

Abdullah SAYIM

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AĞUSTOS 2023



İSKENDERUN TEKNİK
UNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**SODYUMBORHİDRÜR (NaBH_4)
BİLEŞİĞİNİN İNSANSIZ
HAVA ARAÇLARINDA (İHA) YAKIT
OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Abdullah SAYIM

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

AĞUSTOS 2023





**SODYUMBORHİDRÜR (NaBH_4) BİLEŞİĞİNİN İNSANSIZ HAVA
ARAÇLARINDA (İHA) YAKIT OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Abdullah SAYIM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2023

SODYUMBORHİDRÜR (NaBH_4) BİLEŞİĞİNİN İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA
(İHA) YAKIT OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Abdullah SAYIM

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2023

ÖZET

Bu tez çalışmasında, sodyumborhidrür (NaBH_4) bileşiğinin insansız hava araçlarında (İHA) yakıt depolayıcısı olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. NaBH_4 , hidrojen depolama kapasitesi ve taşınması kolay olması nedeniyle yakıt hücresi teknolojilerinde genişçe kullanılmaktadır. Çalışmanın amacı, NaBH_4 'nin İHA'lar için bir alternatif yakıt olarak kullanılabilirliğini belirlemektir. Çalışma kapsamında, NaBH_4 'nin sentez mekanizması, kimyasal özellikleri, yakıt hücrelerindeki performansı ve enerji yoğunluğu gibi temel özellikleri incelenmiştir. Çalışmada ayrıca, NaBH_4 'nin depolanması, taşınması ve yeniden doldurulması gibi pratik kullanım açısından önemli faktörler de değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, hidrojen gazı, diğer geleneksel yakıtlara kıyasla daha temiz bir enerji kaynağı olması nedeniyle NaBH_4 'ün potansiyel olarak İHA'lar için yakıt olarak kullanılabilirliği ve ayrıca hidrojenin, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması nedeniyle İHA'lar için daha uzun uçuş süreleri ve daha geniş menziller sağlayabileceği sonucuna varılmıştır. Fakat NaBH_4 , saf formda reaktif olduğundan ve havayla temas ettiğinde hızla ayrıştığı için uygun depolama ve taşıma önlemlerinin alınması gerektiği değerlendirilmiştir. Alınan sonuçlar, NaBH_4 'nin yeniden doldurulmasının kolay olduğu ve güvenli bir şekilde depolanabilirliği ve ayrıca NaBH_4 'nin İHA'lar için potansiyel bir yakıt olduğunu göstermektedir. NaBH_4 , yüksek hidrojen depolama kapasitesine sahiptir ve bu da İHA'ların uzun süre uçuş yapabilmesini sağlayabilir. Ancak pratik uygulama açısından bazı zorlukları bulunmaktadır. Bu nedenle, konuyla ilgili daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmaları gerekmektedir. NaBH_4 'nin depolama ve taşıma yöntemlerinin geliştirilmesi ve enerji yoğunluğunun artırılması, potansiyelini tam anlamıyla ortaya çıkarmak için önemli adımlar olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler : Sodyumborhidrür, İHA, yakıt pili, hidrojen, enerji depolama
Sayfa Adedi : 62
Danışman : Prof. Dr. Suha Orçun MERT

INVESTIGATION OF THE USAGE OF SODIUMBOROHYDRIDE (NaBH_4)
COMPOUND AS A FUEL IN UNMANNED AIRCRAFT (UAV)

(M. Sc. Thesis)

Abdullah SAYIM

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

August 2023

ABSTRACT

In this thesis, the usability of sodium borohydride (NaBH_4) as a fuel store in unmanned aerial vehicles (UAV) was investigated. NaBH_4 is widely used in fuel cell technologies due to its hydrogen storage capacity and ease of transport. The aim of the study is to determine the usability of NaBH_4 as an alternative fuel for UAVs. Within the scope of the study, basic properties of NaBH_4 such as synthesis mechanism, chemical properties, performance in fuel cells and energy density were investigated. The study also evaluated important factors for practical use, such as the storage, transport and refilling of NaBH_4 . In the evaluations, hydrogen gas can potentially be used as a fuel for UAVs since hydrogen gas is a cleaner energy source compared to other conventional fuels, and also longer flight times and wider range for UAVs due to hydrogen's high energy density. It has been concluded that it can provide ranges. However, since NaBH_4 is reactive in its pure form and can decompose rapidly when in contact with air, it has been evaluated that appropriate storage and transportation precautions should be taken. The results show that NaBH_4 is easy to refill and can be stored safely, and also that NaBH_4 is a potential fuel for UAVs. NaBH_4 has a high hydrogen storage capacity, which can enable UAVs to fly for long periods of time. However, there are some difficulties in terms of practical application. Therefore, more research and development studies on the subject are required. It is thought that the development of storage and transportation methods and increasing the energy density of NaBH_4 will be important steps to fully reveal its potential.

Key Words : Sodium borohydride, uav, fuel cell, hydrogen, energy storage
Page Number : 62
Supervisor : Prof. Dr. Suha Orçun MERT

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecimin başlangıcından tez çalışmamın tamamlanma sürecine kadar yardım ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her anlamda varlığını hissettiren, öğrencisi olduğum için kendimi şanslı hissettiğim danışman hocam Prof. Dr. Suha Orçun MERT'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgisiyle ışık tutan, tez başlangıç sürecimde yönlendirici sözleri ile bana destek veren değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Habibe Gürsoy DEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlanma sürecinde bana her yönüyle rehberlik eden, tecrübe ve bilgisini aktarmada kendisini eksik etmeyen, kıymetli zamanımı esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Fevzi HANSU'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimimi ve tez çalışma sürecimi destekleyen, imkân sağlayan T.C. Cumhurbaşkanlığı Güvenlik İşleri Genel Müdürlüğü'nde görev yapan yöneticilerime ve çalışma arkadaşlarıma, bu süreçte tecrübesi ve deneyimi ile bana yol gösterici olan çalışma arkadaşım Dr. Erdem BULUT'a teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca her türlü fedakârlığı gösteren, bugünlere gelmemde en fazla katkıya sahip aziz anneme, babama, kardeşime ve kıymetli eşime minnet ve teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
RESİMLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
2.1. Konuyla İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar	7
2.2. Tez Konusunun Seçilme Gerekçesi	18
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	20
3.1. Materyal	20
3.1.1. Hidrojen	20
3.1.2. Sodyumborhidrür (NaBH ₄).....	22
3.1.3. İnsansız hava araçları (İHA)	22
3.2. Yöntem.....	23
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	26
4.1. Hidrojen (H ₂) İle Çalışan Yakıt Hücreleri	29
4.2. Sodyumborhidrürün (NaBH ₄) Katalitik Hidrolizi.....	30
4.3. Yakıt Pillerinde Güç Yönetimi	33
4.4. Hidrojen Üretiminde Örnek Bir Katalizörün (Co/Al ₂ O ₃) Aktivasyon Enerjisinin Belirlenmesi.....	34
4.5. İHA'larda Hibrit Güç Yönetim Sistemi	35
4.6. İHA'ların Uçuşa Bağlı Yakıt Tüketimleri.....	36
4.7. Hidrojen Gazının İHA'larda Yakıt Olarak Kullanılması.....	37
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	41
5.1. Sonuçlar.....	41
5.2. Öneriler	42
KAYNAKLAR.....	43

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Hidrojen gazının özellikleri	21



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Yakıt hücresi sisteminin çalışma prensibi.	30
Şekil 4.2. Ni, Cr veya Co katalizörlerinin sulu çözelti sentezleri için deney düzeneği şeması.....	32
Şekil 4.3. Gerilim ve süreye bağlı olarak AC soğuk plazma ile muamele edilmiş Co-Cr-B katalizörü kullanılarak elde edilen hidrojen üretim hacimleri.....	33
Şekil 4.4. Güç yönetimi test devresinin şematik diyagramı	34
Şekil 4.5. Co/Al ₂ O ₃ katalizörünün aktivasyon enerjisi hesaplaması için oluşturulan Arrhenius grafiği: ağırlıkça %15 NaBH ₄ , ağırlıkça %5 NaOH.....	35
Şekil 4.6. Örnek bir yakıt hücresi görüntüsü	38

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Seyir halindeki bazı İHA görüntüleri	36
Resim 4.2. Çok sayıda yakıt hücresinin paralel bağlanmasıyla oluşturulan güç istasyonu görüntüsü.....	39



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
sn	Saniye
dk	Dakika
cm	Santimetre
mm	Milimetre
m³	Metreküp
ml	Mililitre
L	Litre
mg	Miligram
kg	Kilogram
kJ	Kilojül
W	Watt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt Saat
pH	Hidrojen Potansiyeli
°C	Santigrat Derece
C	Karbon
H₂	Hidrojen
O₂	Oksijen
Co	Kobalt
Cr	Krom
Ni	Nikel
N₂	Azot

P	Fosfor
CO	Karbon Monoksit
CO₂	Karbondioksit
H₂O	Su
HCl	Hidroklorik Asit
NaOH	Sodyum Hidroksit
KOH	Potasyum Hidroksit
NaBH₄	Sodyumborhidrür
NaBO₂	Sodyummetaborat
NiCo/HZIF-8	Zeolitik imidozalat
ΔS	Entropi
ΔH	Entalpi
E_a	Aktivasyon enerjisi
°K	Kelvin derece
T	Sıcaklık
R	Gaz sabiti
k	Reaksiyon hızı
mol	Molar hacim
bar	Barometre

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BET	Brunauer-Emmett-Teller
EDS	Enerji Dağılımlı X-ray Cihazı
FCEV	Yakıt Hücreli Rlektrikli Araçlar

FTIR	Foriyer Dönüştürülmüş Kızılötesi Spektrum
HGR	Hidrojen Üretim Hızı
İHA	İnsansız Hava Aracı
MB	Metilen Mavisi
MNP	Metal Nano Partikül
NMR	Nükleer Manyetik Rezonans
NP	Nano Partikül
PEMFC	Proton Değişim Membramlı Yakıt Hücresi
SBH	Sodyumborhidrür
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM	Transmisyon Elektron Mikroskobu
TOF	Frekans Dönüşümü
US DOE	ABD Enerji Bakanlığı
UV	Ultraviyole
XRD	X-ışını Toz Difraksiyonu

1. GİRİŞ

Teknolojide yapılan yenilikçi çalışmalar son yıllarda ulaşımdan haberleşmeye, sağlıktan sanayiye ve buna benzer birçok alanda hayatımızı kolaylaştırmaktadırlar. Bununla birlikte her geçen gün hayatımıza dâhil olan bu yenilikler ve teknolojik araçlar beraberinde enerjiye olan ihtiyacımızı da arttırmaktadır. Enerji hem ülkelerin gelişmesinde hem de insanların yaşam kalitelerinin artırılmasında çok önemli bir rol oynamaktadır. Enerji, etki olarak veya iş yapabilme yeteneği açısından aynı özelliكتedir fakat kullanım fonksiyonları yönüyle çok çeşitlilik arz etmektedir. Bunlardan biri de üretim, iletim ve depolanma yönleriyle üstün avantajlara sahip olan elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisinin depolanması, taşınması ve dağıtılması, elektrikli araçlar ve toplu taşıma sistemleri gibi elektrikle çalışan ulaşım araçları için hayati önem taşır. Enerji depolama sistemleri, araçların menzilinı artırabilir ve şarj altyapısının etkinliğini artırarak elektrikli araç kullanımını önemli oranda teşvik eder.

Günümüzün popüler yenilenebilir enerji teknolojilerinden biri de Hidrojen enerjisidir. Hidrojen, son zamanlarda evrensel bir enerji taşıyıcısı olarak kabul edilmektedir. Çünkü hidrojen, çeşitli kaynaklardan üretilebilir ve çeşitli şekillerde kullanılabilir.

Hidrojen, genellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilir. Elektroliz adı verilen bir işlem olan suyun ayrıştırılmasıyla hidrojen gazı elde edilebilir. Bu işlem sırasında elektrik enerjisi hidrojen ve oksijen olarak ayrıştırılır. Elde edilen hidrojen gazı daha sonra depolanabilir veya kullanılarak elektrik enerjisi üretmek için yakıt hücrelerine beslenebilir.

Hidrojen enerjisi çeşitli avantajlara sahiptir. Öncelikle, hidrojen temiz bir enerji kaynağıdır. Hidrojen yakıt hücrelerinde yanarken sadece su buharı ve ısı üretir ve bu durumda atmosfere zararlı emisyonlar salınmaz. Ayrıca, hidrojen enerjisi depolanabilir bir enerji formudur, bu da enerji arzının düzenlenmesi ve enerjinin talebe göre esnek olarak sağlanması için kullanılabilir. Ancak hidrojen enerjisinin bazı zorlukları da bulunmaktadır. Hidrojen gazı oldukça uçucudur, bu nedenle depolama ve taşıma süreçlerinde dikkatli önlemler alınmalıdır. Ayrıca, hidrojen üretimi için genellikle elektrik enerjisi kullanılır ve bu elektrik enerjisi yenilenebilir olmadığında çevresel etkileri olabilir.

Son yıllarda hidrojen enerjisi alanında araştırma ve geliştirme çalışmaları hız kazanmıştır. Hidrojen yakıt hücreleri otomotiv, enerji depolama ve endüstriyel uygulamalarda da

kullanılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte, hidrojen enerjisi sisteminin daha geniş ölçekte yaygınlaşması için maliyetlerin düşürülmesi, üretim ve depolama altyapısının geliştirilmesi gibi bazı zorlukların aşılması gerekmektedir.

Hidrojen depolama sistemleri, hidrojen gazının uzun süreli depolanması ve kullanılması için tasarlanmış sistemlerdir. Hidrojen, temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak önemli bir potansiyele sahiptir ancak gaz formunda oldukça düşük yoğunluklu olduğu için depolanması zordur. Bu nedenle araştırmacılar tarafından çeşitli Hidrojen depolama sistemleri geliştirilmiş olup bu sistemler hidrojeni güvenli ve verimli bir şekilde depolayarak enerji talebi olduğunda kullanılabilir hale getirmektedirler.

Günümüzde kullanılmakta olan birkaç farklı hidrojen depolama yöntemi mevcuttur. Bunlar:

Gaz halinde depolama: Hidrojen gazı, yüksek basınçlı silindirlerde veya tüplerde saklanabilir. Bu yöntem, hidrojeni taşımak ve depolamak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ancak, yüksek basınç gerektiren ekipmanların kullanılması ve depolama alanının hacimsel olarak büyük olması gibi bazı zorlukları vardır.

Sıvı halinde depolama: Hidrojen, düşük sıcaklık ve yüksek basınç altında sıvılaştırılabilir ve sıvı halde depolanabilir. Bu yöntemde hidrojenin hacmi, gaz fazına kıyasla önemli ölçüde azalır. Ancak, sıvılaştırma işlemi enerji yoğunudur ve sıvı hidrojenin düşük sıcaklıkta tutulması gerekmektedir.

Kimyasal depolama: Hidrojen, kimyasal taşıyıcılar yardımıyla depolanabilir. Bu yöntemde, hidrojen molekülleri başka bir maddeyle reaksiyona girer ve hidrojeni depolamak ve taşımak için daha kararlı bir bileşik oluşturur. Depolanan hidrojen, daha sonra ihtiyaç duyulduğunda serbest bırakılabilir. Bu yöntem, hidrojenin hacmini azaltarak ve daha kolay taşınabilir hale getirirken depolama süresini uzatabilir.

Metal hidrür depolama: Bazı metaller, hidrojeni emerek metal hidrür bileşiklerini oluşturabilirler. Bu bileşikler hidrojeni güvenli bir şekilde depolamak için kullanılabilirler. Metal hidrür depolama sistemleri, hidrojenin düşük basınç ve daha düşük sıcaklıkta depolanmasına olanak tanır. Ancak, hidrojenin depolama kapasitesi sınırlı olabilir ve geri dönüşüm veya yeniden kullanım için bazı ek işlemler gerektirebilir.

Hidrojen depolama sistemleri, enerji depolama ve dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, yukarıda verilen her bir yöntemin avantajları, dezavantajları ve özel gereksinimleri vardır. Gelişen teknolojiyle birlikte Hidrojen depolama yöntemleri ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bunlar arasında günümüzde en popüler olan yöntem Hidrojenin Bor bileşiğine tutundurulması sonucu elde edilen SodyumBorHidrür (NaBH_4) bileşiğidir.

Sodyumborhidrür (NaBH_4)

İyi bir Hidrojen depolayıcısı olan Sodyumborhidrür, kimyasal formülü NaBH_4 olan beyaz kristal veya toz halde bulunan ve patlama riski içermeyen bir bileşiktir. Sodyumun borhidrürle olan bileşiğidir. NaBH_4 , hidrojen gazının sodyum ve borhidrür ile reaksiyonuyla elde edilir.

NaBH_4 , birçok kimyasal reaksiyonda indirgeyici bir ajan olarak kullanılır. Özellikle organik sentezde hidrojen kaynağı olarak yaygın bir şekilde kullanılır. Birçok aldehit ve ketonu alkollere indirgeyebilir, böylece birincil ve ikincil alkol sentezinde kullanılabilir. Ayrıca, bazı metal tuzlarını da indirgeyebilir.

NaBH_4 , hidrolize karşı oldukça duyarlıdır ve suyla temas ettiğinde hidrojen gazı açığa çıkarır. Bu nedenle, sodyumborhidrür manipülasyonu dikkatli bir şekilde yapılmalı ve suyla temasından kaçınılmalıdır.

