

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

GENLEŞTİRİLMİŞ GRAFİT EPOKSİ
KOMPOZİT PLAKA ÜRETİMİ VE
BİPOLAR PLAKA UYGULAMALARI

Selen Begüm SEVİC
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE

2013

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GENLEŞTİRİLMİŞ GRAFİT EPOKSİ
KOMPOZİT PLAKA ÜRETİMİ VE
BİPOLAR PLAKA UYGULAMALARI

Selen Begüm SEVİC
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMANI : Prof. Dr. Ali ATA
EŞ DANIŞMANI: Doç. Dr. Bahadır TUNABOYLU

GEBZE

2013



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21/01/2013 tarih ve 2013/03 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 24/01/2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Selen Begüm SEVİC'in tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Ali ATA

ÜYE

(EŞ DANIŞMAN) : Doç. Dr. Bahadır TUNABOYLU

ÜYE

: Prof. Dr. Metin USTA

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Furkan DÜNDAR

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Kemal KORKMAZ

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Not: Formdaki boşluklar mutlaka Ms Word ortamında doldurulacak.

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: GENLEŞTİRİLMİŞ GRAFİT EPOKSİ KOMPOZİT PLAKA ÜRETİMİ
VE BİPOLAR PLAKA UYGULAMALARI

YAZAR ADI: Selen Begüm SEVİC

Çevre dostu yakıt hücreleri alternatif enerji teknolojisidir. En yaygın olarak kullanılan ve araştırılan yakıt hücresi Proton Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi (PEMYH)'dir. Bipolar plakalar yakıt hücrelerinin en önemli bileşenlerinden biridir. Bipolar plakaların görevleri, ısı ve elektrik iletmek, yakıt ve oksitleyiciyi dağıtmak, modüldeki hücreleri birbirinden ayırmak ve hücrede biriken suyu uzaklaştırmaktır. Bu yüzden daha iletken, ucuz, daha dayanıklı ve yüksek korozyon dayanımlı bipolar plakalar yakıt hücreleri için geliştirilmelidir.

Bu çalışmadaki amaç, farklı epoksilerle bipolar plaka üretmek ve bu plakaları karşılaştırabilmek, bipolar plakaların mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirebilmektir. Çalışmada 4 farklı epoksi çözeltisi hazırlanmıştır ve bu çözeltilerle bipolar plakalar üretilmiştir. Daha sonra elektriksel iletkenlik, mukavemet, korozyon dayanımlarının ölçülmesi için testler yapılmıştır.

Testler sonucunda plakalar referans bipolar plaka ile kıyaslanmıştır. Sonuçların referans malzemedenden daha iyi olduğu görülmüştür. Tezde, bu amaçlara ulaşmak için yapılan çalışmalar ve sonuçlar sunulmuştur.

SUMMARY

THESIS TITLE: PRODUCTION OF EXPANDED GRAPHITE EPOXY COMPOSITE
PLATE AND BIPOLAR PLATE APPLICATIONS

AUTHOR NAME: Selen Begum SEVIC

Environmentally friendly Fuel cells are alternative energy sources. The most widely used and researched fuel cell is PEM (Proton Exchange Membrane) type fuel cell. Bipolar plates are the most important components of a fuel cell. The function of bipolar plates is to conduct heat and electricity, distribute the fuel and oxidants, separate individual cells from one another and remove the excess water accumulated in the cell. Therefore, more conductive, lower cost, more strength, high corrosion resistance bipolar plates are developed for fuel cell.

The aim of this study, to produce bipolar plates with different epoxies, to compare to these plates and to improve mechanical and physical properties of bipolar plates. In this study, 4 different epoxy solutions are prepared and bipolar plate samples are produced with these solutions. Then, electrical conductivity, mechanical strength, corrosion resistance tests are applied to these samples.

As a result of tests, samples are compared with reference samples. And epoxies are compared to each other. Sample's results are better than reference samples. In this thesis, to achieve these goal, applied tests and results are presented.

TEŞEKKÜR

Bana bu çalışmayı yapma imkânı veren değerli danışman hocam Prof. Dr. Ali ATA'ya, Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, pratiği öğreten kıymetli hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Furkan DÜNDAR' a teşekkürü bir borç bilirim. Eş danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Bahadır TUNABOYLU'ya yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca deneylerde bana yardımcı olan Burcu DURSUN'a, korozyon deneyinde bana yardımcı olan Salih DURDU ve Pınar YILMAZ'a, mekanik mukavemet testlerinde yardımını aldığım Adem ŞEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen, her zaman yanımda olan kıymetli aileme, tez çalışmalarım boyunca karşılaştığım zorluklarda beni yalnız bırakmayan herkese teşekkürlerimi iletirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	ii
SUMMARY	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
1.GİRİŞ	1
2.YAKIT HÜCRELERİ	3
2.1.Enerji Taşıyıcı Olarak Hidrojen	5
2.2.Yakıt Hücresi Çeşitleri	7
2.3.PEM Tipi Yakıt Hücreleri	8
3.BİPOLAR PLAKALAR	10
3.1.Bipolar Plaka Malzemeleri	11
3.2.Polimer Kompozit Bipolar Kompozit Plakalar	12
3.2.1.Grafit Kompozit Bipolar Plaka Üretimi	13
4.DENEYSEL ÇALIŞMALAR	15
4.1.Analize Hazırlık	15
4.1.1.Malzeme Hazırlık Süreci	15
4.1.2.Emdirme Süreci	16
4.1.3.Kurutma Süreci	17
4.1.4.Basma Süreci	18
4.2.Analizler	19
4.2.1.Mekanik Mukavemet Ölçüm Düzeneği	19
4.2.2.Korozyon Direnci Ölçüm Düzeneği	19

4.2.3.Elektriksel İletkenlik Ölçüm Düzenekleri	21
4.2.4.Temas Açısı Ölçüm Düzeneği	22
5.DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI	24
5.1.Mekanik Mukavemet Ölçüm Sonuçları	24
5.2.Elektriksel İletkenlik Deneyi Ölçüm Sonuçları	25
5.2.1.Yüzey Elektriksel İletkeliği Ölçümü	26
5.2.2.Kalınlık Yönünde Elektriksel İletkenlik Ölçümü	28
5.3.Korozyon Direnci Ölçümü Sonuçları	30
5.4.Temas Açısı Ölçüm Düzeneği	32
6.SONUÇ	33
KAYNAKÇA	36
ÖZGEÇMİŞ	38

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Tek Hücreli Yakıt hücresi	3
Şekil 2.2. Farklı Yakıt Hücresi Çeşitlerinde Meydana Gelen Reaksiyonlar ve Elde Edilen Ürünler	8
Şekil 3.1 Bipolar Plaka Malzeme Çeşitleri	12
Şekil 3.2 Genel olarak bipolar plaka üretim alternatiflerinin sınıflandırılması	13
Şekil 4.1 Nokta Eğme Testinin Şematik Gösterimi	19
Şekil 4.2 Korozyon Ölçüm Deneyi Düzenegi	20
Şekil 4.3 Elektriksel İletkenlik Ölçüm Düzenegi	21
Şekil 4.4 Elektriksel İletkenlik Ölçüm Düzenegi	22
Şekil 4.5 Temas Açısı Ölçümü Deney Düzenegi	23
Şekil 5.1 Mekanik Mukavemet Ölçüm Değerleri	25
Şekil 5.2 Elektriksel İletkenlik Değerlerinin Gösterimi	28
Şekil 5.3 Elektriksel Direnç Değerlerinin Gösterimi	30
Şekil 5.4 Numunelerin Korozyon Değerlerinin Gösterimi	31

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 DOE hedefleri	10
4.1 Kullanılan Reçinelerin Sertleştirici ile olan Oranları	15
4.2 Malzemelerden Kullanılan Miktarlar	16
4.3 Numunelerin İlk ve Son Ağırlıkları	17
4.4 Optimum Sonuç Veren Basma Süreci	18
5.1 Numunelerin Eğilme Mukavemet Değerleri	24
5.2. Numunelerin Eğilme Mukavemet Değerleri	25
5.3 Referans Numunesi İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri	26
5.4 Seramik İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri	26
5.5 Titanyum İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri	26
5.6 WR İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri	27
5.7 Casting İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri	27
5.8 Referans Numunesi İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri	28
5.9 Seramik İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri	28
5.10 Titanyum İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri	29
5.11 Casting İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri	29
5.12 WR İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri	29
5.13. Korozyon Ölçümü Sonuçları	31
5.14. Temas Açısı Ölçüm Değerleri	32
6.1. Sonuçlar	33

1. GİRİŞ

Dünyadaki enerjinin, geleceği düşünülmeden kullanılmasıyla temiz enerjiye ihtiyaç günden güne artmaktadır. Sonunun gelmesi muhtemel enerji kaynaklarının hızlı sarf edilmesi, yaşanacak enerji ihtiyacını artıracaktır. Bu yüzden yeni enerji kaynaklarına yönelinmiştir. Diğer yandan petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtların yoğun bir şekilde kullanılması ile ozon tabakası delinmesi, asit yağmurları, küresel ısınma gibi etkiler, dünyayı belki de geriye dönüşü zor bir çevre kirliliği ile karşı karşıya bırakmıştır. Nükleer enerjinin çevre kirliliği az olduğu söylene de nükleer kazalar ve silah gücü olarak düşünülmesi büyük soruna dönüştüğü için alternatif enerji olarak düşünülmez. Üzerinde en çok durulan enerji taşıyıcı hidrojen, havaya sadece su buharı bırakması ve enerji yoğunluğunun çok olması sayesinde tercih edilmektedir.

Hidrojen, doğadaki en basit atom yapısına sahiptir ve evrende %90 dan fazla hidrojen bulunmaktadır. Doğada hidrojen bulunmaz fakat diğer enerji kaynaklarından üretilir. Enerji kaynaklarını günümüzdeki yöntemlerle elektriğe çevirmek, hidrojene çevirdikten sonra tekrar elektriğe çevirmekten daha verimsizdir. Hidrojenden enerji elde edilmesi esnasında, su buharı dışında çevreyi kirlitici ve sera etkisi artırıcı hiçbir gaz ve zararlı kimyasal madde üretimi söz konusu değildir. Hidrojenden yararlanmak için yakıt hücresi geliştirilmelidir. Yakıt hücreleri, hidrojendeki kimyasal enerjiyi hava kullanarak doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen ve atık olarak sadece su ve ısı üreten güç elemanlarıdır.

Yakıt hücreleri gelecekte, avantajları göz önünde bulundurularak önümüzdeki yıllarda ticari olarak üretilen ve her yerde kullanılabilen enerji kaynakları olacaklardır. Tezimde yakıt hücresi tiplerinden yaygın olarak kullanılan PEM tipi yakıt hücresinden bahsedilmiştir. Yakıt hücreleri 3 ana bölümden oluşurlar ve önemli bir bölümü olan bipolar plaka bölümü çalışma boyunca ele alınmıştır.

