

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALKALİ ELEKTRÖLİZÖRLERDE VOLTAJ
DARBESİNİN HİDROJEN ÜRETİMİ İÇİN GEREKLİ
OLAN ENERJİYE ETKİSİ**

**Hazırlayan
Mhmd Salah Aldin ALBAWABIJI**

**Danışman
Doç. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR**

Yüksek Lisans Tezi

**Eylül 2017
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALKALİ ELEKTROLİZÖRLERDE VOLTAJ
DARBESİNİN HİDROJEN ÜRETİMİ İÇİN GEREKLİ
OLAN ENERJİYE ETKİSİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Mhmd Salah Aldin ALBAWABIJI**

**Danışman
Doç. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR**

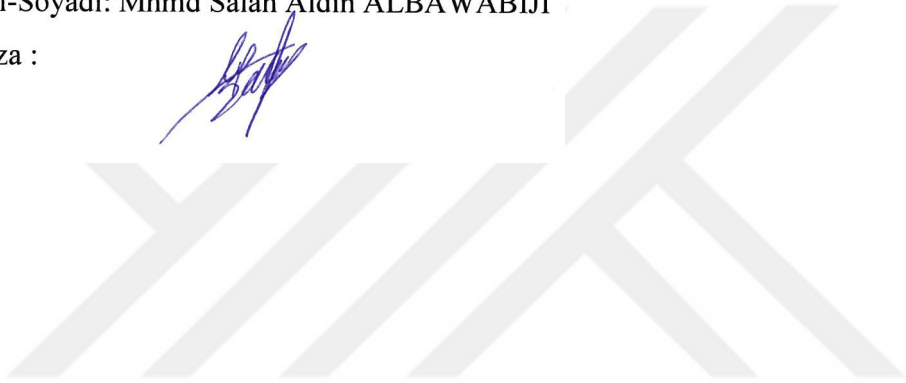
**Eylül 2017
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Mhmd Salah Aldin ALBAWABIJI [

İmza :



YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Alkali Elektrolizörlerde Voltaj Darbesinin Hidrojen Üretimi İçin Gerekli Olan Enerjiye Etkisi” adlı Yüksek Lisans tezi Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.



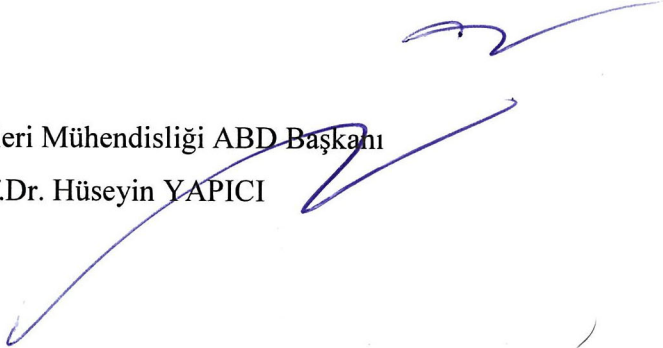
Tezi Hazırlayan

Mhmd Salah Aldin ALBAWABIJI



Danışman

Doç. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR



Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Doç. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR danışmanlığında **Mhmd Salah Aldin ALBAWABIJI** tarafından hazırlanan “**ALKALİ ELEKTROLİZÖRLERDE VOLTAJ DARBESİNİN HİDROJEN ÜRETİMİ İÇİN GEREKLİ OLAN ENERJİYE ETKİSİ**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

05 /09 / 2017

JÜRİ:

Başkan : Doç.Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR

Üye : Yrd. Doç.Dr. Gülşah ELDEN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Muhammet ÇELİK

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 13.10.2017 tarih ve 2017/44-27 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Mehmet AKKURT

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında yardım ve desteklerini esirgemeyerek beni cesaretlendiren değerli danışman hocam Sn. Doç. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR’e, çalışmalarımın başarılı bir şekilde yürümesi için her türlü olanağı sağlayarak deneyimleriyle her zaman yanımda olan Sn. Öğr. Gör. Mehmet Fatih KAYA’ya teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca moral ve motivasyon konusunda her zaman yanımda olan, bilgi paylaşımlarını eksik etmeyen, maddi, manevi her türlü desteklerinden ötürü Sn. Öğr. Gör. Abdullah Tuncay ÖZŞAHİN’e teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı’na sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca; bugüne kadar ki bütün çalışmalarım süresince sabır göstererek, beni daima destekleyen ve yanımda olan çok değerli aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mhmd Salah Aldin ALBAWABIJI

Kayseri, Eylül- 2017

ALKALİ ELEKTROLİZÖRLERDE VOLTAJ DARBESİNİN HİDROJEN ÜRETİMİ İÇİN GEREKLİ OLAN ENERJİYE ETKİSİ

Mhmd Salah Aldin ALBAWABIJI

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Eylül 2017

Danışman: Doç. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR

ÖZET

Hidrojen evrende genel olarak hidrokarbon ya da su bileşikleri halinde bulunur ve hidrojenin buradan ayrıştırılması için yeterli bir enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Teorik olarak hidrojenin elde edilmesi için sisteme verilen enerji, elde edilen hidrojenin enerji yoğunluğundan daha fazladır. Pratikte gereken enerji ihtiyacını manyetik alan, mekanik karıştırma, ses, ışık ve voltaj darbesi gibi çeşitli fiziksel etkilerle performans artışı sağlanarak azaltmak mümkündür. Bu çalışmada, alkali su elektrolizörleri için geliştirilen elektronik devre sayesinde oluşturulan darbe voltajının etkisi deneysel incelenerek, optimum frekans ve voltaj ifadeleri ortaya çıkarılmıştır. Bu amaçla DC akımla sağlanan hidrojen üretimi voltaj darbeleriyle aynı voltajda sisteme sağlanarak tüketilen enerji ortaya hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlardan ağırlıkça %10 potasyum hidroksit çözeltisi 6V'luk DC akımla hidrojen üretimi sağlandığında yaklaşık 40.3 J/ml enerji tüketimi gözlenmiştir. Ancak darbe voltajı durumunda yapılan deneylerde 220 kHz ve %10 görev döngüsü durumunda yaklaşık 31 J/ml enerji gereksinimi, aynı frekansta ve %50 görev döngüsü ile yaklaşık 37.7 J/ml enerji tüketimi olduğu görülmüştür. Aynı zamanda 1100 kHz'te ve %50 görev döngüsü ile de enerji tüketimi 31 J/ml olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak darbe voltajı sayesinde hücre voltajının düşmesi ve performans artışının sağlanabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen Enerjisi, Suyun Elektrolizi, Alkali Elektrolizör, Darbe Voltajı

THE EFFECT OF PULSE VOLTAGE AT HYDROGEN PRODUCTION BY ALKALINE WATER ELECTROLYZERS

Mhmd Salah Aldin ALBAWABIJI

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M. Sc. Thesis, September 2017

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR

ABSTRACT

On our Planet the hydrogen is mainly located in compounds such as hydrocarbons, water, etc. and proper energy needed to release hydrogen from them. In principle the amount of consumed energy is always greater than the energy which can be extracted from the hydrogen, in the real operating condition it is possible to reduce consumed energy by increasing water electrolysis cell performance to produce hydrogen by applying magnetic field to the electrolysis cell, mixing solution by mechanical method or by applying ultrasound wave to electrolysis cell, applying pulse voltage instead of DC voltage. In this study, the effect of the pulse voltage, which provided by the developed electronic circuit system for alkaline water electrolysis systems was revealed by examining the optimum frequency and duty cycle. For this purpose, the consumed energy by applying DC voltage and frequency controlled pulsed voltage to produce the same amount of hydrogen has been calculated. The result of this study, for alkaline water electrolysis by using wt%10 potassium hydroxide solution as an electrolyte and applying 6V DC voltage to the cell it consumed about 40.3 J to produce 1 ml of hydrogen while it consumed 31 J/ml by applying pulsed voltage at 220 kHz with %10 duty cycle, at the same frequency with %50 duty cycle it consumed 37.7 J/ml at the same time it consumed 31 J/ml at 1100 kHz with %50 duty cycle. As a result, the pulse voltage can decrease voltage drops and increase the cell performance.

Keywords: Hydrogen Energy, Water Electrolysis, Alkaline Electrolysis, Pulse Voltage.

İÇİNDEKİLER

ALKALİ ELEKTROLİZÖRLERDE VOLTAJ DARBESİNİN HİDROJEN ÜRETİMİ İÇİN GEREKLİ OLAN ENERJİYE ETKİSİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
ÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii

1. BÖLÜM

GİRİŞ ve LİTERATÜR TARAMASI

2. BÖLÜM

HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

2.1 Reformasyonlu Hidrojen Üretim Yöntemleri.....	5
2.1.1 Hidrokarbonların Buharla Reformasyonu	5
2.1.2 Kükürtsüzleştirme Prosesi	6
2.1.3 Piroлиз Yöntemi	7
2.1.4 Plazma Reformasyonu.....	7
2.1.5 Amonyak Reformasyonu.....	8
2.2 Reformasyonsuz Hidrojen Üretim Yöntemleri	8
2.2.1 Biyokütleden Hidrojen Üretim Yöntemi	8
2.2.2 Sudan Hidrojen Üretimi.....	9

3. BÖLÜM

SUYUN ELEKTROLİZİ

3.1 Elektroliz Teorisi	10
------------------------------	----

3.2 Enerji ve Gerilim İfadeleri	12
3.2.1 Enerji Tüketimi.....	12
3.2.2 Aşırı Potansiyel Eşitlikleri	12
3.2.3 Teorik Hücre Voltajının İfadesi	13
3.3 Kabarcık Teorisi.....	15

4. BÖLÜM

DARBE POTANSİYELİ İLE SUYUN ELEKTROLİZİ

4.1 Elektriksel Verimliliği Etkileyen Parametreler	17
4.1.1 Elektrolit Kalitesi.....	17
4.1.2 Sıcaklık.....	18
4.1.3 Basınç	18
4.1.4 Elektrolitin elektrik direnci	18
4.1.5 Elektrot Malzemesi.....	19
4.1.6 Uygulanan Gerilimin Dalga Geometrisi	20
4.2 Darbe Üretimi	21
4.2.1 Maksimum Bölgeden Ayrılan Darbeler.....	21
4.3 AC Voltaj ile Elektroliz Uygulaması	21
4.4 Elektroliz Sistemlerinde Darbe Potansiyeli İhtiyacı	21
4.4.1 Sinyal Genişlik Modülasyonu ve Görev Döngüsü.....	22
4.4.2 Darbe Elektroliz Sistemleri.....	22
4.4.3 Darbe İçin Geliştirilen Deneysel Yöntemler.....	23

5. BÖLÜM

DENEYSEL KURULUM VE EKİPMAN SEÇİMİ

5.1 Deneysel Metod.....	26
5.2 Deneysel Çalışma ve Sonuçlar	28
5.3 Sonuçlar.....	40
5.3.1 6V'luk hücre gerilimi koşullarında elde edilen sonuçlar:.....	41
5.3.2 8V'luk hücre gerilimi koşullarında elde edilen sonuçlar:.....	43
5.3.3 10V'luk hücre gerilimi koşullarında elde edilen sonuçlar:.....	44
5.4 Frekansın Bir Fonksiyonu Olarak, Farklı Voltaj Değerlerinde Birim Zamanda Üretilen Hidrojen Miktarları.....	46

5.4.1 6V DC ve %10 ve %50 Görev Döngüsü İle DV Uygulandığında Birim Zamanda Üretilen Hidrojen Miktarı	46
5.4.2 8V DC ve %10-%50 Görev Döngüsü ile DV Uygulandığında Birim Zamanda Üretilen Hidrojen Miktarı	47
5.4.3 10V DC ve %10-%50 Görev Döngüsü ile DV Uygulandığında Birim Zamanda Üretilen Hidrojen Miktarı	47

6. BÖLÜM

TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ.....	60

KISALTMALAR VE SİMGELER

Sembol	Anlamı
POX	Kısmı Oksidasyon
ATR	Otomatik Termal Reformasyonu
SGD	Su-Gaz-Dönüşümlü
HDS	Hidrodesülfürizasyon
OER	Anodik Reaksiyon
HER	Katodik Reaksiyonu
HHV	Yüksek Isıtma Değeri
ΔH_{reak}	Reaksiyon entalpisi
T	Termodinamik sıcaklık
ΔG_{reak}	Gibbs serbest enerjisindeki değişim
ΔS_{reak}	Reaksiyon entropisi değişimi
E_{teorik}	Teorik enerji tüketimi
N	Mol sayısı
F	Faraday sayısı
R_{anot}	Anot yüzeyindeki oksijen üretim reaksiyonlarından dolayı ortaya çıkan direnç
R_{kab,O_2}	Anot yüzeyinde kaplanan kabarcıklardan kaynaklanan direnç
R_{ion}	Elektrolit içerisindeki iyonik direnç
$R_{membran}$	Katot yüzeyine kaplanan hidrojen kabarcıklarından dolayı direnci
R_{kab,H_2}	Katot yüzeyine kaplanan hidrojen kabarcıklarından dolayı direnci
R_{katot}	Hidrojen reaksiyonları için oluşan direnç
I	Akım
U	Voltajı
$\eta_{Faradic}$	Faradik verimlilik
$\eta_{Thermal}$	Termal verimlilik
$E_{Kayıp}$	Enerji kaybı

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Hidrojen üretim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları	6
Tablo 3.1 Farklı su elektrolizi türleri için temel kimyasal reaksiyonlar ve çalışma sıcaklığı aralığı.	11
Tablo 5.1 Deneyler sonuçlarının karşılaştırılması	41



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Temel bir su elektroliz sisteminin şematik bir gösterimi	11
Şekil 3.2 Elektrolizör hücre potansiyeli ile çalışma sıcaklığı arasındaki ilişki.....	14
Şekil 3.3 Gaz kabarcığının üç fazlı sınır bölgesinde gösterimi.....	16
Şekil 4.1 (a) Sabit DC dalga formu, (b) Düzgün DC dalga formu.....	20
Şekil 4.2 DV dalga formu	20
Şekil 4.3 Sinyal genişlik modülasyonu ve görev döngüsü elde ettiği çeşitli sinyaller	22
Şekil 4.4 Elektriksel darbe için genel özellikler	23
Şekil 4.5 Voltaj dalgasının frekansa bir fonksiyon olarak dalganın şekil değişimi	24
Şekil 4.6 Anahtarlama Yöntemleri a) İzole edilmiş anahtarlama, b) üst taraf anahtarlama, c) alt taraf anahtarlama.....	25
Şekil 5.1 Deneysel elektroliz hücresi	26
Şekil 5.2 MOSFET Sürücü Devresi	27
Şekil 5.3 Ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisine 6 V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	29
Şekil 5.4 Ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisine 6V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	30
Şekil 5.5 Ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisine 8V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	31
Şekil 5.6 Ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisine 8V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	32
Şekil 5.7 Ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	33
Şekil 5.8 Ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	34

Şekil 5.9 Ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisine 6V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	35
Şekil 5.10 Ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisine 6 V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	36
Şekil 5.11 Ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisine 8V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	37
Şekil 5.12 Ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisine 8 V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	38
Şekil 5.13 Ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	39
Şekil 5.14 Ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	40
Şekil 5.15 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 6V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	42
Şekil 5.16 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 6V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	42
Şekil 5.17 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 8V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	43
Şekil 5.18 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 8V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	44
Şekil 5.19 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	45

Şekil 5.20 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.....	45
Şekil 5.21 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 6V DC ve a) %10 görev döngüsü ile b) %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim zamanda üretilen hidrojen miktarı.....	46
Şekil 5.22 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 8V DC ve a) %10 görev döngüsü ile b) %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim zamanda üretilen hidrojen miktarı.....	47
Şekil 5.23 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve a) %10 görev döngüsü ile b) %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim zamanda üretilen hidrojen miktarı.....	48

1. BÖLÜM

GİRİŞ ve LİTERATÜR TARAMASI

Suyun elektrolizi 200 yıl öncesine dayanan eski bir teknolojidir. Bu teknoloji sayesinde hidrojen üretimi kolaylıkla sağlanabilmektedir. Diğer yöntemlerin aksine suyun elektrolizi işlemi basit ve kolay uygulanabilir bir yöntemdir. Suyun doğru akımla elektrolizi yöntemi ile ilgili son yıllarda birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlar sıvı elektrolit kullanan (alkali veya asidik) veya katı elektrolit teknolojisi kullanan çalışmalardır.

Günümüzde hidrojen enerjisi birincil bir enerji kaynağı olmamasına rağmen oldukça rağbet gören bir enerji çeşididir. Hidrojenin üretim maliyetlerinin düşürülmesi, yakıt hücrelerinin enerji üretim pazarında yaygınlaştırılması konusunda önemli bir adımdır. Hidrojen üretim yöntemleri genel olarak reformasyon, kükürtsüzleştirme, piroliz ve suyun elektrolizi gibi temel gruplara ayrılabilir. 21. Yüzyılda yapılan çalışmalarda suyun elektrolizi yüksek ve düşük sıcaklık koşullarında başarılı bir şekilde sağlanabilmektedir. Hidrojen üretiminde ana hedef, hidrokarbonlardan ve fosil yakıtlardan buhar reformasyonu işleminin alternatifi olabilecek yeni bir yöntem geliştirmektir.

Günümüzde temiz, yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarından elektrik üretimi çözülmesi gereken en önemli mühendislik sorunlarından birisidir. Hidrojen enerjisi çözümü sağlayabilecek yenilenebilir enerji kaynaklarından en önemlilerindendir. Bu enerji doğada hazır olarak bulunmamasına rağmen çeşitli hidrokarbonlar ve sudan elde edilebilmektedir [1]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda suyun elektrolizi yüksek ve düşük sıcaklık koşullarında başarı ile sağlanırken ve bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır [2]. Çalışma koşullarının yanında Farrauta ve ark.[3] malzeme geliştirilmesi çalışmalarının da hidrojen üretim teknolojilerinin PEM yakıt

pillerinde kullanılabilirliğini arttıracaklarını ifade etmiştir. Hidrojen üretiminde ana hedef, hidrokarbonlardan ve fosil yakıtlardan buhar reformasyonu işleminin alternatifi olabilecek bir yöntem geliştirmektir. Bu konuda yapılan ekonomik analizler, hidrojen üretiminde daha dengeli bir üretimin sağlanmasını hedeflemektedir. Örneğin Lemus ve ark. [4] düşük hidrojen üretimi için düşük enerji girdisinin ucuz ve verimli elektrik, ucuz malzemeler, uzun ömürlü malzemeler ya da hammaddelerle sağlanabileceğini ifade etmişlerdir.

Günümüzde hidrojen üretimi genel olarak doğalgazdan sağlanmasına karşın yakıt hücrelerinde enerji üretilmesi amacıyla da kullanılabildiğinden metanol, propan, gazolin ve jet-A, dizel, JP8 gibi diğer yakıtlardan da elde edilebilmektedir. Babich and Song [2, 5-7] metanol dışındaki diğer tüm yakıtların bir miktar sülfür içerdiğini ifade etmişlerdir.

Piroliz yoluyla hidrojen üretimi de hidrokarbonlardan hidrojen eldesi için kullanılan diğer bir yöntemdir. Ayrıca bu yöntem herhangi bir organik malzemeden karbon nano tüp, silindir ve hidrokarbon üretimi için de kullanılabilmektedir [8-10].

Hidrokarbonların reformasyonu dışında diğer başka gelişmiş yöntemler de bulunmaktadır. Şu anda biyokütleden hidrojen üretiminde en yaygın kullanılan yöntemler şunlardır; gazifikasyon, piroliz, sıvı yakıtların süperkritik yöntemiyle ayrıştırılması, sıvılaştırma, hidroliz vs. Bu yöntemlerinde hemen hemen tamamında reformasyonla ve biyolojik hidrojen üretimi mümkündür.