Sodyumborhidrür, birçok endüstriyel uygulamada, farmasötik üretimde, metal işleme ve kimyasal sentezlerde kullanılır. Aynı zamanda birçok araştırma laboratuvarında da yaygın olarak kullanılan bir kimyasal bileşiktir.

Sodyumborhidrürden hidrojeni daha hızlı ayırmak için uygulamada çoğu kez katalizör malzemelerden yararlanır. Son yıllarda bu tür metal katalizörler konusunda da çok sayıda çalışma yapılmış olup etkinlik derecesi yüksek olan Nikel, Krom, Kobalt bazlı çok sayıda katalizör bileşikler üretilmiştir.

İnsansız Hava Araçları (İHA)

Bone ve Bolkcom'a (2003) göre, İnsansız hava araçları (İHA) veya popüler adıyla dronlar, insan müdahalesi olmadan uçabilen, genellikle uzaktan kumanda veya otomatik pilota sahip hava araçlarıdır. İHA'lar, çeşitli amaçlarla kullanılabilir ve farklı boyutlarda, şekillerde ve yeteneklerde olabilirler.

İnsansız hava araçları, askeri ve sivil alanlarda çeşitli uygulamalara sahiptir. İHA'lar askeri keşif ve gözetleme, hava saldırıları, keşif ve kurtarma operasyonları, sınırları koruma, hedef belirleme ve daha birçok askeri operasyon için kullanılabilirler. Aynı zamanda doğal afetlerde hasar tespiti, arama kurtarma operasyonları, yangın söndürme, tarım alanında bitki sağlığı izleme, coğrafi haritalama, haberleşme altyapısı olmayan bölgelerde iletişim sağlama gibi sivil uygulamalarda da yaygın olarak kullanılırlar.

İnsansız hava araçları, genellikle kamera, termal görüntüleme cihazları, sensörler ve veri toplama sistemleri gibi çeşitli donanımlarla donatılmıştır. Bu sayede, çevresel verileri toplayabilir, görüntü ve video kaydedebilir, haritalama yapabilir ve gerektiğinde gerçek zamanlı verileri aktarabilirler.

İHA'lar, uzaktan kumanda edilen veya önceden programlanmış rotaları takip ederek uçabilirler. Ayrıca bazı gelişmiş İHA'lar, kendi kendine uçabilen ve engelleri algılayabilen yapay zekâ sistemleriyle donatılmıştır.

İnsansız hava araçlarının kullanımı, bir dizi endişe ve tartışma konusu da beraberinde getirir. Gizlilik ihlalleri, hava sahası güvenliği, insana zarar verme potansiyeli, düşen dronlar gibi konular üzerinde durulması gereken önemli konular arasındadır. Bu nedenle, İHA'ların kullanımı genellikle yerel yasal düzenlemelere ve güvenlik protokollerine tabidir.

İnsansız hava araçları teknolojisi hızla gelişmekte olup, gelecekte daha da yaygınlaşması ve daha farklı alanlarda kullanılması beklenmektedir. Bu teknoloji, birçok sektörde yeni fırsatlar sunarken, aynı zamanda etik, hukuki ve güvenlik açısından da dikkatle yönetilmesi gereken bir alan olarak kalacaktır.

İnsansız hava araçlarının en önemli sorunu yakıt sorunudur ve genellikle iki farklı yönden ele alınır: Bunlar, enerji kaynakları ve uçuş süreleridir.

Enerji Kaynakları: İHA'ların çoğu, uçuşlarını desteklemek için elektrik veya yakıt hücresi gibi alternatif enerji kaynaklarından güç alır. Elektrikle çalışan İHA'lar, şarj edilebilir piller kullanır ve genellikle daha küçük boyutlarda ve daha kısa menzillerde kullanılır. Yakıt hücreleri ise hidrojen veya benzin gibi yakıtlardan elektrik üretebilir ve daha uzun menzilli ve daha büyük İHA'lar için tercih edilebilir. Bununla birlikte, enerji depolama kapasitesi ve verimliliği konularında bazı kısıtlamalar olabilir.

Uçuş Süreleri: İnsansız hava araçlarının uçuş süreleri, kullanılan enerji kaynağına ve İHA'nın boyutuna bağlı olarak değişir. Elektrikle çalışan İHA'lar genellikle 20 dakika ila 1 saat arasında bir uçuş süresine sahip olabilirken, yakıt hücreli İHA'lar daha uzun uçuş sürelerine sahip olabilir, bazıları birkaç saate kadar uçabilir. Ancak, yakıt hücreli İHA'ların da yakıt depolama kapasitesi sınırlıdır ve daha uzun sürelerde havada kalabilmek için yakıt ikmali yapmaları gerekebilir.

Yakıt sorununu çözmek için araştırmalar ve geliştirmeler devam etmektedir. Daha verimli ve hafif bataryaların geliştirilmesi, enerji depolama kapasitesini artırarak İHA'ların daha uzun süre havada kalmasına yardımcı olabilir. Aynı şekilde, yakıt hücrelerinin verimliliğini artıran çalışmalar da yapılmaktadır.

Alternatif olarak, şarj istasyonları veya yakıt ikmali yapabilen İHA'lar gibi altyapı ve sistemlerin geliştirilmesi de uzun süreli uçuşları desteklemek için bir çözüm olabilir. Fakat insansız hava araçlarının yakıt sorunu hala bir zorluk oluşturmakta ve geliştirme alanları bulunmaktadır. Ancak, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte daha verimli enerji kaynakları ve uzun uçuş süreleri sağlayacak yeniliklerin ortaya çıkması için çalışmalar yoğun olarak sürdürülmektedir.

Tez Konusunun Önemi ve Güncelliği

Günümüzde geniş bir kullanım alanına sahip olan insansız hava araçlarının en büyük sorunu yakıt sorunudur. Bu sorunun çözümü, birçok önemli etkene sahiptir. Bu etkenler aşağıdaki gibi özetlenebilirler:

Uçuş Süresi ve Menzil: İnsansız hava araçlarının yakıt verimliliğinin artırılması, daha uzun uçuş süreleri ve daha büyük menziller sağlayabilir. Bu, İHA'ların daha geniş bir alanı kapsayabilmesi, uzun süreli keşif ve gözetleme operasyonları gerçekleştirebilmesi ve daha etkili bir şekilde kullanılabilmesi anlamına gelir.

Görev Performansı ve Verimlilik: Yakıt sorununun çözülmesi, İHA'ların görev performansını ve verimliliğini artırabilir. Daha uzun süre havada kalabilen İHA'lar, daha fazla veri toplayabilir, daha geniş bir alanı gözlemleyebilir ve daha karmaşık görevleri yerine getirebilir. Bu da askeri, sivil ve endüstriyel uygulamalarda daha etkili sonuçlar elde etmeyi mümkün kılar.

İHA Çeşitliliği ve Uygulama Alanları: Yakıt sorununun çözülmesi, farklı boyutlarda ve yeteneklerde çeşitli İHA'ların geliştirilmesine olanak tanır. Daha küçük ve hafif İHA'lar, dar alanlarda veya hassas görevlerde kullanılabilirken, daha büyük ve uzun menzilli İHA'lar geniş alanlarda veya uzun süreli görevlerde kullanılabilir. Yakıt sorununun çözülmesi, İHA teknolojisinin daha çeşitli uygulama alanlarına yayılmasına katkı sağlar.

Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etkiler: İnsansız hava araçlarının daha verimli yakıt kullanması, enerji kaynaklarının daha sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlar. Daha az yakıt tüketimi, çevresel etkileri azaltır ve karbon ayak izini düşürür. Bu da çevre dostu bir yaklaşım sağlar ve sürdürülebilir uçuş operasyonlarına katkıda bulunur.

Güvenlik ve Güvenilirlik: Yakıt sorununun çözülmesi, İHA'ların daha güvenli ve güvenilir bir şekilde çalışmasına katkı sağlar. Yakıtın etkin kullanımı, İHA'ların beklenmedik bir şekilde görev sırasında enerji tükenmesi riskini azaltır. Bu da İHA'ların düşme olasılığını ve potansiyel güvenlik risklerini azaltır.

Yukarıda sıralanan bu önemli gerekçeler nedeniyle günümüzün popüler ve yaygın kullanım alanına sahip hava araçları olan İHA'ların yakıt problemlerinin çözülmesi teknolojik açıdan önemli bir açığın giderilmesi anlamına gelmektedir. Geniş çaplı bir araştırma neticesinde ve özenle seçilmiş olan bu tez konusunun yukarıda belirtilen gerekçeler ve açıklamalar doğrultusunda değerlendirildiğinde, büyük oranda özgünlüğe sahip olan güncel bir konu olduğu ve ayrıca günümüz teknolojisi açısından önemli bir açığı gidereceği beklenmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Fosil kaynaklı yakıtların her geçen gün azalması ve maliyetlerinin artmasıyla birlikte çeşitli alternatif çözümler sunan yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep de her geçen gün daha da artmaktadır. Son zamanlarda popüleritesi bir hayli artan ve iyi bir hidrojen depolayıcısı olan Sodyumborhidrür bileşiğinden hidrojen enerjisi elde etme ve bu hidrojenin yakıt olarak kullanılması ile ilgili yapılan bazı önemli ve güncel çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

2.1. Konuyla İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar

Abdelhamid (2021) tarafından yapılmış olan çalışmada, hidrojenin, fosil yakıtlar da dahil olmak üzere geleneksel yakıtlara umut verici bir alternatif enerji kaynağı olduğu ve bu nedenle, hidrojen üretimi için çeşitli yöntemlerin geliştirildiğini öne sürmüştür. Çalışmasında, sodyumborhidrürün (NaBH_4) hidrolizine veya hidrolitik dehidrojenasyonuna odaklanan yayınların kapsamlı bir bibliyometrik analizini sağlamıştır. Literatürdeki araştırma makaleleri, ileride bazı zorluklar olsa da, bu teknoloji için umut verici bir gelecek gösterdiğini öne sürmüştür. Proses, reaksiyon yan ürününün ($\text{NaBO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ veya $\text{NaBO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) üretilmesi yoluyla tersine çevrilebileceğini ifade etmiştir. Sulu NaBH_4 'ün hidroliz reaksiyonunu etkileyen anahtar parametreler de özetlenmiştir. Yayınların analizi, hidrojen üretim tekniklerinin rekabetçi olması ve mevcut uygulamaların rönesansı olması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyduğunu göstermiştir. İlgili çalışma aynı zamanda NaBH_4 'ün hidrolizini kullanarak hidrojen gazı üretiminin ticarileştirilmesinin ardındaki endişeleri de ortaya koymuştur. Hidrojen üretimi için çeşitli malzemeler rapor edilmiştir, ancak şimdiye kadar hiçbir malzeme mobil uygulamalar için gerekli tüm kriterleri aynı anda karşılayamadığını belirtmiştir. Araştırmacıların ve siyasi karar vericilerin ilerlemeyi yönetmelerini ve ticarileştirme amacıyla yeni kanallar açmaları gerektiğine dikkat çekmiştir. NaBH_4 'ün hidrolizinin, malzeme bilimi, çevresel alanlar ve enerji bazlı uygulamalar dahil olmak üzere birçok uygulama için umut verici olduğu sonucuna varmıştır.

Hung ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmada, bir alkalın sodyum borhidrür çözeltisinin hidroliz reaksiyonundan hidrojen üretimi için bir rutenyum katalizörü hazırlanmıştır. Reaksiyonlar, hangisi önce gelirse, en az %70 dönüşüm veya 500 dakika için 10, 30, 40 ve 60 °C sıcaklıklarda kesikli bir reaktörde gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler şu üç kinetik modele uydurulmuş: sıfırıncı, birinci dereceden ve Langmuir-Hinshelwood. Sonuçlar,

Langmuir-Hinshelwood modelinin, çalışılan tüm sıcaklık aralığında ve deneylerin zaman aralıklarında hidrojen üretim hızının makul bir tanımını verdiğini göstermiştir. Alınan sonuçlardan, sıfır dereceli modelin yalnızca nispeten düşük sıcaklıkta, yani 10 °C'de iyi bir davranış sergilediğini ve birinci dereceden modelin ise 30 °C'ye kadar olan bir sıcaklık aralığında oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Brack, Dann ve Wijayantha (2015) tarafından yapılmış olan çalışmada, hidrojenin yüksek kimyasal enerji yoğunluğu ve yanma reaksiyonlarının iyi huylu yan ürünü nedeniyle en umut verici olanlarından biri olduğunu bildirmiştir. Bununla birlikte, gaz sıkıştırma veya sıvılaştırma gibi hidrojen depolama yöntemleri, düşük hidrojen depolama yoğunlukları nedeniyle taşınabilir veya otomotiv uygulamaları için uygun olmadığını ifade etmiştir. Buna göre, araştırma faaliyetlerinin çoğu, daha yüksek yoğunluklu hidrojen depolama yöntemlerini bulmaya odaklanmıştır. Böyle bir yöntemin, sulu sodyumborhidrür (NaBH_4) çözeltilerinin hidrolizi yoluyla hidrojen üretmek olduğunu ve bu yöntemin yüksek teorik hidrojen depolama kapasitesi (ağırlıkça %10,8) ve karşılaştırmalı olarak diğer kimyasal hidritlere göre nispeten güvenli çalışması nedeniyle yüzyılın başından beri yoğun bir şekilde incelendiğini bildirmiştir. Bu yöntemin ayrıca, özellikle taşınabilir uygulamalar için bir hidrojen jeneratörü olarak kullanılmasını çok çekici kıldığını vurgulamıştır. Sulu NaBH_4 'ün hidroliz reaksiyonunu etkileyen ana faktörler arasında katalizörün performansı, reaksiyon sıcaklığı, NaBH_4 konsantrasyonu, stabilizatör konsantrasyonu ve reaksiyon solüsyonunun hacmi yer alır. Soy metal bazlı katalizörlerin, özellikle rutenyum (Ru) ve platin (Pt), sulu NaBH_4 çözeltilerinden hızlı hidrojen üretiminde özellikle etkili olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, bu tür metallerin kıtlığı ve pahalılığı göz önüne alındığında, geçiş metali bazlı bir katalizör arzu edilen bir alternatif olacaktır ve bu nedenle, pratik bir seçenek elde etmeye çalışmak için kobalt (Co) ve nikel (Ni) bazlı malzemeler kullanılarak çok fazla çalışma yapılmıştır. "Metal içermeyen" NaBH_4 hidrolizi, katı NaBH_4 'e hidroklorik asit (HCl) gibi sulu asitlerin eklenmesiyle de elde edilebilir. Derleme şeklinde oluşturulan bu çalışma temelde, literatürde NaBH_4 'ün hidrolizi için bildirilen çeşitli katalizörleri özetlemektedir.

Liu ve ark. (2009) tarafından yapılmış olan çalışmada, alkali NaBH_4 çözeltilerinden hidrojen üretimi için reçine boncukları üzerinde manyetik nikel-rutenyum bazlı katalizörler, kombine kimyasal indirgeme ve elektriksiz biriktirme yöntemleriyle sentezlenmiştir. Bu katalizörlerin alkali NaBH_4 çözeltilerinden hidrojen üretimi üzerindeki performansı, çözelti sıcaklığı, NaBH_4 yüklemeleri ve NaOH konsantrasyonu gibi faktörler incelenmiştir. Ayrıca,

bu nikel-rutenyum bazlı katalizörlerin özellikleri, SEM/EDS, XPS, SQUID VSM ve BET gibi çeşitli araçlar kullanılarak belirlenmiştir. Bu katalizörlerin, içsel yumuşak ferromanyetizmaları sayesinde kalıcı mıknatıslarla kullanılmış NaBH_4 çözeltisinden kolayca geri dönüştürülebilir olduğu ve bu nedenle hidrojen üretim sürecinin işletme maliyetini düşürdüğü görülmüştür. Yaklaşık olarak yüksek bir hidrojen evrimi oranı Ni–Ru/50WX8 katalizörleri kullanılarak ağırlıkça %5 NaOH içeren %10 ağırlıklı NaBH_4 çözeltisinde 35 °C'de $400 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ 'e ulaşılabilir. Bu tür katalizörler kullanılarak hidrojen üretiminin aktivasyon enerjisinin $52,73 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ olduğu tahmin edilmiştir.

Koh, Kim, D. H., Lee ve Kim, M. S. (2023) tarafından yapılmış olan çalışmanın amacı, sıvı su ile sodyum borhidrürün (SBH) asitle hızlandırılmış hidrolizi yoluyla yüksek güçlü yakıt hücresi uygulamaları için yeterli hidrojen üretmektir. SBH'nin sıvı hidrolizi, yüksek sıcaklıklar (160–200 °C) ve yüksek basınç (40 bar) koşulları altında gerçekleştirilmiştir. SBH'nin sıvı hidrolizinin özellikleri, besleme enjeksiyon hızına, reaktan sıcaklığına ve aşırı stokiometrik sayıya göre analiz edilmiştir. Çalışmada buna ek olarak, reaksiyon ürününün bileşimini analiz etmek için 11B katı NMR spektroskopisi yapılmıştır. Tüm deneysel durumlarda, SBH'nin dönüşümü $\geq 95\%$ olup maksimum ağırlıkça %6,71 gravimetrik hidrojen yoğunluğu elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, besleme enjeksiyon hızı aracılığıyla hidrojen üretim hızını kontrol etmenin mümkün olduğunu göstermiştir. Bu durum, hidrojenin bu sistem kullanılarak değişken çıkışlı yakıt hücresi uygulamalarında kullanılabilmesini göstermiştir. Ayrıca reaktan sıcaklığına göre yapılan deneyler sonucunda reaktan sıcaklığı ne kadar düşükse o kadar az hidrojen üretildiği ve reaksiyona girmemiş artık SBH nin o kadar fazla olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, aşırı stokiometrik oran arttığında, gravimetrik hidrojen yoğunluğu azalmıştır. Bu durum, reaksiyon ürününün viskozitesini ve reaksiyon düşük reaktan sıcaklıklarında gerçekleştirildiğinde gözlenen reaksiyona girmemiş SBH miktarını azaltmıştır. Bu nedenle, pratik amaçlar için stokiometrik sayıyı daha fazla artırmanın mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır.