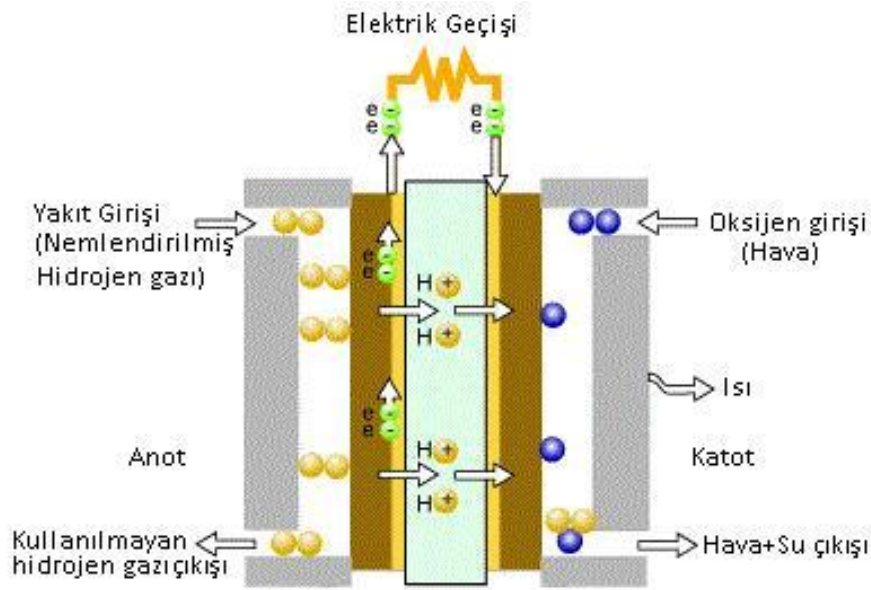
Bipolar plakalar yakıt hücresinin hacim ve ağırlıkça % 80'ini oluşturan temel bir bileşendir[12]. Maliyet olarak ise %45' ini oluşturmaktadır[12]. Çalışmanın dördüncü bölümünde yapılan deneysel çalışmalara yer verilmiştir ve gerçekleştirmiş

olduğum elektriksel iletkenlik, mekanik mukavemet, korozyon direnci, temas açısı ölçümleri deneylerinden bahsedilmiştir ve veriler aktarılmıştır. Kullanılan epoksi malzemelerin grafiti nasıl etkilediği ve performansları grafik ve çizelgeler ile sunulmuştur.

Son bölümde ise mevcut çalışmada elde edilen veriler değerlendirilerek sonuçlar üzerinde durulmuştur.

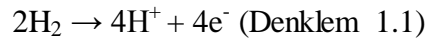
2. YAKIT HÜCRELERİ

Yakıt hücreleri, reaksiyona giren yakıtların (hidrojen, metanol, metan, vs.) kimyasal enerjisini, doğrudan elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal cihazlardır. Temel olarak, iki yüzünde gözenekli anot ve katotla temas halindeki elektrolit tabakasını içermektedir. Çeşitli sıcaklıklarda elektrik elde ederken, sessiz, çevreyi kirlilemeyen ve hareketli parçası olmayan cihazlardır. Çalışma prensibi suyun elektrolizinin tersi olarak bilinmektedir.

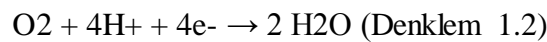


Şekil 2.1 Tek Hücreli Yakıt hücresi

Anot adı verilen elektrota gelen hidrojen gazı, katalizörlerin yardımıyla elektron ve protonlarına ayrılır. (Denklem 1.1)



Protonlar elektrolitten geçerek katoda gelirken, elektronlar ise dış devreden geçerek katoda giderken elektrik üretirler. Hidrojenin proton ve elektronları katot üzerinde oksijenle birleşerek su oluştururlar. (Denklem 1.2)



Böylece yakıt hücresindeki toplam reaksiyon (Denklem 1.3):



olacaktır.

Yakıt Hücrelerinin Avantajları;

- Çevre dostu ve yan ürün olarak sadece su oluşmaktadır.
- Termal sistemlerden elektrik üretiminde sistemin verimini Carnot Çevirimi Kriterleri'nden etkilenirken (Carnot Çevirimi; kullanılan akışkanın ideal bir ısı sistemindeki basınç ve sıcaklığının ortaya çıkardığı ve iki izoterm ile iki adyabatik dönüşümden meydana gelen çift kaynaklı, tersinir termodinamik çevrimdir) yakıt hücreleri sistemlerinde bu etkileşim yoktur. (20) Yakıt hücreleri diğer enerji sistemlerine göre daha yüksek verimle çalışırlar.
- Emisyon miktarı yok denecek kadar azdır (diğer yakıtlara göre).
- Gürültü, hareketli aksamının bulunmadığı için, oluşmamaktadır.
- Yakıt hücrelerinde kullanılacak yakıt sayısı çok fazla olduğundan, fosil ve alternatif yakıtların kullanımının kolaylığı nedeniyle çok farklı alanlarda kullanılabilir.
- İstenilen boyutlarda üretilebilirler. Kapasiteleri ayarlanabilir. Yapıları basittir. Büyüklüklerine göre 1 W'tan 10 MW'a kadar olan bir güç yelpazesine sahiptirler..
- Modülerdirler. Gerekli görülen her yerde kullanılabilir ve yerleştirilebilirler. Ayrıca dayanıklı ve güvenli sistemlerdir.
- Yakıt hücresi sistemlerinde yan ürün olarak oluşan atık ısı geri kazanılabilir.

Yakıt hücrelerinin dezavantajları;

- Yakıt hücreleri pahalı sistemlerdir. Bu pahalı sistemlerin kullanımı, çok fazla bilgi, ileri teknoloji, uzun zaman gerektirir.
- Henüz dayanıklılık sorunları aşılanmamıştır.
- Performans, ağırlık, hacim ve sistem elemanları konularında iyileştirmeler gerekmektedir.

2.1. Enerji Taşıyıcı Olarak Hidrojen

Hidrojen dünya üzerinde en yaygın olarak bulunan elementtir. Tüm elementlerin en basiti olan bir standart hidrojen atomu (protonyum) bir proton ve bir elektrondan oluşur. Hidrojen, Atomik kütlesi 1,00794 g/mol ile en hafif elementtir ve standart sıcaklık ve basınç altında renksiz, kokusuz, metalik olmayan, tatsız, oldukça yanıcı bir atomik gazdır (H₂). Element halindeki hidrojen dünyada az bulunur. Endüstride hidrojen, metan gibi hidrokarbonlardan üretilebildiği gibi, pahalı olsa da suyun elektrolizinden de üretilebilir. Hidrojenin en yaygın doğal izotopu, döteryum (1 proton, 1 nötron) olarak bilinir. Hidrojen, pek çok elementle bileşik verilebilir, suda ve pek çok organik molekülde bulunur. Su, çözünen moleküller arasındaki asit - baz reaksiyonlarında önemli rol oynar. Hidrojen gazı, doğal gaz veya hava gazına benzer olarak borular aracılığıyla her yere kolaylıkla ve güvenli olarak taşınabilmektedir. Doğal gaz için kurulan yer altı boru dağıtım ağının ileride çok az bir değişiklikle hidrojen içinde kullanılması olanaklıdır. Boru hatları dışında hidrojen, basınçlı gaz olarak veya sıvılaştırarak tüplere konup tankerlerle taşınabilir. Taşınırken enerji kaybı olmaz diğer kaynaklar gibi uzun boru hatlarına ihtiyaç yoktur. Depolanabilir. Hidrojen ideal yakıt özelliklerine en çok uyan yakıttır. İdeal yakıttan beklenen özellikler aşağıda bulunmaktadır;

Güneş ve diğer yıldızların termonükleer tepkimeye vermiş olduğu ısının yakıtı da yine hidrojen olup, evrenin temel enerji kaynağıdır. Hidrojen, doğada serbest

halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunur. En çok bilinen bileşiği ise sudur. Hidrojen gazı, farklı yöntemlerle elde edildiği gibi su, güneş enerjisi veya onun türevleri olarak kabul edilen rüzgar, dalga ve biyokütle ile de üretilmektedir.

- Kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilmeli ve taşınırken enerji kaybı olmamalıdır ya da depolanabilir olmalıdır. Tükenmemelidir.
- Her yerde, örneğin, sanayide, evlerde, taşıtlarda kullanılabilmesi çevre kirliliği yaratmamalıdır. Karbon içermemelidir.
- Birim kütle başına yüksek kalori değerine sahip olmalı ve farklı yollarla doğrudan yakarak veya kimyasal yolla kullanılabilir olmalıdır. Güvenli, hafif ve enerji üretimi yüksek verimle olmalıdır. Ekonomik olmalıdır.
- Isı, elektrik veya mekanik enerjiye kolaylıkla dönüşebilmeli. Enerji yakıtı, ideal olarak yukarıdaki koşulları sağlamalıdır:

Bugün sanayide kullanılan hidrojenin büyük bir bölümü doğal gazdan elde ediliyor. Bu yöntem hem şimdilik ucuz hem de sağlam bir alt yapıya sahip. Doğal olarak asıl amaç hidrojeni yenilenebilir kaynaklardan üretebilmektir. Hidrojeni doğal gazdan elde etmenin dışında bunun için bilinen beş yöntem daha vardır.(3)

1. Sudaki hidrojenin elektrik enerjisi ile oksijenden ayrılması (Elektroliz)
2. Organik malzemelerden hidrojen üretilmesi
3. Bazı algler ve bakterilerin artık olarak ürettikleri hidrojenin toplanması
4. Suyu 3100 °C üzerinde ısıtarak molekül bağlarını koparıp element olarak hidrojen ve oksijen elde edilmesi
5. Güneş ışınlarından yararlanarak sudaki hidrojenden ayrıştırılması