Bu yeni yöntemlerin yanında çok eski bir teknoloji olan alkali su elektrolizi hem ekipmanların kolay ulaşılabilir olması hem de prosesin kolay olması sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak bu sistemlerde aktivasyon, ohmik ve konsantrasyon kayıplarını azaltabilecek yöntemler çok kayda değer bir şekilde geliştirilememiştir [11-16]. Bu açıdan yapılacak kapsamlı analiz çalışmaları ile elde edilecek termodinamik ve kinetik verimlilik artışları oldukça önemlidir. Kinoshita ve ark. [16] ile LeRoy ve ark.[17] iyi bir elektrik benzeşimi ortaya koyarak ohmik kayıpları modellemişlerdir. Bard ve ark. [14] da elektrokimyanın uygulamaları hakkında yaptıkları çalışmada aktivasyon kayıpları ile ilgili kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Yüksek korozyon direncine sahip olması gereken elektrot seçimi konusunda Dyer ve ark. [18] nikel elektrotun özelliklerini geliştirerek alkali sistemlerde kullanılabilir hale getirmişlerdir.

Elektrotların yanı sıra elektrolit kalitesi de elektrik verimliliğini arttıran diğer bir etkidir. Elektrolitin özellikleri de elektrotlar gibi elektrolizin elektriksel verimliliğini etkileyen diğer bir etmendir. Genel olarak asidik çözeltiler suyun iletken olmayan yapısı ile birleştirilerek elektrokimyasal banyo oluşturulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede banyo içerisinde akım yoğunluğunun artırılması sağlanabilmektedir. Öte yandan bu elektrokimyasal çözeltilerin korozyon yapısı yüksek asidik ve alkali ortamdan kaynaklı bozunmalara da sebebiyet vermektedir. Bu sebepten dolayı yüksek konsantrasyonlu elektroliz sistemleri yerine daha düşük konsantrasyonlu elektroliz işlemleri oldukça önem arz etmektedir.

Sıcaklık da elektrokimyasal reaksiyonlarda aktivasyon kayıplarını azaltıcı etki yapmaktadır. Nikolic ve ark.[19] bu konuda elektroliz işleminin yüksek sıcaklığın katalitik etkisinden dolayı daha verimli olabildiğini ifade etmişlerdir. Stojic ve ark.[20] ile Jovancicevic ve ark.[21] da yüksek sıcaklıklı elektroliz işlemlerinde daha düşük voltaj sağlanabileceğini ifade etmişlerdir. Basınç seviyesi de elektroliz verimini etkileyen diğer önemli bir faktördür. Mansouri ve ark. [22] yaptıkları çalışmada elektroliz verimini ve maliyetlerini azaltmaya çalışmışlardır. Sonuç olarak elektrolit üzerindeki basınç artışının performansı arttırdığını gözlemleyerek bunun sebebinin gaz kabarcıklarının çapındaki küçülme olduğunu ifade etmişlerdir.

Bu gaz kabarcıkları ile ilgili diğer bir çalışma da Defay ve ark. [23] ile Jones ve ark. [24] tarafından yapılmıştır. Yaptıkları gözlemlerde hidrojen ve oksijen kabarcıklarının belli bir hacme ulaştıktan sonra elektrot yüzeyinden ayrıldıklarını ifade etmişlerdir.

Elektroliz hücreleri içerisindeki elektriksel direnç ifadesi elektrik akımının gönderildiği elektrotlar arasına bağlı olmasının yanında uzunluk, kesit alanı, malzeme geçirgenliği gibi etkenlere de bağlıdır. Mandin ve ark.[25] elektrotlar üzerindeki kabarcık birikiminin kontrolünün düşey düzlemde ohmik kayıpları azaltabildiğini ifade etmişlerdir. Nagai ve ark.[26] düşey düzlemde elektrotları yerleştirmenin aynı zamanda ohmik kayıpları minimize etmenin de mümkün olduğunu ifade etmişlerdir. Burada kabarcıkların elektrot yüzeyinden ayrılmasını sağlayan birkaç yöntem bulunmaktadır. Bunlar manyetik ses gibi fiziksel alanlarla sağlanabildiği gibi DC akımın darbe pontansiyeli sağlanarak dalgalar halinde gönderilmesi de örnek olarak verilebilir. Literatürde bununla ilgili bazı çalışmalar bulunmakta olup sistemin bir şarj deşarj gibi

çalıştığı ifade edilmiştir. Buna göre depolanan enerji kesikli voltaj darbelerinin (DV) de etkisiyle zamanla belli periyotlarla verilerek sistemde kabarcık birikimi önlenebilmektedir[27, 28]. Bununla ilgili ve Mong ve ark. [29] DV'nin Ohm yasasına uygun olarak belli çevrimlerde uygulanmasını devreyi açma kapama faaliyeti gibi düşünüleceğini ifade etmişlerdir. Bu sayede polarizasyon kayıplarının özellikle de ohmik polarizasyonun artabileceği ifade edilmiştir. Ancak DV ile yapılan bu çalışmalarda farklı konsantrasyon ve görev döngülerinde voltaj etkilerini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu açıdan bakıldığında literatürde bulunan bu eksiklerin giderilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında tasarlanan bir elektronik devre sayesinde alkali sulu çözeltide yapılan elektroliz prosesinin DV ile kontrolü sağlanarak farklı görev döngüsü, DV ve çözelti ağırlık yüzdelerinin etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak DC akımla çalışan bir elektroliz hücresine göre DV ile çalışan bir elektroliz hücresinde ortalama %10-30 aralığında bir enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür. DV altında çalışan elektroliz hücresi sayesinde oluşan gaz kabarcıklarının elektrot yüzeyinde bir pompaj etkisi yarattığı ve hücreyi hızla terkettikleri gözlemlenmiştir. Bu da performans artışı yaratarak enerji tüketiminde azalma sağlamıştır.

2. BÖLÜM

HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Hidrojen evrenin temel enerji kaynağı olup, güneş ve diğer yıldızların termonükleer reaksiyonlarla girdiği tepkimelerde temel yakıt olarak kullanılabilir. 1 kg hidrojen, 2.1 kg doğal gaz ve 2.8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahip olup birim enerji başına hacmi yüksektir. Petrol ve türevlerine göre %33 daha verimlidir ve reaksiyonları sonucu su buharı dışında hiçbir gaz çıkmamaktadır. Isı ve patlama enerjisi gerektiren her alanda kullanımı temiz ve kolay olan hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı enerji sistemlerinde, atmosfere atılan ürün sadece su ve/veya su buharıdır. Hidrojen doğada saf halde bulunmaz ancak bir enerji taşıyıcısı olarak çeşitli yöntemlerle elde edilebilir [1]. Günümüzde dünya piyasasındaki bazı belirsizlikler de petrol türevlerine alternatif yakıtlara daha çok ilgi gösterilmesine sebep olmuştur. Bunlara ek olarak petrol kullanımının çevresel etkileri de incelendiğinde yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaşması gerektiği bilinmektedir [30]. Bu amaçla günümüzde hidrokarbon reformasyonu, plazma reformasyonu, sulu reformasyon ve piroliz gibi tekniklerin yanı sıra suyun elektrik akımıyla elektrolizi işlemleri kullanılmaktadır.

2.1 Reformasyonlu Hidrojen Üretim Yöntemleri

2.1.1 Hidrokarbonların Buharla Reformasyonu

Hidrokarbonlardan hidrojen üretimi için kullanılan üç ana yöntem vardır: Bunlar buhar reformasyonu, kısmi oksidasyon (POX) ve ototermal reformasyon (ATR) yöntemleridir [30].

Buhar reformasyonu işleminde hidrojen, karbon monoksit ve karbon dioksit gibi gazlar ortaya çıkmaktadır. Endotermik buhar reformasyonu işlemleri bir dış ısı kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Buhar reformasyonu işlemlerinde genel olarak 3:1 oranında

H_2/CO üretimi sağlanır. Burada kısmi oksidasyon sayesinde hidrokarbonların hidrojene dönüşümü mümkün olmaktadır. Hidrojen eldesi genel olarak ısı kontrollü yanma ile sağlanmakta olup, sıcaklık parametresi aktivasyon enerjisinin düşmesini sağladığından metanın dönüşüm verimi oldukça iyidir. Proses sonucunda yüksek miktarda atık oluşur ve hidrokarbon sentez yöntemlerinde de tercih edilebilir bir yöntemdir. Ototermal reformasyon yöntemi termal olarak nötr bir prosese neden olan hidrojen üretimini arttırmak için kısmi oksidasyon yöntemini kullanır. Kısmi oksidasyon işlemleri ekzotermik olduğundan oto termal reformasyon işlemleri ile beraber kullanıldığında harici bir ısı kaynağına ihtiyaçları yoktur. Bununla birlikte, reaktöre saf oksijen vermek için pahalı ya da kompleks bir oksijen ayırma ünitesine ihtiyaç duyulmaktadır veya diğer bir yöntem olarak ürün gazlar nitrojen ile seyreltilmektedir [2, 3, 31]. Her üç proses de büyük miktarlarda karbon monoksit ürettiğinden dolayı bir veya daha fazla su-gaz-dönüşümlü (SGD) reaktör kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık ($> 350\text{ }^{\circ}\text{C}$) reaktörünün daha hızlı reaksiyon oranı vardır ancak termodinamik olarak dönüşebilen karbon monoksit miktarıyla sınırlıdır. Bu nedenle, düşük sıcaklık reaktörü ($210\text{-}330\text{ }^{\circ}\text{C}$), karbon monoksiti daha düşük bir seviyeye dönüştürmek için kullanılır. Yüksek sıcaklıktaki SGD reaktörlerinde yaygın olarak demir katalizörü kullanılırken, daha düşük sıcaklıktaki reaktörlerinde çoğunlukla bakır katalizörü kullanılır [2, 3, 31].

Tablo 2.1 Hidrojen üretim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları [30]

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
Buhar reformasyonu	1- Yüksek kullanılabilirlik ve yüksek hava emisyonu. 2-Oksijen gerekli değil. 3-Düşük işlem sıcaklığı. 4- H_2 üretimi için en iyi H_2/CO oranı.	En yüksek hava emisyonu.
Ototermal reformasyon	1-POX den daha düşük proses sıcaklığı 2- Düşük metan salınımı	1-Sınırlı ticari kullanım 2-Oksijen veya hava gereksinimi.
Kısmi oksidasyon	1-Kükürt giderme ihtiyacının azalması. 2-Katalizör gerekli değil. 3-Düşük metan salınımı.	1-Düşük H_2/CO oranı 2-Çok yüksek işleme sıcaklığı 3-Kurum oluşumu/yönetimi işlem karmaşıklığına katmak.

2.1.2 Kükürtsüzleştirme Prosesi

Mevcut hidrojen üretimi yöntemleri daha çok doğal gazın proses içerisinde dönüştürülmesinden oluşmaktadır, ancak yakıt hücrelerindeki ilerlemelerle birlikte,

metanol, propan, benzin ve jet-A, dizel ve JP8 yakıtları gibi lojistik yakıtlara olan ilgi de artmıştır. Metanol dışındaki yakıtların tamamı belirli miktarda kükürt içerirken, belirli kükürt türleri yakıt türüne ve kaynağına bağlıdır. Organik kükürt giderimine yönelik yaklaşımlar, kimyasal reaksiyon teknolojileri ve adsorptif teknolojiler olarak kategorize edilebilir. Kimyasal reaksiyon yaklaşımlarına hidrodesülfürizasyon (HDS) ve alkilleşme de dahildir. Çoğu ticari büyük ölçekli uygulamalarda HDS kullanılmaktadır [5-7, 32].

2.1.3 Piroliz Yöntemi

Piroliz, hidrokarbonun hidrojen ve karbona (su veya oksijen olmadan) ayrıştırıldığı bir başka hidrojen üretim teknolojisidir [8]. Piroliz, herhangi bir organik madde ile yapılabildiği gibi hidrokarbonların, karbon nanotüplerinin ve nanoküreciklerin üretimi için de kullanılır [33-35]. Bu yöntemde hava ve su kullanılmadığından ikincil reaktörlerin (buhar reformasyonu, kısmi oksidasyon vs.) kullanımını da ortadan kaldırmaktadır. Bu sayede belirgin bir emisyon azaltılması sağlanabilmektedir. Bu proseste oluşan reaksiyon şu şekilde ifade edilebilir [8, 33, 35-42].



Bu yaklaşımın getirdiği dezavantajlarından birisi karbon birikimi olmakla beraber uygun tasarımla bunun da minize edilebileceği ifade edilmiştir [30]. Düşük CO ve CO₂ emisyon potansiyeline sahip olması ve karbon dönüşümüne yardımcı olabileceği için, piroliz yöntemi hidrojen üretimi konusunda gelecekte önemli bir rol üstlenebilir [8, 10, 34, 37-40, 42, 43].

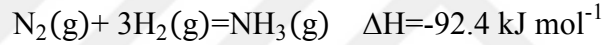
2.1.4 Plazma Reformasyonu

Plazma reformasyonunda oluşan reaksiyonlar geleneksel reformasyon yöntemiyle aynıdır. Bununla birlikte, reformasyon reaksiyonu için kullanılan enerji ve serbest radikaller, ısı ile üretilen bir plazma ile sağlanır [44-52]. Yakıtla su veya buhar enjekte edildiğinde, elektronlara ilaveten H, OH ve O radikalleri oluşur ve bu da hem indirgeyici hem de oksidatif reaksiyonların oluşması için koşullar yaratmaktadır [44]. Birçok araştırmacı plazma reaksiyonu sayesinde diğer yöntemlerde ortaya çıkan katalizör maliyetleri, boyut ve ağırlık gereksinimleri ile yavaş reaksiyon süresi, hidrokarbonlardan hidrojen üretimi gibi sınırlamaların kaldırılabilceğini ifade

etmektedirler [45, 50, 51]. Bu teknolojiadaki en büyük problemi hidrojen üretimi için gereken güç tüketiminin yeterince azaltılamamasıdır [48].

2.1.5 Amonyak Reformasyonu

Amonyak reformasyonu öncelikle taşınabilir güç uygulamaları için yakıt hücreleri ile birlikte kullanılmaktadır [30, 53-59]. Gübre üretiminde de kullanılabilmesi sebebiyle hem ucuz hem de taşınımı kolay bir yakıttır. Saf amonyak, 8.9 kWh / kg enerji yoğunluğuna sahiptir ve bu oran metanolün (6.2 kWh / kg) enerji yoğunluğundan daha yüksektir [59]. Ancak bu sistemlerdeki en büyük dezavantaj PEM yakıt pillerinde bu yakıtların besleme olarak kullanılması halinde amonyak oranının olabildiğince azaltılması gerekmektedir. Bunun sebebi amonyağın Nafyon elektrolitte birikme riskidir. Buna ek olarak amonyak katı oksit yakıt pillerinde direk kullanılabilir. Amonyaktan hidrojen eldesi reaksiyonu şu şekilde ifade edilebilir[56, 58, 60].



2.2 Reformasyonsuz Hidrojen Üretim Yöntemleri

Hidrojen reformasyon işleminden başka birçok yöntemle de üretilebilir. Bunlar bazı biyokütle üretimlerinin yanı sıra sudan hidrojen üretimi yöntemleridir.

2.2.1 Biyokütleden Hidrojen Üretim Yöntemi

Biyokütle enerjisinin kullanımı, ABD’de hidroelektrik santrallerden sonra ikinci sırada yer almaktadır. Bu enerji kaynağı birçok atıktan sağlanabildiği gibi özellikle hayvan atıkları, katı atıklar, bitki atıkları odunsu bitkiler, tarımsal atıklar, talaş, su bitkileri, otsu türler, atık kağıt, mısır ve benzeri gibi çok çeşitli kaynaklardan temin edilebilir.

Hidrojen üretiminde kullanılan biyokütle için daha çok gazlaştırma, piroliz, sıvılaştırma, hidroliz gibi yöntemler kullanılabilir. Bazı durumlarda da reformasyon ve biyolojik üretim de tercih edilmektedir [9, 30].

2.2.1.1 Biyokütlenin Gazlaştırması

Gazlaştırma teknolojisi ticari olarak birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu yöntem piroliz işleminin farklı bir çeşidi olmakla birlikte malzemelerin hidrojen, metan, karbon monoksit, karbondioksit ve bir üretici gazı olarak bilinen azot karışımına kısmi

oksidasyonuna dayanır [61]. Tipik olarak sabit ve akışkan yatakta gerçekleşen bir prosestir. Dezavantaj olarak nemin uzaklaştırılması gerekmektedir ve gazlaştırma işlemi düşük ısı verimliliğinden etkilenen bir prosestir. Gazlaştırma prosesinde 800-1000 °C’de ürünlerin yanı sıra atık da üretilir. Bu nedenle, kireç haline getirilmiş dolomit veya nikel katalizörleri kullanan ikincil bir reaktör, katalitik olarak ürün gazını temizlemek ve yükseltmek için kullanılır. Örneğin, gazlaştırma işleminde kullanılmak üzere Rh/C₆O₂/M(M=SiO₂, Al₂O₃, ve ZrO₂) katalizörünün kullanılmasının katran oluşumunu azalttığı görülmüştür [62]. Günümüzde, yüksek taşıma masrafları gazlaştırma tesislerinin endüstride kullanımını sınırlandırmaktadır. Daha kompakt tesislerin geliştirilmesi ile bu teknolojinin daha hesaplı olması sağlanabilecektir.

2.2.1.2 Biyolojik Hidrojen Üretimi

Son yıllarda atıkların en aza indirgenmesi konusunda yapılan çalışmalar neticesinde biyolojik hidrojen üretimi konusundaki araştırmalarda kayda değer bir artış vardır. Biyo hidrojen üretiminde alglerden ya da bakterilerden, atıkların içerisinde organik maddelerin anaerobik ayrıştırılmasından, foto fermantasyon işlemlerinden ve reformasyonda kullanılan değişim reaksiyonlarından faydalanılmaktadır [63-66]. Bunlara ek olarak bu işlemlerde kullanılan mikro organizmalar özelliklerini geliştirmek üzere yapılarını da değiştirmekte ve daha verimli hidrojen üretimi yapabilmektedir [64, 65, 67, 68].

2.2.2 Sudan Hidrojen Üretimi

Sudan hidrojen ve oksijen üretimi ile ilgili araştırmalar 1980 ve öncesine kadar dayanmaktadır. Temel olarak anot ve katot elektrotların yanı sıra elektrolit çözeltisi içerisinde iyon değişiminin sağlanması sonucu yapılan bir ayrıştırma prosesidir. Oldukça basit bir yöntemdir ve hemen uygulanabilirliği bu alana olan ilgiyi de arttırmaktadır. Suyun ayrıştırılması işlemi genel olarak elektroliz, termik ve foto elektroliz proseslerinden oluşmaktadır.

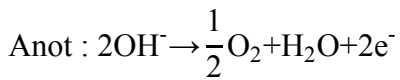
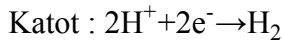
3. BÖLÜM

SUYUN ELEKTROLİZİ

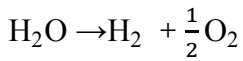
Suyun elektrolizi oldukça eski bir teknolojidir, ancak hidrojen üretimi için umut verici bir teknoloji olmakla beraber geliştirilmesi gereken birçok parametre bulunmaktadır.

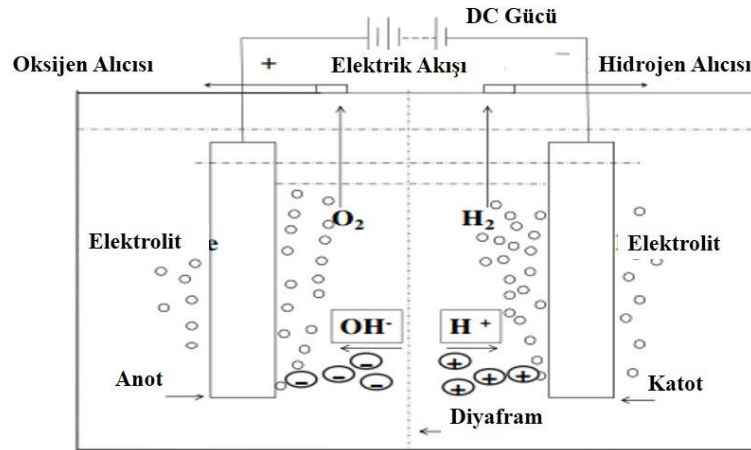
3.1 Elektroliz Teorisi

Suyun elektrolizi su molekülünün hidrojen ve oksijen gazlarına ayrıştırılmasından ibarettir. Şekil 3.1’de suyun elektroliz sisteminin şematiği verilmiştir. Bu işlemler için DC akıma ihtiyaç duyulmaktadır. Elektroliz reaksiyonu basitçe aşağıdaki kimyasal eşitlikler ile ifade edilmektedir:



Su elektrolizinin genel kimyasal reaksiyonu şu şekilde yazılabilir:





Şekil 3.1 Temel bir su elektroliz sisteminin şematik bir gösterimi [11].