Kirk ve ark. (2023) tarafından yapılmış olan çalışmada, sodyumborhidrürün (SBH), gelecek vaat eden bir hidrojen (H_2) taşıyıcısı olduğunu; ancak, başarılı konuşlandırmasının insansız hava aracı uygulamalarıyla sınırlı kaldığını vurgulamıştır. Yüksek sıcaklık ve basınçlarda CO_2 türevli bir asitle katı faz SBH hidrolizini kullanarak son derece verimli su kullanımı sağlayan, araç üstü araç uygulamaları için SBH hidrolizini tamamen yeni bir bakış açısıyla yeniden değerlendirmiştir. Bu strateji, yakıt hücrelerinden su geri kazanımı yoluyla ağırlıkça

%10,4'e kadar uzatılabilen, ağırlıkça %6,33'lük yüksek bir H₂ depolama yoğunluğu sağlamıştır. Metanlamadan sonra karbon monoksit seviyeleri 10 ppm'nin altında olan yüksek saflıkta H₂ elde edilmiştir. Daha da önemlisi, artık NaHCO₂ kullanılarak enerji açısından verimli bir SBH rejenerasyon yöntemi geliştirilmiştir. 1,2 kWe düzeyinde SBH hidrojen üretimi, yakıt hücresi çalışmasıyla değerlendirilmiş ve sistem bazında hacimsel H₂ depolama yoğunluğu 25 g-H₂/L olan 20 kWe düzeyinde kompakt bir sistem geliştirilmiştir. Bu teknolojinin, SBH tabanlı araç uygulamalarını 50 g-H₂/L düzeyine kadar hızlandıracağı beklenmektedir.

Wu ve ark. (2023) tarafından yapılmış olan çalışmada, kahve yağı (CO) atığı kullanılarak çevre dostu çinko oksit nanopartikülleri (CO-ZnO NP'ler) sentezlenmiştir. Sentezlenen biyojenik CO-ZnO NP'ler, UV-Görünür spektrometri (UV-Vis), Fourier-dönüştürülmüş kızılötesi spektrum (FTIR) ve X-ışını kırınımı (XRD) karakterizasyon yöntemleri ile analiz edilmiştir. UV-Vis spektrumuna göre, atık kahve numunesinde 281 nm ve 323 nm'de çift tepe, ZnO NP'ler için 273 nm'de tek tepe gözlenmiştir. XRD analizine göre ZnO NP'lerin boyutu 16,37 nm olarak belirlenmiştir. Sodyum borhidrür (NaBH₄) substratının varlığında, CO-ZnO NP'lerin hidrojen üretiminde yüksek aktiviteye sahip bir katalizör olarak rol oynadığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Frekans Dönüşümü (TOF), aktivasyon enerjisi (E_a), entalpi (ΔH) ve entropi değerleri (ΔS) 805,17 s⁻¹, 17,45 kJ/mol, 14,87 kJ/mol, -194,37 olarak hesaplanmıştır. J/mol.K, sırasıyla. Ayrıca CO-ZnO NP'lerin mükemmel fotokatalitik aktivite gösterdiği belirlenmiştir. Metilen mavisi (MB) boyasının güneş ışığı altında bozunmasının fotokatalitik ölçümlerinde MB'nin %96 oranında bozunduğu ve nanopartiküllerin yüksek fotokatalitik aktiviteye sahip olduğu gözlenmiştir. İlgili çalışma, gelecekte kirletici atıksulara karşı yüksek fotokatalitik olarak kullanılacak ve hidrojen üretimi için çevre dostu bir katalizör olarak kullanılacak bir katalizörün sentezlenmesini amaçlamıştır.

Cafer (2023) tarafından yapılmış olan çalışmada, düşük maliyetli, toksik olmayan ve geri dönüştürülebilir protonlanmış kitosan-zeolit hibrit metal içermeyen katalizörlerin sentezi gerçekleştirilmiştir. Metal içermeyen hibrit katalizörler ilk kez NaBH₄ metanoliz ve etilen glikolizden verimli H₂ üretimi için kullanılmıştır. Hazırlanan kitosan-zeolit-H kompoziti, X-ışını toz difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-Ray analiz cihazı (EDS), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), Transmisyon elektron mikroskobu (TEM), Brunauer-Emmett-Teller (BET) ve X-ışını fotoelektron

spektroskopisi (XPS) analizleri yapılmıştır. Farklı kitosan/zeolit oranları ve farklı kalsinasyon sıcaklıkları, sıcaklık ve NaBH_4 miktarının etkisi ve tekrar kullanılabilirlik parametreleri incelenmiştir. Ayrıca kitosan-zeolit-H ile metanol ve etilen glikolde olası H_2 oluşum mekanizması tartışılmıştır. NaBH_4 (0,25 g) metanoliz ve etilen glikolizin HGR değerleri sırasıyla 17,500 ve 10,428 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. NaBH_4 metanolizi ve etilen glikoliz için elde edilen E_a değerleri sırasıyla 37,29 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ve 50,00 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ olarak bulunmuştur.

Min, Chai, Ding, Li ve Zhang (2023) tarafından yapılmış olan çalışmada, katı sodyum borhidrürün hidrolizi ile hidrojen üretimi incelenmiştir. Hidrolizi hızlandırmak için Ni, Co ve P komplekslerini reçine karbonuna (RC) yükleyen yeni bir NiCoP/RC katalizörü hazırlanmıştır. Reaksiyon sırasında hidrojen üretim hızı, reaksiyon sıcaklığı, hidrojen çıkışı ve su-hidrojen oranı kaydedilmiştir. Yaygın olarak kullanılan kobalt klorür katalizörü ile karşılaştırıldığında, NiCoP/RC katalizörü üstün katalitik aktivite göstermiştir. Alkali yan ürünleri nötralize etmek için sitrik asit kullanılmış ve NiCoP/RC katalizörü ile sitrik asit karışımı hidrojen çıkışını artırırken, su kullanım oranının düşmesine neden olmuştur. Bu nedenle, hem hidrojen çıkışı hem de su kullanım açısından faydalı bulunan reaktörün altından aralıklı su beslemesi önerilmiştir. Son olarak çalışma, katı sodyum borhidrürün hidroliz reaksiyonu sırasında termal kaçak potansiyeli konusunda uyarıda bulunmaktadır.

Lu, He, Zhong, Lv ve Liu (2023) tarafından yapılmış olan çalışmada, zeolitik imidazolat çerçevesi (NiCo/HZIF-8) tarafından desteklenen Ni-Co nanokatalizörü, bir emdirme-kimyasal indirgeme yöntemiyle başarıyla hazırlanmıştır. Nanokatalizörün mikro yapısı, katalitik aktivitesi ve dayanıklılığı incelenmiştir. Hazırlandığı şekliyle NiCo/HZIF-8 nanokatalizörü, yüksek spesifik yüzey alanına ve aktif bölgelerin açığa çıkarılmasına ve katalitik performansın desteklenmesine faydalı olan metal nanopartiküller (MNP'ler) için iyi dağılıma sahip hiyerarşik gözenekli bir yapı göstermektedir. NiCo/HZIF-8 tarafından katalize edilen NaBH_4 'ün hidrolizi için aktivasyon enerjisi (E_a) 32,01 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ kadar düşüktür ve maksimum devir frekansı (TOF) 41,254 $\text{mLH}_2 \cdot \text{gM}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 'dir ve bunu aşmaktadır. çok sayıda asil olmayan metalin ve hatta bazı asil metal nanokatalizörlerin performansı, ek olarak NiCo/HZIF-8 nanokatalizörü, beş döngüden sonra NaBH_4 hidrolizi için ilk katalitik aktivitesinin %85,5'ini koruyabilmektedir.

Demirci, Akdim ve Miele (2009) tarafından yapılmış olan çalışmada, 2000'lerin başında, sodyum borhidrür (NaBH_4), ağırlıkça %10,8'lik ideal bir gravimetrik hidrojen depolama kapasitesi ile gelecek vaat eden bir hidrojen depolama malzemesi olarak sunulmuştu. Araştırma ve geliştirmedeki on yıllık çabalara rağmen, ABD Enerji Bakanlığı (US DOE), yerleşik otomotiv hidrojen depolaması için NaBH_4 'ün kullanılmamasını tavsiye etmişti. ABD DOE kararı şu gözlemlere dayanıyordu: çok düşük etkin gravimetrik hidrojen depolama kapasiteleri, hidroliz yan ürünü (NaBO_2) geri dönüşümünün verimsizliği ve maliyet. Bu karar açıkça otomotiv uygulamalarına odaklandığından, bu çalışmanın ana amacı, NaBH_4 'ün taşınabilir uygulamalar için önemli bir potansiyele sahip olabileceğini göstermeye çalışmaktır.

Kwon, Kim, M. J., Kang ve Kim, T. (2019) tarafından yapılmış olan çalışmada, insansız hava araçları için yüksek enerji yoğunluklu yakıt hücresi sisteminin bir parçası olarak hidrojen kaynağı olarak katı hal sodyum borhidrür (NaBH_4) kullanan bir hidrojen jeneratörü önerilmiştir. Bu çalışmada, katı hal NaBH_4 , NaBH_4 sulu çözeltisinin katalitik hidrolizini kullanan bir hidrojen jeneratörünün, düşük hidrojen verimi ve katalizör bozulmasından dolayı kararsız hidrojen üretimi gibi sorunlarının üstesinden gelmek için kullanılmıştır. Hidrojen üretmek için NaBH_4 'e bir ajan çözeltisi, hidroklorik asit enjekte edilmiştir. Ek olarak, hafif, ticari olarak uygun, yüksek yoğunluklu bir hidrojen jeneratörü geliştirmek için tüm tesis dengesi sistemleri ve bileşenleri entegre edilmiştir. Geliştirilen hidrojen jeneratörü, ticarileştirme olasılığını doğrulamak için tüm çalışma süresi boyunca kararlı hidrojen üretimi ve yeniden başlatılabilirlik açısından değerlendirilmiştir. Performans değerlendirmesinden, hidrojen jeneratörünün gravimetrik ve hacimsel özgül enerji yoğunluklarının sırasıyla 739,1 W sa/kg ve 272,8 W sa/L olduğu bulunmuştur. Ek olarak hidrojen depolama yoğunluğu, NaBH_4 sulu çözeltisi kullanan tipik bir hidrojen üreticisiyle karşılaştırıldığında 1,44 kat daha yüksek olan, ağırlıkça %5,1 olarak bulunmuştur.

Galli, De Francesco, Monteleone, Oronzio ve Pozio (2010) tarafından yapılmış olan çalışmada, kimyasal hidritler, polimer yakıt hücreleri için basit ve güvenli bir hidrojen vektörü olabilir. Burada özellikle, sodyum borhidrürün (NaBH_4) katalitik hidrolizinin, taşınabilir bir enerji jeneratöründeki küçük bir katı polimer yakıt hücresine sağlanmak üzere talep üzerine hidrojen üretmesi öngörülmektedir. Kompakt bir hidrojen jeneratörü, katalitik tozu manyetik alan tarafından yerinde tutulan boru şeklinde bir katalitik reaktör etrafında tasarlanmıştır. Gaz, reaktör içindeki asal olmayan katalizör parçacıklarıyla temas halinde

sulu bir sodyum borhidrür çözeltilisinin ekzotermik hidroliz reaksiyonuyla üretilir. Reaksiyon, suda çözünen ve çevreye zarar vermeyen ıslak hidrojen ve borat üretir. Hidrojen talebi durduğunda reaktör boşaltılır ve hidroliz reaksiyonu durur. Daha sonra bir jeneratör, sorunsuz bir çalışma ve oldukça iyi bir performans göstererek test edilmiştir. Yakıt pili ihtiyacına uygun hidrojen üretimi için çalışma koşullarının ve devreye alma prosedürlerinin doğru seçilmesi istenmiştir.

Richardson, Birdwell, Pin, Jansen ve Lind (2005) tarafından yapılmış olan çalışmada, sodyum borhidrürün özellikleri, onu kolayca kontrol edilebilen ve atıl maliyeti olmayan isteğe bağlı bir sistem için bir yakıt hücresi ile kullanım için iyi bir hidrojen kaynağı olduğunu göstermektedir. Literatürde açıklandığı gibi önceki çalışma, rutenyumun (Ru) sodyum borhidrürden hidrojen üretmek için etkili bir katalizör olduğunu göstermiştir. Katalizör yüklemesini değerlendirmek için testler yapıldı ve bu testlerin sonuçları, hidroliz hızının katalizörün yüklenmesinden etkilendiğini göstermiştir. Alt tabaka yüzeyinin daha düşük yüklemelerde tamamen Ru tarafından işgal edilmediği ve reaksiyon hızını optimize etmek için artan yüklemelere ihtiyaç duyulduğu da açıktı. Sabit yataklı bir reaktör ile bir diferansiyel hız testi de yapılmıştır. Sıcaklığın reaksiyon hızı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlendi. Besleme hızı ayrıca, daha yüksek reaksiyon hızlarına sahip olan daha düşük besleme hızları (reaktörde daha uzun kalma süresi) ile reaksiyon hızını da etkiledi. Tezgaah üstü bir hibrit sistem de geliştirildi ve test edildi. Bu test yatağı, kimyasal olarak üretilen hidrojen beslemeli proton değişim membranlı yakıt hücresine dayalı bir sistemin, nominal çıkışın dört katına kadar oldukça değişken bir elektrik yükünün taleplerini karşılayabilen bir hibrit güç sistemi sağlamak için yakıt hücresinin pillerle nasıl entegre edilebileceğini göstermiştir.

Kojima ve ark. (2004) tarafından yapılmış olan çalışmada, sulu sodyum borhidrür (NaBH_4) çözeltilisinden yüksek saflıkta hidrojen gazı üreten bir hidrojen jeneratörü geliştirilmiştir. Çalışmada, bir Pt-LiCoO₂ kaplı petek monoliti kullanılarak hidrojen jeneratörünün performans testi ele alınmıştır. NaBH_4 çözeltilisi, monolit ile temas ettiğinde H_2 ve sodyum metaborat üretmek üzere hidrolize olmuştur. Sistemin gravimetrik ve hacimsel H_2 yoğunlukları sırasıyla ağırlıkça %2 ve 1,5 kg H_2 /100 l idi. Hacimsel yoğunluk, 25 MPa'da sıkıştırılmış H_2 'ninkine benzer. Hidrojen jeneratörü, 120 ml/dak'lık bir maksimum H_2 üretim oranını başarıyla sağlamıştır. 0,7 V'ta çalışan ve 120 ml/dk üreten standart bir PEM (polimer elektrolit yakıt hücresi, PEFC) yakıt hücresinin 12 kW'a eşdeğer olduğu varsayılmıştır.

Li ve Wang (2016) tarafından yapılmış olan çalışmada, proton değişim membranlı yakıt hücresini (PEMFC) çalıştırmak için sodyum borhidrür (NaBH_4) çözeltisinden hidrojen üretebilen, isteğe bağlı bir hidrojen üretim sistemi geliştirilmiştir. İlk önce, PEMFC'yi çalıştırmak için sürekli bir hidrojen kaynağı sağlamak üzere kesikli bir reaktörde NaBH_4 'ü hidrolize eden hidrojen üretim sistemini inşa edilmiştir. Ayrıca solüsyon konsantrasyonunun ve parti hacminin etkileri tartışılmıştır. Ek olarak, sistemin hidrojen üretimini ve sıcaklık tepkilerini değerlendiren bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Ayrıca, NaBH_4 solüsyonunun parti aralıklarını PEMFC yüklerine göre ayarlamak için bir kontrol stratejisi tasarlanmıştır. Daha sonra tasarlanan kontrolü bir mikrodenetleyici üzerinde uygulanmış ve deneysel doğrulama için bir PEMFC ile entegre edilmiştir. Sonuçlar, geliştirilen isteğe bağlı hidrojen üretim sisteminin, NaBH_4 'ü %90'ın üzerinde bir dönüşüm oranıyla hidrolize edebildiğini ve böylece 3 kW'lık bir PEMFC'yi çalıştırmak için sürekli olarak hidrojen sağlayabildiğini doğrulamaktadır.