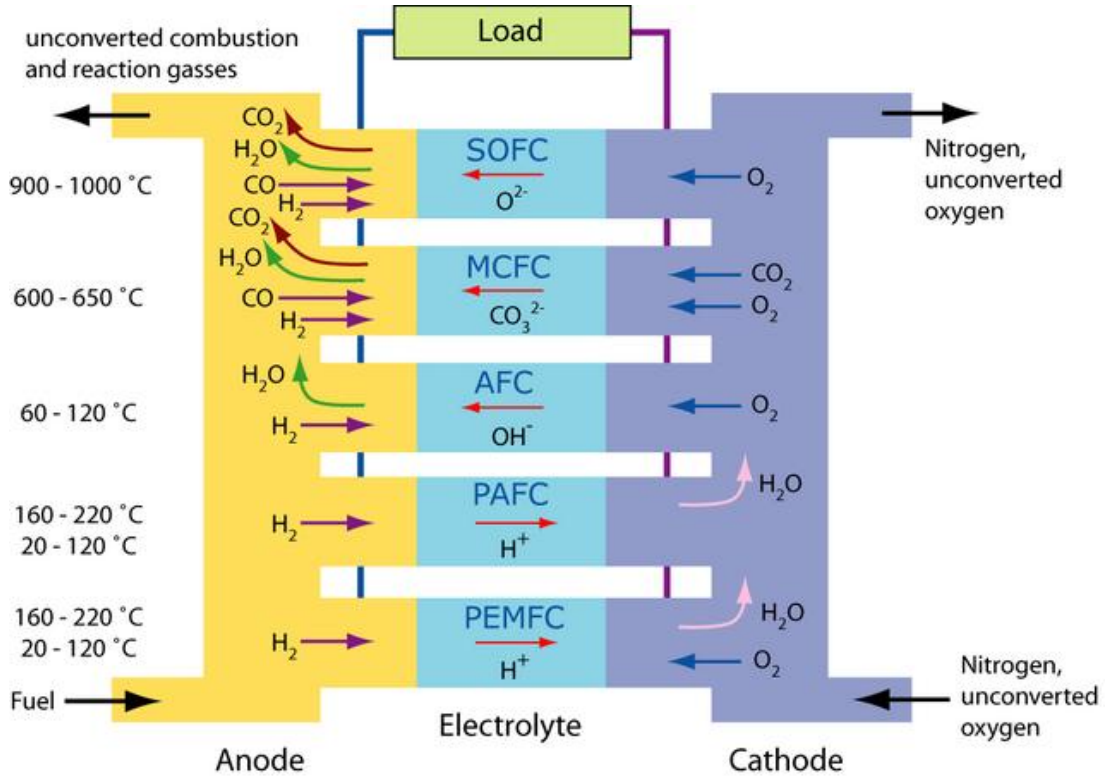
Çok büyük miktarda hidrojen üretimi gerçekleştirecek ekonomik yöntemler geliştirilirken bir yandan da bu yakıtın dağıtımını sağlayacak bir sistem kurma çalışmaları yürütülmelidir. Günümüzde dünyada üretilen az miktarda hidrojenin bir kısmı boru hatlarıyla taşınmıyor. Ancak bu hatlar çok kısırdır. Örneğin ABD 'deki 350 000 km'lik petrol boru hattı ve 2 100 000 km'lik doğal gaz boru hattının yanı sıra 800

km 'lik hidrojen boru hattı bulunmaktadır. Diğer ülkelerde ise durum çok farklı değildir. Ne var ki hidrojen boru hattı teknolojisi yıllardır bilinen ve kullanılan teknolojidir. Bu nedenle gerekli kararlar alındığında hidrojen boru hattı sistemi rahatlıkla kullanılabilir. Ya da yapılacak bir takım değişikliklerle doğalgaz boru hatlarından yararlanılabilir. Ayrıca dağıtım için bir seçenek daha var, buda sıvılaştırılmış hidrojeni tankerlerle ve trenlerle taşımaktır. Yakıt hücreleriyle çalışan ve yakıt olarak hidrojen kullanan taşıtların bir sorunu daha vardır. Bu da hidrojenin depolanmasıdır. Bunun için iki yöntem üzerinde durulmaktadır. Birincisi yüksek basınç altında sıvılaştırılmış gaz olarak depolanması. İkincisi ise; yine yüksek basınç altında ve düşük sıcaklıkta sıvılaştırılmış hidrojen biçimindedir(3).

2.2. Yakıt Hücresi Çeşitleri

Yakıt hücresi sistemleri çalışılan sıcaklığa, basınç aralığına, yakıtın besleme biçimi, elektrolit tipi ve aynı zamanda kullandıkları yakıt ve/veya oksidantlara göre çeşitlilik gösterirler. En yaygın kullanılan sınıflandırma elektrolit tipine bağlı yakıt hücresi çeşitleridir. Buna göre 5 tip yaygın yakıt hücresi çeşidi bulunmaktadır;

- Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresi (PEMFC)
- Alkali Yakıt Hücreleri (AFC)
- Fosforik Asit Yakıt Hücreleri (PAFC)
- Erimiş Karbonat Yakıt Hücreleri (MCFC)
- Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC)



Şekil 2.2. Farklı Yakıt Hücresi Çeşitlerinde Meydana Gelen Reaksiyonlar ve Elde Edilen Ürünler

Değişen sıcaklıkla Yakıt Hücrelerinde meydana gelen reaksiyonlar ve elde edilen ürünlerin gösterimi Şekil 2.1' de verilmiştir.(2)

2.3. PEM Tipi Yakıt Hücreleri

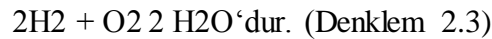
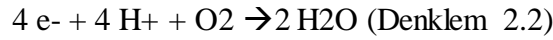
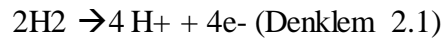
Proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEM), Polimer elektrolit membran (zar) yakıt pili olarak da adlandırılır diğer yakıt hücrelerinden tasarım ve işletim bakımından daha zarif ve fazla güç yoğunluğu, düşük hacim ve düşük ağırlığa sahiptir. Günümüzdeki PEM tipi yakıt hücrelerine benzeyen ilk PEM tipi yakıt hücresi, 1960 yılında NASA için General Electric tarafından geliştirilmiştir. Burada bir katı polimer elektrolit (ince polimer bir zar) membran iki platin katalizörlü gözenekleri olan elektrolit arasına yerleştirilmektedir. Membran, mikron düzeyinde kalınlığa sahip ve proton geçirgen bir yapıdadır. Bu sistem genellikle maksimum 80-90°C aralığında çalışır. Soy metaller ve genellikle platin katalizör olarak kullanılır ve bu da maliyetini artırır. (5)

Bir PEM yakıt hücresi yapısında genel olarak membran, elektrot ve bipolar plakalar bulundurmaktadır.(3)

- **Elektrolit Membran**
- **Elektrodlar**
- **Bipolar Plakalar,**

Çalışma prensibine göre, elektrotlardan birine oksijen ötekine de hidrojen verilir. Arada bulunan zar iki gazın birbiriyle temas etmesini engeller ve yalnızca anot kısmında elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan protonların katot kısmına geçmesine izin verir. Elektronlar ise anottan katoda katottaki elektron ihtiyacı sebebiyle hareket etmektedirler. Anottan katoda elektron hareketi sayesinde elektrik akımı üretilmiş oluyor.

PEM tipi yakıt hücrelerinde anot (Denklem 2.1) ve katot (Denklem 2.2) kısmında gerçekleşen yarı reaksiyonlar ve bu 2 reaksiyonun bileşimi olarak gösterilebilecek net reaksiyon (Denklem 2.3) aşağıda gösterilmiştir.



PEM tipi yakıt hücrelerini bir araya getiren elemanlardan, çalışmada üzerinde durulan, bipolar plakalar aşağıda açıklanmaktadır.

3. BİPOLAR PLAKALAR

Bipolar plakalar, PEM yakıt hücresinde birden fazla hücreyi birbirine bağlayan bileşenlerdir. Bipolar plakalar hücreler arasında elektrik ve ısı iletimini sağlar, hücreleri birbirinden ayırır, hücrede su yönetimini sağlar ve bulunduğu hücre içinde yakıt ve oksitleyiciyi dağıtmak gibi görevleri vardır. [4] Bipolar plakaların görevlerini yerine getirebilmesi için bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bunlar;

- 1) Elektriksel iletkenlik
- 2) Korozyon direnci
- 3) Kimyasal kararlılık
- 4) Isısal kararlılık
- 5) Gaz geçirmezliği
- 6) Mekanik dayanım
- 7) Hafiflik
- 8) Üretim kolaylığı

Bunların dışında, bipolar plakalar yakıt hücresi sistem entegrasyonunu sağlayabilmek için membran veya katalizörü zehirleyebilecek malzemelerden yapılmamalıdır

Bipolar plakaların fonksiyonlarını yerine getirebilmesi için sahip olması gereken özellikler vardır. Bu özellikler ideal olarak kompozit bipolar plakalar için çizelge 3.1'deki gibi olmalıdır[11,12].

Çizelge 3.1 DOE hedefleri

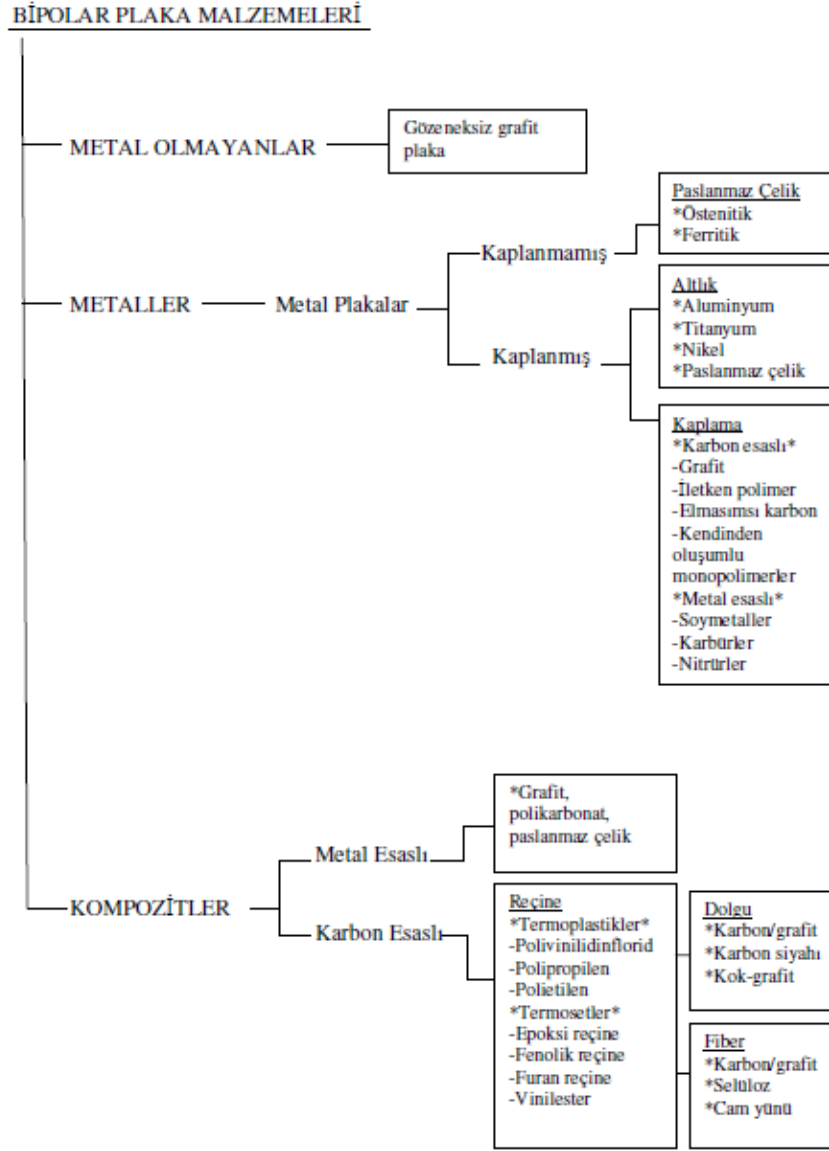
Elektriksel iletkenlik:	> 100 S/cm
Yüzey direnci:	< 10 ohm.cm ²
Isıl iletkenlik:	Mümkün olduğu kadar yüksek
Hidrojen/gaz geçirgenlik:	< 2 x 10 ⁻⁶ cm ³ /s cm ²
Korozyon direnci:	<1µA/cm ²
Eğme mukavemeti:	> 25 Mpa
Yoğunluk:	< 5 g/cm ³

- Isıl dayanıklılık; yakıt hücresi çalışma sıcaklığında ısı dayanıklılık (yakıt hücresi taşıt uygulamaları için – 40'dan 120°C ye kadar);
- Düşük hacim, hafif ağırlık ve düşük maliyet
- Kolay işlene bilme ve seri üretim
- İnce; kalınlık taşıt uygulamaları için (= 2 mm)

3.1. Bipolar Plaka Malzemeleri

Temel olarak 3 çeşit bipolar plaka malzemesi vardır. Bunlar; Metal, kompozit ve metal olmayan malzemelerden yapılan bipolar plakalardır.

- Metal bipolar plakalar, kendi içinde kaplamalı ve kaplamasız olarak ikiye ayrılır. Yüksek elektrik ve ısı iletkenlik ayrıca kolay işlenebilme ve yüksek mukavemete sahiptir.
- Gözeneksiz grafit bipolar plakalar, kimyasal dayanımı ve elektrik iletkenliğinin çok iyi olmasıyla en çok kullanılan malzemedir. Ayrıca iyi ısı iletkenlik ve yüksek hidrofobikliğe sahip olmalarıyla ısı ve su iletimini kolaylaştırır.
- Polimer kompozit bipolar plakalar, hafif ve ekonomik olmaları sayesinde bipolar malzemeler için en iyi alternatiflerdir. İstenilen ölçülerde üretilebilmesi ve hafifliği tercih edilme sebepleridir.



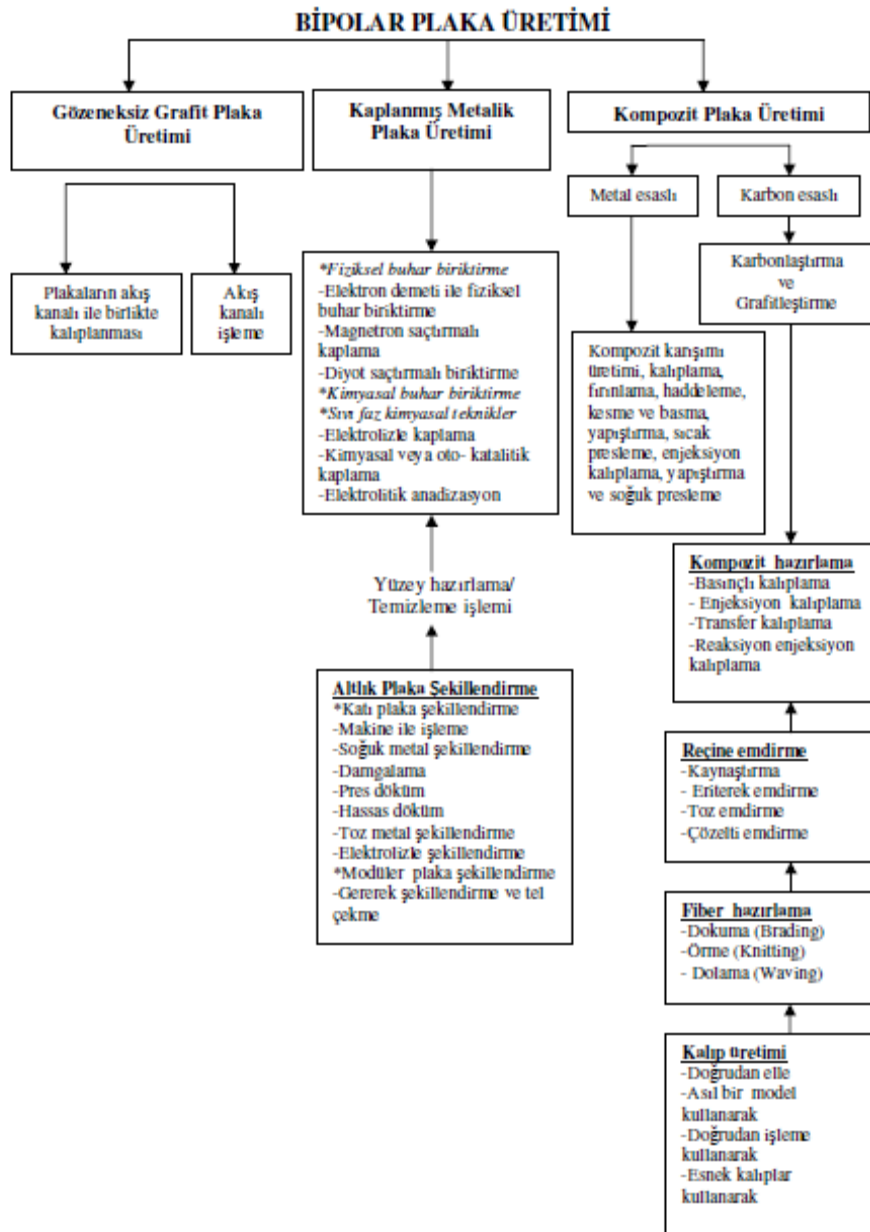
Şekil 3.1 Bipolar Plaka Malzeme Çeşitleri

3.2. Polimer Kompozit Bipolar Kompozit Plakalar

Gözeneksiz grafit plakalardan daha ucuz olmasından ve başka malzemeler katılarak sızdırmazlık, mekanik mukavemet ve kimyasal dayanım kazandırılabilceğinden en iyi alternatiftir. İçine katılan polimer içinde homojen bir ağ oluşturur böylece gaz geçirgenliği azalır gözeneksiz yapıya yaklaşır. Metal ve grafit bazlı olabilirler. Grafit bazlı olanlar düşük yoğunluklu olup istenilen şekle kolaylıkla ulaşabilirler. Metal bazlı olanlar ise yüksek yoğunluklu fakat kolay korozyona uğrarlar.

3.2.1. Grafit Kompozit Bipolar Plaka Üretimi

Grafit kırılğan bir yapıya sahiptir ve akış kanalı işlenmesi maliyetlidir. Kolay işlenebilmesi ve mekanik dayanımının artması için bağlayıcı malzemeler kullanılır. Bilimsel çalışmalarda basınçlı kalıplama, enjeksiyon kalıplama, transfer kalıplama ve reaksiyon enjeksiyon kalıplama gibi yöntemler bulunmaktadır. Bunun yanında PVDF, PP, sıvı kristal polimer (LCP) gibi termoplastik ve fenolik, epoksireçine, vinil ester gibi termosetlerin kullanıldığından bahsedilmektedir.(4,6)



Şekil 3.2 Genel olarak bipolar plaka üretim alternatiflerinin sınıflandırılması
En çok kullanılan üretim yöntemleri aşağıdaki gibidir.

3.2.1.1. Basınçlı Kalıplama Yöntemi

Basit ve ekonomik bir kalıplama yöntemidir. Basit şekilli ve küçük/orta boy parçalar için genellikle daha önceden ısıtılmış kalıp boşluğuna yerleştirilen malzemenin basınç altında şekillendirildiği yöntemdir. Yeterli miktardaki malzeme erkek ve dişi kalıptan oluşan bölüm içine yerleştirilir. Malzeme basınç uygulanarak kalıbın tüm yüzeyine temas etmiş olur. Isı ve basınç etkisi altındaki malzeme şekil alır.

3.2.1.2. Enjeksiyon Kalıplama

Enjeksiyonla kalıplamada plastik parçalar, ergitme, kalıp boşluğuna doldurma, soğutma ve parçaların kalıptan çıkarılması kademelerinden geçilerek elde edilir. Enjeksiyonla kalıplama çok küçük parçalardan bir arabanın gövde panellerinin üretimine kadar çok geniş bir yelpazede kullanım alanı mevcuttur.(4,6)

3.3. Genleştirilmiş Grafit

Karbonun özel bir formülü olan grafit tabakalı yapıya sahiptir ve bağ kuvvetleri zayıftır. Tabakalar arasına atomlar ve küçük moleküller yerleşebilir. Genleştirilmiş grafitte ise bu tabakalar oldukça geniştir. Sıcaklıkla akordeon gibi ayrılabilir ve genleşme sonrasında ilk hacminden çok daha geniş yapıdadır.

Yapısının böyle olmasıyla kazanılan fiziksel ve kimyasal özellikleri;

- Yüksek elektriksel ve ısı iletimi
- Yüksek kayganlık
- Yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı direnç
- Kimyasal moleküllerin grafit tabakaları arasına katkılandırılabilmesidir.

Bu tez çalışmasında genişletilmiş grafit ve üretim yapabilmek için gerekli 4 farklı reçine ile bipolar plakalar üretilmiştir. Ayrıca çalışma boyunca üretilen plakaların yapılan mekanik mukavemet, elektriksel iletkenlik, temas açısı ve korozyon analizleri de yapılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Analize Hazırlık

4.1.1. Malzeme Hazırlık Süreci

Malzemelerin emdirme süreci için kullanılan 4 adet reçinenin izin verilen oranlarda hazırlanması gerekmektedir. Her reçinenin kendine ait epoksi / sertleştirici oranı bulunmaktadır.

Çizelge 4.1 Kullanılan Reçinelerin Sertleştirici ile olan Oranları

Malzeme adı	Numune Kodu	Epoksi Katkı Oranı	Sertleştirici Katkı Oranı
Weicon seramik	WS	100	33
Weicon titanyum	WT	100	33
Weicon casting	WC	100	20
Weicon wr	WWR	100	15

Çalışma boyunca numuneleri numune kodlarıyla bahsedilecektir.

- Weicon seramik, seramik katkı ve mineral dolgulu, macun kıvamında, aşınmaya karşı son derece dayanıklı bir malzemedir.
- Weicon titanyum, katkı ve macun kıvamında bir epoksidir.
- Weicon casting resin, dökme reçinesidir, ince kıvamlı dolgusuz bir malzemedir.
- Weicon WR, çelik katkı, ısınmaya karşı dayanıklı epoksidir.

Daha önceki çalışmalarda farklı epoksiler kullanılmıştır. Weicon şirketinden temin edilen epoksiler eğme mukavemetleri yüksek olduğu için tercih edilmişlerdir. Ayrıca bu epoksiler sertleştikten sonra mekanik olarak işlenebilirler. Çok yüksek sıcaklıklara ve aşınmaya karşı dayanımları vardır. (10)

Yapılmış çalışmalarda kullanılan MTMS ile en iyi sonuç alınan %5 oranında eklenmiştir. Mukavemetin artması ve esneklik sağlanması için katılan MTMS yi de

kullanmayı tercih ettim. MTMS esnek silikann başlangıç malzemesidir. Silika seramik olması yüksek mukavemet kazandırabilir.

Malzemeler ilk önce tartıldı, ağırlıklarına göre epoksi, hardener ve MTMS oranları ayarlandı. Bir plaka ortalama 0.9 gram ağırlığındadır. 4 plaka kullanıldığı için 3.6 gr plaka kullanıldı. Plakaların ağırlığının %25 i kadar polimer emdirildi. Yani 0.9 gr. polimer emdirildi. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucu bulunan miktarın iki katı kullanılarak istenilen oranlar elde edilmeye çalışılmıştır. Bu yüzden 1.8gr miktarda epoksi ve sertleştirici kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda kullanılacak epoksi ve sertleştirici miktarları belirlenmiştir. (Çizelge 4.2) Her malzemenin kendine ait epoksi ve sertleştirici kullanım oranları bulunduğu için değerler belli bir standartta değildir.

Çizelge 4.2 Malzemelerden Kullanılan Miktarlar

Malzeme adı	Kullanılacak Epoksi Miktarı (gr.)	Kullanılacak Sertleştirici Miktarı (gr.)
Weicon seramik	1.35	0.45
Weicon titanyum	1.35	0.45
Weicon casting	1.5	0.3
Weicon wr	1.565	0.235

MTMS ise plakaların ağırlıkça %5 i miktarda kullanılacaktır. (Mtms:0.18 gr) Daha sonra malzemelerimiz 150 ml asetonla tamamlanır. Ultrasonik karıştırıcıyla 1 dk. süre ile karıştırılır. Malzeme emdirme süreci için hazırdır.

4.1.2. Emdirme Süreci

Malzemeler için hazırlanan solüsyonlara 4 adet kesilip hazırlanmış uygun boyutlardaki (1,5*6 cm) plaka solüsyon içine atılır 30 dakika boyunca oda sıcaklığında karıştırıcıya bırakıldı.

Malzemelerin emdiğini ve emdirme miktarını malzemelerin ilk ve son ağırlıkları ölçülerek görüldü (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3 Numunelerin İlk ve Son Ağırlıkları

Numune adı	İlk ağırlıkları	Basmadan sonraki ağırlıkları
WS1	3.61	3.71
WS2	3.65	3.75
WS3	3.63	3.79
WS4	3.67	3.76
WS5	3.6	3.72
WT1	3.64	3.76
WT2	3.65	3.77
WT3	3.69	3.87
WT4	3.68	3.82
WT5	3.71	3.83
WC1	3.73	4.06
WC2	3.76	4.07
WC3	3.77.	4.23
WC4	3.78	4.06
WC5	3.66	3.92
WW1	3.63	3.75
WW2	3.6	3.72
WW3	3.72	3.83
WW4	3.56	3.67
WW5	3.79	3.89

Emme işlemi yeterli miktarda emme olmadığı için eğme mukavemeti değerleri hedeflenen değerlerin altındadır.

4.1.3. Kurutma Süreci

Emdirilmiş plakalar kurutma sürecine bırakıldı, kurutma süreci malzemeden malzemeye değişir, bazı grafitler oda sıcaklığında 1 gün bekletilerek içindeki nemi atarken bazı malzemeler sıcaklık altında, üfleme ile kurutma ile verimli sonuç

vermektedir. En sağlıklı sonucu deneme yanılma yöntemiyle bulundu. Malzemeler önce oda sıcaklığında kurutuldu. bu işlem her farklı reçineli plaka için denendi. Fakat başlarda bir farklılık görünmese bile basma işlemi esnasında kırılmalar ve tabakalar arasında ayrılmalar meydana geldi. Daha sonra bu işlem 2 gün bekletilerek tekrarlandı. Son işlem olarak malzemeler aynı gün kurutulmaya başlandı. Böylece malzemeler süngerimsi yapılarını kaybetmeden aynı gün içinde 40 derece sıcaklık altında 50 dakika kurutmaya bırakıldı.

4.1.4. Basma Süreci

Basma süreci için preste farklı sıcaklıklarda ve farklı basınç aralıklarıyla basmalar denendi. En sonunda en optimum sonuç veren değerler;

Çizelge 4.4 Optimum Sonuç Veren Basma Süreci

Basınç (Bar)	Zaman (Dakika)
50 Bar	1 dk
Basınç 0 a indirilir	
100 Bar	1 dk
Basınç 0 a indirilir	
150 Bar	1 dk
Basınç 0 a indirilir	
200 Bar	5 dk
Basınç 0 a indirilir	
200 Bar	5 dk

Böylelikle malzemelerin arasında hava kalmadı daha homojen, daha pürüzsüz plakalar elde edildi. Daha önce basınç birden verildiğinde plakada ayrılmalar, hava kabarcıkları meydana geldi. Bu yöntem sayesinde malzeme alıştırılarak basınç ile buluştu.

Daha sonra yüzey pürüzsüzlüğü için plakalar parlatıldı.

4.2. Analizler

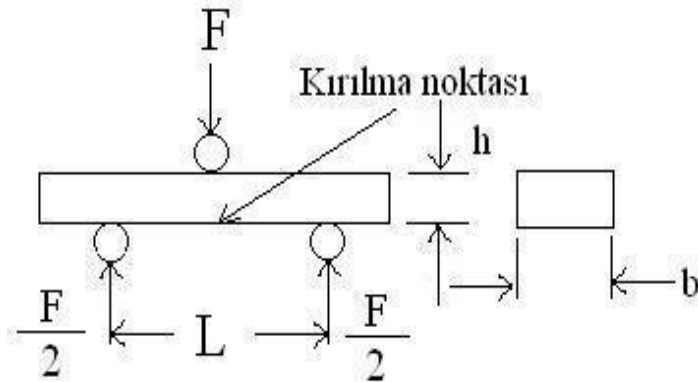
4.2.1. Mekanik Mukavemet Ölçüm Düzenegi

Eğme mukavemetinin (Kırılma modülü) tespiti için yapılan 3 nokta eğme testi, genişletilmiş grafit epoksi kompozit plaka mukavemet davranışını belirlemek için uygun bir düzenektir. Yakıt hücrelerinde hem basma hem de çekme gerilmeleri olduğundan dolayı 3 nokta eğme deneyi yakıt hücresi şartlarını simüle eden en uygun deneylerden biridir. Dayanım parametresi eğme testinden elde edilen verilerden hesaplanan bir kırılma modülüdür (Denklem 4.1).

$$K.M = 3FL/2bh^2 \quad (\text{Denklem4.1})$$

Mukavemet değerleri bipolar plakalar için çok önemlidir. Çünkü plakalar yumuşak yapıya sahip olmasından dolayı, membrana ve elektrota mekanik destek sağlaması ve de yakıt hücrelerinin isteketini oluşturması göz önünde bulundurulduğunda belli değerlere yakın olmalıdır ki görevlerini gerçekleştirebilsin.

Hazırlanan numuneler oda sıcaklığında, 1 mm/sn hızla, Instron mekanik analiz cihazı ile test edilmiştir. Böylelikle farklı epoksiler arasındaki mukavemet değişiklikleri gözle görülebilmektedir.



Şekil 4.1 Nokta Eğme Testinin Şematik Gösterimi

4.2.2. Korozyon Direnci Ölçüm Düzenegi

Yakıt hücresinin korozyon dayanımına sahip olması gerekmektedir. Bu yüzden bipolar plakaların tercih edilir. Volta Lab 80 PGZ 402 cihazı ile -0.5 V'dan

1V'a kadar gerilim arttırılmak suretiyle potansiyodinamik deneyi uygulanmıştır. Sıcaklık kontrolü gerekli olduğundan Lauda Proline Rp 870 cihazı kullanılmıştır ve ortam sıcaklığı 80°C'de sabit tutulmuştur.



Şekil 4.2 Korozyon Ölçüm Deneyi Düzenegi

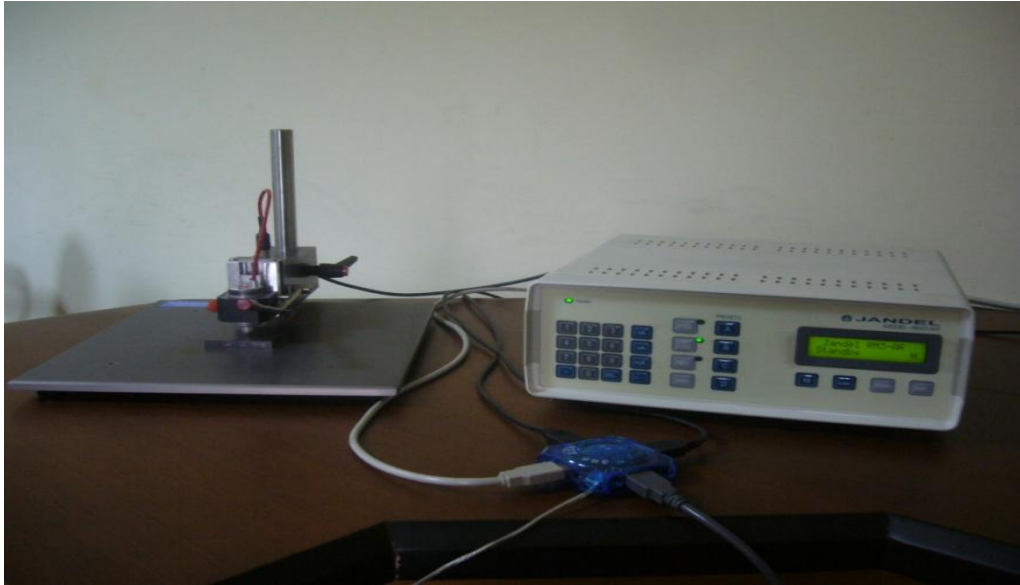
Elde edilen polarizasyon eğrileri, metalin söz konusu olan elektrolit içindeki korozyon hızının belirlenmesinde kullanılabilir. E-log i polarizasyon eğrilerinde, uygulanan dış akım belirli bir değere geldiğinde polarizasyon eğrileri lineer olmaktadır. Aşırı gerilim ile uygulanan dış akım logaritmasının lineer olarak değiştiği bu bölgelere Tafel bölgesi denir. Bu bölgede Tafel doğrusunun eğimi korozyon hızının belirlenmesinde kullanılır. Korozyona uğrayan bir elektrotta anodik ve katodik reaksiyonlar elektrot yüzeyinde aynı anda yürürler. Bu durumda elektrot potansiyeli bir karma potansiyel değerine (E_{corr} , korozyon potansiyeli)erisir. Bu potansiyele karşı gelen akıma da korozyon akımı (I_{corr}) denir. Tafel ekstrapolasyonu yönteminde korozyona uğrayan metal için anodik ve katodik Tafel eğrileri elde edilir ve bunların çizgisel olan kısımları uzatılarak kesim noktalarından o sistem için korozyon hızı I_{corr} ve korozyon potansiyeli E_{corr} bulunur. (14)

Literatürde yapılan çalışmalarda korozyon değerinin $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'nin altına düşürülmesi hedeflenmiştir.

4.2.3. Elektriksel İletkenlik Ölçüm Düzenekleri

4.2.3.1. Yüzeysel Elektriksel İletkenliği Ölçüm Düzenegi

Bu bölümde üretilen numunelerin elektrik iletkenliği ölçümleri yapılmıştır. Numuneler farklı epoksilerle hazırlanmıştır ve hedeflenen elektrik iletkenliği değerine ulaşmaya çalışılmıştır. Farklı epoksilerle emdirilmiş kompozit plakaların iletkenlik değerleri Jandel marka bir multiheight probe (yüksekliği ayarlanabilir probe) ile ölçülmüştür. Bu ünite 1 mm probe mesafesine sahip yüksekliği ayarlanabilir ölçüm başlığı, 10 nA ile 100mA ayarlanabilir akım kaynağına sahip ölçüm ünitesi ve bilgisayar yazılımı ile $\pm\%0,3$ hassasiyette ölçümler yapabilmektedir.



Şekil 4.3 Elektriksel İletkenlik Ölçüm Düzenegi

Her yüzeyin 3 noktasından alınan ölçümlerin ortalaması alınarak her numunenin elektriksel iletkenliği ölçülmüştür.

4.2.3.2. Kalınlık Yönünde Elektriksel İletkenlik Ölçüm Düzeneği

Yakıt hücresi içerisindeki bipolar plakalarda elektron akışı kalınlık yönünde olduğundan bipolar plakaların kalınlık yönündeki dirençlerinin ölçülmesi çok önemlidir. Ölçümler Keithley 2000 multimetre ile yapılmıştır.



Şekil 4.4 Elektriksel İletkenlik Ölçüm Düzeneği

4.2.4. Temas Açısı Ölçüm Düzeneği

Bipolar plakalar da hidrofobik (su sevmeyen) malzemeler tercih edilmelidir. Çünkü yakıt hücrelerinde üretilen suyun bipolar plaka akış kanalları yolu ile kanalları tıkamadan uzaklaştırılması gerekmektedir ve hidrofobik yüzeyler suyun uzaklaştırılmasına katkı sağlayacaklardır. Eğer plakalar hidrofobik olmazlarsa oluşan su, gaz akışı için yeterli hacim kalmamasına sebep olabilmektedir. Bu duruma “Su Basması (Flooding)” denilmektedir. (6)

Her epoksi çeşidinden alınan numuneler numunelerin yüzey gerilimleri KVS Inst Cam 200 cihazıyla ölçülmüştür.



Şekil 4.5 Temas Açısı Ölçümü Deney Düzeneği

5. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI

5.1. Mekanik Mukavemet Ölçüm Sonuçları

Mekanik mukavemet bipolar plakaların yakıt hücrelerine mekanik destek sağladığı için yüksek olması gereken bir özelliktir. Grafit normalde çok kırılğan bir yapıdadır, fakat içine emdirme yöntemiyle katılan polimerler sayesinde bu çalışmada plakalara mukavemet kazandırılmaya çalışılmıştır. Her numuneden örnekler alınarak mekanik mukavemet ölçümü için üç nokta testine tabi tutulmuştur. Her numuneden fazla ölçüm yapılarak sonuçların tekrar edilebilirliği görülmüştür.

Çizelge 5.1 Numunelerin Eğilme Mukavemet Değerleri

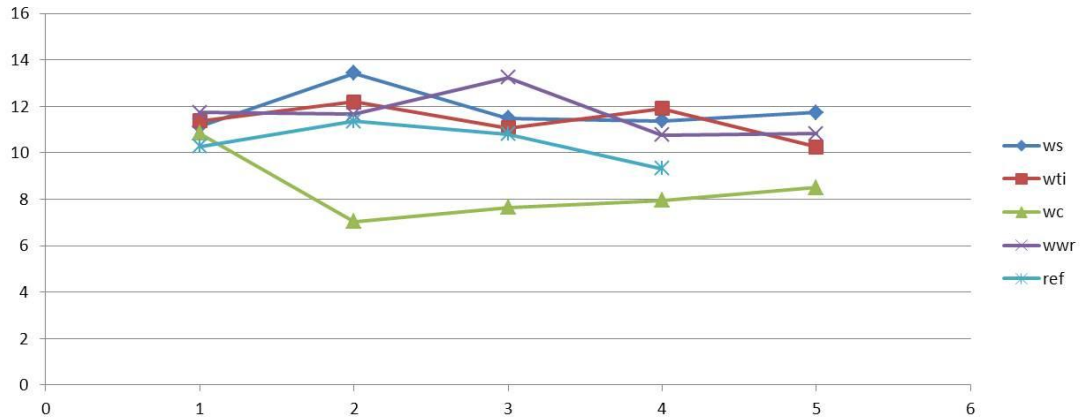
Numune Kodu	Eğme Mukavemeti (MPa)
WS1	11.12
WS2	13.42
WS3	11.49
WS4	11.38
WS5	11.73
WT1	11.38
WT2	12.19
WT3	11.08
WT4	11.91
WT5	10.26
WC1	10.85
WC2	7.04
WC3	7.65
WC4	7.96
WC5	8.5
WW1	11.73
WW2	11.67
WW3	13.23
WW4	10.76

WW5	10.82
-----	-------

Çizelge 5.2. Numunelerin Eğilme Mukavemet Değerleri

Numune Kodu	Max Stress (MPa)
REF-1	10.28
REF-2	11.35
REF-3	10.8
REF-4	9.32

Elde edilen sonuçlara bakıldığında değerlerin çok düşük olmadığı görülmüştür. Kullanılan epoksileri birbirleriyle ve referans alınan malzemeyle karşılaştırılabilirliği elde edildi. İstenilen değer 25 MPa'dan büyük olması istenirken değerler istenilen değerlerden düşüktür. Aralarında karşılaştırıldığında seramik ve titanyum katkılı polimerlerin bulunduğu malzemelerin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Referans malzemeli numunelere bakıldığında sonuçların kötü olmadığı, yalnız seramik ve titanyum katkılı numunelere oranla düşük veriler elde edildiği görülmektedir. Elde edilen değerler şekil 5.1'de verildiği gibi genel olarak birbirleriyle tutarlıdır.



Şekil 5.1 Mekanik Mukavemet Ölçüm Değerleri

5.2. Elektriksel İletkenlik Deneyi Ölçüm Sonuçları

Elektriksel iletkenlik plakalarda yüksek olması istenen önemli bir özelliktir. Bu yüzden her plaka için yüzeyel elektriksel iletkenlik ve plaka kalınlığı yönünde elektriksel direnç ölçümleri yapıldı. Aynı numuneden çok sayıda ölçüm yapılarak

ölçümlerin tekrar edilebilirliği gözlemlendi. Daha sonra hedeflenen değerlerle karşılaştırıldı.

5.2.1. Yüzey Elektriksel İletkeliği Ölçümü

5 farklı epoksi ile üretilmiş kompozit plakaların elektriksel iletkenlikleri ölçümü yapıldı ve birbirleriyle karşılaştırıldı. Ayrıca referans alınmış malzemeye yapılmış numunelerle karşılaştırılarak optimum sonuçlara ulaşılmaya çalışıldı. ABD Enerji Bakanlığının koymuş olduğu 100 S/cm hedefi göz önünde bulundurularak plaka geliştirilmeye çalışıldı.

Çizelge 5.3 Referans Numunesi İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri

Numune Kodları	Elektriksel iletkenlik S/cm
Ref-1	113
Ref-2	120
Ref-3	128
Ref-4	122

Çizelge 5.4 Seramik İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri

Numune Kodları	Elektriksel iletkenlik S/cm
WS.2-1	132
WS.2-2	138
WS.2-3	135
WS.2-4	138
WS.2-5	144
WS.2-6	142

Çizelge 5.5 Titanyum İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri

Numune Kodları	Elektriksel iletkenlik S/cm
WTİ.2-1	133
WTİ.2-2	146

WTİ.2-3	131
WTİ.2-4	141
WTİ.2-5	135

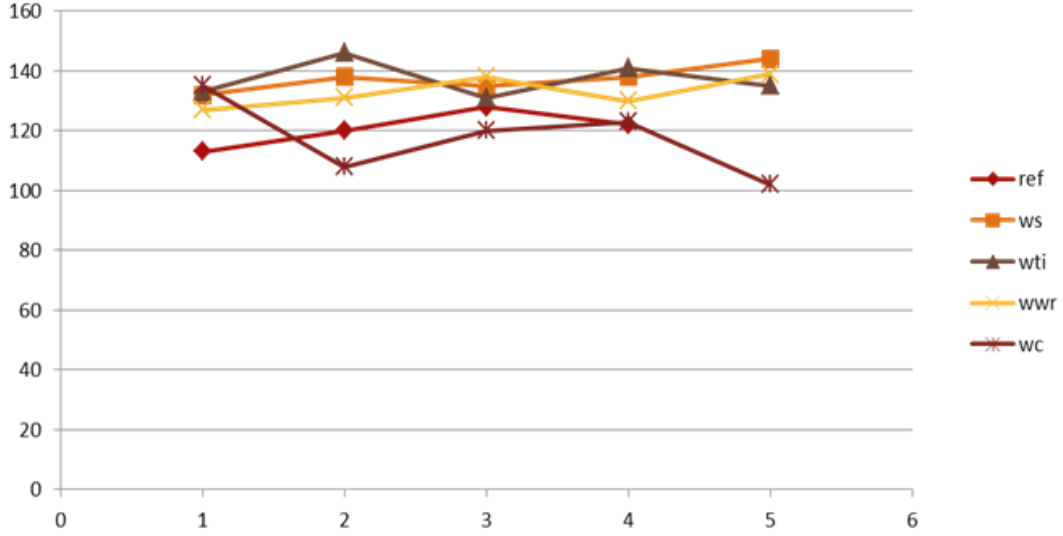
Çizelge 5.6 WR İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri

Numune Kodları	Elektriksel iletkenlik S/cm
WWR.2-1	127
WWR.2-2	131
WWR.2-3	138
WWR.2-4	130
WWR.2-5	139

Çizelge 5.7 Casting İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri

Numune Kodları	Elektriksel iletkenlik S/cm
WC.2-1	135
WC.2-2	108
WC.2-3	120
WC.2-4	123
WC.2-5	102

Yapılan deneylerde, sonuçlar 100 S/cm in üzerindedir. Referans olarak numuneler ne kadar istenilen değerleri tutsada farklı epoksiler kullanılmış plakalar daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olmuşlardır. En düşük çıkan numuneler döküm reçineli numuneler çıktı. Ama onlarda istenilen değeri yakaladılar. Numuneler arasında bir karşılaştırma yapılması gerekirse, seramikli numuneler ve titanyumlu numuneler en yüksek değeri vermişlerdir. Titanyumlu numunelerinin değerleri Şekil 5.1’de olduğu gibi değerler arasında oynamalar daha fazla olduğu için seramikli numunenin değerlerinin daha fazla olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 5.2 Elektriksel İletkenlik Değerlerinin Gösterimi

Y yönü; Elektriksel İletkenlik S/cm
X yönü; Numune numarası

5.2.2. Kalınlık Yönünde Elektriksel İletkenlik Ölçümü

Yapılan ölçümlerin değerleri çizelgelerde verilmiştir. Değerlerin birbirleriyle ve referans numunelerle karşılaştırılabilmektedir.

Çizelge 5.8 Referans Numunesi İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri

Referans malzeme	Kalınlık/m	İletkenlik ölçümleri	Elektriksel Direnç Ohm/cm ⁻¹
Hexion			
Ref-1	0.354	0.38	0.134
Ref-2	0.350	0.39	0.136
Ref-3	0.320	0.37	0.118
Ref-4	0.313	0.50	0.156

Çizelge 5.9 Seramik İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri

Numune Kodları	Kalınlık/cm	İletkenlik ölçümleri	Elektriksel Direnç Ohm/cm ⁻¹
WS.2-1	0.276	0.35	0.0966

WS.2-2	0.244	0.34	0.082
WS.2-3	0.264	0.25	0.066
WS.2-4	0.271	0.25	0.0677
WS.2-5	0.274	0.26	0.071
WS.2-6	0.267	0.225	0.060

Çizelge 5.10 Titanyum İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri

Numune Kodları	Kalınlık/cm	İletkenlik ölçümleri	Elektriksel Direnç Ohm/cm ⁻¹
WTİ.2-1	0.278	0.29	0.080
WTİ.2-2	0.256	0.28	0.071
WTİ.2-3	0.297	0.26	0.077
WTİ.2-4	0.271	0.245	0.066
WTİ.2-5	0.280	0.26	0.0728

Çizelge 5.11 Casting İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri

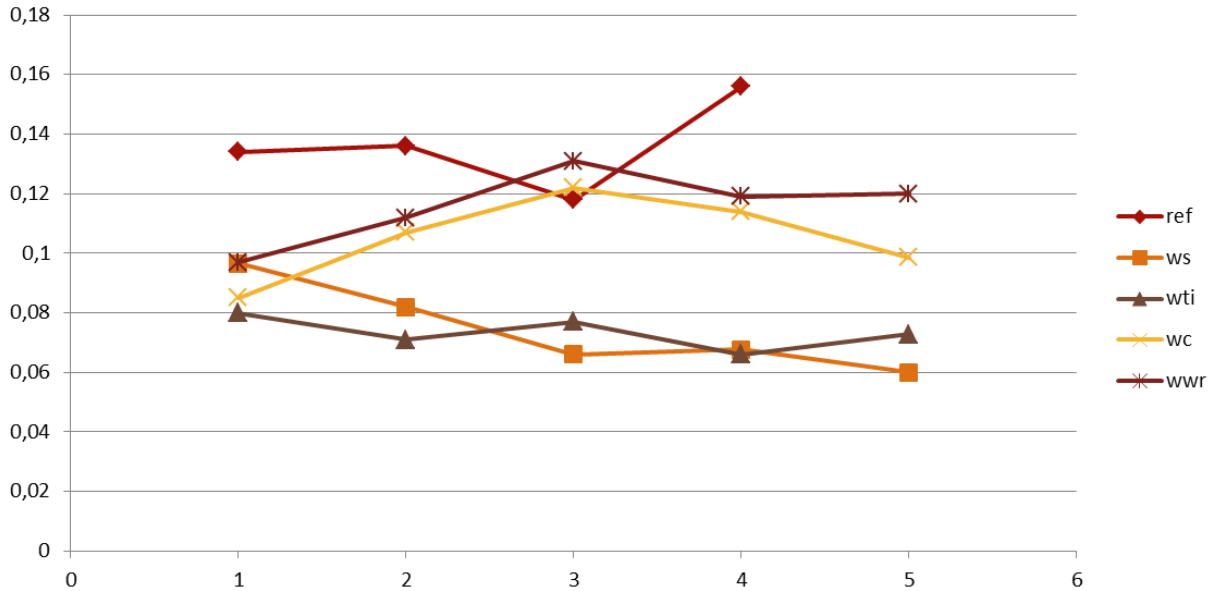
Numune Kodları	Kalınlık/cm	İletkenlik ölçümleri	Elektriksel Direnç Ohm/cm ⁻¹
WC.2-1	0.327	0.26	0.085
WC.2-2	0.370	0.29	0.107
WC.2-3	0.421	0.29	0.122
WC.2-4	0.347	0.33	0.114
WC.2-5	0.290	0.34	0.0986

Çizelge 5.12 WR İçerikli Numuneler İçin Elektriksel İletkenlik Değerleri

Numune Kodları	Kalınlık/cm	İletkenlik ölçümleri	Elektriksel Direnç Ohm/cm ⁻¹
WWR.2-1	0.274	0.355	0.097
WWR.2-2	0.264	0.425	0.112

WWR.2-3	0.266	0.495	0.131
WWR.2-4	0.275	0.435	0.119
WWR.2-5	0.276	0.435	0.12

Çizelgelerde görüldüğü gibi elektriksel direnç açısından bir kıyaslama yapılabiliyor. Elde edilmek istenen değer 0.01 den küçük olmasıyken, seramikli ve titanyumlu numunede bu hedefe yaklaşabiliyoruz. Referans aldığımız numuneler de kullanılan reçineyi kendi numunelerimizin reçinesi ile karşılaştırma imkanı bulabiliyoruz. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi WTİ ve WS numunelerinin değerleri daha aşağıdadır.



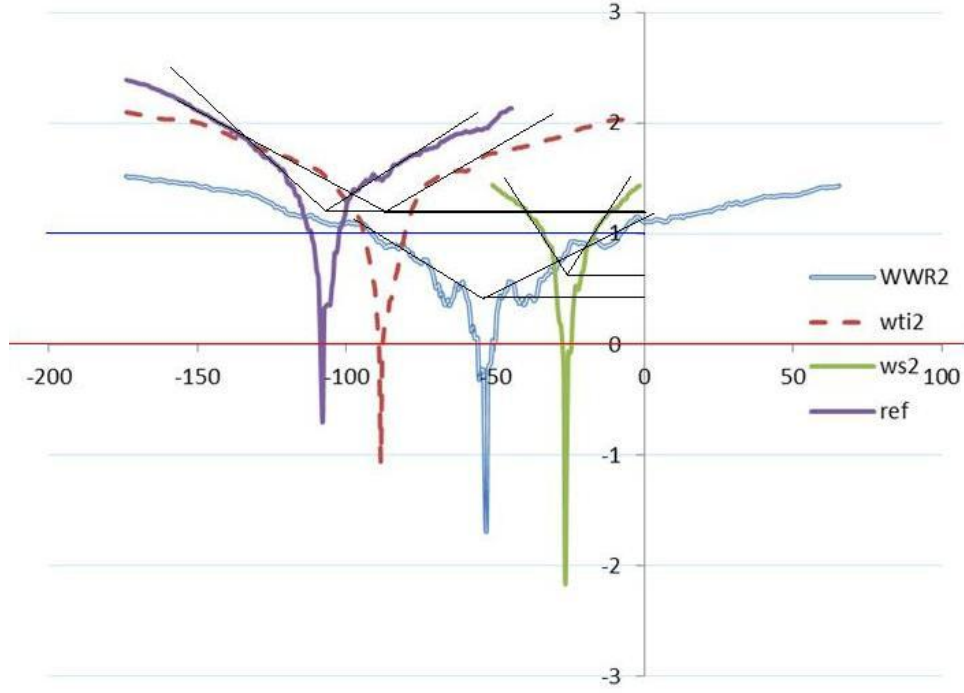
Şekil 5.3 Elektriksel Direnç Değerlerinin Gösterimi

Y yönü; Elektriksel Direnç Ohm.cm
X yönü; Numune numarası

5.3. Korozyon Direnci Ölçümü Sonuçları

Yapılan deneyler sonucu elde edilen korozyon akımı değerleri Şekil 5.1'deki gibidir. Grafiğimizin aşağı yöndeki pik noktası bizim için önemlidir. Pik noktası ne kadar aşağıda ise korozyon dayanımımızın o kadar iyi olduğunu söyleyebiliriz. Grafiktende

başarılı bir kıyaslama yapabiliyoruz. Grafiğe göre seramik epoksi içerikli numunemiz en uygun korozyon dayanımına sahiptir. Literatürde yapılan çalışmalarda korozyon değerinin $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'nin altına düşürülmesi hedeflenmiştir.



Şekil 5.4 Numunelerin Korozyon Değerlerinin Gösterimi

Çizelge 5.13. Korozyon Ölçümü Sonuçları

Numune Kodu	Korozyon Direnci Ölçümü $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
WS	0.6
WTI	1.2
WWR	0.4
REF	1.2

Korozyon deneyi sonucu elde edilen verilen Çizelge 5.13'te gösterilmektedir. Her iki yönden gelen doğrusal çizgilerin kesişme noktası numunenin korozyon değerini vermektedir. Hedeflenen değer $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den küçük olmasıdır. Elde edilen sonuçlara göre WS ve WWR numuneleri hedeflenen değerler arasındadır. Diğer numuneler hedeflenen değer aralığında bulunmasalar da hedefe yaklaşmıştır. Sadece içinde döküm reçinesi bulunan numuneden sonuç alınamamıştır. Birbirleri arasında karşılaştırıldığında en iyi sonucun WWR kodlu malzemeden alındığı

görülmektedir. WS numunesinden de WWR kadar olmasa da iyi sonuçlar alınmıştır. Referans malzemeli numune ile karşılaştırıldığında bu iki numunenin daha iyi sonuçlar verdiği grafik ve çizelgeden anlaşılmaktadır.

5.4. Temas Açısı Ölçüm Düzenegi

Toplamda beş adet numunedan ölçüm alınmıştır. Her numunenin iki farklı yüzeyinin üç farklı noktasından sonuçlar alınmıştır. Temas açısı ölçüm düzenegi ile yapılan ölçümler çizelge 5.14 verilmiştir.

Çizelge 5.14. Temas Açısı Ölçüm Değerleri

NUMUNE	a	b (Numunenin diğer yüzü)
WS	85,3	84,5
	86,07	87,8
	87,5	
WTI	81,7	93,9
	83,2	91,2
		80,4
WWR	84,6	79,5
	79,6	80,9
	80,7	
WC	81,5	86,3
	80,7	87,2
	80,6	80,4
REF	78,7	78,5
	78,5	85,8
	81,9	

Elde edilen sonuçların 70'den büyük olması gerekmektedir. Tüm numunelerin sonuçları istenilen değerlerdedir. Temas açısında değerler ne kadar yüksek olursa malzemenin hidrofobikliği o kadar iyi olduğu düşünülmektedir. Görüldüğü üzere elde edilen sonuçlar WS ve WTI numunelerinde daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca yapılan deney sonucunda referans numune ilede açık bir karşılaştırma yapılabilmektedir. Referans numunenin sonuçları ise diğer tüm numunelerden düşüktür. Genel olarak temas açısından elde edilen sonuçlar sevindirici yöndedir. Bu konuda bir hedef belirlenmediği için numuneler sadece aralarında karşılaştırılmıştır.

6. SONUÇ

Yapılan çalışmada , PEM tip yakıt hücrelerinde kullanılan epoksi katkı grafit bipolar plaka üretimi, geliştirilmesi ve deneyleri üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada ulaşılmak istenen yakıt hücresi çalışma ortamının sıcak ve nemli atmosferine karşılık gereken elektrokimyasal dayanımı sağlayan, belirli bir iletkenlik değerine sahip, yüksek korozyon direnci ve hidrofobik yüzey özelliği olan bipolar plakalar elde etmektedir.

Çizelge 6.1. Sonuçlar

	Yüzeysel Elektriksel İletkenlik S/cm	Kalınlık Yönünde Elektriksel Direnç Ohm.cm	Mekanik Mukavemet MPa	Korozyon Direnci Ölçümleri $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Temas Açısı Ölçümleri
Hedefler	>100	<0.01	>25	<1	>70
ws	137.4	0.074	11.83	0.6	86.2
wti	137.2	0.0733	11.36	1.2	86.08
wwr	133	0.115	11.64	0.4	81.06
wc	117.6	0.105	8.4	-	82.78
ref	120.75	0.136	10.43	1.2	80.68

Çalışmada ilk olarak geliştirilmiş grafiti 4 ayrı epoksi ile emdirme işlemi yaparak 4 farklı seride numune hazırlanmıştır. Ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi için daha önce denenmiş ve iyi sonuçlar elde edilmiş referans epoksi seçilerekte ayrıca 4 numune daha üretilmiştir. Elde edilen numunelerle, mekanik numuneler, elektriksel iletkenlik, korozyon ve temas açısı deneyleri yapılmıştır.

Numunelere ilk olarak mekanik mukavemet ölçümü için üç nokta eğme testi yapılmıştır. Ölçümler incelendiğinde polimer, grafit tabakaları arasında bulunan boşlukları ve gözenekleri doldurarak kırılğan grafit matrisli yapının daha mukavemetli bir yapı haline gelmesini sağlar. Bu yüzden malzemelerimizde polimerden kaynaklı bir mukavemet artışı bulunmaktadır. Ama çalışmada önemli olan kullanılan dört epoksinin arasından en optimum sonuçları veren epoksinin bulunması bunun referans numune ile karşılaştırıldığında nasıl bir sonuç elde edildiği görülmektedir. Mekanik mukavemet oranları karşılaştırıldığında seramik ve titanyumlu numunelerin diğer numunelerden daha yüksek mukavemet değerlerine ulaştığını görüyoruz. 25 MPa' a ulaşmak hedefimiz olsa da en iyi sonucu 13.43 MPa ile seramikli numunede elde edilmiştir. Referans numuneler ile karşılaştırıldığında ise WS numunelerinin daha yüksek mukavemete sahi oldukları açıkça görülmektedir.

Daha sonra yapılan elektriksel iletkenlik ölçümlerinde 100 S/cm üstüne çıkılması hedeflenmiştir. Yüzey elektriksel iletkenlik ölçümlerinden elde edilen sonuçlarda seramikli ve titanyumlu sonuçların en yüksek değerler olduğu görülmüştür. Referanslı numuneler ile karşılaştırıldığında , WS ve WTI numunelerinin daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahip oldukları görülmektedir. Ama bizim için önemli olan diğer ölçüm ise kalınlık elektriksel iletkenliğidir, çünkü bipolar plakadaki gaz akışı her zaman kalınlık yönündedir. Kalınlık yönünde hedeflenen değer 0.01 ohm.cm den küçük olması istenmektedir. Sonuçlara bakıldığında en iyi değerleri 0.06 ohm.cm ile seramikli numunelerde ulaşılmıştır. Referans numunelerde ise çok daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

Korozyon deneylerine bakıldığında ise 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'nin altına düşülmesi hedeflenmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi en düşük değere WS ve WWR kodlu numunelerden elde edilmiştir. Elde edilen en düşük değer 0.4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'dir. Referanslı numuneden daha iyi bir sonuç elde edildiği sayılarla ispat edilmiştir. WS numunesinde elde edilen sonuç 0.6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'dir. Bu iki numuneden elde edilen sonuç diğer numunelere göre iyi değerlerdedir. Referanslı numuneden de daha iyi bir sonuç elde edildiği sayılarla gösterilmiştir. Korozyon deneyi sonucu elde edilen sonuçlarla hedeflenen değere ulaşılmıştır.

En son yapılan deney ise temas açısı ölçüm deneyidir. Temas açısında istenilen değer 70-90 arasındır. Elde edilen değerlere göre tüm numuneler istenilen aralıkları sağlamışlardır. Buna rağmen referans numuneyle kıyas edildiğinde seçilen epoksilerin sonuçları daha iyi olduğu çizelge.5.14 te görülmektedir.

Yapılan deneylerde elde edilen numuneler istenilen optimum sonuçlara ulaşmıştır. Seçilen dört epoksi arasından seramikli epoksinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca bir diğer gelişme ise elde edilen sonuçlar referans numunelerden daha iyi değerler vermektedir.

Bundan sonraki aşamalarda seçilmiş numunenin epoksi miktarlarıyla ya da kullanılan grafit türünün değiştirilmesi sağlanabilirse, yakıt hücrelerinde kullanılabilecek bipolar plakalar üretilebilir.

Bu çalışmada ulaşılmak istenilen amaç, gerekli elektrokimyasal dayanımı sağlayan, belirli bir iletkenlik değerine sahip, yüksek korozyon direnci ve hidrofobik yüzey özelliği olan bipolar plakalar elde etmektir. En iyi bipolar plakayı elde etmenin en iyi epoksinin seçilmesi ile mümkün olabileceği bilinmektedir bu yüzden çalışma boyunca kullanılan epoksilerden en iyi sonuçları veren epoksiyi seçebilmek önemlidir. Çalışma boyunca istenilen amaca ulaşmak için bir çok deney gerçekleştirilmiştir. Elde edilen somut veriler doğrultusunda ulaşılmak istenilen amaca çok yaklaşıldığı, gerekli optimizasyonların elde edildiği görülmüştür. Her epoksinin iyi sonuçlar verdiği deneyler olmasına karşın, içinde seramik katkısı olan numuneden tüm deneylerde iyi sonuçlar elde edilmiştir.

KAYNAKÇA

- (1) Kaplan R., imal Edilen ve Ticari PEM Tipi Yakıt Hücrelerinin Performanslarının Kıyaslanması, Yüksek Lisans Tezi, 2008
- (2) <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/printall.php>
- (3) Bulut Ş. Building up gas diffusion layer for using at polymer electrolyth membrane (pem) fuel cells,(M.Sc. Thesis) 2007
- (4) Tekin G., ‘Bipolar Plaka Uygulamaları için Pbt/Kompozit Plakanın Perkolasyon Aralığının Bulunması’ Yüksek Lisans Tezi,
- (5) Yıldırım Y., yakıt pili ders notları T.C. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
- (6) Renata Wlodarczyk¹, Agata Dudek², Rafal Kobylecki¹ and Zbigniew Bis¹
Properties of Graphite Sinters for Bipolar Plates in Fuel Cells
Department of Energy Engineering, Czestochowa University of Technology,
Poland
- (7) http://eng.harran.edu.tr/moodle/moodledata/134/DersNotlari/bipolar_plakalar.pdf
- (6) Ay F. , “PEM tipi yakıt hücreleri için bipolar plakaların geliştirilmesi”, Doktora Tezi, GYTE 2009
- (9) Boru F. ‘yakıt pillerinin yapısı, çalışması ve otomobillere uygulanması’
T.C.GAZİ ÜNİVERSİTESİ
- (10) Weicon plastic data sheet
- (11) A. Kumar, R. G. Reddy, J. Power Sources 129 (2004) 62-67.
- (12) Begüm Ünveroğlu, “PEM tipi yakıt hücreleri için grafit ve genişletilmiş grafit kompozit bipolar plakaların incelenmesi”, Lisans Tezi, GYTE 2010
- (13) Oğuz E, Hidrojen Yakıt Pilleri ve PEM Yakıt Pili Analizi, Yüksek Lisans Tezi, 2006
- (14) ÖZDEMİR O. K., Çeşitli ftalosiyanınların inhibitör olarak asidik ortamda alüminyumun korozyonuna etkisi, Yüksek Lisans Tezi G.Y.T.E (2008), Gebze.
- (15) www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp
- (16) Priyanka H. Maheshwari , R.B. Mathur, T.L. Dhani, “Fabrication of high strength and a low weight composite bipolar plate for fuel cell applications”, Journal of Power Sources (2007)

(17) L. Du, “ Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells”, Doktora Tezi, Akron Üniversitesi, Mayıs (2008)

(18) <http://www.fuelcells.org/basics/benefits.html>.

(19)F.Babir, PEM Fuel Cells: Theory and Practise,Elsevier(2005)

(20) http://tr.wikipedia.org/wiki/Carnot_evrimi

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Eskişehir’de doğan Selen Begüm SEVİC, eğitimine İki Eylül İlköğretim Okulu’nda (Eskişehir) başlayıp, ilköğretim eğitimini Faik Reşit Unat İlköğretim Okulu’nda (İstanbul) bitirdi. Lise öğrenimini 2003 yılında Erenköy Kız Lisesi’nde bitirdi. 2005 yılında Anadolu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü’nü kazandı, eğitimine devam etti. 2010 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği’nde yüksek lisans eğitimine başladı.