Suyun elektrolizi için iyi iletkenlik değerine sahip bir anot ve katotun yanı sıra iyonik iletkenliği sağlayabilecek bir elektrolite de ihtiyaç duyulmaktadır. Oda sıcaklığında saf suyun iletkenliği çok düşük olacağından burada eklenen asidik ya da bazik çözünenlerin oranları oldukça önemlidir. Elektroliz işlemlerinde genel olarak KOH, NaOH ve H₂SO₄ çözeltileri kullanılmaktadır. Bu çözünen iyonlar su içerisindeki ayrıştırılan iyonları pozitif ve negatif yüklerde bir elektrot yüzeyinden diğer elektrot yüzeyine taşıyarak hidrojen ve oksijen oluşumunu sağlarlar. Tablo 3.1’de bazı elektroliz reaksiyonları için temel kimyasal reaksiyonlar ve farklı su elektroliz türleri için çalışma sıcaklığı aralıkları görülmektedir [69].

Tablo 3.1 Farklı su elektrolizi türleri için temel kimyasal reaksiyonlar ve çalışma sıcaklığı aralığı[69].

Elektroliz İşlemi	Alkali Elektroliz	PEM Elektroliz	Yüksek Sıcaklık Elektroliz
Anodik Reaksiyon (OER)	$2\text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^-$
Katodik Reaksiyonu (HER)	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$
İyon Taşıyıcısı	OH^-	H^+	O^{2-}
Çalışma Sıcaklığı	40-90 °C	20-100 °C	700-1000 °C

3.2 Enerji ve Gerilim İfadeleri

3.2.1 Enerji Tüketimi

Bir mol suyun hidrojen ve oksijene ayrıştırılması için gereken enerji, bir mol suyun oluşum entalpisine karşılık gelmektedir. Elektrik enerjisi olarak uygulanması gereken entalpinin minimum miktarının gösteriminde, reaksiyon entalpisi, ΔH_{reak} , Termodinamik sıcaklık, T ve Gibbs serbest enerjisindeki değişim, ΔG_{reak} , reaksiyon entropisi değişimi için ΔS_{reak} kullanılmaktadır [69].

$$\Delta H_{\text{reak}} = \Delta G_{\text{reak}} + T\Delta S_{\text{reak}} \quad (3.1)$$

Reaksiyon için gerekli minimum enerjinin Gibbs serbest enerji ilişkisi ile Denk. 3.2'deki gibi verilebilir.

$$\Delta G_{\text{reak}} = \Delta H_{\text{reak}} - T\Delta S_{\text{reak}} \quad (3.2)$$

Standart sıcaklık ve basınç durumlarında suyun termodinamik olarak teorik ayrıştırılma voltajı 1.23V ve akım verimliliği %100 olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla, 1m³ Hidrojen üretmek için teorik enerji tüketimi (E_{teorik}) 2.94 kWh/m³H₂ 'dir. Bununla birlikte gazların hücre dışına atılabilmesi için 1.65-1.7V'a ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle endüstride yaklaşık 1.8-2.6 V' luk gerilim kullanılmaktadır. Dolayısıyla genel olarak pratik enerji tüketimi, teorik enerji tüketiminden yaklaşık 1.5 ila 2.2 kat daha fazla olmaktadır. Gerçek verimlilik değeri ise % 48 ile % 70 arasında değişmektedir [70].

3.2.2 Aşırı Potansiyel Eşitlikleri

Suyun elektrolizi işleminde enerji hesaplamalarını yapabilmek için iki ana gerilim parametresi bulunmaktadır. Bunlar tersinir hücre voltajı ve termal voltaj ifadeleridir. Suyun oluşumu için teorik enerji tüketimi Denk. 3.3 ile ifade edilebilmektedir.

$$V_{\text{ref}} = \frac{\Delta G_{\text{reak}}}{nF} \quad (3.3)$$

Burada, n her bir mol ürün için gerekli elektron mol sayısıdır ($F = 96\,500\text{ C/mol}$) [71]. Suyun elektrolizi için gereken minimum hücre voltajı V_{entalpi} reaksiyonun entalpisine bağlı olarak Denk. 3.4 ile ifade etmektedir [72].

$$V_{\text{entalpi}} = \frac{\Delta H_{\text{reak}}}{nF} \quad (3.4)$$

Termodinamik dengeden dolayı hücrenin çalışma voltajı hesaplanabilen tersinir hücre voltajından büyüktür. Çünkü hücre içerisindeki aktivasyon kayıpları, türlerin transferi ve elektrolit ile elektrot arasındaki dirençten kaynaklı kayıpları sebep olmaktadır. Tersinmezliklerin ifade edilebilmesi aşırı potansiyel ve akım değerlerine bağlı olarak deneysel Tafel denklemi kullanılabilmektedir [70].

$$\eta = A + B \log(i) \quad (3.5)$$

Burada, η , aşırı potansiyel ve i , akım yoğunluğu olarak gösterilmiştir.

3.2.3 Teorik Hücre Voltajının İfadesi

Su, termodinamik olarak doğadaki en kararlı bileşiklerden birisidir. Suyu hidrojen ve oksijene ayrıştırabilmek için de eşdeğer hücre voltajı değerinin üzerine çıkılması gerekmektedir. Anot ile katot elektrot arasındaki bu açık devre voltajı ifadesine de eşdeğer hücre potansiyeli denilmektedir, bu ifade Denk. 3.6'da gösterilmiştir [12].

$$E^{\circ} = E^{\circ}_{\text{anot}} - E^{\circ}_{\text{katot}} \quad (3.6)$$

Elektrokimyasal reaksiyonlarda Gibbs serbest enerjisinin değişimi, ΔG ile hücre voltajı arasındaki ifade Denk. 3.7 ifade edilmiştir.

$$\Delta G = nFE^{\circ} \quad (3.7)$$

Burada n , reaksiyonda transfer edilen elektronların mol sayısıdır ve F , Faraday sabitidir. Toplam su elektroliz hücresi reaksiyonu E° , 1.23 V (25°C) ve ΔG , Gibbs serbest enerji değişikliği, hidrojen üretmek için gerekli minimum elektrik enerjisi miktarı

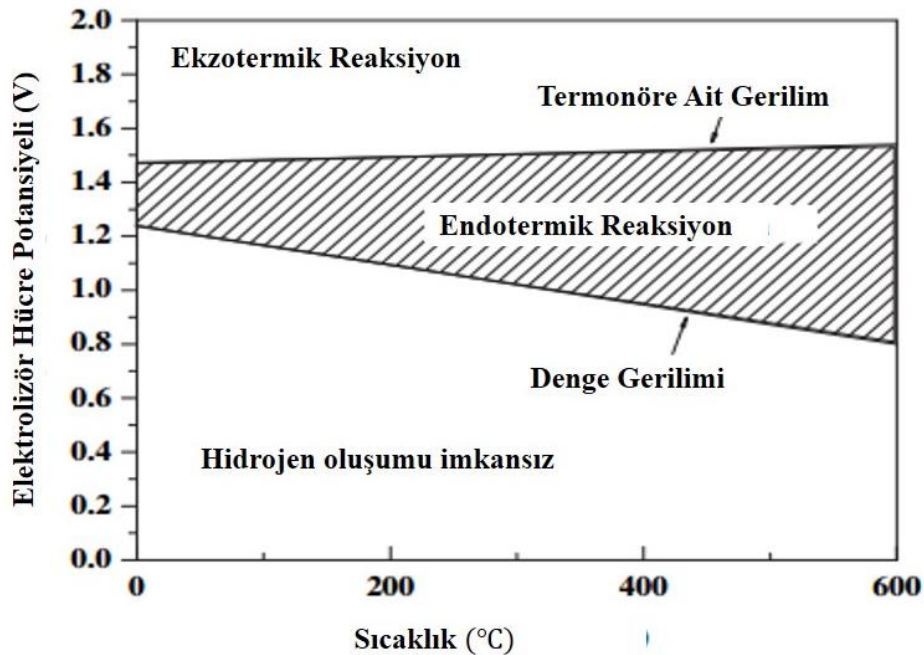
olan $+237.2 \text{ kJ mol}^{-1}$ 'dir [73]. Hücre içerisinde bulunan aşırı gerilim, ohmik kayıplar ve aktivasyon kayıpları Denk. 3.8'deki gibi ifade edilebilir.

$$E_{\text{hücre}} = E_{\text{anot}} - E_{\text{katot}} + \sum \eta + iR_{\text{ger}} \quad (3.8)$$

Aşırı potansiyel ifadeleri ise Denk. 3.9 ile gösterilebilir.

$$\sum \eta = |\eta_{\text{anot}}(j)| + |\eta_{\text{katot}}(j)| \quad (3.9)$$

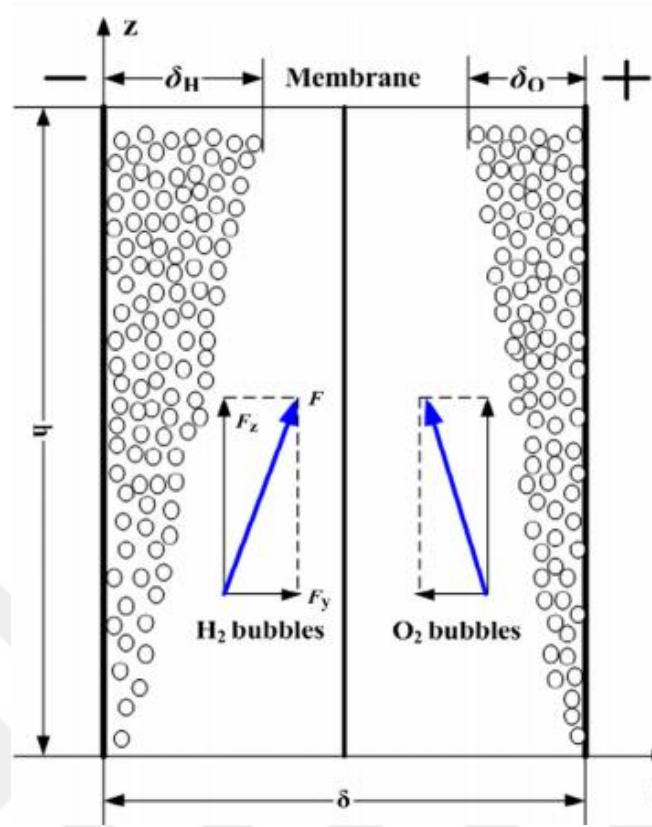
Şekil 3.2'de elektrolizör hücre potansiyeli ile çalışma sıcaklığı arasındaki bağıntı verilmiştir. Buna göre elektroliz hücre potansiyelinin sıcaklıkla ilişkisi üç ana bölgeye ayrılabilir. Bunlar eşdeğer voltaj bölgesi çizgisi ile termal voltaj çizgisidir. Sıcaklık arttıkça eşdeğer voltajda yükselme meydana gelmektedir. Termo-nötral voltaj elektroliz hücresine uygulanması gereken minimum hücre voltajını ifade etmektedir ve bu eğrinin altında elektroliz işlemi endotermiktir, üstündeyse ekzotermiktir. Termo-nötral voltaj genel olarak elektrotlardaki aşırı gerilim ifadelerini de içermektedir ve sıcaklıkla artış gösterir.



Şekil 3.2 Elektrolizör hücre potansiyeli ile çalışma sıcaklığı arasındaki ilişki [11].

3.3 Kabarcık Teorisi

Elektroliz ilerledikçe, anot ve katodun yüzeyleri üzerinde hidrojen ve oksijen kabarcığı oluşur ve yeterince büyüdülerinde yüzeyden ayrılırlar. Elektrot yüzeylerinin gaz kabarcıkları tarafından kaplanması, elektrolit ile elektrot arasındaki teması azaltarak, elektron transferini bloke ederek ve sistemin ohmik kaybını arttırarak doğrudan tüm sistemin elektrik direncini artırır. Kabarcık fenomenini anlamak, herhangi bir su elektroliz sisteminin geliştirilmesinde önemli bir unsurdur. Elektrolitin mekanik olarak dolaşımı kabarcıkların ayrılmasını hızlandırabilir, böylece gaz kabarcığına bağlı direnci azaltmak için bir olanak sağlanır. Alternatifleri, elektrolitin yüzey gerilimini azaltmak için elektrolit çözeltisine uygun katkı maddelerinin ve elektrot yüzey özelliklerinin modifikasyonlarının gaz kabarcıklarına daha az çekici olmasını sağlamak için kullanılması düşünülmüştür. Kabarcıkların elektrotlardan ayrılma koşullarını belirlemek için kabarcık davranışının dinamiklerini anlamak önemlidir. Gaz kabarcığı, elektrot ve elektrolit arasındaki üç fazlı temas için genel termodinamik şart Şekil 3.3'de gösterildiği gibi üç faz sınırında sonlu bir temas açısıdır [23, 24]. Kabarcıkların ayrılması, ıslanabilirlik olarak bilinen katı/çözelti ara yüzünde elektrolitin değiştirilmesine bağlıdır [74, 75]. Yüzey gerilimi, hidrofobik ve hidrofilik olarak iki tür elektrot yüzeyi tanımlanabilir. Su tercih eden elektrot hidrofilik ve su tercih etmeyen elektrot hidrofobik olarak adlandırılır. Gaz kabarcıklarının elektrot yüzeyini kaplamalarını azaltmak için elektrot yüzeylerini daha hidrofilik yapmak için uygun yüzey kaplaması uygulanmalıdır. Bu nedenle kabarcık fenomenini yönetmek için bazı geniş yaklaşımlar vardır. Bunlardan birincisi, suyun kabarcıkların yerini alması için elektrot yüzeylerini daha hidrofilik hale getirmektir. Diğer bir yaklaşım, yüzey gerilimini azaltmak için elektrolit çözeltisinde katkı maddeleri kullanmaktır böylece kabarcıklar elektrotlardan ayrılmaya hızlıca başlar. Ek olarak, kabarcıkları elektrotları mekanik olarak bırakmaya zorlamak için akış modelini kontrol etmek de bir araçtır. Elektroliz sistemlerinde kabarcık davranışı üzerine çalışmalar yapılmıştır [75-77]. Kabarcık direncinin üstesinden gelmek veya azaltmak çözülmesi gereken kilit bir konudur. Kabarcıkların olumsuz etkilerini daha da azaltmak için daha ayrıntılı çalışmalar gereklidir.



Şekil 3.3 Gaz kabarcığının üç fazlı sınır bölgesinde gösterimi.

4. BÖLÜM

DARBE POTANSİYELİ İLE SUYUN ELEKTROLİZİ

4.1 Elektriksel Verimliliği Etkileyen Parametreler

Büyük bir akım yoğunluğu uygulandığında elektrotlar arasında daha fazla potansiyel kaybı oluşmaktadır. Bu yüzden elektrolizörün çalışması esnasında elektriksel kayıplar artmakta ve elektrolizörün çalışması daha verimsiz hale gelmektedir.

4.1.1 Elektrolit Kalitesi

Bilindiği gibi, saf suyun iletkenliğini değiştirmek için kullanılan bazik ve asidik yapılar, belirli bir akım yoğunluğunda elektrolitik bir çözeltiden hidrojen üretimi için gereken voltaj üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [78, 79]. Bu durum bir elektrolitin iyonik iletkenlik kalitesinin bir sonucudur. Öte yandan, bu malzemelerin aşındırıcı özelliği, elektrolitlerin ve sistemin bazı diğer bölümlerinin ömrünü olumsuz yönde etkileyerek endüstriyel elektrolizörlerdeki çok yoğun asidik ve alkali elektrolitlerin kullanımını sınırlandırmaktadır. Sözü edilen hususlar göz önüne alındığında, ortalama % 25-30 civarında potasyum hidroksit (KOH) çözeltileri elektrolizör işlemlerinde kullanılmaktadır [80].

Bugünkü yaygın elektroliz hücrelerinin elektrokatalitik performansının sınırlı olduğu bilinmektedir [81, 82]. Bu kısıtlama, sistemin toplam elektrik direnci, belirtilen parametreden etkilendiği için verimliliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, elektrolitik solüsyonların iletkenlik ve istikrar faktörlerini iyileştirmek için son zamanlarda yenilikçi iyonik sıvılar gibi maddeler kullanılmıştır [83, 84].

4.1.2 Sıcaklık

Sıcaklık, bir elektroliz cihazının elektrik enerjisi talebinde en etkili değişkenlerden biri olarak bilinir. Elektroliz yüksek sıcaklıklarda daha etkilidir [19]. Ayrıştırma reaksiyonunun gerçekleşme potansiyeli, sıcaklığın artmasıyla azaldığı gibi bir su molekülünün termodinamik özelliklerine göre de değişmektedir. Buna ek olarak, bir elektrolitin yüzey reaksiyonu ve iyonik iletkenliğinin sıcaklık ile artması beklenmektedir [85]. Elektroliz işleminde yüksek sıcaklık uygulandığı zaman, aynı akım yoğunluğuna ulaşmak için daha düşük voltaja ihtiyaç duyulmaktadır [20, 21, 86].

4.1.3 Basınç

Basınç seviyesi, elektroliz verimliliğini etkileyen bir faktördür. Mansouri ve ark. [22] geleneksel elektrolizörlerde daha yüksek akım yoğunluğuna ulaşarak hidrojen üretiminin verimliliğini arttırmaya ve sermaye maliyetlerini düşürmeye çalışmışlardır. Araştırma sonuçları, artan elektrolit basıncının, üretilen gaz kabarcıklarının çapını azalttığı için daha az güç tüketimine neden olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, ohmik gerilim düşümü ve elektrotlar arasındaki güç dağılımı azalmaktadır. Buna ek olarak, yüksek basınçlı elektroliz işlemleri ürünün depolanması için gereken gücün azalmasını da sağlamaktadır.

4.1.4 Elektrolitin elektrik direnci

Elektriksel direnç R , elektrik akımının ilerlemesine karşı gösterdiği zorluktur. Bu direnç birkaç faktöre bağlıdır ve Denk. 4.1'e göre hesaplanmaktadır.

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

(4.1)

Denk. 4.1'deki ρ , öz direnci; A , kesit alanı ve L , akım yolunun uzunluğudur. Elektronlar katot yüzeyinden elektrolit yoluyla anot yüzeyine kadar hareket eder. Bu yol, elektrotlar arasındaki mesafe, elektrot alanının kesiti, elektrot maddesinin ve elektrolitin elektriksel iletkenliği ve farklı faktörler gibi elektrik direnç değerini değiştirebilen faktörlerdir.

4.1.4.1 Elektrotlar Arasındaki Mesafe

Denk. 4.1'den elektrotlar arasındaki boşluk azaltılarak daha düşük elektrik direnci elde edebildiği görülmektedir. Bunun sebebi elektrotlar arası mesafe arttıkça ohmik kayıpların artmasıdır. Bu açıdan bakıldığında bu tez çalışmasında olabildiğince küçük bir elektrot arası mesafe tercih edilmiştir.

4.1.4.2 Elektrot Boyutları

Denk.4.1'e göre elektrik direnci değerisinde elektrotlar kesit alanı etkili bir faktördür. Aynı elektrot genişliğini kullanarak ve sadece yükseklikleri arttırıldıkça, daha fazla voltaj gereksinimi olmaktadır. Mandin ve ark. tarafından geliştirilen gaz kabarcıkları hareket modeline göre, kabarcık birikimi elektrotların yüksek bölümlerinde daha fazla sürtünme oluşturmaktadır [25]. Yapılan son çalışmalarda, kabarcık ayrılma davranışıyla ilgili olarak asgari ohmik direnç elde etmek için elektrotları dikey halinde yerleştirmenin en iyi seçim olduğunu göstermiştir [26]. Kaya ve ark. bu şekilde bir elektrot yerleşimi kullanarak manyetik alan etkilerini incelemişlerdir [87].

