

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PROTON DEĞİŞİMLİ MEMBRANLARDA  
KULLANILMAK ÜZERE NANOBOYUTLU PLATİN  
ELEKTROT ELDESİ**

Kimya Mühendisi Tuna EMİR

**FBE Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Programı'nda Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Seyfettin ERTURAN**

**İSTANBUL, 2010**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. YAKIT HÜCRELERİ.....	3
2.1. Yakıt Hücrelerinin Önemi.....	3
2.2. Yakıt Hücrelerinin Tarihçesi.....	4
2.3. Yakıt Hücrelerinin Kullanım Alanları.....	6
2.3.1. Uzay Çalışmaları/Askeri Uygulamalar.....	6
2.3.2. Evsel Uygulamalar.....	6
2.3.3. Taşınabilir Güç Kaynağı Uygulamaları.....	6
2.3.4. Atık/Atık Su Uygulamaları.....	7
2.3.5. Taşıt Uygulamaları.....	7
2.4. Yakıt Hücrelerinin Çalışma Prensibi ve Avantajları.....	7
2.5. Yakıt Hücresi Çeşitleri.....	9
2.5.1. Alkali Yakıt Hücresi (AFC).....	11
2.5.2. Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC).....	12
2.5.3. Katı Oksitli Yakıt Hücresi (SOFC).....	14
2.5.4. Proton Değişim Membran Yakıt Hücresi (PEMFC).....	14
2.5.5. Eriyik Karbonatlı Yakıt Hücresi (MCFC).....	16
2.5.6. Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi (DMFC).....	17
2.6. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin Ana Bileşenleri.....	17
2.6.1. Polimer Elektrolit Membran.....	18

2.6.2.	Katalizör Tabakaları.....	20
2.6.3.	Gaz Difüzyon Tabakaları.....	22
2.7.	Yakıt Hücresinde Polarizasyonlar.....	22
2.7.1.	Aktivasyon Polarizasyonları.....	23
2.7.2.	Yakıt Geçişi ve İçsel Akımlardan Kaynaklanan Polarizasyonlar.....	24
2.7.3.	Direnç Polarizasyonları.....	24
2.7.4.	Konsantrasyon Polarizasyonları.....	24
2.8.	Yakıt Hücreleri İçin Elektrot Hazırlama Yöntemleri.....	24
2.8.1.	Emdirme Yöntemi.....	25
2.8.2.	İyon Değişimi Yöntemi.....	25
2.8.3.	Çöktürme Yöntemi.....	26
2.8.3.1.	Poliol Metot.....	26
2.8.3.2.	Sülfito Metot.....	26
2.8.4.	Kolloidal Yöntem.....	27
2.9.	Katalizör Sentezi ile İlgili Yapılmış Bazı Çalışmalar.....	27
2.10.	Katalizörde Kullanılan Platin Partiküllerinin Boyutunun Ayarlanması.	30
3.	MALZEME VE YÖNTEM.....	33
3.1.	Deneyde Kullanılan Kimyasal Maddeler.....	33
3.2.	Deneysel Çalışma.....	33
3.2.1.	Hidrazin Kullanılarak Yapılan İndirgeme Metodu.....	33
3.2.2.	Hidrojen Gazı Kullanılarak Yapılan İndirgeme Metodu.....	35
3.3.	Deney Sonuçlarının İncelenmesi İçin Kullanılan Ölçüm Cihazları.....	37
3.3.1.	Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektrometre (FTIR).....	37
3.3.2.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	38
4.	DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI.....	40
4.1.	FTIR Spektroskopi Sonuçları.....	41
4.1.1.	Hidrazin Kullanılarak Yapılan İndirgeme Metodu ile Hazırlanmış Platin Partiküllerinin FTIR Spektroskopi Sonuçları.....	41
4.1.2.	Hidrojen Gazı Kullanılarak Yapılan İndirgeme Metodu ile Hazırlanmış Platin Partiküllerinin FTIR Spektroskopi Sonuçları.....	45
4.2.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları.....	47
4.2.1.	Hidrazin Kullanılarak Yapılan İndirgeme Metodu ile Hazırlanmış Platin Partiküllerinin SEM Sonuçları.....	47

4.2.2.	Hidrojen Gazı Kullanılarak Yapılan İndirgeme Metodu ile Hazırlanmış Platin Partiküllerinin SEM Sonuçları.....	51
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	54
	KAYNAKLAR.....	56
	ÖZGEÇMİŞ.....	58

## SİMGE LİSTESİ

A	Amper (akım şiddeti)
E <sup>0</sup>	Standart Elektrot Potansiyeli
kW	Kilowatt (güç birimi)
ohm	Direnç
Pt	Platin
Ru	Rutenyum
S	Siemens (iletkenlik birimi)
V	Volt (gerilim, potansiyel)
Pa	Pascal (basınç)

## KISALTMA LİSTESİ

AFC	Alkaline Fuel Cell (Alkalin Yakıt Hücresi)
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell (Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi)
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)
GDT	Gaz Difüzyon Tabakası
IPA	İzopropil Alkol
LPG	Likit Petrol Gazları
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (Eriyik Karbonatlı Yakıt Hücresi)
MEA	Membran Elektrot Assemblisi
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell (Fosforik Asit Yakıt Hücresi)
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi)
PTFE	Polimerize Edilmiş Tetrafloraetilen (Teflon)
SEM	Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (Katı Oksit Yakıt Hücresi)
Vulcan XC-72	Karbon Siyahı

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1.	Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi.....	4
Şekil 2.2.	Gemini’de kullanılan proton değişim membran yakıt hücresi.....	5
Şekil 2.3.	Yakıt hücresi bileşimi.....	8
Şekil 2.4.	Yakıt hücresi türleri.....	10
Şekil 2.5.	Alkali yakıt hücresinin şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.6.	Fosforik asit yakıt hücresinin şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.7.	Katı oksitli yakıt hücresinin şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.8.	Proton değişim membranlı yakıt hücresinin şematik gösterimi.....	15
Şekil 2.9.	Eriyik karbonatlı yakıt hücresinin şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.10.	Doğrudan metanol yakıt hücresinin şematik gösterimi.....	17
Şekil 2.11.	Dupont firması Nafion’un kimyasal yapısı.....	19
Şekil 2.12.	Nafion membranın ticari hali.....	19
Şekil 2.13.	Nafion membranın işlenmeye hazır kesilmiş hali.....	19
Şekil 2.14.	Proton değişim membranı üzerinde bulunması muhtemel kirlilikler ve bunların temizlenmesi için kullanılacak kimyasallar.....	20
Şekil 2.15.	Tafel eğrisi.....	23
Şekil 3.1.	Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme metodu.....	34
Şekil 3.2.	Hidrojen gazı kullanılarak yapılan indirgeme metodu.....	36
Şekil 3.3.	Elektromanyetik spektrumda infrared ışınların konumu.....	37
Şekil 3.4.	Bir Fourier dönüşümlü infrared spektroskopi cihazı örneği.....	38
Şekil 3.5.	Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) şematik yapısı.....	39
Şekil 3.6.	Bir taramalı elektron mikroskobu örneği.....	40
Şekil 4.1.	Herhangi bir işlem uygulanmamış $K_2PtCl_6$ platin tuzuna ait FTIR spektrumu.....	42
Şekil 4.2.	Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C’de kurutulan platin partiküllerine ait FTIR spektrumu.....	43
Şekil 4.3.	Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 800 °C’de kurutulan platin partiküllerine ait FTIR spektrumu.....	44
Şekil 4.4.	Hidrojen gazı kullanılarak yapılan indirgeme metoduyla elde edilen platin partiküllerine ait FTIR spektrumu.....	46
Şekil 4.5.	Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü.....	47
Şekil 4.6.	Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C	

	sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü.....	48
Şekil 4.7.	Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü.....	48
Şekil 4.8.	Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 800 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü.....	49
Şekil 4.9.	Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 800 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü.....	50
Şekil 4.10.	Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 800 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü.....	50
Şekil 4.11.	Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 800 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü.....	51
Şekil 4.12.	Hidrojen gazı kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü.....	52
Şekil 4.13.	Hidrojen gazı kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü.....	52
Şekil 4.14.	Hidrojen gazı kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü.....	53

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1.	Yakıt hücrelerinin anot ve katot kısmında meydana gelen reaksiyonlar.....	11
Çizelge 2.2.	Farklı metotlarla hazırlanmış katalizörlerin özellikleri.....	30
Çizelge 3.1.	Deneyde kullanılan kimyasal maddeler ve özellikleri.....	33

## **ÖNSÖZ**

Yüksek lisans çalışmalarım esnasında her zaman yanımda olan ve bana destek veren değerli hocam Prof. Dr. Seyfettin ERTURAN'a ve her zaman manevi desteklerini yanımda hissettiğim aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. En içten sevgi ve saygılarımla...

Tuna EMİR

## ÖZET

Yakıt hücresi, yakıt ve oksitleyicinin kimyasal enerjisini elektrik ve ısı formunda enerjiye çeviren sistemdir. Yakıt hücreleri, emisyonlarının düşük olması, gürültü kirliliğine neden olmamaları ve hareketli parça içermemeleri gibi avantajlara sahiptir. Yakıt hücrelerinde karşılaşılan en büyük sorun katalizörde kullanılan platinin etkin bir şekilde kullanılamamasıdır ve bu durum maliyeti arttırmaktadır. Bu amaç doğrultusunda katalizör yüzeyinde platinin daha iyi dağılması ve daha küçük boyutlu platin eldesi için karbon destek materyaller kullanılmaktadır. Böylece daha fazla elektrik üretimi hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında platinin katalitik etkisini arttırmak amacıyla daha küçük boyutlu ve daha iyi dağılımlı platin partiküllerinin elde edilmesi araştırılmıştır. Bunun için iki indirgeme yöntemi seçilmiştir. Birinci yöntemde hidrazin ile indirgeme yapılmış ve indirgenen partiküller etüvde 100 °C'de ve kül fırınında 800 °C'de olmak üzere iki ayrı şekilde kurutulmuştur. İkinci yöntemde ise hidrojen gazı ile indirgeme yapılmış ve partiküller sadece etüvde 100 °C'de kurutulmuştur. Kurutma sonrasında partiküllerin yapısı, boyut büyüklüğü ve dağılımın incelenmesi için FTIR spektrumları ve SEM mikroskobu görüntüleri alınmıştır. Yapılan analizlerin sonucunda en iyi dağılıma sahip ve en küçük boyutlu platin partiküllerinin hidrojen gazı kullanılarak yapılan indirgeme işlemi ile sentezlendiği anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yakıt hücreleri, proton değişim membranı, karbon destekli platin katalizör.

## **ABSTRACT**

Fuel cell is the system which converts fuel and oxidant's chemical energy to electrical and thermal energy. Fuel cells have advantages such as producing low emissions, not causing the noise pollution and not including moving parts. The biggest problem of the fuel cell is platinum cannot be used efficiently enough as catalyst and this situation increases the cost. For this aim carbon supporting materials are applied to obtain better platinum dispersion on catalyst surface and smaller platinum particles. Thus, more electric production is aimed.

In this study, the synthesis of smaller sized platinum particles and higher dispersion of particles was researched in order to increase the catalytic efficiency of platinum. For this aim, two reduction methods were chosen. In the first method particles were reduced by hydrazine and dried at 100 °C temperature in the drying oven or dried at 800 °C temperature in the ash oven as two different drying ways. In the second method particles were reduced by hydrogen gas and dried at 100 °C temperature in the drying oven. After drying, the FTIR spectrums and SEM photographs of particles were taken in order to analyse the structure, particle size and dispersion level. As a result, after analyses it is appeared that platinum particles which have the best dispersion level and the best particle size were synthesized by reduction method with hydrogen gas.

**Keywords:** Fuel cells, proton exchange membrane, carbon supported platinum catalyst.

## 1. GİRİŞ

Kentleşmenin ve nüfusun her geçen gün arttığı dünyamızda, bu artışa paralel olarak ihtiyaçların artmasının yanı sıra, tüketim alışkanlığı da çeşitlenmektedir. Çeşitlenen bu ihtiyaçları karşılamak amacıyla sanayi alanında da hızlı bir gelişim yaşanmaktadır.

Sanayileşmenin hızlı gelişiminin yanı sıra teknoloji alanında yaşanan gelişmelerin üretim alanına uygulanması sonucunda çok yüksek seviyede üretim kapasitesine sahip makineler ortaya çıkmıştır. İnsanların ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla büyük çapta üretim yapan bu makinelerin kullanımıyla birlikte her geçen gün enerjiye duyulan ihtiyaç artmaktadır. İhtiyaç duyulan enerjinin önemli bir kısmı fosil yakıt olarak tanımlanan kömür, petrol, doğalgaz vb. kaynaklardan sağlanmaktadır.

Ancak enerjiye olan ihtiyacın her geçen gün artmasına karşın fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin sınırlı oluşu, enerji kaynaklarının güvenliğinin sağlanmasındaki zorluklar ve bu kaynakların çevreye verdiği zararlar nedeniyle enerji çeşitlendirmesi yapmak amacıyla yeni enerji kaynaklarına yönelim başlamıştır. Bütün bu sebepleri değerlendiren ülkeler hem enerji kaynaklarının sürekliliğini sağlamak hem de çevre kirliliğini önlemek amacıyla alternatif enerji kaynaklarına yönelmiştir [1].

Dünyada artan enerji ihtiyacını karşılamak için devam eden yeni enerji arayışları içerisinde, yakıt hücreleri temiz enerji üretiminde kullanılan ve gelecekte de yaygın olarak kullanılacağı tahmin edilen en önemli yaklaşımlardan biridir. Yakıt hücresi reaktanların kimyasal enerjisini herhangi bir ara basamak olmadan elektrik enerjisi ve ısıya dönüştüren sistemlerdir (Devrim, 2006).

Yakıt hücreleri, emisyonlarının düşük olması, gürültü kirliliğine neden olmamaları, hareketli parça içermemeleri ve fosil yakıtlardan daha yüksek dönüşüm elde edilebilmeleri gibi avantajlara sahiptir. Yakıt hücreleri gerek yüksek çalışma verimleri ve gerekse direkt olarak oksijenin kullanıldığı yanma reaksiyonuna göre çok daha kontrollü olarak oluşturulan elektrokimyasal reaksiyon nedeniyle kükürdioksit ve azotoksit emisyonlarını sıfıra yakın değerlere düşürürken, karbondioksit emisyonunu da oldukça azaltmaktadır. Yakıt hücresi enerji tesisleri elektrolit türüne bağlı olarak yaklaşık % 40-60 verime sahiptir. Açığa çıkan ısının değerlendirildiği durumlarda ise toplam verim % 80'e kadar arttırılabilmektedir (Magnet, 1968).

Yakıt hücrelerinde karşılaşılan en büyük sorun katalizörde kullanılan platinin etkin bir şekilde kullanılamaması ve maliyeti arttırmasıdır. Bunun için reaksiyona giren platinin yüzey alanının arttırılarak daha fazla katalitik reaksiyon oluşumunun sağlanması ve daha fazla elektrik

üretimini gerçekleşmesi hedeflenmektedir. Bu amaç doğrultusunda katalizörde platinin daha iyi dağılması ve daha küçük boyutlu platin eldesi için karbon destek materyaller kullanılmaktadır.

Saf platin partiküllerinin sentezinde uygulanan ana işlemler; metal kaynağının uygun indirgen maddeyle reaksiyonu, indirgenmiş platin partiküllerinin santrifüj işleminde ayrıştırılması, uygun kimyasallarla partiküllerin temizlenmesi ve etüvde gerekli sıcaklıkta kurutulmasıdır. Partikül boyutuna etki eden faktörler indirgen madde, pH, sıcaklık, partiküllerin içinde bulunduğu çözelti ortamının iyonik etkisi, reaksiyon hızı ve konsantrasyondur. Bu nedenle sentezleme aşamasında partikül boyutuna etki eden bütün parametreler birlikte değerlendirilmelidir. Sentezlemede dikkat edilmesi gereken ikinci konu ise homojen dağılımdır. Sentezlenen platin partiküllerinin topaklaşma oluşturmada homojen dağılım göstermesi gerekir (Beyribey, 2006).

## 2. YAKIT HÜCRELERİ

Yakıt hücreleri, verimli, ekonomik, sessiz ve çevre ile uyumlu enerji üretiminde kullanılan, yakıt gazlarındaki kimyasal enerjiyi; düşük enerjili, minimum hareketli parçalar içeren ve hava kirliliğine sebep olmayan elektrokimyasal bir proseste elektrik enerjisine dönüştüren bir tür pildir (Akınç, 2008).

Yakıt hücreleri anot, katot ve elektrolit membrandan meydana gelmektedirler. Anotta ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar sonucu arada oluşan potansiyel fark sayesinde elektrik enerjisi üretilmektedir (Barbır, 2005).

Yakıt hücrelerinde hidrojen, alkol ve diğer hidrokarbonlar yakıt olarak kullanılmaktadır. Bu yakıtlar bazen doğrudan bazen de bir ara işleyici ile hidrojene çevrilip sisteme gönderilmektedirler. Yakıt, hücrenin anot kısmına, saf oksijen veya kuru hava ise hücrenin katot tarafına beslenmektedir (Çavuşoğlu, 2005).

### 2.1. Yakıt Hücrelerinin Önemi

Yeni bir bin yıla girerken yakıt pilinin dünya çapında araçların kullanımında inanılmaz şekilde artacağı ve enerji için dünya çapında rağbet göreceği tahmin edilmektedir. Enerji stoklarımızı korumak, çevremizi korumak ve yaşam kalitesini düzeltmek üzere dünyanın enerji ihtiyaçları için teknolojiden yeterince yararlanmak gerekmektedir. Arabalar, evler ve enerji santralleri için yeterli çok yönlü bir teknolojiye ihtiyaç vardır. Çevremize verilen zararları tersine döndürmeye yardım edebilecek yeterince temiz bir teknoloji gereklidir. O teknoloji yakıt pilleridir (Akınç, 2008).

Yakıt hücreleri, konvansiyonel güç üretim sistemlerine göre aşağıdaki üstünlüklere sahiptir:

- Çevresel kirlilik oranı düşüktür.
- Enerji üretim verimi oldukça yüksektir.
- Farklı yakıtlarla çalışabilir (Doğalgaz, LPG, Metanol ve Nafta).
- Egzoz ısısı yeniden kazanılabilir.
- Modüler yapıdadır.
- Montaj süresi kısadır.
- Çok yüksek miktarda soğutma suyu (deniz suyu gibi) gerektirmez.
- Güvenilir bir sistemdir.
- İşletim karakteristiği uygulamada kolaylıklar sağlar.

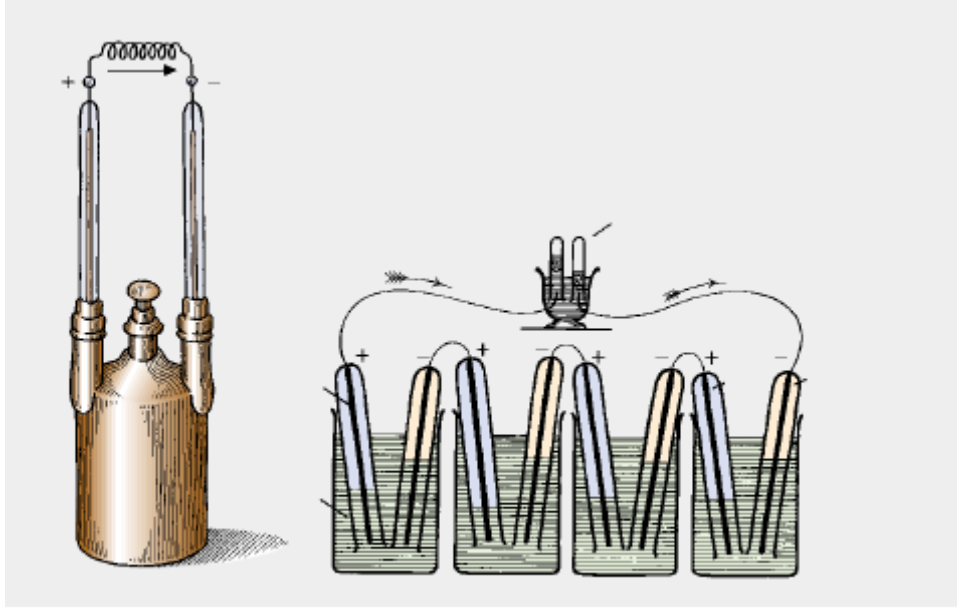
-Geleceğe yönelik olarak gelişme potansiyeli oldukça yüksektir.

-Katı atık ve gürültü problemi yoktur (Akinç, 2008).

## 2.2. Yakıt Hücrelerinin Tarihçesi

Yakıt hücreleri ilk defa 19. yüzyılın sonunda geliştirilmiştir. İlk pratik yakıt hücreleri Apollo uzay programı için 1960'larda yapılmıştır ve günümüzde de uzay programlarında yakıt hücrelerinin kullanımı devam etmektedir.

Yakıt hücrelerinin tarihçesine bakılacak olursa ilk olarak 1839 yılında Sir William Grove seyreltik sülfürik asit çözeltisine daldırılmış iki platin elektrotdan oluşmuş bir sistemde hidrojen ve oksijen üretmeyi başarmıştır. Daha sonraki yıllarda Grove, önceki çalışmasında kullandığı sistemden elli tanesini birleştirerek oluşturduğu bir sistemde daha fazla elektrik akımı üretmiştir (Devrim, 2006).



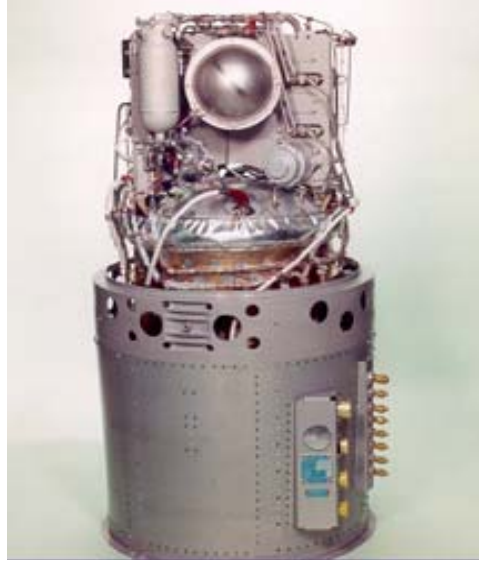
Grove's historic fuel cell (1839)

Şekil 2.1. Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi (Devrim, 2006)

Yakıt hücresi terimi ilk olarak 1889'da Ludwing Mond ve Charles Langer tarafından Grove'un çalışmaları tekrarlanarak ortaya konmuştur. Mond ve Longer oksijen kaynağı olarak havayı, hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazını kullanarak 1,5 watt güç üreten ve %50 çalışma verimine sahip bir yakıt hücresi geliştirmişlerdir.

1894'de Wilham Oswald kömür türevli yakıtlar ile çalışan bir elektrokimyasal hücre yapmıştır. 1932'de Francis T. Bacon ilk başarılı yakıt hücresinin geliştirmiştir. Bacon düşük korozif özelliğe sahip, alkalın elektrolit ile pahalı olmayan nikel elektrotlar kullanarak daha

önce yapılan çalışmalardan daha yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkmıştır. 1952’de Bacon ve arkadaşları 5 kW’lık güç üreten bir yakıt hücresi yapmışlardır. Aynı yılın sonlarında Harry Karl Ihring 20 beygir gücünde bir yakıt hücresiyle çalışan bir traktör tasarlamıştır. Bu buluş günümüzdeki modern yakıt hücresiyle çalışan makinelerin başlangıcı olmuştur.