Kim, Choi, K. H. ve Choi, Y. S. (2010) tarafından yapılmış olan çalışmada, yüksek enerji yoğunluklarına sahip alternatif mobil güç kaynaklarının geliştirilmesi arayışında olan bu çalışma, küçük ve kompakt bir kartuşa yerleştirilmiş yeni bir katalizör, sodyum hidrojen karbonat (NaHCO_3) kullanarak katı NaBH_4 'ten yeni bir hidrojen üretim yaklaşımını aydınlatmıştır. Kartuşla donatılmış düzlemsel hava soluyan bir PEMFC sistemi, NaBH_4 ve NaHCO_3 'ten hidrojen üretimini test etmek için araştırılmıştır. NaHCO_3 , hidrojen kartuşunun hidrojen üretimini kontrol etmesine ve güç yoğunluğunu, yakıt verimliliğini, enerji verimliliğini ve hücre tepkisini iyileştirmesine izin vermiştir. Katı NaBH_4 hava soluyan PEMFC sisteminin hücre performansı büyük ölçüde çalışma koşullarına bağlıdır: NaBH_4 hidrolizi için katalitik çözeltilerin besleme hızları ve konsantrasyonları, NaHCO_3 sulu çözeltilerinin çeşitli konsantrasyonlarında (ağırlıkça %5-12), ağırlıkça %10 NaHCO_3 sulu çözeltisi, 0,7 V'ta $128 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ile en yüksek maksimum güç yoğunluğunu sergilemiştir; bunun, %78,4'lük bir Faradik verimlilik ve %46,3 enerji verimliliği olduğu tahmin edilmiştir. Veriler, NaHCO_3 'ün, yardımcı hidrojen kontrolörü veya cihazları olmadan çalıştırılan hava soluyan mikro PEMFC'ler için bir hidrojen taşıyıcısı olarak kabul edilen katı NaBH_4 ile hidrojen üretimi için etkili bir katalizör olduğunu göstermiştir.

Prosini ve Gislou (2006) tarafından yapılmış olan çalışmada, yakıt hücresi ile çalışan bir cep telefonu için hidrojen üretmek üzere bir cihaz tasarlanmıştır. Cihaz, oda sıcaklığında ve basıncında hidrojen talebini karşılamak için NaBH_4 ile hidroklorik/su çözeltisi arasındaki

kimyasal reaksiyona dayanmaktadır. Çalıştırma mekanizması ve kontrol yöntemi, Kipp'in gaz üretme aparatına dayanmaktadır. Optimum tuz/asit ve asit/çözelti oranlarını değerlendirmek ve çalışma sırasında hidrojen kütle akış hızlarını ve bekleme durumunda basınç değişimini kontrol etmek için bir prototip oluşturulmuş ve test edilmiştir. Sistem, 0 ila 10 ml·dk⁻¹ arasında değişen hidrojen akışları sağlayarak çalışır. Tipik bir testte, hidrojen akışı, 1 W'lık güçlü bir yakıt hücresine uyması için 5 ml·dk⁻¹'e ayarlandı. Çalışma basıncı atmosferik olandan biraz daha yüksekti. Hidrojen kapasitesi %2,5 (a/a) kadar yüksekti. Bu miktardaki hidrojeni 0,8 V'ta çalışan bir yakıt pili ile elektriğe dönüştürerek, yaklaşık 720 Wh·kg⁻¹'lik bir sistem enerji yoğunluğu elde etmenin mümkün olduğu görülmüştür; bu değer, ticari yüksek enerji yoğunluklu lityum-iyon pillerden dört kat daha fazladır.

Durbin ve Malardier-Jugroot (2013) tarafından yapılmış olan çalışmada, fosil yakıt kaynakları hızla tükenmekte olduğundan ve kullanımlarının yıkıcı çevresel etkileri artık göz ardı edilemez olduğundan, hidrojen gazı fosil yakıtların potansiyel bir ikamesi olarak giderek daha fazla incelendiği belirtilmiştir. H₂, ağırlıkça tüm yaygın yakıtlar arasında en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu için umut verici bir ikame enerji depolama molekülüdür. Fosil yakıtların değiştirilmesinin büyük etki yaratacağı alanlardan biri, şu anda neredeyse tamamen benzinle çalışan otomobillerdir. Araçlardaki boyut ve ağırlık kısıtlamaları nedeniyle, araç içi hidrojenin küçük, hafif bir sistemde depolanması gerekir. Bu durum, özellikle hidrojen için zordur, çünkü hacim olarak yaygın yakıtlar arasında en düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu nedenle, kompakt, güvenli, güvenilir, ucuz ve enerji açısından verimli bir H₂ depolama yöntemi bulmak için çok araştırma yapılır. Kimyasal hidritlerde depolamanın yanı sıra mekanik sıkıştırma ve karbon substratlara absorpsiyon araştırılmıştır. Çalışma kapsamında mevcut araştırma ve potansiyel faydalar ve sorunlar da dahil olmak üzere tüm sistemlere genel bir bakış ele alınmıştır.

Kim, K., Kim, T., Lee ve Kwon (2011) tarafından yapılmış olan bir çalışmada, insansız hava araçlarında (İHA) güç kaynağı olarak kullanılmak üzere bir yakıt hücresi sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Yakıt hücresi sistemi, bir yakıt hücresi yığını, hidrojen jeneratörü ve hibrit güç yönetim sisteminden oluşmuştur. Verimli çalışma koşullarına karar vermek için 100 W çıkış gücüne sahip PEMFC yığını hazırlanmış ve test edilmiştir; uzun süreli yığın performansı sağlamak için yığın temizleme ile çıkmaz modda çalıştırılmalıdır. Yığına gaz halinde hidrojen sağlamak için bir hidrojen jeneratörü imal edilmiştir. Bu çalışmada hidrojen kaynağı olarak sodyum borhidrür (NaBH₄) kullanılmıştır. Alkali NaBH₄ çözeltisinin oda

sıcaklığında hidrolizi için Co/Al₂O₃ katalizörü hazırlanmıştır. Üretilen Co katalizörü, Ru katalizörü ile karşılaştırılabilir. İHA, kalkış modunda seyir modunda olduğundan daha fazla güç tüketir. Verimli enerji yönetimi için yardımcı batarya kullanan bir hibrit güç yönetim sistemi geliştirilmiş ve değerlendirilmiştir. Hem yakıt hücresinden hem de pilden gelen hibrit güç, kalkış ve dönüş uçuş operasyonlarına güç sağlarken, yakıt hücresi seyir uçuşu sırasında sabit güç sağlar. Yakıt hücreli İHA'ların uzun süreli uçuş yetenekleri, başarılı uçuş testleri ile doğrulanmaktadır.

Kim ve Kwon (2012) tarafından yapılmış olan çalışmada, yakıt hücresiyle çalışan küçük bir insansız hava aracının tasarımı, yapımı ve uçuş testi anlatılmaktadır. Mevcut pillere yeni bir güç kaynağı alternatifi olarak hizmet veren bir hidrojen jeneratörü ile birleştirilmiş bir polimer elektrolit membran yakıt hücresine sahip bir yakıt pili sistemi önerilmiştir. Hidrojen jeneratörü, sodyum borhidrürün alkali çözeltisinden hidrojeni çıkarmak için katalitik bir hidroliz reaksiyonu kullanır ve bir reaktör, pompa, ayırıcı ve yakıt kartuşu ile inşa edilmiştir. Yakıt hücresinin performans özellikleri dikkate alınarak, bir yakıt hücresi ve bir pilin hibrit güç yönetimi tasarlanmıştır. Yakıt hücresi yığını, hidrojen jeneratörü ve güç yönetim sistemi çeşitli yük koşullarında değerlendirilmiştir. Önerilen yakıt hücresi sisteminin olasılığını doğrulamak için yüksek verimliliğe sahip bir insansız hava aracı tasarlanmış ve üretilmiş ve yüksek dayanıklılık test uçuşu için küçük bir uçuş kontrol sistemi geliştirilmiştir. Gerçek uçuş koşullarında uçuş testlerinden önce rüzgar tüneli testleri yapılmıştır. Küçük bir uçakta bir yakıt hücresinin kullanılması olasılığı, yakıt hücresi ile çalışan uçuş testi ile doğrulanmıştır. Yakıt hücreli uçak, yakıt hücre sisteminde herhangi bir olay olmadan 2 saat boyunca uçmuştur.

Okumuş ve ark. (2017) tarafından yapılmış olan çalışmada, özel olarak tasarlanmış ve üretilmiş küçük bir insansız hava aracına güç sağlamak için sodyum borhidrürün çözeltisi ve 200 W yakıt hücresi sistemi kullanan bir hidrojen üretim sistemi geliştirilmiştir. Kobalt bazlı özel bir katalizöre sahip eksiksiz bir hidrojen üretim sistemi, 10 çevrimden fazla dayanıklılığa sahip 11 cm³'lük bir reaktör hacminde 5,4 L/dk hidrojen üretebilmiştir. Bu hidrojen akış hızı, 218 W güç (24,5 VDC ve 8,9 A akım) üretmek üzere 50 hücreli yakıt hücresi sistemini beslemek için yeterliydi. Hidrojen üretim sistemi temel olarak yakıtı beslemek için peristaltik pompa, katalizör için reaksiyon odası, reaksiyon ürünü soğutması, gaz/su ayırma tankı ve akış kontrol ünitelerinden oluşuyordu. Yakıt hücresi sistemi, reaksiyon için hava sağlayan hava soğutmalı ve hava soluyan katoda sahiptir. Gözenekli gaz

difüzyon tabakası yapısından beslenen hidrojen ve membran elektrot düzeneklerinin nemi, çıkmaz çalışma algoritması ile kontrol edildi. İHA dahil tüm sistemin ağırlığı 7,5 kg idi. Güç sisteminin (yakıt hücresi, hidrojen üretim sistemi ve yakıt) enerji yoğunluğu 325 Wh/kg olarak ölçülür ve bu, bu özel uygulamanın lityum-iyon enerji yoğunluğunun yaklaşık iki katıdır.

Lapeña-Rey ve ark. (2017) tarafından yapılmış olan çalışmada, hibrit bir enerji kaynağıyla çalışan elektrikli bir İnsansız Hava Aracı (İHA) tasarlamış, geliştirmiş ve ardından çok çeşitli çalışma koşullarında deneme ve uçuş testleri yapmıştır. Enerji kaynağı, sodyum borhidrürün (NaBH_4) kontrollü hidrolizinden yakıt hücresi çalışma basıncında oldukça saf hidrojen üreten bir kimyasal hidrit hidrojen jeneratörü tarafından beslenen 200 We Polimer Elektrolit Membranı (PEM) yakıt hücresi sistemine sahiptir, bu da 1 L kimyasal çözeltiden 900 Wh'lik enerji açığa çıkartır. Yüksek özgül enerjili Lityum Polimer pillerle de donatılan bu yakıt hücreli İHA, 4 saate yakın uçuş sürelerine ulaşabilmektedir. Bu belge, uçak ve sistem tasarımını, tezgah ve uçuş testlerinin sonuçlarını, bu geliştirme sırasında karşılaşılan ana zorlukları ve gelecekteki optimizasyon için öğrenilen konuları özetlemektedir.

Hong ve Kim (2018) tarafından yapılmış olan çalışmada, yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEV'ler), çevre dostu araçlar ve dağıtılmış enerji santralleri için gelecek vaat eden bir aday olarak büyük ilgi görmüştür. Hyundai'nin Şubat 2013'te dünyanın ilk seri üretim FCEV'si Tucson ix35'i konuşturmasından bu yana, Hyundai üç ana sorunu, yani maliyet, performans ve dayanıklılığı çözmek için her türlü çabayı göstermektedir. Sonuç olarak Hyundai, Mart 2018'de gelişmiş bir FCEV olan Nexo'yu tanıtmış ve onu dünya pazarı için üretmeye başlamıştır. Nexo FCEV, selefi Tucson ix35 ile karşılaştırıldığında önemli teknolojik gelişmeler elde etmiştir: %55'ten %60'a iyileştirilmiş sistem verimliliği; 415 km'den 609 km'ye geliştirilmiş sürüş menzili; $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 'den $-30\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar gelişmiş soğuk çalışma özelliği; dayanıklılık 4 yıl/80 000 km'den 10 yıl/160 000 km'ye çıkarıldı. Hyundai'nin FCEV teknolojilerindeki son gelişmeler ve ilerleme, yeni nesil FCEV'ler için gelecekteki araştırma ve geliştirme yönleri bu çalışmada ele alınmıştır.

Hua, Roh ve Ahluwalia (2017) tarafından yapılmış olan çalışmada, Tip 4 700 bar sıkıştırılmış hidrojen depolama tankları, ABAQUS kullanılarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar modeli, bileşik dönüşüm verimliliğini elde etmek için önce 35-L alt ölçekli test tanklarının verilerine göre kalibre edilmiş ve ardından tam boyutlu tanklara uygulanmıştır.

Temel T700/epoksi kompozitinin iki varyasyonu dikkate alınmış; burada epoksi, düşük maliyetli bir vinil ester reçinesi ve alternatif bir boyutlandırma ile düşük maliyetli reçine ile değiştirilmiştir. Sonuçlar, kompozit ağırlıktaki azalmanın, esas olarak reçinenin düşük yoğunluğuna ve düşük viskoziteli vinil ester reçinesi ile artan sıkma nedeniyle kompozitteki daha yüksek fiber hacim fraksiyonuna atfedildiğini göstermiştir. 5,6 kg H₂ alan yerleşik depolama sistemi için sistem gravimetrik ve hacimsel kapasiteleri sırasıyla ağırlıkça %4,2 (1,40 kWh/kg) ve 24,4 g-H₂/L'dir (0,81 kWh/L). Tank “boş” basıncı düşürülerek tank içi geri kazanılamaz hidrojen miktarı azaltılırsa, sistem kapasiteleri artar ve karbon fiber gereksinimi azalır. Alternatif tank tasarımı modelleri, uzunluk-çap (L/D) oranı 2,8–3,0 olan ancak 1,7 L/D için tasarruf sağlamayan tanklar için kompozit kullanımda potansiyel %4–7 tasarruf göstermiştir. Daha küçük açıklığa ve daha uzun flanşa sahip bir başlık, sarmal sargıların miktarını azaltmıyor gibi görünmektedir.

2.2. Tez Konusunun Seçilme Gerekçesi

İnsansız hava araçları (İHA'lar) birçok sivil ve askeri amaçla kullanılmaktadır. Bir İHA'nın en önemli özelliği uzun uçuş süresidir. Pil gücü, İHA'lara 60–90 dakikalık uçuş süresi sunar. Bu uçuş süresini uzatmak için daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir güç kaynağı faydalı olacaktır. Lityum iyon pil enerji yoğunlukları 150–200 Wh/kg kadar düşükken, yakıt hücreleri 500–2000 Wh/kg enerji yoğunluğu ile alternatif güç kaynakları olarak iyi adaylardır. Bir yakıt hücresi sisteminin (FCS), İHA uygulamaları için mevcut pil sistemlerinden daha hafif olması beklenmektedir. Yakıt hücrelerinin hareketli parçalarının bulunmaması sayesinde; titreşimler azaltılır, bakımı basitleştirilir ve güvenilirlikleri artırılır. Elde edilen yüksek operasyonel parametreler, güvenilirlik ve ticari kullanılabilirlik nedeniyle PEMFC, İHA uygulamaları için en uygun gibi görünmektedir. Özellikle hafif ve küçük hacmin gerekli olduğu bu tür uygulamalarda hidrojenin depolanması kritik hale gelir. Hidrojenin metanol, amonyak, amonyum boran, sodyum borhidrür gibi kimyasal formlarda depolanması ve kullanılması, gaz depolamaya alternatif olarak kabul edilmiştir. Sodyumborhidrür yoluyla hidrojen üretimi, talep üzerine üretim ve düşük basınçlı çalışma gibi ek avantajlar sunarak güvenlik risklerini ortadan kaldırır. NaBH₄ formülüne sahip katı, inorganik bir toz bileşik olan sodyumborhidrür, çok yönlü bir indirgeme maddesidir.

Yukarıdaki açıklamalar ve gerekçeler doğrultusunda bu çalışmanın temel amacı, İHA uygulamaları için pillerden daha uzun uçuş süreleri sağlayan, yüksek enerji yoğunluklu bir

yakıt ve yakıt hücresi sistemi üretmenin mümkün olup olmadığını araştırmaktır. Bu amaç için, geçiş metali katalizörleri yoluyla NaBH_4 'ün katalitik hidrolizinden yüksek oranlı bir hidrojen üretim sistemi geliştirme yöntemini ortaya koymaktır. Bu çalışmanın çıktısının daha geniş bir sistemin geliştirilmesine katkı sağlayacağı beklenmektedir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Hidrojen

Hidrojen gazı, hidrojen elementinin gaz hâline gelmiş halidir. Kimyasal sembolü H₂'dir. Hidrojen, evrende en yaygın elementlerden biridir ve genellikle diğer elementlerle bileşikler oluşturarak bulunur. Ancak hidrojen gazı, hidrojenin serbest hâlde bulunduğu bir formdur.

Hidrojen gazı, renksiz, kokusuz ve yanıcı bir gazdır. Düşük yoğunluğa sahip olduğu için havadan daha hafiftir. Hidrojen, yüksek oranda enerji taşıyabilen bir yakıttır ve genellikle yakıt hücreleri ve roketler gibi alanlarda kullanılır.

Yakıt hücreleri, hidrojeni oksijenle birleştirerek elektrik enerjisi üreten cihazlardır. Bu süreçte sadece su ve ısı açığa çıkar, zararlı emisyonlar oluşmaz. Bu nedenle hidrojen, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kabul edilir.

Hidrojen gazının üretimi birkaç farklı yöntemle gerçekleştirilebilir. En yaygın yöntemlerden biri doğal gaz reformasyonudur. Doğal gazın buharlaştırılması ve ardından su buharıyla reaksiyona sokulmasıyla hidrojen üretilir. Diğer yöntemler arasında elektroliz, biyoyakıt kullanımı ve termal su ayrışması yer alır.

Hidrojen gazının kullanımı, enerji sektöründe sürdürülebilirlik ve karbon salınımını azaltma amacıyla giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Aynı zamanda hidrojenin endüstriyel süreçlerde kullanımı ve taşımacılık sektöründe kullanımı da araştırılmaktadır. Bununla birlikte, hidrojenin üretimi ve depolanmasıyla ilgili bazı zorluklar ve maliyetler bulunmaktadır ve bu alanlarda çalışmalar devam etmektedir.

Hidrojen gazı, birçok endüstriyel ve enerji uygulamasında kullanılan önemli bir elementtir. Temiz enerji kaynakları için potansiyel bir yakıt olarak değerlendirilmektedir ve hidrojen ekonomisi konusunda büyük bir ilgi bulunmaktadır. Ancak, hidrojen gazının üretimi, depolanması ve taşınması gibi bazı teknik zorluklar ve güvenlik riskleri de bulunmaktadır. Hidrojen gazının kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Hidrojen gazının özellikleri

ÖZELLİKLER	HİDROJEN
Formül	H ₂
C/H Oranı	0
Mol ağırlığı, (g/molg)	2,02
Özgül kütle:	
Sıvı:(kg/litre)	0,07
Gaz:(kg/litre)	0,84.10 ⁻⁴
Isıl değer:	
Alt:(MJ/kg)	119,93
Üst:(MJ/kg)	141,86
Stokiyometrik Karışım İçin:	
Hava/Yakıt:(kütlesel) (kJ/l)	34,32
Hava/Yakıt:(hacimsel) (kJ/l)	2,38
Buharlaşma Isısı (MJ/kg)	0,447
Tutuşma Sınırları:	
Hacim %'si	4,1-74
Laminar Alev Hızı (m/s)	2,91
Adyabatik Alev Sıcaklığı (°C)	2110
Difüzyon Katsayısı (m ² /s)	0,61
Kaynama Noktası (°C)	-252,35
Donma Noktası (°C)	-259
Kendi Kendine Tutuşma (°C)	574-591

Kaynak: (Çetinkaya, Karaosmanoğlu 2003)

3.1.2. Sodyumborhidrür (NaBH₄)

NaBH₄ formülüne sahip katı, inorganik bir toz bileşik olan sodyumborhidrür, çok yönlü bir indirgeme maddesidir. NaBH₄, aşağıdaki birleşik avantajlar nedeniyle en yoğun ilgiyi görmüştür:

- Yüksek hidrojen depolama kapasitesi (ağırlıkça %10,8);
- Alkali çözeltilerde yüksek stabilite ve yanıcılık olmaması;
- Desteklenen katalizörlerle hidrojen üretim hızı üzerinde optimum kontrol;
- Düşük sıcaklıklarda bile kabul edilebilir hidrojen üretim hızı;
- Kullanılabilirlik ve kolay kullanım;

Bu kimyasal bileşik, su ile hidroliz edildiğinde verimli bir hidrojen kaynağı haline gelir:



NaBH₄, hidrolize karşı oldukça duyarlıdır ve suyla temas ettiğinde hidrojen gazı açığa çıkarır. Bu nedenle, sodyumborhidrür manipülasyonu dikkatli bir şekilde yapılmalı ve suyla temasından kaçınılmalıdır.

Sodyumborhidrür, birçok endüstriyel uygulamada, farmasötik üretimde, metal işleme ve kimyasal sentezlerde kullanılır. Aynı zamanda birçok araştırma laboratuvarında da yaygın olarak kullanılan bir kimyasal bileşiktir.

3.1.3. İnsansız hava araçları (İHA)

İnsansız hava araçları (İHA), insansız olarak uçabilen ve çeşitli görevleri yerine getirebilen hava araçlarıdır. İHA'lar, gelişen teknoloji ile birlikte önemli bir ilerleme kaydetmiş ve birçok farklı alanda kullanılmaya başlanmıştır.

İHA'lar, askeri, sivil ve ticari alanlarda kullanılan çeşitli tiplerde olabilir. İşlevlerine ve tasarımlarına bağlı olarak, İHA'lar keşif, gözetleme, istihbarat toplama, hava fotoğrafçılığı

ve video çekimi, tarım alanlarında bitki hastalıkları tespiti, yangın söndürme, afet durumlarında arama kurtarma gibi birçok farklı amaç için kullanılabilirler.

İHA'ların teknolojisi sürekli olarak gelişmektedir. Daha hafif ve dayanıklı malzemelerin kullanılması, gelişmiş sensör ve kameraların entegrasyonu, daha uzun uçuş süreleri için geliştirilen pil teknolojileri, otonom uçuş kabiliyeti için yapay zekâ ve otomatik pilot sistemleri gibi faktörler İHA'ların daha etkili ve kullanışlı hale gelmesini sağlamıştır. Bu teknoloji, bir dizi avantajlar sunmaktadır. İnsansız hava araçları, tehlikeli veya zorlu ortamlarda insanların yerine geçerek riskleri azaltabilir. Ayrıca, İHA'lar insanların ulaşması zor olan alanlara erişim sağlayarak keşif ve gözetleme faaliyetlerini kolaylaştırır. Tarım sektöründe kullanılan İHA'lar, bitki hastalıklarını tespit ederek verimliliği artırabilir ve tarım alanlarını daha sürdürülebilir hale getirebilir. Ancak, İHA teknolojisinin bazı zorlukları da vardır. Uçuş güvenliği, hava trafik yönetimi, veri gizliliği ve güvenliği gibi konular, İHA'ların yaygın kullanımını sınırlayan faktörler arasında yer almaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için hükümetler, düzenleyici kurumlar ve teknoloji şirketleri, İHA kullanımına ilişkin politika ve yönetmelikleri geliştirmektedir.

Günümüzde insansız hava araçları teknolojisi hızla ilerleyen bir alandır ve birçok sektörde önemli bir rol oynamaktadır. İleriki zamanlarda bu alanda daha fazla gelişme ve iyileştirme beklenmektedir, bu da İHA'ların daha da yaygın bir şekilde kullanılacağı anlamına gelmektedir.

3.2. Yöntem

İHA'lar için sodyumborhidrürden hidrojen üretimi için literatürde bildirilen çok sayıda çalışma vardır. Kim, Oh ve Kwon (2016), yakıt piliyle çalışan bir İHA tasarladı ve geliştirdi. Ticari bir PEM yakıt hücresi ile entegre bir hidrojen jeneratörü ürettiler ve yaklaşık 2 saat boyunca uçak uçuş testleri gerçekleştirdiler. Kim (2014), İHA'nın görev yeteneklerini geliştirmek için ticari bir PEM yakıt hücresinin modifikasyonu ile bir yakıt hücresi sistemi ürettiler. Başka bir çalışmada, yakıt hücresi sisteminin hacimsel yoğunluğunu artırmak için hacim değişimli bir yakıt tankı kullanılmıştır. NaBH_4 ve NaBO_2 çözeltileri arasındaki hacim değişimli yakıt tankının basit mekanizması için bir lastik torba kullanılmıştır. Yukarıda belirtilen çalışmalara ek olarak bu tez çalışmasında NaBH_4 tabanlı İHA'ların uzun uçuş sürelerini yakalayabilmesi için gerekli olan yakıt desteğinin sağlanması amacıyla

sodyumborhidrür bileşiginden hidrojen üretimi prensibine dayanan yeni bir öneri sunulmuştur.

Sodyumborhidrür çözeltilerinden hidrojen üretimi, pahalı platin ve rutenyum katalizörleri gibi farklı katalizörlerin varlığında gerçekleşir. Nikel, Krom, Kobalt veya bunların bileşikleri başka katalizör türleri olarak kullanılabilirler ve bu katalizörler nispeten yüksek aktiviteyi temsil ederler. Bununla birlikte, substrattaki katalitik özelliklerin kaybı nedeniyle kullanılan metal katalizörünün aktivitesi zamanla önemli ölçüde azalır. Bu nedenle, uygun maliyetli ve dayanıklı bir hidrojen üretim katalizörü hazırlamak önemlidir. Sistemde yer alan yakıt pompasının akış hızını ve reaksiyon odasının ısıtma cihazlarının gücünü kontrol ederek sodyumborhidrür çözeltisinden reaksiyon odasında yüksek basınç altında hidrojen üretmek mümkündür. Hidrojen üretim sisteminin ana bileşenleri, katalizör içeren bir reaksiyon odası, reaksiyon odasını sıvı yakıtla besleyen bir peristaltik pompa, üretilen sıvı metaborat için bir toplama alanı, üretilen H₂ ve suyu ayırmak için bir soğutma cihazı, üretilen su için diğer bir toplama alanı ve metaborat ile su seviyelerini algılamak için kullanılan seviye sensörleridir.

Metal katalizörler kullanılarak sodyum borhidrürden hidrojen üretimi son zamanlarda sıkça kullanılan bir yöntemdir ve sodyumborhidrür (NaBH₄), hidrojen depolamak ve taşımak için yaygın olarak kullanılan bir bileşiktir. Aşağıda, bu işlemi gerçekleştirmek için kullanılan bazı yaygın metal katalizörler ve genel bir reaksiyon yol haritası verilmiştir:

Palladyum (Pd) katalizörü: Palladyum, sodyum borhidrürden hidrojenin ayrıştırılması için sıkça kullanılan bir katalizördür. Palladyum katalizörü, hidrojenin sodyum borhidrürle tepkimeye girerek hidrojen gazına dönüştürülmesini kolaylaştırır.

Platin (Pt) katalizörü: Platin katalizörü de sodyum borhidrürden hidrojen üretimi için yaygın olarak kullanılan bir seçenektir. Pt katalizörü, sodyum borhidrürün hidroliz reaksiyonunu hızlandırır ve hidrojenin serbest bırakılmasını sağlar.

Reaksiyon yol haritası aşağıdaki adımlardan oluşur:

Adım 1: Sodyum borhidrür ve su karışımı hazırlanır. Bu karışım, hidrojen gazının serbest bırakılması için gereklidir.

Adım 2: Palladyum veya platin gibi uygun bir metal katalizörü reaksiyon kabına yerleştirilir.

Adım 3: Sodyum borhidrür-su karışımı katalizörün üzerine eklenir.

Adım 4: Katalizörün varlığında gerçekleşen reaksiyon sonucunda, sodyum borhidrür hidroliz olur ve hidrojen gazı açığa çıkar. Bu reaksiyon şu şekildedir:



Adım 5: Hidrojen gazı toplanır ve kullanılması gereken herhangi bir alanda depolanabilir veya kullanılabilir.

Bu işlem, hidrojenin sodyumborhidrürden çıkarılması ve kullanılabilir bir formda elde edilmesini sağlar. Metal katalizörler, reaksiyon hızını artırarak ve enerji gereksinimlerini azaltarak bu süreci optimize eder. Ancak, reaksiyon koşulları ve katalizör seçimi gibi faktörler, hidrojen üretimi verimliliğini etkileyebilir ve belirli uygulamalara yönelik optimize edilmiş katalizör sistemlerinin kullanılmasını gerektirebilir.

Sodyumborhidrür (NaBH_4) bileşiği yanma veya patlama riski taşıyan bir madde değildir. NaBH_4 , yanıcı değildir ve oda sıcaklığında hava ile reaksiyona girmez. Ancak, NaBH_4 su ile temas ettiğinde hidrojen gazı üretme eğilimindedir. Bu durum, suyla temas ettiğinde sodyumborhidrürün yavaşça hidrojen gazına ve sodyum hidroksite (NaOH) ayrıştığı anlamına gelir. Bu reaksiyonun sonucunda hidrojen gazı açığa çıkar ve hidrojen gazı yanıcıdır. Bu nedenle, NaBH_4 'nin suyla temas etmesi veya su içeren ortamlarda kullanılması durumunda yanma veya patlama riski ortaya çıkabilir.

NaBH_4 'nin güvenli bir şekilde kullanılması için, su veya nemden uzak tutulmalı ve kapalı bir ortamda saklanmalıdır. Ayrıca, NaBH_4 ile çalışırken uygun güvenlik önlemleri almak önemlidir. Bu önlemler arasında uygun kişisel koruyucu ekipmanların (gözlük, eldiven, laboratuvar önlüğü) kullanılması, iyi havalandırılan bir alanda çalışılması ve yangın söndürme ekipmanlarınının yakın olması yer alır.

Her durumda, NaBH_4 veya herhangi bir kimyasal maddeyle çalışırken, güvenlik talimatlarını takip etmek ve kimyasalın güvenli kullanımı hakkında yetkin bir kişi veya kuruluşun rehberliğinden faydalanmak önemlidir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

İHA'lar uzun süredir gözetleme ve keşif görevleri için kullanılmaktadırlar. Uçuş dayanıklılığı, görev performansını iyileştirmede en önemli faktördür ve bu nedenle İHA'ların güç kaynağının, uçuş dayanıklılığını artırmak için yüksek enerji yoğunluğuna ve yüksek verime sahip olması gerekir. Düşmanlar tarafından tespit edilmekten kaçınmak için düşük akustik ve ısı emisyonları da gereklidir.

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) için kullanılacak potansiyel yakıt türleri çeşitli olabilir. İHA'lar genellikle hafif ve verimli olmaları gerektiğinden, aşağıda listelenen yakıt türleri yaygın olarak kullanılmaktadır:

Benzin: Benzin, İHA'larda sıklıkla kullanılan bir yakıt türüdür. Hafif olması ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması avantajlarından biridir. Ancak, benzinin yanma süreci sırasında ortaya çıkan emisyonlar dikkate alınmalıdır.

Jet A1: Jet A1, ticari uçaklarda yaygın olarak kullanılan bir yakıt türüdür. İHA'larda da kullanılabilir çünkü yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve genellikle düşük sıcaklıkta donmaz. Bununla birlikte, Jet A1'in ağırlığı İHA'nın taşıma kapasitesini etkileyebilir.

Elektrik: İHA'larda elektrikli motorlar da kullanılabilir. Bu durumda, lityum iyon veya lityum polimer piller kullanılır. Elektrikli İHA'lar sessiz çalışır ve çevre dostudur. Ancak, enerji depolama kapasitesi sınırlıdır, bu nedenle uçuş süresi kısıtlı olabilir.

Hidrojen: Hidrojen, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan bir yakıttır ve su buharı gibi çevre dostu bir yan ürünü vardır. Hidrojen yakıt hücreleri, İHA'larda kullanılan alternatif bir enerji kaynağı olabilir. Ancak, hidrojenin depolanması ve taşınması zorluklar içerebilir.

Biyoyakıtlar: Biyoyakıtlar, biyokütle kaynaklarından elde edilen yakıtlardır. Bu tür yakıtlar genellikle fosil yakıtlara göre daha çevre dostudur. Örneğin, biyodizel İHA'larda kullanılabilir. Bununla birlikte, biyoyakıtların enerji yoğunluğu ve stabilitesi değişebilir.

Yakıt seçimi, İHA'nın amaçlarına, tasarımına ve operasyonel gereksinimlerine bağlı olarak değişebilir. Ayrıca, güvenlik, maliyet ve mevcut kaynakların erişilebilirliği de dikkate

alınmalıdır. İHA teknolojileri sürekli olarak geliştiği için başka yakıt türlerinin keşfi için de çalışmalar sürdürülmektedir.

İHA'lar üzerine günümüze kadar birçok araştırma yapılmıştır. Bununla birlikte, günümüzdeki İHA'ların güç sistemleri tamamen içten yanmalı motorlara veya ikincil pillere bağlıdır. İçten yanmalı motorlar düşük ısı verime ve gürültüye ve yüksek ısı emisyonuna sahiptirler. Bu özellikler askeri uygulamalar için pek uygun değildirler. Ayrıca ikincil piller, düşük enerji yoğunluğu nedeniyle görev menziline sınırlamalara yol açar. Son zamanlarda gelişmiş ülkeler arasında görev yapan İHA'lar için alternatif güç kaynağı olarak yakıt pili sistemleri üzerine çalışılmaktadır. Yakıt hücresi basit bir konfigürasyona ve yüksek enerji yoğunluğuna ve yüksek verimliliğe sahiptir çünkü bu sistemlerde kimyasal enerji doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür. Ayrıca gürültü ve titreşim sistemleri yoktur. Bu da askeri açıdan büyük bir avantaj anlamına gelmektedir.

Proton değişim membranlı yakıt hücrelerini (PEMFC'ler) çalıştırmak için gaz halindeki hidrojen gereklidir. Hidrojen depolama sistemleri, yakıt hücresi sistemlerinin ağırlığının büyük bir bölümünü oluşturmaktadır ve bu nedenle uygun bir hidrojen kaynağının seçilmesi önemlidir. Sıkıştırılmış hidrojen ve metal hidrürler söz konusu olduğunda, gerekli enerji yoğunluğunu karşılamak için büyük hacimli ve ağır olmaktadırlar. Kimyasal hidrürler, yüksek enerji yoğunluklarından dolayı yeni hidrojen kaynakları olarak öne çıkmışlardır. Son yıllarda bu hidrürlerden en önemli olanlarından biri NaBH_4 alkali solüsyonu olarak bilinmektedir ve bu solüsyonun bazı üstün avantajları vardır: kararlı, yanmaz, toksik olmayan ve yüksek hidrojen kapasitesine (ağırlıkça %10,8) sahip olmasıdır. Ayrıca katalitik hidroliz ile hidrojen üretimini sistem yönetimi açısından kontrolü oldukça kolaydır.

