

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Pd-Zn KAPLI BAKIR KÖPÜK KULLANIMININ DOĞRUDAN
BORHİDRÜR YAKIT PİLİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

İPEK ÇAĞLAYAN

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Pd-Zn KAPLI BAKIR KÖPÜK KULLANIMININ DOĞRUDAN
BORHİDRÜR YAKIT PİLİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

İPEK ÇAĞLAYAN

Prof. Dr. Cenk ÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Halil İbrahim SARAÇ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İsmet TIKIZ
Jüri Üyesi, Kırklareli Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 09.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER

Tez yazım sürecinde her türlü desteği veren, çalışma disiplini aşıl原因an, akademik olarak gelişmemi sağlayan ve üzerimde emeği olan danışmanım Prof. Dr. Cenk ÇELİK'e teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarım boyunca değerli bilgilerinden ve desteklerinden faydalandığım Prof. Dr. Muharrem YILMAZ, Prof. Dr. Sibel ZOR ve Prof. Dr. Halil İbrahim SARAÇ hocalarıma ve yıl içinde kaybettiğim Prof. Dr. Mustafa ÇÖL hocama teşekkür ederim.

Yapılan çalışma TÜBİTAK (215M255 Nolu Proje) desteği ile sundukları imkanlardan dolayı teşekkür ederim.

Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Birimi'ne 2017/101 nolu yüksek lisans tez projeme desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Çalışmamda yanımda olan, bilgi paylaşımlarında bulunduğum, destek ve yardımlarını esirgemeyen yüksek lisans ve doktora öğrencisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında beni her konuda destekleyen, geleceğim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, beni en iyi şekilde yetiştiren aileme ve son olarak ilham kaynağım bütün başarılarımı adadığım merhum babacığımın teşekkürlerimi borç bilirim.

Haziran – 2019

İpek ÇAĞLAYAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİ	3
2. YAKIT PİLİ	8
2.1. Yakıt Pili Tarihçesi	8
2.2. Yakıt Pili Bileşenleri	12
2.2.1. Gaz difüzyon tabakası (GDT)	13
2.2.2. Akış dağıtıcı plaka.....	14
2.2.3. Elektrolit.....	15
2.3. Yakıt Pili Çeşitleri.....	16
2.3.1. Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP).....	17
2.3.2. Alkali yakıt pili (AYP).....	19
2.3.3. Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP).....	20
2.3.4. Katı oksit yakıt pili (KOYP)	21
2.3.5. Formik asit yakıt pili (FAYP)	22
3. DOĞRUDAN BOR HİDRÜR YAKIT PİLİ.....	23
3.1. Katyon Değişim Membranlı Doğrudan Bor Hidrür Yakıt Pili (KDM- DBHYP)	24
3.2. Anyon Değişim Membranlı Doğrudan Bor Hidrür Yakıt Pili (ADM- DBHYP)	25
3.3. DBHYP Anot ve Katot Katalizör Malzemeleri.....	25
4. DENEYSEL ÇALIŞMA İÇİN LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	27
4.1. Metal Köpüklerin Sıvı Yakıt Pili Sistemlerinde Kullanılması.....	27
4.1.1. Doğrudan metanol yakıt pilinde metal köpük kullanımı.....	29
4.1.2. Doğrudan etanol yakıt pilinde metal köpük kullanımı.....	36
4.1.3. Doğrudan glikoz yakıt pilinde metal köpük kullanımı	37
4.1.4. Doğrudan bor hidrür yakıt pilinde metal köpük kullanımı	39
4.1.5. Diğer yakıt pilleri	39
4.2. Elektrolitik Kaplama	40
4.2.1. Kaplama prensibi	40
4.2.2. Bakır köpüklerin kaplanması	42
5. DENEYSEL YÖNTEM VE BULGULAR	44
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	64
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	75
ÖZGEÇMİŞ	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	İçten yanmalı motorlar ile yakıt pillerinin karşılaştırılması	4
Şekil 1.2.	Yakıt pili çalışma mekanizması	4
Şekil 2.1.	Grove'nin Gaz Voltaik Batarya'sı ilk yakıt pili	9
Şekil 2.2.	Bacon'nun geliştirdiği hidrojen-oksijen yakıt pili (1960).....	10
Şekil 2.3.	Harry Karl Ihrig'in Allis-Chalmers isimli.....	10
Şekil 2.4.	a) Apollo uzay gemisinde kullanılan Bacon yakıt pili b) Gemini V uzay gemisi PEMYP	11
Şekil 2.5.	Yakıt hücresinin a)Şematik gösterimi b) MEA.....	12
Şekil 2.6.	GDL malzemeleri a) karbon kumaş b) karbon kağıt c) metal köpük d) paslanmaz çelik mesh	14
Şekil 2.7.	Akış dağıtıcı plaka kanal tasarımları a) paralel b) serpantin c) paralel serpantin	15
Şekil 2.8.	Yakıt pili türleri çalışma mekanizmalarının şematik gösterimi	17
Şekil 2.9.	PEMYP'nin çalışma mekanizmasının şematik gösterimi	18
Şekil 2.10.	AYP çalışma mekanizması.....	19
Şekil 2.11.	EKYP'nin çalışma mekanizmasının şematik gösterimi	20
Şekil 3.1.	KDM-DBYP A) KDM-DBHYP de reaksiyon mekanizması B) KDM-DBHYP'nin kütle transfer mekanizması ve elektrik üretim mekanizmasının şematik gösterimi.....	24
Şekil 3.2.	ADM-DBHYP de reaksiyon mekanizması	25
Şekil 4.1.	Yakıt hücresi içinde DT ve katalizör tabakasının yapısı.....	28
Şekil 4.2.	Doğrudan metanol yakıt hücresinin anot tarafında meydana gelen iki fazlı akış	30
Şekil 4.3.	Elektrolitik kaplama sisteminin şematik gösterimi	41
Şekil 4.4.	Kaplama mekanizmasının şematik gösterimi.....	41
Şekil 5.1.	Bakır köpükleri kaplamak için kullanılan ön hazırlık banyoları.....	45
Şekil 5.2.	Sırası ile kaplamasız ticari bakır köpük, Pd-Zn ile kaplanmış ticari bakır köpük, Pd ile kaplanmış bakır köpük	45
Şekil 5.3.	Bakır köpükleri kaplamak için hazırlanmış Pd-Zn kaplama banyosu.....	46
Şekil 5.4.	Pd-Zn kaplanmış bakır köpüklerin kesiti alınmış görüntüsü	47
Şekil 5.5.	Numune 3 için SEM görüntüsü	48
Şekil 5.6.	Numune 3 için EDX analizi	48
Şekil 5.7.	Numune 4 için SEM görüntüsü	49
Şekil 5.8.	Numune 4 için EDX analizi	49
Şekil 5.9.	Numune 5 için SEM görüntüsü	50
Şekil 5.10.	Numune 5 için EDX analizi	50
Şekil 5.11.	Numune 7 için SEM görüntüsü	51
Şekil 5.12.	Numune 7 için EDX analizi	51
Şekil 5.13.	Numune 10 için SEM görüntüsü	52
Şekil 5.14.	Numune 10 için EDX analizi	52
Şekil 5.15.	Numune 13 için SEM görüntüsü	53
Şekil 5.16.	Numune 13 için EDX analizi	53

Şekil 5.17. Sınırlandırıcı akım yoğunluğu işleminin daha iyi anlaşılması ile elde edilen operasyonel akım yoğunluğundaki artışın arkasındaki prensibi gösteren oksijen kütle transfer katsayısının farklı değerleri için polarizasyon eğrileri	55
Şekil 5.18. Tek hücre test sistemi	55
Şekil 5.19. Numune 3 için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1mg/cm ² Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH ₄ +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)	56
Şekil 5.20. Numune 4 için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1mg/cm ² Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH ₄ +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)	57
Şekil 5.21. Numune 5 için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1mg/cm ² Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH ₄ + %12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)	57
Şekil 5.22. Numune 7 için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1mg/cm ² Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH ₄ +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)	58
Şekil 5.23. Numune 10 için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1mg/cm ² Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%wt): %4 NaBH ₄ +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak).....	58
Şekil 5.24. Numune 13 için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1mg/cm ² Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH ₄ +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)	59
Şekil 5.25. 80°C'de en yüksek sonucu veren tek hücre test sonucu (Katot:1mg/cm ² Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH ₄ +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)	59
Şekil 5.26. Kaplanan köpükler için güç yoğunluğu kaplama voltajı karşılaştırılması	60
Şekil 5.27. Bakır köpüklerin performans karşılaştırma grafiği. Katot: 1mg/cm ² Pt/C, Sıcaklık: 80°C, Yakıt Çözeltisi (%ağ.): %2 NaBH ₄ + %12 NaOH, Membran: Nafyon117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak).....	60
Şekil 5.28. Konsantrasyonlarına göre kıyaslanma	61

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Yakıt pili türleri.....	17
Tablo 5.1. Yüzey temizleyici çözelti reçetesi.....	44
Tablo 5.2. Kostik daldırma çözeltisi reçetesi	44
Tablo 5.3. Nitrik asit desmutter çözeltisi reçetesi	45
Tablo 5.4. Pd-Zn kaplanan bakır köpüklerin değerleri.....	46
Tablo 5.5. Numune 3 için EDX analiz sonuçları.....	48
Tablo 5.6. Numune 4 için EDX analiz sonuçları.....	50
Tablo 5.7. Numune 5 için EDX analiz sonuçları.....	51
Tablo 5.8. Numune 7 için EDX analiz sonuçları.....	52
Tablo 5.9. Numune 10 için EDX analiz sonuçları.....	53
Tablo 5.10. Numune 13 için EDX analiz sonuçları.....	54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ag	: Gümüş
Au	: Altın
BH ₄	: Bor hidrür
Cu	: Bakır
K	: Potasyum
KBH ₄	: Potasyum bor hidrür
Na	: Sodyum
NaBH ₄	: Sodyum bor hidrür
NaOH	: Sodyum hidroksit
Ni	: Nikel
OH	: Hidroksil
Pd	: Paladyum
Pt	: Platin
PTFE	: Politetrafloretillen
ağ%	: Ağırlıkça yüzde

Kısaltmalar

ADM-DEYP	: Anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pili
ADM	: Anyon değişim membranı
ADP	: Akış dağıtıcı plaka
AYP	: Alkali yakıt pili
DBHYP	: Doğrudan bor hidrür yakıt pili
DEYP	: Doğrudan etanol yakıt pili
DGYP	: Doğrudan glikoz yakıt pili
DMYP	: Doğrudan metanol yakıt pili
DSYP	: Doğrudan sıvı yakıt pili
DT	: Difüzyon tabakası
EDX	: Enerji dağılımlı X-Işını
EKYP	: Erimiş karbonat yakıt pili
FAYP	: Fosforik asit yakıt pili
GDT	: Gaz difüzyon tabakası
KDM	: Katyon değişim membranı
KOYP	: Katı oksit yakıt pili
PEMYP	: Polimer elektrolit membranlı yakıt pili
PPI	: İnç başına düşen porozite
SEM	: Scanning electron microscope (Taramalı elektron mikroskobu)

Pd-Zn KAPLI BAKIR KÖPÜK KULLANIMININ DOĞRUDAN BORHİDRÜR YAKIT PİLİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Yakıt pili sistemleri hali hazırda gelişmekte olan ve geliştirilmesi gereken bir teknoloji olmasına rağmen yüksek enerji verimi, uzun çalışma süresi, sessiz çalışması ve çevreye zararlı atık oluşturmaması nedeniyle sanayinin birçok kolunun dikkatini çeken bir teknolojidir. Yakıt pili sistemlerinin ticarileştirilebilmesi için maliyet düşürücü, verimlilik artırıcı ve daha küçük hacimlerde daha yüksek güç sağlayan yakıt hücreleri elde edilmelidir. DBHYP'lerinin verimli, kararlı ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için anot difüzyon tabakası tasarımı büyük önem teşkil etmektedir. Bu sebeple tez kapsamında DBHYP için anot difüzyon tabakası üzerine çalışılmıştır. Metal köpükler yakıt pillerinde akış dağıtıcı plaka, elektrot mimarisi ve yakıt pilinin ısı yönetimini sağlamak için kullanılmaktadır. Özellikle akış dağıtıcı ve elektrot olarak metal köpük kullanılması hücre performansında, hücre ağırlık ve hacminde önemli artılar sağlamaktadır. Metal köpükler metalden gelen yüksek elektriksel ve termal iletkenlikleri, gözenekli yapının sağladığı yüksek geçirgenlik, dar akış kanalları, geniş özgül yüzey alan, kılcal ve difüzyon kuvvetleri sayesinde yakıt pilleri başta olmak üzere birçok mühendislik uygulamalarında mükemmel performans sağlayan bir malzemedir.

Bu çalışmada bakır köpük üzerine yapılan Pd-Zn kaplamaların DBHYP'nde verime etkisi incelenmiştir. Köpük kaplamaların karakterizasyonu için SEM ve EDX analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada kaplamaların farklı koşullardaki etkinliğinin yakıt pili performansına etkisini görebilmek için tek hücre testleri yapılmıştır. İnceleme sonucunda yakıt pilinde en iyi performans 80 °C sıcaklıkta 68,75 mA/cm² akım yoğunluğu ve 195,72 mW/cm² güç yoğunluğu değerleri ile numune 4'ten elde edilmiştir. Kaplama yapılmamış ticari bakır köpük, yalnızca Pd kaplanmış bakır köpük ve Pd-Zn kaplanmış bakır köpüklerin polarizasyon ve güç eğrilerine bakıldığında Pd-Zn kaplanmış bakır köpüğün performansının yakıt pili içerisinde daha yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Difüzyon Tabakası, Doğrudan Borhidrür Yakıt Pili, Elektro-Kaplama, Hidrojen Enerjisi, Metal Köpük.

SEARCHING OF THE EFFECT OF Pd-Zn COATED COPPER FOAM DIRECTLY TO PERFORMANCE IN BOROHYDRIDE FUEL CELL

ABSTRACT

Although fuel cell systems are already developing and need to be developed, it is a technology that attracts the attention of many branches of industry due to its high energy efficiency, long working time, silent operation and no harmful waste to the environment. In order to commercialize fuel cell systems, fuel cells should be obtained which are cost-effective, increase efficiency and provide higher power in smaller volumes. Anode diffusion layer design is essential for efficient, stable and safe operation of DBHYPs. For this reason, anode diffusion layer was studied for DBHYP. Metal foams are used in fuel cells to provide flow distributor plate, electrode architecture and heat management of the fuel cell. In particular, the use of metal foam as flow distributor and electrode provides significant increases in cell performance, cell weight and volume. Metal foams provide excellent performance in many engineering applications, especially in fuel cells, thanks to their high electrical and thermal conductivity from metal, high permeability of the porous structure, narrow flow channels, wide specific surface area, capillary and diffusive forces.

In this study, the effect of Pd-Zn coatings on copper foam on DBHYP was investigated. SEM and EDX analyzes were performed for the characterization of foam coatings. In this study, single cell tests were performed in order to see the effect of the efficiency of the coatings under different conditions on fuel cell performance. As a result of the study, the best performance of the fuel cell was obtained from sample 4 with a current density of 68.75 mA/cm^2 and a power density of 195.72 mW/cm^2 at $80 \text{ }^\circ\text{C}$. When looking at the polarization and power curves of uncoated commercial copper foam, only Pd coated copper foam and Pd-Zn coated copper foams, the performance of the Pd-Zn coated copper foam was found to be higher in the fuel cell.

Keywords: Diffusion Layer, Direct Borohydride Fuel Cell, Electrodeposition Coating, Hydrogen Energy, Metal Foam.

GİRİŞ

Her geçen gün insan nüfusunun hızlı artışı ve küresel ekonominin büyümesi, dünya üzerindeki enerji talebinin artmasına neden olmaktadır. Enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayan fosil yakıtların gelecekte tükenecek olması ve çevre kirletici etkileri araştırmacıların yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelmesine neden olmuştur. Bu kapsamda araştırmacılar; güneş, rüzgar, hidrolik enerji, jeotermal, biokütle ve hidrojen enerjisi gibi yenilenebilir enerji sistemi araştırmalarına yoğunlaşmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğu (güneş, rüzgar, hidrolik, jeotermal, vd.) doğa şartlarındaki anlık değişimlerden etkilenmeleri sebebiyle kararlı bir güç çıkışı vermemesi gibi önemli bir dezavantaja sahiptir.

Son yıllarda, hidrojen enerjisinin kullanıldığı, hidrojenin kimyasal enerjisini doğrudan elektriğe dönüştüren yakıt pili sistemlerine olan ilgi artmıştır. Kuşkusuz bunun sebeplerinden biri, ülkelerin küresel ısınmanın önlenmesi sebebiyle aldığı yasal önlemler, bu sistemin diğer yenilenebilir enerji sistemlerine göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve sürdürülebilir güç çıkışı elde edilebilmesidir. Yakıt pili sistemleri ile diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının aksine, yakıt sağlandığı takdirde sürekli bir güç çıkışı elde edilebilmektedir.

Yakıt pili sistemlerinde yakıt olarak saf hidrojen veya hidrojen taşıyıcı sıvı yakıtlar kullanılmaktadır. Yakıt olarak saf hidrojenin kullanıldığı yakıt pili sistemlerinde, hidrojenin yanıcı ve patlayıcı özelliği, yakıt depolama ve taşıma problemleri meydana gelmektedir. Bu doğrultuda hidrojen taşıyıcı sıvı yakıtların kullanıldığı yakıt pili sistemleri yoğun ilgi görmektedir. Bor minerali rezervlerinin büyük bir kısmının ülkemiz topraklarında bulunduğu göz önünde bulundurulursa, yakıt olarak borhidrür bileşikleri kullanılan doğrudan bor hidrür yakıt pillerinin (DBHYP) geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması ülkemiz açısından stratejik bir öneme sahiptir.

DBHYP'lerinin yaygınlaştırılması ve ticarileştirilmesi, diğer yakıt pili türleri için de olduğu gibi hücre performansını arttırarak, hücre hacmini ve maliyeti azaltarak gerçekleştirilecektir. Bilindiği gibi malzeme bilimindeki gelişmelerle paralel birçok

endüstride ilerleme kat edilmektedir. Metal köpüklerin yakıt hücrelerinde kullanılmaya başlanması da yakıt pili sistemlerinde hücre performansında önemli gelişmeler elde edilmesini sağlamaktadır. Yapılan araştırmalarda metal köpük olarak Ni köpüğün yaygın bir şekilde tercih edildiği görülmüştür. Bu çalışmada Ni köpüğe göre daha kolay ve ucuz bir şekilde temin edilebilen bakır köpüğün yakıt hücresinde gaz difüzyon elektrotu olarak kullanılabilirliği test edilmiştir. Bakır korozif etkilere dayanımının düşük olması, asit ve bazlarla kolaylıkla tepkimeye girebilmeleri gibi dezavantajlarının önüne geçilebilmesi için köpük yapılar katalitik özelliklere ve korozyon dayanımına sahip Pd-Zn ile kaplanmıştır. Kaplama için yüksek dayanıklılık ve kalitede kaplama elde edilebilen elektrolitik kaplama metodu kullanılmıştır. Elde edilen gaz difüzyon elektrotunun yakıt hücresi içerisinde kullanılabilirliği ve performans etkileri araştırılmıştır.

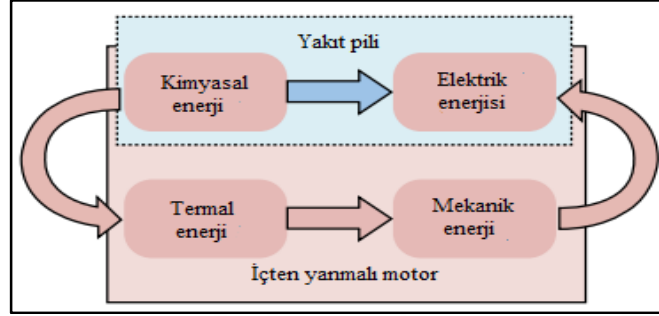
1. GENEL BİLGİ

Yakıt pili sistemleri yakıtın içinde depolanan kimyasal enerjiyi, doğrudan elektrik ve ısı enerjisine dönüştüren yüksek verimliliğe sahip elektrokimyasal cihazlardır. Fosil yakıtların yanması sonucu enerji üretilen ısı motorları (içten yanmalı motorlar) düşük verimliliğe ve çevre kirletici etkilere sahiptir. Yakıt pilleri, %50-70 arasındaki yüksek enerji verimliliğine sahip olmaları ve çevreye zehirli gaz salmamaları sebebiyle gelecekte içten yanmalı motorlar başta olmak üzere güç üretim sistemlerinin yerine kullanılmaya önemli bir adaydır.

Yakıt pili sistemleri, diğer enerji üretim sistemlerine göre daha verimli sistemlerdir. Örneğin Şekil 1.1'de görüldüğü üzere içten yanmalı motorlar da yakıtın kimyasal enerjisi termal enerjiye, termal enerji de mekanik enerjiye ve mekanik enerji de elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu her bir enerji dönüşüm aşaması, sistemin verimini azaltan kayıplar oluşturmaktadır. Yakıt pili sistemleri yakıtın kimyasal enerjisini herhangi bir ek dönüşüme girmeden yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektriğe çevirdiğinden dolayı diğer enerji dönüşüm sistemlerine göre daha verimli sistemlerdir (Colpan, Nalbant ve Ercelik 2018, Ma, Choudhury ve Sahai 2010). Yakıt pilleri verimli sistemler olarak değerlendirilse de, hücre içerisinde meydana gelen ohmik, aktivasyon, yakıt-reaktif taşıma ve yakıt kullanım verimliliği kayıpları sebebiyle verim düşüşleri meydana gelmektedir.

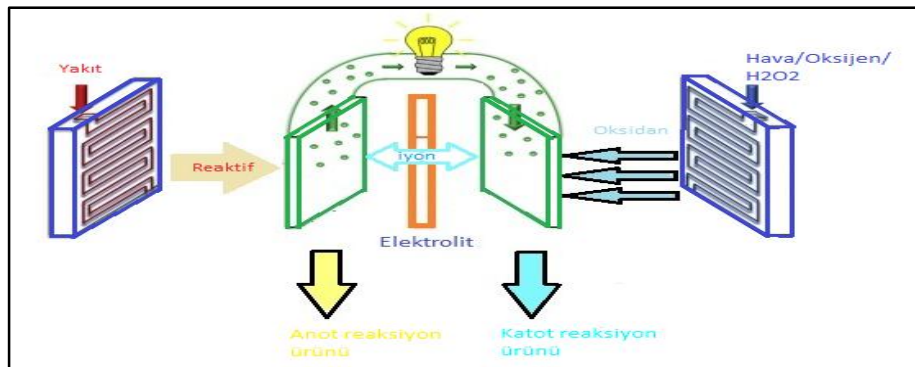
Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP) ve doğrudan metanol yakıt pili (DMYP) günümüzde en çok ilgi gören yakıt pili türleridir. PEMYP'de yakıt olarak kullanılan yanıcı ve patlayıcı özelliği sebebiyle kullanım esnasında yaşanabilecek taşıma ve depolama zorlukları özellikle portatif (taşınabilir) küçük ve orta büyüklükteki güç üretim sistemlerinde büyük problem teşkil etmektedir. Bu problem, alternatif yakıt arayışını gerektirmektedir. Yakıt olarak hidrojen taşıyıcı kimyasal sıvıların kullanılan doğrudan sıvı yakıt pilleri, sıvı yakıtların yanıcı ve patlayıcı olamamaları sebebiyle daha kolay dağıtım ve depolanabilmeleri ile hidrojen kullanımındaki zorluklara çözüm oluşturmaktadır. Sıvı yakıt pillerinde kullanılan

temel yakıtlar; metanol, etanol, etlen, dimetil, glikol, sodyum bor hidrür olarak sıralanabilmektedir (Arges vd. 2014, Gauthier ve Benziger 2014, He vd. 2012, Li vd. 2003, Ma, Choudhury vd. 2010, Pinto, Oliveira ve Falcão 2018, Sørensen 2008, Wang, He ve Lan 2012, Wang ve Wang 2003).



Şekil 1.1. İçten yanmalı motorlar ile yakıt pillerinin karşılaştırılması

Yakıt pili hücreleri anot ve katot akış dağıtıcı plaka (ADP), membran, anot ve katot difüzyon tabakası (DT), anot ve katot katalizör tabakasından oluşmaktadır. Yakıt hücresinin temel çalışma mekanizması Şekil 1.2'de verilmiştir. Sıvı yakıt, oksidasyon reaksiyonunu gerçekleştirmek için anottan hücre içerisine gönderilmektedir. Oksidan ise aynı anda indirgeme reaksiyonunu gerçekleştirmek için katottan gönderilmektedir. Katalizör tabakasına ulaşan reaktifler kimyasal reaksiyona uğrar. Bu reaksiyonların sonucu oluşan iyonlar elektrolitten geçerken; elektronlar, harici bir devreden geçmektedir. Yakıtın türün bağlı olarak reaksiyon ürünleri değişse de katotta genellikle çevreye her hangi bir zararlı etkisi olmayan su üretilmektedir (Colpan vd. 2018, Kamarudin, Achmad ve Daud 2009, Ling, Ee ve Birgersson 2013 Ong, Kamarudin ve Basri 2017, Schenk, Cermenek and Hacker 2018).



Şekil 1.2. Yakıt pili çalışma mekanizması

Doğrudan sıvı yakıt pillerinde anot ve katot akış dağıtıcı ve difüzyon tabakası, sıvı ve gaz fazdaki reaktiflerin ve reaksiyon ürünlerinin iki fazlı kütle taşınmasına olanak sağlamalıdır. Sıvı yakıt pillerinde çift fazlı akış nedeni ile kütle taşıma ve yakıt kullanım verim kayıpları oldukça önem arz etmektedir (Li vd. 2003, Li, Liu, vd. 2013, Zabel vd. 2009, Zamel ve Li 2013). Doğrudan sıvı yakıt pillerinde sıvı yakıtın ve reaksiyon ürünlerinin etkili bir şekilde taşınması hücre verimini etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Sıvı yakıt pillerinde reaktif ve reaksiyon ürünlerinin taşınmasının etkin bir şekilde gerçekleştirilememesi katalizör bölgesinde tıkanıklıklar oluşturarak reaksiyon verimini düşürmektedir. Bu sebeple sıvı yakıt pillerinde akış dağıtıcı plaka ve gaz difüzyon tabakası tasarımı büyük önem arz etmektedir ve çok fazlı akışa izin verecek şekilde tasarlanmalıdır (Gauthier ve Benziger 2014, He vd. 2012, Oliveira, Pereira, ve Pinto 2016, Shrivastava ve Harris 2017, Wang ve Wang 2003).

DSYP ile ilgili yaptığımız araştırmada DMYP'nin en çok ilgi gören sıvı yakıt pili olduğu görülmektedir. DBHYP bor hidrürün yüksek parlama noktası ve enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen görmesi gereken ilgiyi son yıllara kadar görmemiştir. Son yıllarda DBHYP'ne olan ilgi artış göstermiştir (Arges vd. 2014). Bor minerali rezervlerinin %70'den fazlasının ülkemiz topraklarında bulunması sebebiyle, alkali çözeltilerde çözülmüş bor hidrürün yakıt olarak kullanıldığı DBHYP'lerin geliştirilmesi ülkemiz açısından stratejik bir öneme sahiptir (Çelik 2006, Okur 2012). Bu sebeple tez kapsamında DBHYP'leri üzerine çalışılmıştır.

DBHYP'lerinde reaksiyon ürünlerinin yakıt hücresi içerisinde etkin bir şekilde uzaklaştırılmaması hücre performansında kademeli olarak azalma meydana gelmesine neden olmaktadır (An ve Jung 2017, Yang vd. 2015). Ayrıca yakıt hücresinin anot tarafında yakıt olarak kullanılan bor hidrürün %100 verimle reaksiyona girememesinden dolayı bor hidrür hidrolize uğrayarak ($\text{NaBH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaBO}_2 + 4\text{H}_2$) hidrojen oluşturmaktadır. Yakıt hücresi içerisinde hidrojen birikimi hücre verimini azaltmakla kalmaz, yakıt pili için göz ardı edilemeyecek güvenlik problemleri oluşturmaktadır (An vd Jung 2017, Cao vd. 2010, Li vd. 2003, Liu, Li, ve Suda 2004). DBHYP'lerinin verimli, kararlı ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için anot difüzyon tabakası tasarımı büyük önem teşkil etmektedir. Bu sebeple tez kapsamında DBHYP için anot difüzyon tabakası üzerine çalışılmıştır.

Malzeme bilimindeki gelişmeler kuşkusuz birçok endüstrinin gelişmesine neden olduğu gibi yakıt pili sistemlerinin de gelişmesine katkıda bulunmuştur. Metal köpüklerin 1900 yılların ilk yarına dayanan yeni bir malzeme türü olmasına rağmen, günümüzde enerji, kimya, yapı, medikal sanayi olmak üzere birçok endüstride vaz geçilemez bir malzeme türü haline gelmiştir. Metal köpükler metalden gelen yüksek elektriksel ve termal iletkenlikleri, gözenekli yapının sağladığı yüksek geçirgenlik, dar akış kanalları, geniş özgül yüzey alan, kılcal ve difüzyon kuvvetleri sayesinde yakıt pilleri başta olmak üzere birçok mühendislik uygulamalarında mükemmel performans sağlayan bir malzemedir (Arbak vd. 2017, Banhart 2001, Lefebvre, Banhart, ve Dunand 2008, Shirazy, Blais, ve Fréchet 2012, Xu, Mao, ve Hu 2018). Metal köpükler yakıt pillerinde akış dağıtıcı plaka, elektrot mimarisi ve yakıt pilinin ısı yönetimini sağlamak için kullanılmaktadır. Özellikle akış dağıtıcı ve elektrot olarak metal köpük kullanılması hücre performansında, hücre ağırlık ve hacminde önemli artılar sağlamaktadır (Baroutaji vd. 2017, Ferreira-Aparicio, Conde, ve Chaparro 2018, Ong vd. 2017, Tan vd. 2018, Tseng vd. 2012, Xu vd. 2018, Yuan vd. 2012).

Son yirmi yılda yakıt pili sistemlerinde metal köpük akış dağıtıcı ve elektrot mimarisi kullanılmasına artan bir ilgi görülmüştür. Metal köpükler yüksek özgül yüzey alanları ve üç boyutlu yapıları elektrokimyasal ve katalitik uygulamalarda dikkat çeken bir performans arışı meydana gelmesine neden olmaktadır. Difüzyon tabakası ve akış alanı görevi gören metal köpüklerin katalizör malzemesi ile kaplanması ile üretilen metal köpük matrisli elektrotlar yakıt hücresi performansını önemli ölçüde arttırmaktadır. Metal köpüğün yüksek özgül yüzey alanı katalizör kaplanan aktif yüzey alanı artırarak reaksiyon oranını arttırdığından ve yüksek geçirgenliği, kılcal, difüzyon kuvvetleri nedeni ile kütle taşınmasını kolaylaştırdığından hücre performansını arttırmaktadır (Alsabet ve Jerkiewicz 2012, Gao vd. 2018, Oh vd. 2015, Oh ve Kwon 2012, Yuan vd. 2012).

Nikel köpük malzemenin yakıt pillerinde akış dağıtıcı ve elektrot olarak yaygın bir şekilde tercih edilmesini yaptığımız araştırmalarda tespit ettik. Bu tez kapsamında nikel köpüğe göre daha ucuz ve kolay temin edilebilen bakır köpüğün anot difüzyon elektrotu olarak kullanılabilirliği test edilmiştir. Kaplama yöntemi olarak yüksek

dayanıklılık ve kalitede kaplama ele edilebilen elektrolitik kaplama metodu kullanılmıştır.



2. YAKIT PİLİ

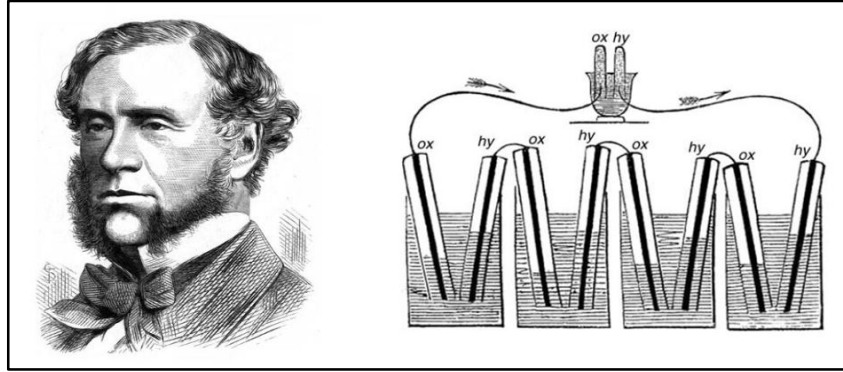
2.1. Yakıt Pilinin Tarihçesi

Kuşkusuz ki yakıt pilinin temelleri elektrokimyanın keşfi ile başlamıştır. 1791’de İtalyan fizyolog, fizikçi Luigi Galvani, iki farklı metali kurbağanın açık sinirine dokundurduğunda meydana gelen kas kasılmasının, kurbağanın içindeki iç elektriksel direnç sonucu ortaya çıktığını ileriye sürmüştür. Galvani’nin teorisi 1792 yılında İtalyan fizikçi Alessandro Volta tarafından; metal ve yumuşak dokudan oluşan sistemin pil görevi gördüğü, metal ile kas dokunun teması sonucu oluşan elektriğin hareket meydana getirdiği şeklinde açıklanmıştır. Galvani ve Volta tarafından elektrokimyanın temelleri atılması ardından, 1800 yılında Volta “Volta Yığını” olarak bilinen ilk elektrokimyasal cihaz örneğini tanıtmıştır. 1801’de, William Nicolsan ve Anthon Carlisle suya akım vererek suyu hidrolize etmiş, hidrojen ve oksijen atomlarına ayırmıştır (Bagotsky vd., J. Harper 2008).

Bu gelişmeler ışığında, 1830’larda İngiliz avukat, yargıç ve kimyacı olan Sir Wiliam Robert Grove; biri oksijen diğeri hidrojen ile doldurulmuş iki tüp içerisine platin elektrot yerleştirmiştir ve bu tüpleri yarısına kadar sülfürik asit dolu bir kap içerisine daldırarak deneyler gerçekleştirmiştir. Suya akım verilerek hidrojen ve oksijen atomlarına ayrıştırılmasından yola çıkarak, karşı tepkimenin de gerçekleşebileceğini düşünen Grove, deney düzeneğindeki elektrotları harici bir devre ile birbirine bağlamıştır ve devreden akım geçtiğini görmüştür. 1839 yılında Grove’nin bu buluşu “Gaz Voltaik Batarya” adı ile Felsefe Dergisi’nde bilim dünyasına tanıtılmıştır. Grove’nin yakıt hücreleri ilk yakıt pili olarak kabul edilmektedir (Ausilio Bauen, Eric Chen, David Hart, Martina Hinsberger, Martin Hongarth, Richard Stone vd., J. Harper 2008).

1843’de Grove’nin deneylerinden yola çıkarak Schoenbein yaptığı deneyler ile akımın temas sonucu değil kimyasal reaksiyon sonucu ortaya çıktığını kanıtlamıştır (Cermenek, Ranninger, ve Hacker 2018, Gülzow 2004, J. Harper 2008).

Günümüzde geliştirilen yakıt hücresinin ilk prototipi 1889 yılında Mond ve Langer tarafından “yeni gaz aküsü” adı ile tarif edilmiştir.

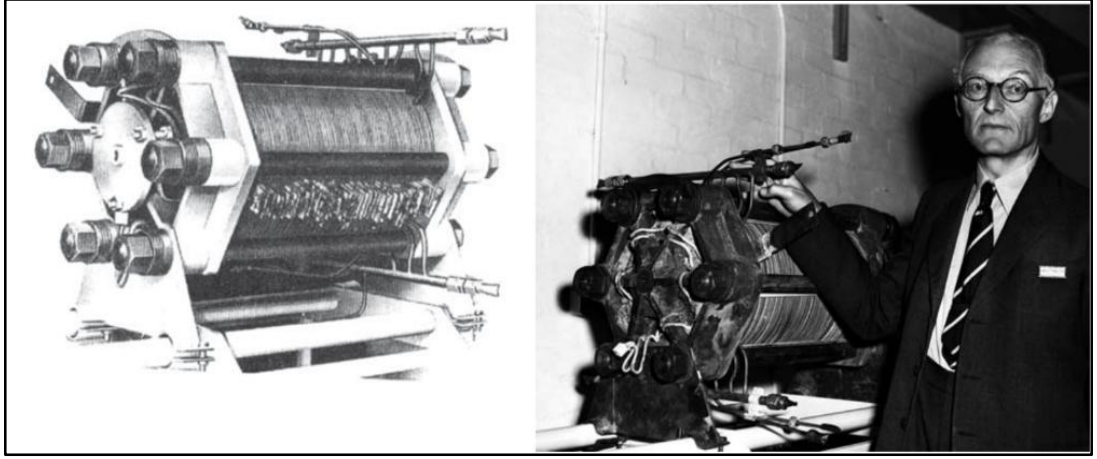


Şekil 2.1. Grove'nin Gaz Voltaik Batarya'sı ilk yakıt pili

1894 yılında Alman fiziksel kimyacı Wilhelm Ostwald, kömür yakılarak mekanik enerji elde edilen buhar motorlarının kömürün kimyasal enerjisinin yalnızca %10'nunu mekanik enerjiye dönüştürebildiğini görmesi üzerine dehşete kapılmış, bu verimsizliğin çözümü olarak da elektrokimyayı görmüştür. Bunun üzerine Zeitschrift Für Electrochemie dergisinde şu yazıyı yazmıştır: “Gelecekte, elektrik enerjisi üretimi elektrokimyasal yöntemlerle gerçekleştirilecek ve termodinamiğin ikinci kanunun sınırlamalarına tabi olmayacak.”. Ostwald'nın bu çalışması yakıt hücreleri için önemli bir temel oluşturdu ve araştırmaların başlamasına neden oldu. Ancak Ostwald, yakıt hücresini sadece termodinamik açıdan ele aldı, kimyasal yönlerini göz ardı etmiştir. Ostwald'nın makalesinin ardından yapılan ilk çalışmalar bile, yakıtın doğrudan elektrokimyasal reaksiyonu için cihaz oluşturmanın oldukça güç olduğunu göstermiştir (Bagotsky vd.).

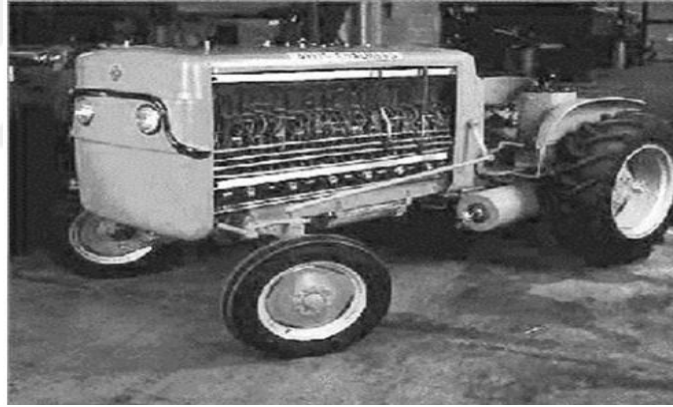
1912 yılından 1939 yılına kadar olan süreçte Emil Baur ve arkadaşları kömür ve kömür gazlaştırma ürünlerinin elektrokimyasal oksidasyonlarının üzerine birçok araştırma gerçekleştirmiştir. Sistemin yalnızca kömürün yeterince hızlı yakıldığı sıcaklıkta başarılı olacağı varsayan Emil Baur ve arkadaşları, 1937 yılında, katı oksit elektrolitli yakıt hücresini üretmiştir.

Francis Thomas Bacon 1959 yılından, aşırı korozif etkileri olan elektrolit yerine alkali KOH elektrolit kullanmıştır. Bacon ilk başarılı alkali yakıt hücresini üretmiştir. 1960 yılında 5-6 kW'lık güç üretilen yakıt pilini halka tanıtmıştır (Bagotsky vd., J. Harper 2008).



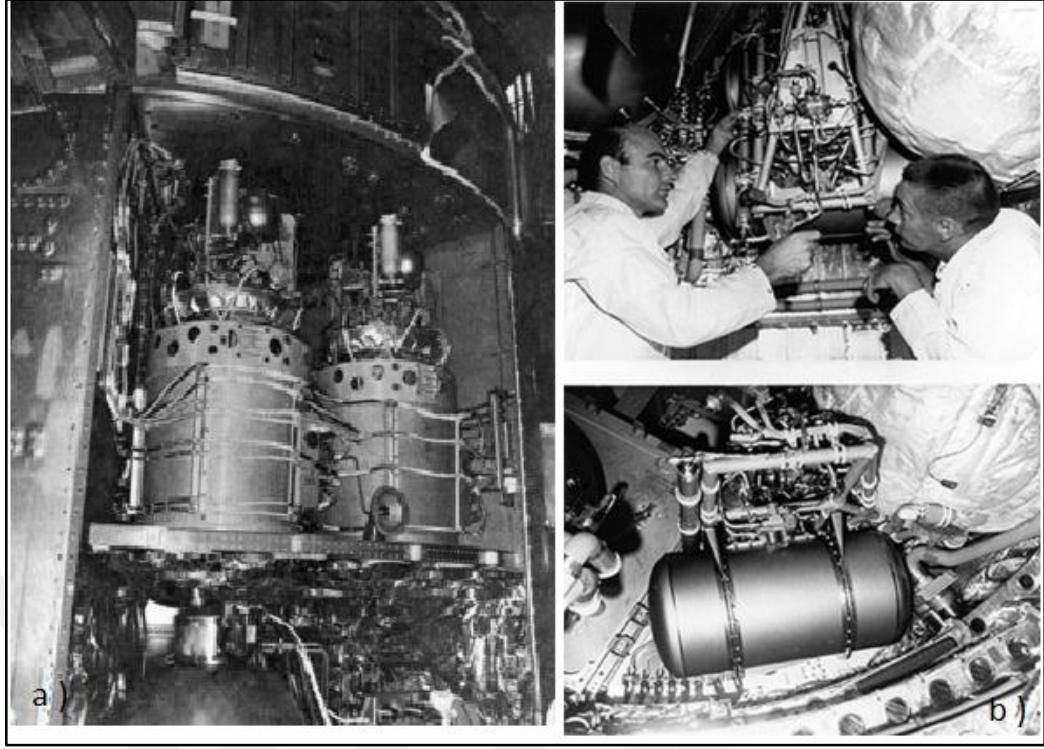
Şekil 2.2. Bacon'nun geliştirdiği hidrojen-oksijen yakıt pili (1960) (Bagotsky vd., J. Harper 2008)

1959 yılında Harry Karl Ihrig tarafından ilk yakıt pilli araç imal edilmiştir. Ihrig'nın Allis-Chalmers isimli 15kW'lık 1008 hücreye sahip yakıt pilli traktörü, yakıt pili ile çalışan makinelerin başlangıcı olmuştur (J. Harper 2008).



Şekil 2.3. Harry Karl Ihrig'in Allis-Chalmers isimli

1960'lı yılların başlarında Amerikan uzay uygulamalarına yönelik yakıt pili çalışmaları başlamıştır ve Gemini V uzay gemisinde proton değişim membranlı yakıt pili kullanılmıştır. Bacon'un alkali yakıt pilinin ardından, alkali yakıt pillerinin daha verimli olduğu düşüncesi ile proton değişim membranlı yakıt piline olan ilgi azalmıştır. Prantt and Whitney Aircraft şirketi tarafından Apollo uzay gemisinin yardımcı birimlerine güç sağlamak için alkali yakıt pili geliştirmiştir (Ausilio Bauen, Eric Chen, David Hart, Martina Hinsberger, Martin Hongarth, Richard Stone vd., Bagotsky vd., Cermenek vd. 2018, Gülzow 2004, J. Harper 2008).



Şekil 2.4. a) Apollo uzay gemisinde kullanılan Bacon yakıt pili b) Gemini V uzay gemisi PEMYP

1960’larda doğrudan yakıtın kullanıldığı yakıt hücrelerine olan ilgi artmıştır. Ancak bu sefer kömür kullanmak yerine yakıt olarak metanol kullanılmaya başlanmıştır. 1963 yılında Murray ve Grimes tarafından ilk alkali elektrolitli metanol yakıt hücresinin laboratuvar modeli geliştirilmiştir. Bu yakıt hücrelerinde katalizör olarak büyük miktarlarda platin kullanılmıştır. Platinin pahalı olması nedeniyle bu tür çalışmalara uzun yıllar ara verilmesine neden olmuştur.

Du Pont tarafından 1960’larda polimerik iyon değişim membranı olan Nafion geliştirilmiştir. Nafion malzemesinin geliştirilmesi yakıt hücresinin veriminin ve ömrünün artmasına neden olduğu, katalizör olarak kullanılan platin miktarının önemli ölçüde azaltılmasına olanak sağlaması nedeni ile araştırmacıların ilgisini çekmiş ve yakıt hücresinin geliştirilmesine yönelik önemli gelişmeler sağlamıştır.

1970’lerde petrol krizi ve otomobil sayısının artmasının neden olduğu hava kirliliği nedeniyle yakıt hücresi üzerine yapılan çalışmalar hızla artmıştır. Dünya çapında bazı otomobil üreticileri yakıt pillerinin otomobillerde kullanılmasına dair ciddi çabalar sarf etmiştir. 1970’lerde Los Alamos National Laboratory mühendisleri tarafından fosforik asit yakıt pili kullanılan golf aracı üretilmiştir. Ardından Tokyo

Elektrik Power tarafından bu yakıt pilleri 11 MW'lık güçlere kadar geliştirilmiştir (Dündar 2018, F. Yıldızbilir 2006).

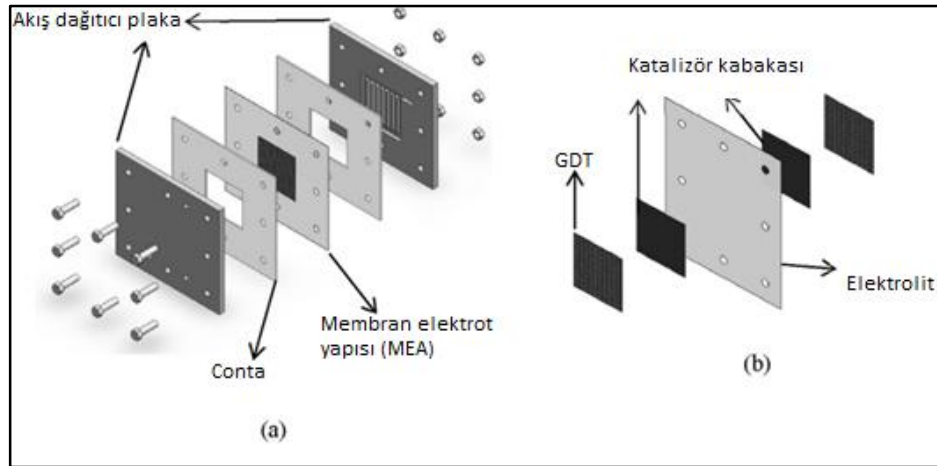
1990'lı yıllarda bir alman firması olan Howaldtswerke-Deutsche Werft AG (HDW AG) tarafından Class 212 denizaltı için haftalarda su altında güç ihtiyacını karşılayabilecek güçte bir PEMYP geliştirilmiştir.

Cep telefonu, taşınabilir bilgisayarlar başta olmak üzere farklı tiplerdeki taşınabilir cihazların sayısındaki artış, bu cihazların uzun süreli çalışabilme ihtiyacı, bu cihazlarda kullanılan pillerin daha yüksek kapasiteli güç kaynakları ile değiştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Tüm bu faktörler doğrultusunda, yakıt pilleri ile ilgili araştırmalar önemli ölçüde artmıştır (Ausilio Bauen, Eric Chen, David Hart, Martina Hinsberger, Martin Hongarth, Richard Stone vd., Bagotsky vd.).

PEMYP ve DMYP'ler üzerine yapılan geniş çaplı araştırmaların yanı sıra, 1990'lardan beri yüksek sıcaklıkta çalışan katı oksit yakıt pilleri ve erimiş karbon yakıt pilleri üzerine birçok araştırma yürütülmüştür. 2003-2005 yıllarından bu yana erimiş karbon yakıt pillerine dayanan enerji santrallerinin sayısında belirgin bir artış görülmektedir (J. Harper 2008).

2.2. Yakıt Pili Bileşenleri

Bir yakıt hücresi temel olarak Şekil 2.5.'de de gösterildiği gibi elektrolit (elektrolitik membran), anot ve katot gaz difüzyon tabakaları, anot ve katot akış dağıtıcılarından oluşmaktadır.



Şekil 2.5. Yakıt hücresinin a) Şematik gösterimi b) MEA

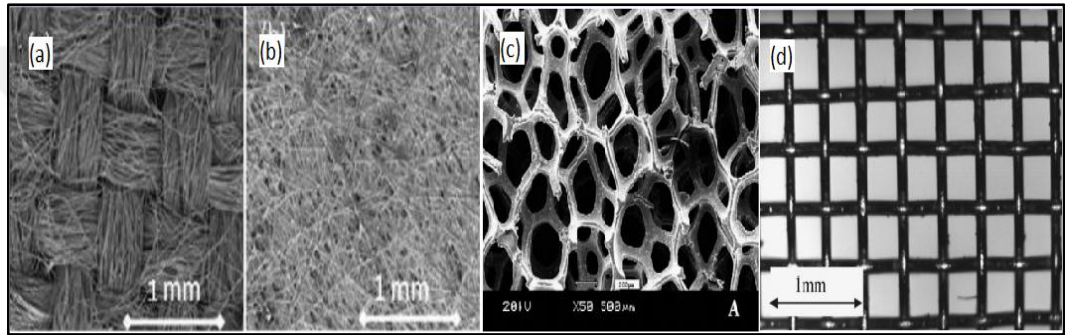
2.2.1. Gaz difüzyon tabakası (GDT)

Anot ve katot GDT olmak üzere yakıt hücresi içerisinde iki adet difüzyon tabakası (DT) bulunmaktadır. GDT doğrudan elektrokimyasal reaksiyona katılmamakla birlikte, reaktif elektrolit bölgesine taşınmasına izin verirken, reaksiyon ürünlerinin akış dağıtıcı plakaya taşınmasını sağlayarak hücre içerisinden uzaklaştırılmasını sağlayan komponenttir (Colpan vd. 2018, Morgan ve Datta 2014, Omrani ve Shabani 2017, Ozden vd. 2017). GDT'nin yerine getirmesi gereken temel özellikleri aşağıdaki gibidir;

1. Reaktif geçirgenliği: GDL katalizör tabakasına kesintisiz bir şekilde reaktif (yakıt ve oksidanların) sağlayabilmesini mümkün kılacak büyüklükte geçirgenliğe sahip olmalıdır. Katalizör bölgesine kesintisiz bir şekilde reaktif sağlanması hücre performansının reaktif taşınımından bağımsız bir şekilde, elektrolit kinetiğine bağlı meydana gelmesini sağlamaktadır.
2. Reaksiyon ürünü geçirgenliği: Reaksiyon ürünlerini hücre içerisinden uzaklaştırılmaması katalizör bölgesinde tıkanıklık oluşturarak reaksiyon oranını düşürdüğünden hücre performansını düşürmektedir ve hücre performansında kademeli bir azalma meydana getirmektedir.
3. Elektriksel iletkenlik: GDT katalizör tabakası ile akış dağıtıcı plaka yüksek iletkenliğe sahip olmalı ki, hücre içerisindeki ohmik kayıplar pil performansını düşürücü etkiler meydana getirmemelidir.
4. Isıl iletkenlik: Yakıt hücresi içerisinde gerçekleşen reaksiyon ekzotermik bir reaksiyondur ve yakıt hücresinin sabit çalışma sıcaklıklarında çalışabilmesi için GDT'nin ısı iletkenliği yüksek olmalıdır.
5. Mekanik destek: elektrolitin zarar görmemesi için akış dağıtıcı ile elektrolit arasında iyi bir mekanik destek sağlamalıdır (Atiyeh vd. 2007, Cindrella vd. 2009, Fadzillah vd. 2017, Kandlikar vd. 2014, Majlan vd. 2018, Oliveira vd. 2016, Omrani ve Shabani 2019, Qi ve Kaufman 2002, Shrivastava ve Harris 2017).

GDT tek katmanlı veya mikro gözenekli ve makro gözenekli katman olmak üzere iki katmanlı bir şekilde kullanılmaktadır. İki katmanlı GDL'de katmanlardan biri elektrolit ile akış dağıtıcı arasındaki temas direncini azaltmak için kullanılırken, diğer katman elektrolite destek sağlamak maksatlı kullanılmaktadır. Karbon kumaş ve karbon kağıt GDL'in sağlaması gereken temel özellikleri karşıladığından dolayı

yaygın bir şekilde tercih edilen karbon temelli GDT malzemeleridir (Gao, Blunier, ve Miraoui 2013, Omrani ve Shabani 2019). Bununla birlikte karbon malzemelerin kırılgan ve dayanıksız olmaları nedeniyle, yüksek mekanik mukavemet ve iletkenliğe sahip metal kafesler, köpükler ve folyolar gibi alternatif malzemeler de kullanılmaktadır. Yaygın bir şekilde kullanılan metal malzemeler paslanmaz çelik (Falcão, Pereira, ve Pinto 2016, Yi vd. 2012), titanyum (Shao vd. 2006, Yu ve Scott 2004), nikel (Bidault vd. 2009, Cao vd. 2010, Huang, Su, ve Liu 2013, Lausic vd. 2012) nikel krom alaşımlarıdır (An, Zhao, ve Xu 2011, Settar, Abboudi, ve Lebaal 2018).



Şekil 2.6. GDL malzemeleri a) karbon kumaş b) karbon kağıt (Gauthier ve Benziger 2014) c) metal köpük (Yang vd. 2006) d) paslanmaz çelik mesh (Arisetty, Prasad, ve Advani 2007)

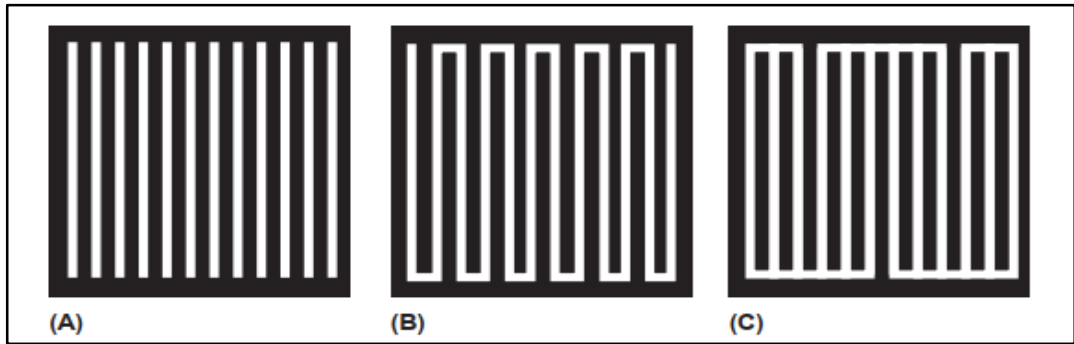
2.2.2. Akış dağıtıcı plaka

Akış dağıtıcı plaka, yakıt hücresi içerisinde yakıt ve reaktif gaz akışını yönlendiren, hücre yığımında hücreleri fiziksel olarak birbirinden ayırırken elektriksel olarak birbirine bağlayan, hücre yığımına mekanik destek sağlayan, yakıt hücresi katalizör bölgesinde ekzotermik reaksiyon sonucu oluşan ısıyı uzaklaştıran, reaksiyon sonucu üretilen akımı toplayan kompakt bir yapıdır. Akış dağıtıcı plakaların yerine getirmesi gereken özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Reaktifler için akış alanı sağlamalı,
- Akış esnasında basınç düşüşü düşük olmalı,
- Reaktiflerin katalizör bölgesine homojen bir şekilde dağılmasını sağlamalı,
- Reaksiyon ürünlerini hücre içerisinde uzaklaştırmalı,
- İyi elektriksel iletkenliğe sahip olmalı,

- Hücree yığıının soğutulması ve hücreler arası homojen sıcaklık sağlanması için yüksek termal iletkenliğe sahip olmalı,
- Yakıt hücresinin korozif ortamına dayanacak kabul edilebilir bir korozyon direncine sahip olmalı,
- İyi mekanik dayanım ve karalılığa sahip olmalı,
- Özellikle taşınabilir uygulamalar için düşük ağırlık ve hacme sahip olmalı,
- Düşük maliyetli olmalıdır (Arisetty vd. 2007, Hermann, Chaudhuri, ve Spagnol 2005, Tawfik, Hung, ve Mahajan 2007).

Karbon bazlı grafit malzemesi, bu özelliklerin birçoğunu karşılması nedeniyle uzun yıllardır akış dağıtıcı plaka malzemesi olarak yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Grafit plaka, akışın gerçekleşmesi için paralel, serpantin, interdijite ve franksiyonel akış kanalları açılarak akış dağıtıcı olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.7.) Grafit mükemmel korozyon direnci ve elektriksel özelliklere sahip olan bir malzeme olmasının yanı sıra oldukça kırılğan ve pahalı bir malzeme olması nedeni ile, son zamanlarda kanal açılmış veya köpük formdaki kompozit ve metal malzemeler de akış dağıtıcı olarak kullanılmaktadır. Akış dağıtıcı için kompozit ve metal malzemeler iyi mekanik mukavemet, elektriksel ve termal özellikleri, kolay işlenebilirliği ve düşük maliyetleri nedeniyle dikkat çekici bir malzeme adayıdır (Colpan vd. 2018, Kim ve Cunningham 2010, Park vd. 2018).



Şekil 2.7. Akış dağıtıcı plaka kanal tasarımları a) paralel b) serpantin c) paralel serpantin (Colpan vd. 2018)

2.2.3. Elektrolit

Elektrolit, yakıt hücresini anodik ve katodik bölgelerini birbirinden ayıran, iyonik iletkenliğe sahip yapısal elemandır. Elektrolitin yerine getirmesi gereken yapısal

özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Kimyasal reaksiyon sonucu oluşan iyonları minimum kayıpla anottan katoda iletebilmesi için iyon iletkenliği olabildiğince yüksek olmalıdır.
2. Anot ve katot yapısal elemanlarını elektriksel olarak birbirinden ayırırken iyonik olarak birbirine bağlamalıdır.
3. Anot ve katot reaktiflerinin birbirine karışmasını önlemelidir (Gao, Kabalo, vd. 2013, Gao, Blunier, vd. 2013, Ma, Choudhury, vd. 2010, Ma, Sahai, ve Buchheit 2010, Pinto vd. 2018).

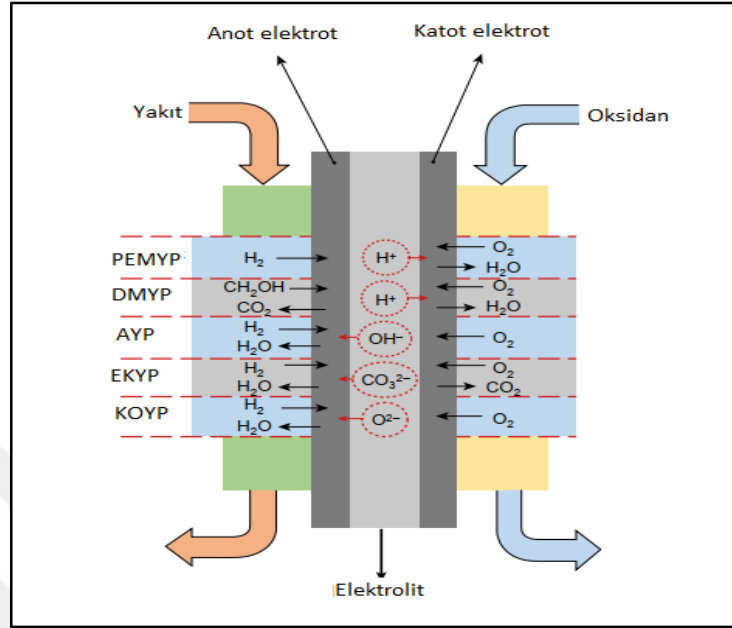
2.3. Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pilleri temel olarak yakıt ve oksidan türüne, elektrolit türüne ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak üç farklı şekilde sınıflandırılmaktadır;

1. Yakıt ve oksitleyici türü: İndirgeyici yakıt olarak hidrojen, metanol, etanol, etilen glikol, etil, bor hidrür, karbon monoksit (CO), hidrojen sülfür (H₂S) ve hidrazin (N₂H₄) gibi bazı organik ve inorganik indirgeyici maddeler kullanılmaktadır. Oksitleyici madde olarak saf oksijen, havadaki oksijen, hidrojen peroksit (H₂O₂) ve hidrojen klorür kullanılmaktadır.
2. Elektrolit tipi: Yakıt hücrelerinde temel olarak sıvı ya da katı elektrolitler kullanılmaktadır. Sıvı elektrolitler asitlerin, alkalilerin ve tuzların sulu çözeltilerinden oluşmaktadır. Katı elektrolitler ise iyonik olarak iletken olan polimer ve iyonik oksit bileşiklerinden oluşmaktadır.
3. Çalışma sıcaklığı: 25-100 °C arası düşük çalışma sıcaklıklı, 100-500 °C arası orta sıcaklıklı ve 500 °C'nin üzeri sıcaklıklarda çalışan yüksek çalışma sıcaklıklı yakıt pilleri olarak adlandırılmaktadır. PEMYP ve alkali yakıt pilleri (AYP) düşük çalışma sıcaklıklı yakıt pillerinin örneğidir. Fosforik asit yakıt pilleri orta sıcaklıklı yakıt pillerindedir. Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP) ve katı oksit yakıt pili, yüksek çalışma sıcaklıklı yakıt pillerinin örnekleridir (Yalaz 2018, Okur 2012).

En yaygın karşılaşılan yakıt pili sınıflandırma türü, elektrolit türüne bağlı sınıflandırmadır. Elektrolit türüne göre yakıt pili çeşitleri; polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP), alkali yakıt pili (AYP), fosforik asit yakıt pili (FAYP), erimiş karbonat yakıt pili (EKYP), katı oksit yakıt pili (KOYP). Bu yakıt

pillerinin çalışma mekanizması Şekil 2.8.'de şematik olarak özetlenmiştir. Geniş kapsamlı özeti ise Tablo 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Yakıt pili türleri çalışma mekanizmalarının şematik gösterimi

Tablo 2.1. Yakıt pili türleri (Colpan vd. 2018)

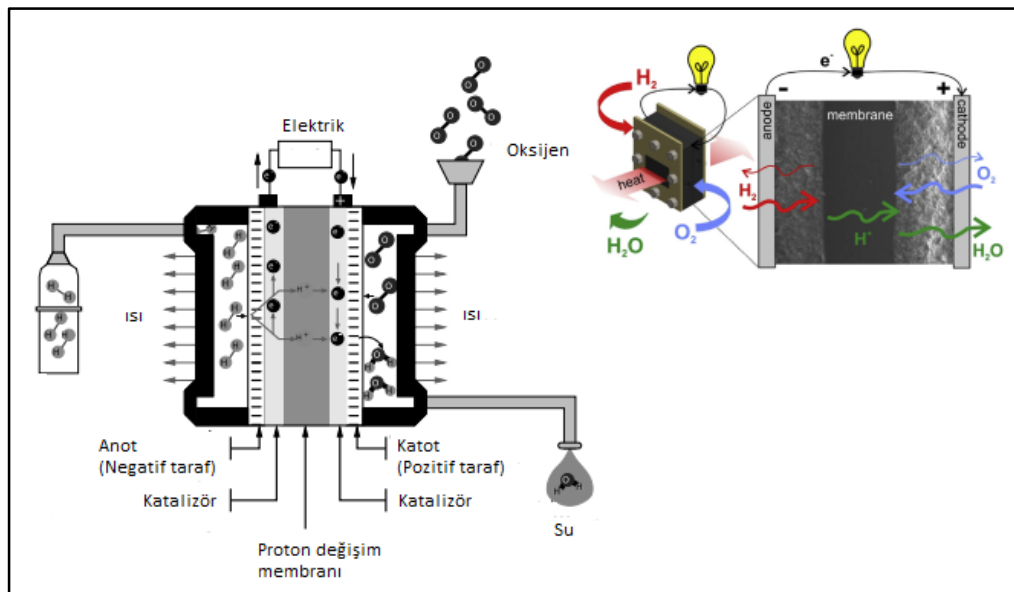
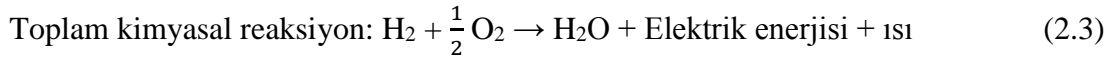
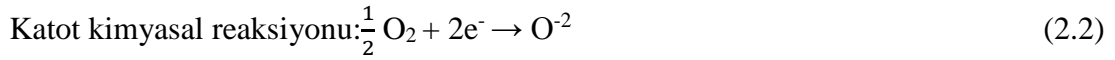
Tür	Elektrolit	İyon	Güç çıkışı (kW)	Çalışma sıcaklığı (°C)	Stack verimi (%)
PEMYP	Polimer membran	H ⁺	0,001-500	50-100	50-70
AYP	Sulu alkali çözelti	OH ⁻	10-200	<80	60-75
FAYP	Erimiş fosforik asit	H ⁺	<10000	150-200	55
EKYP	Erimiş karbon	CO ₃ ²⁻	<100000	600-650	55
KOYP	Seramik iyonik iletken	H ⁺ veya O ²⁻	<100000	500-1100	60-75

2.3.1. Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP)

Polimer elektrolitik membranlı yakıt pili, proton değişim membranlı yakıt pili olarak da bilinen, son zamanlarda en hızlı gelişim gösteren, piyasada en yaygın kullanılan

yakıt pili türüdür. Adını kullandığı katı polimer elektrolitten almaktadır. PEMYP'nin diğer yakıt pillerine göre daha fazla tercih edilmesinin başlıca nedenleri, yüksek dayanım, yüksek verimlilik (%50-70), yüksek maliyet etkinliği, diğer yakıt pili türlerine göre düşük hacim ve ağırlık avantajlarına sahip olmasıdır. 50-100 °C arası çalışma sıcaklıklarında çalışan PEMYP hücre güç çıkışını hızla değiştirilebilmesine olanak sağlaması ve yüksek güç yoğunluklarında çalışabilmesi nedeni ile otomotiv endüstrisinden yoğun ilgi görmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı (DOE), otomotiv sektörü için PEMYP'nin içten yanmalı motorların yerini almaya potansiyel aday olduğunu kabul ettiğini duyurmuştur.

PEMYP'de gerçekleştirilen temel elektrokimyasal reaksiyonlar aşağıdaki (2.1), (2.2) ve (2.3) numaralı denklemlerde verilmiştir. Anot tarafında kimyasal reaksiyon sonucu H^+ iyonları, hidrojen iyonu iletkenliği oldukça yüksek, elektriksel olarak yalıtkan bir malzeme olan polimer elektrolit vasıtasıyla katoda transfer edilir. Katotta kimyasal reaksiyon sonucu oluşan O^{2-} ile birleşerek su ve elektrik enerjisi oluşturmaktadır (Yılmaz 2018, Coralli vd. 2019, Dündar 2018, Okur 2012).

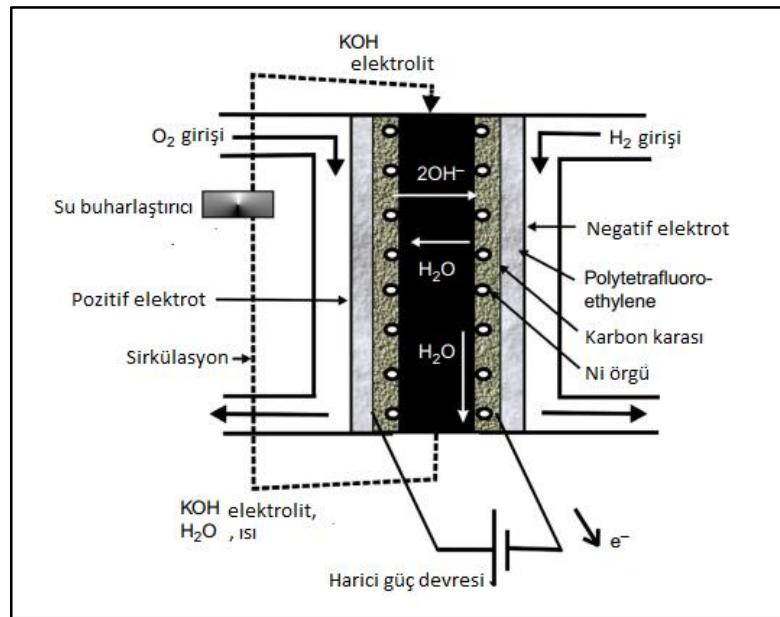
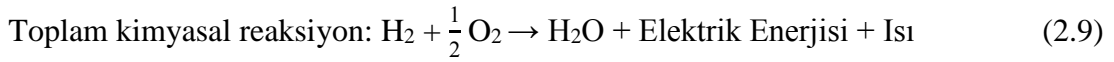
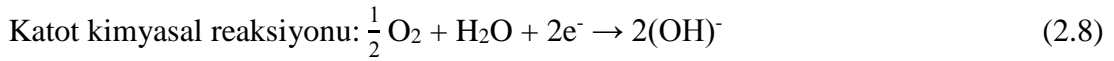
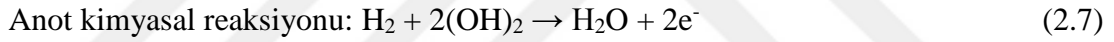


Şekil 2.9. PEMYP'nin çalışma mekanizmasının şematik gösterimi

2.3.2. Alkali yakıt pili (AYP)

Sıvı, iyonik iletkenliğe sahip, alkali KOH çözeltisinin elektrolit olarak kullanıldığı yakıt pili türüdür. Alkali ortamlar da asidik ortamlara göre indirgeme ve oksidasyon reaksiyonları daha hızlı gerçekleşmektedir. Alkali KOH'ın sağladığı yüksek reaksiyon kinetiği ve yüksek iyonik iletkenlik yüksek hücre performansı sağlamaktadır. AYP ucuz asil veya asil olmayan metallerin katalizör olarak kullanılabilirdiği bir yakıt pili türüdür. Hücre ve elektrot maliyeti olarak diğer yakıt hücrelerine göre daha düşüktür. AYP'nin yakıt ve oksidan da CO₂ varlığına toleransı sıfırdır. Bu sebeple yüksek saflıktaki gazlarla beslenmek zorundadır. Ayrıca bu yakıt pili türü sıvı elektrolit sebebiyle sızdırmazlık problemleri görülmektedir. Bu dezavantajlar doğrultusunda günümüzde AYP başarılı bir yakıt pili türü olarak değerlendirilmemektedir (Coralli vd. 2019, Dündar 2018, Gülzow 2004, Okur 2012).

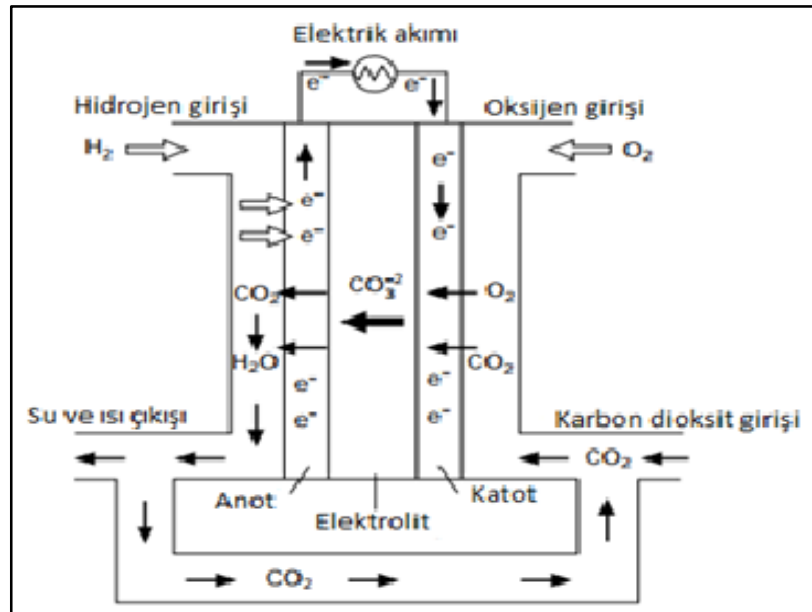
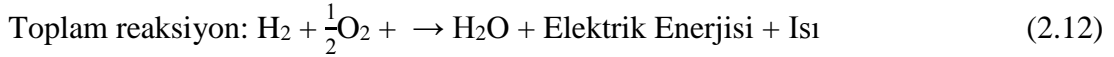
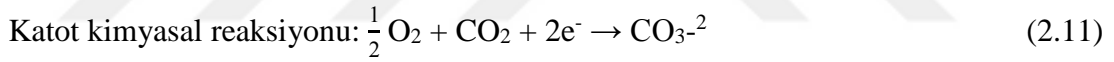
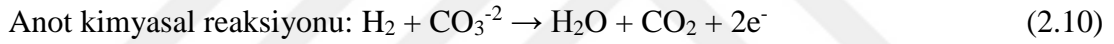
Çalışma mekanizması Şekil 2.10 da şematize edilmiş AYP'nin temel anot ve katot kimyasal reaksiyon denklemleri (2.7), (2.8) ve (2.9) da verilmiştir.



Şekil 2.10. AYP çalışma mekanizması

2.3.3. Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP)

Ortalama 600°C ve daha yüksek çalışma sıcaklıklarında çalışan yüksek çalışma sıcaklıklarında sahip bir yakıt pili türüdür. Sabit uygulamalara yönelik yüksek verimliliklere sahip yakıt pili türüdür. Bu yakıt pillerinde Lityum/potasyum ($\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3$) ve Lityum/sodyum gibi alkali metallerin erimiş tuzları sıvı elektrolit olarak kullanılmaktadır. Bu elektrolitler oldukça yüksek iyonik iletkenliğe sahiptir. Bu yakıt hücresinin yüksek çalışma sıcaklıkları reaksiyon kinetiğini ve hızını arttırdığından dolayı pahalı asil metal katalizörlerin kullanım zarureti bulunmamaktadır. Şekil 2.11. de çalışma mekanizması şematik olarak gösterilen EKYP'nin anodunda ve katodunda meydana gelen hidrojen oksidasyon ve oksijen indirgeme reaksiyonu (2.10), (2.11) ve (2.12) numaralı denklemlerde verilmiştir. EKYP de anot reaksiyonu için yakıt olarak hidrojen, karbon monoksit (CO), doğal gaz, kömür ve çöp gazları kullanılırken, katot reaksiyonu için oksijen kullanılmaktadır.



Şekil 2.11. EKYP'nin çalışma mekanizmasının şematik gösterimi

Bu yakıt pillerinde kimyasal reaksiyonlar sonucu yüksek miktarda atık ısı elde edilmektedir. Elde edilen atık ısıya kojenerasyon uygulayarak EKYP'nin %60'lık yakıt pili verimi %80'lere kadar çıkarılabilmektedir. EKYP kojenerasyon kullanılarak yüksek olan hücre veriminin daha da artırılabilmesi ve ucuz katalizörlerin kullanılabilirliği gibi avantajlarının yanında, uzun başlama süresi, yüksek çalışma sıcaklığının hücre ömrünün kısaltıcı etkileri gibi dezavantajlara sahiptir.

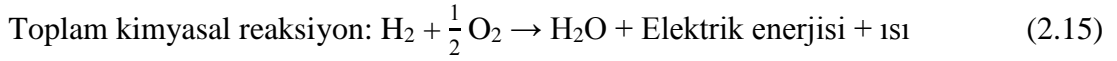
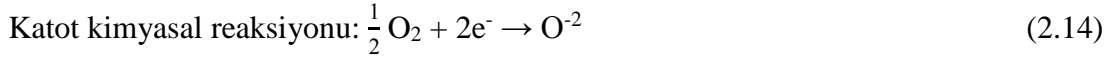
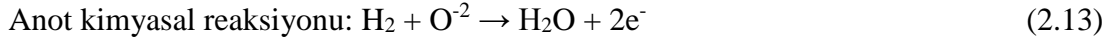
Fosil yakıtların kullanıldığı enerji santrallerinde karbon ve sera gazı emisyonlarının azaltılması için EKYP kullanıldığı uygulamalar bulunmaktadır. Ayrıca bu yakıt hücrelerinde karbon dioksitin hücre içerisinde zehirleyici etkilerinin olmamasından dolayı anot reaksiyon ürünü olarak oluşan karbon dioksitin yakıt hücresi içerisinde sirkülasyonu yapılabilmektedir. Küresel ısınma gerçeğinin bulunduğu günümüz dünyasında EKYP'nin fosil yakıtların kullanıldığı enerji santrallerinde kullanılması oldukça önemli bir gelişme olacaktır (Coralli vd. 2019, Dündar 2018, Sørensen 2008, Watanabe 2016).

2.3.4. Katı oksit yakıt pili (KOYP)

Yakıt olarak saf hidrojen, hidrokarbonlar, doğal gaz ve kömür (bio-yakıtlar) kullanılır. Yüksek çalışma sıcaklıklarında çalışan (600-1000 °C) bir yakıt pili türüdür. Yüksek çalışma sıcaklıklarına sahip yakıt pilleri arasında sahip olduğu % 60-75 arasındaki hücre verimleri ile dikkat çekmektedir. EKYP'lerinde ki gibi bu yakıt pili türünde, hücre atık ısısının kojenerasyon sistemleri ile geri kazanıldığı takdirde %80'lik hücre verimlerine ulaşılabilir. Yüksek verimlilikteki KOYP'nin uygulama alanları evler ve güç santralleridir.

Yüksek çalışma sıcaklıklarına uygun hücre performansını ve ömrünü kısıtlamayacak hücre malzemelerinin seçilmesi bu yakıt pili türü için son derece önemli bir konudur. Bu yakıt pili türünde hücre maliyeti, üretim sürecinde çalışma koşullarını sağlayacak malzemelerin seçilmesine bağlı oldukça yüksektir. KOYP'nin en önemli dezavantajları yüksek maliyet, yüksek çalışma sıcaklığı, koklaşma, kükürt zehirlenmesi ve korozyon nedeni ile malzeme seçimin güçlüğüdür (Topçu 2017, Dündar 2018, Okur 2012, Sørensen 2008).

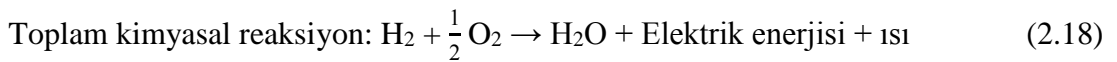
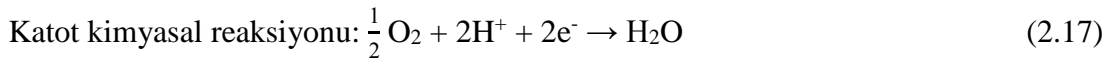
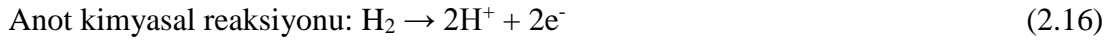
KOYP de gerçekleşen temel kimyasal reaksiyonlar Denklem (2.13), Denklem (2.14) ve Denklem (2.15) denklemlerinde verilmiştir.



2.3.5. Formik asit yakıt pili (FAYP)

FAYP esas itibari ile adını sıvı fazdaki formik asit (H_3PO_4) elektrolitten almaktadır. Formik asit termal özellikleri, elektrokimyasal kararlılığı ve düşük uçuculuğu nedeni ile yaygın bir şekilde kullanılan inorganik bir asittir. Bu yakıt pili üründe yakıt olarak LPG, doğal gaz ve kömür gazları kullanılmaktadır. Yeni nesil yakıt pillerinin ilk uygulaması olması ve ticari olarak kullanılan ilk yakıt pili türü olması nedeni ile FAYP yakıt pili tarihinde ayrı bir öneme sahiptir.

FAYP de gerçekleşen temel kimyasal reaksiyonlar (2.16), (2.17) ve (2.18) numaralı denklemlerde verilmiştir.



Sabit uygulamalar için geliştirilmiş FAYP, 175-200 °C arasındaki çalışma sıcaklıklarına sahiptir. Kojenerasyon uygulanarak %37-42 arasındaki hücre verimi, %85'in üzerine çıkarılabilmektedir. FAYP diğer yakıt pili türlerine nazaran daha yüksek katalizör yükleme miktarlarına ihtiyaç duymaları nedeni ile hücre maliyetleri yüksektir. FAYP aynı hacim ve ağırlığa sahip diğer yakıt pillerine göre daha düşük güç yoğunluğu vermektedir. Fakat FAYP'nin %33'lük hücre verimlerinin yakma temelli santrallerin verimlerine nazaran daha fazla olduğu göz ardı edilemeyecek değerde olduğu göz ardı edilmemelidir (Dündar 2018, Okur 2012, Sørensen 2008).

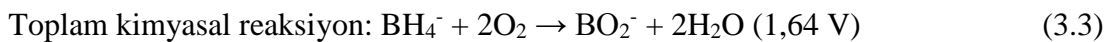
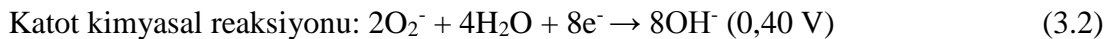
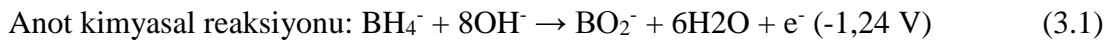
3. DOĞRUDAN BOR HİDRÜR YAKIT PİLİ

Bor hidrür, doğrudan veya dolaylı yollar ile (borhidrür (BH₄) hidrolizi ile elde edilen hidrojenin PEMYP de kullanılması) yakıt hücresi için yakıt olarak kullanılmaktadır. Potasyum (K) veya sodyum (Na) ile bağlı olarak bulunan borhidrür (KBH₄, NaBH₄) oldukça yüksek hidrojen kapasitesine sahip (yaklaşık olarak ağırlıkça %10,6'sı kadar hidrojene sahiptir.) yakıt malzemeleridir. Alkali borhidrür çözeltisi ile beslenen DBHYP'den 9,3 W.sa/g gibi yüksek enerji yoğunluğu elde edilmektedir (Jianliang ve Xianyou 2008, Li vd. 2003, Ma, Choudhury, vd. 2010, Ma, Sahai, vd. 2010, Pinto vd. 2018).

DBHYP'nin diğer yakıt pillerine göre çeşitli üstünlükleri vardır. Bunlar kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir (Jianliang ve Xianyou 2008);

1. Hidrojenin depolanmasında yaşanan problemler ortadan kalkmaktadır.
2. DBHYP bor hidrür bileşiklerinin yüksek hidrojen kapasitesi sebebiyle yüksek güç yoğunluğu ve yüksek teorik hücre voltajına sahiptir.
3. DBHYP de yakıtın katot tarafına çapraz geçişi diğer yakıt pili türlerine göre daha az problem teşkil etmektedir.
4. Diğer yakıt pillerine göre daha ucuz katalizör malzemelerinin kullanılmasına izin vermektedir.

DBHYP de anotta ve katotta gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki (3.1), (3.2) ve (3.3) numaralı denklemlerde verilmiştir.



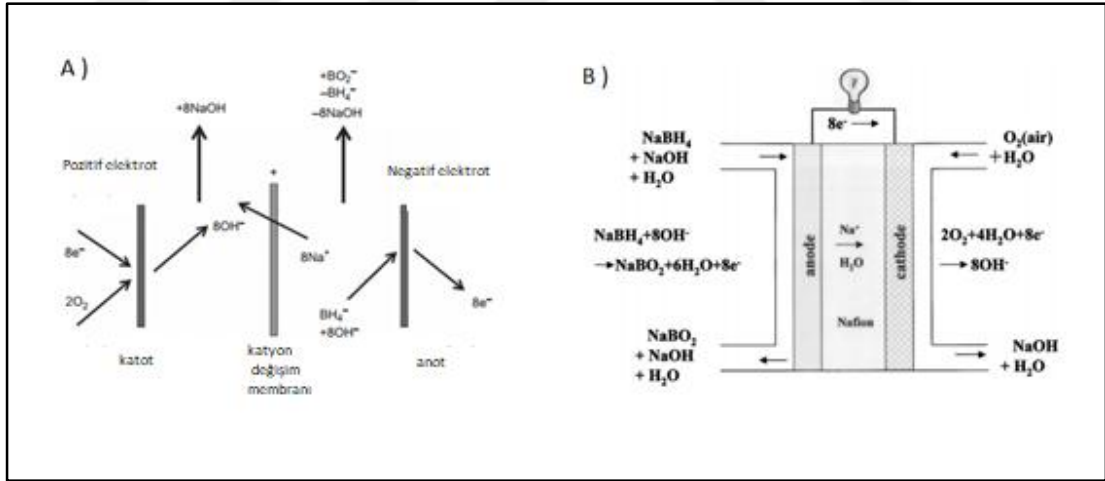
Yakıt hücresinin anot tarafındaki hidroliz reaksiyonunun uzun süreli dayanabilmesi için sodyum hidroksit (NaOH) ile seyreltilmiş borhidrür (BH₄) bileşiğinden oluşan alkali bir sulu çözelti ile beslenmektedir (Jianliang ve Xianyou 2008). DBHYP katot

kimyasal reaksiyonu saf oksijen, hava veya hidrojen peroksit (H_2O_2) ile beslenmektedir (Pinto vd. 2018, Arges vd. 2014).

DBHYP de elektrolit olarak hem anyon değişim membranı (ADM) hem de katyon değişim membranı (KDM) kullanılabilir. Bu iki membran türünün kullanıldığı yakıt hücreleri arasındaki fark iyon iletimindeki farklılıklar nedeniyle oluşmaktadır. Bu farklılıklar alt başlıklarda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

3.1. Katyon Değişim Membranlı Doğrudan Bor Hidrür Yakıt Pili (KDM-DBHYP)

KDM, katyona iyon transferine izin veren, anyona iyon transferine izin vermeyen yapıdır. KDM-DBHYP Şekil 3.1'den de görüldüğü gibi KDM katotta oluşan OH^- iyonlarının anoda geçmesine izin vermeyen, anotta oluşan Na^+ iyonlarının katoda geçmesine izin veren bir yapıdadır. Transfer edilen Na^+ iyonları yük taşıyıcı görevi görmektedir. Sonuç olarak KDM-DBHYP de toplam reaksiyonlar sonucu anotta boratlar, katotta sodyum hidroksit oluşmaktadır.



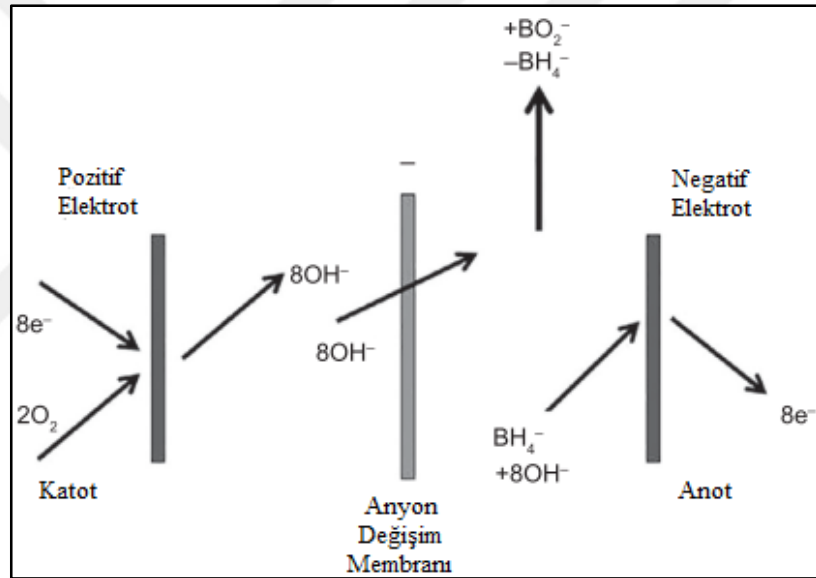
Şekil 3.1. KDM-DBHYP A) KDM-DBHYP de reaksiyon mekanizması B) KDM-DBHYP'nin kütle transfer mekanizması ve elektrik üretim mekanizmasının şematik gösterimi

KDM olarak yaygın bir şekilde tercih Nafion elektroliti tercih edilmektedir. DBHYP de PEMYP'ne göre, Na^+ iyonlarının H^+ iyonlarına nazaran daha büyük boyutlarda olması nedeni ile iyon taşıma direnci daha yüksektir. Daha ince elektrolitik membran kullanılarak iyon taşıma direnci azaltılabilmektedir ve daha yüksek hücre güç çıkışı elde edilmektedir (Ma, Choudhury, vd. 2010).

KDM kolaylıkla ticari olarak temin edilebilir olması, iyon iletkenliğinin yüksek olması, mekanik ve kimyasal dayanımının yüksek olması nedeni ile DBHYP için yoğun ilgi gören elektrolit türüdür (Liu vd. 2004).

3.2. Anyon Değişim Membranlı Doğrudan Bor Hidrür Yakıt Pili (ADM-DBHYP)

ADM-DBHYP kimyasal reaksiyonları sonucu anotta su ve boratlar, katotta hidroksil iyonları (OH^-) üretilmektedir. Katot bölgesinde kimyasal reaksiyon sonucu oluşan OH^- iyonları, ADM vasıtası ile katottan anoda taşınmaktadır (Arges vd. 2014, Chang vd. 2013, Jianliang ve Xianyou 2008, Li, Liu, vd. 2013, Li, Ma, vd. 2013).



Şekil 3.2. ADM-DBHYP de reaksiyon mekanizması

3.3. DBHYP Anot ve Katot Katalizör Malzemeleri

DBHYP yakıt olarak kullanılan alkali sıvı borhidrür çözeltisinin yüksek reaktiviteye sahip olması nedeni ile Pt, Pb, Ag, Au gibi soy metaller dışında, Ni ve Cu gibi değerli olmayan geçiş metalleri anodik reaksiyon için katalizör olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu katalizörler arasında, anot kimyasal reaksiyonu için en yüksek kimyasal aktiviteye sahip katalizör malzemesinin Au'dur (Jianliang ve Xianyou 2008, Liu vd. 2004, Ma, Choudhury, vd. 2010).

Katot katalizör malzemesi olarak Pt, Pt/C, Pd/C, Au/C, Ag/C kullanılmaktadır. Pt yüksek elektriksel iletkenliği ve kimyasal kararlılığı sebebiyle DBHYP de katot

malzemesi olarak yaygın bir şekilde tercih edilmektedir (Jianliang ve Xianyou 2008, Ma, Choudhury vd. 2010)



4. DENEYSEL ÇALIŞMA İÇİN LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

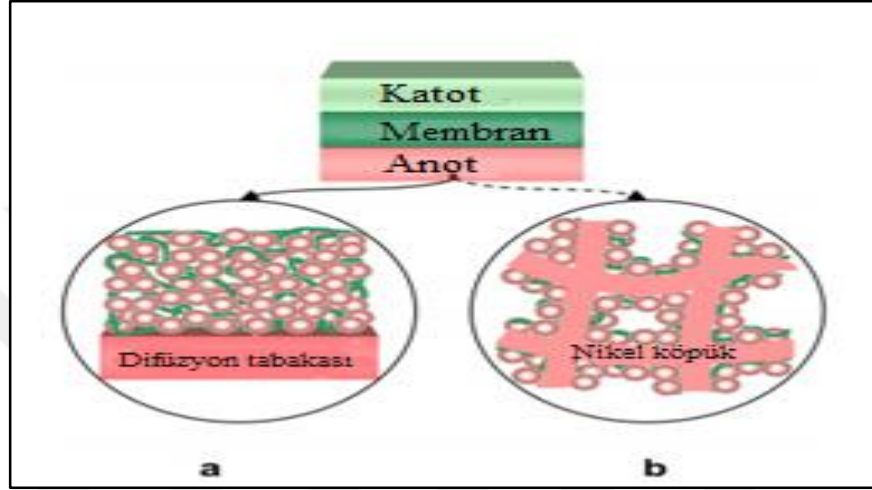
4.1. Metal Köpüklerin Sıvı Yakıt Pili Sistemlerinde Kullanılması

Yakıt hücresinin temel elemanlarından difüzyon tabakasının ve akış dağıtıcı plakasının yaygın bir şekilde karbon bazlı malzemelerden tercih edildiğini tezi daha önceki bölümlerinde bahsetmiştik. Karbon malzemeler yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, yüksek korozyon dayanımı gibi benzersiz elektriksel ve yapısal özelliklere sahip malzemedir. Karbon malzemelerin avantajlara ek pahalı ve dayanıksız oluşu alternatif malzeme arayışını gerektirmektedir (Carton ve Olabi 2015, Colpan vd. 2018, Dicks 2006, Kamarudin vd. 2009, Ling vd. 2013, Ong vd. 2017, Sadykov vd. 2010).

Metal köpükler yakıt hücresi içerisinde difüzyon tabakası ve akış dağıtıcı plaka görevinde kullanılabilir. Metal köpükler akış dağıtıcı plakada ve difüzyon tabakasında aranan yüksek geçirgenlik ve elektriksel iletkenliğe sahip bir malzemedir. Hatta metal köpük malzemeler, karbon malzemelerden yaklaşık 10 kat daha yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir (Mallick ve Thombre 2017, Morgan ve Datta 2014, Yuan vd. 2012).

Metal köpüklerin difüzyon tabakası olarak kullanılması durumunda, yaygın bir şekilde metal köpük DT aynı zamanda katalizör destek malzemesi olarak da görev yapacak şekilde montajlandığı görülmektedir. Katalizör tabakasının destek malzemesi üzerine kaplanarak montajlanması katalizör dayanımını arttırmaktadır. Katalizör tabakası difüzyon tabakası veya membran üzerine kaplanarak hücre içi montajı yapılmaktadır. Katalizör tabakasının membran üzerine kaplanması durumunda katalizör tabakası ile DT arasında mükemmel temas sağlanamadığından dolayı hücre içerisi kayıplar yüksektir ve katalizör iyi bir şekilde desteklenmediği için dayanımı düşüktür. Katalizör tabakasının DT üzerine kaplanması katalizör ile DT arasında temas alanının yüksek olması kayıpların daha düşük olmasına ve katalizör dayanımının yüksek olmasını sağlamaktadır. Karbon kumaş veya karbon kâğıt DT kullanılması durumunda Şekil 4.1 (a)'da görüldüğü gibi katalizör düz bir

tabaka halinde bulunmaktadır. Şekil 4.1 (b)'de görüldüğü gibi metal köpük difüzyon tabakasının katalizör desteği olarak kullanılması, katalizörün üç boyutlu geometri üzerinde yayılmaktadır. Metal köpük DT kullanımı ile karbon malzemelere göre daha yüksek katalizör yüzey alanı dolayısıyla daha yüksek elektrokimyasal hücre performansı elde edilmektedir (An vd. 2011, Shrivastava ve Harris 2017, Yuan vd. 2012).



Şekil 4.1. Yakıt hücresi içinde DT ve katalizör tabakasının yapısı

Plakalara akış kanalı açılarak üretilen geleneksel akış dağıtıcılarda kanal tasarımının zor olması ve kanal açımının güç olması zorluklarının dışında hücre içerisinde yapısal iki soruna neden olmaktadır. Bu sorunlar metal köpük akış dağıtıcı kullanılması ile ortadan kaldırılabilir. Sorumlardan birincisi akış kanal bölgesi reaktiflerin ve hücre içerisinde üretilen ısının katalizör tabakasına homojen bir şekilde dağılmasına engel olmaktadır. Bu durum etkisiz katalizör bölgelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Metal köpük kullanımı ile reaktifin çoklu girişi ve birden fazla bölgeye bölünmesi, reaktifin katalizör bölgesine eşit dağılmasını sağlamakta ve katalizör kullanımını arttırmaktadır. Kanallı tip akış dağıtıcıda kanal yapısı hücre içerisinde ısının homojen bir şekilde dağılmamasına neden olmaktadır. Dolayısıyla katalizör bölgesinde tepkime kinetiğinde homojensizlikler oluşturmaktadır. Metal köpük kullanımı homojen ısı ve reaktif dağılımı sağladığından dolayı, reaksiyonun katalizör bölgesinde homojen bir şekilde gerçekleşmesini ve katalizör dayanımının artmasına neden olmaktadır. Sorunlardan ikincisi, reaksiyon ürünü su yerçekiminin de etkisi ile akış kanallarının alt bölgesinde birikme eğiliminde olmasıdır. Biriken suyun hücre içerisinden uzaklaştırılması

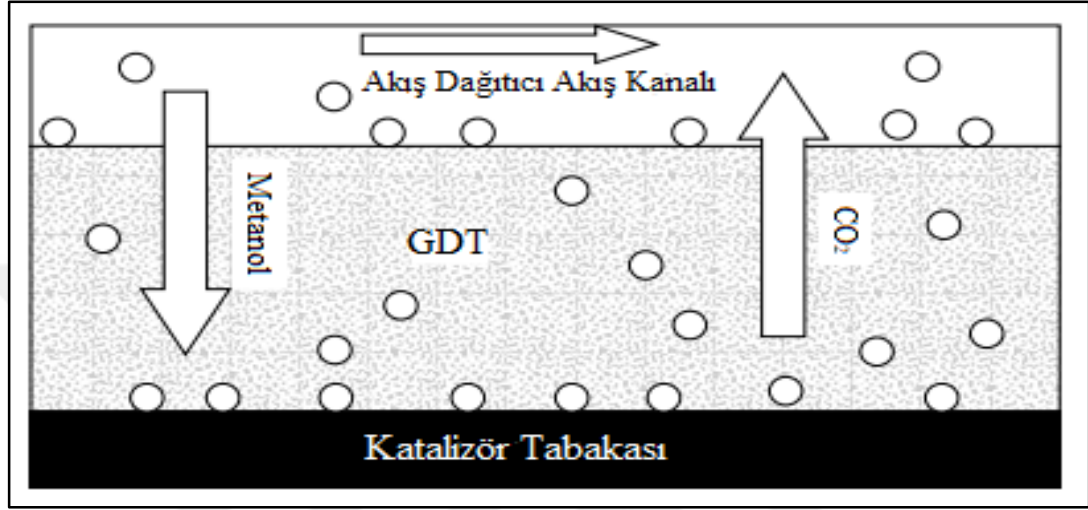
güçleşir ve bu durum hücre içerisinde su baskını ve katalizör bölgesinde tıkanıklıklara neden olmaktadır. Metal köpük akış dağıtıcı kullanılması metal köpüğün muazzam kıvrımlı yapısının sağladığı kılcal kuvvet ve yerçekimi bağımsızlığı ve yüksek geçirgenliği reaksiyon ürünü suyun hücre içerisinden uzaklaştırılmasını kolaylaştırıcı etkiler doğurmaktadır. Ayrıca metal köpük yapı sıvı ve gaz fazındaki akışkanların aynı anda taşınmasına izin verdiğinden dolayı reaktif ve reaksiyon ürünlerinin muazzam bir şekilde taşınmasını sağlamaktadır ve akış bölgesinde tıkanıklıklar oluşturmamaktadır. Özetle metal köpük akış dağıtıcı kullanılması hücre içerisinde reaksiyon kinetiğinin artmasına neden olduğundan hücre performansını arttırmaktadır (Huo vd. 2017, Kim ve Cunningham 2010, Tsai vd. 2012, Tseng vd. 2012, Yuan vd. 2012).

Metal köpük yapının akış dağıtıcı plaka ve difüzyon tabaka görevi gören tek bir entegre yapı halinde kullanılmasına olanak tanındığının belirtildiği birçok örneği görülmüştür. Bu durum yakıt pili sisteminin büyük ölçüde basitleşmesine ve maliyetinin azalmasına neden olacağı açıktır. Sonuç olarak metal köpük malzemelerin yakıt hücrelerinde kullanılması yakıt pilinin ticarileşmesine önemli katkılarda bulunacaktır (Arisetty vd. 2007, Huo vd. 2017, Yuan vd. 2012).

4.1.1. Doğrudan metanol yakıt pilinde metal köpük kullanımı

Bir çeşit doğrudan alkol yakıt pili olan DMYP, en çok rağbet gören DSYP türüdür. Doğrudan metanol yakıt hücresi anot ve katot bölümler ayrı ayrı ele alınacak olursa; anot reaksiyonu sonucu oluşan karbon dioksitin ($\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$) ve katot reaksiyonu sonucu oluşan suyun ($\frac{3}{2}\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$) ortamdan uzaklaştırılması sistemin geliştirilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Şekil 4.2'den de görüldüğü gibi anot reaksiyonu sonucu oluşan CO_2 katalizör bölgesinde kabarcık halinde birikme eğilimindedir. Biriken CO_2 kabarcıkları sıvı metanolü akışın tersi yönde akış kanalına doğru iter ve metanolün katalizör bölgesine ulaşması engeller, katalizör bölgesinde kör noktalar (tıkanıklıklar) oluşturmaktadır. CO_2 'nin hücre içerisinden uzaklaştırılmaması sıvı metanolün hücre içerisinde dağıtımını engellemektedir ve hücre performansının kademeli olarak azalmasına neden olmaktadır (Arisetty, Advani, ve Prasad 2008, Gauthier ve Benziger 2014, Scott vd. 2001, Wang ve Wang 2003, Yan vd. 2014). Aynı şekilde katotta oluşan su da

katalizör yüzeyinde birikme eğilimindedir ve katot reaktifi oksijenin katalizör bölgesine taşınmasını engellemektedir. Anot ve katot bölgesinde reaktif akışının tersi yönde gerçekleşen çok fazlı akış hücre performansını düşürücü etkiler oluşturmaktadır ve önlenmesi gereken bir durumdur (Gauthier ve Benziger 2014, He vd. 2012, Shrivastava ve Harris 2017, Wang ve Wang 2003).



Şekil 4.2. Doğrudan metanol yakıt hücresinin anot tarafında meydana gelen iki fazlı akış

Scott ve arkadaşları (Scott vd. 2001) bu çalışması, gözenekli metal malzemelerin sıvı yakıt pillerinde kullanılmasına dair yapılan ilk çalışmadır. Paslanmaz çelik anot kullandıkları bu çalışmada, doğrudan metanol yakıt hücresinin anot bölümünde oluşan CO₂ gazının uzaklaştırılabilme performansının difüzyon tabakasının ve akış dağıtıcının yüzey özelliklerine bağlı olarak değiştiğini belirlenmiştir. Scott ve arkadaşları oluşturdukları akış dağıtıcının sağladığı gaz giderme ve elektriksel özellikleri ile hücre performansında umut vaat edici bir hücre performansı elde ettiklerini göstermiştir. Arisetty ve arkadaşları (Arisetty vd. 2008) metal köpük anot difüzyon tabakası kullanıldığı bu çalışmada, metal köpük difüzyon tabakasının hücre içerisinde metanol akış hızını arttırdığından dolayı CO₂ 'nin hücre içerisinden uzaklaştırma oranını arttırdığını belirtmiştir. Özetle metal köpük GDT kullanılması ile hücre içerisinde metanol difüzyon oranını arttırmış ve CO₂'nin hücre içerisinden uzaklaştırılma oranını arttırmaktadır.

Elektrot yüzey şekli ve dayanımı, hücre dayanımı ve hücre performansını etkileyen önemli konulardan bir diğeridir (Niu, Zhao, ve Lan 2016, Yu ve Scott 2004). Elektrot

katalizör tabakası ve katalizör destek malzemesinden oluşmaktadır. Metal yapı üzerine katalizör kaplanmasına dair ilk çalışmayı Yu ve Scott (Yu ve Scott 2004) tarafından yapılmıştır. Titanyum örgü üzerine Pt katalizörü kaplayarak ürettikleri elektrotun yüksek katalitik aktivite ve dayanım sergilediğini belirtilmiştir. Pt/Ti anot elektrot kullanılması ile elde edilen yüksek performansın nedenleri olarak şunlar gösterilmiştir. i) Metal mesh destek malzemesinin üzerine katalizör kaplanması ile artan katalizör kaplanmış yüzey alana bağlı katalitik aktivite artmıştır. ii) Metal mesh yapının karbon destek malzemesine göre daha yüksek geçirgenliğe sahip olması nedeni ile daha yüksek reaktif geçişi görülmüştür ve reaksiyon kinetiği reaktif geçişinden bağımsız katalitik aktiviteye bağlı gerçekleşmesi sağlanmıştır. iii) Karbon destek malzemenin sertlik ve hidrofobiklik sağlamak amacı ile kullanılan PTFE malzemesi metal malzemeli elektrotta kullanılmamıştır. PTFE malzemesi elektrik iletkenliğinin düşük olması katalizör tabakasının iyonik direncini arttırmasından ve katalizör aktif alanını azalttığından hücre performansına olumsuz etkiler doğurmaktadır (Yu ve Scott 2004).

Yu ve arkadaşlarının ilk kez yakıt hücresi içerisinde metal matrisli elektrot yapısının ardından Showroński ve Wazny (Skowroński ve Wazny 2005) çalışmasında yakıt hücresi içerisinde metal köpük kullanılmasının performans etkilerini incelemiştir. DSYP için metal köpük matrisli elektrot kullanılmasına dair ilk çalışma niteliğindeki bu çalışmada, ADM-DMYP için yüksek katalitik aktiviteye sahip Pt katalizörü polianilin kaplı Ni köpük üzerine desteklenmiştir. Ni köpük geometrinin, polianilin matrisin sağladığı yüksek yüzey alan, daha yüksek katalitik yüzey alan elde ettirerek daha yüksek hücre performansı elde edilmesini sağlandığı belirtilmiştir.

Niu ve arkadaşları (Niu vd. 2016) çalışmasında DMYP'de Ni köpük destekli Pd elektrot ile Pd/C elektrotun metanol oksidasyon verimlerini mukayese etmiştir. Oluşturulan Pd-2-Ni ve Pd-4-Ni elektrotların her ikisinin de ticari Pd/C elektrotundan metanol oksidasyon reaksiyonu için daha yüksek katalitik aktivite ve dayanım sergilediği gözlemlenmiştir. Ni köpük geometri elektrotun, Pd/C elektroda göre daha yüksek performans sağlamasının, Ni köpüğün daha yüksek kütle difüzyonu ve katalitik aktivite sağlamasının bir sonucu olarak görüldüğü sonucuna

varılmıştır. Pd-4-Ni ile Pd-2-Ni elektrotlarından, Pd-4-Ni elektrotu 1,5 kat daha yüksek metanol oksidasyon veriminin sağlanmıştır.

Settar ve arkadaşları (Settar vd. 2018) metanolden hidrojen üretimi için metal köpük matrisli elektrot kullandığı çalışmada, Ni, Ni-Cr ve Ni-Fe-Cr köpük elektrotların metanol oksidasyon verimlerini karşılaştırmıştır. Köpük yapının termo-fiziksel özelliklerinin metanol reaksiyon oranında genel bir artış sağladığını belirten Settar ve arkadaşları, bu üç köpükten Ni-Fe-Cr köpüğünde %16,91 daha yüksek hidrojen üretim oranı elde etmiştir.

Cimino ve arkadaşları (Cimino vd. 2016) metanol oksidasyon reaksiyonu için Fecrallay metal köpük üzerine desteklenmiş Pt elektrodu kullanmıştır. Pt yükleme oranına bağlı reaksiyon kinetiğinde artış sağlandığı belirtilen bu çalışmada, oluşturulan elektrot yapı ile düşük çalışma sıcaklıklarında dahi metanol oksidasyon reaksiyonunda %100 CO₂ dönüşümü sağlanmıştır. Tekrarlanan oksidasyon reaksiyonlarında oluşturulan metal köpük elektrot yüksek kararlılık göstermiştir.

DMYP de oksidan ve yakıt tedarigi için sıvı pompası ve gaz kompresörü kullanılan sistemlere aktif DMYP denilmektedir. Bu sistemler ek tertibatlar kullanılması nedeni ile karmaşık oluşu ve kullanılan tertibatların hücre güç çıkışından enerji emmeleri nedeni ile olması gerekenden daha düşük pil verimi elde edilmesi gibi dezavantajlara sahiptir. Reaktiflerin (yakıt ve oksidan) hücre içerisine taşınmasını konvektif taşınım ve difüzyon yolu ile sağlayan DMYP sistemleri pasif DMYP olarak adlandırılmaktadır. Pasif DMYP de yardımcı cihaz kullanımı olmadığından aktif DMYP den daha basit ve hafiftir. Bu nedenle portatif uygulamalarda pasif DMYP sistemleri dikkat çekmektedir. Pasif DMYP'lerinin geliştirilmesi ve ticarileştirilmesi için reaktiflerin konvektif taşınım ve difüzyonunu geliştirecek akış dağıtıcı ve elektrot mimarilerinin kullanılması gerekmektedir (An ve Jung 2017, Chen ve Zhao 2007, 2017, Oliveira vd. 2016).

Pasif DMYP hücrelerinde hücre güç çıkışını arttırmak için, genellikle yüksek konsantrasyonlarda yakıt kullanılmaktadır. Yüksek konsantrasyonlarda metanol kullanımı, yakıt hücresinin anot ve katot tarafında ki kütle taşınımında artış gerektirmektedir. Metanol konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak anot reaksiyonunu karşılayacak, katottan alınması gereken oksidan miktarı artmaktadır.

Gerekli oksidan miktarının sağlanması ile anodik reaksiyon sonucu üretilen CO₂ miktarında artmaktadır. Özetle yüksek konsantrasyonlarda metanol kullanımı ile reaktiflerin ve reaksiyon ürünlerinin hücre içerisinde taşınması daha da önemli bir hale gelmektedir. Pasif DMYP de akım toplayıcı akış alanı reaktif ve reaksiyon ürünlerinin etkin bir şekilde taşınması için anahtar öneme sahip yakıt hücresi bileşenidir (Chen ve Zhao 2007, Oliveira vd. 2016, Yan vd. 2014). Yan ve arkadaşları (Yan vd. 2014) metanolün anodik reaksiyonu sonucu üretilen CO₂'nin hücre içerisinden yeteri kadar uzaklaştırılmamasının, katalizör bölgesine metanol transferini engelleyecek tıkanıklıklar oluşturmasını ve hücre performansını düşürmesini önlemek amacı ile mikro gözenekli (köpük) anot akım toplayıcı kullanmıştır. Delikli tip anot akım toplayıcı (1,5 mm kalınlıkta %47,8 açıklık oranına sahip paslanmaz çelik) ile mikro gözenekli anot akım toplayıcı (1 mm kalınlıkta %25 gözenekliliğe sahip) kullanılan Pasif DMYP'lerin artan metanol konsantrasyonlarına bağlı hücre performansları test edilmiştir. Delikli tip akım toplayıcı akış alanı kullanılan yakıt hücresinde 6M metanol konsantrasyonunun üzerine çıkılması hücre performansında düşüş meydana getirmiştir. Gözenekli tip akım toplayıcı akış alanı kullanılan yakıt hücresinde ise hücre performansında düşüşe neden olan metanol konsantrasyonu eşik değeri 22M'dür. Gözenekli tip akım toplayıcı akış alanı kullanılan yakıt hücresinde delikli tip akım toplayıcı akış alanı kullanılan hücreye nazaran dört kat daha yüksek hücre enerji yoğunluğu elde edilmiştir.

Zhao ve arkadaşları (Chen ve Zhao 2007) çalışmasında yüksek konsantrasyonlarda metanol kullanılan pasif DMYP'lerin anot tarafında metanol taşınımının, katot tarafındaki oksijen taşınımına göre daha az problem teşkil ettiğini düşünmeleri belirtmiştir. Reaksiyon ürünü suyun hücre içerisinde uzaklaştırılma hareketi, oksidanın katalizör tabakasına taşınmasını güçleştirici etki oluşturmaktadır. Dolayısı ile yakıt olarak yüksek konsantrasyonda metanol kullanılan pasif DMYP'de yüksek oksijen transferi ve reaksiyon ürünü suyu hücre içerisinde uzaklaştıran katot elektrot mimari tasarımı ve optimizasyonu büyük önem taşımaktadır. Chen ve arkadaşı da (Chen ve Zhao 2007) Pasif DMYP'nin hücre performansını arttırmak için katot mimarisinin kilit öneme sahip olduğunu düşünmüştür ve oksijen transfer direncini azaltacak, voltaj kayıplarını en aza indirecek katot akım toplayıcı akış alanı kullanma yolunu seçmiştir. Bir önceki çalışmasında metal köpük akım toplayıcı akış alanının

delikli tip akım toplayıcı akış alanına göre daha iyi kütle taşınımı sağladığını tespit etmiştir (R.Chen 2006). Bu doğrultuda yakıt hücresi içerisinde anot difüzyon tabakasının tabakası çıkarmış, metal köpük akım toplayıcı akış alanı kullanmıştır. Katot katalizörlerini doğrudan membran (Nafion 115) kapladığı çalışmada, Pt/Ru anot katalizörlerini difüzyon tabakası görevi gören karon kumaş üzerine destekleyerek membran elektrot düzeneği hazırlanmıştır. Oluşturulan membran elektrot düzeneği %47,8 açıklık oranına sahip delikli tip paslanmaz çelik anot akım toplayıcı akış alanı ve %95 gözenekliliğe sahip Ni-Cr köpük akım toplayıcı arasına yerleştirilerek hücre montajı yapılmıştır. Geliştirilen yakıt hücresi özellikle yüksek akım yoğunluklarında, geleneksel hücreye göre daha hücre performansı sağlamıştır. Bunun nedeni olarak da metal köpük akış alanının kütle transfer direncini azaltarak, daha yüksek oksijen transferi ve etkin su uzaklaştırması sağlaması gösterilmiştir.

Yüksek çalışma sıcaklığı reaksiyon kinetiğini arttırdığından dolayı, daha yüksek hücre performansı elde edilmesine neden olmaktadır. Hücre içerisinde üretilen ısının büyük bir çoğunluğunun katot akım toplayıcıdan kaybedildiğinden yola çıkarak, katot akım toplayıcısının düşük termal iletkenliğe sahip malzeme türünden tasarlanması hücre performansını arttıracak mühendislik tasarımıdır. Zhan ve Chen çalışmalarında (Chen ve Zhao 2007, 2017) Pasif DMYP katot akım toplayıcı akış alanı olarak Ni-Cr metal köpük malzeme kullanmıştır. Delikli tip paslanmaz çelik akım toplayıcıya kıyasla Ni-Cr metal köpük akım toplayıcısının daha düşük termal iletkenliğe sahip olması nedeni ile oluşturulan yakıt hücresinde daha yüksek hücre çalışma sıcaklıklarına çıkılabilmektedir. Ayrıca metal köpük akım toplayıcı, gözenekli yapının sağladığı kılcal kuvvetler ile reaksiyon ürünü suyun hücre içerisinde uzaklaştırılmasını olumlu yönde etkilemektedir. Suyun etkili bir şekilde hücre içerisinde uzaklaştırılması ile %100'e yakın metanol oksitlenme oranı elde edilmiştir. Ni-Cr metal köpük akım toplayıcı akış alanı kullanılması ile artan hücre çalışma sıcaklığına bağlı yüksek elektrokimyasal kinetik ve artan kütle taşıma özellikleri sonucu özellikle yüksek akım yoğunluklarında dikkat çeken performans artışı elde edilmiştir. Özetle metal köpük akım toplayıcı akış alanları, geleneksel delikli tip akım toplayıcılara göre daha iyi su yönetimi, oksijen tedariki, termal yönetim sağladığından dolayı daha iyi Pasif DMYP performansı sağlamıştır (Chen ve Zhao 2007, 2017, Mallick, Thombre ve Shrivastava 2015, Yang vd. 2014).

Shudo ve Suzuki çalışmasında (Shudo ve Suzuki 2008) gözenekli anot ve katot akış dağıtıcı (%90 gözenekliliğe sahip paslanmaz çelik köpük anot ve katot akış dağıtıcı) kullanımını, geleneksel akış dağıtıcı kullanımı ile mukayese etmiştir. Çalışmasının sonucunda metal köpük akış dağıtıcının geleneksel akış dağıtıcıya göre daha yüksek hücre performansı sağlamasının nedenlerini şu şekilde açıklamıştır; i) Geleneksel akış dağıtıcı plakada akışı engelleyen kanal destek bölgelerinin bulunması nedeni ile katalizör bölgesine homojen bir şekilde katalizör akışı sağlanamamaktadır. Dolayısıyla etkisiz katalizör bölgeleri oluşmaktadır. Metal köpük akış dağıtıcı kullanılması durumunda reaktiflerin homojen bir şekilde katalizör bölgesine taşınması sağlanmaktadır. Dolayısı ile metal köpük akış dağıtıcı kullanılması daha yüksek reaksiyon verimi ve hücre performansı sağlamaktadır. ii) Akış dağıtıcının gözenekli yapısı anot reaksiyonu sonucu oluşan CO₂'nin uzaklaştırılmasını teşvik eder. CO₂ nedeni ile oluşabilecek performans düşüşünün önüne geçilmiş olur. iii) Metal köpük akış dağıtıcı kılcal kuvvetlerin etkisi ile H₂O'nun başarılı bir şekilde hücre içerisinden uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. iv) Katot akış dağıtıcının hücre performansına etkisinin anot akış dağıtıcıdan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeninin katot reaksiyonu sonucu üretilen suya ek, anottan katoda suyun çapraz geçişinin olması gösterilmiştir.

Arisetty ve arkadaşları (Arisetty vd. 2007) çalışmalarında farklı gözenek boyutlarına ve yoğunluklara sahip metal köpük akış dağıtıcıların DMYP performansına etkilerini incelemiştir. Arisetty ve arkadaşlarının bu çalışması metal köpüklerin yakıt hücresi içerisinde kullanılmasına dair en kapsamlı çalışmalardan biridir. İki kısımdan oluşan bu çalışmanın ilk bölümünde %6-8 yoğunluğunda 10, 20 ve 40 PPI da ve %12-16 ve %18-24 yoğunluğa sahip 20 PPI metal köpük akış dağıtıcıların performans etkilerini incelemiştir. Sabit gözenek boyutunda köpük yoğunluğundaki artış (%6-8, %12-16, %18,24) ile hücre performansında artış gözlemlenmiştir. PPI değerleri eşit olduğundan dolayı düzlemsel yönde eşir gözenek boyutuna sahip bu yapıların akım toplama kapasiteleri eşittir. Ancak yoğunluk artışı ile düzlemsel yönde gözenek boyutu küçülür ve küçük gözenek boyutu katalizör ve GDL bölümünden CO₂ baloncuklarının ayrılmasını kolaylaştırdığından, hücre performansını arttırmaktadır. Çalışmanın ikinci kısmında akış dağıtıcı ve GDL görevi gören iki katmanlı metal köpük akış dağıtıcı kullanılmasının hücre performansına etkileri incelenmiştir. %6-8

yoğunluklu 40 PPI'daki metal köpük akış dağıtıcı ile paslanmaz çelik mesh, Ni köpük ve karbon kumaş GDL test edilmiştir. Ni köpük GDL kullanılan hücre değerine göre daha yüksek hücre performansı sağlamıştır. Ni köpük GDL kullanılan hücreden sonra en yüksek hücre performansı paslanmaz çelik GDL kullanılan hücrede elde edilmiştir.

4.1.2. Doğrudan etanol yakıt pilinde metal köpük kullanımı

Bir çeşit doğrudan alkol yakıt pili olan doğrudan etanol yakıt pili (DEYP) etanolün toksit özelliğinin son derece düşük olması ve yenilenebilir karakteri nedeni ile diğer yakıt pilleri arasında dikkat çekmektedir. DEYP ticarileştirilmesi için geliştirilmesi gereken iki tane ana dezavantaja sahiptir. Birincisi etanolün anodik elektro oksidasyon reaksiyon kinetiğinin ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 12\text{H}^+ + 12\text{e}^-$) düşük olmasıdır. Diğer dezavantajı ise hücre içerisindeki su yönetiminin oldukça ehemmiyetli olmasıdır. DEYP'de katodik reaksiyon sonucu altı molekül su üretilmektedir. Katodik reaksiyon ($\text{O}_2 + 12\text{H}^+ + 12\text{e}^- \rightarrow 6\text{H}_2\text{O}$) sonucu üretilen altı su molekülünden anodik reaksiyon için gerekli üç molekül su çıkarıldığında hücre içerisinden uzaklaştırılması gereken net üç su molekülü kalmaktadır. Su yönetiminin etkili bir şekilde yapılmaması, hücre içi direncin artmasına neden olarak hücre performansında kayıpların artmasına neden olmaktadır (Akhairi ve Kamarudin 2016, An vd. 2011, Demirci 2009, Kamarudin vd. 2013, Li ve He 2014, Tsang ve Leung 2018, Wang vd. 2010).

Etanolün düşük olan elektrokimyasal kinetiği DEYP'nin performansını kısıtlayan en önemli faktörlerden biridir. Son yıllarda, metal köpük yüzeyine katalizör kaplanması elektrotun aktif yüzey alanını arttırdığı ve kütle transferini kolaylaştırdığından reaksiyon verimini arttırdığından, etanol kinetiğini arttırmak için izlenen yollar arasında yer almaktadır. Wang ve arkadaşları (Wang vd. 2010) DEYP için nikel köpük üzerine Pd nano parçacıkları biriktirerek hazırladıkları elektrotu kullanmıştır. Hazırlanan metal köpük geometri ile elektrot kullanılan DEYP'nin, Pd film elektrot kullanılan DEYP'ye göre sekiz kat daha yüksek tepe akım yoğunluğu sağlamıştır. Ayrıca Pd-Ni elektrot karbon destekli elektroda göre de daha yüksek hücre performansı ve karalılık sağlamıştır.

Etanol oksidasyon reaksiyonu kinetiğinin asidik çalışma ortamına göre alkali çalışma

ortamında daha yüksektir. Etanol oksidasyonun alkali çalışma ortamında daha kolay gerçekleştiğinden dolayı son yıllarda anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pillerine (ADM-DEYP) olan ilgi artmıştır. Li ve Zhao (Li ve Zhao 2011) çalışmasında ADM-DEYP için Ni köpük destekli Pd katalizör tabakası kaplanarak katalizör tabakası ve difüzyon tabakasının entegrasyonundan oluşan anot elektrotu kullanmıştır. Optimum kalınlığa kadar Pd yükleme miktarındaki artış hücre performansında artış sağlamıştır (optimum kalınlığın üzerindeki Pd yüklemesi gözeneklerin tıkanmasına neden olur ve hücre içerisinde kütle taşınım olaylarını olumsuz etkilemektedir.). yağın bir şekilde kullanılan karbon destekli elektrot yapısı kullanılan yakıt hücresine elde edilen 130 mW/cm^2 'lik hücre güç çıkışı, elektro kimyasal aktif yüzey alanını genişleten, iyon ve kütle taşınmasını kolaylaştıran bu elektrot yapısı ile 1060 mW/cm^2 'a çıkmıştır. Li ve He (Li and He 2014) de çalışmalarında hazırladıkları Pd-Ni elektrotun karbon destekli (Pd-C elektroda) göre 1,16 kat daha yüksek hücre güç yoğunluğu elde ettiklerini belirtmiştir.

Hava erişimi olamayan yeraltı, denizaltı ve uzay uygulamalarından oksidan olarak hidrojen peroksit bileşiği kullanılmaktadır. Oksidan olarak hidrojen peroksit kullanılan sistemlerde, katottaki hidrojen peroksit ayrışması nedeni ile katot potansiyeli ve hücre performansında önemli miktarda düşüş meydana gelmektedir. An ve arkadaşları (An vd. 2011) oksidan olarak hidrojen peroksit kullanılan alkali asit DEYP'de hidrojen peroksit ayrışması nedeni ile meydana gelen performans düşüşünü azaltmak için altın kaplı Ni-Cr metal köpük elektrot kullanmıştır. Kullanılan elektrotun yüksek gözenekli yapısı sayesinde düşen kütle transfer direnci ayrışma sonucu oluşan atık ürünlerin, reaktiflerin reaksiyon ürünlerinin hücre içerisinde taşınmasını geliştirmiş ve Al-C elektrotta elde edilen 135 mW/cm^2 'lik maksimum güç yoğunluğu, %48 oranında artarak 200 mW/cm^2 a çıkmıştır.

4.1.3. Doğrudan glikoz yakıt pilinde metal köpük kullanımı

Glikoz doğada bol bulunması, ucu olması, toksit özelliğinin olmaması ve üretiminin kolay olması nedeniyle yakıt hücreleri için ideal yakıtlardan biri olarak görülmektedir. Doğrudan glikoz yakıt pillerinde (DGYP) katalizör olarak yaygın bir şekilde enzim ve mikro organizmalar kullanılmaktadır. Kullanılan katalizör türüne bağlı olarak enzimatik yakıt hücresi ve mikrobiyel yakıt hücresi olarak da

bilinmektedir. Enzim ve mikro organizmaların düşük aktivitesi, dayanıklılıklarının düşük olması, kısa ömürlü olmaları ve yüksek çalışma sıcaklıklarına olanak vermemeleri nedeniyle bu yakıt hücrelerinde düşük güç çıkışı elde edilmektedir. Son zamanlarda, DGYP'lerin düşük hücre performansını geliştirmek için metal köpük yüzey üzerine metal katalizör biriktirilen elektrotların kullanılması yolu izlenmiştir. Bu elektrot yapısı ile hücre performansında artış elde edilmesinin nedenleri; i) Enzimlerin ve mikro organizmaların dayanamayacağı hücre çalışma sıcaklıklarına çıkılabilmesi sağlamasıdır. ii) Metal köpük elektrotun yüksek elektrik iletkenliği reaksiyon sonucu serbest kalan elektrotların daha az dirence maruz kalmasına neden olması. iii) Metal köpüğün geniş spesifik yüzey alanı etkin katalizör yüzey alanını arttırarak, yüksek katalitik aktivite sağlamasıdır. iv) Metal katalizörlerin katalitik aktivitelerinin enzim ve mikro organizma katalizörlere göre daha yüksek elektro katalitik aktiviteye sahip olmasıdır (Chen vd. 2012, 2017, Cheng ve Wu 2013, Kumari, Shankar, ve Mondal 2018).

DGYP'de metal katalizör kullanılmasına dair ilk çalışmayı Chen ve arkadaşları (Chen vd. 2012) tarafından gerçekleştirilmiştir. Metal katalizör olarak, glikoz oksidasyon reaksiyonu ve oksijen indirgeme reaksiyonu için yüksek elektro katalitik aktiviteye sahip Ag kullanılmıştır. Katalizör biriktirilecek elektrot mimarisi olarak katalitik özelliğe sahip Ni köpük kullanılmıştır. Oluşturulan elektrot yapısı kullanılan yakıt hücresinde 80 °C çalışma sıcaklığında 2,03 mW/cm²'lik hücre güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu güç çıkışının mikro organizmaların kullanıldığı doğrudan glikoz yakıt hücresinde elde edilen 0,431 mW/cm²'lik ortalama güç çıkışından oldukça yüksek olduğu açıkça ortadadır.

Chen ve arkadaşları (Chen vd. 2017) başka bir çalışmada DGYP için Ni metal köpük matris üzerine Au katalizörü biriktirilmiş anot ve katot elektrotu kullanmıştır. Oluşturdukları yakıt hücresi ile 70 °C'lik çalışma sıcaklıklarında 23,6 mW/cm²'lik maksimum güç yoğunluğu elde edilmiştir.

Chen ve Wu (Cheng ve Wu 2013) çalışmasında, Pt kaplı Ni köpük ve paslanmaz çelik örgü yapıları elektrotların DGYP performansına etkileri incelenmiştir. Nikelin asidik korozyon direncini arttırmak için köpük yüzeyine %30 oranında PTFE yüklemesi yapılmıştır. Katalizör yükleme miktarına bağlı hücre performansının

arttığı belirtilen bu çalışmada, en yüksek hücre performansı Ni köpük matrisli elektrotta elde edilmiştir.

4.1.4. Doğrudan bor hidrür yakıt pilinde metal köpük kullanımı

Cao ve arkadaşları (Cao vd. 2010) Hidrojen peroksit kullanılan, doğrudan bor hidrür yakıt hücresi için kütle taşıma özelliklerini iyi, katalitik özellikleriyse yüksek elektrot elde etmeyi amaçladıkları çalışmada Au biriktirilmiş Ni köpük anot ve elektrotları kullanmıştır. Köpüğün üstün özellikleri ile yüksek reaksiyon oranı, kütle taşıma özellikleriyle sağlanmıştır ve hücre performansında belirgin bir artış sağlanmıştır.

Yang ve arkadaşları çalışmada (Yang vd. 2015) DBHYP için Au nanoporoz/Ni köpük elektrot ile iki boyutlu Au nanosheet/Ni köpük elektrotun hücre performans etkilerini incelemiştir. Daha yüksek katalizör aktif alanı elde edilmesini sağlayan Au nanosheet/Ni köpük elektrot kullanılan yakıt hücresinde artan katalitik aktivite sebebiyle daha yüksek hücre performansı elde edilmiştir.

4.1.5. Diğer yakıt pilleri

Cheng ve arkadaşları (Cheng vd. 2011) bir çeşit doğrudan alkol yakıt pili olan doğrudan 2 propanol yakıt hücresinde Pd/Ni köpük elektrot kullanmıştır. Ni köpük yüzeyine nano boyutlu Pd katalizör kaplaması, köpük geometrinin arttırdığı katalizör yüzey alanını daha da arttırmıştır. Buna ek akım toplayıcı görevi gören Ni köpüğün katalizör tabakası ile doğrudan teması hücre içerisindeki kayıpların düşmesine neden olmuştur.

Yang ve arkadaşları (Yang vd. 2006) Magnezyum-Hidrojen peroksit yakıt hücresinin katot aktivasyon kayıplarını azaltmak, katalizör verimini arttırmak için bimetalik yapıda Pd-Ag nanopartikülleri biriktirilmiş Ni köpük elektrot kullanmıştır. Ni köpük yüzeyine Ag biriktirilmesi ile daha ince tanecik yapısına sahip bir yüzey elde edilmiştir. Ag biriktirilmiş köpük yüzeye Pd biriktirilmesi ile daha da ince tanecik yapısına sahip çok katmanlı yüzey elde edilmiştir. Kaplamanın yüzey alana etkilerinin hücre performansını etkileyeceği belirtilen bu çalışmada Pd-Ag/Ni köpük elektrot kullanılan hücrede, Ag/Ni elektrot kullanılan hücreye göre %27 daha yüksek hücre güç yoğunluğu elde edilmiştir.

4.2. Elektrolitik Kaplama

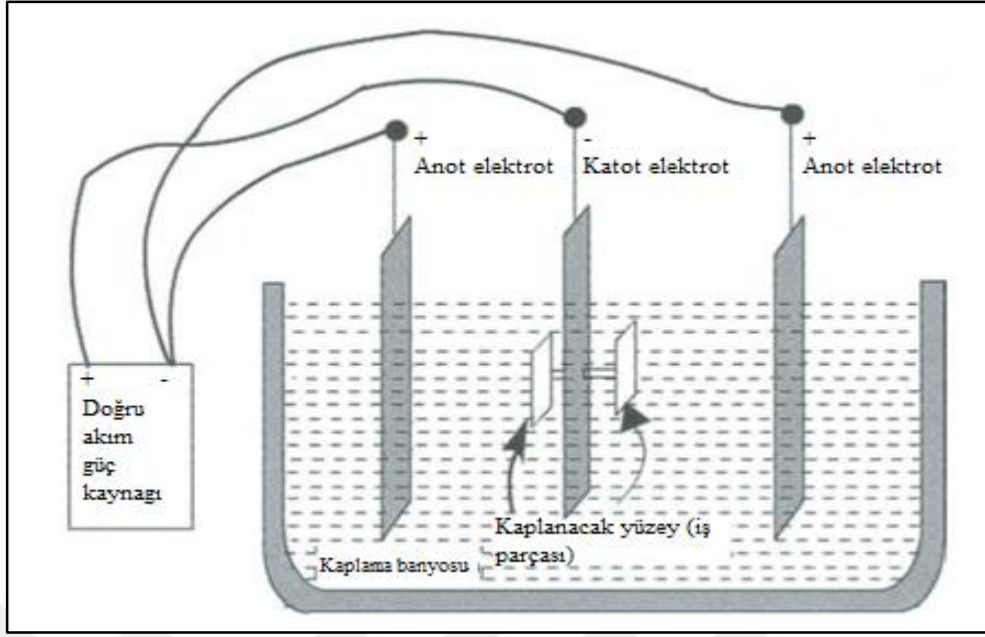
Elektrolitik kaplama, kaplama metalinin iyonlarını içeren sulu bir çözelti içerisinde ki metal iyonlarının basit elektroliz metodu ile kaplanacak iş parçası yüzeyine yapışmasını sağlayarak ince bir metal film kaplama yüzeyi elde edilen kaplama metodudur (Rao ve Trivedi 2005). Malzeme yüzeyinde ince metal film oluşturan elektrolitik kaplama, metal veya metal olmayan yüzeylere estetik görünüm, aşınma dayanımı, korozyon direnci kazandırmak için yaygın bir şekilde tercih edilen elektrokimyasal bir metottur (Asthana, Kumar, ve Dahotre 2007, Sasi vd. 2015).

Elektrolitik kaplamanın ilk uygulaması 1843 yılında R. Boettper tarafından metal yüzeye nikel kaplayarak gerçekleştirilmiştir. İlk ticari uygulaması 1849 yılında gerçekleştirilen bu yöntem, elde edilen yüzeylerin başka yöntemlerle elde edilememesi nedeni ile günümüzde vazgeçilmez bir yöntem haline gelmiştir ve endüstrinin birçok kolunda kullanılmaktadır (Berk vd.).

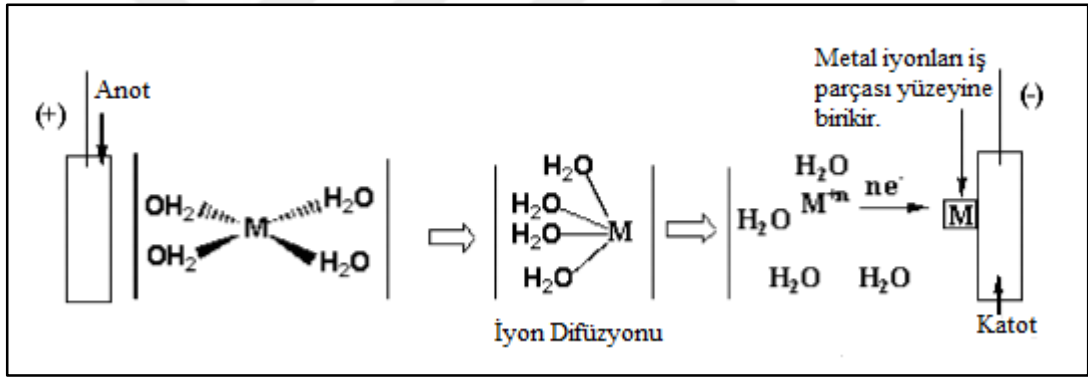
Bu tez kapsamında gaz difüzyon elektrotu olarak kullanılacak bakır köpük elektrolitik kaplama metodu ile paladyum ve çinko kaplanacaktır. Bu konu başlığının ilerleyen kısımlarında elektrolitik kaplama ile ilgili detaylı bilgi ve ilgili kaplamalara dair çalışmalara yer verilmiştir.

4.2.1. Kaplama prensibi

Elektrolitik kaplama işlemi kaplama metalinin iyonlarını içeren iletken elektrolitik sıvı (kaplama banyosu) içerisine yerleştirilmiş, katot elektrot görevi gören kaplanacak iş parçası ve anot elektrotu doğru akım geçirilmesi ile gerçekleşmektedir (Şekil 4.3. Kaplama düzeneğinin şematik gösterimi). Kaplama mekanizması şu şekilde gerçekleşmektedir; Sisteme akım verilmesi ile elektrolitik sıvı içerisinde ki çözülmüş metal iyonlarının ve anot elektrotundan çözünen metal iyonlarının kaplanacak yüzeye doğru difüzyonu gerçekleşir, metal iyonların iş parçası yüzeyine çökler (birikir) ve kaplama işlemi gerçekleşir (Şekil 4.4.) (Anonymous 1998, Berk vd., Devivier vd. 2015, Hurley 2003, Nasser Kanani 2004, Rao ve Trivedi 2005, Shipway 2006, Yli-Pentti 2014).



Şekil 4.3. Elektrolitik kaplama sisteminin şematik gösterimi



Şekil 4.4. Kaplama mekanizmasının şematik gösterimi

Kaliteli bir kaplama elde edilmek için kaplama öncesinde kaplanacak yüzeyin yağ, cila atıklarından, yüzeyde oluşan oksit tabakasından arındırılması gerekmektedir (Asthana vd. 2007, Berk vd., Shipway 2006). Bunun için sırasıyla cila ve yağ atıklarını gidermek için yağ giderme, oksit tabakasının temizlenmesi için asitle dağlama işlemleri yapılmalıdır. Yağ alma işlemi alkali (bazik) temizleme çözeltisine daldırılmış iş parçası ve paslanmaz çelik elektrotta akım verilmesi ile gerçekleşmektedir. Bu işlem ile yüzeyindeki yağ ve ciladan arındırılmış iş parçası ardından, dağlama banyosuna (saf su ile seyreltilmiş sülfürik asit) daldırılarak oksit tabakasından da arındırılarak kaplama işlemi için hazır hale getirilir (Anonymous 1998 vd., Asthana vd. 2007, Berk vd., Shipway 2006).

Kaplama işlemi elektrokimyasal bir işlem olduğundan kaplama kalitesi birçok faktöre bağlıdır. Bunlar;

- Kaplama banyosunun kimyasal bileşenlerine ve kullanılan suya,
- Kaplanacak yüzeyin durumuna: yüzeyde bulunan yağ ve oksit tabakası metal iyonların yüzeye yapışmasını olumsuz etkilemektedir.
- Akım yoğunluğu: kaplama kalitesinde iki karşıt etki oluşturmaktadır. Akım yoğunluğunun eşik değere kadar artırılması kristal oluşum hızını artırır homojen ince bir kaplama elde edilmesini sağlamaktadır. Eşik değerin üzerindeki akım yoğunlukları iyon deşarjının çok fazla olmasına, iyonların banyo içerisinde yeterince karıştırılmamasına dolayısıyla, homojen kaplama elde edilememesine neden olmaktadır.
- Sıcaklık: sıcaklığın artması ile kristal oluşum hızını artar ve daha büyük kristalli, süngerimsi yüzeyler elde edilmesine neden olur.
- Kaplama banyosunu pH değerinin referans aralıkların dışında olması kaplama kalitesini bozucu etki oluşturmaktadır (Asthana vd. 2007, Berk vd. , Nasser Kanani 2004)

4.2.2. Bakır köpüklerin kaplanması

Açık hücreli metal köpükler içerisinde bakır köpükler maliyeti düşük ve kolay üretilebilir olması ile diğer metal köpük malzemeleri arasında dikkat çekmektedir. Ne yazık ki bakır köpükler düşük korozyon dayanımı ile uygulama alanında sınırlamalar oluşmaktadır (Boonyongmaneerat, Schuh, ve Dunand 2008). Malzemelerin daha üstün özellikler sergileyen malzemeler ile elektro kaplanması, kaplanan malzemenin dayanamayacağı çalışma ortamlarına dayanımını geliştirmek için uygulanan bir yaklaşımdır (Boonyongmaneerat vd. 2008). Çalışmada difüzyon elektrotu olarak kullanılacak bakır köpüğün hem çalışma ortamına dayanımını arttırmak hem de katalitik özellikler kazandırmak için çeşitli kaplamalar yapılmıştır.

Paladyumun özellikleri: Simgesi Pd olan elementin, atom ağırlığı 106,4'tür. Çelik beyazı olan bu metal normal sıcaklıkta atmosfere açık ortamda oksitlenmez ve kararmaz. Asil metal grubu elementlerindedir. Kimyasal olarak kararlı bir elementtir, diğer elementlerle bileşik oluşturmaz. Elektriksel direnci gümüş ile karşılaştırıldığında yedi kat daha yüksektir (Kaplama Banyoları).

Paladyum yüksek katalitik aktivitesi, korozyon direnci, muazzam kimyasal, fiziksel, elektriksel özellikleri ve asil metal grubundaki diğer metallere daha ucuz nedeniyle birçok endüstri tarafından dikkat çeken bir kaplama malzemesidir (Kublanovsky vd. Nikitenko 2013, Lai, Wang, ve Wan 1992, Lewis vd. 1983, Rao vd. Trivedi 2005).

Hernández ve arkadaşları (Hernández vd. 2008) değişen akım yoğunluklarından (1-10 mA/cm²) ve pH değerlerinin (8,5-10,5), benzersiz manyetik özelliklere ve hidrojen emme özelliklerine sahip FePd'nin kaplama kalitesine etkilerini incelemiştir. pH'daki değişim alaşım birleşim oranına etkilemediği, ancak tane boyutu ve şeklini önemli etkilediği sonucuna varılmıştır. Akım yoğunluğunun artması ile tane boyutu büyüyerek kaplama yapısının daha gözenekli gelmektedir.

Çinkonun özellikleri: Simgesi Zn olan elementin, atom ağırlığı 65,38'dir. Mat dökümlü mavimsi rengi olan bir metal olarak bilinmektedir. Oda sıcaklığında kırılmandır, 100 °C ve üstünde sıcaklıklara çıkıldığında dövülebilir hale gelmektedir. Tekrar oda sıcaklığına soğutulduğunda yeniden kırılğan bir yapıya dönüşmektedir. Alüminyum gibi amfoter bir metaldir. Hem asit hem de bazlar ile tepkime vermektedir. Kimyasal tepkimelerde genellikle katalizör görevi görmektedir (Kaplama Banyoları).

5. DENEYSEL YÖNTEM VE BULGULAR

5.1. Kullanılan Malzemeler ve Metotlar

DBYP tek hücre testlerinin yapılabilmesi için numuneler 5x5 cm²'lik kare parçalar şeklinde 0,5 cm kalınlığında kesilmiştir. Kesme işlemi sonrasında parçalar malzemelerde elektro kaplamada tutarlı sonuçların eldesi için, çeşitli temizleme ve şartlandırıcı işlemlerin, başlangıçtaki metalik tabakanın çökmesi ve düzgün bir aktivite yüzeyi elde edilmesi esastır. Numune yüzeyi herhangi bir yağ, parlatma bileşiği ve diğer yabancı maddelerden arındırılmış olmak için aşamalardan geçmektedir.

Yumuşak bir aşındırma tipi temizleyici için uygun bir sıcaklıkta sulu karbonat fosfat çözeltisi (Tablo 5.1.) kullanılmıştır. Daha sonra deiyonize edilmiş suya numune batırılmıştır.

Tablo 5.1. Yüzey temizleyici çözelti reçetesi

Sodyum karbonat	25 g/l
Sodyum Fosfat	25 g/l
Sıcaklık	60-80 °C
Süre	1-3 dak.

Kostik daldırma, hem demir içermeyen hem de demir bileşenlerinden kaplamalar, boyalar ve diğer aşındırıcı bileşenlerin soyulması için en yaygın ve en düşük maliyetli tekniktir (Tablo 5.2.).

Tablo 5.2. Kostik daldırma çözeltisi reçetesi

Sodyum hidroksit	50 g/l
Süre	30s -1 dak.
Sıcaklık	50°C

Kostik soda banyosundan sonra bakır köpükler yıkanır. Bunu takiben bir nitrik asit-amonyum biflorür solüsyonuna daldırılır (Tablo 5.3.). Nitrik asitle yapılan dağlama sonucunda kaplama için pürüzlü yüzey alanı oluşturulmuştur.

Tablo 5.3. Nitrik asit desmutter çözeltisi reçetesi

Nitrik asit	500-700 ml
Amonyum biflorür	30-120 g/l
Süre	30s
Sıcaklık	20-25 °C

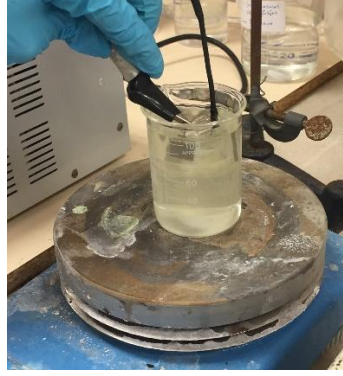
Şekil 5.1’de kaplama öncesi banyolar görülmektedir. Her bir banyo adımından sonra alkollü su ile durulama yapıp banyolardan gelebilecek kimyasal tepkimelerin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Yine her bir adımdan sonra köpükler çok fazla su tuttuğu için ekstra bir kurutma yapılmıştır.



Şekil 5.1. Bakır köpükleri kaplamak için kullanılan ön hazırlık banyoları



Şekil 5.2. Sırası ile kaplamasız ticari bakır köpük, Pd-Zn ile kaplanmış ticari bakır köpük, Pd ile kaplanmış bakır köpük



Şekil 5.3. Bakır köpükleri kaplamak için hazırlanmış Pd-Zn kaplama banyosu

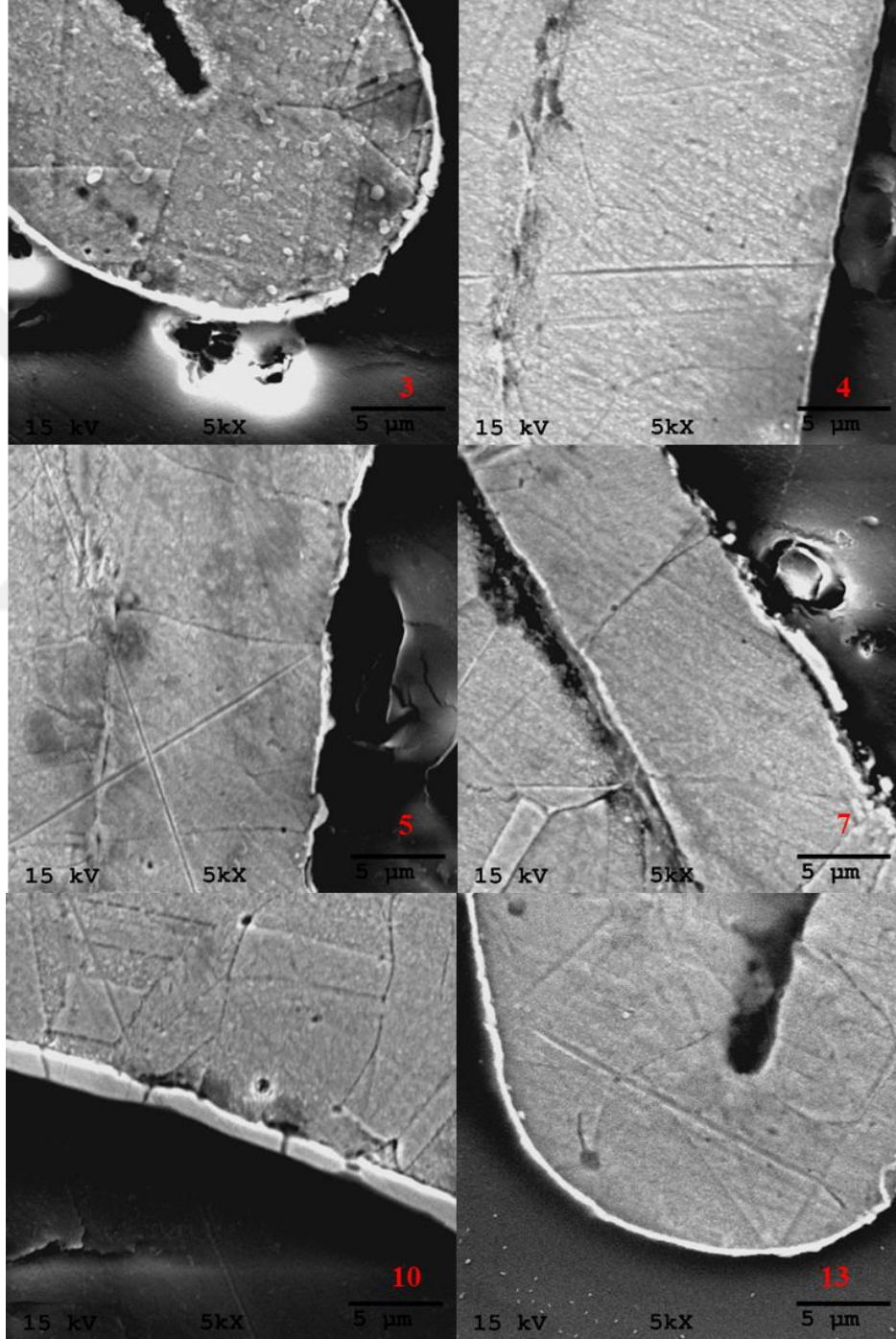
Bakır köpükleri kaplamak için kullanılan Pd-Zn kaplama banyosu için ticari Pd banyosu alımı yapılmıştır. Zn alımı yapılan Pd banyosunun içine belirlenen molarlarda çinko oksit olarak eklenip banyo çözeltisi hazırlanmıştır. Anot elektrodu olarak platin tel kullanılmıştır. Banyo sıcaklığı sabit olup 50 °C olarak belirlenip tutma süresinde sabit alınarak kaplamalar yapıp gerilimler değiştirilerek Tablo 5.4 oluşturulmuştur.

Tablo 5.4. Pd-Zn kaplanan bakır köpüklerin değerleri

Numune	Ağırlık (mg)			Ortalama Kalınlık Farkı (μm)	Tutma Süresi (dak.)	Gerilim (V)	Akım (A)
	ilk	son	fark				
1	6186,8	6640	453,2		15	3	0,29
3	6220	6313,3	93,3	1,08	15	3	0,4
2	6245,2	6365,1	119,9		15	3	0,52
13	6160,2	6234,5	74,3	1,33	15	3	0,45
6	6670	6810	140		15	3,5	0,4
7	6402,8	6730	327,2	1,45	15	3,5	0,6
8	6827,9	7331,5	503,6		15	3,5	0,56
9	5769,7	6035,4	265,7		15	3,5	0,56
4	6610	6810	200	1,49	15	4	0,85
11	6720	7089,7	369,7		15	4	0,7
10	7152,7	7543,6	390,9	1,42	15	4	1,09
12	6680,2	7375,6	695,4		15	4	1,09
5	6850	7270	420	1,54	15	4,5	0,8
14	6884,2	7320	435,8		15	4,5	1
15	6437,5	6925,2	487,7		15	4,5	1
16	6729,7	7463,2	733,5		15	4,5	1,3

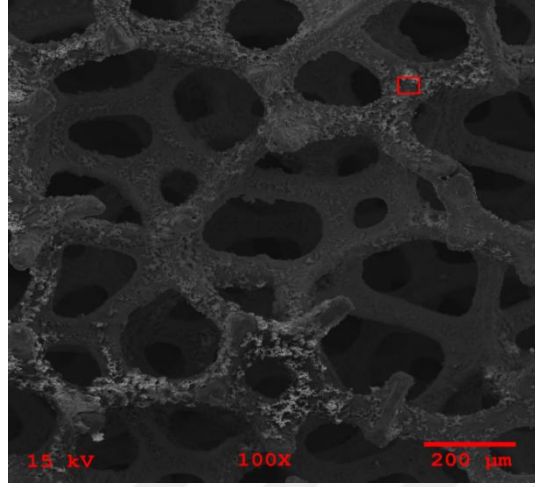
Tablo 5.4'te kırmızı olarak yazılmış numuneler seçilip SEM ve EDX analizleri yapılmıştır. Tablodan ayrıca gerilim değeri arttıkça kaplama ağırlığının artışı

gözükmektedir. Kaplama makro boyutta homojen olup mikro boyutta homojen kalınlıkta kaplanamadığı için ve analizlerde her noktaya bakmak mümkün olmayacağı için kalınlıklar en az 20 farklı noktadan seçilip ortalaması alınarak tabloya yazılmıştır. Fakat gerilim arttıkça kaplama kalınlığının arttığı görülmektedir (Şekil 5.4).



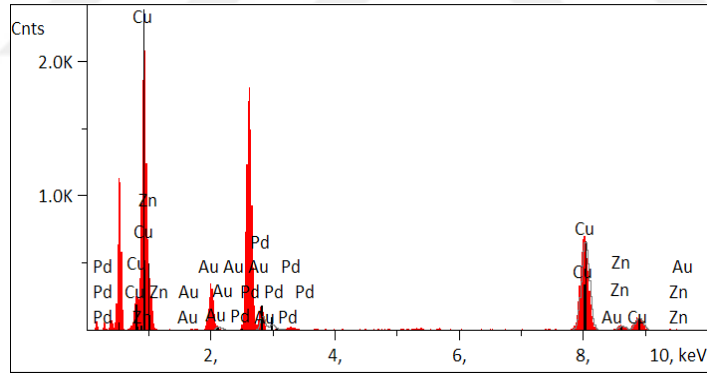
Şekil 5.4. Pd-Zn kaplanmış bakır köpüklerin kesiti alınmış görüntüsü

Pd-Zn kaplanan bakır köpük numunelerinin SEM ve EDX analizleri ve sonuçları aşağıdaki resim ve tablolarda görülmektedir.



Şekil 5.5. Numune 3 için SEM görüntüsü

Numune 3 için bakılan SEM görüntüsünde yüzeyde haşın bir kaplama olduğu görülmektedir. Yüzeydeki pürüzlülük sayesinde aktif alanın artması sağlanmıştır. 3V'da kaplanmış olup çektiği düşük akımdan ötürü kaplama ağırlığı düşük çıkmıştır.

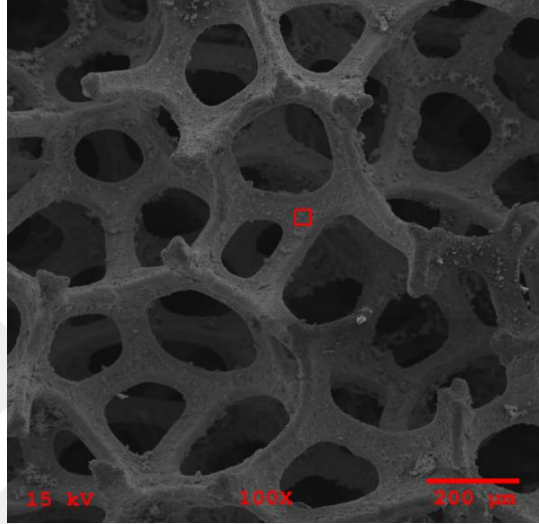


Şekil 5.6. Numune 3 için EDX analizi

Tablo 5.5. Numune 3 için EDX analiz sonuçları

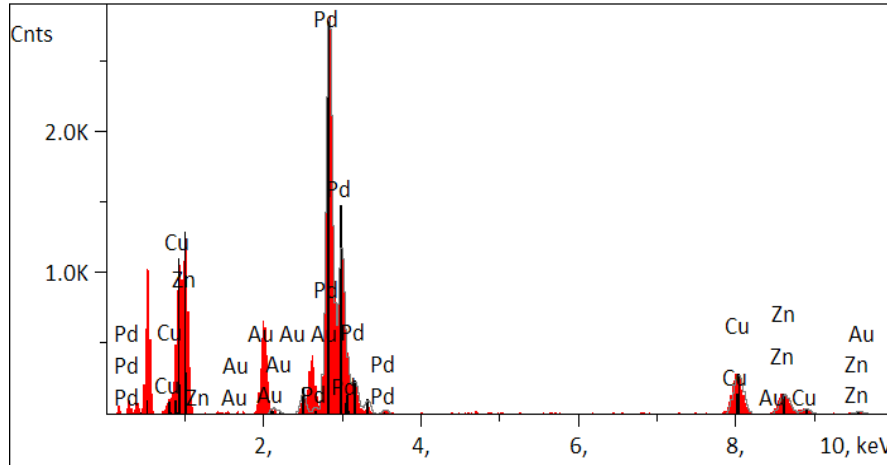
Element	Düzlem	Yoğunluk (devir/s)	Konsantrasyon	Birim
Cu	Ka	179,39	85,290	ağ.%
Zn	Ka	9,78	6,371	ağ.%
Pd	La	19,27	4,568	ağ.%
Au	La	0,49	3,771	ağ.%
Toplam			100,000	ağ.%

EDX analizi noktasal bir analiz olup işaretlenen yerden (Şekil 5.3) ışınları ölçerek o noktada bulunan element veya elementlerin K alfa L alfa vd. değerleri ile karşılaşıp hangi elementin olduğunu söylemektedir. Tablo 5.5 ve Şekil 5.6'daki piklerden görüldüğü üzere bakır köpükler üzerine Pd ve Zn başarılı bir şekilde kaplanmıştır. Analizlerde gelen Au bakalite alınan numunenin üzerine yüzeyde ölçüm için iletkenliği sağlaması amacıyla kaplandığından pik değerleri görülmektedir.



Şekil 5.7. Numune 4 için SEM görüntüsü

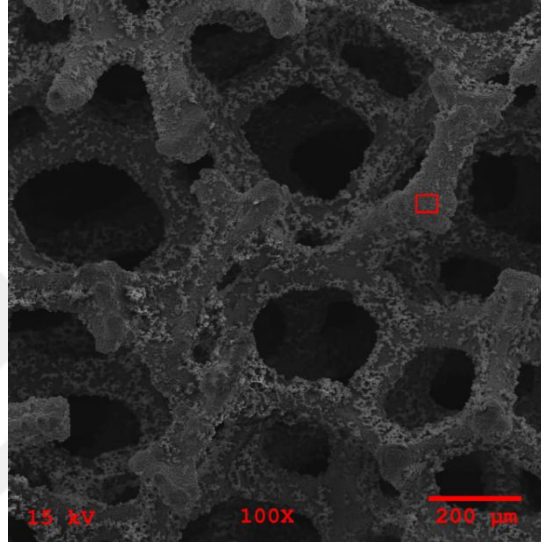
Numune 4 içinde kaplamanın makro boyutta homojen olduğu gözükmemektedir. Şekil 5.7'de işaretlenen kırmızı alanda noktasal EDX analizi yapılmıştır. Pd ve Zn'nun diğer numunelere göre en yüksek çıktığı görülmektedir. 4V'da kaplanmış olup Tablo 5.6'da analiz sonucu ağırlıkça %'lik (wt.%) içerdiği elementlerin değerleri gözükmemektedir.



Şekil 5.8. Numune 4 için EDX analizi

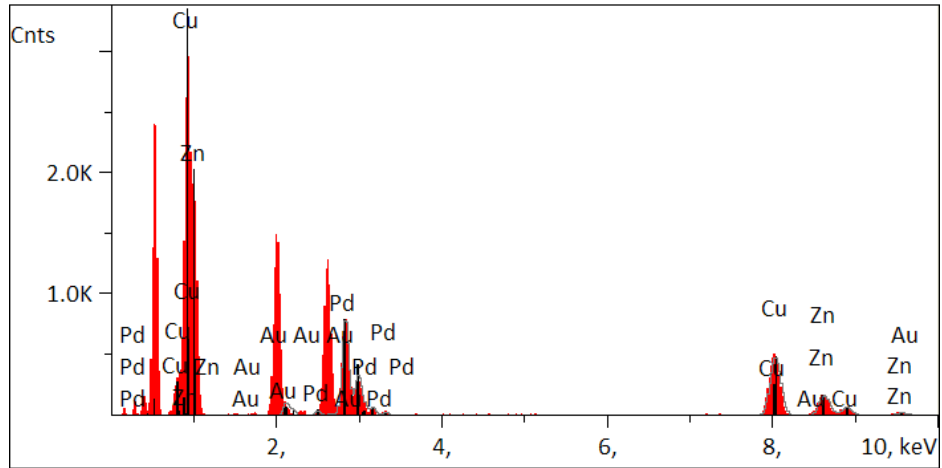
Tablo 5.6. Numune 4 için EDX analiz sonuçları

Element	Düzlem	Yoğunluk (devir/s)	Konsantrasyon	Birim
Cu	Ka	76,97	19,651	ağ.%
Zn	Ka	40,75	14,178	ağ.%
Pd	La	489,10	63,340	ağ.%
Au	La	0,70	2,831	ağ.%
Toplam			100,000	ağ.%



Şekil 5.9. Numune 5 için SEM görüntüsü

Numune 5 için bakıldığında numune 3'e göre daha pürüzlü bir kaplama yüzeyi gözükmektedir. Şekil 5.9'da işaretlenen noktadaki EDX analizine bakıldığında Pd-Zn oranının dengeli dağıldığı gözlemlenmektedir (Tablo 5.7). 4,5V'da kaplanmış olup ağırlık farkı 420 mg çıkmıştır.

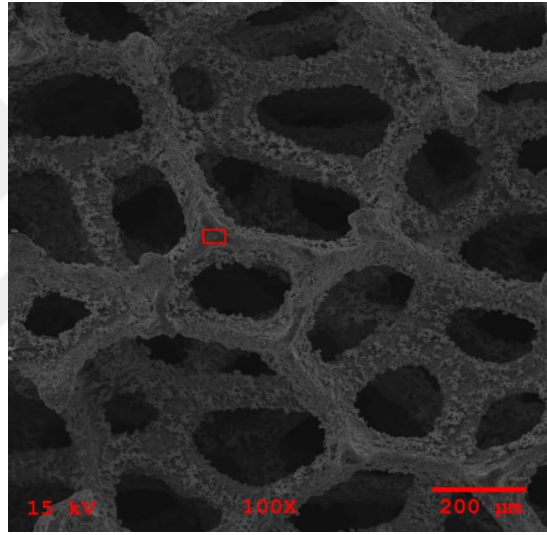


Şekil 5.10. Numune 5 için EDX analizi

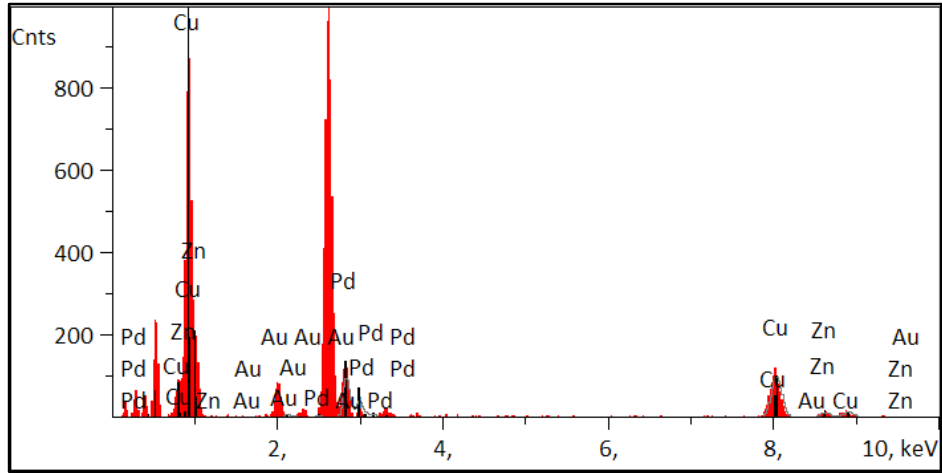
Şekil 5.10'daki piklere bakıldığında 2 keV'un solunda kalan piklerde Pd ve Zn pikleri yaklaşık aynı çıkmıştır. 1:1 oranında bakır köpük üzerinde kaplama yapıldığı görülmektedir.

Tablo 5.7. Numune 5 için EDX analiz sonuçları

Element	Düzlem	Yoğunluk (devir/s)	Konsantrasyon	Birim
Cu	Ka	130,75	46,601	ağ.%
Zn	Ka	46,84	22,900	ağ.%
Pd	La	138,13	25,515	ağ.%
Au	La	0,86	4,984	ağ.%
Toplam			100,000	ağ.%



Şekil 5.11. Numune 7 için SEM görüntüsü



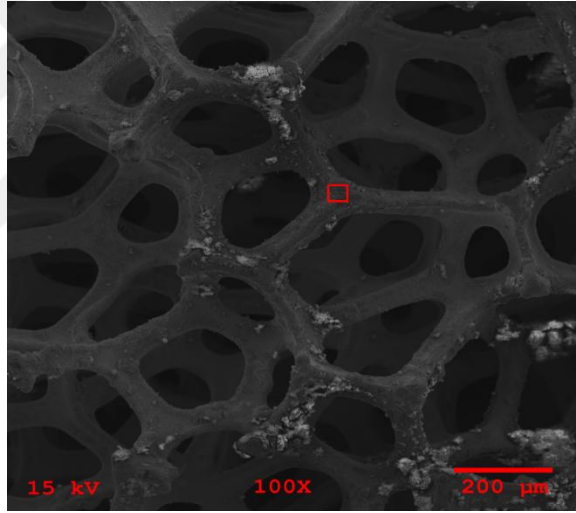
Şekil 5.12. Numune 7 için EDX analizi

Numune 7'de de makro boyutta pürüzlü homojen bir kaplama gözükmemektedir. Şekil

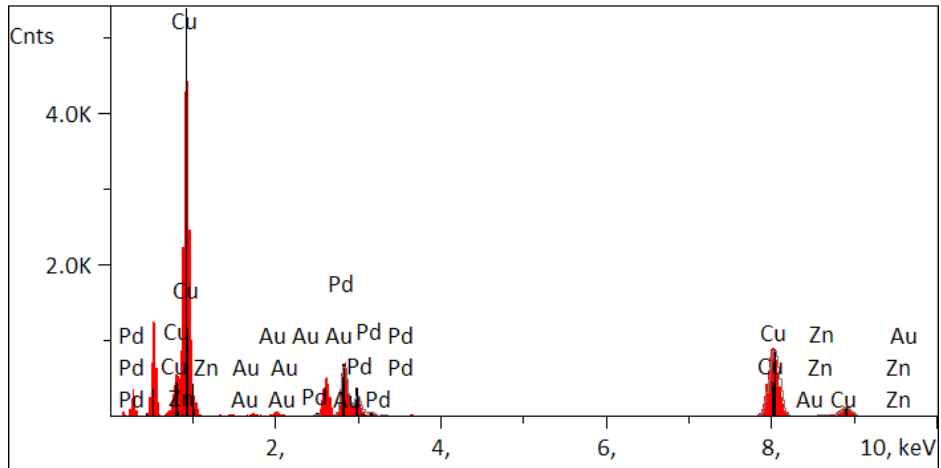
Numune 10'a baktığımızda 4V ile kaplanmış en yüksek kaplama ağırlığına sahip olup yüzeyde makro boyutta homojen kaplandığı görülmektedir. Şekil 5.14'te düşük konsantrasyonda pikler çıkmış olmasına rağmen analiz edilen diğer numunelere göre Zn piki en yüksek çıkmıştır. Ayrıca Pd ve Cu piklerine göre de Zn pikinin konsantrasyonu ağırlıkça yüzdeye bakıldığında yüksek çıkmıştır (Tablo 5.9).

Tablo 5.9. Numune 10 için EDX analiz sonuçları

Element	Düzlem	Yoğunluk (devir/s)	Konsantrasyon	Birim
Cu	Ka	69,43	59,871	ağ.%
Zn	Ka	27,12	32,262	ağ.%
Pd	La	11,24	4,970	ağ.%
Au	La	0,20	2,896	ağ.%
Toplam			100,000	ağ.%



Şekil 5.15. Numune 13 için SEM görüntüsü



Şekil 5.16. Numune 13 için EDX analizi

Numune 13 ise 3V ile kaplanmış olup en düşük ağırlık farkına sahiptir (Şekil 5.15). Yüzeyde makro boyutta homojen kaplama mevcuttur. Yüksek konsantrasyonda bakır piki gözükmemektedir (Şekil 5.16). Bunun sebebi seçilen noktanın kaplamanın az olduğu bir yüzeye denk gelmesinden dolayı bu kadar büyük Cu piki verdiği görülmektedir. Tablo 5.10'a bakıldığında ağırlıkça yüzde den Pd oranının Zn oranının 9 katı kadar olduğu görülmektedir.

Tablo 5.10. Numune 13 için EDX analiz sonuçları

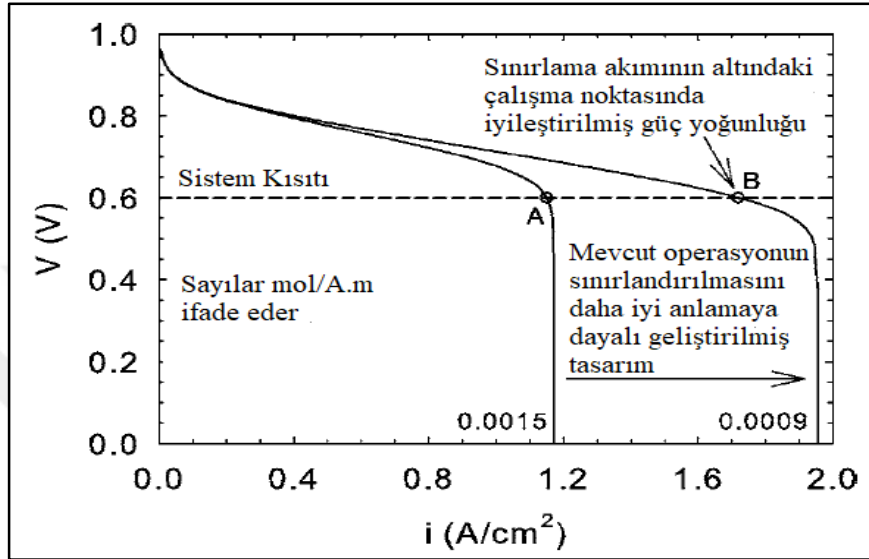
Element	Düzlem	Yoğunluk (devir/s)	Konsantrasyon	Birim
Cu	Ka	237,63	73,970	ağ.%
Zn	Ka	8,46	3,600	ağ.%
Pd	La	114,82	18,113	ağ.%
Au	La	0,86	4,317	ağ.%
Toplam			100,000	ağ.%

Sıcaklığın yakıt hücresinin özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirlerken, reaktiflerin kısmi basınçların ve membran neminin etkisi düşüktür. Elde edilen bulgulara dayanarak, optimum çalışma sağlamak için yakıt hücresi sistemlerinde farklı karmaşıklığa sahip ölçüm ve kontrol ekipmanı için tasarım kriterleri tanımlayabilmektedir (Davor Živko, Vedran Bilas, 2007).

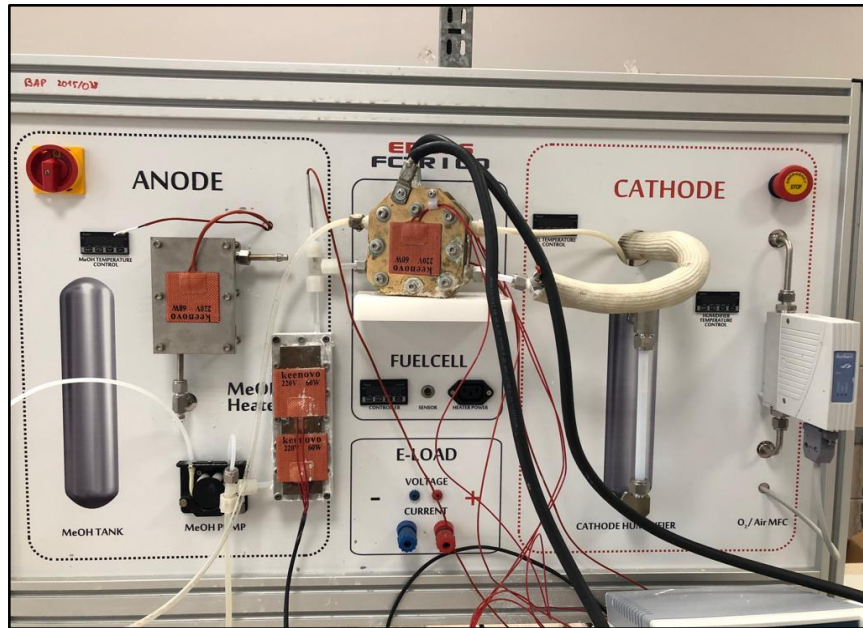
Yüksek akım yoğunluklarında, tüm reaktanların ve ürünlerin toplu taşınması önemli olabilir. Bu nedenle, farklı kütle taşınımı aşırı kapasitelerin ayrılmasını gerektirir. Son teknoloji malzeme ve tasarım ihmal edilebilir ohmik kayıplar ile karakterize edilir (elektron kütle taşınımı). Buna karşılık, su daha fazla dikkat gerektirmektedir. Su buharı taşınım kayıpları doymuş giriş akımları (konsantrasyon gradyanını minimize ederek gaz faz taşınımının olmaması) kullanarak en aza indirgenir, bu aynı zamanda hem göç hem de difüzyon ile zardaki proton taşınımını artırır. Sıvı su, özellikle hem kütle taşınımı hem de kinetik kayıplar üzerindeki etkisinden dolayı daha problemlidir (M. Doyle ve G. Rajendran 2003, U. Pasaogullari ve C. Y. Wang 2004).

Hücrenin polarizasyon eğrisinin modelinin bazı parametrelerinin tahmini için bir metodoloji ve parametrelerin temel bağımsız değişkene (hücre çalışma sıcaklığı) karşı davranışını analiz etmiş ve tartışmıştır. Sınırlı sayıda deney noktası ve özellikle

de deneylerin sadece bir MEA kullanılarak yapılmış olması nedeniyle, parametreleri ve çalışma sıcaklığını birbirine bağlayan genel analitik korelasyonlar önermek mümkün olmamıştır, analiz yönteminin potansiyeli ve deneylerin kolaylığı, geniş bir MEA tipolojisine uygulanmasına izin vermektedir (M.G. Santarelli, M.F. Torchio, P. Cochis, 2006).

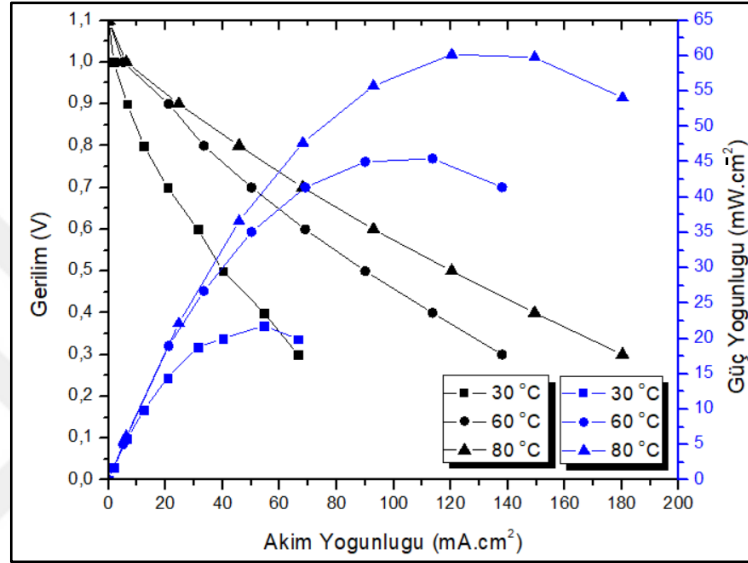


Şekil 5.17. Sınırlandırıcı akım yoğunluğu işleminin daha iyi anlaşılması ile elde edilen operasyonel akım yoğunluğundaki artışın arkasındaki prensibi gösteren oksijen kütle transfer katsayısının farklı değerleri için polarizasyon eğrileri



Şekil 5.18. Tek hücre test sistemi

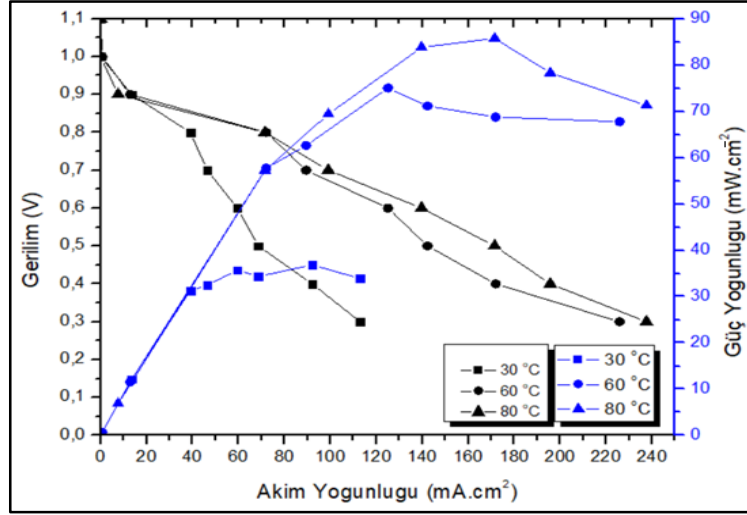
Tek hücre test çalışmalarında yakıt pilinin bileşen kısımlarında; anot kısmı için 5x5x0,5 cm'lik Pd-Zn kaplı bakır köpük, yakıt pilinin katot kısmı için 1mg cm⁻² Pt/C katalizör kaplı difüzyon tabakası, yakıt pili yakıt çözeltisi (% ağı.) %4 NaBH₄ + %12 NaOH, membran olarak Nafyon 117 ve son olarak 0,3L/dak kuru Oksijen oksidant olarak beslenmiştir. Belli bir koşullandırma prosesi altında deneyler gerçekleştirilmiştir.



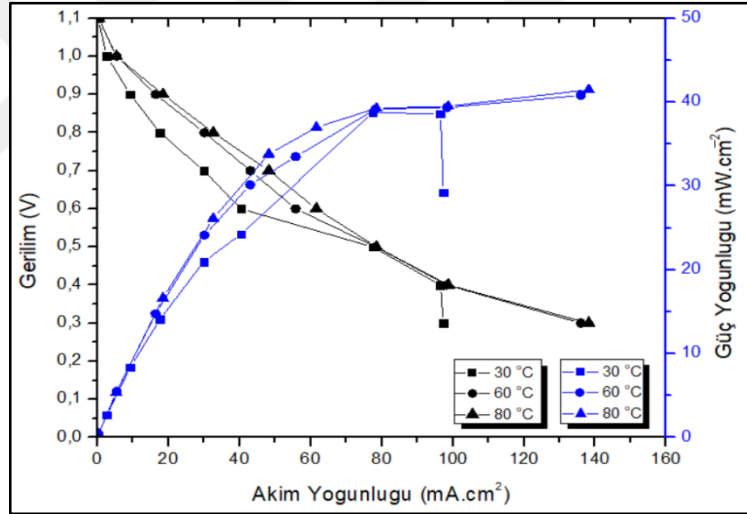
Şekil 5.19. Numune 3 için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1mg/cm² Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağı.): %4 NaBH₄+%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)

Numune 3 için 80°C'de en iyi güç ve akım yoğunluğunun elde edildiği görülmektedir. Şekil 5.19'da verilen polarizasyon eğrilerine bakıldığında sıcaklık arttıkça akım yoğunluğunun arttığı gözükmemektedir. Bu durumun sebebi sıcaklık arttıkça proton iletkenliğinin ve indirgenme reaksiyonlarının hızlanmasından dolayı, yakıt hücresinin veriminin artmasıdır. En yüksek güç yoğunluğu 59,76 mW/cm² olup 0,4 V'da elde edilmiştir.

Numune 4 için Şekil 5.20'ye bakıldığında 0,8V'a kadar aktivasyon eğrisinin 60 ve 80 °C'lerde aynı kaldığı görülmektedir. Bu da 0,8V'a kadar aynı güç yoğunluğunda seyredeceklerini göstermektedir. 30 °C'de ohmik kayıpların fazla olduğu görülmektedir. Düşük sıcaklık ve ohmik kayıplardan dolayı bakılan diğer sıcaklıktaki değerlere göre düşük kalmıştır.

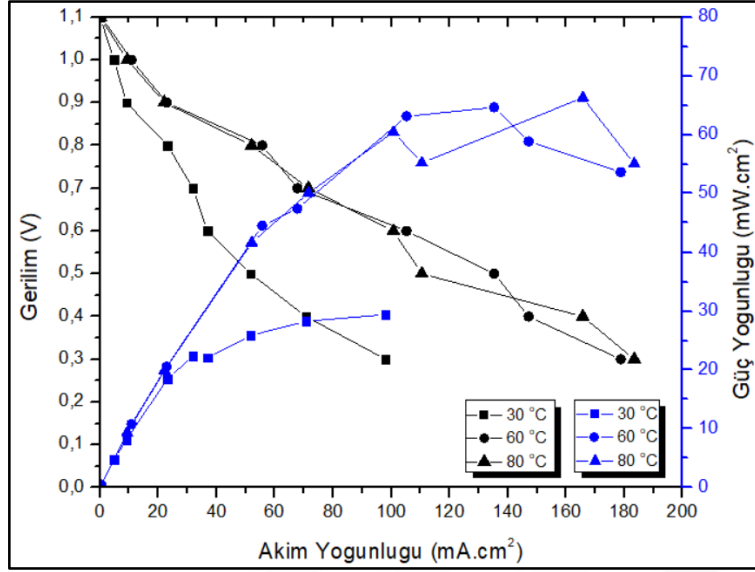


Şekil 5.20. Numune 4 için yapılan tek hücre test sonucu (Katot: $1\text{mg}/\text{cm}^2$ Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH_4 +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)



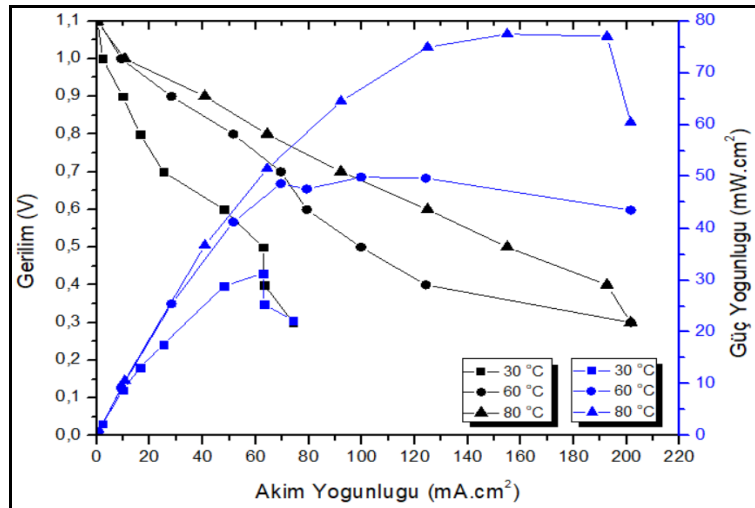
Şekil 5.21. Numune 5 için yapılan tek hücre test sonucu (Katot: $1\text{mg}/\text{cm}^2$ Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH_4 +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)

Numune 5'te 30°C 'de kırılma görülmektedir (Şekil 5.2). Bu kırılmanın konsantrasyondan kaynaklı akım limitine ulaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Grafikte 60 - 80°C 'lerde yakın değerlerde gitmiş olup artan bir eğri görülmektedir. 5. Numunenin DBHYP'inde kullanıldığı durumda sıcaklık değişiminden minimum etkilendiği ve düşük sıcaklıklarda da aynı performansta çalışabileceği görülmektedir.



Şekil 5.22. Numune 7 için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1mg/cm² Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH₄+%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)

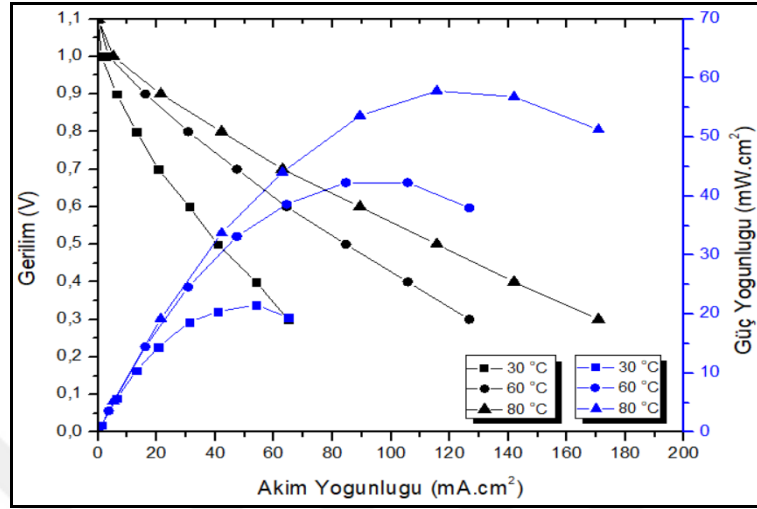
Numune 7'de 60-80°C'lerde düşük gerilimde stabil sonuç elde edilememiştir. Bununla beraber stabil olmasa dahi 60-80°C'lerde performanslar birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır (Şekil 5.22).



Şekil 5.23. Numune 10 için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1mg/cm² Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%wt): %4 NaBH₄+%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)

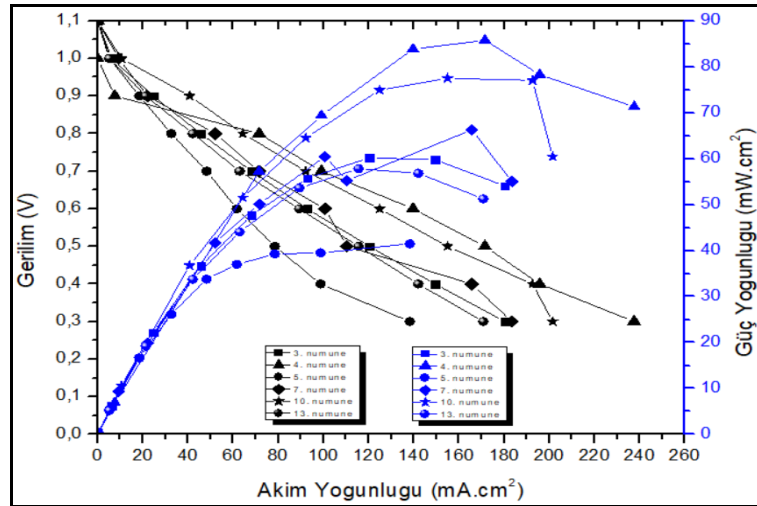
Numune 10'da maksimum güç yoğunluğu 80°C'de olduğu görülmektedir (Şekil 5.23). 0,4V'daki performans 0,3V'da büyük bir hızla düştüğü görülmektedir. Bunun

durumun sebebi 0,3V'a gelindiğinde limit akım yoğunluğuna ulaşılması olarak düşünülmektedir.



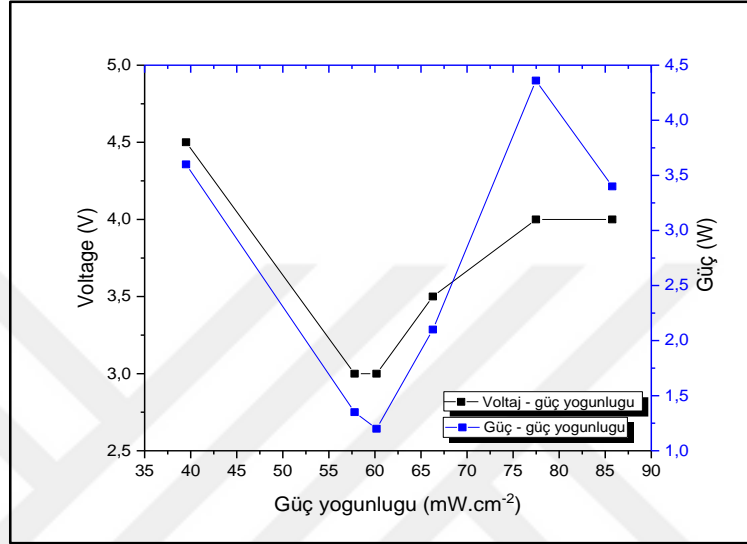
Şekil 5.24. Numune 13 için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1mg/cm² Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH₄+%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)

Numune 13'te de beklenildiği gibi en iyi sonuç 80°C'de alınmıştır (Şekil. 5.24). Polarizasyon eğrileri ohmik kayıp bölgesinde son bulmuştur. Bu duruma bakıldığında daha konsantre bir yakıt kullanılarak daha yüksek performans elde edileceği düşünülmektedir.

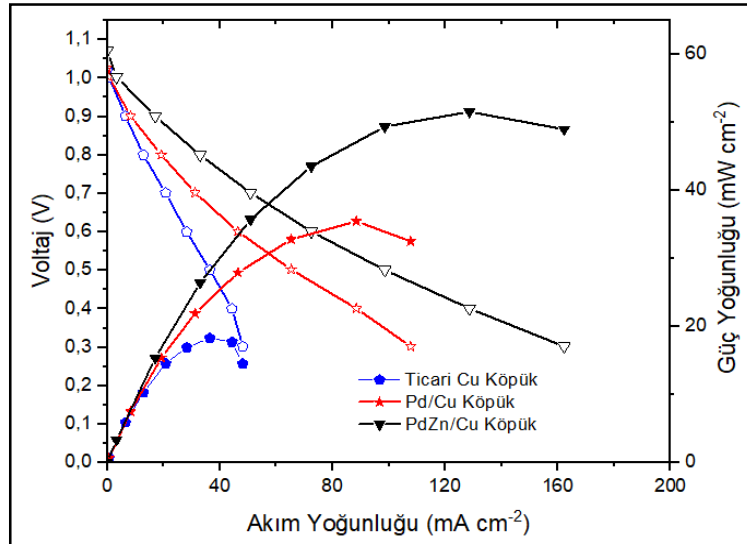


Şekil 5.25. 80°C'de en yüksek sonucu veren tek hücre test sonucu (Katot:1mg/cm² Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH₄+%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)

Şekil 5.25’de yakıt pili test hücresinde kullanılan bütün numunelerin en yüksek performansa ulaştıkları 80 °C’deki polarizasyon ve güç eğrileri verilmiştir. Buna göre numune 4 yapılan çalışmada en iyi performansı göstermiştir. Numune 4 0,5 V’da 195,72 mW/cm² güç yoğunluğu üretmiş olup ve en yüksek performansı göstermiştir.



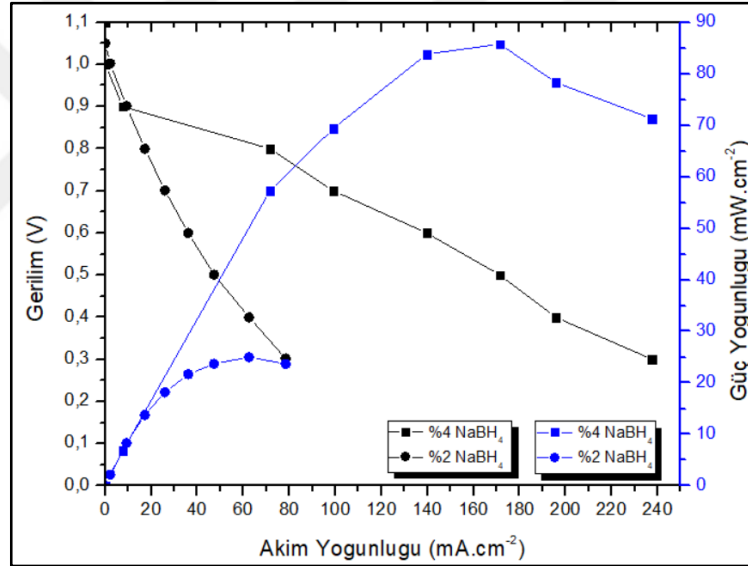
Şekil 5.26. Kaplanan köpükler için güç yoğunluğu kaplama voltajı karşılaştırılması



Şekil 5.27. Bakır köpüklerin performans karşılaştırma grafiği. Katot: 1mg/cm² Pt/C, Sıcaklık: 80°C, Yakıt Çözeltisi (%ağ.): %2 NaBH₄+ %12 NaOH, Membran: Nafyon117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak)

Şekil 5.26'te de görüldüğü gibi güç yoğunluğu kaplama voltajı grafiği verilmiştir. Her bir numune için bir nokta olacak Kaplamalar için 3 ile 4,5 V arası gerilim kullanılmıştır. Buna istinaden en iyi yakıt pili performansını 4 V'da kaplanan numuneler göstermiştir. Bunu sırasıyla 3,5-3-4,5 V gerilimi ile kaplanan numuneler izlemiştir. Bu durum kaplama voltajının bir maksimum değeri olması gerektiği ve bu değer üstünde veya altında yapılan kaplamaların yakıt pili performansını düşürdüğünü göstermektedir.

Şekil 5. 27'de kaplama yapılmamış ticari bakır köpük, yalnızca Pd kaplanmış bakır köpük ve Pd-Zn kaplanmış köpüğün polarizasyon ve güç eğrileri görülmektedir. Diğerleriyle kıyaslandığında Pd-Zn kaplanmış bakır köpüğün performansının daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.28. Konsantrasyonlarına göre kıyaslanma

Şekil 5.28 de verilen grafikte, numune 4 iki farklı kompozisyondaki yakıt ile beslendiği durumdaki performansı verilmiştir. Bu durumda görülmektedir ki, NaBH₄'ün derişiminin arttırılması performansı olumlu yönde etkilediği görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, literatürde PEMYP ve DBHYP'leri için yapılan difüzyon tabakaları göz önünde bulundurularak, metal köpük kullanımı ile ilgili çalışmalara katkı sağlamak için çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar gözlemlendiğinde Ni köpük kullanımının literatürde geniş yer bulmasına rağmen, Cu köpüklerin elektriksel iletkenliği, katalitik etkisi ve maliyetinin daha düşük olması sebebiyle bu konuda literatürdeki boşluğu doldurulması adına bu çalışma yapılmıştır.

DBHYP için ilk olarak anot tarafı için bakır köpük seçilmiş olup, tutma süresi, sıcaklık, banyo karıştırma devri ve pH sabit tutularak 3-3,5-4-4,5V gerilimler uygulanarak Pd-Zn kaplamalar yapılmıştır. Her bir gerilim için akım değerleri not edilmiş, kaplama öncesi ve sonrası ağırlıklar ölçülerek çıkan farktan yapılan kaplama ağırlıkları bulunmuştur. SEM ve EDX görüntüleri ile yapılan kaplamanın kalitesi incelenmiş olup makro boyutta homojen kaplama yapıldığı ve kaplamadaki Pd-Zn oranları noktasal olarak elde edilmiştir. Hazırlanan kaplama banyosunda literatürde denenmemiş olduğu için hem Pd kaplama banyosu hem de Zn kaplama banyosu aynı anda karıştırılarak hazırlanmıştır. Kaplama banyosu içinde gerilim verilerek aynı anda bakır köpüğün üzerine hem Pd hem de Zn başarılı bir şekilde kaplanmıştır.

DBHYP tek hücre testleri ile kaplanan bakır köpüklerin performans etkisi incelenmiştir. İnceleme sonucunda yakıt pilinde en iyi performans 80 °C sıcaklıkta 68,75 mA/cm² akım yoğunluğu ve 195,72 mW/cm² güç yoğunluğu değerleri ile numune 4'ten elde edilmiştir. Kaplama yapılmamış ticari bakır köpük, yalnızca Pd kaplanmış bakır köpük ve Pd-Zn kaplanmış bakır köpüklerin polarizasyon ve güç eğrilerine bakıldığında Pd-Zn kaplanmış bakır köpüğün performansının yakıt pili içerisinde daha yüksek olduğu görülmüştür. Kaplamalar için 3 ile 4,5 V arası gerilim kullanılmıştır. Buna istinaden en iyi yakıt pili performansını 4 V'da kaplanan numuneler göstermiştir. Bunu sırasıyla 3,5-3-4,5 V gerilimi ile kaplanan numuneler izlemiştir. Bu durum kaplama voltajının bir maksimum değeri olması gerektiği ve bu değer üstünde veya altında yapılan kaplamaların yakıt pili performansını

düşürdüğünü göstermektedir. Numune 7, 60-80 °C'lerde yakıt pili performansı yakın değerlerde çıkmasından dolayı bu sıcaklık aralarında aynı verimde çalıştırılabilir. Numune 10 yakıt pili içinde kullanılacağı zaman NaBH₄'ün derişiminin arttırılması performansa olumlu yönde etki gösterebilir.

Polarizasyon eğrilerine bakıldığında sıcaklık arttıkça akım yoğunluğunun arttığı gözükmektedir. Bu durumun sebebi sıcaklık arttıkça proton iletkenliğinin ve indirgenme reaksiyonlarının hızlanmasından dolayı, yakıt hücresinin veriminin artmasıdır. Diğerleriyle kıyaslandığında Pd-Zn kaplanmış bakır köpüğün performansının kaplanmamış bakır köpüğe ve Pd kaplı bakır köpüğe göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum Pd-Zn kaplı köpüklerin tek hücre testlerine göre performansa olumlu etkisi olduğunu göstermiştir.

KAYNAKLAR

Akhairi M. A. F., Kamarudin S. K., Catalysts in Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC): An Overview, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, **41**(7), 4214–4228.

Alsabet M., Jerkiewicz G., Surface Science and Electrochemical Analysis of Nickel Foams, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, **4**, 3012–3021

An L., Jung C. Y., Transport Phenomena in Direct Borohydride Fuel Cells, *Applied Energy*, 2017, **205**, 1270–1282.

An L., Zhao T. S., Xu J. B., A Bi-Functional Cathode Structure for Alkaline-Acid Direct Ethanol Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, **36**(20), 13089–13095.

Anonymous, Chapter 5 - Electrodeposited coatings, Editors: Grainger S., Blunt J., *Engineering Coatings Design and Application*, 2nd Edition, Woodhead Publishing, England, 1998, 167–193.

Antenucci A., Guarino S., Tagliaferri V., Ucciardello N., Electro-Deposition of Cu on Open Cell Aluminum Foams, *Materials Sciences and Applications*, 2013, **4**(11), 679–682.

Arbak A., Dukhan N., Bağcı Ö., Özdemir M., Influence of Pore Density on Thermal Development in Open-Cell Metal Foam, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, **86**, 180–188.

Arges C. G., Prabhakaran V., Wang L., Ramani V., Bipolar Polymer Electrolyte Interfaces for Hydrogen-Oxygen and Direct Borohydride Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, **39**(26), 14312–14321.

Arisetty S., Advani S. G., Prasad A. K., Methanol Diffusion Rates through the Anode Diffusion Layer in Direct Methanol Fuel Cells from Limiting Current Measurements, *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 2008, **44**(10), 1199–1206.

Arisetty Sr., Prasad A. K., Advani S. G., Metal Foams as Flow Field and Gas Diffusion Layer in Direct Methanol Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2007, **165**(1), 49–57.

Asthana R., Kumar A., Dahotre N. B., Coatings and Surface Engineering, *Materials Processing and Manufacturing Science*, 2007, **1**(433), 313–395.

Atiyeh H. K., Karan K., Peppley B., Phoenix A., Halliop E., Pharoah J., Experimental Investigation of the Role of a Microporous Layer on the Water Transport and Performance of a PEM Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 2007, **170**(1), 111–121.

Ausilio B., Chen E., Hart D., Hinsberger M., Hongarth M., Stone R., Thompsett D., *Fuel Cell Technology Handbook*, CRC PRESS, 2002.

Bagotsky V. S., *Fuel Cells*. 2nd. ed., Moscow, Russian November 18, 2005.

Banhart J., Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams, *Progress in Materials Science*, 2001, **46**(6), 559–632.

Baroutaji A., Carton J. G., Stokes J., A. Olabi G., Application of Open Pore Cellular Foam for Air Breathing PEM Fuel Cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, **42**(40), 25630–25638.

Berk Vedat, Yüzey İşlemler Teknolojileri,
<http://www.galvanoteknik.org/galvanoteknik-e-kitap.html> , 18 Aralık 2018.

Bidault F., Brett D. J. L., Middleton P. H., Abson N., Brandon N. P., A New Application for Nickel Foam in Alkaline Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, **34**(16), 6799–6808.

Boonyongmaneerat Y., Schuh C. A., Dunand D. C., Mechanical Properties of Reticulated Aluminum Foams with Electrodeposited Ni-W Coatings, *Scripta Materialia*, 2008, **59**(3), 336–339.

Cao D., Gao Y., Wang G., Miao R., Liu Y., A Direct NaBH₄-H₂O₂ fuel Cell Using Ni Foam Supported Au Nanoparticles as Electrodes, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, **35**(2), 807–813.

Carton J. G., Olabi A. G., Representative Model and Flow Characteristics of Open Pore Cellular Foam and Potential Use in Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, **40**(16), 5726–5738.

Cermenek B., Ranninger J., Hacker V., Editors: Basile A., Iulianelli A., Dalena F., Veziroglu N., Alkaline Direct Ethanol Fuel Cell, *Institute of Chemical Engineering and Environmental Technology*, 2019, **15**(1), 383–405.

Chang Y. H., Lin C. T., Chen T. Y., Hsu C. L., Lee Y. H., Zhang W., Wei K. H., Li L. J., Highly Efficient Electrocatalytic Hydrogen Production by MoS_x Grown on Graphene-Protected 3D Ni Foams, *Advanced Materials*, 2013, **25**(5), 756–760.

Chen J., Zhao C. X., Zhi M. M., Wang K., Deng L., Xu G., Alkaline Direct Oxidation Glucose Fuel Cell System Using Silver/Nickel Foams as Electrodes, *Electrochimica Acta*, 2012, **66**, 133–138.

Chen J., Zheng H., Kang J., Yang F., Cao Y., Xiang M., An Alkaline Direct Oxidation Glucose Fuel Cell Using Three-Dimensional Structural Au/Ni-Foam as Catalytic Electrodes, *RSC Advances*, 2017, **7**(5), 3035–3042.

Chen R., Zhao T. S., A Novel Electrode Architecture for Passive Direct Methanol Fuel Cells, *Electrochemistry Communications*, 2007, **9**(4), 718–724.

Chen R., Zhao T. S., Porous Current Collectors for Passive Direct Methanol Fuel Cells, *Electrochimica Acta*, 2007, **52**(13), 4317–4324.

Cheng S., Wu J., Air-Cathode Preparation with Activated Carbon as Catalyst, PTFE as Binder and Nickel Foam as Current Collector for Microbial Fuel Cells, *Bioelectrochemistry*, 2013, **92**, 22–26.

Cheng Y., Liu Y., Cao D., Wang G., Gao Y., Effects of Acetone on Electrooxidation of 2-Propanol in Alkaline Medium on the Pd/Ni-Foam Electrode, *Journal of Power Sources*, 2011, **196**(6), 3124–3128.

Cimino S., Gambirasi A., Lisi L., Mancino G., Musiani M., Vázquez-Gómez L., Verlato E., Catalytic Combustion of Methanol on Pt-Fecralloy Foams Prepared by Electrodeposition, *Chemical Engineering Journal*, 2016, **285**, 276–285.

Cindrella L., Kannan A. M., Lin J. F., Saminathan K., Ho Y., Lin C. W., Wertz J., Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cells-A Review, *Journal of Power Sources*, 2009, **194**(1), 146–60.

Colpan C. O., Nalbant Y., Ercelik M., Fundamentals of Fuel Cell Technologies, *Comprehensive Energy Systems*, 2018, **4**(5), 1107–1130.

Coralli A., Sarruf B. J. M., Miranda P. E. V., Osmieri L., Specchia S., Minh N. Q., Fuel Cells, Editors: de Miranda P. E. V., Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies, 1st ed. Academic Press, Rio de Janeiro, 2019, Elsevier Inc., 39–122.

Çelik C., Doğrudan Sodyum Borhidrüllü Yakıt Pili Proses Parametrelerinin Verim Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 197911.

Živko D., Bilas V., Analysis of Individual PEM Fuel Cell Operating Parameters for Design of Optimal Measurement and Control Instrumentation, *15th IMEKO TC-4 Symposium on Novelties in Electrical Measurements and Instrumentation*, Iasi, Romania, 18-22 September 2007, 399-403

Demirci U. B., How Green Are the Chemicals Used as Liquid Fuels in Direct Liquid-Feed Fuel Cells?, *Environment International*, 2009, **35**(3), 626–631.

Devivier C., Tagliaferri V., Trovalusci F., Ucciardello N., Mechanical Characterization of Open Cell Aluminium Foams Reinforced by Nickel Electrodeposition, *Materials and Design*, 2015, **86**, 272–278.

Dicks A. L., The Role of Carbon in Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2006, **156**(2), 128–141.

Doyle M., Rajendran G., Handbook of Fuel Cells–Fundamentals, Technology and Applications, Editors: Vielstich W., Gasteiger H., Lamm A., *Materials and Manufacturing Processes*, JohnWiley & Sons, New York, 2003, **22**(6), 351.

Dündar P., Katı Oksit Yakıt Pili Uygulamalarında Kullanılmak Üzere Kompozit Elektrolit Sentezi Üzerine Çalışmalar, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2018, 506581.

F. Yıldızbilir, Yakıt Pili ile Elektrik Enerjisi Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006, 185463.

Fadzillah D. M., Rosli M. I., Talib M. Z. M., Kamarudin S. K., Daud W. R. W., Review on Microstructure Modelling of a Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **77**, 1001–1009.

Falcão D. S., Pereira J. P., Pinto A. M. F. R., Effect of Stainless Steel Meshes on the Performance of Passive Micro Direct Methanol Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, **41**(31), 13859–13867.

Ferreira-Aparicio P., Conde J. J., Chaparro A. M., Fundamentals and Components of Portable Hydrogen Fuel-Cell Systems, Editors: Ferreira-Aparicio P., Chaparro A. M., *Portable Hydrogen Energy Systems: Fuel Cells and Storage Fundamentals and Applications*, 1st ed., Oxford, UK., Elsevier Inc., 15–39, 2018.

Gao F., Blunier B., Miraoui A., Modeling of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Editor: Gao F., *Proton Exchange Membrane Fuel Cells Modeling*, 1st ed., John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA., 47–48, 2013.

Gao F., Kabalo M., Rylko M. S., Blunier B., Miraoui A., Chapter 6 Fuel Cell System, Editors: Chakraborty S., Simões M. G., Kramer W. E., *Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems*, Green Energy and Technology, 1st ed., Springer-Verlag, London, 2013, 185–234.

Gao J., Xuan H., Xu Y., Liang T., Han X., Yang J., Han P., Wang D., Du Y., Interconnected Network of Zinc-Cobalt Layered Double Hydroxide Stick onto RGO/Nickel Foam for High Performance Asymmetric Supercapacitors, *Electrochimica Acta*, 2018, **286**, 92–102.

Gauthier E., Benziger J. B., Gas Management and Multiphase Flow in Direct Alcohol Fuel Cells, *Electrochimica Acta*, 2014, **128**, 238–247.

Gülzow E., Alkaline Fuel Cells, *Fuel Cells*, 2004, **4**(4), 251–255.

He Y. L., Miao Z., Zhao T. S., Yang W. W., Numerical Study of the Effect of the GDL Structure on Water Crossover in a Direct Methanol Fuel Cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, **37**(5), 4422–4438.

Hermann A., Chaudhuri T., Spagnol P., Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A Review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, **30**(12), 1297–1302.

Hernández S. C., Yoo B. Y., Stefanescu E., Khizroev S., Myung N. V., Electrodeposition of Iron-Palladium Thin Films, *Electrochimica Acta*, 2008, **53**(18), 5621–5627.

Huang Z. M., Su A., Liu Y. C. Hydrogen Generator System Using Ru Catalyst for PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) Applications, *Energy*, 2013, **51**, 230–236.

Huo S., Cooper N. J., Smith T. L., Park J. W., Jiao K., Experimental Investigation on PEM Fuel Cell Cold Start Behavior Containing Porous Metal Foam as Cathode Flow Distributor, *Applied Energy*, 2017, **203**, 101–114.

Hurley S. A., Coatings, Editors: Newman J., Choo B. S., *Advanced Concrete Technology*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK., 2003, **4**, 1–14.

Harper J., Gavin D., Fuel Cell Projects for the Evil Genius, 1st ed., TAB Books Inc., New York, United States, 17 Jun 2008, **208**.

Jianliang W., Xianyou W., Direct Borohydride Fuel Cell, *China Academic Journal Electronic*, 2008, **20**, 1427–1432.

Kamarudin M. Z. F., Kamarudin S. K., Masdar M. S., Daud W. R. W., Review: Direct Ethanol Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, **38**(22), 9438–9453.

Kamarudin S. K., Achmad F., Daud W. R. W., Overview on the Application of Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) for Portable Electronic Devices, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, **34**(16), 6902–6916.

Kanani N., Electrolytes for the Deposition of Metal Coatings, *Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice*, Elsevier Advanced Technology: Oxford, U.K., 1st Edition, 2004, 55–84.

Kandlikar S. G., See E. J., Koz M., Gopalan P., Banerjee R., Two-Phase Flow in GDL and Reactant Channels of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, **39**(12), 6620–6636.

Kaplama Banyoları, 8. Ders Elektrometal Kaplama Tekniği Kaplama Banyoları Bölüm 3 Kurşun, Nikel, Paladyum, Platin, Rodyum, Elektrometal Kaplamanın Temelleri II, Ders Notu, 49-50.

Kim J., Cunningham N., Development of Porous Carbon Foam Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 2010, **195**(8), 2291–2300.

Kublanovsky V. S., Nikitenko V. N., Mechanism of the Electrodeposition of Palladium Coatings from Glycinate Electrolytes, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2013, **699**, 14–20.

Kumari U., Shankar R., Mondal P., Electrodes for Microbial Fuel Cells, Editor: Marinakis K. KI, *Progress and Recent Trends in Microbial Fuel Cells*, Chapter 8, 1st ed., Elsevier B.V., Cambridge, United States, 125-141, 2018.

Lai C. K., Wang Y. Y., Wan C. C., Palladium Electrodeposition from Ammonia-Free Electrolyte, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 1992, **322**(1–2), 267–278.

Lausic A. T., Bouwhuis B. A., McCrea J. L., Palumbo G., Hibbard G. D., Mechanical Anisotropy in Electrodeposited Nanocrystalline Metal/Metal Composite Foams, *Materials Science and Engineering*, 2012, A **552**, 157–163.

Lefebvre, Louis Philippe, John Banhart, David C. Dunand, Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments, *Advanced Engineering Materials*, 2008, **10**(9), 775–87.

Lewis F. A., Johnston R. C., Witherspoon M. C., Obermann A., Palladium and Platinum Hydrogen Electrodes I: Hydrogen Chemical Potentials, Molecular Hydrogen Diffusion and Local Cell Hydrogen Transfer Effects At Palladium and Platinum Electrodes Under Open-Circuit Conditions and During Constant Current and Pulsed Current Electrolysis In Hydrogen-Saturated Solutions, *Surface Technology*, 1983, **18**(2), 147–166.

Li Y. S., Zhao T. S., A High-Performance Integrated Electrode for Anion-Exchange Membrane Direct Ethanol Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, **36**(13), 7707–7713.

Li Y., He Y., Layer Reduction Method for Fabricating Pd-Coated Ni Foams as High-Performance Ethanol Electrode for Anion-Exchange Membrane Fuel Cells, *RSC Advances*, 2014, **4**(32), 16879–16884.

Li Z. P., Liu B. H., Arai K., Suda S., A Fuel Cell Development for Using Borohydrides as the Fuel, *Journal of The Electrochemical Society*, 2003, **150**(7), A868.

Li Z. P., Liu Z. X., Qin H. Y., Zhu K. N., Liu B. H., Performance Degradation of a Direct Borohydride Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 2013, **236**, 17–24.

Li Z. P., Ma S. L., Li G. R., Liu B. H., Hydrogen Generation from Borohydride Hydrolysis on Surface-Alloyed Ni Foam, *Journal of Power Sources*, 2013, **242**, 621–626.

Ling C. Y., Ee S. L., Birgersson E., Three-Dimensional Approximate Analytical Solutions for Direct Liquid Fuel Cells, *Electrochimica Acta*, 2013, **109**, 305–315.

Liu B. H., Li Z. P., Suda S., Electrocatalysts for the Anodic Oxidation of Borohydrides, *Electrochimica Acta*, 2004, **49**(19), 3097–3105.

Ma J., Choudhury N. A., Sahai Y., A Comprehensive Review of Direct Borohydride Fuel Cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, **14**(1), 183–199.

Ma J., Sahai Y., Buchheit R. G., Direct Borohydride Fuel Cell Using Ni-Based Composite Anodes, *Journal of Power Sources*, 2010, **195**(15), 4709–4713.

Majlan E. H., Rohendi D., Daud W. R. W., Husaini T., Haque M. A., Electrode for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **89**, 117–134.

Mallick R. K., Thombre S. B., Performance of Passive DMFC with Expanded Metal Mesh Current Collectors, *Electrochimica Acta*, 2017, **243**, 299–309.

Mallick R. K., Thombre S. B., Shrivastava N. K., A Critical Review of the Current Collector for Passive Direct Methanol Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2015, **285**, 510–529.

Morgan J. M., Datta R., Understanding the Gas Diffusion Layer in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. I. How Its Structural Characteristics Affect Diffusion and Performance, *Journal of Power Sources*, 2014, **251**, 269–278.

Niu X., Zhao H., Lan M., Palladium Deposits Spontaneously Grown on Nickel Foam for Electro-Catalyzing Methanol Oxidation: Effect of Precursors, *Journal of Power Sources*, 2016, **306**, 361–368.

Oh T. H., Gang B. G., Kim H., Kwon S., Sodium Borohydride Hydrogen Generator Using Co-P/Ni Foam Catalysts for 200 W Proton Exchange Membrane Fuel Cell System, *Energy*, 2015, **90**, 1163–1170.

Oh T. H., Kwon S., Effect of Manufacturing Conditions on Properties of Electroless Deposited Co-P/Ni Foam Catalyst for Hydrolysis of Sodium Borohydride Solution, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, **37**(21), 15925–15937.

Okur O., Doğrudan Sodyum Borhidrüllü Yakıt Pili Anot ve Katot Elektrokatalizörünün Sentezi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012, 321350.

Oliveira V. B., Pereira J. P., Pinto A. M. F. R., Effect of Anode Diffusion Layer (GDL) on the Performance of a Passive Direct Methanol Fuel Cell (DMFC), *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, **41**(42), 19455–19462.

Omrani R., Shabani B., Gas Diffusion Layer Modifications and Treatments for Improving the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Electrolysers: A Review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, **42**(47), 28515–28536.

Omrani R., Shabani B., Review of Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane-Based Technologies with a Focus on Unitised Regenerative Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, **44**(7), 3834–3860.

Ong B. C., Kamarudin S. K., Basri S., Direct Liquid Fuel Cells: A Review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, **42**(15), 10142–10157.

Ozden A., Alaefour I. E., Shahgaldi S., Li X., Colpan C. O., Hamdullahpur F., Gas Diffusion Layers for PEM Fuel Cells: Ex- and In-Situ Characterization, Editors: Dincer I., Colpan C.O., Kizilkan O., *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions*, Academic Press, London, UK., 2017, 253–277.

Park J. E., Lim J., Kim S., Choi I., Ahn C. Y., Hwang W., Lim M. S., Cho Y. H., Sung Y. E., Enhancement of Mass Transport in Fuel Cells Using Three-Dimensional Graphene Foam as Flow Field, *Electrochimica Acta*, 2018, **265**, 488–496.

Pasaogullari U., Wang C. Y., Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *J. Electrochem. Soc.*, 2004, **6**(1), 399–406.

Pinto A. M. F. R., Oliveira V. B., Falcão D. S., Development of Direct Alcohol Fuel Cells Components, *Fundamentals, Engineering and Advances*, 2018, 265–286.

Pinto A. M. F. R., Oliveira V. B., Falcão D. S., Other Fuels for Direct Fuel Cells (DFCs), *Fundamentals, Engineering and Advances*, 2018, 157–207.

Qi Z., Kaufman A., Improvement of Water Management by a Microporous Sublayer for PEM Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2002, **109**(1), 38–46.

Rao C. R. K., Trivedi D. C., Chemical and Electrochemical Depositions of Platinum Group Metals and Their Applications, *Coordination Chemistry Reviews*, 2005, **249**(5–6), 613–631.

Sadykov V., Mezentseva N., Usoltsev V., Smorygo O., Mikutski V., Marukovich A., Bobrenok O., Uvarov N., Metal Supported SOFC on the Gradient Permeable Metal Foam Substrate, *Advanced Materials Research*, 2010, **123–125**, 1083–1086.

Santarelli M. G., Torchio M. F., Cochis P., Parameters estimation of a PEM fuel cell polarization curve and analysis of their behavior with temperature, *Journal of Power Sources*, 2006, **159**, 824–835.

Sasi A., Mondal M., Dayal S., Kumar S., Electro Deposition of Nickel-Alumina Composite Coating, *Materials Today: Proceedings*, 2015, **2**(4–5), 3042–3048.

Schenk A., Cermenek B., Hacker V., Other Polymer Electrolyte Fuel Cells, Editors: Hacker V., Mitsushima S., *Fuel Cells and Hydrogen: From Fundamentals to Applied Research*, Amsterdam, Netherlands, Elsevier B.V., 2018, 91-115

Scott K., Argyropoulos P., Yiannopoulos P., W. Taama M., Electrochemical and Gas Evolution Characteristics of Direct Methanol Fuel Cells with Stainless Steel Mesh Flow Beds, *Journal of Applied Electrochemistry*, 2001, **31**(8), 823–832.

Settar A., Abboudi S., Lebaal N., Effect of Inert Metal Foam Matrices on Hydrogen Production Intensification of Methane Steam Reforming Process in Wall-Coated Reformer, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, **43**(27), 12386–12397.

Shao Z. G., Lin W. F., Zhu F., Christensen P. A., Zhang H., Yi B., A Tubular Direct Methanol Fuel Cell with Ti Mesh Anode, *Journal of Power Sources*, 2006, **160**(2 SPEC. ISS.), 1003–1008.

Shipway P. H., The Range of Surface Coating Methods, Editor: Mellor B. G., *Surface Coatings for Protection Against Wear*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 249-301, 2006.

Shirazy R. S. M., Blais S., Fréchet L. G., Mechanism of Wettability Transition in Copper Metal Foams: From Superhydrophilic to Hydrophobic, *Applied Surface Science*, 2012, **258**(17), 6416–6424.

Shrivastava N. K., Harris T. A. L., Direct Methanol Fuel Cells, *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 2017, **3**(1), 343–357.

Shudo T., Suzuki K., Performance Improvement in Direct Methanol Fuel Cells Using a Highly Porous Corrosion-Resisting Stainless Steel Flow Field, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, **33**(11), 2850–2856.

Skowroński J. M., Wazny A., Nickel Foam-Based Composite Electrodes for Electrooxidation of Methanol, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2005, **9**(12), 890–899.

Sørensen B., Fuel Cells, Editor: Sørensen B., *Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage*, 1st ed., Academic Press, Massachusetts, 169–178, 2008.

St-Pierre J., Wetton B., Kim G. S., Promislow K., Limiting Current Operation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *Journal of The Electrochemical Society*, 2007, **154** (2), B186-B193.

Tan W. C., Saw L. H., Thiam H. S., Xuan J., Cai Z., Yew M. C., Overview of Porous Media/Metal Foam Application in Fuel Cells and Solar Power Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **96**, 181–197.

Tawfik H., Y. Mahajan Hung. D., Metal Bipolar Plates for PEM Fuel Cell-A Review, *Journal of Power Sources*, 2007, **163**(2), 755–767.

Topcu A., Katı Oksit Yakıt Pili İnterkonnektörlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Performanslarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tabzon, 2017, 467947.

Tsai B. T., Tseng C. J., Liu Z. S., Wang C. H., Lee C. I., Yang C. C., Lo S. K., Effects of Flow Field Design on the Performance of a PEM Fuel Cell with Metal Foam as the Flow Distributor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, **37**(17), 13060–13066.

Tsang C. H. A., Leung D. Y. C., Use of Pd-Pt Loaded Graphene Aerogel on Nickel Foam in Direct Ethanol Fuel Cell, *Solid State Sciences*, 2018, **75**, 21–26.

Tseng C. J., Tsai B. T., Liu Z. S., Cheng T. C., Chang W. C., Lo S. K., A PEM Fuel Cell with Metal Foam as Flow Distributor, *Energy Conversion and Management*, 2012, **62**, 14–21.

Wang W. L., He S. M., Lan C. H., Protective Graphite Coating on Metallic Bipolar Plates for PEMFC Applications, *Electrochimica Acta*, 2012, **62**, 30–35.

Wang Y. L., Zhao Y. Q., Xu C. L., Zhao D. D., Xu M. W., Su Z. X., Li H. L., Improved Performance of Pd Electrocatalyst Supported on Three-Dimensional Nickel Foam for Direct Ethanol Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2010, **195**(19), 6496–6499.

Wang Z. H., Wang C. Y., Mathematical Modeling of Liquid-Feed Direct Methanol Fuel Cells, *Journal of The Electrochemical Society*, 2003, **150**(4), 508.

Watanabe T., Molten Carbonate Fuel Cells, *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation, Second Edition*, 2016, **4**, 3113–3138.

Xu C., Mao Y., Hu Z., Numerical Study of Pore-Scale Flow and Noise of an Open Cell Metal Foam, *Aerospace Science and Technology*, 2018, **82–83**, 185–98.

Yalaz E., Gadolinyum Katkılı ZrO₂ Katı Elektrolitlerin Üretilmesi, Karakterizasyonu ve Yakıt Pili Uygulaması, Doktora Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2018, 507156.

Yan X. H., Zhao T. S., An L., Zhao G., Zeng L., A Micro-Porous Current Collector Enabling Passive Direct Methanol Fuel Cells to Operate with Highly Concentrated Fuel, *Electrochimica Acta*, 2014, **139**, 7–12.

Yang B., Zhang J., Zhang Y., Deng S., Yu G., Wu J., Zhang H., Liu J., Promoting Effect of EDTA on Catalytic Activity of Highly Stable Al-Ni Bimetal Alloy for Dechlorination of 2-Chlorophenol, *Chemical Engineering Journal*, 2014, **250**, 222–229.

Yang F., Cheng K., Wang G., Cao D., Preparation of Au Nanosheets Supported on Ni Foam and Its Electrocatalytic Performance towards NaBH₄ Oxidation, *Electrochimica Acta*, 2015, **159**, 111–115.

Yang W., Yang S., Sun W., Sun G., Xin Q., Nanostructured Palladium-Silver Coated Nickel Foam Cathode for Magnesium-Hydrogen Peroxide Fuel Cells, *Electrochimica Acta*, 2006, **52**(1), 9–14.

Yılmaz C., “Bipolar Plaka Gaz Akış Kanalı Desen Tasarımının Pem Yakıt Pili Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2018, 510071.

Yi P., Peng L., Lai X., Li M., Ni J., Investigation of Sintered Stainless Steel Fiber Felt as Gas Diffusion Layer in Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, **37**(15), 11334–11344.

Yli-Pentti A., Electroplating and Electroless Plating, *Comprehensive Materials Processing*, 2014, **4**, 277–306.

Yu E. H., Scott K., Direct Methanol Alkaline Fuel Cell with Catalysed Metal Mesh Anodes, *Electrochemistry Communications*, 2004, **6**(4), 361–365.

Yuan W., Tang Y., Yang X., Wan Z., Porous Metal Materials for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells - A Review, *Applied Energy*, 2012, **94**, 309–329.

Zabel T., Thomsen A. C. V., Cole C., Martin R., Mahone E. M., Reliability Concerns in the Repeated Computerized Assessment of Attention in Children, *Clinical Neuropsychologist*, 2009, **23**(7), 12,13–31.

Zamel N., Xianguo L., Effective Transport Properties for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells - With a Focus on the Gas Diffusion Layer, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, **39**(1), 111–146.

Zhao T. S., Chen R., Fuel Cells – Direct Alcohol Fuel Cells | Experimental Systems, *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 2009, **1**, 428–435.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Aydın S., **Caglayan I.**, Sarac B., Sarac H. I., Celik C., Sıvı Yakıt Hücreleri için Metalik Köpüğe Genel Bakış, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Kasım 2018.

Caglayan I., Turkmen A. C., Celik C., Sarac H. I., Analysis of wind energy potential: A case study of Kocaeli University Campus, *2nd International Conference on Renewable Energy and Resources*, Boston, USA, 27-28 August 2018.

Caglayan I., Tikiz I., Turkmen A. C., Celik C., Soyhan G., Analysis of wind energy potential; A case study of Kocaeli University Campus, *Fuel*, 2019, **253**, 1333-1341.

ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında İstanbul'da doğdu. Erenköy Kız Lisesinden 2011 yılında mezun olmuştur. 2011 yılında lisans eğitimine başladığı Kocaeli Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 2015 yılında mezun olmuştur. 2016 senesinde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Tübitak'ın 215M255 nolu "Laboratuvar Şartlarında Üretilen Membran ve Membran Elektrot Üniteleri Kullanılarak Tasarlanan Doğrudan Borhidrüllü Yakıt Pili İnceleme Parametrelerinin Verim Üzerine Etkisinin İncelenmesi" projesinde bursiyer olarak 3 yıl çalışmıştır. Kocaeli Üniversitesi BAP birimi destekli "Doğrudan sodyum borhidrüllü yakıt pillerinin (DBHYP) anot kısmında katalizör desteği olarak standart karbon kağıt/kumaş yerine gaz difüzyon tabakası olarak kullanılmak üzere metalik köpüğün karakterizasyonu" projesini tamamlamıştır.