Şekil 2.2. Gemini’de kullanılan proton değişim membran yakıt hücresi (Gottesfeld ve Zawodzinski, 1997; Scott ve Hafele, 1990)

1960’lı yıllara gelindiğinde, NASA yakıt hücresi teknolojisine oldukça ciddi yatırımlar yapmaya başlamıştır. Yakıt hücreleri hafif olmaları ve yan ürün olarak su üretmelerinden dolayı uzay uygulamaları için düşünülmüştür. Uzay çalışmalarında yakıt hücrelerinin kullanılması; yüksek verim, düşük gürültü ve titreme, yüksek enerji yoğunluğu gibi avantajlar sağlamaktadır. İlk olarak Gemini uzay aracında General Elektrik tarafından üretilen PEM yakıt hücresi (Şekil 2.2) kullanılmıştır (Gottesfeld ve Zawodzinski, 1997; Scott ve Hafele, 1990).

1970’li yıllarda General Motor “Elektrovan” adlı yakıt hücresiyle çalışan bir araç geliştirmiştir. 1970’li yıllarda devlet destekli yakıt hücresi araştırmaları başlamış ve bu amaçla Los Alamos Ulusal Laboratuvarı ve Brookhaven Ulusal Laboratuvarları kurulmuştur.

1973 yılında Amerika’daki petrol ambargosu arazi uygulamalarında, yakıt hücrelerinin güç kaynağı olarak kullanılmasının düşünülmeye sebep olmuştur. Yüksek verimlilikleri, kullanım kolaylıkları ve sağlamlılıkları Amerika’da petrole alternatif olarak yakıt hücrelerinin kullanılmasını gündeme getirmiştir. Buna ek olarak yakıt hücrelerinin yararları düşünüldüğünde de geleneksel fosil yakıtlarla çalışan fabrikalarda da yakıt hücrelerinin kullanılması gündeme gelmiştir. Pek çok Amerikan firması büyük ölçekte enerji üretiminde

yakıt hücrelerinin kullanılmasıyla ilgili çalışmalar başlatmıştır. Yakıt hücreleri günümüzde hala büyük ölçüde güç üretiminin yerini alamasa da, ufak üretimlerde ve araçlarda kullanılabilirler (Devrim, 2006).

### **2.3. Yakıt Hücrelerinin Kullanım Alanları**

- Uzay Çalışmaları/Askeri Uygulamalar
- Evsel Uygulamalar
- Taşınabilir Güç Kaynağı Uygulamaları
- Atık/Atık Su Uygulamaları
- Taşıt Uygulamaları

#### **2.3.1. Uzay Çalışmaları/Askeri Uygulamalar**

Yakıt hücrelerinin ilk uygulanma alanı, uzay çalışmalarıdır. ABD’de NASA’nın çalışmaları kapsamında Apollo, Gemini, ve Space Shuttle uzay gemilerinde H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> yakıt hücresi birbirine bağlı 3 ünite olarak kullanılmıştır.

Stratejik bir önemi olan enerji kaynakları, ülkelerin politikalarında önemli bir yer tutmaktadır. Yakıt çeşitliliği ve veriminden dolayı, askeri amaçla kullanılacak en iyi yakıtlardan biri yakıt hücresidir. Gerek askeri araçlarda, gerek ısı ve elektrik ihtiyacı durumunda kolay kullanımıyla askeri yönden yakıt pilleri iyi bir alternatiftir (Hoogers, 2002).

#### **2.3.2. Evsel Uygulamalar**

Sessiz çalışan yakıt hücreleri, evlerde veya apartmanlarda ısıtma ve elektrik ihtiyacını sağlamak için kullanılacak bir alternatiftir. Bu tipte kullanılacak yakıt hücreleri, propan ve doğal gazdan üretimi sağlayarak elektrik üretmekte ve oluşan ısı geri kazanılarak ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır (Hoogers, 2002).

#### **2.3.3. Taşınabilir Güç Kaynağı Uygulamaları**

Telekomünikasyon, bilgisayar, görüntü teknolojileri, alarm sistemlerinde yakıt hücresi uygulamaları söz konusudur. Bu tip uygulamalar üzerinde çalışmalar sürmektedir. Minyatür yakıt hücreleri pazara çıktıkları zaman, cep telefonu sahipleri cep telefonlarını uzun süre şarj etmeden kullanabileceklerdir. Bu tip yakıt hücreleri metanol ile çalışabilen, çok küçük boyutta üretilen hücrelerdir (Hoogers, 2002).

### 2.3.4. Atık/Atık Su Uygulamaları

Atık su ve atıkların işlenmesi sırasında yanma reaksiyonları sonucunda oluşan emisyonları azaltmak ve oluşan metan gazından güç elde etmek için yakıt hücreleri kullanılmaktadır (Hoogers, 2002).

### 2.3.5. Taşıt Uygulamaları

Elektrikli taşıtlar 2000'li yılların yeni-temiz alternatif uygulamaları arasında ön sırada yer almaktadır. Elektrikli taşıtlar:

- Enerjiyi doğrudan hattan alarak (tren, trolleybüs, tramvay, metro gibi)
- Enerjiyi depolanmış bir sistemden kullanarak (akülü taşıtlar, ultra kapasitörlü taşıtlar)
- Taşınabilir bir sistemden anında enerji üreterek (yakıt hücreli taşıtlar, güneş pilli-fotovoltaik pilli taşıtlar)
- Hibrit elektrikli taşıtlar (benzin-yakıt hücresi, motorin-yakıt hücresi taşıtları) şeklinde uygulamadır.

Bu uygulamalar içinde yakıt hücreli elektrikli taşıtlar pek çok avantaj ile öndedir ve geleceğin otomotiv teknolojisi içinde hidrojen kullanan yakıt hücreli elektrikli taşıt uygulaması çok büyük alan kaplayacaktır (Hoogers, 2002).

### 2.4. Yakıt Hücrelerinin Çalışma Prensibi ve Avantajları

Yakıt hücresinde, yakıtlardaki kimyasal enerji, düşük enerjili minimum hareket içeren ve hava kirliliğine sebep olmayan elektrokimyasal bir proseste elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülür. Yakıt hücresi, yakıt (direkt kullanımda; hidrojen, dolaylı kullanımda ise; doğalgaz, LPG, metanol vb.) ve oksitleyicinin (hava veya oksijen) kimyasal enerjisini doğrudan elektrik ve ısı formunda enerjiye çeviren güç üretim cihazlarıdır (Blomen ve Mugerwa, 1993).

Yakıt hücrelerinde saf hidrojen gazı kullanılabileceği gibi çeşitli hidrokarbonlar içeren yakıtlar da kullanılabilir. Ancak hidrojen ve hidrokarbon yakıtların kullanımları arasında farklılıklar bulunmaktadır. Hidrokarbonların yakıt olarak kullanılması durumunda dönüşüm için çok büyük katalizör yüzeyi gerekmektedir, ayrıca yüksek sıcaklık gerektiren oksidasyon problemleri ortaya çıkmaktadır. Hidrokarbon içeren yakıtlar, yakıt hücresine beslenmeden önce bir dönüştürücü yardımıyla hidrojene dönüştürülürler. Bu nedenle de hidrokarbon yakıt kullanılan yakıt hücrelerinin verimi direkt hidrojen kullanılan yakıt hücrelerine göre daha düşüktür (Stobart, 2004).

Temel olarak bir yakıt hücresi; anot, katot ve elektrolit kısımlarından oluşmaktadır. Sistemde;  $H_2$  anotta yükseltgenerek elektron ve protonlarına ayrılır. Ayrılan elektronlar, bir dış devre üzerinden katoda doğru ilerlerken, protonlar elektrolit üzerinden katoda doğru hareket eder. Katotta, anottan gelen elektronlar ve katoda beslenen  $O_2$  reaksiyona girer ve devre tamamlanır. Böylelikle dış devreden dolaşan elektronların bulunduğu akım kolunda elektrik akımı oluşur.

Yakıt hücre sistemlerinde kullanılan anot ve katotlar gazlara karşı geçirgendir ve elektriği iyi iletirler bunun yanında elektrolit gazlara karşı yalıtkan olmalı ve protonu geçirmelidir. Hücre uygun bir yakıt ve yükseltgeyici ile beslendiği sürece elektrik gücü elde edilebilir. 1 volt civarındaki bir elektrik voltajı akımı başlatır, daha yüksek voltajlar birkaç hücrenin seri bağlanmasıyla elde edilebilir. Yakıt hücresinde tek bir hücre gerilimi 1 volttan daha az olduğundan, gerekli elektrik enerjisini üretmek için birden fazla yakıt hücresini seri bağlanarak kullanılmaktadır. Sandviç şeklindeki bu yakıt hücresi grubuna "Yakıt hücresi bileşimi" adı verilmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Yakıt hücresi bileşimi (Hoogers, 2002)

Yakıt hücre sistemleri geleneksel yanma temelli teknolojilere ve pillere göre alternatif bir güç kaynağıdır. Birçok pazarda, çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Yakıt hücreleri içten yanmalı motorlardan ve şarj edilebilen bataryalardan farklı olarak güç üretir. Yakıt hücreleri temiz, sessiz ve verimli elektrokimyasal aygıtlardır (Hoogers, 2002).

Yakıt desteği olduğu sürece kesintisiz olarak çalışabilirler. Yakıt hücrelerinin hareketli parçaları yoktur, bu yüzden yüksek güvenilirliğe ve uzun işletme ömrüne sahiptirler. Yakıt hücre sistemleri çoklu yakıtle (doğalgaz, metanol, petrol, hidrojen vb.) kullanılabilirler ve bir içten yanmalı motor gibi kolaylıkla yakıtle doldurulabilirler. Yüksek yakıt verimliliği ile düşük emisyon veya sıfır emisyonu bir arada sunarlar. Kurulumu ve çalıştırılması kolay,

sessiz çalışan, düşük titreşimli özelliklere sahiptir. Bu avantajlar yakıt hücrelerinin güç üretim kaynakları arasında temiz, verimli ve bundan dolayı alternatif olmasını sağlar. Yakıt hücre çeşitli geleneksel teknolojiler ile karşılaştırılacak olursa;

**Şarj edilebilen Bataryalar:** Bataryalar enerji depolama aygıtlarıdır ve kesintili olarak güç üretirler. Doldurma işleminin uzun, zahmetli ve kirliliği artırıcı etkisinin yanında, verimleri düşüktür. Yakıt hücreleri elektrokimyasal, yüksek verimliliğe sahip, sessiz çalışan ve yanma sonucu oluşan hiçbir emisyon meydana getirmeyen aygıtlardır. Bir batarya, enerjisini elektrotlarında depolar. Elektrik, elektrotların tüketilmesi ile açığa çıkar. Buna karşın yakıt hücreleri harici bir depodaki yakıtı kullanarak elektrik üretirler. Yakıt hücreleri yakıt desteği sağlandıkça sürekli olarak çalışabilirler ve depoları kısa sürede doldurulabilir.

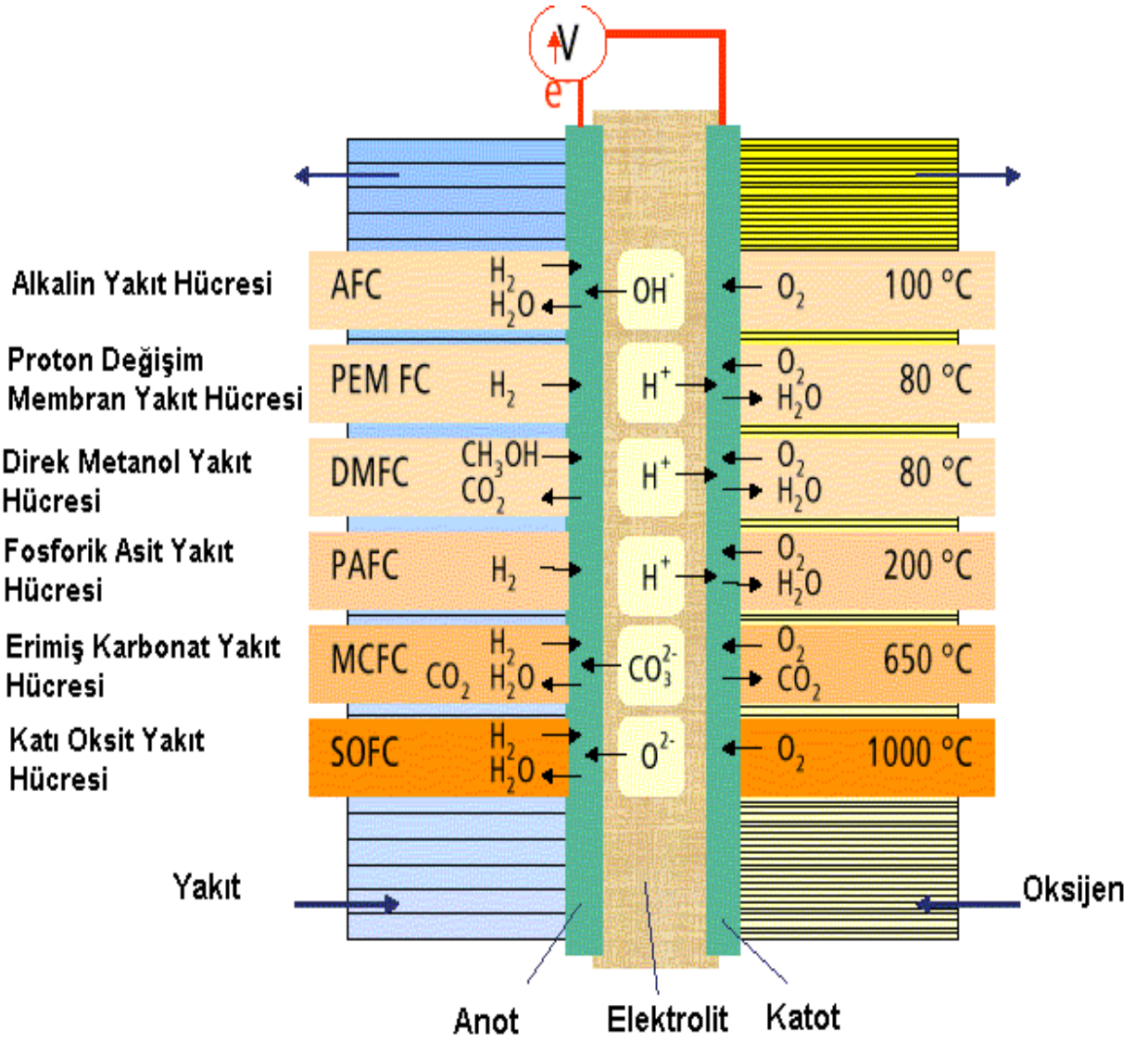
**İçten Yanmalı Motorlar:** İçten yanmalı motorlarda yüksek sıcaklıkta meydana gelen yanma işlemi düşük verimliliktedir ve zararlı emisyonlar, gürültü ve titreşim problemlerini de beraberinde getirir. İçten yanmalı motorlar ısı meydana getirmek için yakıtı yakar. Oluşan ısı mekanik enerjiye ve daha sonra bir güce (jeneratörü döndürecek elektrik gücü) çevrilir.

Bu dönüşümün verimi, kayıp ısı ve sürtünmelerden oldukça etkilenir. Buna karşın yakıt hücreleri yakıtı verimli olarak direkt elektrik enerjisine çevirirler. Yakıt hücrelerinin içten yanmalı motorlara göre iki kat daha verimli olduğu, yakıttan efektif güç elde etmenin daha yüksek olduğu söylenebilir. Bir içten yanmalı motor gibi, yakıt hücreleri rahatlıkla yakıtı depodan kullanabilir ve yakıt desteği olduğu sürece çalışabilir. Yakıt hücreleri yakıtı yakmadığından dolayı içten yanmalı motorlarda yanma sonucu meydana gelen zararlı emisyonları meydana getirmez (Devrim, 2006).

## **2.5. Yakıt Hücresi Çeşitleri**

Yakıt hücre sistemleri, kullanılan elektrolite göre sınıflandırılırlar. Günümüzde bilinen 6 çeşit yakıt hücresi bulunmaktadır (Şekil 2.4). Bunlar;

1. Alkalin yakıt hücreleri,
2. Erimiş karbonat yakıt hücreleri,
3. Fosforik asit yakıt hücreleri,
4. Katı oksit yakıt hücreleri,
5. Direk metanol yakıt hücreleri,
6. Proton değişim membran yakıt hücreleri olarak sıralanabilir (Devrim, 2006).



Şekil 2.4. Yakıt hücresi türleri (Devrim, 2006)

Çizelge 2.1. Yakıt hücrelerinin anot ve katot kısmında meydana gelen reaksiyonlar (Oğuz, 2006)

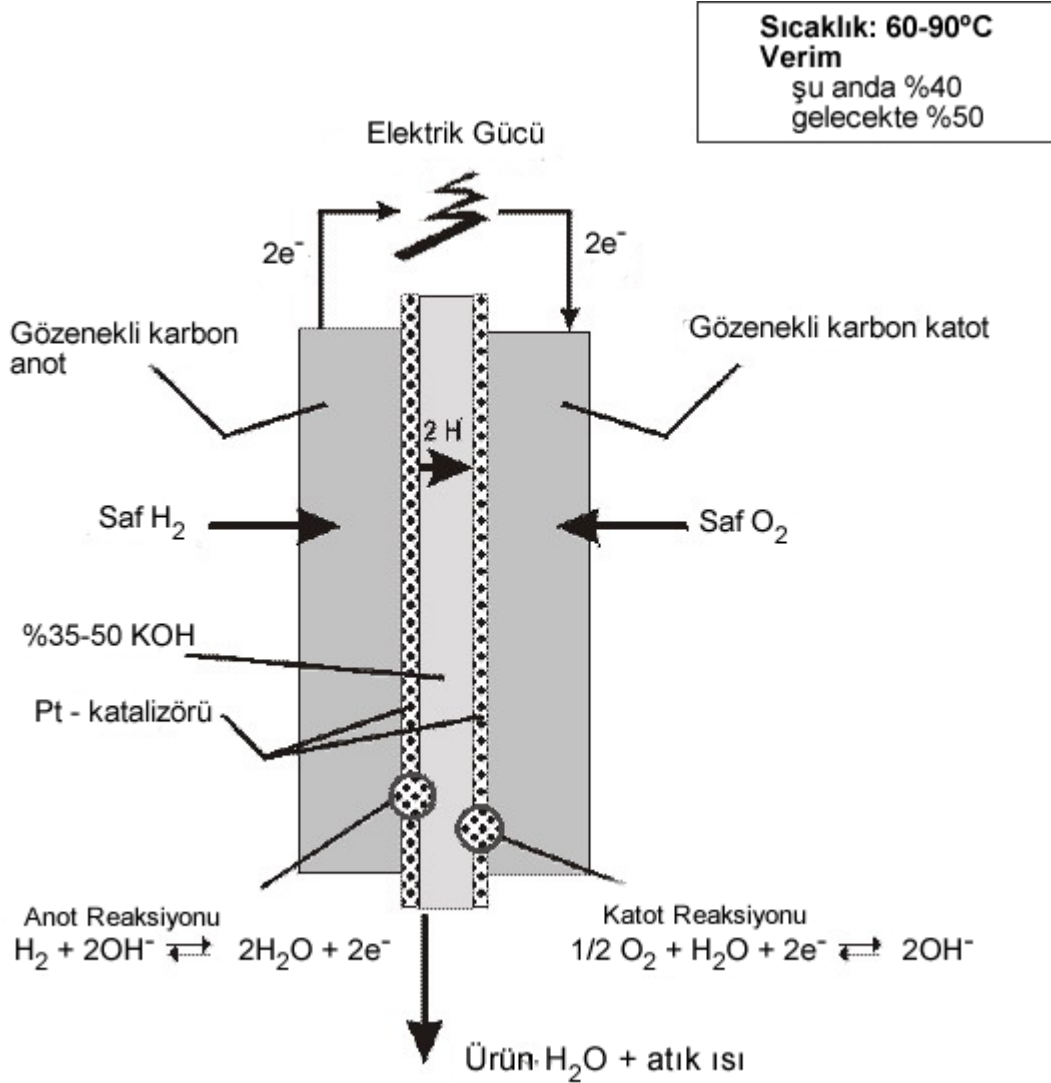
Yakıt Hücresi Türü	Anot tepkimesi	Katot tepkimesi	Tam tepkime
Alkali Yakıt Hücresi (AFC)	$\text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}(\text{aq}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + \text{H}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-(\text{aq})$	$\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC)	$\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi (DMFC)	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{CH}_3\text{OH} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC)	$\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi (MCFC)	$\text{H}_2(\text{g}) + \text{CO}_3^{-2} \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{-2}$	$\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$
Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC)	$\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$	$\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$

### 2.5.1. Alkali Yakıt Hücresi (AFC)

Bu yakıt hücresinde elektrolit olarak KOH kullanılır. Alkali elektrolitlerde oksijen indirgeme kinetiği asit elektrolitlerden daha hızlıdır ve soy metal olmayan elektro katalizörlerin kullanılabilmesi AFC'yi ekonomik yapmaktadır. Ancak elektrolitin CO<sub>2</sub> gibi asidik safsızlıkların ortamda bulunmasına izin vermemesi, emisyon oranından dolayı sorun yaratır. Alkali sistemler oda sıcaklığında çok iyi çalışır ve diğer tüm yakıt sistemleri arasında en

yüksek voltaj verimine sahiptirler. Ayrıca birçok malzeme ile iyi uyum sağlayabildiğinden AFC'ler uzun işletim ömrüne sahiptir.

AFC'ler güvenilir sistemlerdir ve küçük hacimde nispeten yüksek güçler elde edebilmektedirler. Güç yoğunlukları 100-200 mW/cm<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Maliyetler ise ulaştırma sektörü için 50-100 \$/kW değerlerine ulaştırılmaya çalışılmaktadır (Hoogers, 2002).



Şekil 2.5. Alkali yakıt hücresinin şematik gösterimi (Hoogers, 2002)

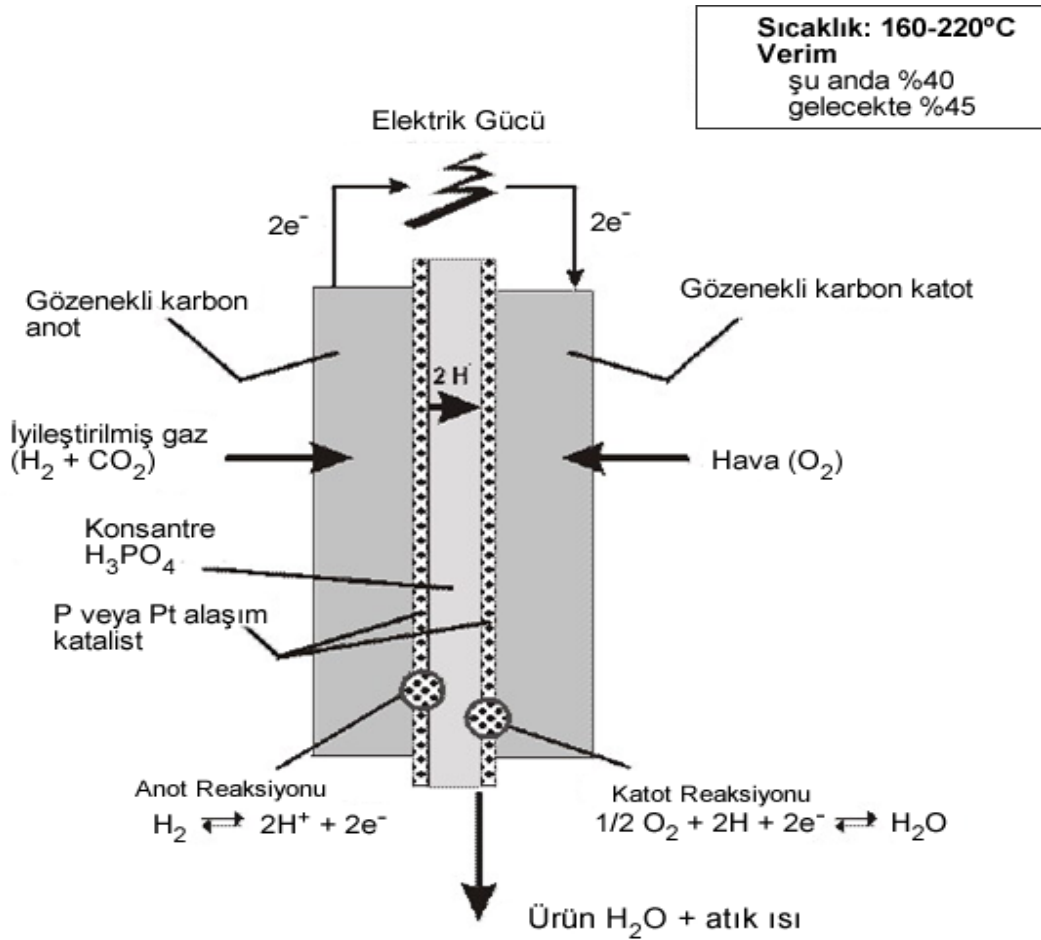
### 2.5.2. Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC)

Elektrolitik olarak fosforik asidin kullanıldığı bu yakıt pilinde bağlı olarak temiz yakıtlar (doğalgaz, LPG gibi) veya gazlaştırıcıdan alınan temizlenmiş kömür gazı kullanılır. Pazara en yakın iki uygulama üzerinde durulmaktadır. Bunlar güç santralleri ve kojenerasyon üniteleridir. PAFC'inde soy metal elektro katalizör kullanmak gerekmektedir. Bu dezavantajına rağmen fosforik asit bir elektrolit olarak mükemmel ısıl, kimyasal ve

elektrokimyasal kararlılık gibi avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca PAFC'ler atık ısıdan yararlanabilme açısından çok avantajlıdır.

PAFC sistemleri yeryüzündeki uygulamalarda en çok gelişme gösteren sistemlerdir. Çoğunlukla apartmanlar, alışveriş merkezleri gibi yerlerde elektrik üretmek amacıyla kullanılmaktadırlar. PAFC'ler 250 W'dan 200 kW'a kadar, 24 V'luk elektrik jeneratörü şeklinde ticari olarak piyasaya sunulma aşamasındadır. Yakıt olarak doğalgaz kullanan 200 kW'lık bir PAFC sisteminde yatırım maliyeti 287 \$/kW'dır.

PAFC'ler sabit bir çıkış seviyesinde en iyi verimde çalışabilmektedirler. Hibrit bir sistem ile ivmelenmenin gerektirdiği yüksek güç gereksiniminin başka araçlarla karşılanması durumunda daha iyi performans göstermektedir. PAFC'lerin en güzel uygulamaları ağır yük taşıtları ya da lokomotiflerde olacaktır (Hoogers, 2002).

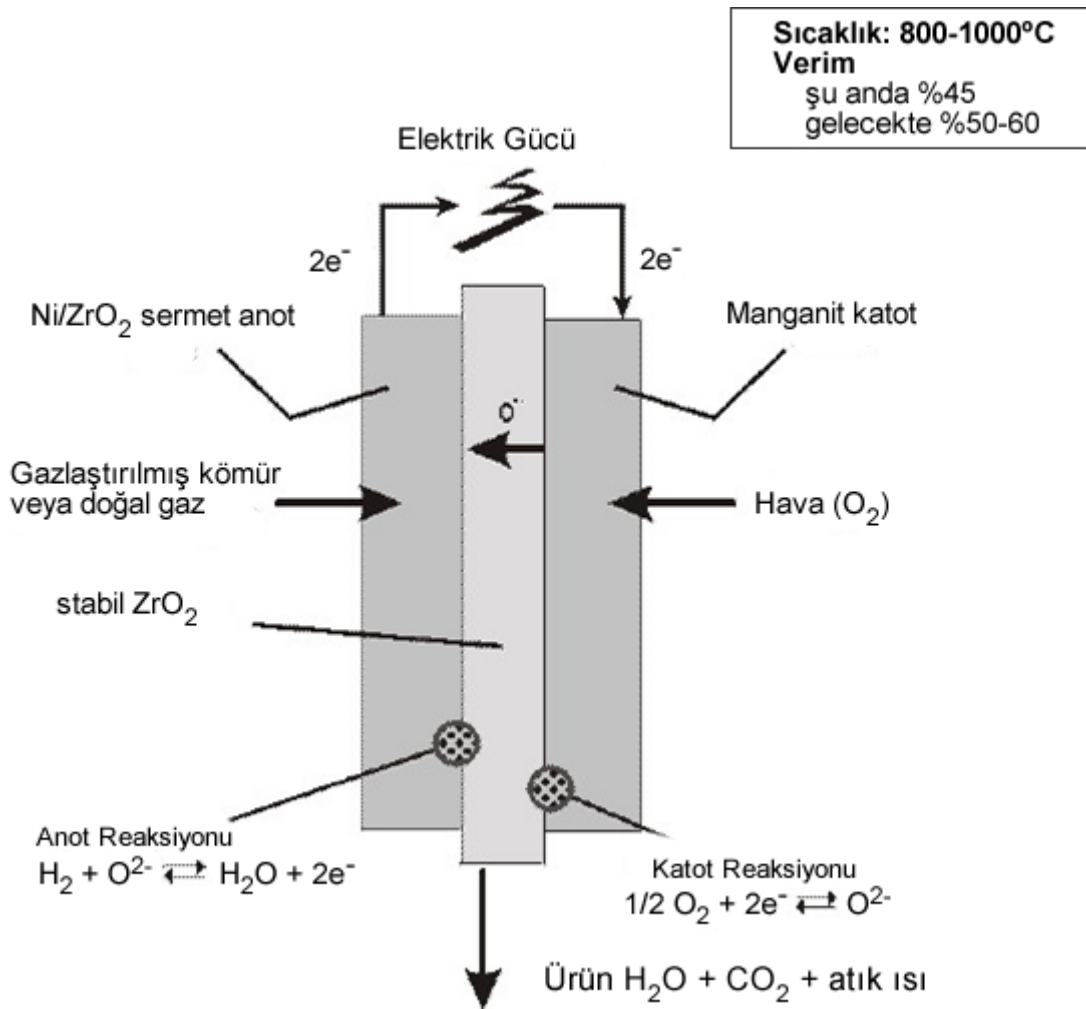


Şekil 2.6. Fosforik asit yakıt hücresinin şematik gösterimi (Hoogers, 2002)

### 2.5.3. Katı Oksitli Yakıt Hücresi (SOFC)

SOFC'ler katı haldeki yakıt pilleridir. Hücre malzemelerinin çoğu özel seramik ve nikelden oluşmaktadır. Çalışma sıcaklığı 1000 °C civarındadır. Yakıt olarak CO ile birleşmiş halde hidrojen kullanılmaktadır ve reaksiyon ürünü olarak da su buharı ve CO<sub>2</sub> çıkmaktadır.

SOFC'ler kojenerasyon ünitesi olarak hem elektrik hem de ısının kullanılabilceği yerlerdir. Böylece toplam sistem verimi %50-55 mertebesine ulaşabilmektedir. Şu anda hesaplanan yatırım maliyetleri 1500 \$/kW mertebesindedir (Hoogers, 2002).



Şekil 2.7. Katı oksitli yakıt hücresinin şematik gösterimi (Hoogers, 2002)

### 2.5.4. Proton Değişim Membran Yakıt Hücresi (PEMFC)

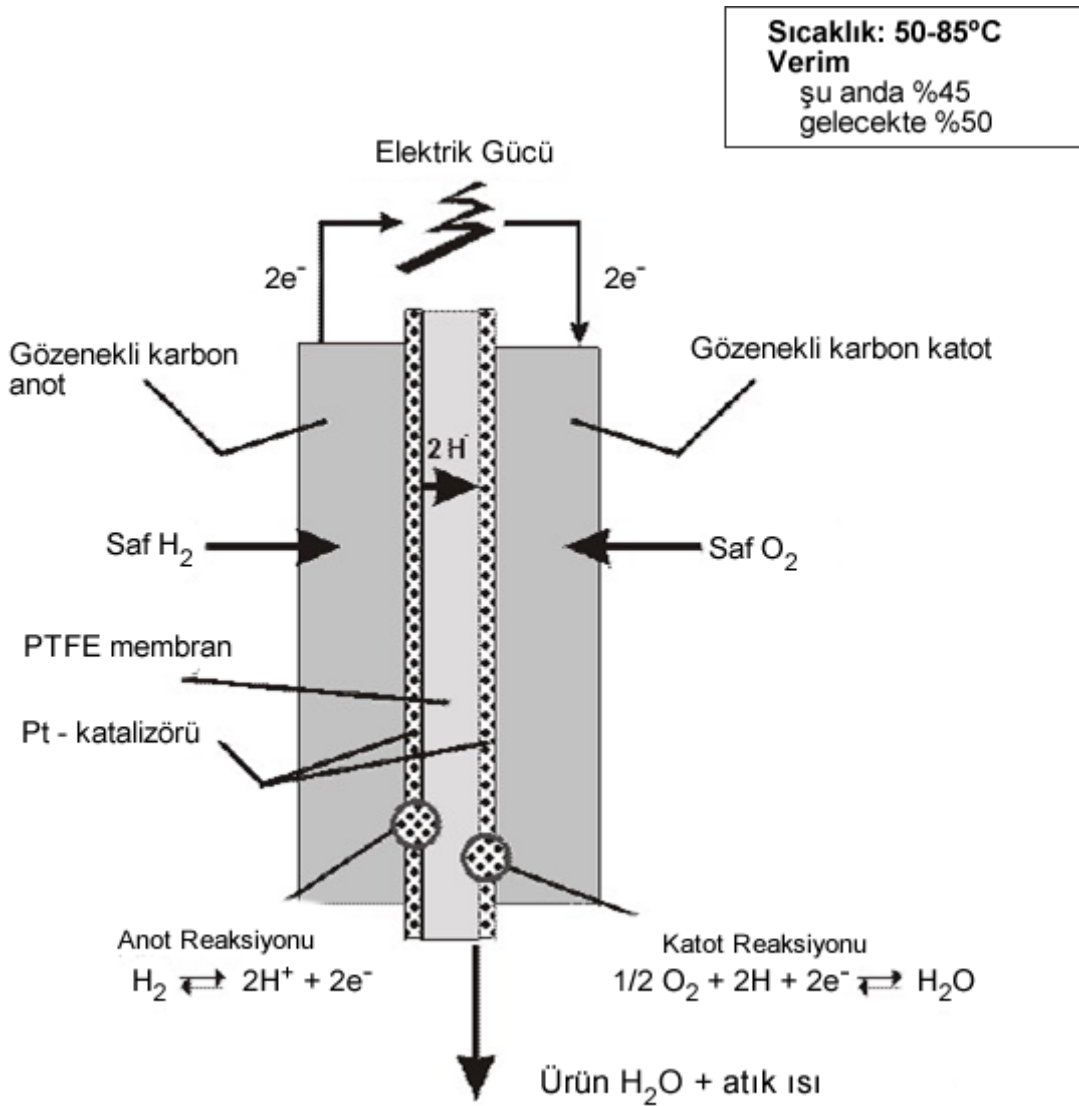
PEMFC'ler 1960'ların başında General Electric tarafından icat edilmiştir. Katı polimer elektrolitli yakıt hücresi olarak da adlandırılır. Bu tip yakıt hücrelerinde proton (hidrojen iyonu) geçirebilen membranlar kullanılmaktadır.

PEM yakıt hücresi, platin ile kaplanmış iki elektrotun arasına preslenmiş proton ileten bir membrandan oluşur. Buradaki membran anottan katoda doğru hidrojen iyonlarının

taşınmasını sağlar. Bipolar tabaklar üzerinde bulunan gaz difüzyon kanalcıkları mevcuttur. Bu kanallar elektrik akımını toplama görevini de üstlenir. PEM'lerin çalışma sıcaklığı 80 - 90 °C gibi çok düşük sıcaklıklarda ve çalışma basınçları da 100000-800000 Pa basınç arasındadır. Bu tip yakıt hücreleri belli bir nem oranında hidrojen ve oksijen ile çalışabilmektedir.

PEM'ler 350 mW/cm<sup>2</sup> gibi yüksek bir güç yoğunluğuna sahiptir ve şu anda ticari olarak 100-500 W güç aralığında elde edilebilir durumdadırlar. Yatırım maliyetleri de 5000 - 13000 \$ arasında değişmektedir. Membran ve katalizör maliyetlerindeki düşüş ile ve seri üretime geçilmesi durumunda bu maliyetler 10-20 kat aşağıya inebilecektir.

Yüksek güç yoğunluğu, hızlı ve çabuk marş yapabilme ve değişken güç çıkışına uygun olması PEM'lerin ulaşım alanında kullanılabilmesini uygun kılmaktadır (Hoogers, 2002).



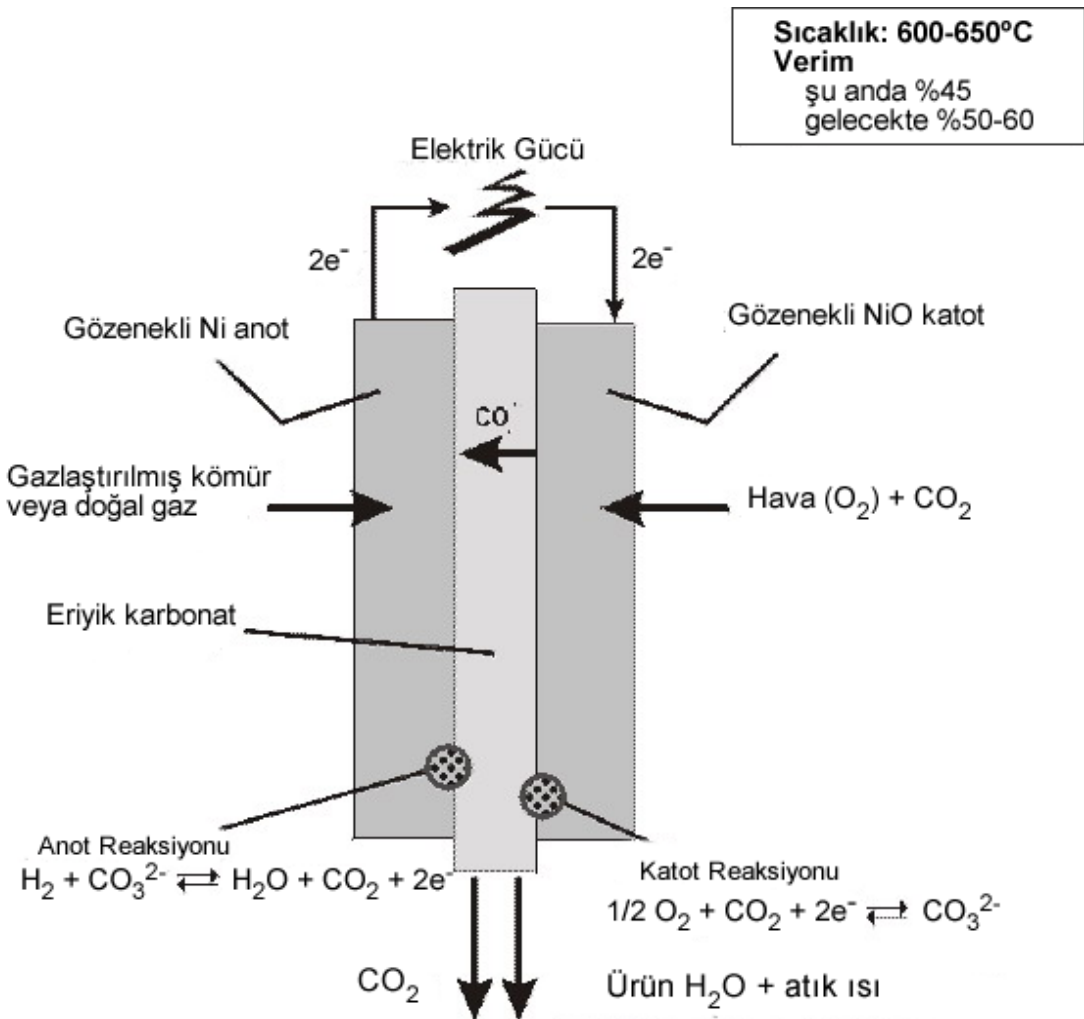
Şekil 2.8. Proton değişim membranlı yakıt hücresinin şematik gösterimi (Hoogers, 2002)

Yakıt hücresi çalışma mekanizması suyun elektrolizinin tam tersidir. Anot ve katot reaksiyonları sonucunda elektrik, su ve bir miktar ısı açığa çıkar. Açığa çıkan bu ısı miktarı evsel veya herhangi bir uygulama için kullanılarak yakıt hücresinden elde edilen toplam verim artırılabilir (Hoogers, 2002).

### 2.5.5. Eriyik Karbonatlı Yakıt Hücresi (MCFC)

MCFC'ler 600-650 °C sıcaklıkta çalışır ve son dönemlerde geliştirilen ikinci jenerasyon yakıt pillerindedir. Anotta CO<sub>2</sub>'ce zengin gaz ürün ve H<sub>2</sub>O üretimi sağlanır, CO<sub>2</sub> katota giren hava ile karıştırılmak üzere gönderilir.

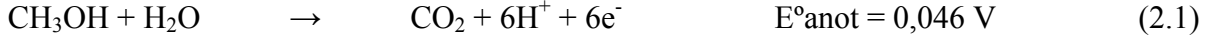
MCFC işletim sıcaklığı yüksek olması nedeniyle değerli atık ısı, proses ısı ve kojenerasyon amaçlı olarak kullanılabilir. En önemli avantajları hücre içindeki kendi atık ısı desülfürizasyondan geçmiş metanın anot odasında hidrojene dönüştürülmesi için doğrudan kullanılabilir. MCFC'ler için hedeflenen yatırım maliyeti 1000 \$/kW seviyesindedir (Hoogers, 2002).



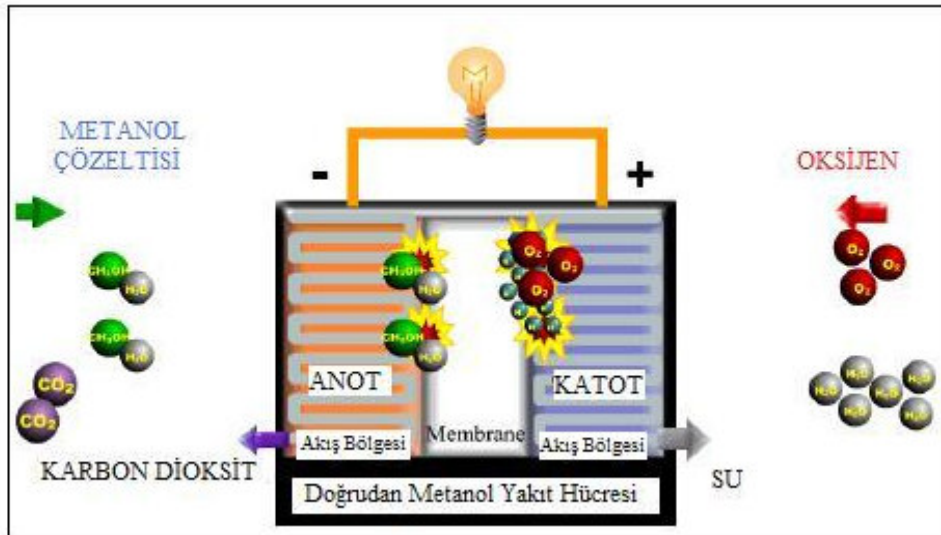
Şekil 2.9. Eriyik karbonatlı yakıt hücresinin şematik gösterimi (Hoogers, 2002)

### 2.5.6. Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi (DMFC)

Metanolün atmosferik koşullarda sıvı olması ve yüksek hacimsel enerji yoğunluğu ile yakıt pillerinin kullanım alanlarının artmasına katkı sağlamaktadır. Metanol kolaylıkla ulaşılabilen, düşük maliyetli sıvı bir yakıt olup benzine çok yakın bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Burada metanol direkt yakıt olarak kullanılmaktadır.



Doğrudan metanol yakıt hücrelerinde anot kısmına beslenen metanol,  $\text{CO}_2$  ve  $6\text{H}^+$  iyonuna okside olmaktadır. Oluşan protonlar, oksijen veya kuru hava ile reaksiyona girmek üzere polimer elektrolit membran üzerinden geçerek katot kısmına ulaşırlar. Anotta üretilen elektronlar, katot kısmında proton ve oksijen ile birleşerek su oluşturmak üzere reaksiyona girerler ve böylece kimyasal reaksiyonun serbest enerjisini oluştururlar. Yani elektronlar dış devre üzerinden akarak güç üretmek üzere kullanılırlar. Teorik olarak bulunan hücre potansiyeli 1,18 V'dur (Hoogers, 2002).



Şekil 2.10. Doğrudan metanol yakıt hücresinin şematik gösterimi (Fırtına, 2008)

### 2.6. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin Ana Bileşenleri

Yakıt hücresi 3 ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar bir araya gelerek membran elektrot assemblisini (MEA) oluştururlar:

1. Polimer elektrolit membran
2. Katalizör tabakaları
3. Gaz difüzyon tabakaları (GDT)

### **2.6.1. Polimer Elektrolit Membran**

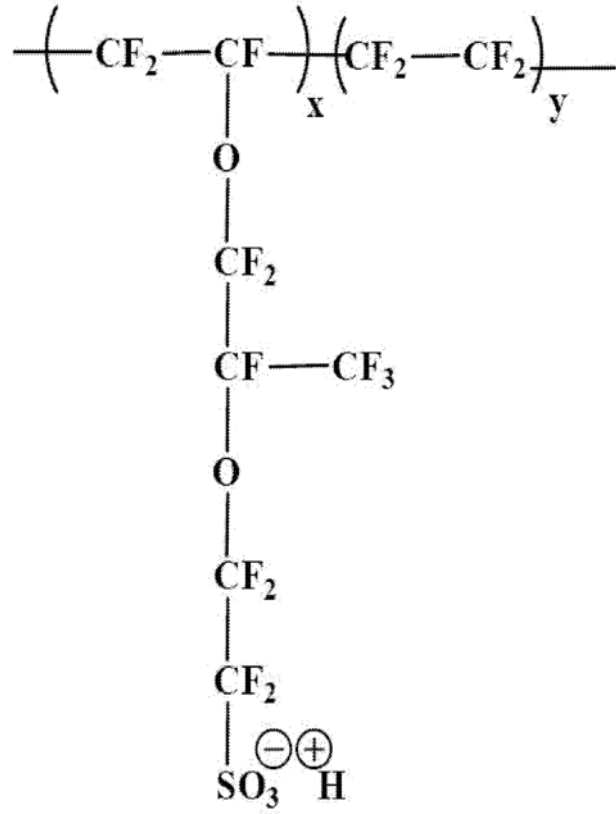
Proton iletkenliğine sahip membran, MEA'nın ana komponentidir. Kullanılan membranın en önemli fonksiyonallikleri ise şunlardır:

- Proton iletkenliğini sağlaması
- Yakıt geçişine izin vermemesi
- Mekanik ve ısı dayanıma sahip olması

Yapıda kullanılan membran proton ileticisi olarak görev almaktadır. Burada en dikkat edilmesi gereken husus ise membranın gereken proton iletkenliğini sağlayabilmesi için yeterince nem içeriğine sahip olmasıdır. Sonuç olarak, anottan katoda ek bir su akımı gerçekleşir. Bu durum elektroosmotik kuvvet vasıtasıyla protonların göçü neticesinde olmaktadır. Membran anot arayüzünde su miktarında gerçekleşen azalmaya karşın gereken nem ise ön nemlendirilmiş reaktanlar tarafından sağlanmaktadır.

Membran sülfonik asit grubu içeren perfloro polimer bileşiminde bir yapıdır. Yapısı gereği protonların üzerinden geçmesine imkan tanımaktadır. Doğrudan metanol yakıt hücrelerinde en yaygın olarak kullanılan membranlar Dupont firması tarafından üretilen, nafion tipi membranlardır.

Nafionun optimum iletkenliğini sağlamak için, membranlar su içeriyor olmalıdır. Metanol ve su kimyasal olarak benzerdir. Doğrudan metanol yakıt hücrelerinde membranlar aynı zamanda metanol ile temas halindedirler. Bir de metanol membran üzerinden katoda geçerek hava kısmında da yer almaktadır. Ancak anot kısmından katot kısmına geçen metanol yakıt hücresi performansında düşüğe yani karışık (mixed) potansiyele yol açmaktadır [2].



Şekil 2.11. Dupont firması Nafion'un kimyasal yapısı (Devrim, 2006)



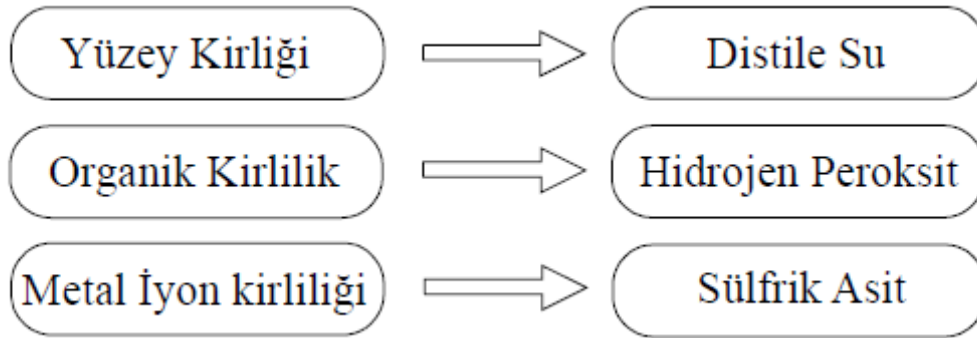
Şekil 2.12. Nafion membranının ticari hali (Bilaloğlu, 2006)



Şekil 2.13. Nafion membranının işlenmeye hazır kesilmiş hali (Bilaloğlu, 2006)

Nafion yüksek oranda kimyasal inertlik sağlayan PTFE iskelet yapısına sahiptir (polimerize edilmiş tetrafloraetilen olup ticari adı teflondur). Yan zincirler ise perfloravinil polieter yapısında olup, oksijen atomları ile PTFE ana iskeletine bağlanır. Yan zincirler ise sülfonik asit grubu  $-SO_3H$  ile sonlanıyor olup, polimere katyon değiştirme yeteneği sağlamaktadır. İlk üretilen membran nafion 120 olup, ekivalent ağırlığı 1200, kalınlığı ise 250 mikrometredir. Bunu takiben nafion 117 membranlar üretilmeye başlamış ve 1100 ekivalent ağırlığa ve 178 mikrometrelik bir kalınlığa sahiptir. Uygun miktarda neme sahip olması durumunda  $80\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta en yüksek iletkenliğe  $0,17\text{ S/cm}$  ile nafion sahiptir. 178 mikrometre kalınlık için spesifik direnç  $0,105\text{ ohm/cm}^2$  ya da ohmik kayıplar  $1\text{A/cm}^2$  için  $105\text{ mV}$ 'tur. Performansı arttırmak adına membran için yapılabilecek en iyi optimizasyon membran kalınlığını düşürmekten geçmektedir. Ayrıca anot tarafından katot kısmına olan proton göçü de kolaylaşmış olacaktır. En önemli dezavantaj olarak ise, katoda geçen metanol miktarındaki artış nedeniyle katot performansında düşüş meydana gelmesi söylenebilir (Hoogers, 2002).

Polimerik elektrolit membranın verimli bir şekilde çalışabilmesi için üzerinde bulundurabileceği muhtemel kirliliklerden arındırılması gerekmektedir. Bu kirlilikler yüzey kirliliği, organik kirlilikler ve metal iyon kirlilikleri olarak sıralanabilir. Bu kirlilikler ve bunların temizlenmesi için kullanılacak kimyasallar Şekil 2.14'te sırası ile verilmiştir (Bilaloğlu, 2006).



Şekil 2.14. Proton değişim membranı üzerinde bulunması muhtemel kirlilikler ve bunların temizlenmesi için kullanılacak kimyasallar (Bilaloğlu, 2006)

### 2.6.2. Katalizör Tabakaları

Katalizör tabakaları yakıt hücrelerinin en önemli kısımlarından biridir. Bu tabaka membran ve gaz difüzyon tabakaları arasında bulunur. Elektrokimyasal reaksiyonlar bu bölgede bulunan katalizör yüzeylerinde gerçekleşir. Katalizör yüzeyinde reaksiyonun gerçekleşmesi için reaktan (sıvı-gaz), elektron ve protonun bu bölgeye rahatça girip çıkması gerekmektedir.

Tepkimeye girecek reaktan gaz difüzyon tabakasında bulunan boşluklardan katalizör yüzeyine gelir. Tepkime sonucu oluşan veya tepkimeye girecek elektron ve proton ise kendi ortamlarında taşınmalıdır. Elektronlar iletken bir madde üzerinde taşınmalı iken protonlar iyonomerlerle taşınmalıdır. Bu halde katalizör yüzeyinde hem boşluk, hem elektriksel iletken tabaka, hem de proton iletken iyonomer katalizör yüzeyine temas etmelidir. Katalizörün yüzeyi ne kadar büyük olursa katalizör yüzeyindeki aktif alan da o kadar büyük olur. Katalizörün yüzey alanını büyütmek için daha küçük yapıda katalizör tanecikleri üretilmelidir.

DMFC’inde anot katalizörü olarak platin ve rutenyum kullanılır. Platin metil alkol yüzeyindeki hidrojenleri koparıırken, rutenyum platin aktif yüzeyinde alıkonulan karbon monoksit bağının koparılmasına yardımcı olur. Katot katalizör tabakasında ise katalizör olarak platin kullanılır. Katalizör yüzeyinin kompozisyonu ve yapısının bilinmesi katalizörün karakterizasyonunda ve katalitik reaksiyon mekanizmasının anlaşılmasında önemli rol oynar. Katalizörü daha iyi dağıtarak yüzey alanında artış sağlanması ve elektron iletkenliği için katalizöre destek olarak karbon siyahı veya karbon nanotüp kullanılır.

Anot katalizör tabakasına gelen metil alkol ve su katalizör yüzeyinde bulunan aktif sitelere adsorblanır ve tepkimeye girerek karbondioksit ile proton ve elektron açığa çıkar. Katot katalizör tabakasında ise elektron ve protonlar Pt yüzeyinde oksijeni indirger ve su açığa çıkarır.

Anot katalizör tabakasında bulunan katalizörün performansı DMFC performansı ile doğru orantılıdır. Kullanılan platin ve rutenyum alaşımlarından daha yüksek performans verecek yeni soy metaller ve metallerin bulunması gerekmektedir. Bu sebeple metallerin alaşımlanması konusunda ar-ge çalışmaları devam etmektedir. Etkin bir katalizörün geliştirilmesi sayesinde DMFC’leri bir anda birçok farklı cihazda ticari ürün olarak kullanılabilir.

Anot katalizör tabakasının performansını artırmanın bir yolu da katalizör desteğini modifiye etmek olabilir. Nanoteknoloji alanında yapılan hızlı gelişmeler sayesinde DMFC performansını artıran ürünler üretilebilir.

Anot katalizör tabakası DMFC maliyetini oldukça artırmaktadır. Katalizörün performansını artırmak için anot katalizör tabakasına 2 ile 8 mg/cm<sup>2</sup>, ye kadar katalizör yüklemesi yapılmaktadır. Katalizör yüklemesini düşürüp performans artışını sağlamak üzere katalizörün daha aktif kullanımına yer verecek üretim metotları da araştırılmaktadır (Liu vd., 2006).

### 2.6.3. Gaz Difüzyon Tabakaları (GDT)

Gaz difüzyon tabakasının pek çok fonksiyonalitesi vardır:

Reaktan geçirgenliği: Kullanılan yakıt metanolün anot katalizör tabakasına taşınımını sağlar, oksidant olarak kullanılan hava ya da saf oksijeni katot katalizör tabakası üzerine taşır.

Ürün geçirgenliği: Anotta oluşan  $\text{CO}_2$ 'i anot katalizör tabakasından, suyu da katot katalizör tabakasından uzaklaştırılmasına yardımcı olur.

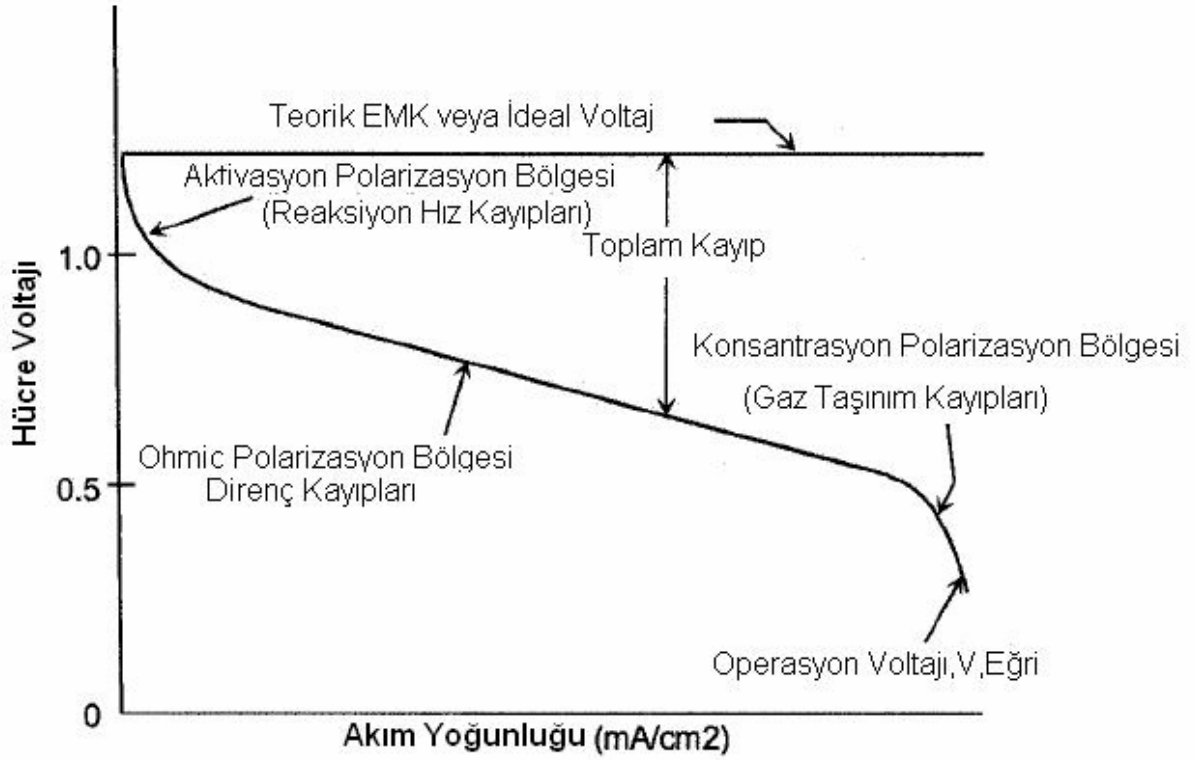
Elektronik ve ısı iletkenliği: Elektron iletimine yardımcı olur. Difüzyon tabakasındaki grafit partikülleri elektrik akımını katalizör tabakasından, elektrot plakasına iletir. Kütle taşınım ve elektron iletim özellikleri dikkate alındığında, katalizör tabakası ile difüzyon tabakası arasında dirençlerin olması olasıdır. Difüzyon tabakası ile elektrot plakası arasındaki direnç ise düşüktür.

Mekanik dayanımı: Ayrıca difüzyon tabakası, yakıt metanolün katalizör tabakasına homojen dağılımını sağlar. Gaz difüzyon tabakasının por boyut dağılımı, maksimum por boyutu, porositesi, karbon fiberin çapı, hidrofiliklik, hidrofobiklik ve kalınlık gibi özelliklerin tamamı performans üzerinde etkilidir. Karbon kağıdı olarak literatürde bahsedilen yapılar doğrudan gaz difüzyon tabakası olarak kullanılmaktadır (Hea vd., 2007).

### 2.7. Yakıt Hücresinde Polarizasyonlar

Teorik olarak yakıt hücresinden 1,229 V voltaj elde edilmelidir. Fakat yakıt hücresindeki tersinmez kayıplar yüzünden bu değer elde edilemez. Tersinmez kayıplara polarizasyon adı verilir. Şekil 2.11'de hücre voltajına karşı akım yoğunluğu grafiği görülmektedir. Teorik olarak elde edilmesi gereken voltaj değeri yakıt hücresindeki kayıplar nedeniyle farklılaşmıştır (Şahin, 2007).

Güç, akım ve voltajın bir ürünüdür. Güç yoğunluğu ise akım yoğunluğu ve voltajın ürünüdür. Polarizasyon eğrisinin sonuçlarına göre, güç yoğunluğu ile akım yoğunluğu arasında çizilen eğri kullanılarak yakıt hücresinin ulaşabileceği maksimum güç yoğunluğu hesaplanmaktadır (Berkem, 1993).



Şekil 2.15. Tafel eğrisi (Şahin, 2007)

Yakıt hücresinde görülen başlıca polarizasyonlar aktivasyon polarizasyonları, yakıt geçişi ve içsel akımlardan kaynaklanan polarizasyonlar, direnç polarizasyonları ve konsantrasyon polarizasyonlarıdır (Kurtcephe, 2006).

### 2.7.1. Aktivasyon Polarizasyonları

Aktivasyon polarizasyonları, elektrot yüzeyindeki reaksiyonların yavaş ilerlemesinden ve daha fazla bir aktivasyon enerjisine gerek duymasından kaynaklanmaktadır. Üretilen voltajın bir kısmı, elektronların elektrotlara veya elektrotlardan dışarı transferini sağlayan elektrokimyasal reaksiyonları gerçekleştirmesinde kullanılmaktadır. Yakıt hücresi performansını arttırmak için şu yöntemlere başvurulabilir:

- Pil sıcaklığını yükseltmek
- Çok etkili katalizörler kullanmak
- Elektrotların pürüzlülüğünü arttırmak
- Reaktan konsantrasyonunu arttırmak
- Basıncı arttırmak (Kurtcephe, 2006).

### 2.7.2. Yakıt Geçişi ve İçsel Akımlardan Kaynaklanan Polarizasyonlar

Yakıt hücrelerinde elektrolit malzemesinin sadece iyon geçirmesi istenmekte elektronik iletkenlik istenmemektedir. Doğrudan metanol yakıt hücrelerinde kullanılan Nafion membranların iyonik iletkenlikleri çok iyi olmasına rağmen az da olsa elektron geçişine izin vermektedir. Aynı zamanda bir miktar yakıt da anottan katot tarafına geçmektedir. Katot tarafına geçen yakıt, pil için akım üretmek yerine katalizör aracılığıyla doğrudan oksijenle tepkimeye girmektedir. Bu durumda dış devreden geçmesi gereken elektronlar, anottan katoda içten geçen yakıttan elde edilerek lokal kısa devreye sebep olmakta ve hücrenin performansını düşürmektedir (Kurtcephe, 2006).

### 2.7.3. Direnç Polarizasyonları

Elektrotların üzerinde yüksek dirençli bir tabakanın oluşumu ile akımın geçmesine karşı bir direnç göstermesinden kaynaklanır. Voltaj düşüşü miktarı akımla orantılıdır. Yakıt hücrelerinin bağlantı noktaları, çift kutuplu levhalar ve esas olarak elektrolit ohmik kayıpların gerçekleşebileceği bölgelerdir (Kurtcephe, 2006).

Hücrenin iç direncini düşürmek için;

- Yüksek iletkenlik özelliğine sahip elektrotlar kullanmak
- Pil bağlantıları ve çift kutuplu levhalar için uygun malzemeler
- Elektroliti yeterince ince seçmek. (Genellikle mümkün değildir. Elektrotların ayakta durması için kalın, elektrolit akışını dağıtmak için yeterince geniş olması gereklidir.)

### 2.7.4. Konsantrasyon Polarizasyonları

Elektrot yüzeyinde yakıt ve oksijen konsantrasyonunun değişmesinden kaynaklanmaktadır. Yüksek akım yoğunluklarında meydana gelmektedir. Katalitik yüzeyde reaksiyon çok hızlı olduğu için gözenekli elektrot yapısından dolayı yeterince malzeme taşınmamaktadır. Bu nedenle reaksiyon için gerekenden az yakıt veya oksijen olması gerektiği kadar voltaj üretilmemesine neden olmaktadır (Kurtcephe, 2006).

## 2.8. Yakıt Hücreleri İçin Elektrot Hazırlama Yöntemleri

Yakıt hücreleri için hazırlanan elektrotlardan yüksek performans elde edilebilmesi için;

- Dar bir partikül aralığı sağlanmalı
- Nano partiküllerin üniform kompozisyonu gerçekleştirilmeli

- Yüksek alaşımlanma derecesi sağlanmalı
- Karbon üzerine büyük ölçüde dispersiyon sağlanmalıdır.

Bunun için ekonomik katalizör hazırlama yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar sırasıyla;

- Emdirme yöntemi
- İyon değişimi yöntemi
- Çöktürme yöntemi
- Kolloidal yöntem (Liu vd., 2006).

### **2.8.1. Emdirme Yöntemi**

Platin esaslı katalizörlerin hazırlanmasında geniş çapta kullanılan bir katalizör hazırlama tekniğidir. Bu yöntemde göre metal tuzlarının birer çözeltisi hazırlanır. Platin ve ikinci metal karışımından oluşan sulu çözeltinin pH'ı metallerin karbon üzerine adsorbsiyonunu sağlamak üzere ayarlanır. Hazırlanan bu çözeltiler karbon destek ile karıştırılır. Kullanılan katalizör destek maddesi karbon partiküllerinin büyümesini sınırlandırır. Hazırlanan nihai karışım, solventi uzaklaştırmak için kurutulur. Ardından ya ısı bir kurutma işlemi uygulanır ya da istenen katalizör formunu sağlayacak dekompozisyon için indirgeme işlemine tabi tutulur. İndirgeme yapmak için  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NaBH}_4$ ,  $\text{Na}_4\text{S}_2\text{O}_5$ , hidrazin ya da formik asit gibi kimyasallar kullanılır. Ayrıca gaz fazı indirgeme akımı olarak ise hidrojen kullanılabilir. Ancak büyük çaplı uygulamalarda sulu çözelti tarafından karbonun az ıslatılması dolayısıyla bu teknik pek uygun değildir. Emdirme prosesi esnasında katalizörün kompozisyonu, morfoloji ve dispersiyonu katalitik aktiviteyi etkilemektedir. Karbonun porositisi ise katalizör nanopartikül boyutunu ve dispersiyonunu etkilemektedir. Ayrıca emdirmede metal başlangıç maddelerinin yapısı, indirgeme metodu, ısıtma sıcaklığı da etkili olmaktadır (Hoogers, 2002).

### **2.8.2. İyon Değişimi Yöntemi**

Bu yöntem genelde yeterli miktarda iyon değişimine olanak sağlayan sitelere sahip karbon desteklerin kullanıldığı durum için geçerlidir. Ancak karbon siyahları yeterli platin yüklemesini sağlayacak kadar siteye sahip değildir. Bu nedenle karbonlar platin yüklemesini arttırabilmek için, iyon dönüşüm sitelerinin miktarını attırarak şekilde muamele edilmelidir (Hoogers, 2002).

### 2.8.3. Çöktürme Yöntemi

Bu yöntem esas olarak çözünebilir türlerin kimyasal dönüşüm ile çöktürülmesi esasına dayanmaktadır. Bu dönüşüm ya pH'nın etkisi ile asidik ya da bazik ortamda, ya da bir indirgenin ortama ilavesi ile sağlanabilmektedir. Çöktürme yöntemi kullanılarak farklı iki metot ile katalizör hazırlamak mümkündür. Bu metotlar;

-Poliol metot

-Sülfito metot (Hoogers, 2002).

#### 2.8.3.1. Poliöl Metot

Poliol prosesi redoks esaslı bir prosestir (Bonet vd., 1999). Poliöl prosesinde çözünebilir metal türleri bir polihidroksilik alkol içerisinde çözülür veya dağıtılır. Genel olarak reaksiyonu ele aldığımızda reaksiyon inorganik katı bileşenin çözünmesi, çözelti içinde indirgenmesi, homojen çekirdeklenme ve metalik fazın büyümesi kademelerini içermektedir. Metalin indirgenmesi birçok poliöl içerisinde olabilir. Ancak etilen glikol veya dietilen glikol ya da her ikisinin karışımı en çok kullanılanlardır. Reaksiyonlarda etilen glikolün oksidasyonu ile metallerin indirgenme potansiyelleri arasındaki fark arttıkça, hem indirgenme için geçen süre hem de indirgenme sıcaklığı artmaktadır (Fievet vd., 1989).

#### 2.8.3.2. Sülfito Metot

Yakıt hücreleri için katalizör hazırlamada pek çok sayıda platin ön maddesi denenmiştir. Platin başlangıç maddelerini asidik ve bazik olmak üzere iki gruba ayırabiliriz. Asidik platin başlangıç maddelerine en iyi örnek  $H_2PtCl_6$  ve platin nitrattır. Bu tuzların çöktürülmesi için sodyum hidrojen karbonat ve sodyum hidroksit (NaOH) gibi bazik maddeler kullanılır. Bazik platin başlangıç maddeleri olan heksahidroksiplatini asidin amin çözeltisi içinde çöktürülmesi için, asetik asit gibi organik bir asit ilave edilir. Sonuç olarak, platin hidroksit çökeltileri oluşmaktadır. Bu çökeltinin indirgenmesi için ise hidrazin, formikasit ve formaldehit gibi indirgenler kullanılmaktadır.

Bu metot esas alındığında, sülfito denen yöntem ise ilk 1970'te Prototech tarafından denenmiş ve geniş çapta bir uygulama alanı bulmuştur. Kısaca bu metoda göre, kloroplatini asit, sodyum bisülfid ile reaksiyona sokularak, platin (II) sülfite dönüştürülür. Platin çözeltisi karbon karışımına ilave edilir. Ortamda bulunan platinleri çöktürmek amacıyla hidrojen peroksit geçirilir. Neticede, peroksidin etkisiyle platin oksit türleri oluşur ve karbon üzerine

yapıştır. Bu metot Pt-Ru ve ikili metallerin hazırlanmasında çokça kullanılmıştır (Hoogers, 2002).

#### 2.8.4. Kolloidal Yöntem

Kolloidal yöntem her ne kadar kararlı mono metalik kolloidlerin hazırlanması için stabilize edici maddeler kullansa ve hazırlama pek çok adımdan oluşsa da, yakıt hücresi uygulamalarında son zamanlarda sıkça kullanılmaktadır. Kolloidal yöntem alaşım yapısında ve dar alanda partikül boyut dağılımına sahip ikili metal katalizörlerin hazırlanmasında yaygın olarak kullanılmıştır. En yaygın olarak kullanılan kolloidal katalizör hazırlama yöntemleri;

-Mikroemülsiyon yöntemi

-Bönneman yöntemi'dir (Hoogers, 2002).

#### 2.9. Katalizör Sentezi ile İlgili Yapılmış Bazı Çalışmalar

Katalizör sentezinde metal tuzlarının indirgenmesi amacıyla çeşitli indirgenler kullanılmıştır. Bu amaçla yapılan bir çalışmada HCHO ile indirgenme yapılırken, 80 °C'de katalizör tuzları çözülmüş ve ozonla temizlenmiş karbon siyahı su ve izopropil alkol (IPA) karışımında ultrasesle 20 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra katalizör çözeltisi eklenmiş ve 15 dakika daha karıştırılmıştır. Çözelti pH'ı NaOH ekleyerek 8'e ayarlanmış ve 80 derecede 1 M HCHO damla damla çözeltiye eklenmiştir ve 1 saat karıştırılmıştır ve daha sonra çözeltide klor iyonlarının olmaması için de tekrar tekrar saf su ile yıkanmıştır. Daha sonra katalizör pudrası 80 °C'de 3 saat kurutulmuş ve vakumlu kapta tutulmuştur (Wang vd., 2006).

Yine indirgen olarak HCHO kullanan başka bir çalışmaya göre ise önce 1 g karbon siyahı uygun miktarda yüklemeye karşılık gelecek şekilde kloroplatinik asit çözeltisiyle karıştırılmıştır. Daha sonra HCHO:PtCl<sub>6</sub><sup>-2</sup> oranı molce 20:1 olacak şekilde 5,2 ml % 37'lik HCHO eklenmiştir. Daha sonra 0,5 M NaOH çözeltisi pH 14 oluncaya kadar çözeltiye eklenmiştir. Daha sonra ısıtmaya bağlı olarak karışım 15 dakika ve 36 saat emdirme sürelerine tabi tutulmuştur. Karışım daha sonra yağ banyosuna alınmıştır ve oda sıcaklığından 363 K'e dakikada 10 K artışla getirilmiş ve bu sıcaklıkta 3 saat tutulmuştur. En son olarak çökelme sağlayıcı sodyum nitrat, sodyum klorür veya hidroklorik asit gibi güçlü bir elektrolit çözeltiye eklenmiştir. Oluşan katı içinde klor iyonları bulunmadığı anlaşılincaya kadar suyla yıkanmış ve daha sonra katalizörler 373 K'de 10 saat kurutulmuştur. Aynı çalışmada, başka bir kaynağa referans yaparak değiştirilmiş poliöl proses için etilen glikol indirgen olarak

kullanılmıştır. Bu çalışmada sentezlenen partikülün kristalit boyutu yaklaşık 3-4 nm olarak ölçülmüştür (Choi vd., 2004).

İndirgen olarak hidrojen gazı kullanılan çalışmalarda katalizör tuzları suda çözüldükten sonra karıştırılmıştır. Daha sonra Vulcan XC-72 çözelti içine karıştırılmıştır. Sonrasında kurutulan çözelti ısı işlem altında hacmen %5 H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> gazı ortamına bırakılmıştır. Bu çalışmada sentezlenen partikülün kristalit boyutu yine yaklaşık 3-4 nm olarak ölçülmüştür (Choi vd., 2006; Yang vd., 2003).

NaBH<sub>4</sub> ile indirgeme yapıldığında metal tuzları su içinde çözülmüştür. Birkaç saat bekletildikten sonra içine 0.2 M NaBH<sub>4</sub> (Choi vd., 2004) veya her 1 ml su için 0.1 g NaBH<sub>4</sub> (Park vd., 2004) eklenmiştir. En son kalan katı suyla birkaç defa yıkandıktan sonra dondurularak kurutulmuştur. Bu çalışmada sentezlenen partikülün kristalit boyutu 4,5 nm olarak ölçülmüştür.

Liu ve arkadaşlarının yaptığı yayında 20 mM'luk kloroplatinik asit çözeltisinden 2 ml alınarak 25 ml etilen glikolda çözülmüştür. Çözelti maksimum sıcaklığın 170 °C'ye ayarlanabildiği bir mikrodalga reaktörde 60 saniye tutulmuştur. Çıkan çözelti hacminin 1–2 katı kadar seyreltilmiş ve tiyol/Pt mol oranı 3–10 arasında olacak şekilde 25 ml'lik bir dekantiyol-toluen çözeltisi ile karıştırılmıştır. Yeni karışım Pt'nin toluen fazına geçmesi için iyice karıştırılmıştır ve su fazının rengi berraklaşınca işlem sonlandırılmıştır. Tiyol içine kapsüllenmiş katalizör tanecikleri daha sonra destek üzerine toluen çözeltisine yerleştirilmiş, 2 saat karıştırılmış ve toluen uçurulduktan sonra 60 °C'de vakumda kurutulmuştur. Daha sonra stabilizörü temizlemek için argon gazlı 360 °C'lik fırında bırakılmıştır. Bu çalışmada sentezlenen partikülün kristalit boyutu 5 nm olarak ölçülmüştür (Liu vd., 2004).

T. Kim ve arkadaşlarının yaptığı yayında heksakloroplatinik asit ve rutenyum klorür tuzları 1:4 hacimsel oranda 20 ml su-n-propanol çözülmüş, daha sonra 30 ml'lik poli(N-vinil-2-pirolidon) (ortalama Molekül Ağırlığı 10000) su-n-propil alkol karışımına eklenmiştir. Oda sıcaklığında yeterince karıştırıldıktan sonra çözelti iyice karıştırılarak 1-3 saat süreyle havada rifleks edilmiştir. Daha sonra karbon pudrası eklenmiş, ultrasonik banyoda 30 dakika karıştırılmış ve oluşan süspansiyon 60 °C'de kurutulmuştur. Oluşan pudra 300–400 derece arasında H<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>'li ortamda poli(N-vinil-2-pirolidon)'nin katalizör pudrasından ayrılması için tutulmuştur. poli(N-vinil-2-pirolidon) miktarı ile katalizör miktarının oranının katalizör tanecik boyutuna nasıl etki yapıldığı araştırılmıştır. Bu çalışmada kristalit boyutu 2-3 nm olarak ölçülmüştür (Kim vd., 2004).

X. Xue ve arkadaşlarının çalışmasında ise 100 mg  $H_2PtCl_6$  ve 40 mg  $RuCl_3$  ve 250 mg Vulcan XC 72 karbon siyahı 25 ml aseton içinde karıştırılmıştır ve sonra çözeltiliye 20 ml  $[(BMI)BF_4]$  eklenmiş ve oda sıcaklığında 30 dakika karıştırılmıştır. Çözelti 80 °C'de 30 dakika tutularak aseton kurutulmuştur. Çözelti hidrojen atmosferinde 80 °C'de 40 dakika tutulmuştur ve 3000 rpmde 30 dakika tutulmuştur. Pt-Ru/C katalizörü aseton ve diklorometan ile yıkanmış ve azaltılmış basınçta kurutulmuştur. Son olarak Pt-Ru/C katalizörü 600 °C'de 4 saat sinterlenmiştir. Bu çalışmada kristalit boyutu 3,5 nm olarak ölçülmüştür (Xue vd., 2005).

Xu ve arkadaşlarının çalışmasında iyonik surfaktant olarak yüksek yayılabilirliği sebebiyle sodyum dodesilbenzen sulfonat ( $C_{18}H_{29}NaO_3S$ , NaDDBS) ve kosurfaktant olarak n-bütanol, yağ fazı olarak sikloheksan kullanılmıştır. Metal kaynağı olarak kloroplatinik asit ve rutenyum klorür su içinde çözünmüştür. Vulcan XC-72 karbon siyahı hidrofobikliğini artırmak maksadıyla polivinilalkol ile temizlenmiş ve karbon siyahı  $H_2PtCl_6$  ve  $RuCl_3$  karışık konsantre çözeltisine eklenmiştir ve 12 saat karıştırılmıştır. Daha sonra su fazı, 2 kat daha fazla olan yağ fazıyla karıştırılmıştır. Konsantre  $Na_2CO_3$  çözeltisi kullanılarak pH 9'a ayarlanmış ve indirgen olarak  $NaBH_4$  ve HCHO çözeltileri kullanılmıştır. Bu çalışmada kristalit boyutu 3,2 nm olarak ölçülmüştür (Xu vd., 2006).

Yine indirgen olarak hidrazinin kullanıldığı bir çalışmada  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$  ve  $CoCl_2$  iki ayrı behere tartılmıştır. Sonra beherlere bir miktar etilen glikol ilave edilmiştir. Ultrasonik banyoda 5-10 dakika tutularak çözeltilerin homojen hale gelmesi sağlanmıştır. 2,5 M NaOH çözeltisiyle pH 12'ye çıkarılmıştır. Ardından manyetik karıştırıcıda şiddetli karıştırma altında 2 M hidrazin ısıtma olmadan ortama damla damla ilave edilmiş ve bir saat karıştırılmıştır. Kademeli olarak 2. kez 2 M hidrazin ortama ilave edilmiş ve bir saat daha karıştırılarak indirgenme tamamlanmıştır. Bu sırada başka bir beherde karbon siyahı ve etilen glikol manyetik karıştırıcı ile çamur haline getirilmiştir. Bu çamura damla damla indirgenme yapılmış çözelti ilave edilmiş ve 3 saat karıştırılmıştır. Bu şekilde sentezlenen katalizör önce süzölmüş, sonra deiyonize su ile yıkanmış ve vakum etüvünde 80 °C'de 8 saat kurutulmuştur. Yine aynı çalışmada benzer prosedürle Pt-Ni ve Pt-V katalizörleri de hazırlanmıştır. Bu şekilde sentezlenen partikülün kristalit boyutu yaklaşık 3-4 nm olarak ölçülmüştür (Firtına, 2008).

Diğer bir çalışmada polirol metoduna göre indirgen olarak etilen glikol seçilmiştir. Katalizörlerin hazırlanmasında tek aşamada metal yüklemesi yapılmıştır.  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$  ve  $SnCl_2$  ayrı ayrı iki behere tartılmıştır. Gerekli etilen glikol miktarı beherlere damla damla ilave edilmiştir. Ardından 5-10 dakika ultrasonik banyoda metal tuzlarının iyice çözünmesi

sağlanmıştır. Ortam pH'ı 0,5 M NaOH ile 5'ten 13'e yükseltilmiştir. Ardından manyetik karıştırıcı kullanılarak ve geri soğuyucu altında 30 dakika daha karıştırılmış ve sonra ısıtma işlemine geçilmiştir. Sıcaklık 90-100 °C'ye ulaştığında reaksiyon karışımının renk değiştirmesiyle indirgenme tamamlanmıştır. Daha sonra ortama karbon siyahı ilave edilmiş ve karışım 3 saat yağ banyosu içerisinde 130 °C'de bekletilmiştir. Sonra sentezlenen katalizör süzülüş, etil alkol ile yıkanmış ve vakum etüvünde 80 °C'de 10 saat kurutulmuştur. Yine aynı çalışmada benzer prosedürle Pt-Co ve Pt-Cr katalizörleri de hazırlanmıştır. Bu şekilde sentezlenen partikülün kristalit boyutu yaklaşık 3-5 nm olarak ölçülmüştür (Çalışkan, 2007).

Çizelge 2.2. Farklı metotlarla hazırlanmış katalizörlerin özellikleri

Referans	Katalizör	Destek	Boyut (nm)
Park vd.	Pt-Ru-Rh-Ni (50:40:5:5)	Vulcan XC 72	4,5
Choi vd.	Pt-Ru-Rh (5:4:1)	Vulcan XC 72	3-4
Choi vd.	Pt-Ru (1:1)	Vulcan XC 72	3-4
Choi vd.	Pt-Ru (2:1)	Vulcan XC 72	3-4
Liu vd.	%20 Pt-Ru (1:1)	Vulcan XC 72	5
Kim vd.	%27 Pt-Ru (1:1)	Ketjen Black	2-3
Xue vd.	%30 Pt-Ru (1:1)	Vulcan XC 72	3,5
Xu vd.	Pt-Ru (4:3)	Vulcan XC 72	3,2
Fırtına	Pt-Co/C (3:1)	Vulcan XC 72	4
Fırtına	Pt-Ni/C (3:1)	Vulcan XC 72	3
Çalışkan	Pt-Sn (80:20)/C	Vulcan XC 72	4,9
Çalışkan	Pt-Sn (50:50)/C	Vulcan XC 72	2,6

## 2.10. Katalizörde Kullanılan Platin Partiküllerinin Boyutunun Ayarlanması

Katalizör sentezinde kullanılan platinin etkin kullanılmaması üretilen elektrik miktarını ve dolayısıyla yakıt hücresinin verimini düşüren aynı zamanda üretim maliyetini arttıran bir dezavantajdır. Burada istenilen platin partiküllerinin mümkün olduğunca ufak, nanoboyutlarda sentezlenerek katalizör yüzeyinde maksimum dağılmasını sağlamaktır.

Böylece oluşacak katalitik reaksiyon miktarının artırılarak daha fazla elektrik üretimi hedeflenmektedir.

Kompozit elektrot sentezinin ilk aşaması uygun boyutlardaki platinin sentezlenmesidir. İndirgen madde seçimi kullanılacak kimyasalların oksidasyon reaksiyonlarına ve potansiyel değerlerine bakılarak yapılmalıdır. Kullanılan indirgen madde, sıcaklık ve pH sentezlenen platinin yapısını farklı şekillerde etkiler. PEM yakıt pillerinde etkinliğin yüksek olması için elektrot yüzeyinde kullanılan platin miktarının az olması ve partiküllerin de mümkün olduğu kadar küçük boyutta elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için, reaksiyonun uygun ve sabit bir hızda gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Ayrıca, indirgeme ajanı ile indirgenen kimyasal maddenin standart indirgenme potansiyelleri arasındaki fark ne kadar fazla ise indirgenme tepkimesi o kadar hızlı ve elde edilen platin partikül boyutu da o kadar küçük olur. Hidrazin; şeffaf, renksiz ve oda sıcaklığında çok hidroskopik bir sıvıdır. Amonyakı andıran keskin bir kokusu vardır ve çok polar bir çözücüdür. Susuz hidrazin çok güçlü bir indirgeme ajanıdır ve oldukça ekzotermik bir biçimde, inanılmaz bir hızla bozunabilecek kadar güçlü bir reaktif moleküldür. Bu yüzden birçok araştırmada indirgen madde olarak hidrazin seçilmiştir. Aseton ve likit parafin ise platin partiküllerinin topaklanmasını önlemek ve düzgün dağılmasını sağlamak için deneylerde kullanılmaktadır (Beyribey, 2006).

Saf platin partiküllerinin sentezinde uygulanan ana işlemler; metal kaynağının uygun indirgen maddeyle reaksiyonu, indirgenmiş platin partiküllerinin santrifüj işlemiyle ayrıştırılması, uygun kimyasallarla partiküllerin temizlenmesi ve etüvde gerekli sıcaklıkta kurutulmasıdır. Partikül boyutuna etki eden faktörler indirgen madde, pH, sıcaklık, partiküllerin içinde bulunduğu çözelti ortamının iyonik etkisi, reaksiyon hızı ve konsantrasyondur. Genel olarak pH değeri arttıkça partikül boyutu küçülür. İndirgenme reaksiyonunun hızlanması ise partiküllerin büyümesine izin vermeyerek daha küçük boyutta platin partiküllerinin elde edilmesine neden olur. Sıcaklığın artması ise genelde çözeltideki partiküllerin kinetik enerjilerini ve dolayısıyla partiküller arası etkileşimi artırır. Bu da reaksiyonun hızını arttırarak yine partiküllerin büyümesine fırsat vermeyerek daha küçük boyutta partiküller elde edilmesini sağlar.

Platin partiküllerinin boyutunu ve dağılımını etkileyen diğer bir parametre de partiküllerin içinde bulunduğu çözeltinin partiküllerle etkileşimidir. Platin partikülleri reaksiyon çözeltisinin içinde farklı, temizleme ve kurutma sonrası tekrar saf su içinde dağıtılmaları durumunda farklı boyut ve dağılım özellikleri gösterebilmektedirler. Reaksiyon çözeltisinde platin partikülleri diğer iyonlarla etkileşim gösterirler. Partiküllere iyonik kuvvetler etki eder

ve bu etkileşim platin partiküllerini büyütür. Ayrıca çözelti içindeki iyon konsantrasyonu artarsa çözeltinin yoğunluğu ve viskozitesi de artar.

Saf su içindeki platin partikülleri üzerinde bu iyonik kuvvet etkileşimlerinden hiçbiri oluşmaz. Temizlenme sonrası saf su içindeki partiküllere ise suyun polar yapısı etki eder. Ayrıca kurutma esnasında topaklanmalar meydana gelebilir. Bu da mevcut partikül boyutunu negatif yönde etkiler.

Katalizörde kullanılacak platin partiküllerini belirlemede dikkat edilmesi gereken önemli bir parametre ise partiküllerin homojen dağılımıdır. Optimum şartları belirlemek için en küçük partikül boyutuyla en homojen dağılım özellikleri birlikte değerlendirilmelidir (Beyribey, 2006).

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. Deneyde Kullanılan Kimyasal Maddeler

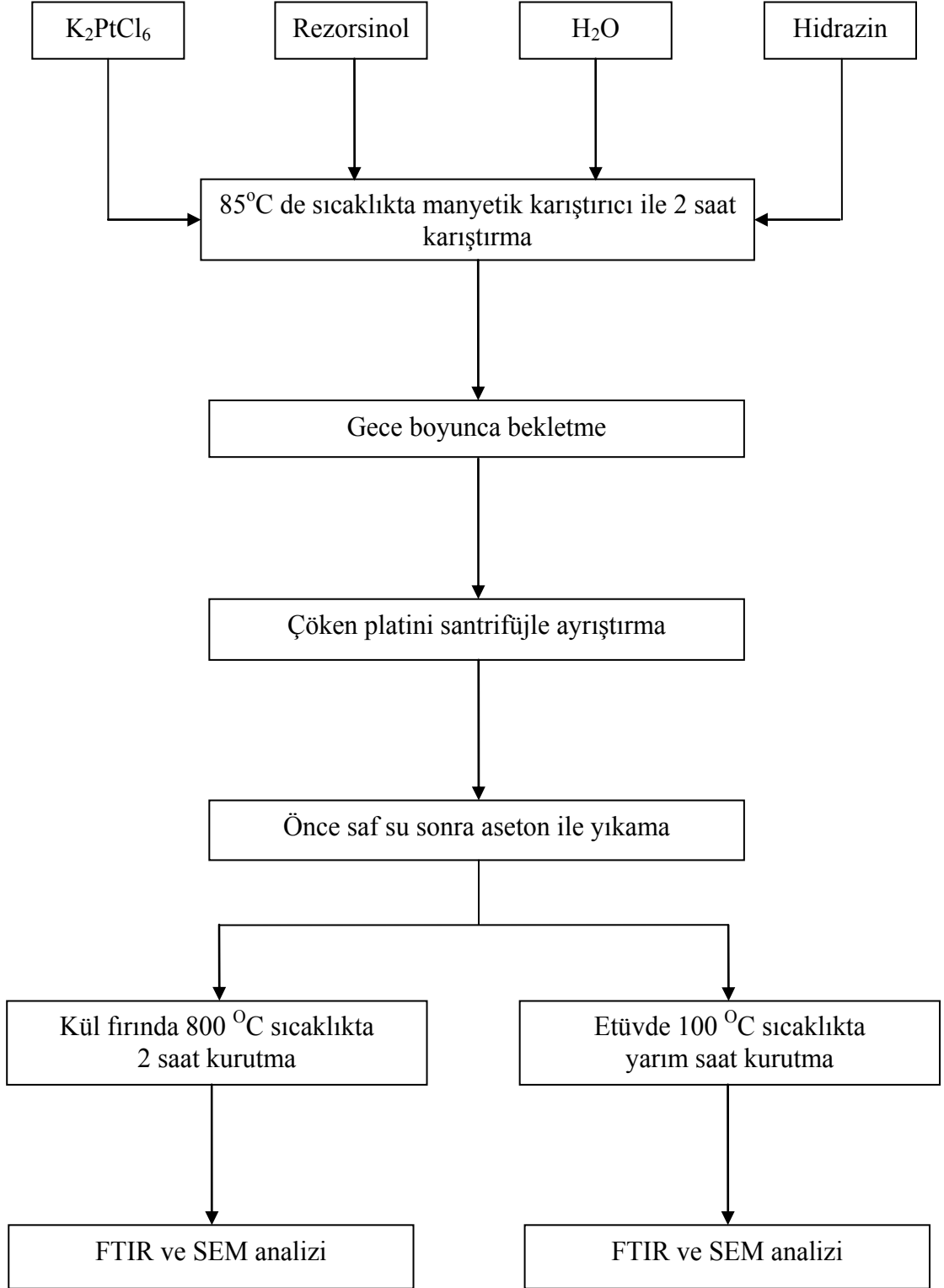
Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan kimyasal maddeler ve özellikleri

Kullanılan Kimyasal Maddeler	Özellikler
Hidrazin ( $N_2H_4$ )	Sigma-Aldrich, % 35'lik sulu çözelti, 207942
Rezorsinol ( $C_6H_4(OH)_2$ )	Merck, 107593
Potasyum heksakloroplatinat ( $K_2PtCl_6$ )	Merck, 119238
Aseton ( $(CH_3)_2CO$ )	Merck, 100014
Bidistile su	
Likit parafin	Teknik Kalite
Dietil eter ( $(C_2H_5)_2O$ )	Merck, 100921

#### 3.2. Deneysel Çalışma

##### 3.2.1. Hidrazin Kullanılarak Yapılan İndirgeme Metodu

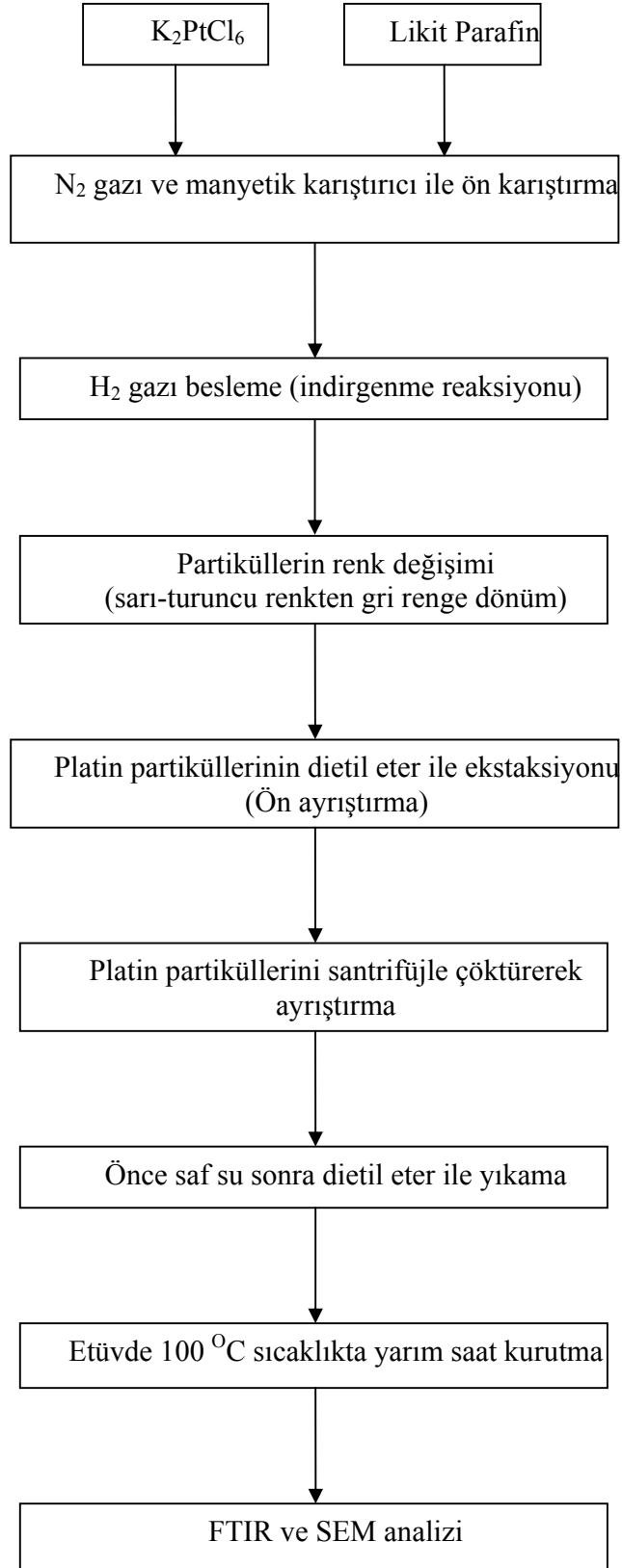
İndirgenme reaksiyonunu sağlayacak başlangıç maddelerinin tespitinden sonra 1,944 gr  $K_2PtCl_6$ , 36 ml  $H_2O$ , 440 mg rezorsinol ve 640 mg hidrazin ısı değişimi için dış ceketi bulunan karıştırma kabına alındı. Karıştırma işleminde gerekli ısıyı sağlayacak ısıtıcı yağ silikonlu yağ banyosu cihazı ile dış cekete beslendi. Böylece reaktanlar 85 °C'de manyetik karıştırıcı ile 2 saat boyunca karıştırıldı. Reaksiyon sonrası karışım gece boyunca bekletildi. Çöken indirgenmiş platin partikülleri santrifüj tüpleriyle ayrıştırıldı. Platin partikülleri temizlenmesi amacıyla önce saf su sonra aseton ile yıkandı. Temizlenen partiküllerin kurutulması aşamasında iki farklı yöntem uygulandı. Birinci yöntemde indirgenmiş platin partikülleri etüvde 100 °C'de yarım saat kurutuldu. İkinci yöntemde ise platin partikülleri kül fırınında 800 °C'de 2 saat kurutuldu. Kurutma sonrası partiküllerin yapılarının, partikül büyüklüğünün ve dağılımının belirlenmesi için FTIR spektrumları ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri alındı. Rezorsinol deneyde platin partiküllerinin küçük boyutlarda elde edilebilmesi için rezorsinol içinde asılı kalmasını ve böylece boyut sınırlandırma işleminin gerçekleşmesini sağlamak için kullanılmıştır. İndirgeme reaksiyonunda rol almamıştır.



Şekil 3.1. Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme metodu

### 3.2.2. Hidrojen Gazı Kullanılarak Yapılan İndirgeme Metodu

Reaksiyon için gerekli miktar belirlendikten sonra 500 mg  $K_2PtCl_6$  ve 100 ml likit parafin gaz yıkama şişesine aktarıldı. Parafinle potasyum heksakloroplatinatın ön karıştırılmasında daha iyi karışım elde edilebilmesi için sisteme inert, kuru azot gazı beslendi. Aynı zamanda karışım manyetik karıştırıcı yardımıyla da iyi bir karışım elde edilinceye kadar karıştırıldı. Potasyum heksakloroplatinatın likit parafin içinde dağılımından sonra  $N_2$  gazı kapatıldı ve indirgenme reaksiyonu için sisteme indirgen olarak  $H_2$  gazı beslenmeye başlandı. Bir süre  $H_2$  gazı geçişinden sonra sarı, turuncu renkli metal partikülleri siyaha yakın gri bir renk aldılar. Böylece reaksiyonun tamamlanıp indirgenme işleminin gerçekleştiği anlaşıldı ve sisteme beslenen  $H_2$  gazı kapatıldı. Fakat reaksiyon tamamlandığında partiküllerin dış cama yapıştığı gözlemlendi. Partiküllerin ayrıştırılabilmesi için önce dietil eter ile ekstraksiyon işlemi uygulandı. Sonra santrifüjleme işlemiyle partiküller çöktürülerek ayrıştırıldı. İndirgenmiş platin partikülleri temizlenmesi amacıyla önce saf su sonra dietil eter ile yıkandı. Temizlenen partiküller etüvde  $100\text{ }^\circ\text{C}$ 'de yarım saat kurutuldu. Partiküllerin yapılarının, partikül büyüklüğünün ve dağılımının belirlenmesi için FTIR spektrumları ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri alındı. Likit parafin deneyde aynı diğer metotta kullanılan rezorsinol gibi daha küçük boyutta platin partiküllerinin elde edilebilmesi için partiküllerin düzgün dağılımı ve boyut sınırlandırma amacıyla kullanılmıştır. İndirgeme reaksiyonunda rol almamıştır.



Şekil 3.2. Hidrojen gazı kullanılarak yapılan indirgeme metodu

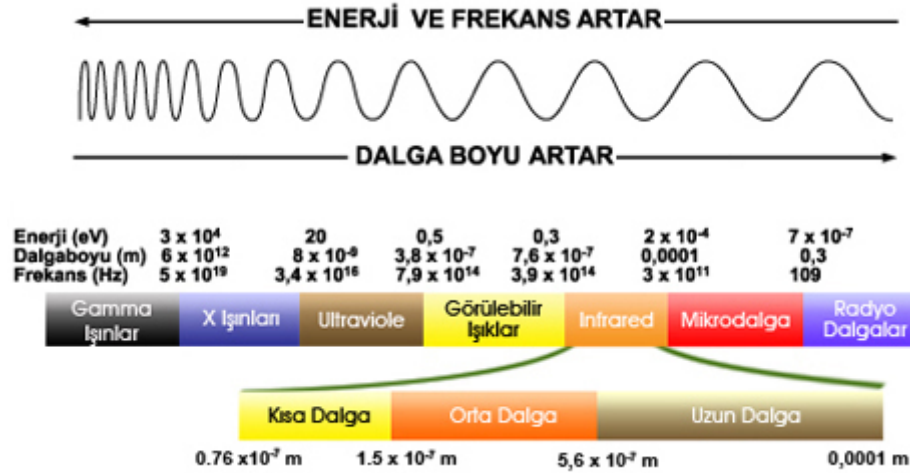
### 3.3. Deney Sonuçlarının İncelenmesi İçin Kullanılan Ölçüm Cihazları

Deney sonuçlarının ölçümleri için 2 çeşit cihaz kullanılmıştır:

1. FTIR Spektrometre (Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektroskopi)
2. Taramalı Elektron Mikroskobu-SEM (Scanning Electron Microscopy)

#### 3.3.1. Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektrometre (FTIR)

Fourier dönüşümlü infrared spektroskopi (FTIR) bir IR spektroskopi (infrared spektroskopi) çeşididir. Burada ölçüm için infrared bölgede yer alan ışınlar kullanılır. İnfrared ışınlar elektromanyetik spektrum'da görünür ışınlar ile mikrodalga ışınları arasında bulunurlar. Dalga boyu  $0,760 \mu\text{m}$  ile  $1000 \mu\text{m}$  arasında değişiklik gösterebilir. Aynı zamanda infrared ışınlar kendi içinde kısa dalga ( $0,76 - 1,5 \mu\text{m}$ ), orta dalga ( $1,5 - 5,6 \mu\text{m}$ ) ve uzun dalga ( $5,6 - 1000 \mu\text{m}$ ) olmak üzere üç kısma ayrılır.  $10^{-6}$  ile  $10^{-3}$  metre dalga boyu arası infrared bölge (IR) olarak isimlendirilir. Orta infrared bölgede Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FTIR) daha iyi spektrumlar vermektedir [3].



Şekil 3.3. Elektromanyetik spektrumda infrared ışınların konumu [4]

IR spektroskopisi molekül absorpsiyon spektroskopisinin bir dalı olup IR ışınlarının absorplanmasına dayanır. Moleküllerin titreşim ve dönme enerji seviyelerinden diğer enerji seviyelerine geçerken dipol momentinde değişme olarak ışın absorplanır. IR spektrometresinde bu işlemler gerçekleşerek tanımlama yapılabilir. FTIR spektroskopisinde duyarlılık diğer IR spektrometrelere göre daha yüksektir, diğer yöntemlerle örtüşebilecek pikleri ayırt edebilecek ayırma gücüne sahiptir, ölçüm süreleri kısadır ve sonuçlar daha hızlı elde edilir [5].

IR spektrometresi ışın kaynağı, monokromatör ve dedektörden oluşur. Kaynaktan çıkan ışının yarısı örnekten yarısı referanstan geçer. Monokromatörden geçen ışın dalga boylarına ayrılıp dedektör üzerine düşer. Buradan da dalga sayısına karşılık absorpsiyon değeri elde edilir. FTIR spektrometresi bir reaksiyonda istenen maddenin oluşup oluşmadığına, yan ürünlerin çıkıp çıkmadığına ve oluşan ürünlerin neler olduğuna yanıt verir. Ayrıca çözücü etkileri ve asosiyasyon dengeleri hakkında da önemli bilgiler verir. Cam infrared ışınları kuvvetli olarak absorpladığından deneyler için KBr, AgCl, NaCl veya CaF<sub>2</sub>'den yapılmış kaplar veya prizmalar kullanılır. Katı maddeler KBr ile toz haline getirilerek ve belli bir ölçüde preslenerek spektrumu alınır [6].

FTIR spektrumunda molekülde bulunan bağların titreşim frekanslarının değişmesi ve bağ açılarının değişmesi söz konusudur. Spektrumda algılanan molekülün hangi dalga boyunda ne kadar enerji absorpladığıdır. Bu da bize molekülde bulunan bağlar hakkında önemli bilgiler verir. IR monokromatörlerinde mercekler bulunmaz. Onun yerine parlak yüzü toplayıcı aynalar bulunur. Dedektör olarak düşük enerjili ışınlar kullanıldığı için termal ve fotoiletken dedektörler kullanılır [3].



Şekil 3.4. Bir Fourier dönüşümlü infrared spektroskopi cihazı örneği [7]

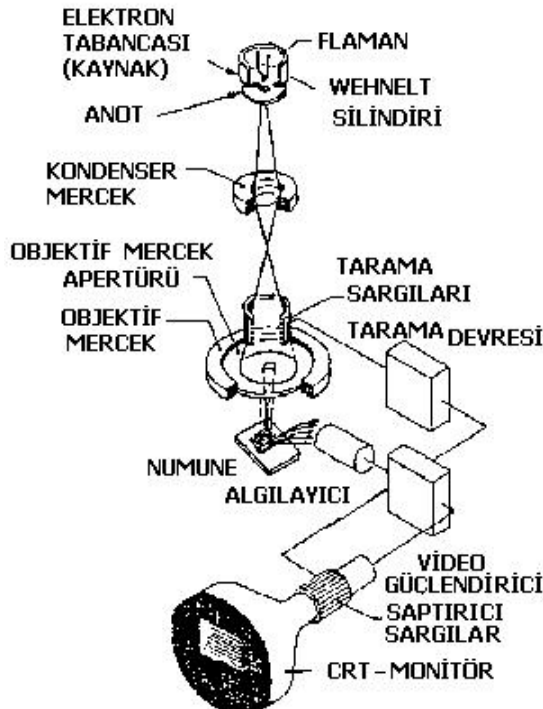
### 3.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden

geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir [8].

Gerek ayırım gücü (resolution), gerek odak derinliği (depth of focus) gerekse görüntü ve analizi birleştirebilme özelliği, taramalı elektron mikroskobunun kullanım alanını genişletmektedir. Günümüzde modern taramalı elektron mikroskoplarının ayırım gücü 0,05 nm'ye kadar inmiştir (Fırtına, 2008).

Taramalı Elektron Mikroskobu optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Optik kolon kısmında; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apatürler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune  $10^{-4}$  Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışınları toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır [8].



Şekil 3.5. Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) şematik yapısı [8]



Şekil 3.6. Bir taramalı elektron mikroskobu örneği [9]

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Deneysel çalışmada katalizörlerde kullanılacak en küçük boyutlu ve en iyi dağılımlı platin partiküllerinin sentezi araştırılmıştır. Bunun için optimum koşullar eşliğinde iki indirgeme metodu seçilmiştir. Birinci metotta indirgen olarak hidrazin kullanılmış ve indirgenme sonrası platin partikülleri üzerinde iki farklı kurutma işlemi uygulanmıştır. İlk kurutma işleminde numuneler etüvde 100 °C’de yarım saat kurutulmuştur. İkinci kurutma işleminde numuneler kül fırınında 800 °C’de 2 saat kurutulmuştur. İkinci metotta ise indirgen olarak olarak hidrojen gazı kullanılmıştır. Kurutma aşamasında ise etüvde 100 °C’de yarım saatlik tek çeşit kurutma işlemi uygulanmıştır. İndirgenme ve temizlenme sonrası uygun koşullarda kurutulan numuneler önce FTIR spektroskopi cihazı ile incelenmiş ve spektrumları alınmıştır. Sonra SEM mikroskobu görüntüleri alınarak partiküllerin boyut, yapı ve dağılımları hakkında bilgi edinilmiştir.

FTIR analizinde Arian Excalibur He Series FTS 3100 marka FTIR spektrometresi kullanılmıştır. Numuneler FTIR analizine hazırlanırken önce her bir numuneden 0,1 gr tartılmış ve üzerine 5-6 kat KBr ilave edilmiştir. Kuvars havanda iki toz bileşimi ezilerek karıştırılmış ve daha sonra 5-10 Pa basınç altında tablet haline getirilmiştir. Bu işlemten sonra hazır hale gelen numuneler cihaza yerleştirilmiş ve spektrumları alınmıştır. SEM analizinde JEOL, JSM-5410LX marka SEM mikroskobu kullanılmıştır. Analiz için tanecikler direkt olarak iletkenlik bandına yapıştırılmış ve fotoğrafları alınmıştır.

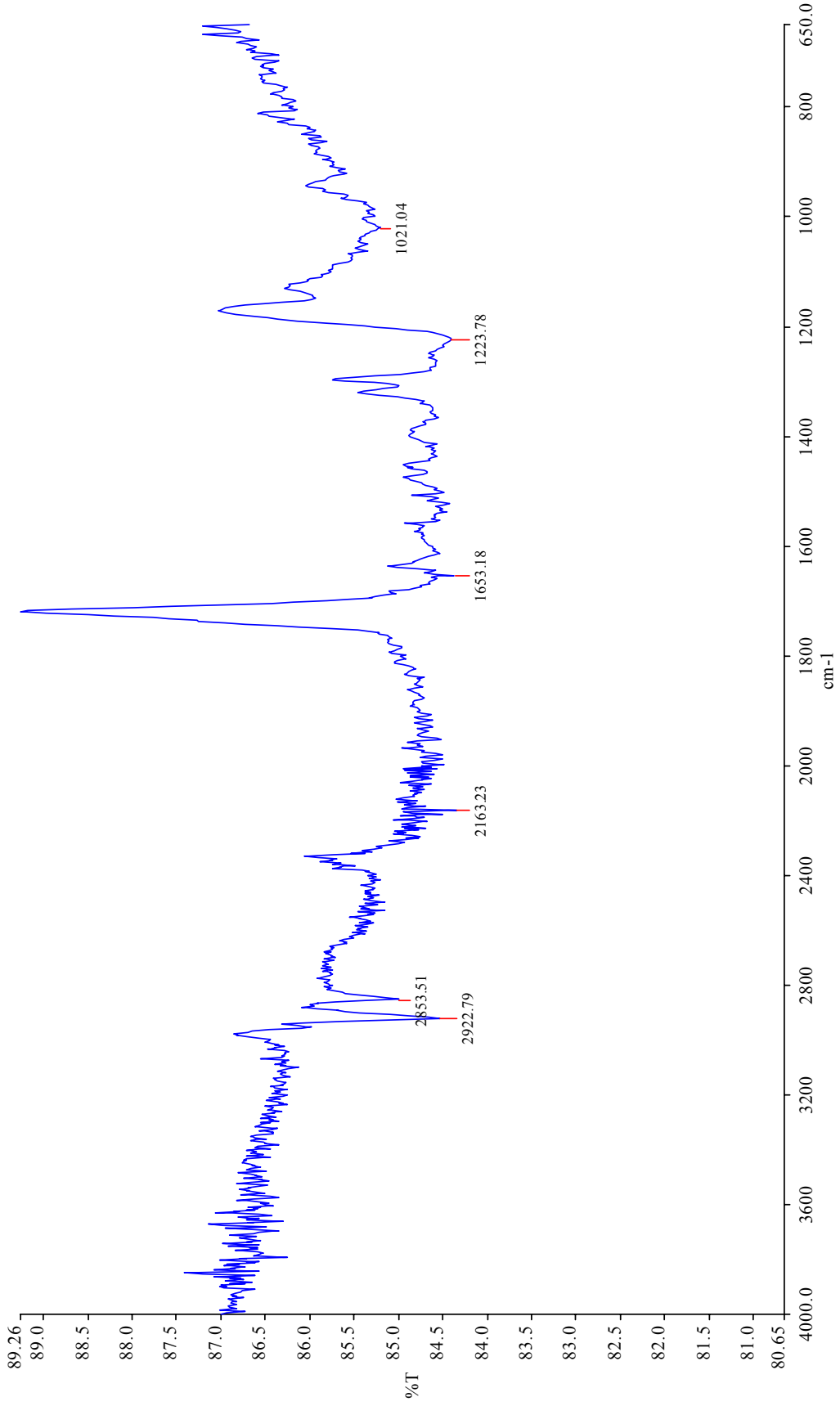
## 4.1. FTIR Spektroskopi Sonuçları

### 4.1.1. Hidrazin Kullanılarak Yapılan İndirgeme Metodu ile Hazırlanmış Platin Partiküllerinin FTIR Spektroskopi Sonuçları

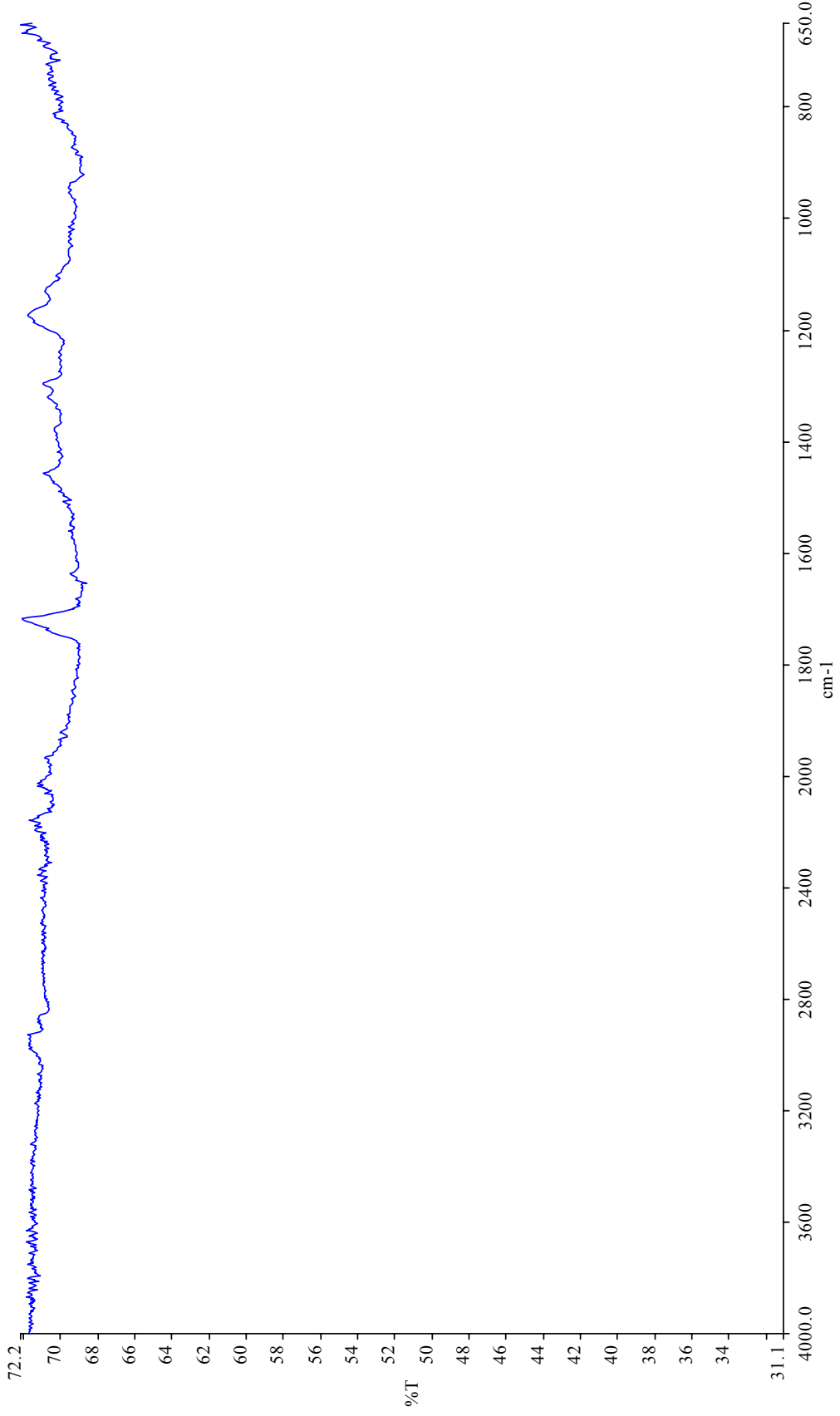
Şekil 4.1 herhangi bir indirgeme işlemi uygulanmamış başlangıçtaki potasyum heksakloroplatinata ait FTIR spektrumudur. Potasyum heksakloroplatinatın bu spektrumu diğer numunelerin spektrumları ile karşılaştırılmak amacıyla bağ yapılarının incelenmesi için referans spektrum olarak kabul edilmiştir. Potasyum heksakloroplatinat yapısında K-Cl, Cl-Cl, Cl-Pt ve Cl-Pt-Cl bağları olmak üzere 4 çeşit bağ içerir. Burada  $2922\text{ cm}^{-1}$  piki K-Cl bağını,  $2853\text{ cm}^{-1}$  ve  $1223\text{ cm}^{-1}$  pikleri Cl-Cl bağını,  $2163\text{ cm}^{-1}$  piki Cl-Pt bağını,  $1700\text{ cm}^{-1}$  piki Cl-Pt-Cl bağını göstermektedir.

Şekil 4.2 ise hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme işlemi sonrasında  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kurutulan platin partiküllerine ait FTIR spektrumudur. Burada ortaya çıkan spektrumda referans spektrumdaki hiçbir pik görülmemiştir. Bu durum elde edilen maddenin saf platin olduğunu, platinin potasyum heksakloroplatinattaki bütün bağlardan ayrıştığını göstermektedir.

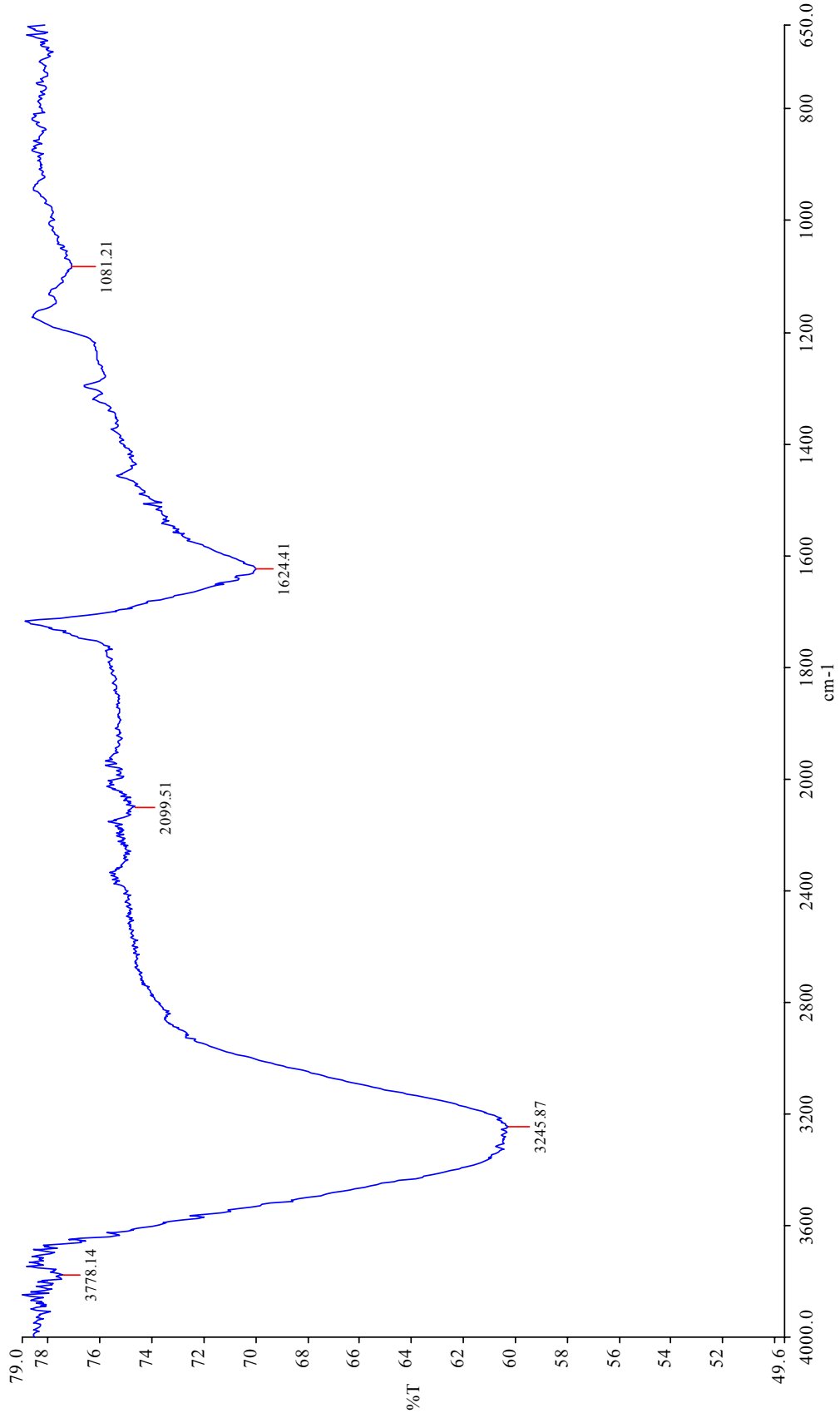
Şekil 4.3 hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme işlemi sonrasında  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kurutulan platin partiküllerine ait FTIR spektrumudur. Bu spektrumda referans spektrumdaki pikler oluşmamıştır. Spektrumda görünen  $3245\text{ cm}^{-1}$  piki Pt-O titreşim bandını,  $1624\text{ cm}^{-1}$  piki ise Pt-O-O-Pt titreşim bandını göstermektedir. Kül fırınında kurutma işlemi sırasında partiküllerde topaklaşma ve oksitlenme oluşması nedeniyle ve yüksek sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerindeki bağ yapılarının bozulması nedeniyle bu spektrumda referans spektrumdaki piklere rastlanılamamıştır.



Şekil 4.1. Herhangi bir işlem uygulanmamış potasyum heksakloroplatinata ait FTIR spektrumu



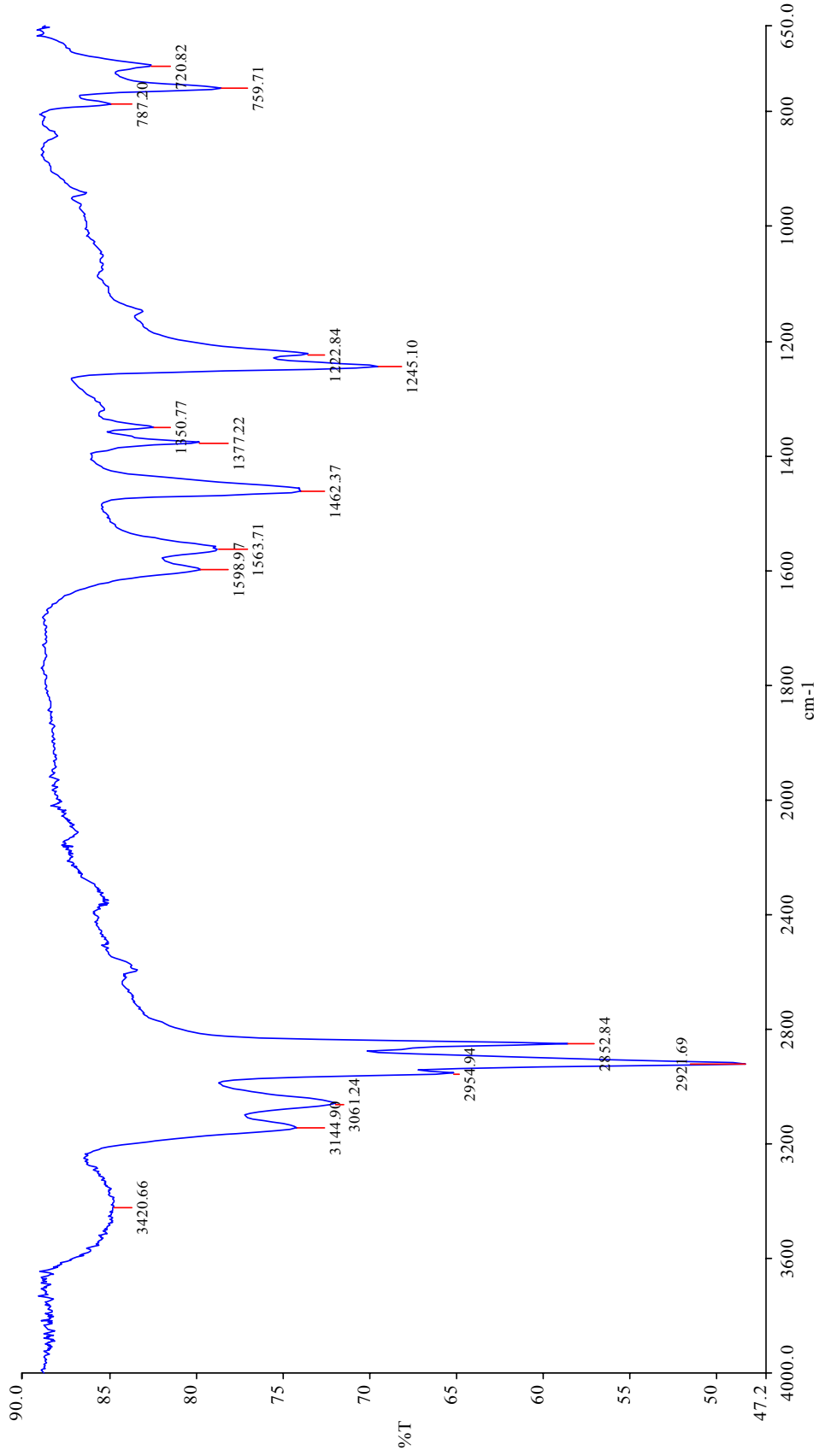
Şekil 4.2. Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C’de kurutulan platin partiküllerine ait FTIR spektrumu



Şekil 4.3. Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında kül fırınında 800 °C’de kurutulan platin partiküllerine ait FTIR spektrumu

#### **4.1.2. Hidrojen Gazı Kullanılarak Yapılan İndirgeme Metodu ile Hazırlanmış Platin Partiküllerinin FTIR Spektroskopi Sonuçları**

Şekil 4.4 hidrojen gazı kullanılarak yapılan indirgeme işlemiyle elde edilen platin partiküllerine ait spektrumdur. Spektrumda elde edilen  $3420\text{ cm}^{-1}$ ,  $3145\text{ cm}^{-1}$ ,  $2922\text{ cm}^{-1}$ ,  $2853\text{ cm}^{-1}$  ve  $1223\text{ cm}^{-1}$  pikleri K-Cl, Cl-Cl ve Cl-Pt titreşim bantlarını göstermektedir. Pikler arasındaki bazı farklar indirgeme yöntemleri arasındaki farklılardan kaynaklanmaktadır. Burada referans spektrumdaki bağ yapılarını gösteren pikler görülmektedir. Bu da elde edilen platinin tam olarak saflaştırılmadığını göstermektedir. Bu durum potasyum heksakloroplatinatın hidrojen gazı ile tam olarak indirgenememesinden ve reaksiyon sonrası platin partiküllerini dietil eter ile yıkama işleminin tam olarak gerçekleştirilememesinden kaynaklanmıştır.

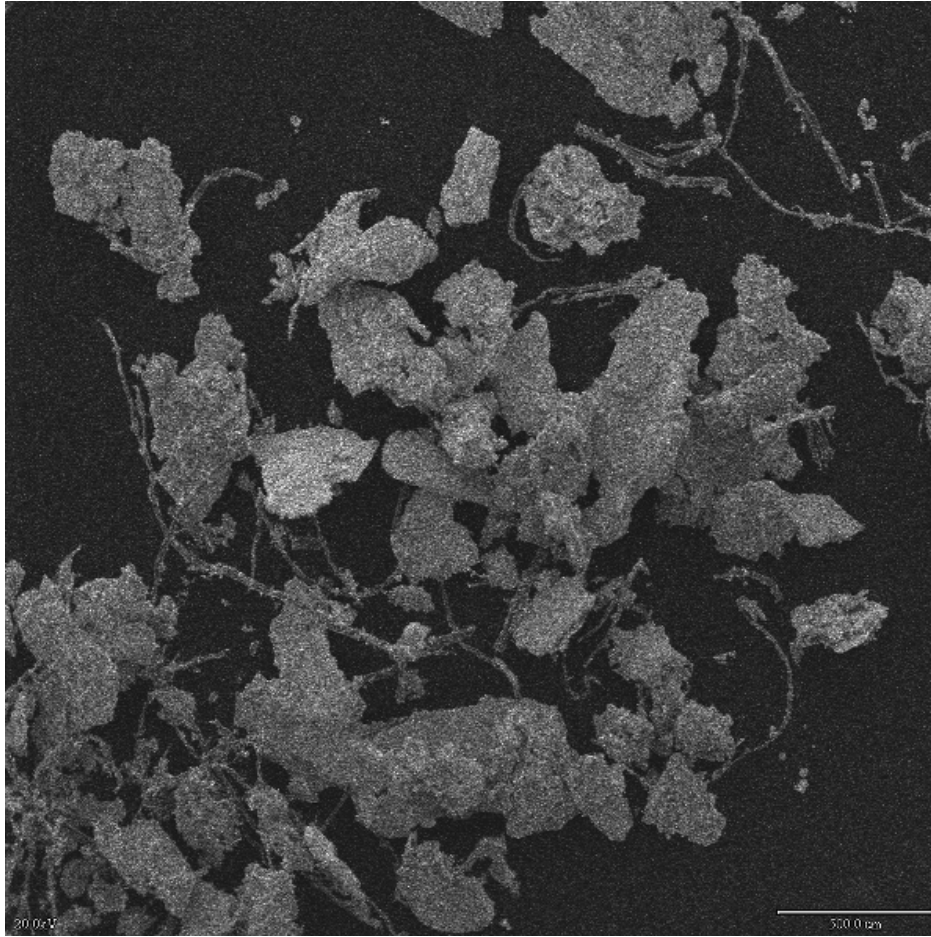


Şekil 4.4. Hidrojen gazı kullanılarak yapılan indirgeme metoduyla elde edilen platin partiküllerine ait FTIR spektrumu

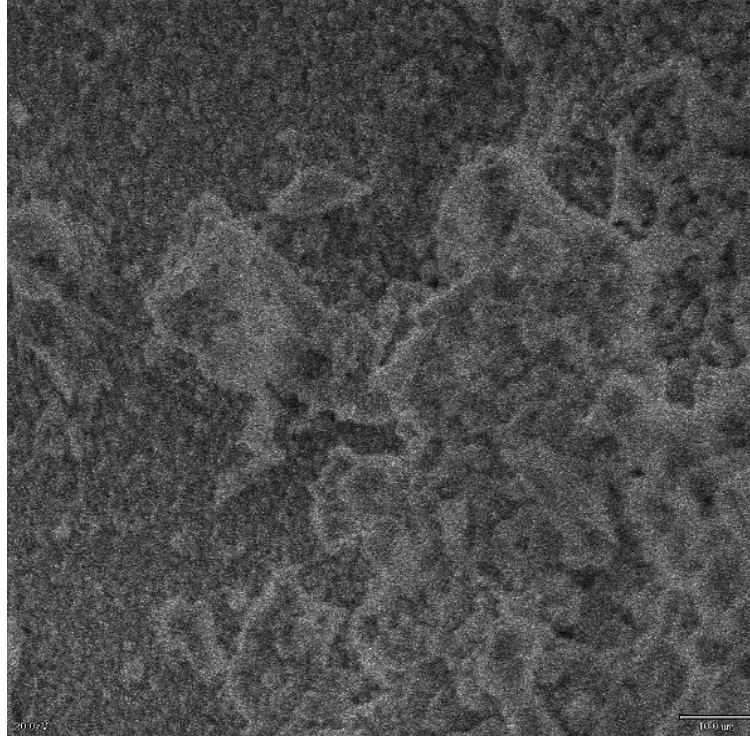
## 4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları

### 4.2.1. Hidrazin Kullanılarak Yapılan İndirgeme Metodu ile Hazırlanmış Platin Partiküllerinin SEM Sonuçları

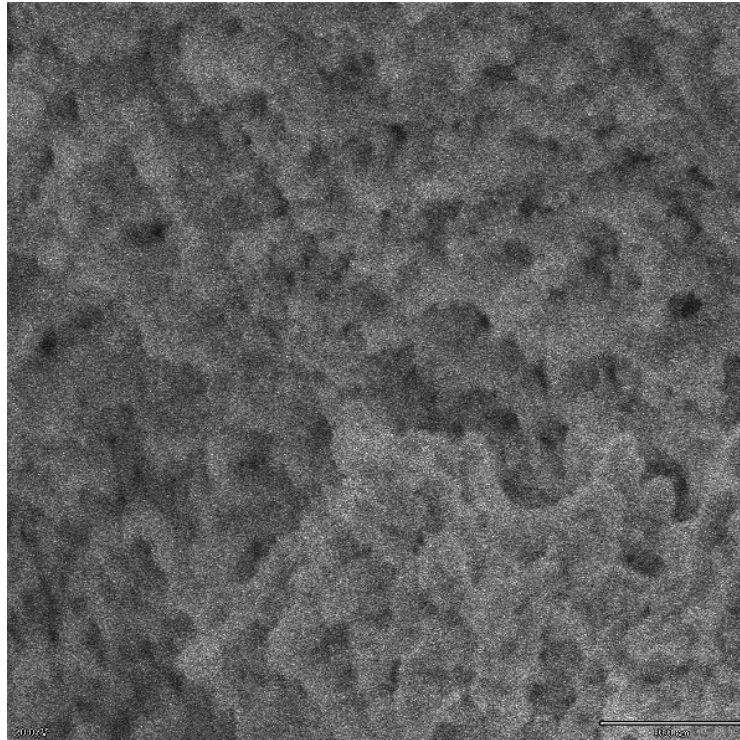
Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 hidrazin ile indirgenmiş ve sonrasında etüvde 100 °C sıcaklıkta kurutulmuş platin partiküllerine ait SEM görüntüleridir. Burada Şekil 4.5 x35 kat, Şekil 4.6 x1000 kat ve Şekil 4.7 x2000 kat büyütme oranlarıyla elde edilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde indirgenmiş platin partiküllerinin kümeleşmiş bir yapıda olduğu ve iyi bir dağılım elde edilemediği görülmektedir. Partiküllerin boyutunun ise yaklaşık 300 nm değerinde olduğu saptanmıştır.



Şekil 4.5. Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü (x35 büyütme)

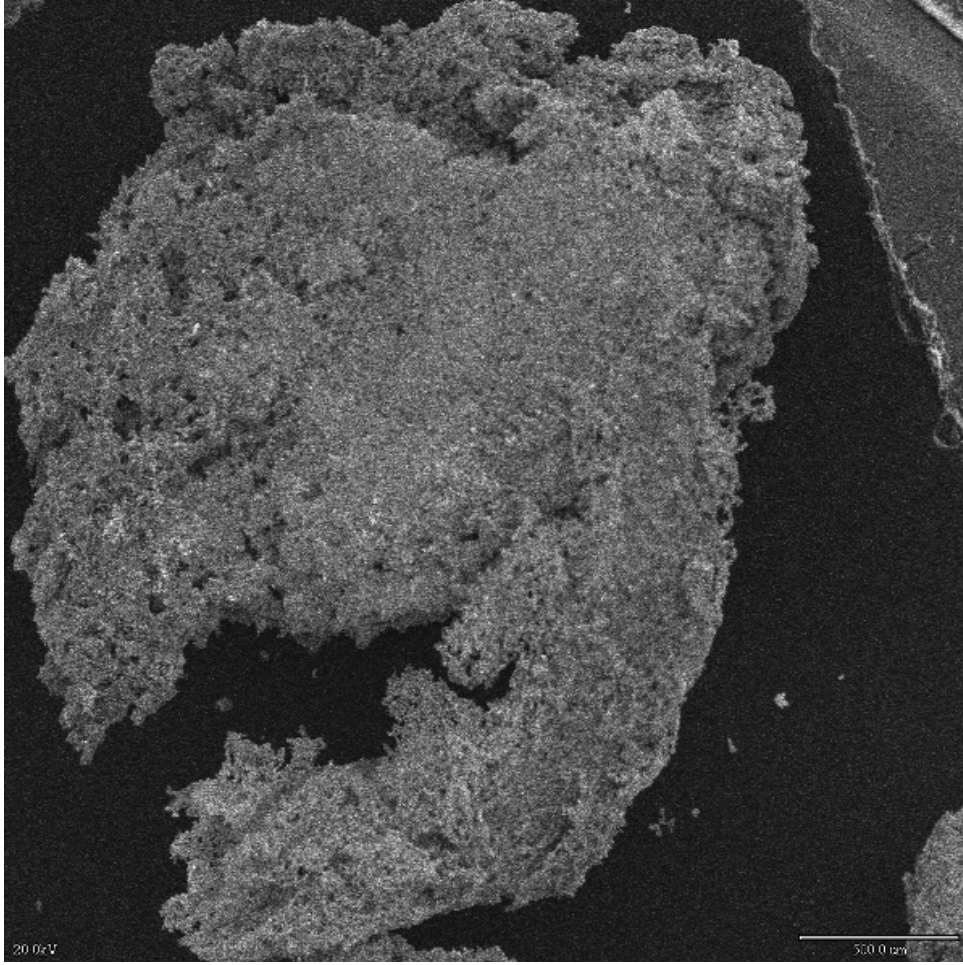


Şekil 4.6. Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü (x1000 büyütme)

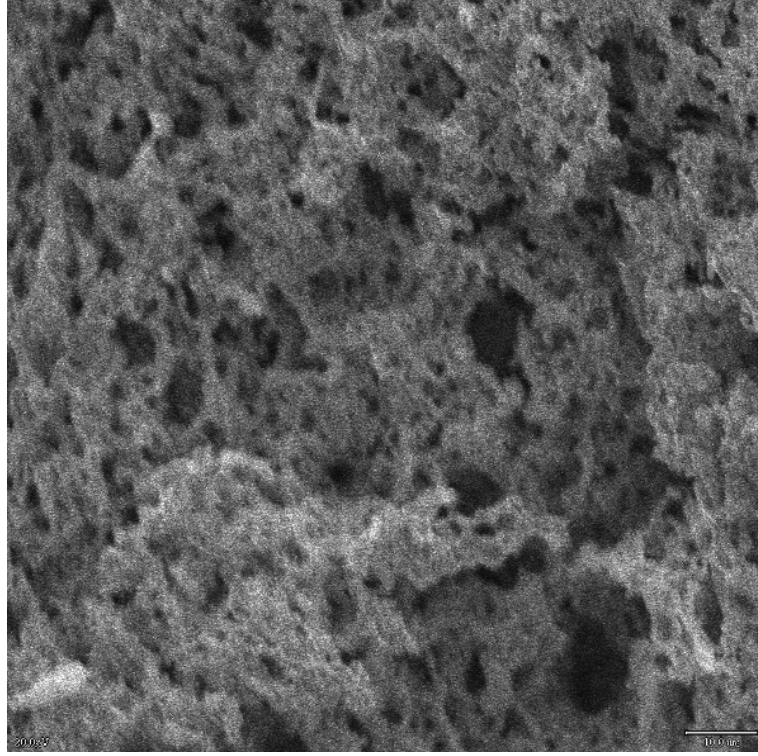


Şekil 4.7. Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme)

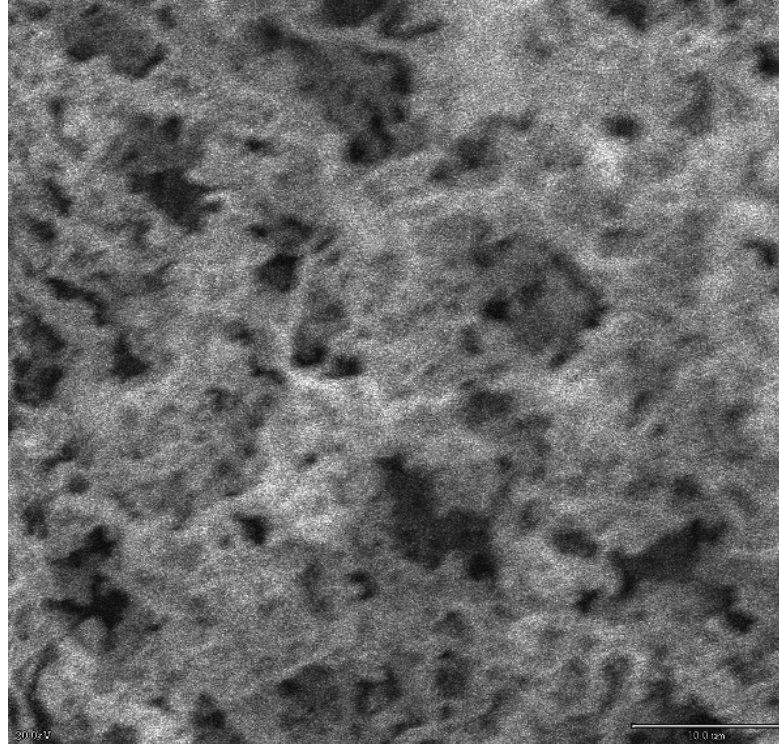
Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 hidrazin ile indirgenmiş ve sonrasında kül fırınında 800 °C sıcaklıkta kurutulmuş platin partiküllerine ait SEM görüntüleridir. Burada Şekil 4.8 x35 kat, Şekil 4.9 x1000 kat, Şekil 4.10 x2000 kat ve Şekil 4.11 x2000 kat büyütme oranlarıyla elde edilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde özellikle Şekil 4.8’de indirgenmiş platin partiküllerinin büyük bir topaklanmış yapı oluşturduğu görülmektedir. Bu durum istenen platin partiküllerinin elde edilemediğini, dağılımın kötü olduğunu göstermektedir. Topaklanma nedeniyle platin partiküllerinin boyut tespiti de yapılamamıştır. Sadece partikül boyunun istenen küçüklükte olmadığı anlaşılmaktadır.



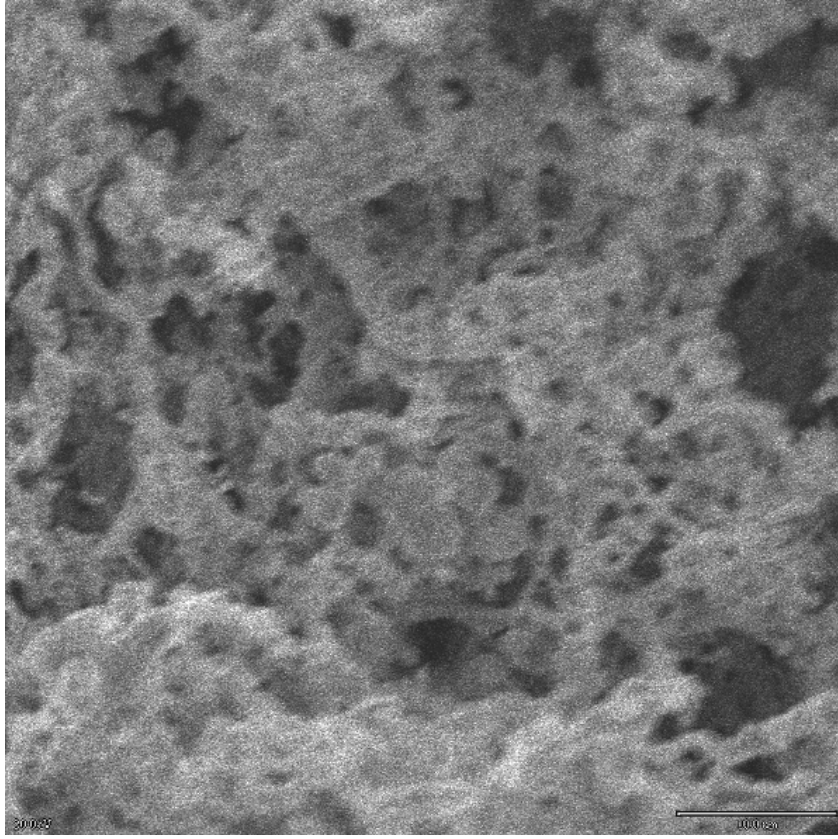
Şekil 4.8. Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 800 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü (x35 büyütme)



Şekil 4.9. Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 800 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü (x1000 büyütme)



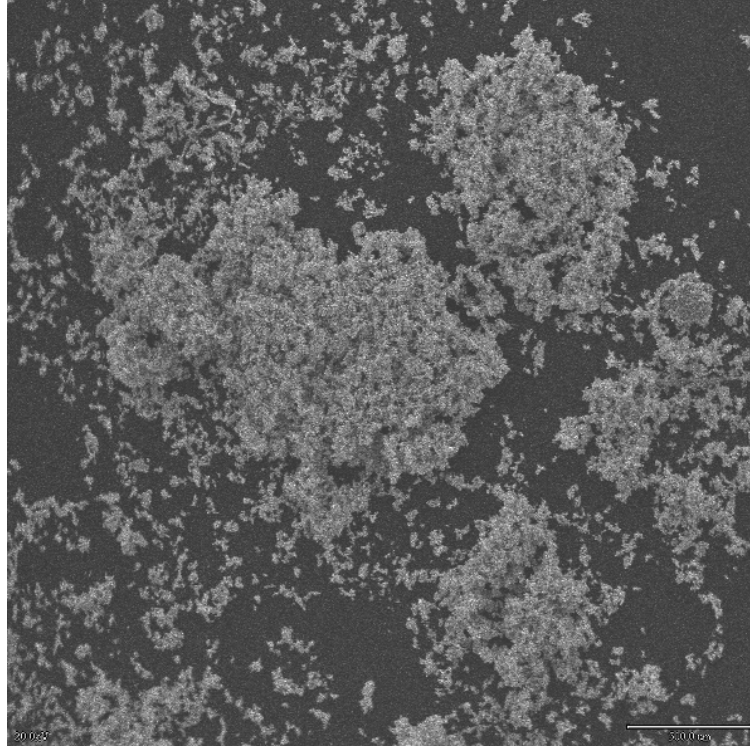
Şekil 4.10. Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 800 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme)



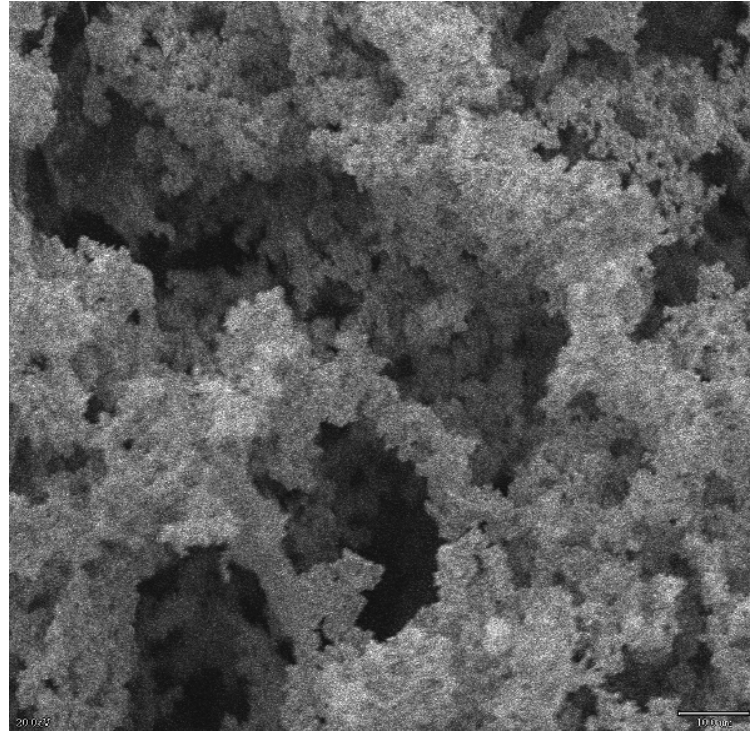
Şekil 4.11. Hidrazin kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 800 °C sıcaklıkta kurutulmuş platin partiküllerine ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme)

#### 4.2.2. Hidrojen Gazı Kullanılarak Yapılan İndirgeme Metodu ile Hazırlanmış Platin Partiküllerinin SEM Sonuçları

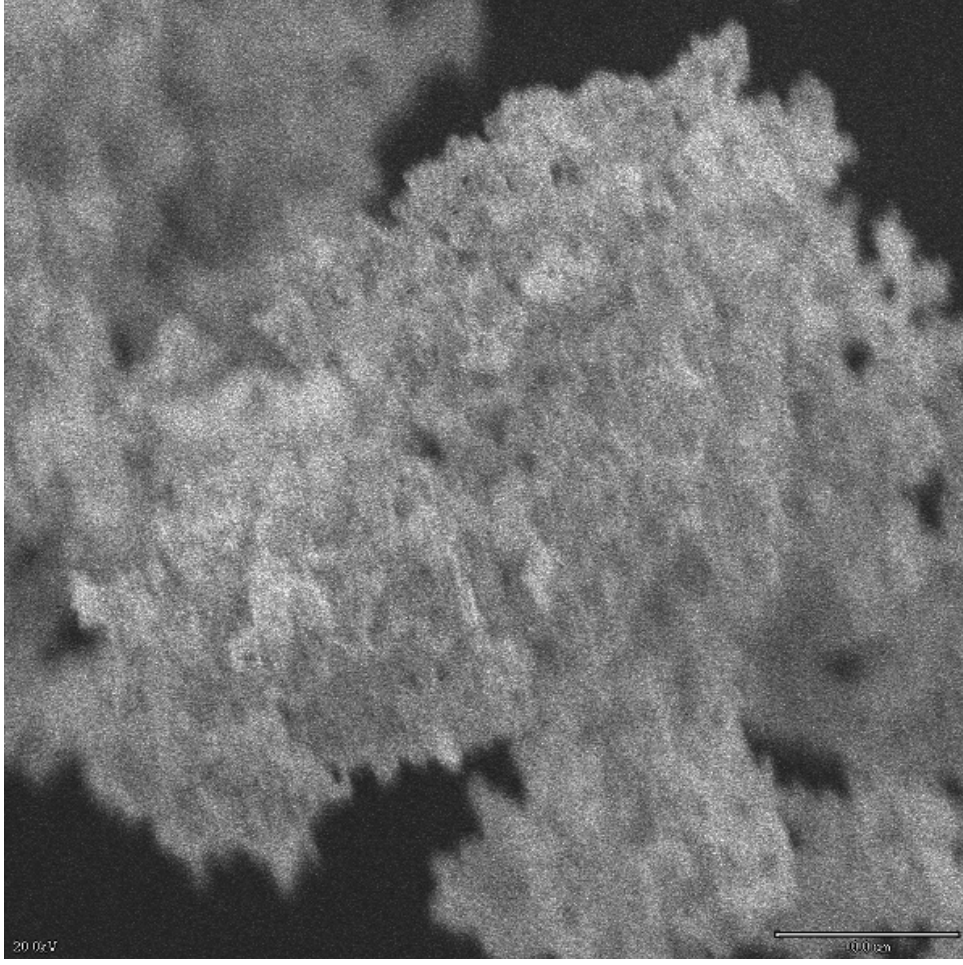
Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 hidrojen gazı kullanılarak indirgenmiş ve etüvde 100 °C sıcaklıkta kurutulmuş platin partiküllerine ait SEM görüntüleridir. Burada Şekil 4.12 x35, Şekil 4.13 x1000 ve Şekil 4.14 x2000 kat büyütme oranlarıyla elde edilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde hidrazinle sentezlenen platin partiküllerine göre daha küçük partikül boyutunun ve katalitik etkiyi arttıracak daha iyi bir dağılımın elde edildiği görülmektedir. Sentezleme aşamasında partiküllere uygulanan ayrıştırma işleminin etkisi nedeniyle bu sentezde daha başarılı olunduğu görülmüştür. Partiküllerin boyutunun ise yaklaşık 40-50 nm değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.12. Hidrojen gazı kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü (x35 büyütme)



Şekil 4.13. Hidrojen gazı kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü (x1000 büyütme)



Şekil 4.14. Hidrojen gazı kullanılarak yapılan indirgeme sonrasında 100 °C sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerine ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme)

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yakıt hücrelerinde karşılaşılan en büyük sorunlardan birisi platin aktivitesidir. Katalizörlerde kullanılan platin partikülleri mümkün mertebede küçük boyutlu olmalı ve iyi bir dağılım elde edilmelidir. Böylece daha fazla katalitik reaksiyon gerçekleşir ve elektrik üretimi dolayısıyla da yakıt hücresinin verimi artar. Ayrıca daha az platin kullanımıyla da maliyet düşürülmüş olur.

Deneysel çalışmada katalizörlerde kullanılacak en küçük boyutlu ve en iyi dağılımlı platin partiküllerinin sentezi araştırılmıştır. Bunun için optimum koşullar eşliğinde iki indirgeme metodu seçilmiştir. Birinci metotta indirgen olarak hidrazin kullanılmış ve indirgenme sonrası platin partikülleri üzerinde iki farklı kurutma işlemi uygulanmıştır. İlk kurutma işleminde numuneler etüvde 100 °C'de yarım saat kurutulmuştur. İkinci kurutma işleminde numuneler kül fırınında 800 °C'de 2 saat kurutulmuştur. İkinci metotta ise indirgen olarak olarak hidrojen gazı kullanılmıştır. Kurutma aşamasında ise etüvde 100 °C'de yarım saatlik tek çeşit kurutma işlemi uygulanmıştır. İndirgenme ve temizlenme sonrası uygun koşullarda kurutulan numuneler önce FTIR spektroskopi cihazı ile incelenmiş ve spektrumları alınmıştır. Sonra SEM mikroskobu görüntüleri alınarak partiküllerin boyut, yapı ve dağılımları hakkında bilgi edinilmiştir.

İlk önce herhangi bir işlem uygulanmamış potasyum heksakloroplatinata ait spektrum alınmıştır. Bu spektrum diğer numunelerin değerlendirilmesi için referans olarak kullanılmıştır. Spektrumda 2922  $\text{cm}^{-1}$ , 2853  $\text{cm}^{-1}$ , 2163  $\text{cm}^{-1}$ , 1700  $\text{cm}^{-1}$  ve 1223  $\text{cm}^{-1}$  pikleri referans pikler olarak alınmıştır.

Hidrazin ile indirgenmiş ve 100 °C sıcaklıkta etüvde kurutulmuş platin partiküllerinin spektrumunda referans spektrumdaki hiçbir pik görülmemiştir. Bu durum elde edilen maddenin saf platin olduğunu, platinin potasyum heksakloroplatinattaki bütün bağlardan ayrıştığını göstermektedir. Bu partiküllerin SEM görüntülerinde ise yapının kümeleştiği, dağılımın iyi olmadığı görülmüştür. Platin partikül boyutu 300 nm olarak tespit edilmiştir. Bu değer yeterli küçük boyutta platin elde edilemediğini göstermektedir.

Hidrazin ile indirgenmiş ve 800 °C sıcaklıkta kül fırınında kurutulmuş platin partiküllerinin spektrumunda referans spektrumdaki pikler oluşmamıştır. Spektrumda görünen 3245  $\text{cm}^{-1}$  piki Pt-O titreşim bandını, 1624  $\text{cm}^{-1}$  piki ise Pt-O-O-Pt titreşim bandını göstermektedir. Kül fırınında kurutma işlemi sırasında partiküllerde topaklaşma ve oksitlenme oluşması nedeniyle ve yüksek sıcaklıkta kurutulan platin partiküllerindeki bağ yapılarının bozulması nedeniyle bu spektrumda referans spektrumdaki piklere rastlanılamamıştır. Bu numunenin SEM

görüntülerinde yapıda büyük bir topaklaşma görülmüştür. Bu nedenle partikül boyutu tespit edilememiş sadece partiküllerin yeterince küçük olmadığı anlaşılmıştır. Topaklaşma nedeniyle iyi bir dağılım elde edilememiştir.

Hidrojen gazı ile indirgenmiş ve 100 °C sıcaklıkta etüvde kurutulmuş platin partiküllerinin spektrumunda elde edilen 3420  $\text{cm}^{-1}$ , 3145  $\text{cm}^{-1}$ , 2922  $\text{cm}^{-1}$ , 2853  $\text{cm}^{-1}$  ve 1223  $\text{cm}^{-1}$  pikleri K-Cl, Cl-Cl ve Cl-Pt titreşim bantlarını göstermektedir. Burada referans spektrumdaki bağ yapılarını gösteren pikler görülmektedir. Bu da elde edilen platinin tam olarak saflaştırılmadığını göstermektedir. Bu durum potasyum heksakloroplatinatın hidrojen gazı ile tam olarak indirgenememesinden ve reaksiyon sonrası platin partiküllerini dietil eter ile yıkama işleminin tam olarak gerçekleştirilememesinden kaynaklanmıştır. Bu numunenin SEM görüntülerinde partiküllerin dağılımının oldukça iyi bir şekilde olduğu görülmüştür. Partikül boyutu ise 40-50 nm olarak tespit edilmiştir.

Bu sonuçlara göre en iyi dağılımlı ve en küçük boyutlu platin partikülleri hidrojen gazı ile indirgenmiş ve 100 °C sıcaklıkta etüvde kurutulmuş metot ile elde edilmiş olmasına karşın nano boyuttaki platin partiküllerini reaksiyon sonrası ayrıştırma ve kurutma işlemi oldukça zordur. Bu nedenle spektrumlarda diğer fonksiyonel gruplar hala bulunmaktadır. Bunların giderilmesi için hidrojen gazı sisteme verilirken azot gazı ile jel ortamının daha fazla karıştırılması ve daha homojen bir karışımın sağlanması gerekmektedir. Çalışmamızda saf platin partikülleri hidrazin ile indirgenip 100 °C'de kurutma metodu ile elde edilmiştir. Fakat partikül boyutları 300 nm gibi büyük bir değerdedir.

Bu iki yöntem karşılaştırıldığında hidrojen gazı ile nano boyutta platin partikülleri elde etmek mümkündür. Fakat karşılaşılan en büyük problem oluşan partiküllerin bulunduğu ortamdan izole edilmesi ve saflaştırılmasıdır. Buradan partikül dağılımına ve boyut büyüklüğüne; işlem esnasında kullanılan indirgen maddenin cinsinin, sentez sonrası partiküllere uygulanan ayrıştırma işleminin, partikülleri yıkama işleminin ve kurutma sıcaklığının oldukça fazla etki ettiği gözlenmiştir.

**KAYNAKLAR**

- Akınç, O., (2008), Yakıt Hücreleri İçin Bipolar Kompozit Tabaka Hazırlanması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- Barbır, F., (2005), PEM Fuel Cells, Theory and Practice, Elsevier Academic Press.
- Berkem, A. R., (1993), Elektrokimya, İstanbul Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- Beyribey, D. B., (2006), H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> Yakıt Pillerinde PtRu/C ve PtIr/C Kompozit Elektrotların Sentezi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Bilaloğlu, S., (2006), Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresi Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi ve Nafion 115 Proton Değişim Zarı Kullanılarak Üretilen Yakıt Hücrelerinin Performans Verilerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi.
- Blomen, L. ve Mugerwa, M. N., (1993), Fuel Cell Systems, Plenum, New York.
- Bonet, F., Guery, C., Guyamard, D., Urbina, R. H., Tekaiia Elhsisen, K. ve Tarascon, J. M., (1999), "Electrochemical Reduction of Noble Metal Compounds in Ethylene Glycol", International Journal of Inorganic Materials, 1, 47, 51.
- Choi, J. H., Park, K. W., Park, I. S., Nam, W. H. ve Sung, Y. E., (2004), "Methanol Electro-Oxidation and Direct Methanol Fuel Cell Using Pt/Rh and Pt/Ru/Rh Alloy Catalysts", Electrochimica Acta, 50: 787-790.
- Choi, J. S., Chung, W. S., Ha, H. Y., Lim, T. H., Oh, I. H., Hong, S. A. ve Lee, H. I., (2006), "Nano-Structured Pt-Cr Anode Catalyst Over Carbon Support for Direct Methanol Fuel Cell", Journal of Power Sources, 156: 466-471.
- Çalışkan, N., (2007), Karbon Destekli Platin ve Platin İkinci Metal Nano Partiküllerin Etilen Glikol İndirgenmesi ile Hazırlanması ve Tanımlanması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- Çavuşoğlu, A., (2005), Yakıt Pilleri ve Kullanım Alanları, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi.
- Devrim, Y., (2006), Alternatif Yöntemler Kullanılarak Proton Değişim Membran Yakıt Hücreleri İçin Yeni Membranların Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi.
- Fırtına, İ., (2008), Doğrudan Metanol Yakıt Pillerinde Kullanılacak Yeni Katalizörlerin Hazırlanması ve Tanımlanması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- Fievet, F., Lagier, J. P. ve Blin, B., (1989), "Homogeneous and Heterogeneous Nucleations in the Polyol Process for the Preparation of Micron and Submicron Size Metal Particles", Solid State Ionics, 32 (33): 198-205.
- Gottesfeld, S. ve Zawodzinski, T. A., (1997), In Advances in Electrochemical Science and Engineering, Wiley-VCH Verlag GMBH, Weinheim, Almanya.
- Hea, G., Zhao, Z., Ming, P., Abuliti, A., Yin, C., (2007), "A Fractal Model for Predicting Permeability and Liquid Water Relative Permeability in the GDL of PEMFC", Journal of Power Sources, 163: 846-852.
- Hoogers, G., (2002), Fuel Cell Technology Handbook First Edition, CRC Press, 2.2-2.38, Florida.
- Kim, T., Takahashi, M., Nagai, M. ve Kobayashi, K., (2004), "Preparation and Characterization of Carbon Supported Pt and Pt-Ru Alloy Catalysts Reduced by Alcohol for Polymer Electrolyte Fuel Cell", Electrochimica Acta, 50: 817-821.

- Kurtcephe, B., (2006), Tek Hücreli Doğrudan Metanol Yakıt Pillerinin Geliştirilmesi ve Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi.
- Liu, H., Song, C., Zhang, L., Zhang, J., Wang, H. ve Wilkinson, D. P., (2006), “A Review of Anode Catalysis in the Direct Methanol Fuel Cell”, *Journal of Power Sources*, 155: 95-110.
- Liu, Z., Ling, X. Y., Su, X. ve Lee, J. Y., (2004), “Carbon Supported Pt and Pt-Ru Nanoparticles as Catalysts for a Direct Methanol Fuel Cell”, *Journal of Physical Chemistry B*, 108: 8234-8240.
- Magnet, H. J. R., (1968), *Handbook of Fuel Cell Technology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 425, New Jersey, Amerika.
- Oğuz, A. E., (2006), Hidrojen Yakıt Pilleri ve PEM Yakıt Pilinin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- Park, K. W., Choi, J. H., Lee, S. A., Pak, C., Chang, H. ve Sung, Y. E., (2004), “Pt-Ru-Rh-Ni Nanoparticle Electrocatalyst for Methanol Electro-Oxidation in Direct Methanol Fuel Cell”, *Journal of Catalysis*, 224: 236-242.
- Scott, D. S. ve Hafele, W. J., (1990), *Hydrogen Energy*, 15, 10.
- Stobart, R. K., (2004), *Fuel Cell Technology for Vehicles 2002-2004*, Second Edition: 584.
- Şahin, A., (2007), Yakıt Hücrelerinde Kullanılmak Üzere Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Kompozit Membran Sentezi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- Wang, Z. B., Ping, G. P. ve Shi, P. F., (2006), “Effects of Ozone Treatment of Carbon Support on Pt-Ru/C Catalysts Performance for Direct Methanol Fuel Cell”, *Carbon* 44: 133-140.
- Xu, C., Zhao, T. S. ve Ye, Q., (2006), “Effect of Anode Backing Layer on the Cell Performance of a Direct Methanol Fuel Cell”, *Electrochimica Acta*, 51: 5524-5531.
- Xue, X., Lu, T., Liu, C., Xu, W., Su, Y., Lv, Y. ve Xing, W., (2005), “Novel Preparation Method of Pt-Ru/C Catalyst Using Imidazolium Ionic Liquid as Solvent”, *Electrochimica Acta*, 50: 3470-3478.
- Yang, B., Lu, Q., Wang, Y., Zhuang, L., Lu, J. ve Liu, P., (2003), “Simple and Low Cost Preparation Method for Highly Dispersed Pt-Ru/C Catalysts”, *Chemistry of Materials*, 15: 3552-3557.

## İNTERNET KAYNAKLARI

- [1] [http://iats09.karabuk.edu.tr/press/bildiriler\\_pdf/IATS09\\_03-01\\_1480.pdf](http://iats09.karabuk.edu.tr/press/bildiriler_pdf/IATS09_03-01_1480.pdf)
- [2] <http://www.fz-juelich.de/iwv/iwv3/index.php?index=118>
- [3] [http://www.kimyasanal.net/sorugoster.php?soru\\_id=3366](http://www.kimyasanal.net/sorugoster.php?soru_id=3366)
- [4] [http://www.telexshop.com/images/inf\\_sablon.jpg](http://www.telexshop.com/images/inf_sablon.jpg)
- [5] <http://www.kimyaturk.net/index.php?topic=27035.new>
- [6] <http://www.istanbul.edu.tr/merkezler/itl/CihazFtir.html>
- [7] <http://www.andersonmaterials.com/images/ftir.jpg>
- [8] <http://www.istanbul.edu.tr/eng2/metalurji/sem.htm>
- [9] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:SEM\\_chamber1.JPG](http://en.wikipedia.org/wiki/File:SEM_chamber1.JPG)

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum Tarihi	13.08.1982	
Doğum Yeri	Tekirdağ	
Lise	1996-1999	Sefaköy Lisesi
Lisans	1999-2000	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yabancı Diller Bölümü Yabancı Dil Hazırlık (İngilizce)
	2000-2001	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü
	2001-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2004-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

**Çalıştığı Kurumlar**

2010-Devam ediyor TGS Yer Hizmetleri A.Ş.