Günümüzde İHA'ların uçuş dayanıklılığını artıracak bir güç kaynağı geliştirme üzerine çok sayıda çalışma yürütülmektedir ve hâlihazırda bu hususta önemli aşamalar da kaydedilmiştir. İHA'lar için güç kaynağı olarak bir yakıt hücresi sisteminin tasarımı ve üretimi büyük önem arz etmektedir. Bu konuda çok sayıda ve çeşitlilikte yakıt hücresi modelleri geliştirilmiş ve geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Bradley, Moffitt, Fuller, Mavris, ve Parekh (2009), yakıt hücresiyle çalışan insansız hava araçlarına yönelik tasarım yöntemlerinin iki karşılaştırmasını sunmaktadır. Yakıt hücresiyle çalışan uçaklara ilişkin önceki tasarım çalışmaları, yakıt hücreli güç santralinin tasarımına

ve güç santrali ile uçak uygulaması arasındaki etkileşimlere ilişkin içsel varsayımlar içeren tasarım yöntemlerini kullanmışlardır. Yakıt hücresi sistemi genel olarak üç alt sistemden oluşur: bir yakıt hücresi yığını, hidrojen jeneratörü ve hibrit güç yönetim sistemidir. Araç ve mobil uygulamalar için yüksek verimliliğe, yüklere hızlı cevap verebilen ve kararlı çıkış gücüne sahip olan PEMFC'ler tercih edilmektedirler. İHA'ların genel enerji yoğunluğunu karşılamak için yüksek bir hidrojen ağırlık yoğunluğu gereklidir. Önemli avantajlar sunması nedeniyle hidrojen kaynağı olarak genellikle sodyumborhidrür (NaBH_4) bileşiği seçilir. Hidrojen, katalitik bir hidroliz reaksiyonuyla üretilir. Etkili güç yönetimi için bazen hibrit sistem olarak bir lityum batarya sistemi de ek olarak kullanılabilir. Yakıt pili sistemi İHA test platformuna entegre edilerek uçuş testleri gerçekleştirilebilir.

Sodyumborhidrür (NaBH_4), kimyasal formülü NaBH_4 olan bir bileşiktir. Genellikle bir indirgen olarak kullanılır ve hidrojen kaynağı olarak işlev görebilir. İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) için yakıt olarak kullanılabilirliğini araştırmak için, NaBH_4 'ün bazı özelliklerini ve potansiyel avantajlarını incelemek önemlidir.

NaBH_4 , hidrojen gazını salmak suretiyle enerji sağlayabilir. Bu özelliği nedeniyle İHA'lar gibi hafif ve taşınabilir uçan sistemlerde enerji kaynağı olarak önemli bir potansiyel sunar. NaBH_4 'ün İHA yakıtı olarak kullanılabilirliği hakkındaki bazı noktalar aşağıda verilmiştir:

Yüksek hidrojen içeriği: NaBH_4 , %10'a kadar hidrojen içerebilir, bu da yakıt olarak kullanıldığında yüksek enerji yoğunluğu sağlar. Bu durum, İHA'ların daha uzun uçuş süreleri için yeterli enerji sağlamalarını sağlayabilir.

Güvenli depolama ve taşıma: NaBH_4 , hidrojen gazına kıyasla daha güvenli bir şekilde depolanabilir. Katı bir formda olduğu için sıkıştırılmış hidrojen gazının güvenlik endişeleri olmadan taşınması ve depolanması mümkündür.

Düşük toksisite: NaBH_4 , çoğu diğer hidrojen depolama bileşiklerine kıyasla düşük toksisiteye sahiptir. Bu da işletme ve kullanım açısından avantajlı olabilir.

Kolay hidrojen salınımı: NaBH_4 , uygun katalizörler kullanılarak hidrojen gazını verimli bir şekilde salabilir. Bu da, İHA'ların ihtiyaç duydukları enerjiyi hızlı bir şekilde sağlayabilmelerini sağlar.

NaBH₄'ün bazı zorlukları da vardır:

Reaktivlik: NaBH₄, su ve diğer reaktif maddelerle temas ettiğinde hidrojen gazı üretebilir. Bu, güvenlik ve depolama açısından dikkate alınması gereken bir faktördür.

Ağırlık: NaBH₄, diğer hidrojen depolama bileşiklerine göre daha yoğun olabilir. Bu, İHA'ların taşıma kapasitesini etkileyebilir ve uçuş sürelerini sınırlayabilir.

Maliyet: NaBH₄, diğer hidrojen depolama yöntemlerine göre maliyetli olabilir. Büyük miktarlarda üretimi ve kullanımı maliyetlerin artmasına neden olabilir.

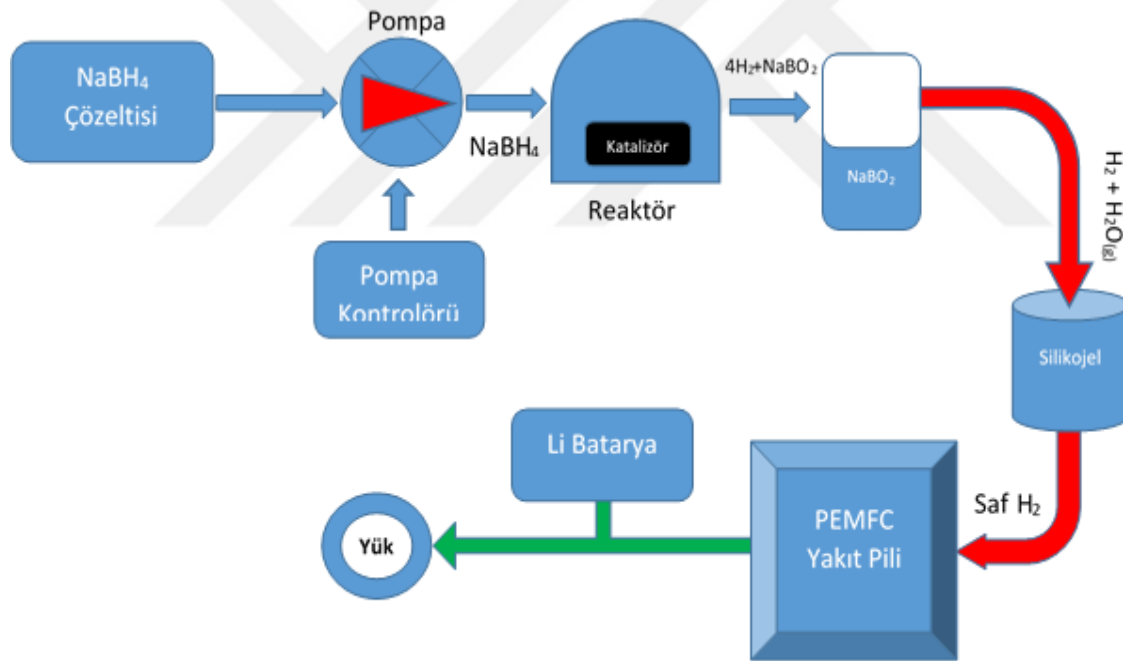
4.1. Hidrojen (H₂) İle Çalışan Yakıt Hücreleri

Hidrojen (H₂) ile çalışan yakıt hücreleri, üretimden depolamaya kadar, yüksek verimlilikleri ve uzun sürüş menzilleri nedeniyle, özellikle ağır hizmet taşıtları için son zamanlarda vazgeçilmez güç jeneratörleri olarak kabul edilmektedir. Sodyumborhidrür (SBH), yüksek H₂ depolama yoğunluğu (saf SBH'de ağırlıkça %10,6 H₂; SBH:4H₂O hidrolizinde ağırlıkça %7,3 H₂; SBH:6H₂O hidrolizinde ağırlıkça %5,5 H₂) nedeniyle umut verici bir yakıt adayı olarak kabul görmüştür.

Sürekli akışlı bir reaktör kullanılan metal katalizli bir reaksiyonun aksine, araştırmacılar son yıllarda, yarı kesikli tipte bir reaktör kullanarak, katı hal SBH ile yüklü reaktöre sıvı bir asit çözeltisi damlatma yoluyla sürekli gaz akışının sağlandığı bir yöntem geliştirmişlerdir. Katı hal SBH sistemi, 750 bar gazın sağladığı basınca eşdeğer olabilecek yüksek sistem tabanlı bir H₂ depolama yoğunluğu sayesinde taşınabilir ve yerleşik uygulamalar için umut verici bir seçenek olarak görülmektedir. Bu sayede özellikle insansız hava aracı (İHA) uygulamalarında önemli kazanımlar elde edilmiştir. Ancak bu sistemlerde HCl gibi güçlü asitlerin kullanılması, taşıma ve yakıt ikmali sırasında güvenlik sorunlarına neden olmaktadır. Ayrıca, gazlaştırılmış asitleri veya diğer asit yan ürünlerini yakalayarak yakıt hücresinin enerji performansını sürdürmek için yoğun bir rejenerasyon gerektiren bir saflaştırma modülü gerektirmektedir. Bunun hacimsel sistem tabanlı H₂ depolama yoğunluğunda önemli bir azalmaya yol açması kuvvetle muhtemeldir.

Literatürde yapılmış olan çalışmalarda, yarı kesikli reaktör sisteminde formik asit (FA) destekli SBH hidrolizi yoluyla ağırlıkça %6,33 H₂'lik yüksek bir gravimetrik H₂ depolama yoğunluğunun elde edildiği görülmüştür. Bu depolama yoğunluğu, sırasıyla PEMFC'den %75 H₂O geri kazanımı ve NaHCO₂'den ilave hidrojen giderme dikkate alındıktan sonra, ağırlıkça %10,4 H₂ ve ağırlıkça %7,10 H₂'ye yükseltilebilir. CO₂'den türetilen FA, karbon-nötr bir asit olarak kabul edilir. FA çözeltilerinin zayıf asitliği ve düşük erime sıcaklığı, güvenlik endişelerini önemli ölçüde azaltabilir. Esas olarak boraks pentahidrat ve NaHCO₂'den oluşan reaksiyon ürünü, normal boraks veya metaborat türlerini içeren başka bir işlem olmaksızın, muhtemelen daha az çaba ve maliyetle SBH'ye dönüştürülebilir.

Yakıt hücresi sisteminin genel çalışma prensibini sembolize eden şema Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Yakıt hücresi sisteminin çalışma prensibi

4.2. Sodyumborhidrürün (NaBH₄) Katalitik Hidrolizi

Karbon safsızlığı olmayan saf hidrojen, hidroliz ile elde edilebilir. NaBH₄'ün temel hidroliz reaksiyonu aşağıdaki gibidir:



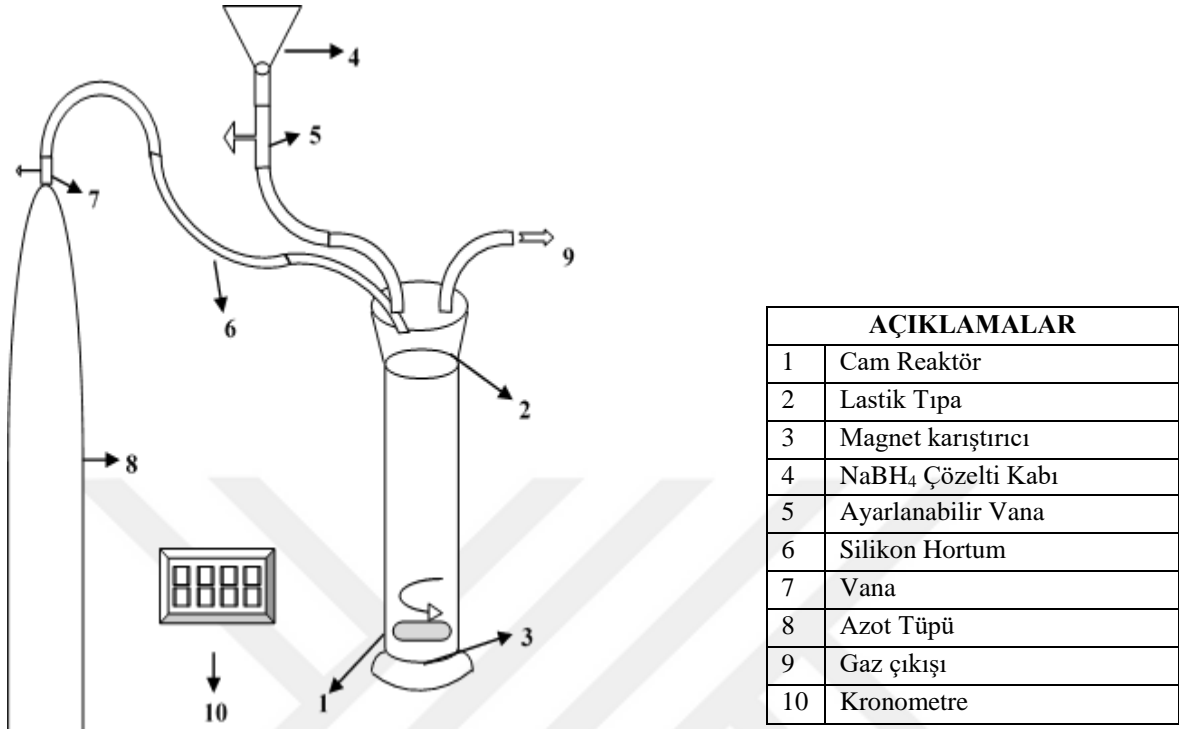
Denklem 3'e bakıldığında, hidrojen, reaksiyondaki tek gaz üründür ve borat yan ürünü ayrıştırıldıktan sonra saf hidrojen elde edilir. Krcevoy ve Jacobson (1979) tarafından, NaBH_4 'ün hidrolizinin aşağıdaki şekilde pH ve sıcaklığa bağlı olduğunu ileri sürmüştür:

$$\text{Log}10t_{1/2} = pH - (0,034T - 1,92) \quad (4)$$

Burada $t_{1/2}$ (dak), NaBH_4 çözeltisinin kendi kendine hidrolizi için yarılanma ömrüdür; pH , hidrojenin kimyasal aktivitesi; ve T , depolama sıcaklığıdır ($^{\circ}\text{K}$). Bu nedenle sulu NaBH_4 çözeltisinin kendi kendine hidrolizini önlemek için $pH > 12$ ile alkali halde bulunması daha etkilidir. En verimli değerlerin elde edilmesi için genellikle ağırlıkça %15 NaBH_4 alkali çözeltisi hazırlanır ve ağırlıkça %15 NaBH_4 , ağırlıkça %5 NaOH ve ağırlıkça %80 sudan oluşturulabilir. NaBH_4 çözeltisinin kendi kendine hidrolizini sınırlandırmak için ise kontrol bileşeni olarak sodyum hidroksit (NaOH) bileşiği kullanılır.

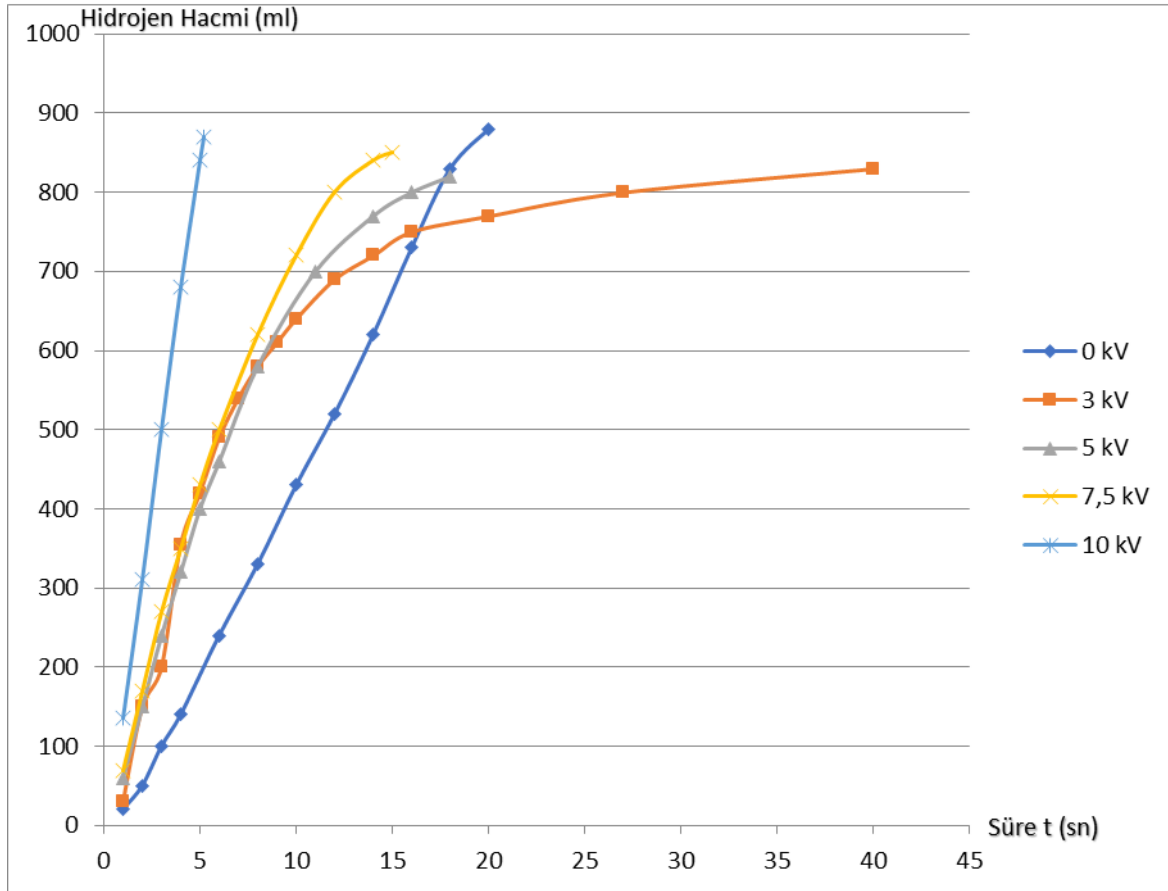
Brown, H. C. ve Brown, C. A. (1962) çalışmalarında, NaBH_4 hidroliz reaksiyonuna göre yüksek aktiviteleri nedeniyle Pt, Ru ve Pd gibi asil metaller seçilmişti ancak bunlar maliyetli malzemeler olduğu için araştırmacılar farklı çözüm yollarına yönelmişlerdir. Örneğin, Jeong ve ark. (2005) Co'nun NaBH_4 hidrolizi ile yüksek aktiviteye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Bu nedenle bazı çalışmalarda katalizör malzemesi olarak Ni, Cr veya Co seçilmiştir. Katalizör desteği olarak, kütle oranı başına geniş bir yüzey alanına sahip olduğu için gama tipi alüminyumoksit (Al_2O_3) bileşiği seçilebilir. Katalizör, ıslak emdirme yöntemiyle Al_2O_3 topraklarına yüklenir. Katalizör imalat prosedürleri genel olarak 4 adımda sınıflandırılabilir. Bunlar: yıkama, yükleme, kalsinasyon ve azaltmadır. Alüminyumoksit saf suda yıkanır, sonrasında su ve hidroksil gruplarını uzaklaştırmak için $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 12 saat boyunca etüvde kurutulur. Daha sonra, 24 saat süresince oda sıcaklığında bir CoCl_2 öncü çözeltisine bekletilir ve tekrar kurutulur. Safsızlıkları gidermek için 3 saat süreyle $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kalsinasyon işlemleri gerçekleştirilir. Co'yu etkinleştirmek için indirgeme prosedürü takip edilir. Böylece kataliz işlemi, Co'nun aktivasyon noktasını aktive eden bir indirgeme prosedüründen sonra tamamlanmış olur.

Ni, Cr veya Co katalizörlerinin sentez işlemi için oluşturulan düzeneğin genel şeması Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Ni, Cr veya Co katalizörlerinin sulu çözeltili sentezleri için deney düzeneği şeması

Son zamanlarda, soğuk plazmanın katalizör reaksiyonları ve bunların yüzey modifikasyonları üzerindeki etkisinin araştırılmasına büyük ilgi duyulmaktadır. Dielektrik Bariyer Boşalması (DBB) ile oluşturulan soğuk plazma katalizör üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir katalizörün DBB soğuk plazma kimyasal işlemi, elektrik yüklerinin elektrotlardan doğrudan katalizörlerin yüzeylerine bombardıman edilmesi ve bu sayede katalizörün yüzey alanının artması sağlanır. Elektriksel plazma iyon, elektron, foton, uyarılmış serbest radikaller veya bu yüklerin nötr türlerini içeren karmaşık bir fiziksel karışımdır. Hansu (2015) tarafından, termal olmayan düşük basınçlı plazma boşaltma arıtma yöntemlerinin, NaBH₄'ün hidroliz reaksiyonlarında kullanılan katalizörlerin yüzeylerini iyileştirdiğini göstermiştir. Plazma ile muamele edilmiş bir katalizörün üretim sürecinde, plazma, katalizör parçacıklarının yüzeyini yüksek yoğunluklu bir elektron-iyon çığıyla bombalar ve bunların oldukça gözenekli olmasına neden olur. Bu işlem, bir kimyasal reaksiyonun hidrolizinde önemli bir role sahip olan katalitik aktivitede bile katalizörün yüzeyini geliştirir. Soğuk plazma yöntemiyle sentezlenen örnek bir Co-Cr-B katalizörünün karşılaştırmalı etkinlik sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Gerilim ve süreye bağlı olarak AC soğuk plazma ile muamele edilmiş Co-Cr-B katalizörü kullanılarak elde edilen hidrojen üretim hacimleri

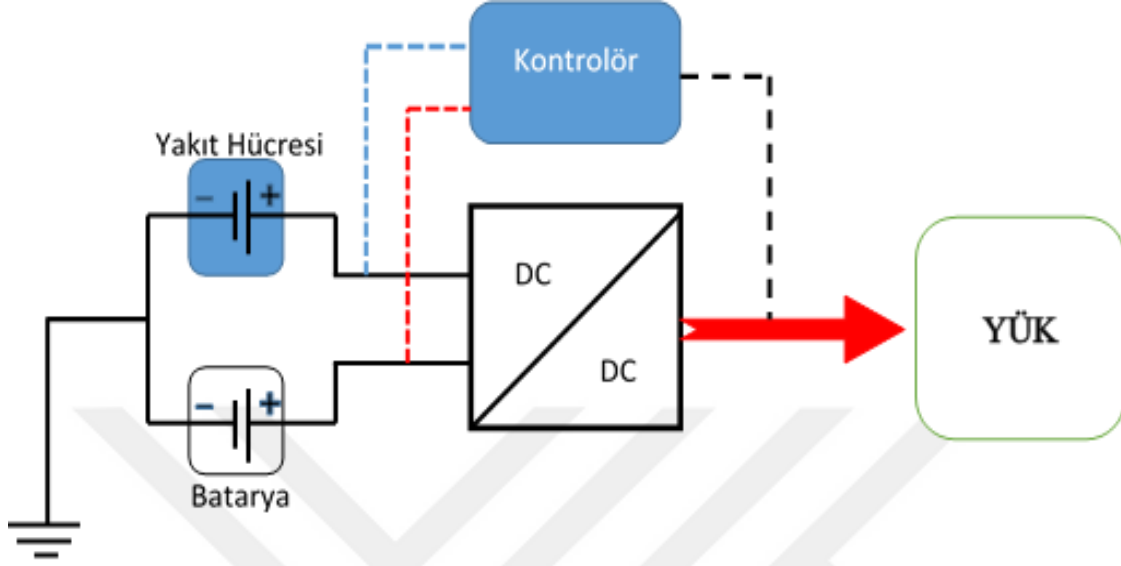
Kaynak: (Hansu, 2015)

4.3. Yakıt Pillerinde Güç Yönetimi

Yakıt pilleri yüksek enerji yoğunluğuna fakat düşük güç yoğunluğuna sahiptirler. Dolayısıyla geniş güç aralığında çalışan İHA'lar ve araçlar gibi uygulamalar için daha büyük ve daha ağır olmaları gerekir. Bu nedenle, yüksek güç tüketimi olan bölgelerde hibrit bir sistem kullanmak daha etkilidir. Kalkış ve dönüş operasyonları gibi yüksek güç tüketen operasyonel gereksinimleri karşılamak için yardımcı batarya ile uyumlu modüllere sahip hibrit güç yönetim sistemleri kullanılabilir. Ayrıca fazla enerjinin yakıt hücreleri kullanılarak depolanması, sistemlerin enerji yoğunluğunu ve verimini de artırır.

Yakıt hücrelerinin çalışma gerilimi değişkendir ve yük arttıkça azalır. Bu temelden yola çıkarak yakıt pili ile batarya arasındaki voltaj dengesini kullanarak hibrit bir sistem kurulabilir. Şekil 4.4'te batarya ve yakıt hücresi, çıkış gerilimini istenilen seviyeye göre düzenleyebilen bir DC-DC dönüştürücüye bağlanarak gerekli entegrasyonun sağlandığı

devre verilmiştir. DC-DC dönüştürücünün çıkışı ise doğrudan bir elektrik yüküne (İHA motoruna) bağlanarak sistem kolay kontrol edilebilecek şekilde beslenebilir.



Şekil 4.4. Güç yönetimi test devresinin şematik diyagramı

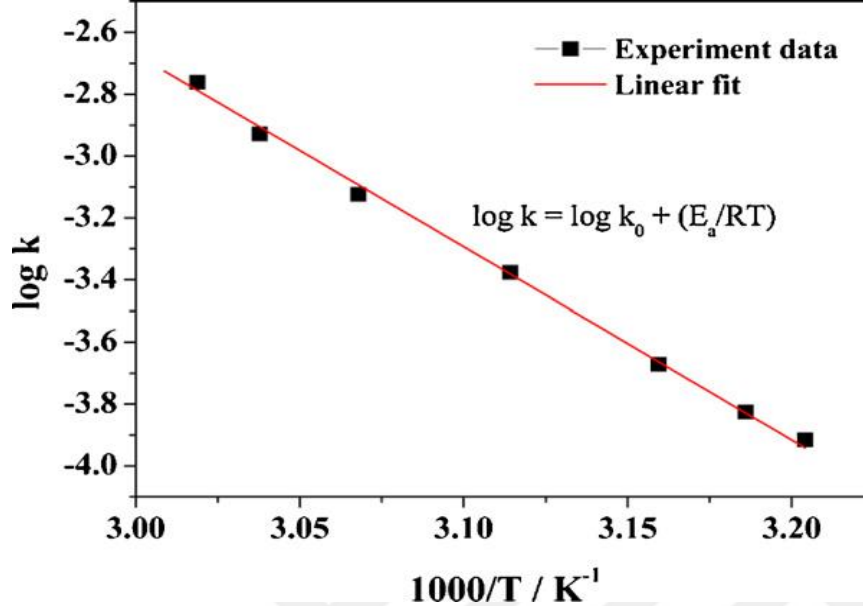
4.4. Hidrojen Üretiminde Örnek Bir Katalizörün (Co/Al₂O₃) Aktivasyon Enerjisinin Belirlenmesi

Kim ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada, katalitik hidroliz için öncelikle uygun bir reaktör tasarlanır ve imal edilir. Üretilen Co/Al₂O₃'ün % ağırlık oranı belirlenir. Genel olarak NaBH₄'ün katalitik hidroliz reaksiyonu, baskın olarak reaksiyon sıcaklığından etkilenir. Hidrojen üretim hızı yüksek sıcaklıklarda artarken, kinetik reaksiyon sıfır dereceli bir reaksiyon halini alır. Co/Al₂O₃ ile hidrolize edilen NaBH₄ çözeltisinin aktivasyon enerjisinin hesabı Arrhenius denklemi baz alınarak yapılır. Aktivasyon enerjisi, Arrhenius denklemi ile aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

Burada k reaksiyon hızıdır (ml min⁻¹ g⁻¹); E_a , reaksiyon için aktivasyon enerjisi (kJ mol⁻¹); R , gaz sabiti (8,314 kJ mol⁻¹ K⁻¹); ve T , reaksiyon sıcaklığı (°K). Şekil 4.5, bir Co/Al₂O₃ katalizörü ile NaBH₄ alkalın çözeltisinin katalitik hidroliz reaksiyonunun örnek bir Arrhenius grafiğini göstermektedir. Şekilde verilen grafiğin eğimi kullanılarak aktivasyon enerjisi 51,75 kJ mol⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, IRA-400 ve grafit destekli bir Ru katalizör için sırasıyla 47 kJ mol⁻¹ ve 61,1 kJ mol⁻¹ ile karşılaştırılabilir. Ayrıca, Co/Al₂O₃

katalizörünün aktivasyon enerjisi, Co-P'nin (48,1 kJ mol⁻¹) aktivasyon enerjisinden daha fazla çıktığı görülmüştür.



Şekil 4.5. Co/Al₂O₃ katalizörünün aktivasyon enerjisi hesaplaması için oluşturulan Arrhenius grafiği: ağırlıkça %15 NaBH₄, ağırlıkça %5 NaOH
Kaynak: (Kim ve ark., 2011)

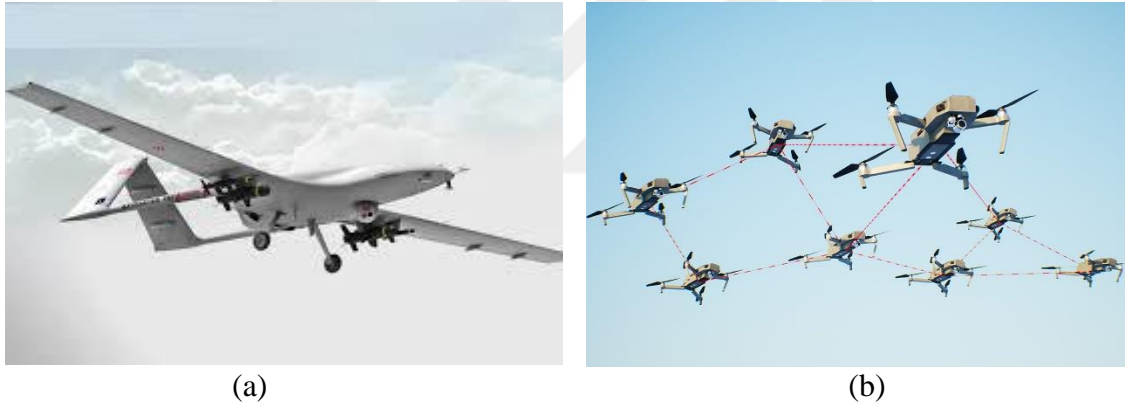
4.5. İHA'larda Hibrit Güç Yönetim Sistemi

İHA'larda performans testleri genel olarak 3 adımda sınıflandırılır:

- (a) şarj modu
- (b) seyir modu
- (c) hibrit mod.

İHA'larda elektrik yükündeki tüketim gücü başlangıçta belirli bir değere ayarlanır ve bu değer sabit olarak kaydedilir. Benzer şekilde, yakıt hücresi çıkış gücü ile batarya çıkış gücü (P_b) de belirli bir değerde seçilir ve sisteme kaydedilir. Bataryanın güç akış yönü pozitif veya negatif olabilir. Batarya gerilimi yakıt hücresinin geriliminden daha düşük olduğu durumlarda batarya gücünün yönü negatif olur ve bu durumda yakıt hücresinin fazla enerjisinin aküyü şarj etmek için kullanıldığı anlamına gelir. Batarya şarj edildikçe, batarya ile yakıt hücresi arasındaki voltaj farkı azaldığı için yakıt hücresi çıkışı ve şarj hızı azalır.

$P_b = 0$ ise, batarya geriliminin yakıt hücresi gerilimiyle aynı olduğunu ve bataryanın tamamen şarjlı durumda olduğunu gösterir, çünkü bataryanın tam şarjlı gerilimi yakıt hücresinin maksimum güçteki çıkış gerilimi olarak ayarlanmıştır. Bu noktada, eğer yükün gücü yakıt hücresinin gücünden düşük seviyede ise bu durum, hibrit güç yönetimi sisteminin seyir modudur. İHA sadece yakıt hücresinden güç alıyordur ve batarya seyir modunda nötr durumdadır. Hibrit modu değerlendirmek için İHA'nın yükü, yakıt hücresinin maksimum çıkış gücünden daha yüksek olursa, bu durumda yakıt pilinin gerilimi aşırı yük nedeniyle batarya geriliminin altına düştüğü için batarya eksik kalan gücü tamamlamak üzere sisteme belirli bir güç pompalar. Sonuç olarak, hibrit güç yönetimi sistemi, seyir için normal güç tüketimini ve kalkış için en yüksek güç gereksinimini karşılamış olur. Çalışma modları, yakıt hücresi ile batarya arasındaki gerilim farkına göre belirlenir. Bu nedenle, verimli hibrit güç yönetimi için tam şarjlı akünün voltajı, normal çıkış gücünde yakıt hücresininkiyle aynı değerde olmalıdır. Seyir halindeki bazı İHA görüntüleri Resim 4.1'de verilmiştir.



Resim 4.1. Seyir halindeki bazı İHA görüntüleri
Kaynak: (İnternet)

4.6. İHA'ların Uçuşa Bağlı Yakıt Tüketimleri

İHA'lar (İnsansız Hava Araçları), farklı boyutlarda ve kullanım amaçlarına bağlı olarak değişen farklı yakıt tüketimlerine sahip olabilir. İHA'ların genel yakıt tüketimleri, hava aracının tasarımı, boyutu, ağırlığı, motor tipi, hızı, uçuş süresi ve kullanılan yakıtın özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır. İHA'ların yakıt tüketimi oldukça çeşitlilik gösterir ve kullanılan İHA'nın özelliklerine, boyutuna ve uçuş profiline bağlı olarak değişir. Her bir İHA modelinin spesifik yakıt tüketimi verileri üretici şirketler veya kullanıcılar tarafından sağlanabilir.

Küçük ölçekli İHA'lar genellikle hafif ve daha az yakıt tüketen elektrikli motorlara sahiptir. Bu İHA'lar, saatlerle ifade edilen uçuş sürelerine sahip olabilir ve genellikle hafif pillerle çalışır. Bu tür İHA'ların yakıt tüketimi oldukça düşüktür.

Orta boy İHA'lar, benzinli veya dizel motorlarla çalışabilir. Yakıt tüketimi, uçuş süresi ve hız gibi faktörlere bağlı olarak saatte birkaç litre veya daha fazla olabilir.

Büyük ölçekli İHA'lar, genellikle jet motorları veya turboprop motorları kullanırlar. Bu tür İHA'ların yakıt tüketimi daha yüksektir ve saatte yüzlerce litre veya daha fazla yakıt tüketebilir. Ancak, bu İHA'lar genellikle uzun menzilli ve uzun süreli keşif veya askeri operasyonlar için tasarlanmıştır.

Yakıt tüketimi ayrıca İHA'nın uçuş profiline ve görevine de bağlıdır. Örneğin, İHA'nın sabit bir hızda düz uçuş yapması, daha az yakıt tüketimiyle sonuçlanabilirken, hızlı manevralar veya dikey kalkış ve inişler gibi daha enerji yoğun uçuş hareketleri daha fazla yakıt tüketimine neden olabilir.

4.7. Hidrojen Gazının İHA'larda Yakıt Olarak Kullanılması

Hidrojen gazının İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) için yakıt olarak kullanılması, çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı arayışının bir parçası olarak önemli bir araştırma alanıdır. Hidrojen, yüksek enerji yoğunluğu, temiz yanma özellikleri ve yenilenebilir bir kaynak olarak kabul edilmesi nedeniyle ilgi çekmektedir.

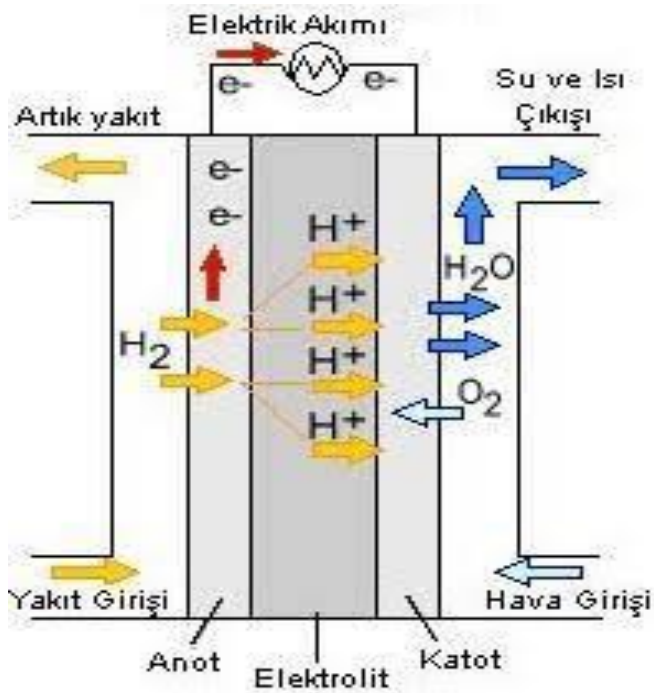
İHA'larda hidrojen gazının kullanımına yönelik çalışmalar çok yönlü olarak sürdürülmektedir. Bu çalışma alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Yakıt Hücreleri: Yakıt hücreleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bu cihazlar, genellikle hidrojen ve oksijen gibi yakıtları kullanarak elektrik üretirler. Yakıt hücreleri, birçok farklı türde mevcut olmasına rağmen, en yaygın kullanılan türler arasında proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEMFC), katı oksit yakıt hücreleri (SOFC) ve metanol yakıt hücreleri (DMFC) bulunmaktadır.

Amendola ve ark (2000) göre, PEMFC'ler, hidrojen yakıtı kullanarak elektrik üreten ve su buharı gibi yan ürünler üreten yakıt hücreleridir. Bu tür yakıt hücreleri, düşük çalışma

sıcaklığı ve hızlı devreye alma süresi gibi avantajlara sahiptir. Bu nedenle, taşınabilir elektronik cihazlarda ve otomobillerde kullanım için yaygın olarak araştırılmaktadırlar.

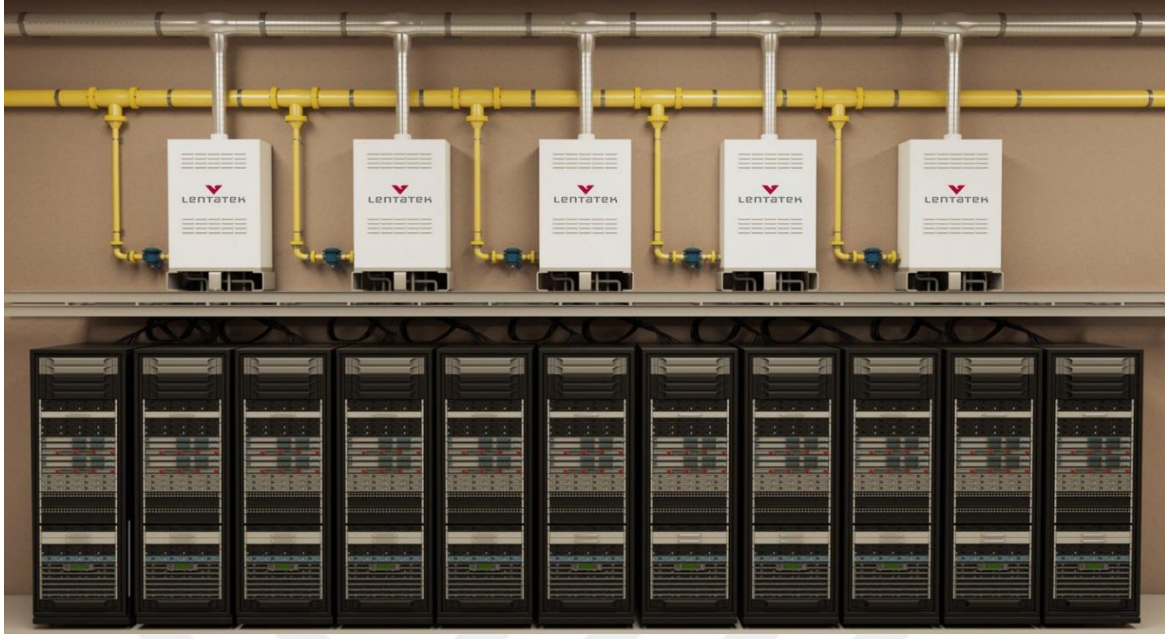
Hidrojen gazı, yakıt hücreleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilir ve bu elektrik enerjisi İHA'nın motorlarını çalıştırmak için kullanılabilir. Yakıt hücreleri, hidrojeni oksijenle birleştirerek su üretirken elektrik üretirler. Bu sistemlerin avantajı, sadece su buharı ve termal enerji üretmeleridir, böylece emisyon salınımı minimum düzeydedir. Örnek bir tek hücreli yakıt pili modeli Şekil 4.6'de verilmiştir.



Şekil 4.6. Örnek bir yakıt hücresi görüntüsü

Kaynak: (Kahraman, Çevik ve Coşman, 2014)

SOFC'ler, katı oksit elektroliti kullanan yakıt hücreleridir. Bu tür yakıt hücreleri, hidrojen, doğal gaz ve biyoyakıtlar gibi çeşitli yakıtları kullanabilirler. Yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle SOFC'ler, evlerde ve sanayi tesislerinde elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Yüksek güç ihtiyaçlarını karşılamak, yedekleme veya yedek güç sağlamak amacıyla paralel bağlanmış çok hücreli yakıt pillerinden oluşan bir enerji santrali görüntüsü ise Resim 4.2'de verilmiştir.



Resim 4.2. Çok sayıda yakıt hücresinin paralel bağlanmasıyla oluşturulan güç istasyonu görüntüsü

Kaynak: (İnternet)

Hidrojenli İçten Yanmalı Motorlar: Hidrojen gazı, içten yanmalı motorlarda da kullanılabilir. Bu motorlar, hidrojeni oksijenle reaksiyona sokarak enerji üretirler. Hidrojenin yüksek yanma hızı, bu motorların yüksek güç üretme potansiyeline sahip olmalarını sağlar. Ancak, hidrojenin depolanması ve yakıt sistemi tasarımı gibi bazı teknik zorluklar vardır.

Depolama ve Taşıma: Hidrojenin İHA'larda kullanılabilmesi için etkili bir şekilde depolanması ve taşınması gerekmektedir. Bu bağlamda, hidrojenin sıkıştırılarak veya sıvılaştırılarak depolanması gibi farklı yöntemler araştırılmaktadır. Sıkıştırılmış hidrojenin yüksek basınç gerektirmesi ve sıvılaştırılmış hidrojenin düşük sıcaklıklarda depolanması gerektirmesi, bu alanda bazı zorluklar doğurmaktadır.

Güvenlik ve Uçuş Performansı: Hidrojenin yanıcı olması nedeniyle güvenlik önlemleri alınması gerekmektedir. Hidrojenin kullanımıyla ilgili risk analizleri ve güvenlik protokolleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca, hidrojenin yakıt olarak kullanılmasının İHA'ların uçuş performansına etkisi de araştırılmaktadır. Hidrojenin hafif olması, İHA'lara daha uzun uçuş süreleri ve daha yüksek taşıma kapasiteleri sağlama potansiyeline sahip olabilir.

Yukarıda sıralanmış olan çalışmalar, hidrojenin İHA'larda yakıt olarak kullanılmasının avantajlarını ve zorluklarını araştırmayı ve teknik engelleri aşmayı hedeflemektedir. Ancak, güncel çalışmalar neticesinde alınan verilere göre hidrojenin İHA'larda yakıt olarak daha geniş çapta kullanılabilmesi için daha fazla araştırma, geliştirme ve güvenlik önlemlerinin alınması gerekmektedir.



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında sodyumborhidrürün insansız hava araçlarında yakıt depolayıcısı olarak kullanılıp kullanılmayacağı konusu ele alınmıştır. Çalışma kapsamında sodyumborhidrürün hidrojen depolayıcısı olarak kullanılabilirliği ile ilgili günümüze kadar yapılmış olan bazı önemli çalışmalar incelenmiş ve konuyla ilgili olumlu ve olumsuz yönleri nazara alınarak uygulanabilirlik açısından değerlendirilmiştir. Yapılan teknik araştırma, inceleme ve yorumlamalar neticesinde varılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- 1- NaBH_4 (sodyumborhidrür) bir yakıt olarak kullanılabilir, ancak İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) için pratik bir yakıt seçeneği olarak bazı sınırlamaları vardır.
- 2- NaBH_4 , hidrojen gazını serbest bırakan bir bileşiktir. Yakıt hücresi teknolojisi kullanılarak NaBH_4 , hidrojen gazı elde etmek için suyla tepkimeye sokulur. Bu hidrojen gazı daha sonra bir yakıt hücresinde oksijenle reaksiyona girerek elektrik enerjisi üretebilir.
- 3- NaBH_4 , potansiyel olarak İHA'lar için yakıt olarak kullanılabilir çünkü hidrojen gazı, diğer geleneksel yakıtlara kıyasla daha temiz bir enerji kaynağıdır. Hidrojen, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğundan, daha uzun uçuş süreleri ve daha geniş menziller sağlar.
- 4- NaBH_4 bazlı yakıt hücrelerinde, bazı zorluklarla karşılaşılır. Bunlar arasında yakıt depolama ve taşıma zorlukları, sistem ağırlığı ve hacmi, enerji yoğunluğu, yakıt hücresinin verimliliği ve güvenlik önlemleri yer alır.
- 5 NaBH_4 hidrojen depolamak için iyi bir seçenek gibi görünse de, saf hidrojen gazının depolanması ve taşınması genellikle zorluklarla doludur. Hidrojen gazı yüksek enerjili ve yanıcı olduğundan, güvenlikle ilgili endişeler söz konusudur.

Yukarıda sıralanmış olan nedenlerden dolayı, İHA'lar için NaBH_4 bazlı yakıt hücresi sistemleri geliştirmek için daha fazla araştırma ve mühendislik çalışması gerekmektedir. Yakıt hücresi teknolojisinin iyileştirilmesi ve hidrojenin depolanması, taşınması ve güvenli bir şekilde kullanılması konularında ilerlemeler sağlanırsa, NaBH_4 tabanlı yakıtlar İHA'lar

için daha cazip bir seçenek haline gelebilir. Ancak günümüzde, geleneksel yakıtlar ve batarya teknolojileri İHA'larda daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

5.2. Öneriler

Sodyumborhidrürün yüksek hidrojen depolama kabiliyeti, yanma ve patlama riski taşımaması ve kolay reaksiyona girmesi gibi üstünlükleri nedeniyle İHA teknolojisi için önemli bir yakıt alternatifi olacağı üzerine çalışmalar yoğunlaştırılmalıdır. Ayrıca, yakın gelecekte yakıt hücreleri ve diğer hidrojen depolama teknolojileri gibi alternatifler de İHA'lar için değerlendirilmelidir.



KAYNAKLAR

- Abdelhamid, H. N. (2021). A review on hydrogen generation from the hydrolysis of sodium borohydride. *international journal of hydrogen energy*, 46(1), 726-765.
- Amendola, S. C., Sharp-Goldman, S. L., Janjua, M. S., Kelly, M. T., Petillo, P. J., & Binder, M. (2000). An ultrasafe hydrogen generator: aqueous, alkaline borohydride solutions and Ru catalyst. *Journal of Power Sources*, 85(2), 186-189.
- Bone, E., & Bolkcom, C. (2003, April). Unmanned aerial vehicles: Background and issues for congress. Congressional Research Service, Library of Congress.
- Brack, P., Dann, S. E., & Wijayantha, K. U. (2015). Heterogeneous and homogenous catalysts for hydrogen generation by hydrolysis of aqueous sodium borohydride (NaBH₄) solutions. *Energy Science & Engineering*, 3(3), 174-188.
- Bradley, T. H., Moffitt, B. A., Fuller, T. F., Mavris, D. N., & Parekh, D. E. (2009). Comparison of design methods for fuel-cell-powered unmanned aerial vehicles. *Journal of Aircraft*, 46(6), 1945-1956.
- Brown, H. C., & Brown, C. A. (1962). New, highly active metal catalysts for the hydrolysis of borohydride. *Journal of the American Chemical Society*, 84(8), 1493-1494.
- Cafer, S. A. K. A. (2023). Highly active hydrogen generation from sodium borohydride methanolysis and ethylene glycolysis reactions using protonated chitosan-zeolite hybrid metal-free particles. *Applied Catalysis B: Environmental*, 325, 122335.
- Çetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F. (2003) Yakıt Pilleri, *Tesisat Mühendisliği*, 75, s 18 33
- Demirci, U. B., Akdim, O., & Miele, P. (2009). Ten-year efforts and a no-go recommendation for sodium borohydride for on-board automotive hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(6), 2638-2645.
- Durbin, D. J., & Malardier-Jugroot, C. (2013). Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications. *International journal of hydrogen energy*, 38(34), 14595-14617.

Galli, S., De Francesco, M., Monteleone, G., Oronzio, R., & Pozio, A. (2010). Development of a compact hydrogen generator from sodium borohydride. *international journal of hydrogen energy*, 35(14), 7344-7349.

Hansu, F. (2015). The effect of dielectric barrier discharge cold plasmas on the electrochemical activity of Co–Cr–B based catalysts. *Journal of the Energy Institute*, 88(3), 266-274.

Hong, B. K., & Kim, S. H. (2018). Recent advances in fuel cell electric vehicle technologies of Hyundai. *Ecs Transactions*, 86(13), 3.

Hua, T. Q., Roh, H. S., & Ahluwalia, R. K. (2017). Performance assessment of 700-bar compressed hydrogen storage for light duty fuel cell vehicles. *international journal of hydrogen energy*, 42(40), 25121-25129.

Hung, A. J., Tsai, S. F., Hsu, Y. Y., Ku, J. R., Chen, Y. H., & Yu, C. C. (2008). Kinetics of sodium borohydride hydrolysis reaction for hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(21), 6205-6215.

İnternet: Seyir halindeki bazı İHA görüntüleri (a) URL: <https://www.defenceturk.net/bayraktar-tb2-siha-300-bin-saattir-goklerde> , Son Erişim Tarihi: 22.08.2023.

İnternet: Seyir halindeki bazı İHA görüntüleri (b) URL: <https://www.savunmahaber.com/suru-ihalarimizi-tualcom-haberlestirecek-cok-bantli-milli-suru-ihaveri-bagi-coban-haziranda-sahaya-cikiyor/> , Son Erişim Tarihi:22.08.2023.

İnternet: Çok sayıda yakıt hücresinin paralel bağlanmasıyla oluşturulan güç istasyonu görüntüsü URL: <https://lentatek.com/tr/cozumler/hidrojen-ve-yakit-pili-teknolojileri> , Son Erişim Tarihi: 22.08.2023.

Jeong, S. U., Kim, R. K., Cho, E., Kim, H. J., Nam, S. W., Oh, I. H., ... & Kim, S. H. (2005). A study on hydrogen generation from NaBH₄ solution using the high-performance Co-B catalyst. *Journal of Power Sources*, 144(1), 129-134.

- Kahraman, H., Çevik, I., & Coşman, S. (2014). Sıkıştırma basıncının PEM yakıt pili performansına etkisi. *ISITES2014*, 1-10.
- Kim, H., Oh, T. H., & Kwon, S. (2016). Simple catalyst bed sizing of a NaBH₄ hydrogen generator with fast startup for small unmanned aerial vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(2), 1018-1026.
- Kim, J. H., Choi, K. H., & Choi, Y. S. (2010). Hydrogen generation from solid NaBH₄ with catalytic solution for planar air-breathing proton exchange membrane fuel cells. *International journal of hydrogen energy*, *35*(9), 4015-4019.
- Kim, K., Kim, T., Lee, K., & Kwon, S. (2011). Fuel cell system with sodium borohydride as hydrogen source for unmanned aerial vehicles. *Journal of power sources*, *196*(21), 9069-9075.
- Kim, T., & Kwon, S. (2012). Design and development of a fuel cell-powered small unmanned aircraft. *International Journal of Hydrogen Energy*, *37*(1), 615-622.
- Kim, T. (2014). NaBH₄ (sodium borohydride) hydrogen generator with a volume-exchange fuel tank for small unmanned aerial vehicles powered by a PEM (proton exchange membrane) fuel cell. *Energy*, *69*, 721-727.
- