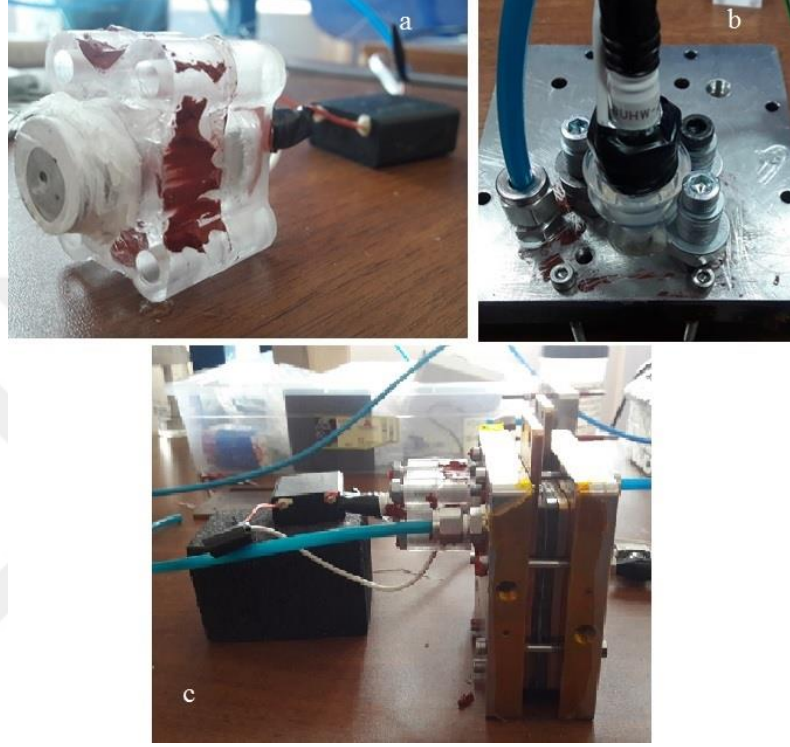
Elektrik yalıtımı ve aktuatörün tutucu plaka üzerinde sabit durabilmesi için pleksiglas çerçeve kullanılmıştır. Bu bağlantı tipinde yüksek debilerde çok az bir etki görülmüş olup etkinin daha net oluşabilmesi için düşük debilerde de çalışılmıştır. Aktuatörün doğrudan bağlanması nedeniyle yüksek voltajın oluşturabileceği riskler nedeniyle ilk iki bağlantı tipinde kullanılan diğer güç kaynakları kullanılmamıştır.

Kullanılan G1 güç kaynağı da sistem üzerinde statik elektrik yük birikmesi riski nedeniyle daha düşük voltaj aralıklarında kullanılmıştır. Bu nedenle yakıt pilinde sentetik jetin etkisini ortaya koyabilmek için daha düşük stokiyometri değerlerinde çalışılmıştır.

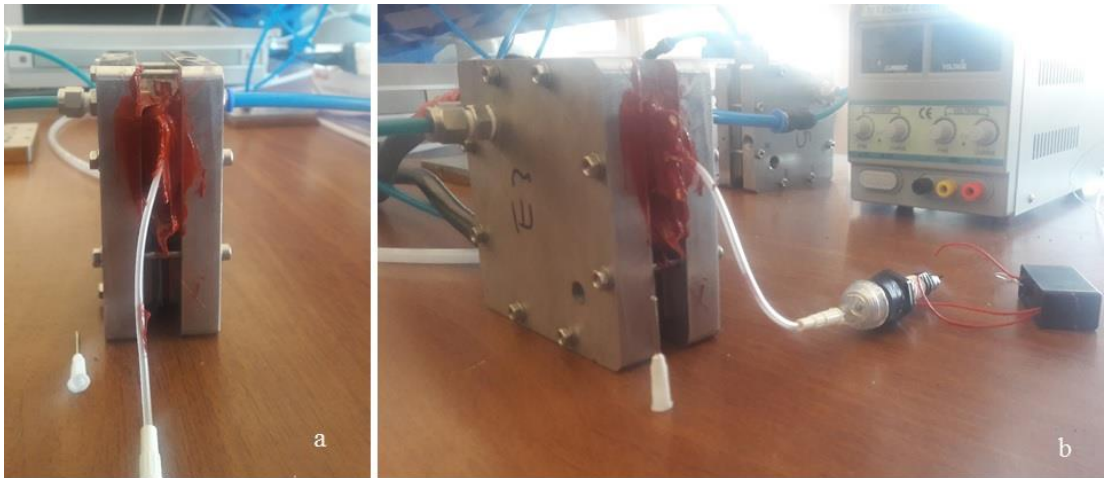


Fotoğraf 3.5. Plazma sentetik jetin yakıt piline Plektsiglas kanal ile uygulamasının üst (a), ön (b) ve yan gösterimi (c)

Üçüncü bağlantı tipinde yakıt pili performansında PSJ aktuatörün etki oluşturmaları üzerine bu etkiyi daha da artırabilmek amacıyla akış kanalına yandan bağlantılı dördüncü bir tasarımın daha testleri yapılmıştır. İlk iki bağlantı tipinde PSJ aktuatör yakıt pilinin dışında katot ikmal tüpü üzerine uygulanırken bu yeni bağlantı tipinde ise grafit plakanın yan tarafından açılan delik ile akış kanalının girişine doğrudan bağlanmıştır.



Fotoğraf 3.6. Plazma sentetik jetin yakıt piline katot tutucu plakasına entegre uygulamasının bağlanmadan öncesi(a), tutucu plakada (b) ve montaj edilmiş (c) gösterimi

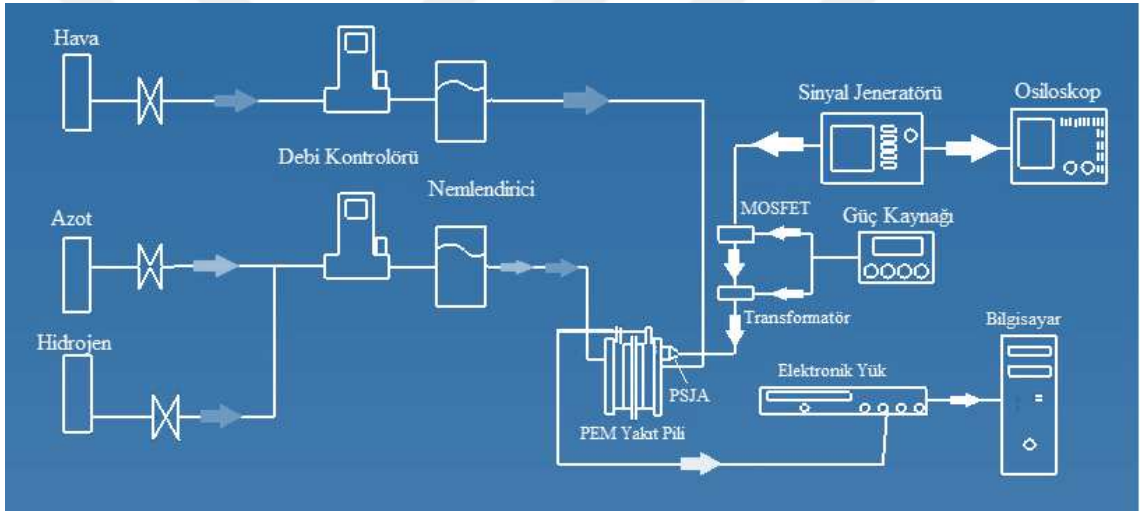


Fotoğraf 3.7. Plazma sentetik jetin yakıt piline akış kanalından bağlanmasının yan (a) ve önden (b) gösterimi

Ancak bu durumda da çeşitli sızdırmazlık problemleri ve özellikle su birikimi ve yüksek basınç nedeniyle plazma oluşumunun elverişsiz hale gelmesi bu bağlantı tipinde de beklenen sonucu oluşturamamıştır. Bu nedenle bu çalışmada sadece üçüncü bağlantı tipi olan direkt bağlantı durumunda elde edilen sonuçlara bulgular kısmında yer verilmiştir.

3.2 Yakıt Pili Test Düzenegi

Yakıt pili test sistemi şematik resmi Şekil 3.2’de görülmektedir. Şemada görüldüğü gibi test sisteminde yer alan hava, hidrojen ve azot tanklarından gelen oksidant, yakıt ve temizleyici gazlar kütleli debi ölçerden (Fotoğraf 3.8(a)) istenilen akış debilerine ayarlanarak nemlendiricilerden geçtikten sonra yakıt piline gönderilmektedir.



Şekil 3.2. Plazma sentetik jetin yakıt piline uygulanmasında kullanılan sistem



Fotoğraf 3.8. Debi kontrolörü (a) ve tüm düzenek (b) (Akansu vd., 2017)

Yakıt pili anot ve katot girişlerinde gazların sıcaklıkları ve basınçları ölçülmektedir. Yakıt pili tutucu plaka içerisine yerleştirilen çubuk ısıtıcılar ile istenilen sıcaklığa ısıtılmaktadır.

PSJ aktuatör şekilde görülen sinyal jeneratörü ile sürülen MOFSET devresinin transformatörü tetiklemesi ile istenilen voltaj, frekans ve duty cycle değerlerinde çalıştırılmaktadır. Yakıt pilinin polarizasyon ve ömür testleri akım toplama plakalarına bağlanan BK Precision 8514 markalı (Fotoğraf 3.8(b)) elektronik yük yardımıyla yapılmıştır. Bir sonraki bölümde bu araştırmanın sonuçları sunulacak ve literatürdeki diğer sentetik jet aktuatörlü katot uygulamaları ile karşılaştırılacaktır.



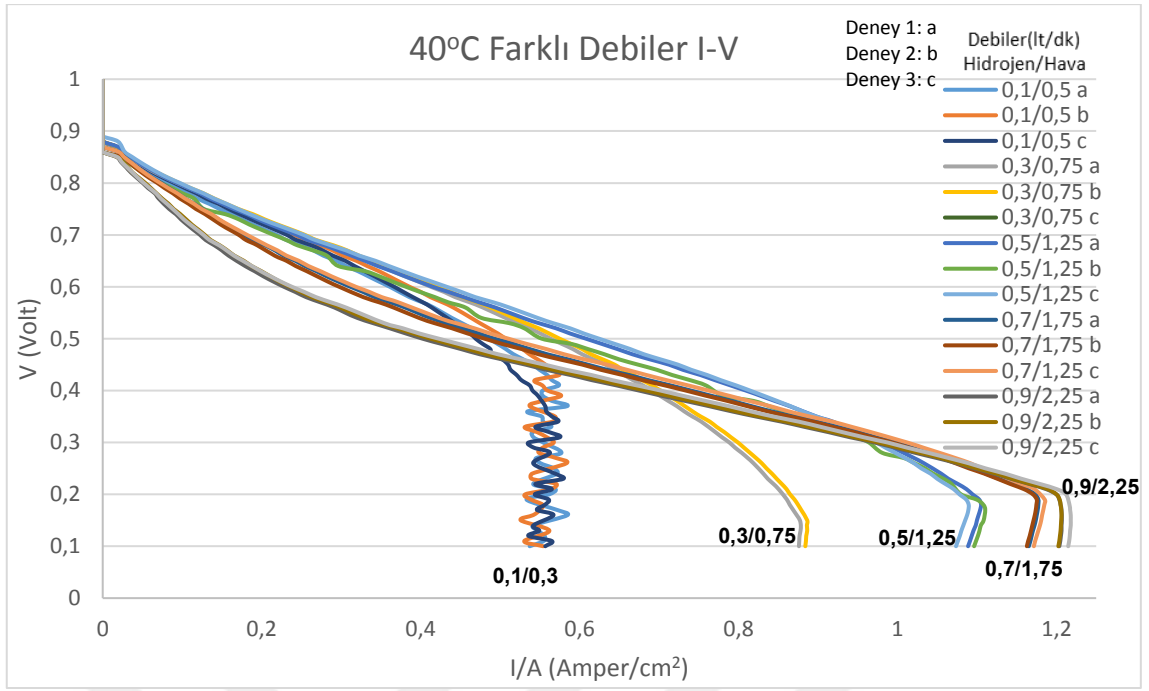
BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

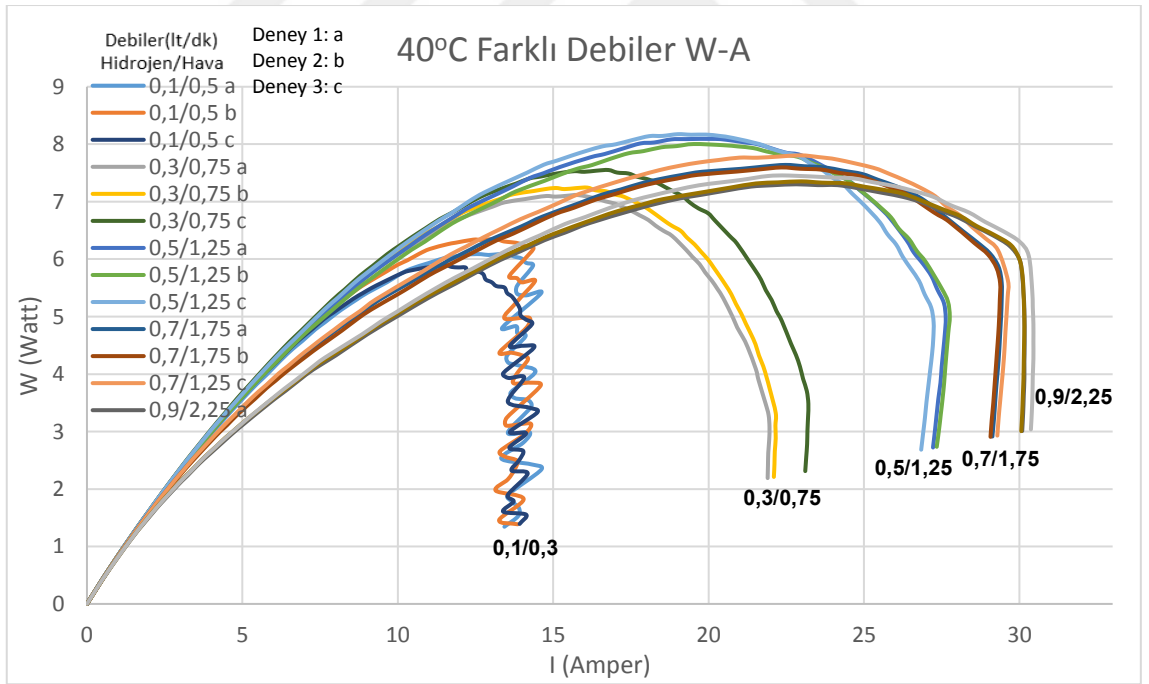
Plazma sentetik jet aktüatörünün yakıt piline uygulanması deneylerine geçmeden önce PEM yakıt pilinin standart koşullarda deneyleri yapılmıştır. Karakterizasyon deneyleri 3'lü düz paralel serpantin akış kanallı yakıt pilinde gerçekleştirilmiştir. Bunun için, farklı debilerde ve sıcaklıklarda polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Farklı debilerdeki deneyler 3 kere tekrarlanıp polarizasyon eğrileri arasında 20 dk beklenmiştir. Hücre çalıştırılmadan önce ve deneylerin bitiminde kanallar azot ile temizlenmiştir. Şekil 4.1'de farklı anot ve katot gaz debilerinde 40° C hücre sıcaklığında polarizasyon eğrileri görülmektedir. Aynı deney sonuçlarından oluşturulan güç-akım grafiği ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Özellikle, Şekil 4.2'de verilen güç-akım grafiklerine bakıldığında en yüksek güç değerinin 0,5 SLPM hidrojen ve 1,25 SLPM hava debisi oranlarında olduğu görülmekte olup 20A civarında 8,1W'lık güç değeri elde edilmiştir. Ancak bu akışkan debisinde basıncın yüksek olması PSJ aktüatörün plazma oluşturmada zorlaştırmaktadır. Bu yakıt pili için düşük debilerde çalıştırılan hücrenin sınırlayıcı akım yoğunlukları grafiklerde keskin bir şekilde görülmüştür. Bu nedenle, plazma sentetik jet uygulamalarının ilk denemeleri 0.3 SLPM hidrojen ve 0.75 SLPM hava debilerinde test edilmiştir. Daha yüksek debilerin tercih edilmeme sebebi, akışın sentetik jeti sönmemesinin yüksek debilerde daha kuvvetli olması ve yüksek hava debilerinde katot giriş basıncının da yüksek olması, atmosfer basıncı seviyesinde güçlü bir şekilde oluşan plazmanın, nemin de etkisiyle oldukça zayıf jet oluşturmaktır.

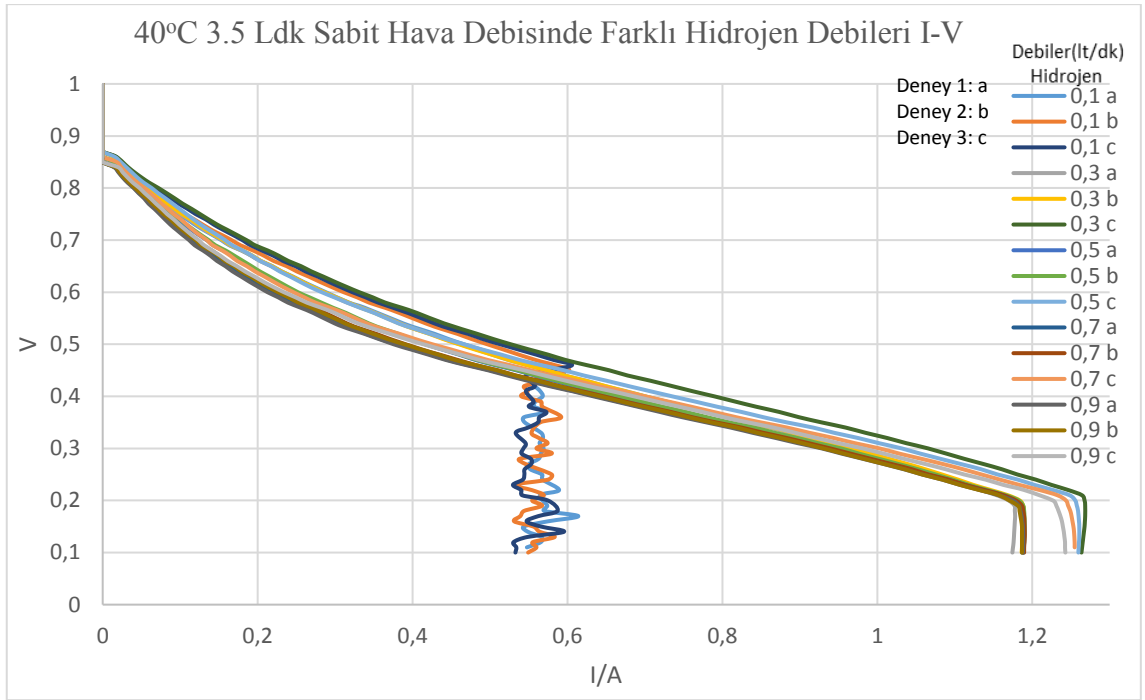
Şekil 4.1'de elde edilen sonuçlar ile sentetik jet uygulama sonuçlarına geçmeden önce yakıt pili karakteristiklerini daha iyi anlayabilmek için sabit 3.5 SLPM hava debisinde hücrenin hidrojen kullanımı incelenmiştir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de sabit hava debisinde, 0,1-0,9 SLPM aralığındaki farklı hidrojen debilerinde elde edilen polarizasyon eğrileri ve güç-akım eğrileri gösterilmiştir.



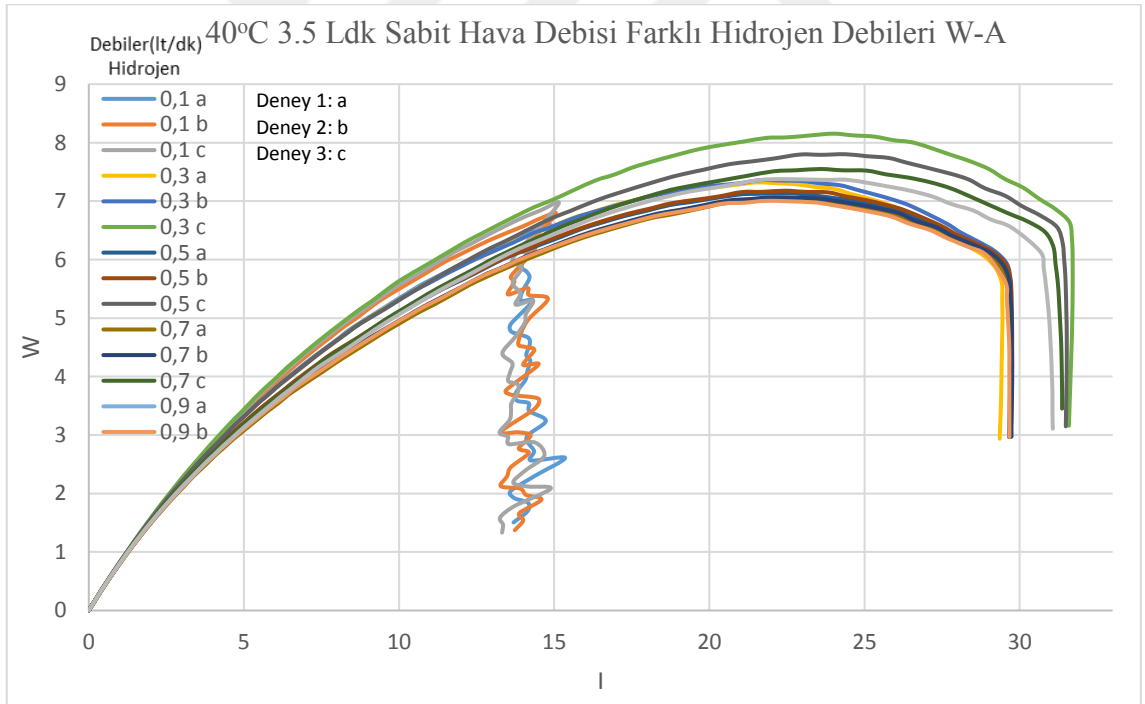
Şekil 4.1. Farklı debilerde 40° C hücre sıcaklığında polarizasyon eğrileri (Akansu vd., 2017)



Şekil 4.2. Farklı debilerde 40° C hücre sıcaklığında güç-akım eğrileri (Akansu vd., 2017)



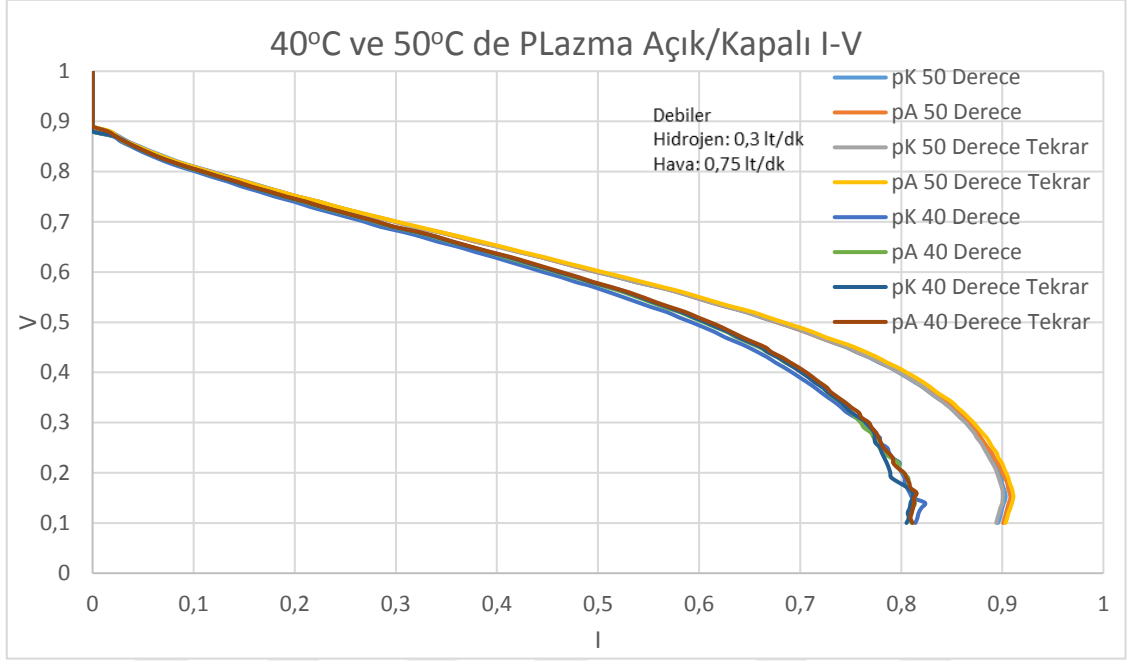
Şekil 4.3. Sabit 3.5 Ldk hava debisinde farklı hidrojen debilerinde polarizasyon eğrileri



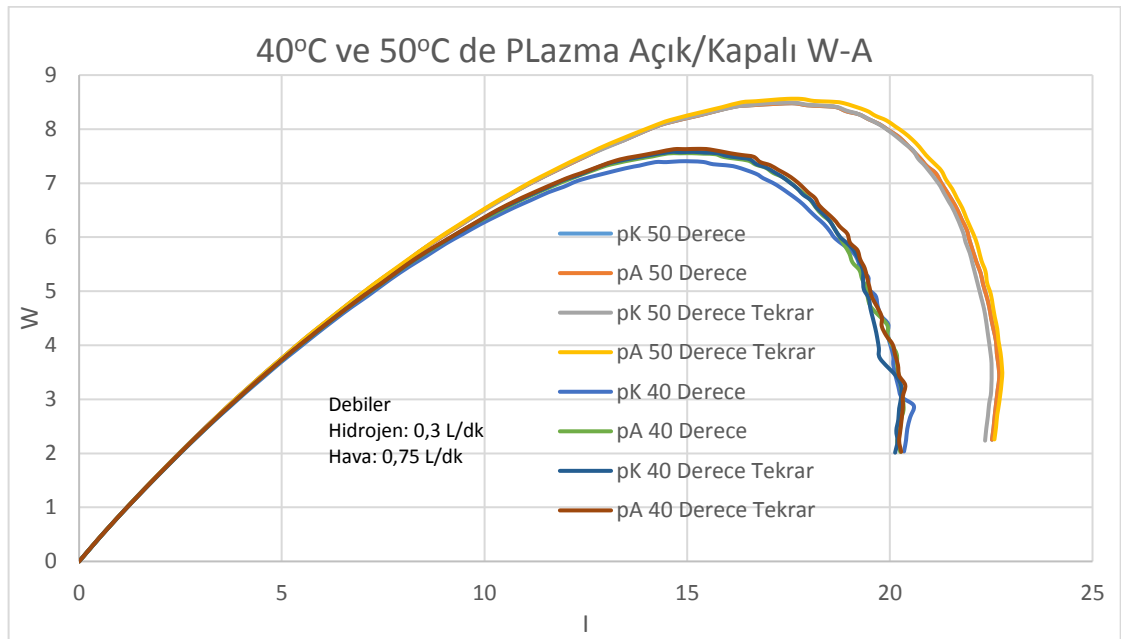
Şekil 4.4. Sabit 3.5 L/dk hava debisinde farklı hidrojen debilerinde güç-akım eğrileri

Yakıt pili standart halindeki testlerden aldığımız sonuçlar sonrasında 0.3 SLPM hidrojen debisi ve 0.75 SLPM hava debisi kullanarak farklı sıcaklıklarda plazma açık ve kapalı deneyleri yapılmıştır. Polarizasyon eğrileri arasındaki bekleme süresi 20 dk uzunluğundadır ve deneyler tekrarlanmıştır. Şekil 4.5'de polarizasyon eğrisi ve Şekil

4.6’da güç-zaman grafiği gösterilmiştir. Şekillerde pA ve pK kısaltmaları sırasıyla PSJ aktuatörün açık ve kapalı olduğu durumları ifade etmektedir. Şekil 4.5 ve 4.6’da plazma sentetik jet için uygun olacağı düşünülen 0,3/0,75 debi oranlarında aynı zamanda hücre sıcaklığının 40°C ve 50°C değerlerindeki etkileri sunulmuştur.

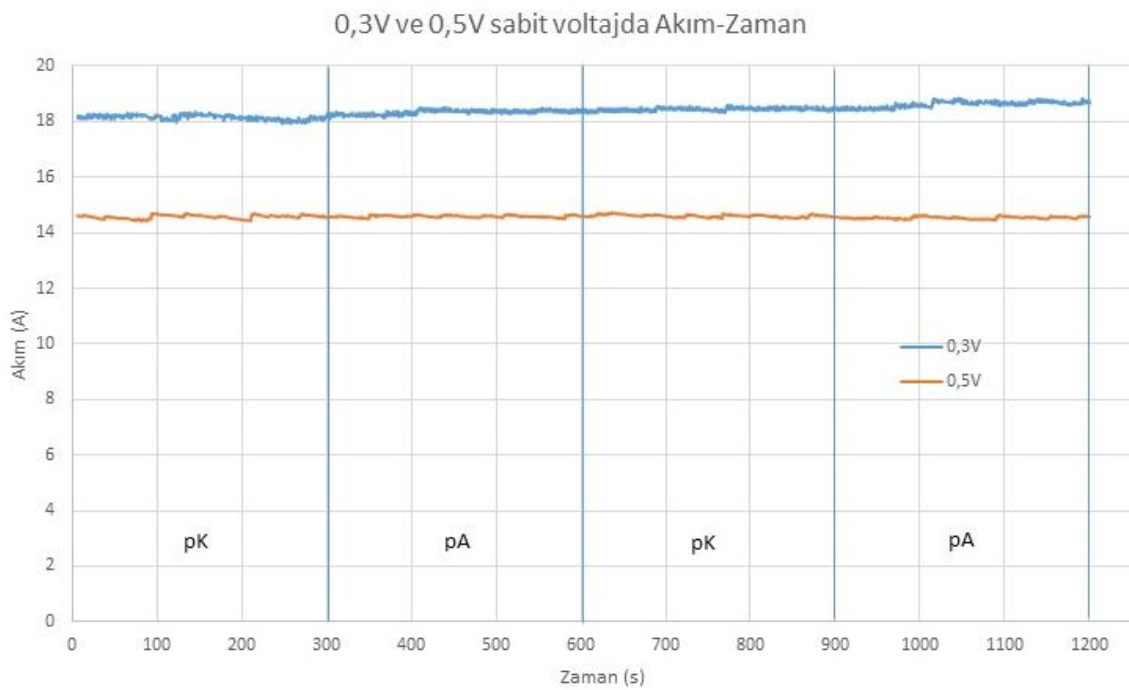


Şekil 4.5. Plazma açık ve kapalıyken sabit debilerde ve farklı sıcaklıklarda polarizasyon eğrisi (Akansu vd., 2017)



Şekil 4.6. Plazma açık ve kapalıyken sabit debilerde ve farklı sıcaklıklarda güç-akım eğrisi (Akansu vd., 2017)

Hücre sıcaklığının 10°C artması maksimum gücün 7.5W'dan 8,5W değerine çıkmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte plazmanın açık veya kapalı olması durumlarının kayda değer bir etki oluşturmadığı görülmüştür. Bununla birlikte oluşan etkinin plazma sentetik jettinden kaynaklanıp kaynaklanmadığını daha iyi ortaya koyabilmek için 0.3 L/dk hidrojen ve 0.75 L/dk hava debisinde sabit sıcaklıkta akım-zaman grafiği alınmıştır. Plazmanın kapalı ve açık olduğu bölgeler Şekil 4.7'de 300 saniyelik zaman periyotları içerisinde gösterilmiştir. Sentetik jet sürüm frekansı %50 duty cycle ve 0.1 Hz frekansta yapılmıştır. Yakıt pilinin elektronik yük ile 0,3 ve 0,5 V sabit voltaj altında akım-zaman geçmişi elde edilmiştir. Sabit 0,5 V gerilim durumunda akımın sabit kaldığı, buna karşın 0,3 V durumunda pA modlarında akımda çok azda olsa bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

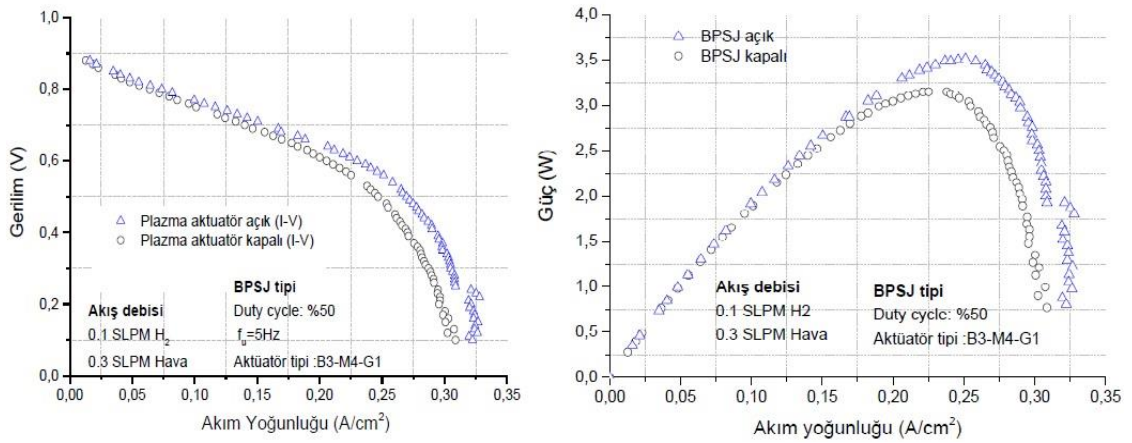


Şekil 4.7. Plazma açık ve kapalıyken sabit debilerde akım-zaman grafiği (Akansu vd., 2017)

Literatürde görülen diğer araştırmalarda olduğu gibi sentetik jetler kanalların oluşturduğu basınç ve katot akışını yenebilmesi için düşük debilerde çalışılması hedeflenmiştir. Plazma sentetik jetin hücre üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için akış debileri düşürülmüştür. Sentetik jet uygulaması katot tarafından yapıldığı için kullanılan hava debisi sentetik jetin etkisini sönmölemektedir. Daha düşük debilerde deneyler yapabilmek için düşürülen hava debisine oranla hidrojen debisinin de düşürülmesi gerekmektedir. Bunun için 0,1/0,3 SLPM yakıt/hava debi oranında deneylerin yapılmasına karar

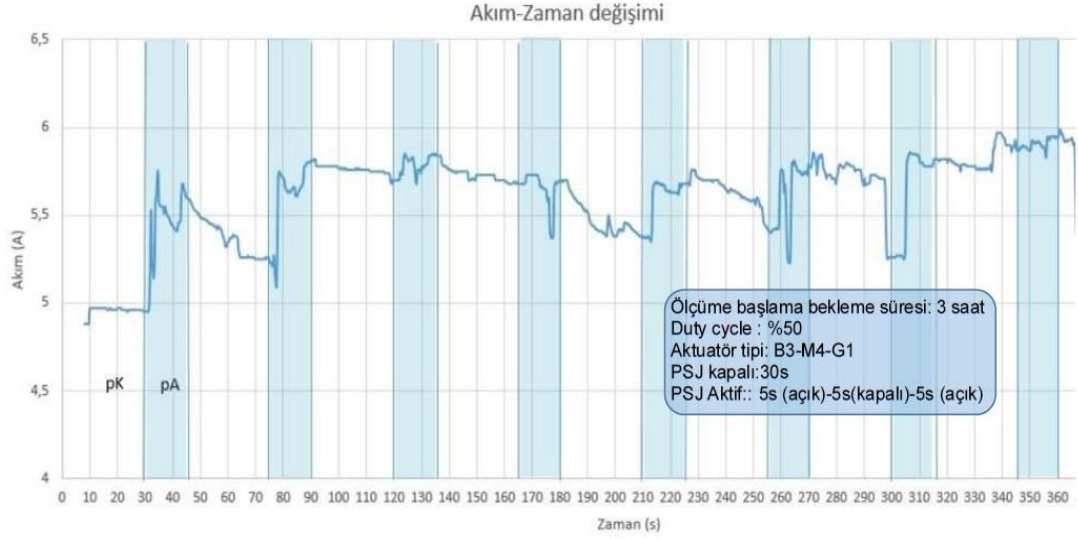
verilmiştir. Ancak, Şekil 4.1 ve 4.2’de görüldüğü gibi bu düşük debi oranlarında 3’lü paralel serpantin her bir kanalındaki akış yapılarındaki kararsızlıklar nedeniyle polarizasyon eğrilerinde ani düşüşler ve dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu nedenle düşük debili PSJ uygulamaları için tekli serpantinli yakıt pili kullanılmıştır. Ayrıca, PSJ aktuatörünün oluşturduğu salınımlı akışın, tekli akış kanalına aktarılması nedeniyle sönümlenme etkisinin de azalacağı düşünülmüştür.

Böylece katot kısmında tutucu plaka üzerine doğrudan bağlantılı PSJ aktuatörünün oluşturduğu jet akışının hücre üzerindeki etkisi Şekil 4.8’de verilen polarizasyon eğrilerinde görülmektedir. Buradaki plazma sentetik jet %50 duty-cycle ve 5 Hz frekans değerlerinde gönderilmiştir. Sentetik jetin etkisi sonucu maksimum güç yoğunluğunda %12’lik artış oluşmaktadır.



Şekil 4.8. Aktuatörün açık ve kapalı olduğu durumlar için polarizasyon ve güç-akım eğrisi (Akansu vd., 2017; Seyhan ve Akansu, 2019)

Son olarak %50 duty cycle ve 5 Hz uyarım frekansında 0.1 SLPM hidrojen/0.3 SLPM hava debilerinde sentetik jetin açılıp kapatıldığı akım-zaman değerleri Şekil 4.9’de verilmiştir. Burada sentetik jet 5s açık, 5s kapalı ve 5s tekrar açık olacak şekilde aktif edilmekte ve sonrasında 30s kapalı durumda bekletilmektedir. Akım-zaman grafiklerinde görülen plazma sentetik jet kullanım bölgelerindeki artışlar, hücre içinde biriken suyun dağılması ve salınımın etkisiyle 0.8 A kadar yükselmelere sebep olmaktadır. Proje kapsamında gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, projenin birinci aşamasında optimize edilerek geliştirilen ve Seyhan (2015) tarafından yapılan yüksek lisans tezinde ve proje sonuç raporunda (Akansu vd., 2017) detayları açıklanan buji temelli sentetik jet aktuatörü kullanılmıştır.



Şekil 4.9. Plazma sentetik jetin açılıp kapatıldığı (30 s kapalı-5 s açık- 5s kapalı-5 s açık- 30 s kapalı) akım-zaman gösterimi (Akansu vd., 2017)

Projenin ikinci aşaması olan PSJ aktüatörünün yakıt piline uygulanması için farklı bağlantı yapılarının incelenmesi ağırlıklı olarak bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiştir. Dört farklı bağlantı yapısı süreç içerisinde test edilmiş olmasına rağmen tutucu plaka üzerine yapılan doğrudan bağlantı hariç diğerlerinde herhangi bir etki görülmemiştir. Tutucu plaka üzerine yapılan doğrudan bağlantı durumunda, yakıt pilinin yüksek voltaj elektrik alanından etkilenmesini önlemek ve hidrojenin patlama riskleri nedeniyle ancak düşük debilerde ve aktüatörün sınırlı parametrelerinde çalışılmıştır. Bu nedenle, önceki bağlantı tipleri için çok sayıda deney yapılmış olmasına rağmen sürekli olarak etkinin görüleceği düzenlemenin iyileştirilmesi üzerine odaklanıldığından, bu deneylerin sonuçları düzenli olarak tutulmamış ve sonuçları burada sunulmamıştır.

PEM yakıt pillerinin katot kısımlarında sentetik jet uygulamaları deney düzenekleri ve sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Yapılan araştırmalarda standart yöntemler ile sentetik jet kullanım uygunlukları karşılaştırılmıştır. Yüksek genlik ve frekanslarda daha iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen ses, güç kullanımı ve boyutsal sınırlamalar göz önüne alınarak araştırmaların belirlediği sınırlardaki sonuçlar sunulmuştur. Her bir çalışmada çalışma şartlarının ve ele alınan parametrelerin farklı olması ve aktüatörler tarafından tüketilen gücün dikkate alınmamış olması nedeniyle birbirleri ile doğrudan karşılaştırılmaları mümkün olmamaktadır. Bununla birlikte, Hwang vd. (2010) tarafından

piston silindir kullanılarak oluşturulan salınlı akışta güç yoğunluğunda 6 katına kadar bir iyileşme elde edilmiştir. Bu durumda 1,16W güç değeri 7,07W değerine çıkmaktadır. Bu çalışmada piston silindir tipi aktuatörün 5W gücündeki motor tarafından tahrik edildiği ifade edilmektedir. Bu güç yoğunluğunda elde edilen artışın diğer aktuatör tiplerine göre çok fazla avantajlı olmayabileceği düşünülmektedir.

Çizelge 4.1. PEM yakıt pillerinin katot kısmında sentetik jetlerin etkileri

Araştırma	Aktif Alan	Sentetik Jet	Bulgular
Seo vd. (2014)	4 cm ²	Piezoelektrik	%40 maksimum güç yoğunluğu artışı
Han vd. (2012)	25 cm ²	Hoparlör tipi	Akım 0.6 A/(cm ²) ve güç yoğunluğu 2.26 W/(cm ²) Wo sayısı 6.55 değerinde sırasıyla 0.74 A/(cm ²) ve 2.54 W/(cm ²) değerlerine yükselmiştir
Hwang vd. (2010)	61.3 cm ²	Piston-silindir	18.9 mW/(cm ²) güç yoğunluğundan 0.0595 m süpürme mesafesinde 115.4 mW/(cm ²) değerine yükselme
Kim vd. (2008)	25 cm ²	Hoparlör tipi	10, 20 ve 30 L/dk debilerde sırasıyla %62, %13 ve %5 maksimum güç artışı
Akansı vd. (2017)	25 cm ²	Plazma Sentetik Jet	Maksimum güç yoğunluğunda %12 yükselme ve 5 dakikalık akım testinde 0.8 A iyileştirme, düşük aktuatör güç tüketimi

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bu çalışmada, PEM yakıt hücrelerinde performansın arttırılmasına yönelik olarak akış kanallarında sentetik jet aktuatörleri kullanarak salınımlı akış oluşturan literatürdeki çalışmalar incelenmiş ve bu tez çalışmasının da parçası olduğu 213M179 nolu TÜBİTAK proje kapsamında elde edilen bazı sonuçların ile karşılaştırması yapılmıştır. Özellikle PEM yakıt pillerine uygulanan sentetik jet aktuatörleri olarak literatürde piston-silindir, hoparlör ve piezoelektrik tabanlı aktuatörler kullanılırken, bu çalışmada buji temelli olarak geliştirilmiş olan plazma sentetik jet aktuatörünün kullanımı ele alınmıştır. Bu çalışmalarda, çalışma şartlarının ve ele alınan parametrelerin farklı olması nedeniyle birbirleri ile doğrudan karşılaştırılmaları mümkün olmamakla birlikte yakıt hücresinin nominal çalışma debilerinden daha düşük değerlerinde kayda değer etkilerinin olduğu görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda aktuatörün uygulandığı kesim ağırlıklı olarak katot tarafı olurken, tek anot tarafında veya her iki tarafta kullanıldığı sadece birer çalışma vardır.

Literatürde yapılan araştırmalarda aktuatörler tarafından tüketilen gücün dikkate alınmamış olması doğrudan bir yöntemin diğer aktuatör tiplerine göre güç yoğunluğunda daha fazla artış sağladığını söylemek mümkün olamamaktadır. Yapılan bu çalışmalarda, güç yoğunluğundaki maksimum artışın, hoparlör tipinde %62, piezoelektrik tipinde %40, piston-silindir tipinde 6 katı mertebelerinde olduğu görülmüştür. Piston-silindir tipinde elde edilen artış 5.9W olurken, sistemde aktuatörün 5W gücündeki motor tarafından tahrik edildiği ifade edilmektedir. Bu çalışmada daha önce geliştirilmiş olan buji temelli plazma sentetik jet aktuatörü kullanılmıştır. Aktuatörün yakıt piline bağlanmasında dört farklı düzenek geliştirilmiştir.

Bunlar; Y tüpü bağlantısı, hücre dışı pleksiglas kanallı bağlantı, tutucu plakaya entegre bağlantı ve akış kanalı plakasına doğrudan bağlantı şeklindedir. Bu yöntemlerden sadece tutucu plakaya entegre bağlantı şeklinde oluşturulan salınımlı akışın yakıt pili üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Yakıt pili, 0.3 SLPM hidrojen ve 0.75 SLPM hava debilerinde çalıştırıldığında, salınımlı akışın polarizasyon ve akım-zaman geçmişi ölçümlerinde çok küçük etkiye sahip olması

nedeniyle literatürde olduğu gibi daha düşük stokiyometri oranlardaki etkisi incelenmiştir.

Debinin 0.1 SLPM hidrojen ve 0.3 SLPM hava olması durumunda plazma sentetik jet aktuatörünün etkisi ile polarizasyon eğrisindeki maksimum güç yoğunluğunda %12 artış tespit edilmiştir. Burada her iki eğrinin yaklaşık 0.55V değerindeki aynı çalışma geriliminde olduğu ve aktuatörün etkisi ile sınırlayıcı akımın yükseldiği anlaşılmıştır. Aynı debilerde akım-zaman grafiğinde plazma aktuatörünün uzun 30s kapalı ve kısa 5s açık, 5s kapalı, 5s açık sürüm şeklinde çalışması durumunda, aktuatörün açıldığı anlarda akım şiddetinde ani sıçramaların olduğu görülmüştür.

Plazma sentetik jet aktuatörünün etkisi ile oluşturulan salınımlı akışın kanallardaki havanın gaz difüzyon tabakasına geçişe yardımcı olduğu ve oluşan su birikiminin tahliyesinde etkili olduğu anlaşılmıştır.

Kullanılan PSJ aktuatörünün salınımlı akış üretebilme kabiliyeti, aktuatör içerisinde kaliteli bir plazma oluşturulmasına bağlı olduğundan yüksek stokiyometri oranlarında katot kanal basıncının yüksek olması plazma oluşumunu zorlaştırmıştır. Ayrıca katot akışkanının nemlendirilmesi zorunluluğu ve kanallarda oluşan su birikiminin plazmanın üretilmesinde olumsuz etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Plazmanın kalitesini artırmak amacıyla, katot tarafındaki hava basıncının azaltılması için daha küçük aktif alanlı yakıt pili kullanılmasının ve akatuatör sayısının artırılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Akansu, Y.E., Yeşilday, C., Seyhan, M., Hammutoğlu, V. ve Chowdhury, M.Z., 213M179: PEM Yakıt Pillerinde Plazma Sentetik Jet Kullanılarak Yakıt Pili Performansının İyileştirilmesi, *Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu*, Niğde, Şubat 2017.

Barbir, F., Pem Fuel Cells Theory and Practice, *Elsevier Inc.*, Waltham, 2013.

Bladergroen, B., Su, H., Pasupathi, S. and Linkov, V., "Overview of Membrane Electrode Assembly Preparation Methods for Solid Polymer Electrolyte Electrolyzer", in Electrolysis, Klepernis, J. and Linkov, V., *Intechopen*, 2012.

Choi, J.W., Hwang, Y.S., Seo, J.H., Lee, D.H., Cha, S.W. and Kim, M.S., "An experimental study on the purge characteristics of the cathodic dead-end mode PEMFC for the submarine or aerospace applications and performance improvement with pulsation effects", *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 3698-3711, 2010a.

Choi, J.W., Hwang, Y.S., Cha, S.W. and Kim, M.S., "Experimental study on enhancing the fuel efficiency of an anodic dead-end mode polymer electrolyte membrane fuel cell by oscillating the hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 12469-12479, 2010b.

Cleghorn, S., Kolde, J. and Liu, W., "Catalyst coated composite membranes", in Handbook of Fuel Cells-Fundamentals, Technology and Applications, Vielstich, W., Gasteiger, H.A., Lamm, A. and Yokokawa, H., *John Wiley & Sons, Ltd.*, 2010.

Costamagna, P. and Srinivsan, S., "Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 200 Part I. Fundamental scientific aspects", *Journal of Power Sources* 102, 253-269, 2001.

Doyle, M. and Rajendran, G., “Perfluorinated membranes”, in Handbook of Fuel Cells-Fundamentals, Technology and Applications, Vielstich, W., Gasteiger, H.A., Lamm, A. and Yokokawa, H., **John Wiley & Sons, Ltd.**, 2010.

Han, H.S., Kim, Y.H., Kim, S.Y. and Hyun, J.M., “Effect of flow pulsation on mass transport in a cathode channel of polymer electrolyte membrane fuel cell”, **Journal of Power Sources** 213, 145-155, 2012.

Hwang, Y.S., Lee, D.Y., Choi J.W., Kim S.Y., Cho, S.H., Joonho, P., Kim, M.S., Jang, J.H., Kim, S.H. and Cha, S.W., “Enhanced diffusion in polymer electrolyte membrane fuel cells using oscillating flow”, **International Journal of Hydrogen Energy** 35, 3676-3683, 2010.

Joshi, C.H., Kamm, R.D., Drazen, J.M. and Slutsky, A.S., “An experimental study of gas exchange in laminar oscillatory flow”, **Journal of Fluid Mechanics** 133, 245-254, 1983.

Katz, E., Shipway, A. N. and Willner, I., “Biochemical Fuel Cells”, in Handbook of Fuel Cell-Fundamentals, Technology and Applications, Vielstich, W., Gasteiger, H.A., Lamm, A. and Yokokawa, H., **John Wiley & Sons, Ltd.**, 2010.

Kim, Y.H., Han, H.S., Kim, S.Y. and Rhee, G.H., “Influence of cathode flow pulsation on performance of proton-exchange membrane fuel cell”, **Journal of Power Sources** 185, 112-117, 2008.

Kurzweg, U.H., “Enhanced heat conduction in oscillating viscous flow within parallel-plate channels”, **Journal of Fluid Mechanics** 156, 291-300, 1985.

Larminie, J. and Dicks, A., Fuel Cell Systems Explained, 2nd ed, **John Wiley & Sons Ltd.** Chichester, 2003.

Liu, H., Narayanan, R. and Logan, B., “Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell”, **Environmental Science and Technology** Vol. 38(7), 2281-2285, 2004.

Liu, Z., Eriqitai and Hong, L., “Numerical Study of a Novel Piston-type Synthtic Jet Actuator with a Quick-return Characteristic”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 187, 012030, 2017.

Ma, H.K., Cheng, H.M., Cheng, W.Y., Fang, F.M. and Luo, W.F., “Development of a piezoelectric proton exchange membrane fuel cell stack (PZT-Stack)”, *Journal of Power Sources* 240, 314-322, 2013.

Ma, H.K., Hsu, Y.L. and Luo, W.F., “Development of a Bi-cell Proton Exchange Membrane Fuel Cell with Optimized Groove-designed Piezoelectric Actuator”, *Fuel Cells* 17(6), 752-761, 2017.

Mane, P., Mossi, K. and Bryant, R., “Synthetic jets with piezoelectric diaphragms”, *Proceeding of SPIE-The International Society for Optical Engineering* 5761, 233-243, 2005.

Mench, M.M., Chance, H. M. and Yang, C. Y., “Dimethyl Ether Polymer Electrolyte Fuel Cells for Portable Applications”, *Journal of Electrochemical Society* Vol. 1, A149-A150, 2004.

Mench, M.M., Fuel Cell Engines, *John Wiley & Sons, Inc.*, New Jersey, 2008.

Mohseni, K. and Mittal, R., Synthetic Jets Fundamentals and Applications, *Taylor & Francis Group, LLC*, 2015.

Narayanaswamy, V., Raja, L.L. and Clemens, T., “Characterization of a High-Frequency Pulsed-Plasma Jet Actuator for Supersonic Flow Control”, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal* 48(2), 297-305, 2010.

Park, S., Lee, J.W. and Popov, B.N., “A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: Materials and design”, *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 5850-5865, 2012.

Peled, E., Duvdevani T., Aharon A. and Melman A., “New Fuels as Alternatives to Methanol for Direct Oxidation Fuel Cells” *Electrochemical and Solid-State Letters* 4(1), A38-A41, 2001.

Rylatt, D.I. and O’Donovan, T.S., “Heat transfer enhancement to a confined impinging synthetic air jet”, *Applied Thermal Engineering* 51, 468-475, 2013.

Schafer, M.A. and Allen, J.S. “Improved Water Removal from Fuel Cell Flow Channels via Natural Frequency Excitation of Free Surfaces”, *ECS Transactions* 41(1), 1887-1896, 2011.

Seo, Y.H., Kim, H.J., Jang, W.K. and Kim B.H., “Development of Active Breathing Micro PEM Fuel Cell”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 1(2), 101-106, 2014.

Service, R. F., “New Tigers in the Fuel Cell Tank”, *Science* 288, 1955-1957, 2000.

Seyhan, M., Buji Plazma Sentetik Jet Aktüatörünün Pem Yakıt Pili Performansı Üzerine Etkisini İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s. 41, 2015.

Seyhan, M and Akansu, Y.E., “The effect of a novel spark-plug plasma synthetic jet actuator on the performance of a PEM fuel cell”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 140, 147-151, 2019.

Watson, E.J., “Diffusion in oscillatory pipe flow”, *Journal of Fluid Mechanics* 133, 233-244, 1983.

Warshay, M. and Prokopius, P. R. “The Fuel Cell in Space: Yesterday, Today and Tomorrow.” *Journal of Power Sources* 29, 193-200, 1990.

Yang, X., Zhou, Z., Cho, H. and Luo, X., “Study on a PZT-actuated diaphragm pump for air supply for micro fuel cells”, *Sensors and Actuators A: Physical* 130-131, 531-536, 2006.

Yokokawa H. and Sakai N., “History of High Temperature Fuel Cell Development”, in Handbook of Fuel Cells-Fundamentals, Technology and Applications, Vielstich, W., Gasteiger, H.A., Lamm, A. and Yokokawa, H., *John Wiley & Sons, Ltd.*, 2010.

Zawodzinski Jr., T.A., Springer, T.E., Davey, J., Jestel, R., Lopez, C., Valerio, J. and Gottesfeld, S., “A Comparative Study of Water Uptake By and Transport Through Ionomeric Fuel Cell Membranes”, *Journal of Electrochemical Society* 140(7), 1981-1985, 1993.



ÖZ GEÇMİŞ

Vuralcan HAMMUTOĞLU 10.10.1991 tarihinde Ankara’da doğdu. İlköğreniminin bir kısmını Ankara’da bir kısmını Almanya’nın Hamburg şehrinde tamamladı. Lise öğrenimini Ankara’da tamamladı. 2010 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden Haziran 2014’de mezun oldu. 2014 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2015-2016 yılları arasında 213M179 numaralı projede Niğde Üniversitesinde proje asistanı olarak görev yaptı. O tarihten beri aynı bölümde yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.