4.1.4.3 Kabarcıkların Ayrıştırılması

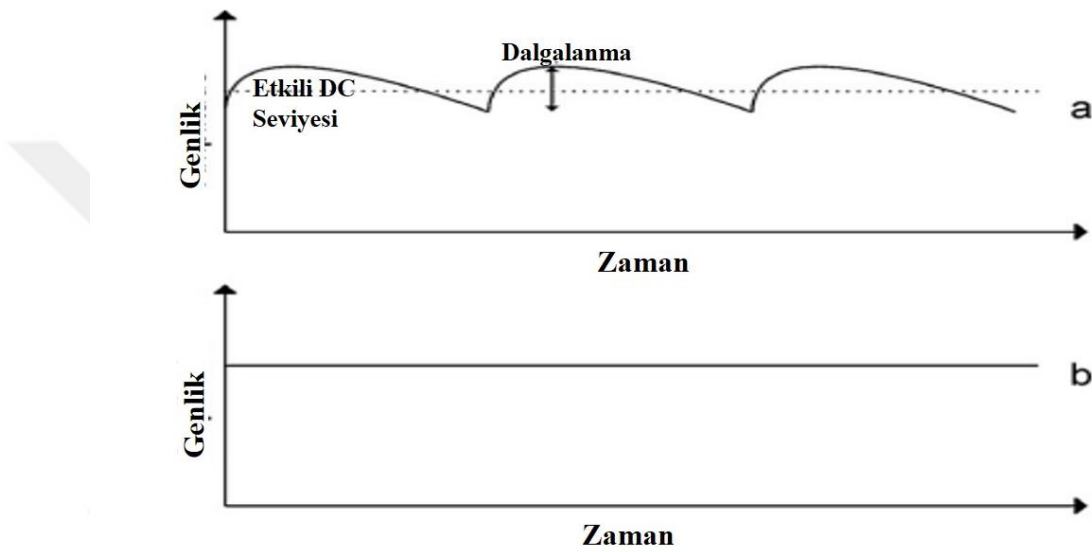
Elektroliz hücresinde ohmik direnç, tüm yüzeylerin kabarcık kapsamı ile orantılıdır. H_2 ve O_2 kabarcık oranı arttıkça daha az elektrik iletkenliği oluşmaktadır, aynı zamanda daha fazla ohmik kayıp meydana gelmektedir [88]. Yüksek akım yoğunluğunda ve düşük basınç uygulandığı zaman daha büyük çaplı gaz kabarcıkları oluşturabilmektedir, kabarcık çapı akım yoğunluğu ve basınç değerine bağlı olarak değişmektedir [89].

4.1.5 Elektrot Malzemesi

Elektrolizörlerde elektrot için kullanılan farklı malzemeler vardır. Her metal için aktivite, elektrik direnci, korozyona karşı direnç ve kullanım ömrü farklıdır. Elektrot olarak en iyi seçenek platin ve altındır [89]. Platin ve altın, yüksek fiyatları yüzünden endüstriyel ve ticari kullanımlar için pek tercih edilen malzemeler değildir.

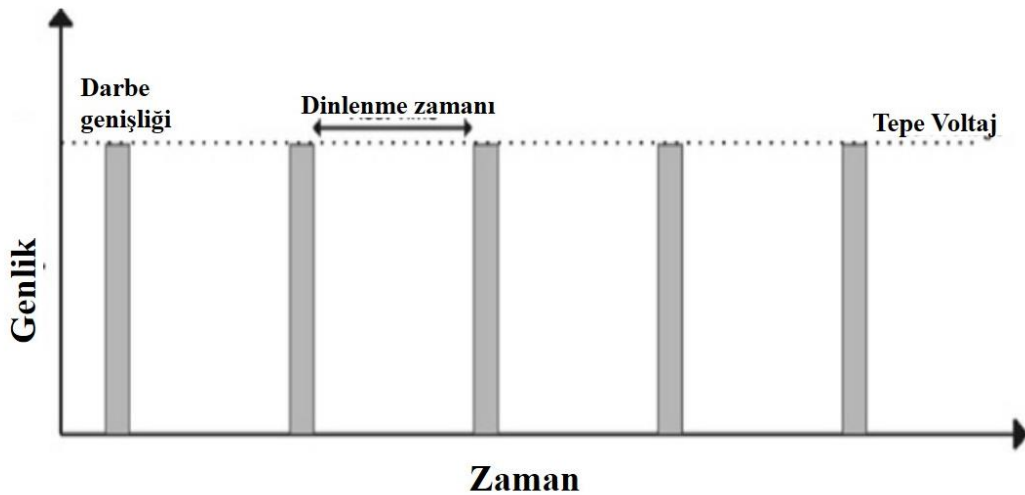
4.1.6 Uygulanan Gerilimin Dalga Geometrisi

Genel olarak elektroliz sistemlerinde elektroliti polarize etmek için Şekil 4.1.a'da gösterildiği gibi ya kararlı bir voltaj dalgası, ya da Şekil 4.1.b'deki gibi DC uygulanmaktadır. Ohm kanununa göre, belli bir DC uygulandığında direnç yoluyla elektrik akımı sağlanmaktadır. Elektroliz hücresinde elektrolit yoluyla değişen bir voltaj seviyesi uygulayarak, belirli akım yoğunluğu elde edilebilmektedir.



Şekil 4.1 (a) Sabit DC dalga formu, (b) Düzgün DC dalga formu

Şekil 4.2'de elektrolitin polarize edilmesi ve ayrıştırılması için DV'nin uygulama aşamaları görülmektedir.



Şekil 4.2 DV dalga formu

4.2 Darbe Üretimi

Darbe genişlik modülasyonu (DGM), analog bileşenleri dijital sinyallerle kontrol edilmesini sağlayacak bir yoldur. Sinyalin frekansının belirlenen değerlerde değiştirilmesi ile dijital sinyaller analog sinyallere dönüştürülebilir.

4.2.1 Maksimum Bölgeden Ayrılan Darbeler

Bu bölümün ana hedefi darbe voltajı ile hücreye maksimum verimle nasıl güç verilebileceğinin tespit etmektir. Bu amaçla maksimum voltaj ve akım artışı ölçülmüştür ve dV / dt ile dI / dt oranları DV'nin uygulanmasında önemlidir.

4.3 AC Voltaj ile Elektroliz Uygulaması

Elektrolizörde AC voltaj uygulandığı zaman, aynı elektrot hem katodik hemde anodik gazların oluşumunu gerçekleştirir. Bu da bazı dezavantajlara yol açmaktadır. AC voltaj kullanmanın dezavantajları kısaca şöyledir:

- Bu gaz karışımları patlayıcı özelliğe sahiptir ve sıkışmaları durumunda patlama riskleri bulunmaktadır.
- Aynı zamanda buradaki reaksiyon gecikmeleri gazların ayrıştırılmasını da önlemektedir.
- Elektrolizin en önemli avantajlarından biri olan saf hidrojenin üretilmesi avantajı da ortadan kaybolmaktadır.

4.4 Elektroliz Sistemlerinde Darbe Potansiyeli İhtiyacı

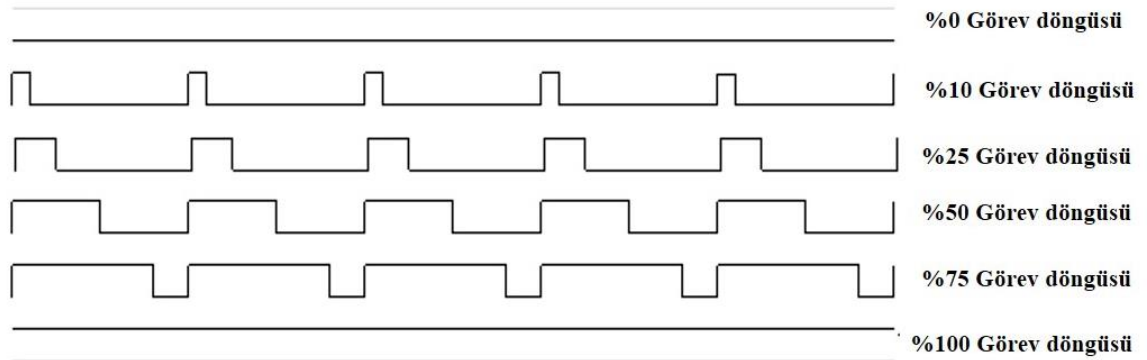
Hidrojen üretiminde ana hedef, hidrokarbonlardan ve fosil yakıtlardan buhar reformasyonu işleminin alternatifi olabilecek bir yöntem geliştirmektir. Bu konuda yapılan ekonomik analizler, hidrojen üretiminde daha dengeli bir üretimin sağlanmasını hedeflemektedir. Örneğin Lemus ve ark. düşük hidrojen üretimi için düşük enerji girdisinin ucuz ve verimli elektrik, ucuz malzemeler, uzun ömürlü malzemeler ya da hammaddelerle sağlanabileceğini ifade etmişlerdir [4]. Hidrojen üretmek için harcanan enerji ve malzeme hacminin azaltılması önemli faktörlerdir [90].

Bu tez çalışmasında, yüksek yoğunluklu sulu elektroliz sağlamak için basit bir alkalın elektrolizör üzerindeki DC darbe elektrik kaynağının etkisi incelenmiştir.

4.4.1 Sinyal Genişlik Modülasyonu ve Görev Döngüsü

Sinyal işleme veya sinyal aktarma gibi daha çok elektronik devrelerin yanı sıra Arduino veya elektrik makineleri gibi özel uygulama alanlarında da yer alan bir tekniktir. Bu kontrolde tamamen anahtarlama ile sağlanır. Anahtarlama ne kadar hızlı yapılırsa, DGM ile aktarılan sinyalin gücü o kadar da artar.

Görev döngüsü kavramı PWM tekniğinde sıkça kullanılmakta ve yapılan işlemin periyodunu belirtmektedir. Bu döngü düşük seviyelerde ise aktarılan güç düşük olurken, yüksek seviyelerde ise yüksek güç aktarılmaktadır. Şekil 4.3 farklı görev döngüsü değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.3 Sinyal genişlik modülasyonu ve görev döngüsü elde ettiği çeşitli sinyaller

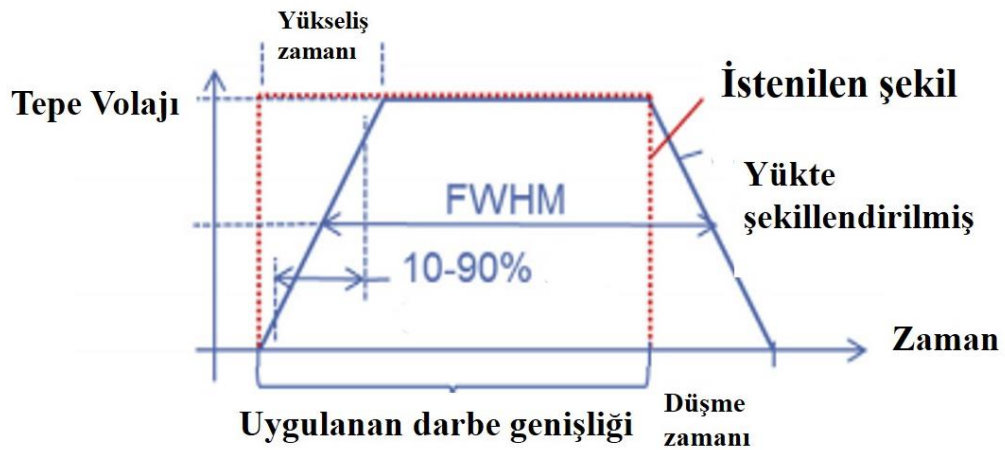
4.4.2 Darbe Elektroliz Sistemleri

Elektroliz, anot ve katotta uygulanan DC yaklaşık 1.6 V'yi, yani oda sıcaklığında teorik bozunma voltajının toplamı olan 1.23 V'yi ve tepkimeyi ihmal edilemeyecek bir oranda sağlamak için gerekli olan bir elektrot aşırı gerilimini aştığında meydana gelmektedir. Bir elektroliz hücresine bir voltaj uygulanmasından hemen sonra, örneğin bir darbenin başlangıcında, elektrikli çift katmanın (EÇK) oluşumu kısmen geniş yüzey alanının ve düşük derinlikteki geometrik yapıdan dolayı oldukça önemli bir değerdir. Genellikle literatürde yayınlanmış elektroliz araştırmalarında kapasitans veya EÇK'den çok söz edilmemiştir. Bu etkinin incelenmesi için kararlı şartlarda deneyler yapılarak veri toplanması gerekmektedir. Bu aşamada, Kirchoff'un mevcut yasası geçerlidir buna

göre; kontrol devresi ve elektroliz hücresini içeren tüm elektrik sistemi tek bir devre gibi davranmaktadır. Hücre, elektriksel direnç ve kapasitans kombinasyonu gibi davranmaktadır [27, 28]. Bununla birlikte, voltajın sonlandırılmasının ardından, depolanmış enerjiyi, iyon göçü sayesinde sağlanan elektrolit iletkenliği aracılığıyla dağıtır ve elektroliz devam eder. Bu durumda Kirchhoff yasası artık geçerli olmadığından harici devre bağlantısı kesilir. Bundan sonraki değişimler elektrokimyasal reaksiyonun etkisiyle gerçekleşmektedir. Darbe tekrarlama frekansı ve uygulanan voltaj düşük olduğunda, kararlı elektroliz işlemi darbe sonlanmadan gerçekleşmiş olur. Bu basitçe kesintili DC elektrolizin oluşmasını sağlar.

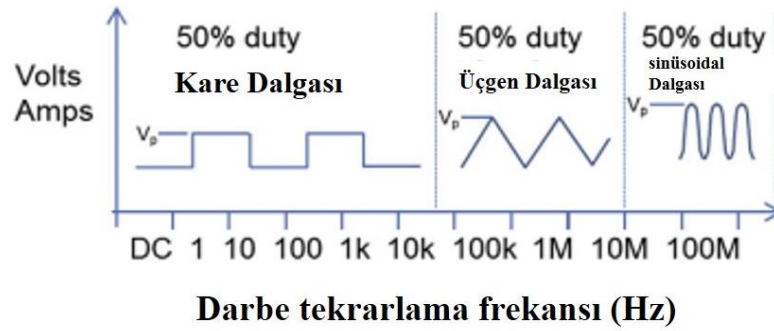
4.4.3 Darbe İçin Geliştirilen Deneysel Yöntemler

DV ile elektroliz yapabilmek için hızlı yükselme zamanına sahip, genişlik ve genliği kontrol edilebilir bir darbe sinyali gerekmektedir. Genel olarak kare sinyal güç çıkışını maksimize etmek için gerekmektedir. Şekil 4.4'te gösterildiği gibi elektriksel darbe için genel özellikler, yükselme süresi ve düşme süresi uzarsa, sonunda Şekil 4.5'deki gibi üçgen veya 'testere dişi' dalga formu oluşmaktadır. Şekil 4.4'de voltaj dalgasının frekansa bir fonksiyon olarak dalganın şekil değişimi görülmektedir.



FWHM-Tam genişlik yarı maksimum

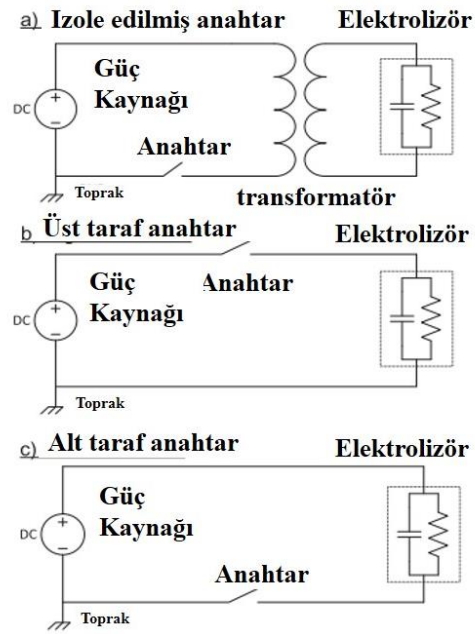
Şekil 4.5 Elektriksel darbe için genel özellikler



Şekil 4.6 Voltaj dalgasının frekansa bir fonksiyon olarak dalga'nın şekil değişimi

Şekil 4.6'da darbeli güç kaynağının yüke (yani, elektroliz hücresi) bir transformatör vasıtasıyla uygulanması, her iki elektrotun da eşit şekilde kontrol edilmesini sağlar. Herhangi bir akım, hücre dahil dış devre etrafında dolaşır. Buna dengeli bir darbe uygulanması da denebilir. Ancak, transformatörden yalnızca AC geçeceği için kare dalga isteniyorsa bu zorluk çıkarır. Kararlı bir akım seviyesi sağlandığında, transformatör bobinlerinin ısınması ile daha fazla enerji kaybolacaktır. Bu yöntem, voltaj dalgasının şekilli sinüs eğrisine yaklaştığında, ultra hızlı darbeler için daha uygundur.

Şekil 4.6'da "alt-taraf" ve "üst-taraf", devredeki elektroliz hücresine ve toprağa göre anahtarın konumunu belirtmektedir. Bir "üst-taraf" anahtar kullanarak, katot sürekli güç kaynağı topraklarına bağlanır. Anahtar açıkken, devrenin herhangi bir bölümüne bağlı değildir. Anahtar açıldığında hücrede kalan fazla yük, devre vasıtasıyla toprağa akabilir. Buna karşılık, bir "düşük taraf" anahtarı kullanıldığında, anot güç kaynağı pozitif terminaline kalıcı olarak bağlanır ve anahtar açıkken tüm hücre pozitif potansiyeldedir. Elektrolit içindeki elektrokimyasal reaksiyonlar vasıtasıyla dağılabilir [29].



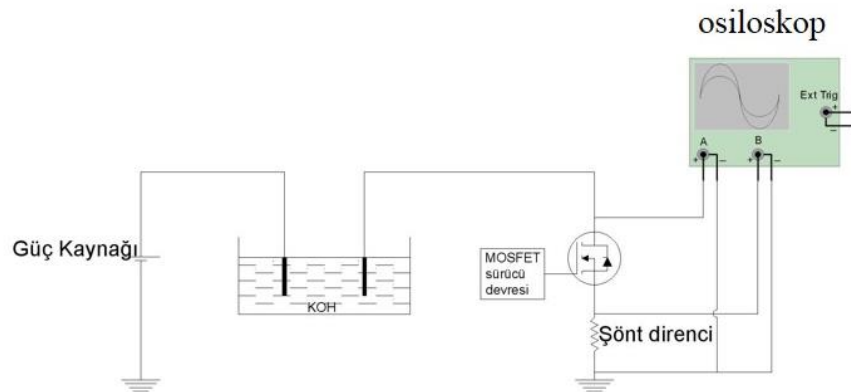
Şekil 4.7 Anahtarlama Yöntemleri a) izole edilmiş anahtarlama, b) üst taraf anahtarlama, c) alt taraf anahtarlama

5. BÖLÜM

DENEYSEL KURULUM VE EKİPMAN SEÇİMİ

5.1 DeneySEL Metod

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen deneylerde anahtarlama yöntemlerinden Şekil 4.6.c’de gösterilen yöntem kullanılmıştır. DeneySEL su elektroliz hücresi şematik olarak Şekil 5.1’de gösterilmiştir. 200 ml kapasiteli bir potasyum hidroksit (KOH) sulu çözeltisinden oluşan polyamid banyo kullanılmıştır. Platin elektrot çiftleri silindir şeklinde olup geometrik boyutları $D = 1\text{mm}$ ve $L = 10\text{mm}$ ’dir. Anot ve katot elektrotlar arası mesafe 1 cm olarak alınmıştır. Her deney için elektrolit konsantrasyonu, ağırlıkça %10 ve %15 KOH sulu çözeltilerinden oluşmaktadır. DeneySEL ortam sıcaklığı olarak oda sıcaklığı alınmıştır. Anot elektrotu için gereken voltajı düzenlemek için iki adet 0-30 V’a kadar ayarlanabilen 0-3 A kadar akım verebilen bir güç kaynağı kullanılmıştır.



Şekil 5.1 DeneySEL elektroliz hücresi

$$P_{avg} = V_{rms} \times I_{rms} \quad (5.1)$$

V_{rms} , elde edilen ortalama voltaj değerine karelerinin ortalamasının karekökü veya kısaca RMS değeri denir. V_{rms} görev dögüsü %50 olduğunda Denk. 5.2'ye göre hesaplanmıştır.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_{Tepe\ gerilimi}^2}{2}} \quad (5.2)$$

V_{rms} görev dögüsü %10 olduğunda Denk. 5.3'e göre hesaplanmıştır.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_{Tepe\ gerilimi}^2}{10}} \quad (5.3)$$

Hücrenin frekansa olan tepkisini araştırmak için, yapılan deneylerin ilk adımı, DC modunda bir akım değeri ve zaman ölçümü yaparak, 10 ml'lik hidrojen birikimi için gerekli zamanı belirlemektir. Grafikselsel hesaplamaları yapabilmek için de 1 ml hidrojen üretimi için gereken enerji hesaplanmıştır. Deneyin bir sonraki adımı ise aynı gerilim değerinde farklı frekans ve farklı görev dögüsü uygulanarak voltaj ve akım değerlerini I_{rms} osiloskop vasıtasıyla ölçmektir. Osiloskop sadece voltajı doğrudan ölçebilmekte ancak akımı ölçememektedir. Akımı ölçmek için MOSFET elemanından sonra bir şönt direnç bağlayarak üstüne düşen gerilim ölçülmüştür.

Şönt direnci üzerindeki potansiyel fark, şönt direnç ile üzerinden geçen akımın çarpımıyla orantılıdır. Voltaj dalgasının şekli ne olursa olsun akımla aynı dalga şekli osiloskopta görülebilir [91]. Görev dögüsü değeri %10 kullandığında frekans 1kHz'den 220 kHz'e değiştirilebilir. Aynı zamanda görev dögüsü değeri %50 kullandığında frekans değerinin 1.3 MHz' e kadar arttırılması mümkündür.

5.2 Deneysel Çalışma ve Sonuçlar

Tez çalışmasında elektrolizin etkinliği incelenmiş ve bu etkinliğin artırılması için çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla, spesifik hücre için tüketilen enerjinin azaltılması

incelenmiştir. Seçilen alkali su çözeltisi için yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

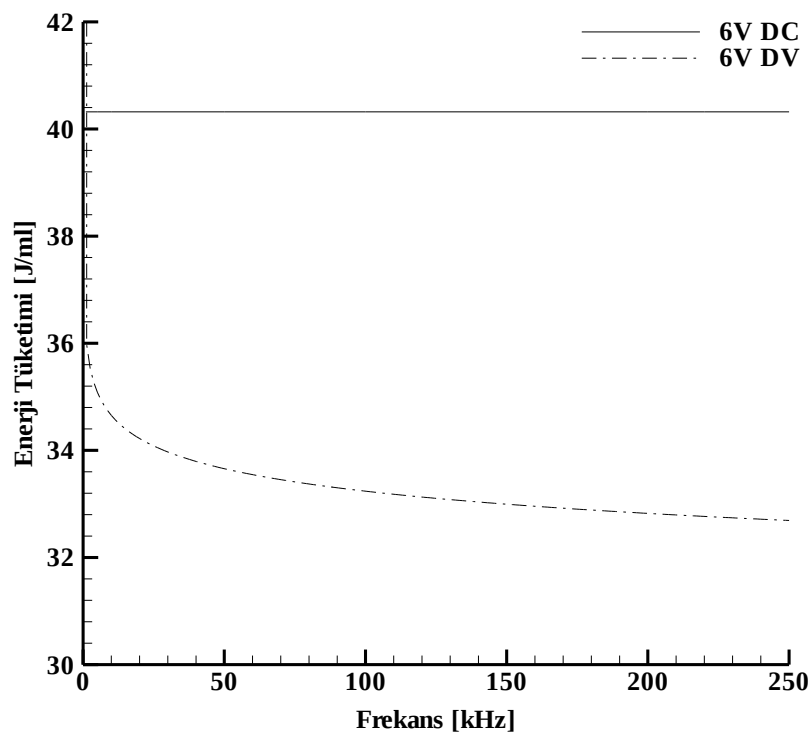
Deney 1:

Yapılan ilk deneyde, 6V DC uygulanarak, ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisinde 10 ml'lik H₂ üretilmiş ve tüketilen enerji miktarı hesaplanmıştır.

Deney 2:

İkinci deneyde, 6V DC uygulanarak, ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisinde 10 ml'lik H₂ üretildi. İlk deneyden farklı olarak %10 görev döngüsü ile frekans kontrollü DV uygulandı, her frekans değeri için 10 ml hidrojen toplandıktan sonra frekans değeri artırıldı. Bu deneyde maksimum 220 kHz uygulanabilmiştir çünkü bu değerden sonra darbe şeklinde formasyon oluşmaya başlamıştır.

Şekil 5.3'de ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisi, 6 V DC ve %10 görev döngüsü uygulanarak birim hidrojen üretmek için gerekli enerji miktarını göstermektedir. DC uygulandığında birim hidrojen üretmek için 40.3 J enerji tüketilirken aynı voltaj değerinde darbe %10 görev döngüsü ile uygulandığında yaklaşık 31 J enerji tüketilmiştir.

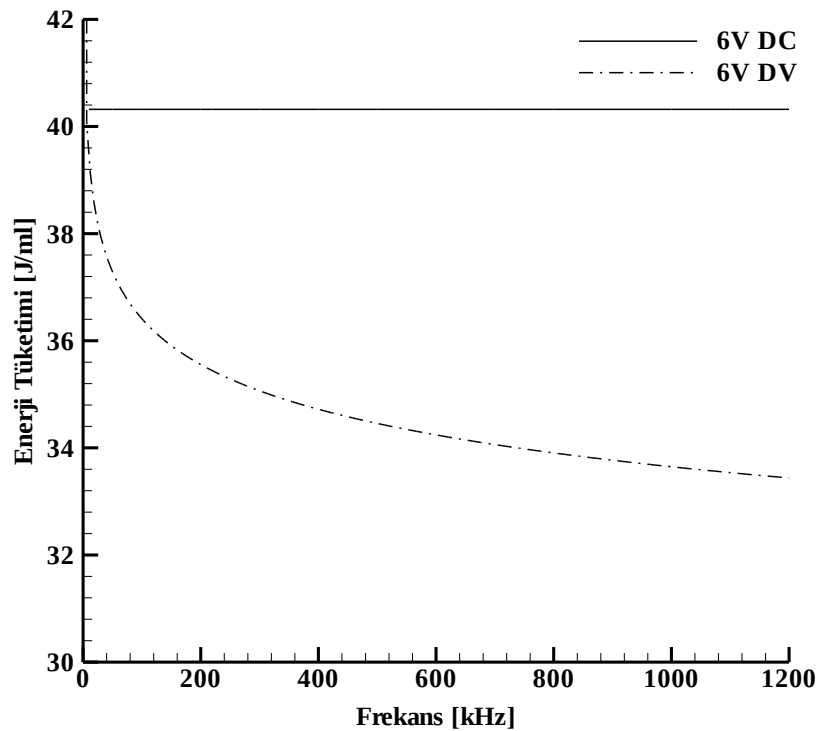


Şekil 5.3 Ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisine 6 V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

Deney 3:

Yapılan üçüncü deneyde, 6V DC uygulanarak, ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisinde 10 ml'lik H₂ üretilmiştir. İlk deneyden farklı olarak bu deneyde %50 görev döngüsü ile frekans kontrollü DV uygulandı. Her frekans değeri için 10 ml hidrojen toplandı. Ardından frekans değeri artırılarak her frekans değeri için tekrar 10 ml hidrojen toplanmıştır.

Şekil 5.4'de ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisinde, 6V DC ve DV ile %50 görev döngüsü uygulandığında birim hidrojen üretmek için gerekli olan enerji miktarı görülmektedir. DC uygulandığında birim hidrojen üretmek için 40.3 J tüketilirken aynı voltaj değerinde darbe ile %50 görev döngüsü uygulandığında yaklaşık 31 J tüketilmiştir. Yani %10 görev döngüsü ile 220 kHz frekansta ve %50 görev döngüsü ile 1100 kHz frekansta birim hidrojen üretmek için aynı miktar enerji tüketilmektedir.



Şekil 5.4 Ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisine 6V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

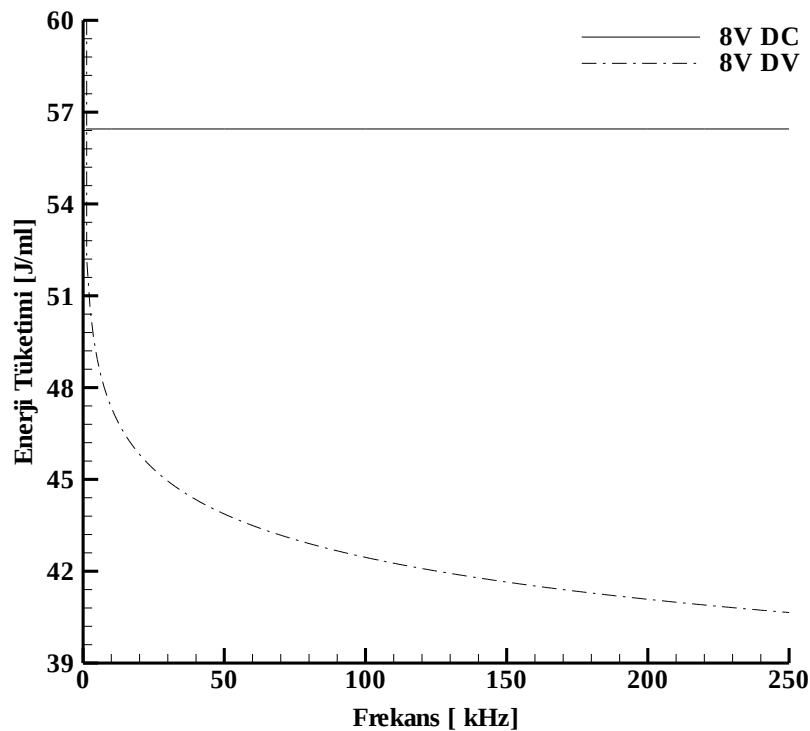
Deney 4:

Yapılan dördüncü deneyde diğer deneylerden farklı olarak 8V DC uygulanarak, ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisinde 10 ml'lik H₂ üretilmiştir.

Deney 5:

Beşinci deneyde, 8V DC uygulanarak 10 ml'lik H₂ üretildi. Dördüncü deneyden farklı olarak bu deneyde %10 görev döngüsü ile frekans kontrollü DV uygulandı. Her frekans değeri için 10 ml hidrojen toplandıktan sonra frekans değeri artırıldı. Bu deneyde maksimum 220 kHz uygulanabildi.

Şekil 5.5 beşinci deneyde 8V DC ve DV kullanıldığında birim hidrojen üretmek için gerekli enerji miktarlarını göstermektedir. DC uygulandığında birim hidrojen üretmek için 56.4 J enerji tüketilirken, aynı voltaj değerinde darbe %10 görev döngüsü ile uygulandığında bu değer yaklaşık 38 J olarak hesaplandı.

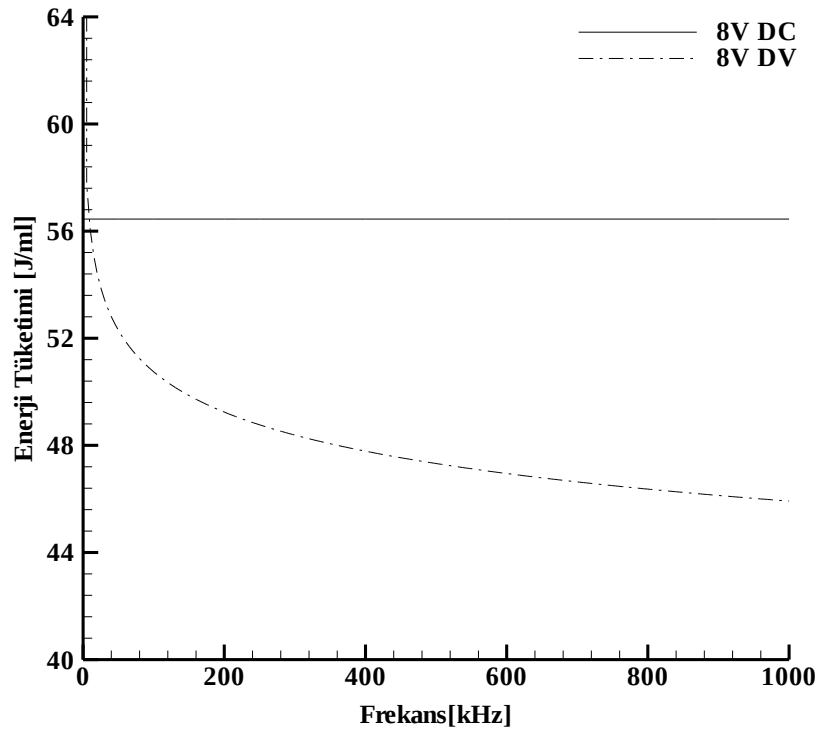


Şekil 5.5 Ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisine 8V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

Deney 6:

Yapılan altıncı deneyde, 8V DC uygulandı. Bu deneyde %50 görev döngüsü ile frekans kontrollü DV uygulandı, her frekans değeri için 10 ml hidrojen toplandı ardından frekans değeri arttırıldı. Bu deneyde maksimum 1100 kHz uygulanabildi.

Şekil 5.6'da 8Volt DC ve %50 görev döngüsü ile darbe voltaj uygulanarak birim hidrojen üretmek için gerekli olan enerji miktarı verilmiştir. DC uygulandığında birim hidrojen üretmek için 56.4 J enerji tüketilirken, aynı voltaj değerisinde darbe uygulandığında yaklaşık 41 J enerji tüketildi. Yani %10 görev döngüsü ile 300 kHz frekansta ve %50 görev döngüsü ile 1000 kHz frekansta birim hidrojen üretmek için aynı miktar enerji tüketildiği görüldü.



Şekil 5.6 Ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisine 8V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

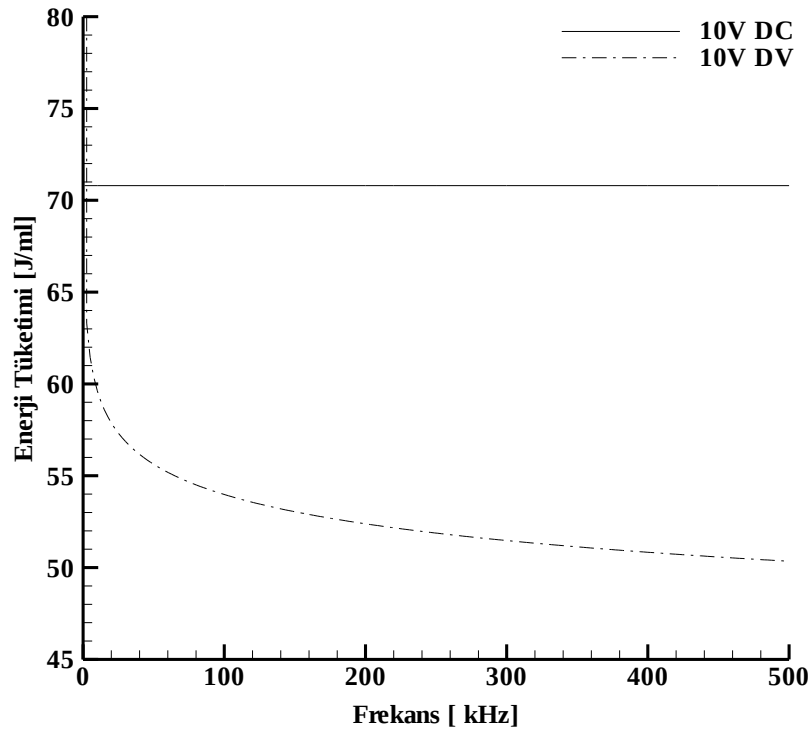
Deney 7:

Yapılan yedinci deneyde, 10V DC uygulanarak, ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisinde 10 ml'lik H₂ üretilmiştir ve tüketilen enerji miktarı hesaplanmıştır.

Deney 8:

Sekizinci deneyde, 10V DC uygulanarak, ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisinde 10 ml'lik H_2 üretilmiştir. Yedinci deneyden farklı olarak bu deneyde %10 görev döngüsü uygulandı. Bu deneyde maksimum 400 kHz uygulanabildi.

Şekil 5.7'de ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisinde, 10V DC ve %10 görev döngüsü ile darbe voltaj uygulanarak birim hidrojen üretmek için gerekli olan enerji miktarı görülmektedir. DC uygulandığında birim hidrojen üretmek için 70 J enerji tüketilirken, aynı voltaj değerisinde darbe uygulandığında 45 J enerji tüketilmektedir.



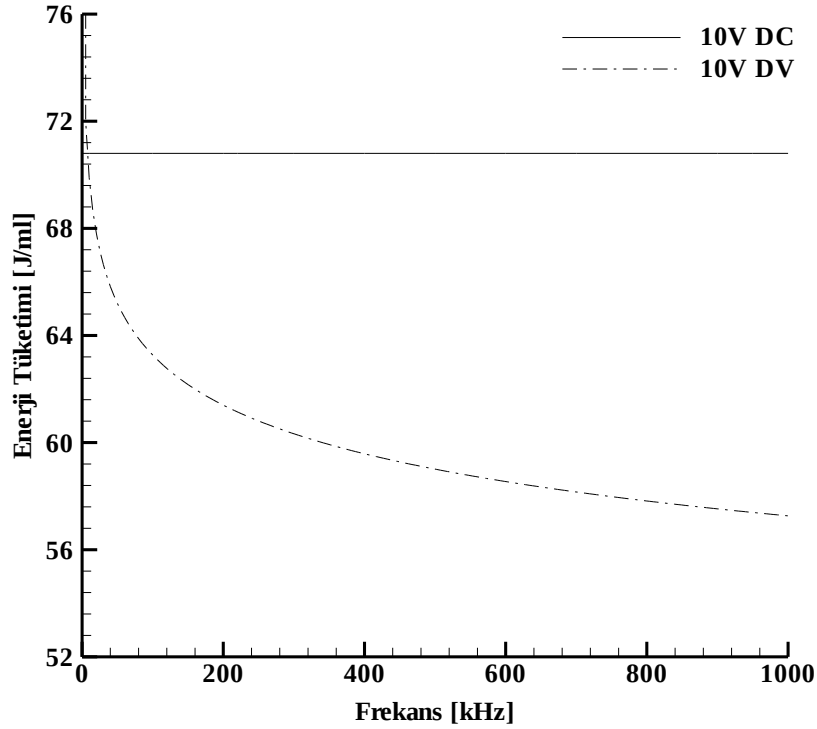
Şekil 5.7 Ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

Deney 9:

Dokuzuncu deneyde %50 görev döngüsü ile frekans kontrollü DV uygulandı. Her frekans değeri için 10 ml hidrojen toplanarak frekans değeri arttırıldı. Bu deneyde maksimum 950 kHz uygulanabildi.

Şekil 5.8'de dokuzuncu deneye ait birim hidrojen üretimi için enerji miktarları verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere DC uygulandığında birim hidrojen üretmek için

70 J'lük enerji tüketiminin aynı voltaj değerinde %50 görev döngüsü ile darbe uygulandığında yaklaşık 52 J'e düştüğü görülmüştür. Yani görev döngüsü %50 ile birim hidrojen üretmek için daha fazla enerji tüketilmektedir. Sonuç olarak voltaj arttıkça elektrolizör kayıplar daha fazla olmaktadır.



Şekil 5.8 Ağırlıkça %10 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

Deney 10:

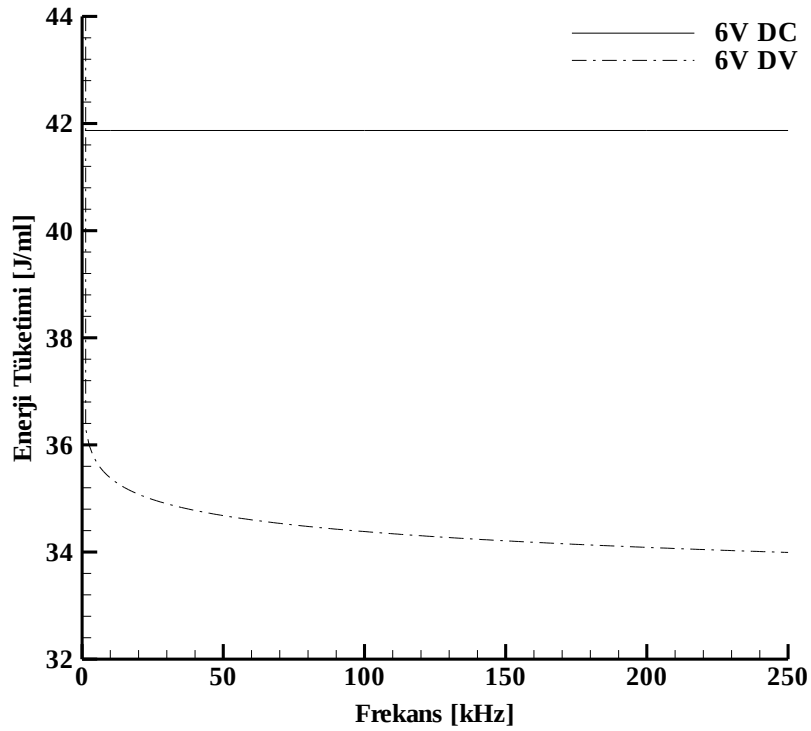
Yapılan onuncu deneyde, diğer deneylerden farklı olarak ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisi için yapılmıştır. Bu deney 6V DC ve %100 görev döngüsü için yapılmıştır.

Deney 11:

Bu deneyde %10 görev döngüsü uygulanmış, her frekans değeri için 10 ml hidrojen toplanmış ve daha sonra frekans değeri arttırılmıştır. Frekans maksimum 250 kHz uygulanabilmiştir.

Şekil 5.9'da ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisinde, 6V DC ve %10 görev döngüsü ile darbe voltaj için deney yapılmıştır. Birim hidrojen üretmek için gerekli olan enerji

miktarları karşılaştırılmıştır. DC uygulandığında 41.8 J enerji tüketimi olurken %10 görev döngüsü ile darbe uygulandığında yaklaşık 33.3 J enerji tüketildiği görülmüştür.

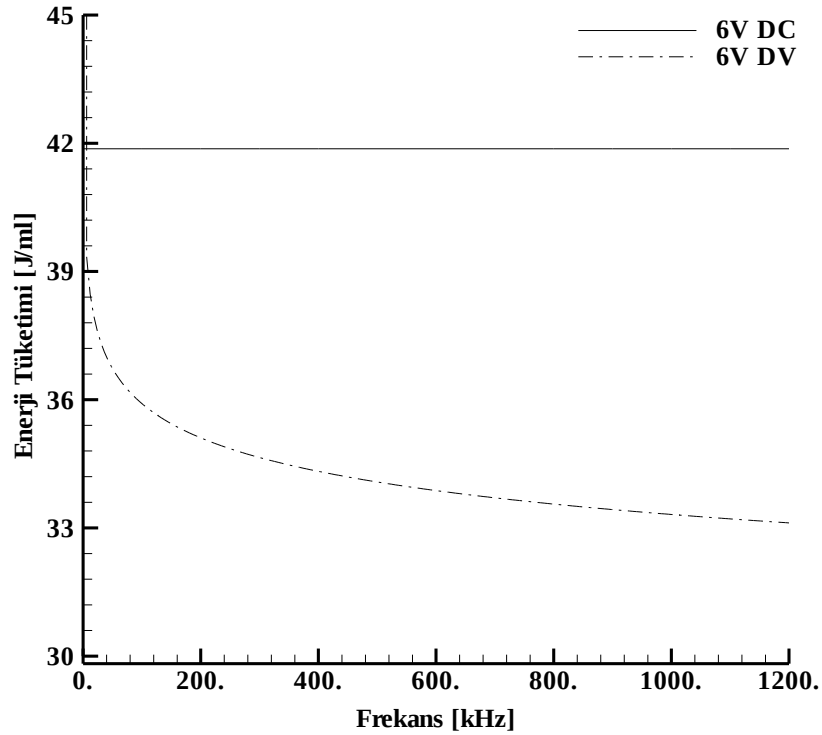


Şekil 5.9 Ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisine 6V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

Deney 12:

Yapılan on ikinci deneyde %50 görev döngüsü ile frekans kontrollü DV uygulanarak frekans değeri arttırıldı. Bu deneyde maksimum 1200 kHz uygulanabildi.

Şekil 5.10'da bu deney için enerji tüketim miktarları DC için 41.8 J olarak hesaplanırken aynı voltaj değerisinde %50 görev döngüsü ile darbe uygulandığında yaklaşık 33.5 J olarak hesaplanmıştır. Deney ölçümleri sonucunda %10 görev döngüsü ile 200 kHz frekansta ve %50 görev döngüsü ile 1100 kHz frekansta birim hidrojen üretmek için aynı miktar enerji tüketildiği görülmüştür.



Şekil 5.10 Ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisine 6 V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

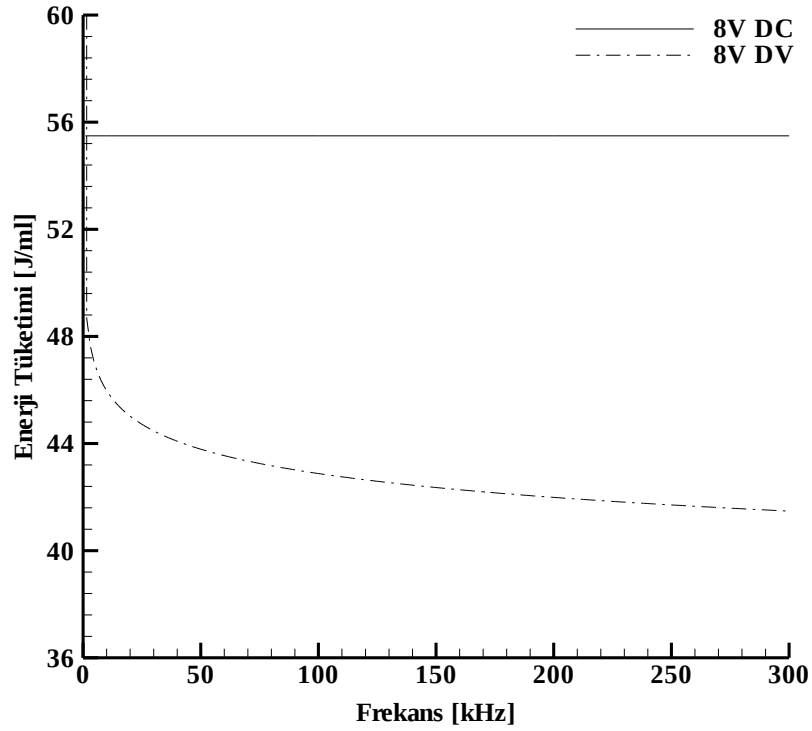
Deney 13:

On üçüncü deneyde, 8V DC uygulanarak, ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisinde 10 ml'lik H₂ üretilmiştir ve tüketilen enerji miktarı hesaplanmıştır.

Deney 14:

Yapılan on dördüncü deneyde, on üçüncü deneyden farklı olarak bu deneyde %10 görev döngüsü ile frekans kontrollü DV uygulanmıştır. Bu deneyde maksimum 300 kHz uygulanabilmiştir.

Şekil 5.11'de bu deney için her iki voltaj değerinin enerji tüketim miktarları karşılaştırılmıştır. DC ve DV uygulandığında enerji değerleri sırasıyla 55.4 J ve 40 J olarak hesaplanmıştır.

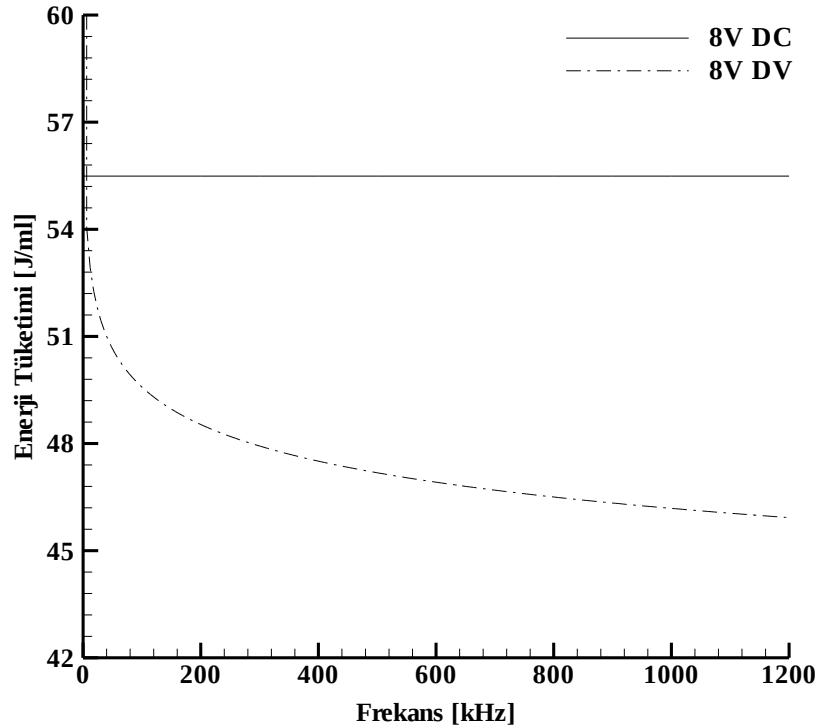


Şekil 5.11 Ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisine 8V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

Deney 15:

Yapılan on beşinci deneyde %50 görev döngüsü uygulanmış ve maksimum frekans değeri 1000 kHz'e kadar çıkarılabilmektedir.

Bu deneyde DC için 55.4 J enerji tüketimi hesaplanırken darbe uygulandığında yaklaşık 43 J olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.12'de bu verilerin karşılaştırılması verilmiştir. Birim hidrojen üretmek için enerji tüketimi %50 görev döngüsünde %10 görev döngüsünden daha fazladır çünkü voltaj arttıkça kayıplar daha fazla olmaktadır.



Şekil 5.12 Ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisine 8 V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

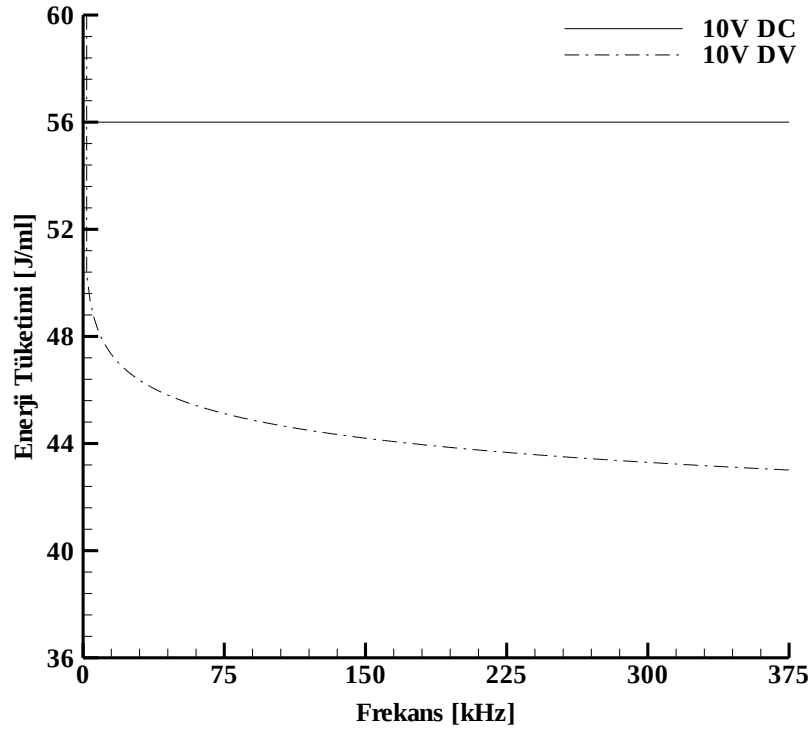
Deney 16:

Bu deneyde, 10V DC uygulanarak, ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisinde 10 ml'lik H₂ üretilmiş ve tüketilen enerji miktarı hesaplanmıştır.

Deney 17:

Yapılan on yedinci deneyde, 10V DC uygulanarak, ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisinde 10 ml'lik H₂ üretilmiştir. On altıncı deneyden farklı olarak bu deneyde %10 görev döngüsü ile frekans kontrollü DV uygulandı, her frekans değeri için 10 ml hidrojen toplandı daha sonra frekans değeri arttırıldı. Bu deneyde maksimum 500 kHz uygulanabildi.

Şekil 5.13'den tüketilen enerji miktarlarının her iki voltaj değeri için sırasıyla 56 J ve 45 J olduğu görülmektedir.

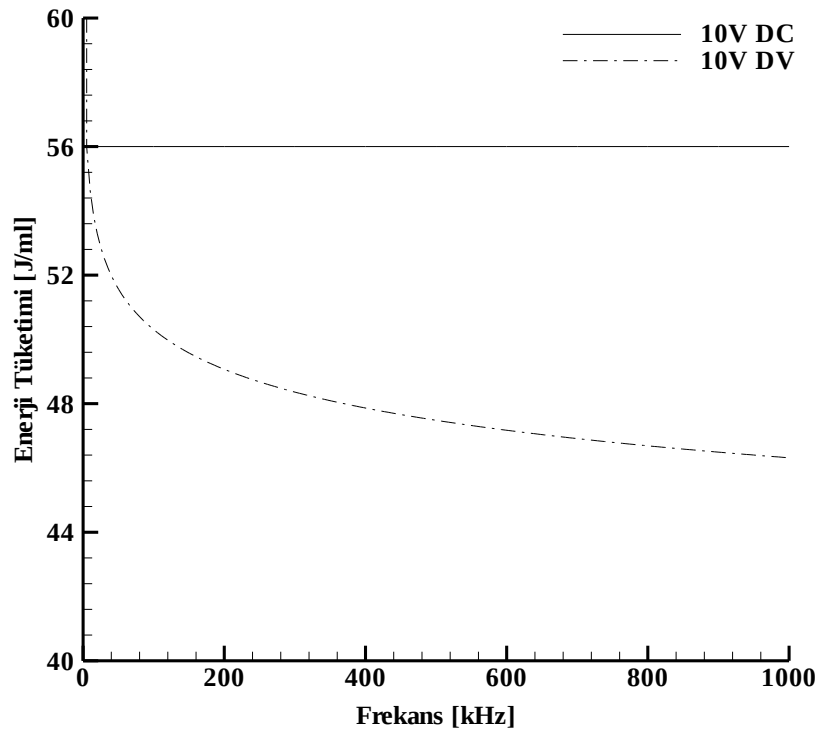


Şekil 5.13 Ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

Deney 18:

On sekizinci deneyde %50 görev döngüsü ile frekans kontrollü DV uygulandı ve frekans maksimum 1000 kHz uygulanabildi.

Şekil 5.14’de her iki voltaj değeri için enerji tüketim miktarları görülmektedir. Şekilden DC uygulandığında enerji değerinin 55 J olduğu, darbe voltaj uygulandığında ise 45.5 J olduğu görülmektedir.



Şekil 5.14 Ağırlıkça %15 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

5.3 Sonuçlar

Tablo 5.1’de deney sonuçları arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ağırlıkça %10 ve %15 KOH çözeltisinde ayrı ayrı %10, %50 ve %100 görev döngüsü uygulandığında, voltaj arttıkça polarizasyon kayıpları ve ohmik kayıplarının arttığını bundan dolayı birim hidrojen üretmek için tüketilen enerji miktarında da artış olduğu tespit edilmiştir.

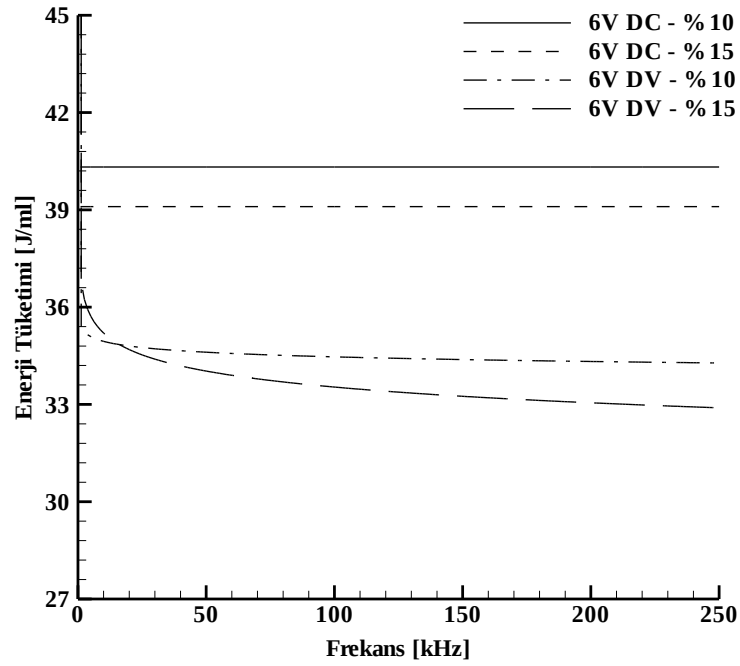
Görev döngüsü arttıkça iki darbe piki arasındaki mesafe azalmaktadır ve bu esnada kimyasal reaksiyonu tamamen bitmediğinden hücre kayıplarında artış gözlenebilmektedir.

Tablo 5.1 Deneyler sonuçlarının karşılaştırılması

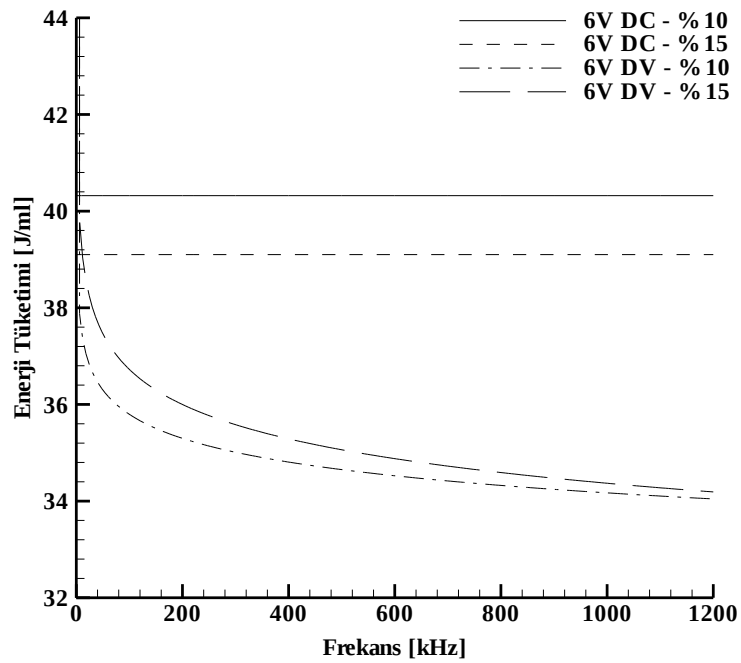
	Ağırlıkça %10					
	%100 görev döngüsü		%50 görev döngüsü		%10 görev döngüsü	
Voltaj	Frekans [kHz]	Birim hidrojen üretmek için tüketilen enerji miktarı [J/ml]	Frekans [kHz]	Birim hidrojen üretmek için tüketilen enerji miktarı [J/ml]	Frekans [kHz]	Birim hidrojen üretmek için tüketilen enerji miktarı [J/ml]
6V	DC	40.3	1100	31	220	31
8V	DC	56.4	1100	41	220	38
10V	DC	70.8	950	52	400	45.5
	Ağırlıkça %15					
	%100 görev döngüsü		%50 görev döngüsü		%10 görev döngüsü	
Voltaj	Frekans [kHz]	Birim hidrojen üretmek için tüketilen enerji miktarı [J/ml]	Frekans [kHz]	Birim hidrojen üretmek için tüketilen enerji miktarı [J/ml]	Frekans [kHz]	Birim hidrojen üretmek için tüketilen enerji miktarı [J/ml]
6V	DC	41.8	1100	33.5	250	33.3
8V	DC	55.5	1000	43	200	40
10V	DC	55	900	45.5	400	45

5.3.1 6V'luk hücre gerilimi koşullarında elde edilen sonuçlar:

6V DC ve DV durumlarında görev döngüsü %10-%50 için Şekil 5.15 ve 5.16'da deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Potasyum hidroksit çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça çözeltide iyon sayısı artar ve birim hidrojen üretmek için daha az enerji ihtiyacı gerekir.



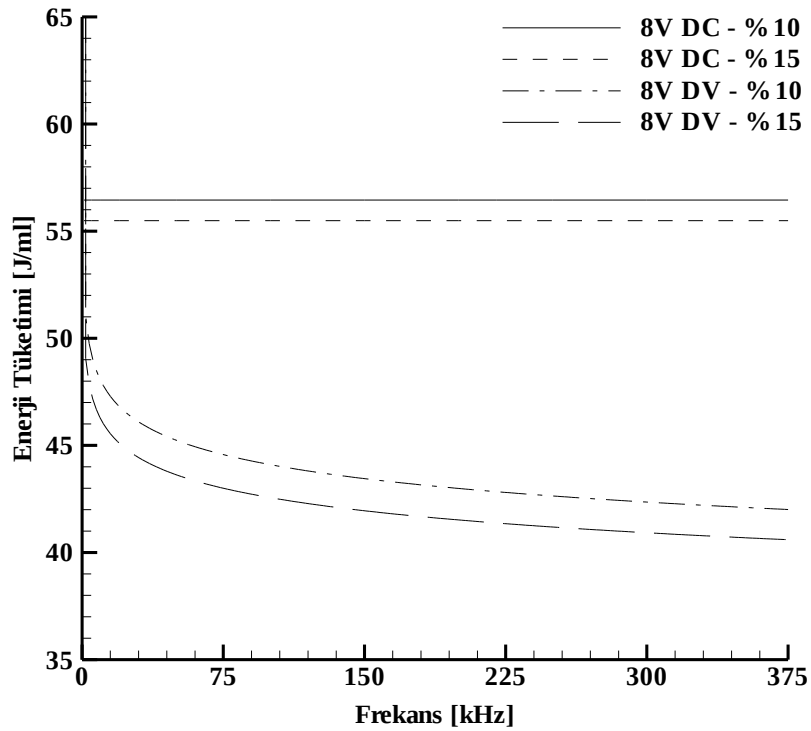
Şekil 5.15 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 6V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı



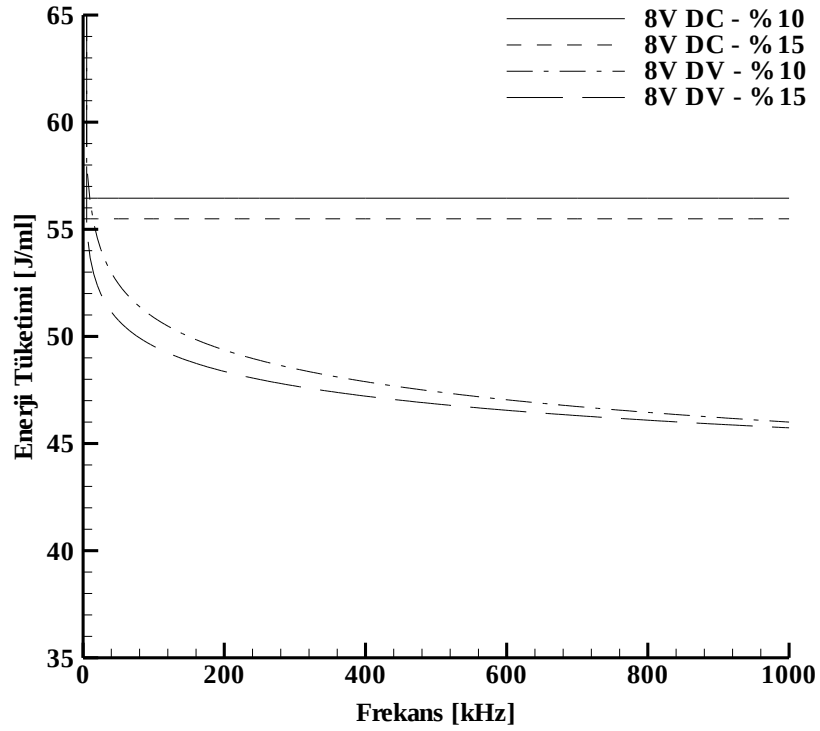
Şekil 5.16 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 6V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

5.3.2 8V'luk hücre gerilimi koşullarında elde edilen sonuçlar:

Şekil 5.17 ve 5.18'de 8V DC ve DV durumunda görev döngüsü %10-%50 olduğundaki durumlar için karşılaştırma yapılmıştır. Birim hidrojen üretmek için daha az enerji ihtiyacı gerektiği ve aynı zamanda 6V durumuna göre enerji tüketiminin arttığı görülmüştür.



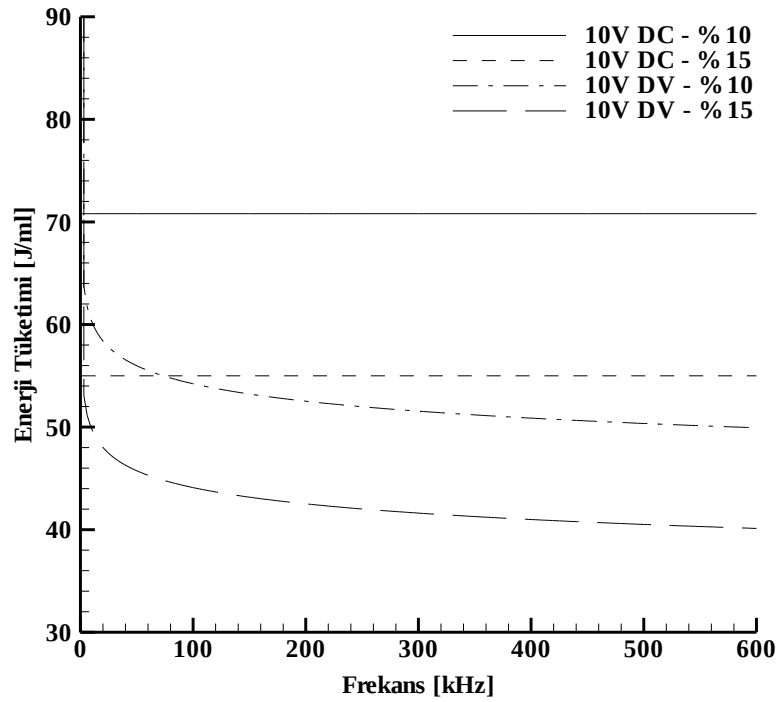
Şekil 5.17 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 8V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı



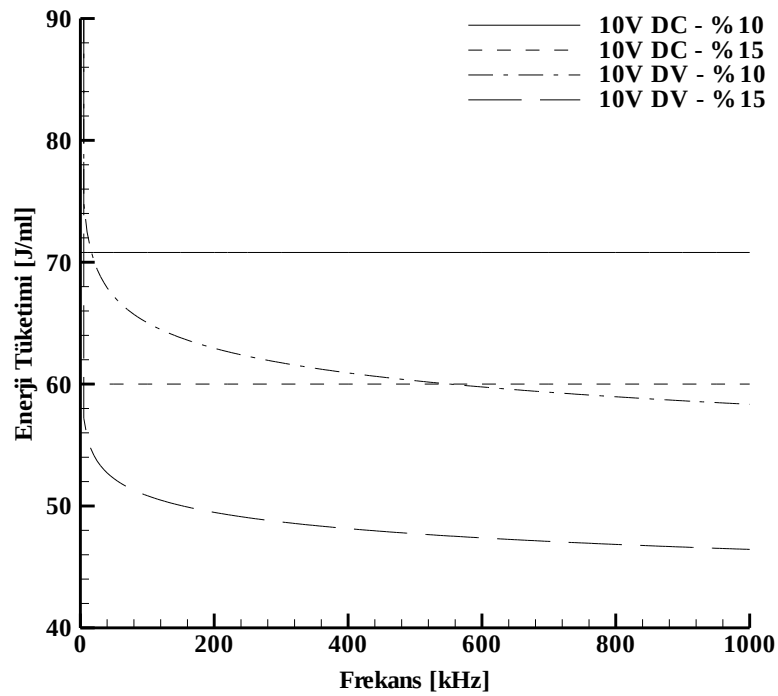
Şekil 5.18 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 8V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı

5.3.3 10V'luk hücre gerilimi koşullarında elde edilen sonuçlar:

10V DC ve DV durumlarında görev döngüsü %10-%50 için Şekil 5.19 ve 5.20'de karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlardan 6V ve 8V durumları için yapılan deney sonuçları incelendiğinde 10V uygulandığında daha fazla enerji ihtiyacı gerektiği görülmüştür.



Şekil 5.19 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve %10 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı



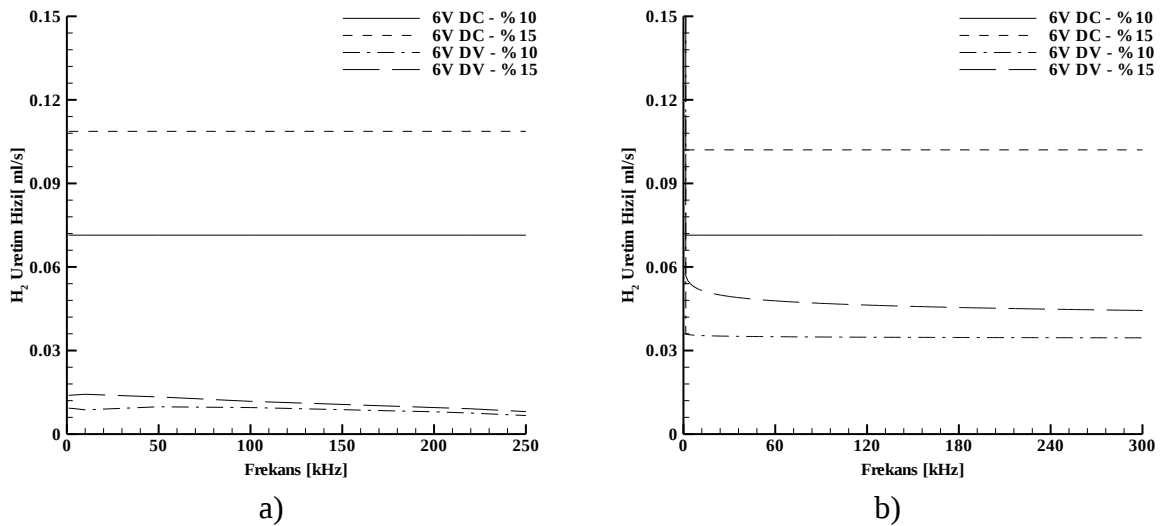
Şekil 5.20 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim hidrojen üretimi için gerekli olan enerji miktarı.

5.4 Frekansın Bir Fonksiyonu Olarak, Farklı Voltaj Değerlerinde Birim Zamanda Üretilen Hidrojen Miktarları

Tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde farklı voltaj ve görev döngüsü değerleri için enerji tüketiminin yanı sıra birim zamanda üretilen hidrojen miktarları da hesaplanmıştır.

5.4.1 6V DC ve %10 ve %50 Görev Döngüsü İle DV Uygulandığında Birim Zamanda Üretilen Hidrojen Miktarı

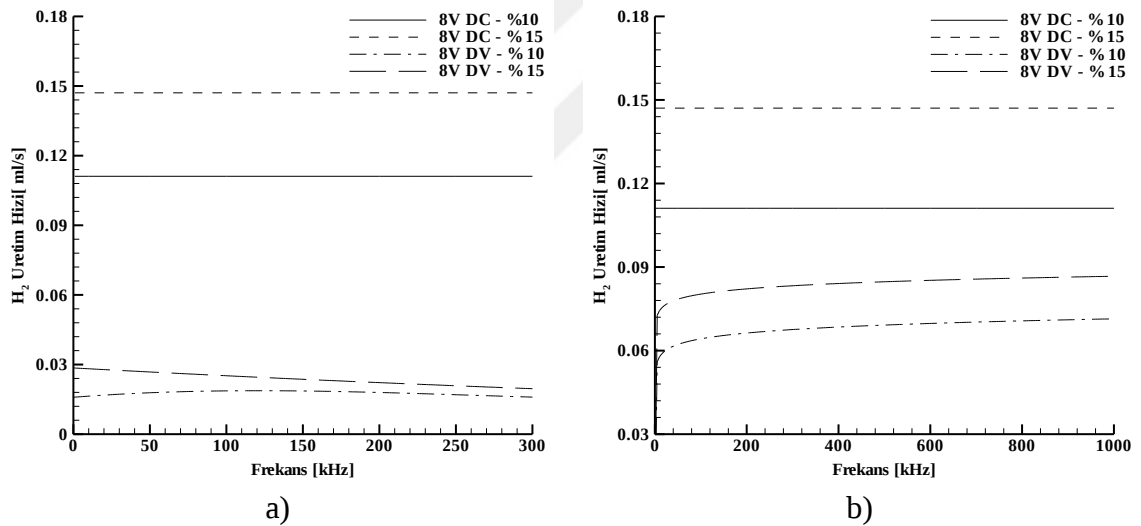
Ağırlıkça %10 potasyum hidroksit çözeltisinde DC uygulandığında bir ml hidrojen üretimi için 14 saniye gerekirken, %10 görev döngüsü uygulandığında 132 saniye, %50 görev döngüsü uygulandığında ise 29 saniye gerekmektedir. Benzer şekilde ağırlıkça %15 potasyum hidroksit çözeltisinde DC uygulandığında 1 ml hidrojen üretimi için 10 saniye, %10 görev döngüsü uygulandığında 105 saniye, %50 görev döngüsü uygulandığında ise 25 saniye gerekmektedir. Şekil 5.21’de ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 6V DC ve a) %10 görev döngüsü ile b) %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim zamanda üretilen hidrojen miktarları görülmektedir.



Şekil 5.22 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 6V DC ve a) %10 görev döngüsü ile b) %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim zamanda üretilen hidrojen miktarı

5.4.2 8V DC ve %10-%50 Görev Döngüsü ile DV Uygulandığında Birim Zamanda Üretilen Hidrojen Miktarı

Ağırlıkça %10 potasyum hidroksit çözeltisinde DC uygulandığında bir ml hidrojen üretmek için 9 saniye gerekirken, %10 görev döngüsünde DV uygulandığında 56 saniye ve %50 görev döngüsü uygulandığında 12.6 saniye gerekmektedir. Benzer şekilde ağırlıkça %15 potasyum hidroksit çözeltisi kullanıldığında ise bir ml hidrojen üretmek için 7 saniye, %10 görev döngüsünde DV uygulandığında 49 saniye ve %50 görev döngüsü uygulandığında 11 saniye gerekmektedir. Şekil 5.22’de birim zamanda üretilen hidrojen miktarı için gerekli süreler görülmektedir. 8V uygulandığında 6V’a göre birim zamanda daha fazla hidrojen üretilebilmekte ancak bunun için daha fazla enerji tüketilmektedir.

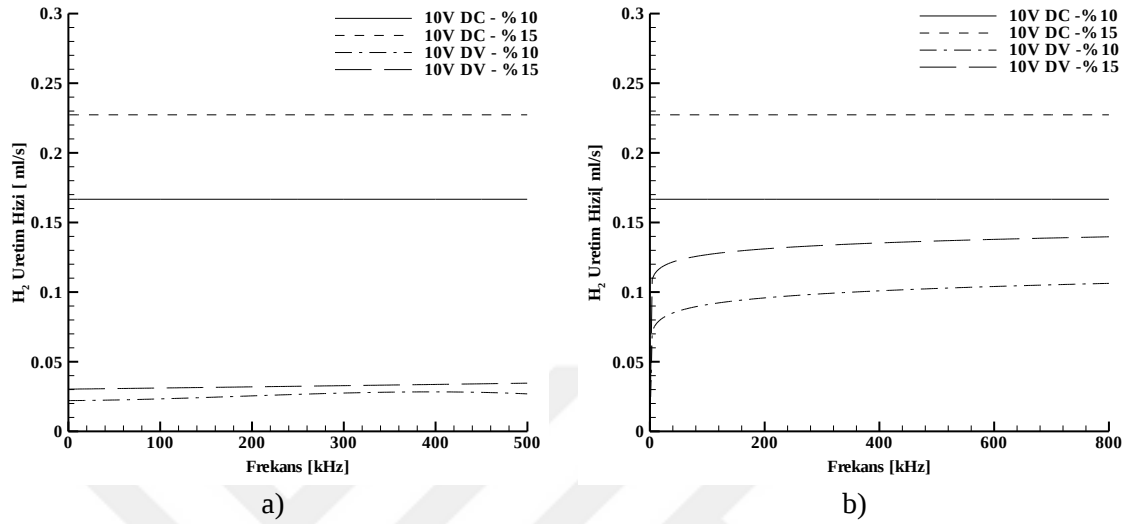


Şekil 5.23 Ağırlıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 8V DC ve a) %10 görev döngüsü ile b) %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim zamanda üretilen hidrojen miktarı

5.4.3 10V DC ve %10-%50 Görev Döngüsü ile DV Uygulandığında Birim Zamanda Üretilen Hidrojen Miktarı

Ağırlıkça %10 potasyum hidroksit çözeltisine DC uygulandığında bir ml hidrojen üretmek için 6 saniye gerekirken, %10 görev döngüsünde DV uygulandığında 32.5 saniye ve %50 görev döngüsü ile uygulandığında ise 8 saniye gibi bir zaman gerekmektedir. Benzer şekilde, ağırlıkça %15 potasyum hidroksit çözeltisine DC uygulandığında ise birim hidrojen üretimi için 5 saniye gerekirken, %10 görev döngüsünde DV uygulandığında 31 saniye ve %50 görev döngüsü uygulandığında 7 saniye gerekmektedir. Şekil 5.23’de 10V için bu durumların karşılaştırılması

yapılmıştır. Voltaj artırıldığında birim zamanda üretilen hidrojen miktarı artmakta ancak tüketilen enerji miktarı daha fazla olmaktadır.



Şekil 5.24 Ağırılıkça %10-%15 KOH sulu çözeltisine 10V DC ve a) %10 görev döngüsü ile b) %50 görev döngüsü ile DV uygulandığında birim zamanda üretilen hidrojen miktarı

6. BÖLÜM

TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, suyun elektrolizinin yüksek frekanslı darbe potansiyeli ile yapılması hidrojen üretimini kayda değer bir biçimde arttırmaktadır. Yapılan çalışmaların sonuçlarından da görüldüğü gibi 1ml hidrojen üretmek için gereken enerji 1300 kHz gibi yüksek frekanslı çalışma şartlarında daha azdır. Bunun sebebi yüksek frekansta daha düşük kütle transferi kayıplarının oluşumundan kaynaklanmaktadır. DV uygulandığı zaman kimyasal reaksiyon yavaşlamakta bu yüzden de birim zamanda üretilen hidrojen miktarı azalmaktadır. Bu sebeple aynı elektrik enerjisi tüketim değerinde daha yavaş bir hidrojen üretimi gözlemlenirken, hidrojenin üretim miktarı daha fazla olmaktadır. Kullanılan darbe potansiyeli ile elde edilen periyodik voltaj, hidrojen ve oksijen gazlarının elektrot yüzeyinde daha az tutunarak ayrılabilmesini ortaya çıkarmıştır.

Bu çalışmada elde edilen yöntemin suyun elektrolizi için yapılan diğer çalışmalara da uygulanabileceği görülmüştür. Tezin deneysel çalışmalarında kullanılan devre tasarımı ve diğer ekipmanlar kolaylıkla diğer elektroliz yöntemlerine adapte edilebilmektedir. Devre üzerindeki bazı temel elemanların değiştirilmesi ile daha yüksek ya da daha düşük güçle çalışan deneysel sistemlerde de rahatlıkla kullanılabilir. Ağırlıkça %10'luk KOH sulu çözeltisinde 6V DV değerinde ve %50 görev döngüsü ile çalıştırılan elektroliz hücresinden elde edilen 110 kHz çalışma frekansında %25-30 civarında enerji tüketim düşüşü ve dolayısıyla performans artışı elde edilebileceği görülmüştür. Bu durum alkali elektroliz sistemi içerisinde bulunan polarizasyon kayıplarının azaltılması ile ilgilidir. DC çalışma şartlarında anot ve katot elektrotlar üzerine biriken gaz kabarcıklarının oluşturduğu kütle transferi ya da diğer bir ifade ile konsantrasyon kayıpları hücrenin performansını azaltırken, DV ile oluşturulan bu anahtarlama

yönteminde, elektrot yüzeyinde bir pompaj etkisi sağlandığından kabarcıklardan kaynaklı bu kayıpların azalarak performans artışının sağlandığı gözlenmiştir. Tasarlanan elektrik devresi ile kontrol edilen elektroliz hücresi kullanılarak daha düşük karbon salımlı hidrojen eldesi sağlanmış, yakıt hücrelerinin ihtiyacı olabilecek hidrojenin daha temiz yollardan elde edilebileceği ortaya çıkarılmıştır. Bu gibi çalışmalar, malzeme teknolojisinin oldukça önemli olduğu elektrokimyasal sistemlerde, güç devresi ve kontrol sistemlerinin tasarımlarının da yüksek performanslı hidrojen üretiminde önemli olduğunu ortaya çıkarmıştır.



KAYNAKLAR

1. Kaya, M. F., 2012. Anot Destekli Silindirik Kati Oksit Yakıt Hücresinin Sayısal Modellenmesi Ve Performansının Analizi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 109 s.
2. Song, C., 2002. Fuel processing for low-temperature and high-temperature fuel cells: Challenges, and opportunities for sustainable development in the 21st century. **Catalysis today**, **77**: (1): 17-49.
3. Farrauto, R., Hwang, S., Shore, L., Ruettinger, W., Lampert, J., Giroux, T., Liu, Y., Ilinich, O., 2003. New material needs for hydrocarbon fuel processing: generating hydrogen for the PEM fuel cell. **Annual Review of Materials Research**, **33**: (1): 1-27.
4. Lemus, R. G., Duarte, J. M. M., 2010. Updated hydrogen production costs and parities for conventional and renewable technologies. **International Journal of Hydrogen Energy**, **35**: (9): 3929-3936.
5. Song, C., 2003. An overview of new approaches to deep desulfurization for ultra-clean gasoline, diesel fuel and jet fuel. **Catalysis today**, **86**: (1): 211-263.
6. Yu, X., Dong, Z., Ren, X., Wang, J., Wang, Y., 2005. Ranliao huaxue xuebao. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**, **33**: 372-378.
7. Babich, I., Moulijn, J., 2003. Science and technology of novel processes for deep desulfurization of oil refinery streams: a review☆. **Fuel**, **82**: (6): 607-631.
8. Muradov, N., 2003. Emission-free fuel reformers for mobile and portable fuel cell applications. **Journal of power Sources**, **118**: (1): 320-324.
9. Demirbas, A., 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in energy and combustion science**, **30**: (2): 219-230.
10. Wu, W., Yoshikawa, K., 2002. R&D on micro-pyrolyzer for solid wastes using high temperature steam and air. **JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering**, **45**: (3): 487-491.
11. Zeng, K., Zhang, D., 2010. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, **36**: (3): 307-326.

12. Wendt, H., Kreysa, G., 1999. Electrochemical engineering: science and technology in chemical and other industries. Springer Science & Business Media, 408 s.
13. LeRoy, R., 1983. Industrial water electrolysis: present and future. **International Journal of Hydrogen Energy**, **8**: (6): 401-417.
14. Bard, A. J., Faulkner, L. R., 2001. Fundamentals and applications. **Electrochemical Methods**, **2**: 455-462.
15. Rossmeisl, J., Logadottir, A., Nørskov, J. K., 2005. Electrolysis of water on (oxidized) metal surfaces. **Chemical physics**, **319**: (1): 178-184.
16. Kinoshita, K., 1992. Electrochemical oxygen technology. John Wiley & Sons,
17. LeRoy, R. L., Bowen, C. T., LeRoy, D. J., 1980. The thermodynamics of aqueous water electrolysis. **Journal of The Electrochemical Society**, **127**: (9): 1954-1962.
18. Dyer, C., 1985. Improved nickel anodes for industrial water electrolyzers. **Journal of the Electrochemical Society**, **132**: (1): 64-67.
19. Nikolic, V. M., Tasic, G. S., Maksic, A. D., Saponjic, D. P., Miulovic, S. M., Kaninski, M. P. M., 2010. Raising efficiency of hydrogen generation from alkaline water electrolysis—energy saving. **International Journal of Hydrogen Energy**, **35**: (22): 12369-12373.
20. Stojić, D. L., Marčeta, M. P., Sovilj, S. P., Miljanić, Š. S., 2003. Hydrogen generation from water electrolysis—possibilities of energy saving. **Journal of Power Sources**, **118**: (1): 315-319.
21. Jovancicevic, V., Bockris, J. M., 1986. The mechanism of oxygen reduction on iron in neutral solutions. **Journal of The Electrochemical Society**, **133**: (9): 1797-1807.
22. Mansouri, K., Ibrik, K., Bensalah, N., Abdel-Wahab, A., 2011. Anodic dissolution of pure Aluminum during electrocoagulation process: Influence of supporting electrolyte, initial pH, and current density. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, **50**: (23): 13362-13372.

23. Defay, R., Bellemans, A., Prigogine, I., 1966. Surface tension and adsorption. 432 s.
24. Jones, S., Evans, G., Galvin, K., 1999. Bubble nucleation from gas cavities—a review. **Advances in colloid and interface science**, **80**: (1): 27-50.
25. Mandin, P., Aissa, A. A., Roustan, H., Hamburger, J., Picard, G., 2008. Two-phase electrolysis process: From the bubble to the electrochemical cell properties. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, **47**: (11): 1926-1932.
26. Nagai, N., Takeuchi, M., Kimura, T., Oka, T., 2003. Existence of optimum space between electrodes on hydrogen production by water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, **28**: (1): 35-41.
27. Ursua, A., Sanchis, P., 2012. Static–dynamic modelling of the electrical behaviour of a commercial advanced alkaline water electrolyser. **International journal of hydrogen energy**, **37**: (24): 18598-18614.
28. Mazloomi, K., Sulaiman, N., Ahmad, S. A., Yunus, N., 2013. Analysis of the frequency response of a water electrolysis cell. **Int. J. Electrochem. Sci**, **8**: (3): 3731-3739.
29. Monk, N., Watson, S., 2016. Review of pulsed power for efficient hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**: (19): 7782-7791.
30. Holladay, J. D., Hu, J., King, D. L., Wang, Y., 2009. An overview of hydrogen production technologies. **Catalysis Today**, **139**: (4): 244-260.
31. Twigg, M. V., 1989. Catalyst handbook. Wolfe , London, 255 s.
32. Song, C., Ma, X., 2003. New design approaches to ultra-clean diesel fuels by deep desulfurization and deep dearomatization. **Applied Catalysis B: Environmental**, **41**: (1): 207-238.
33. Demirbaş, A., 2005. Recovery of chemicals and gasoline-range fuels from plastic wastes via pyrolysis. **Energy Sources**, **27**: (14): 1313-1319.
34. DEMİRBAŞ, A., 2003. Hydrocarbons from pyrolysis and hydrolysis processes of biomass. **Energy sources**, **25**: (1): 67-75.

35. Demirbas, A., Arin, G., 2004. Hydrogen from biomass via pyrolysis: relationships between yield of hydrogen and temperature. **Energy Sources**, **26**: (11): 1061-1069.
36. Guo, Y.-s., He, L., Fang, W.-j., Lin, R.-s., 2003. Study on Pyrolysis-Cracking Coke of Endothermic Hydrocarbon Fuels. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**, **31**: (4): 300-304.
37. Meng, X.-h., Gao, J.-s., Li, L., Xu, C.-m., 2004. Advances in catalytic pyrolysis of hydrocarbons. **Petroleum science and technology**, **22**: (9-10): 1327-1341.
38. Li, L., Gao, J., Xu, C., Meng, X., 2006. Reaction behaviors and mechanisms of catalytic pyrolysis of C4 hydrocarbons. **Chemical Engineering Journal**, **116**: (3): 155-161.
39. Tsadkin, M., Kolesov, S., Khabibullin, R., Gimaev, R., 2005. Barium chloride-based industrial catalysts for pyrolysis of hydrocarbon feedstock. **Petroleum Chemistry**, **45**: (2): 107-117.
40. Zhagfarov, F., Grigor'Eva, N., Lapidus, A., 2005. New catalysts of hydrocarbon pyrolysis. **Chemistry and technology of fuels and oils**, **41**: (2): 141-145.
41. Salakhov, I., Ekimova, A., Eiyatdinov, A. S., Diyarov, I., Gil'manov, K. K., Shangareeva, A., 2005. Effect of feedstock hydrocarbon composition on the distribution of products of initiated pyrolysis. **Chemistry and technology of fuels and oils**, **41**: (5): 386-394.
42. Guo, Y.-S., Fang, W.-J., Lin, R.-S., 2005. Coking-inhibition of pyrolysis-cracking of endothermic hydrocarbon fuel. **Zhejiang Daxue Xuebao(Gongxue Ban)/Journal of Zhejiang University(Engineering Science)**, **39**: (4): 538-541.
43. Kothari, R., Buddhi, D., Sawhney, R., 2004. Sources and technology for hydrogen production: a review. **International journal of global energy issues**, **21**: (1-2): 154-178.
44. Sekiguchi, H., Mori, Y., 2003. Steam plasma reforming using microwave discharge. **Thin solid films**, **435**: (1): 44-48.
45. Czernichowski, A., Czernichowski, P., Wesolowska, K., 2004. Plasma-catalytical partial oxidation of various carbonaceous feeds into synthesis gas.

2nd international conference on fuel cell science, engineering and technology, New York. 11: (1): 14-16.

46. Bromberg, L., Cohn, D. R., Rabinovich, A., 1997. Plasma reformer-fuel cell system for decentralized power applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, **22: (1): 83-94.**
47. Matsui, Y., Kawakami, S., Takashima, K., Katsura, S., Mizuno, A., 2005. Liquid-phase fuel re-forming at room temperature using nonthermal plasma. **Energy & fuels**, **19: (4): 1561-1565.**
48. Paulmier, T., Fulcheri, L., 2005. Use of non-thermal plasma for hydrocarbon reforming. **Chemical engineering journal**, **106: (1): 59-71.**
49. Muta-Yardimci, O., Saveliev, A., Fridman, A., Kennedy, L., 1998. Employing plasma as catalyst in hydrogen production. **International journal of hydrogen energy**, **23: (12): 1109-1111.**
50. Bromberg, L., Cohn, D., Rabinovich, A., Alexeev, N., 1999. Plasma catalytic reforming of methane. **International Journal of Hydrogen Energy**, **24: (12): 1131-1137.**
51. Biniwale, R. B., Mizuno, A., Ichikawa, M., 2004. Hydrogen production by reforming of iso-octane using spray-pulsed injection and effect of non-thermal plasma. **Applied Catalysis A: General**, **276: (1): 169-177.**
52. Hammer, T., Kappes, T., Baldauf, M., 2004. Plasma catalytic hybrid processes: gas discharge initiation and plasma activation of catalytic processes. **Catalysis Today**, **89: (1): 5-14.**
53. Arana, L. R., Schaevitz, S. B., Franz, A. J., Schmidt, M. A., Jensen, K. F., 2003. A microfabricated suspended-tube chemical reactor for thermally efficient fuel processing. **Journal of Microelectromechanical Systems**, **12: (5): 600-612.**
54. Choudhary, T. V., Goodman, D., 2002. CO-free fuel processing for fuel cell applications. **Catalysis Today**, **77: (1): 65-78.**
55. Metkemeijer, R., Achard, P., 1994. Ammonia as a feedstock for a hydrogen fuel cell; reformer and fuel cell behaviour. **Journal of Power Sources**, **49: (1-3): 271-282.**

56. Wojcik, A., Middleton, H., Damopoulos, I., 2003. Ammonia as a fuel in solid oxide fuel cells. **Journal of Power Sources**, **118**: (1): 342-348.
57. Call, C., Powell, M., Fountain, M., Chellappa, A., Pan, S., 2001. Ammonia-based hydrogen generation for portable power. **Small Fuel Cells**, 22-24.
58. Chachuat, B., Mitsos, A., Barton, P. I., 2005. Optimal design and steady-state operation of micro power generation employing fuel cells. **Chemical Engineering Science**, **60**: (16): 4535-4556.
59. Gardner, K., 2001. Portable Fuel Cells for Military Applications. Washington, DC, 2001. 255 s.
60. Uribe, F. A., Zawodzinski, T. A., 2001. Effects Of Fuel Impurities On Pem Fuel Cell Performance. Los Alamos National Laboratory, USA. 225 s.
61. Demirbas, M. F., 2006. Hydrogen from various biomass species via pyrolysis and steam gasification processes. **Energy Sources, Part A**, **28**: (3): 245-252.
62. Asadullah, M., Ito, S.-i., Kunimori, K., Yamada, M., Tomishige, K., 2002. Energy efficient production of hydrogen and syngas from biomass: development of low-temperature catalytic process for cellulose gasification. **Environmental science & technology**, **36**: (20): 4476-4481.
63. Carrieri, D., Kolling, D., Ananyev, G., Dismukes, G. C., 2006. Prospecting for biohydrogen fuel. **Industrial Biotechnology**, **2**: (2): 133-137.
64. Nath, K., Das, D., 2004. Biohydrogen production as a potential energy resource—Present state-of-art. **Journal of Scientific and Industrial Research**, **63**: (09): 729-735.
65. Levin, D. B., Pitt, L., Love, M., 2004. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. **International journal of hydrogen energy**, **29**: (2): 173-185.
66. Wills, J., 2006. Small fuel cells. **Fuel Cell Review**, (April 2006), 12-14.
67. Asada, Y., Miyake, J., 1999. Photobiological hydrogen production. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, **88**: (1): 1-6.
68. Kapdan, I. K., Kargi, F., 2006. Bio-hydrogen production from waste materials. **Enzyme and microbial technology**, **38**: (5): 569-582.

69. Rashid, M. M., Al Mesfer, M. K., Naseem, H., Danish, M., 2015. Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis. **Int J Eng Adv Technol**, **4**: (3): 80-93.
70. Wang, M., Wang, Z., Gong, X., Guo, Z., 2014. The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **29**: 573-588.
71. Zhang, H., Lin, G., Chen, J., 2010. Evaluation and calculation on the efficiency of a water electrolysis system for hydrogen production. **international journal of hydrogen energy**, **35**: (20): 10851-10858.
72. Laoun, B., 2007. Thermodynamics aspect of high pressure hydrogen production by water electrolysis. **Revue des energies renouvelables**, **10**: (3): 435-444.
73. Kim, S., Koratkar, N., Karabacak, T., Lu, T.-M., 2006. Water electrolysis activated by Ru nanorod array electrodes. **Applied physics letters**, **88**: (26): 2106-2132 .
74. Matsushima, H., Fukunaka, Y., Kuribayashi, K., 2006. Water electrolysis under microgravity: Part II. Description of gas bubble evolution phenomena. **Electrochimica acta**, **51**: (20): 4190-4198.
75. Kiuchi, D., Matsushima, H., Fukunaka, Y., Kuribayashi, K., 2006. Ohmic resistance measurement of bubble froth layer in water electrolysis under microgravity. **Journal of The Electrochemical Society**, **153**: (8): 138-143.
76. Boissonneau, P., Byrne, P., 2000. An experimental investigation of bubble-induced free convection in a small electrochemical cell. **Journal of Applied Electrochemistry**, **30**: (7): 767-775.
77. Vogt, H., Balzer, R., 2005. The bubble coverage of gas-evolving electrodes in stagnant electrolytes. **Electrochimica Acta**, **50**: (10): 2073-2079.
78. Badwal, S., Giddey, S., Ciacchi, F., 2006. Hydrogen and oxygen generation with polymer electrolyte membrane (PEM)-based electrolytic technology. **Ionics**, **12**: (1): 7-14.

79. Millet, P., Andolfatto, F., Durand, R., 1996. Design and performance of a solid polymer electrolyte water electrolyzer. **International Journal of Hydrogen Energy**, **21**: (2): 87-93.
80. Petrov, Y., Schosger, J.-P., Stoyanov, Z., de Bruijn, F., 2011. Hydrogen evolution on nickel electrode in synthetic tap water–alkaline solution. **international journal of hydrogen energy**, **36**: (20): 12715-12724.
81. Petitjean, M., Reytier, M., Chatroux, A., Bruguière, L., Mansuy, A., Sassoulas, H., Di Iorio, S., Morel, B., Mougin, J., 2011. Performance and durability of high temperature steam electrolysis: from the single cell to short-stack scale. **ECS Transactions**, **35**: (1): 2905-2913.
82. Ulleberg, Ø., 2003. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. **International journal of hydrogen energy**, **28**: (1): 21-33.
83. De Souza, R. F., Padilha, J. C., Gonçalves, R. S., Dupont, J., 2003. Room temperature dialkylimidazolium ionic liquid-based fuel cells. **Electrochemistry Communications**, **5**: (8): 728-731.
84. Lagrost, C., Carrie, D., Vaultier, M., Hapiot, P., 2003. Reactivities of some electrogenerated organic cation radicals in room-temperature ionic liquids: toward an alternative to volatile organic solvents? **The Journal of Physical Chemistry A**, **107**: (5): 745-752.
85. Udagawa, J., Aguiar, P., Brandon, N., 2007. Hydrogen production through steam electrolysis: Model-based steady state performance of a cathode-supported intermediate temperature solid oxide electrolysis cell. **Journal of Power Sources**, **166**: (1): 127-136.
86. Kaya, M., Demir, N., 2017. Numerical Investigation of PEM Water Electrolysis Performance for Different Oxygen Evolution Electrocatalysts. **Fuel Cells**, **17**: (1): 37-47.
87. Kaya M.F., Kayataş Demir N., Albawabiji M.S. , Taş M., 2017. "Investigation of Alkaline Water Electrolysis Performance for Different Cost Effective Electrodes Under Magnetic Field", **International Journal Of Hydrogen Energy**, **vol.42**: 17583-17592,

88. Qian, K., Chen, Z., Chen, J., 1998. Bubble coverage and bubble resistance using cells with horizontal electrode. **Journal of Applied Electrochemistry**, **28**: (10): 1141-1145.
89. Mazloomi, S., Sulaiman, N., 2012. Influencing factors of water electrolysis electrical efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **16**: (6): 4257-4263.
90. Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., Stolten, D., 2013. A comprehensive review on PEM water electrolysis. **International journal of hydrogen energy**, **38**: (12): 4901-4934.
91. Mazloomi, K. a. S., Nasri and Moayedi, Hossein, 2012. An Investigation into the Electrical Impedance of Water Electrolysis Cells – With a View to Saving Energy. **International journal of electrochemical science**, **7**: 3466 - 3481.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Mhmd Salah Aldin ALBAWABIJI
 Uyuğu: Suriyeli
 Doğum Tarihi ve Yeri: 24 Haziran 1988, Şam / SURİYE
 Medeni Durumu: Bekar
 Tel: +90 536 069 02 80
 email: salah.bawabiji@gmail.com

EĞİTİM

YÜKSEK LİSANS: Erciyes Üniversitesi - KAYSERİ
 (2014-2017) Enerji Sistemleri Mühendisliği
 Lisans : Şam Üniversitesi – Şam - SURİYE
 (2007-2012) Elektrik Mühendisliği

YABANCI DİL : Türkçe – iyi derece
 İngilizce – iyi derece
 Arapça – Ana dil

İŞ BİLGİLERİ : 15/09/2015 itibaren VIA Aydınlatma'da Elektrik Elektronik Müh.

YAYINLAR : Kaya M.F., Kayataş Demir N., Albawabiji M.S. , Taş M.,
 "Investigation of Alkaline Water Electrolysis Performance for Different Cost Effective
 Electrodes Under Magnetic Field", **International Journal Of Hydrogen Energy**,
 vol.42, pp.17583-17592, 2017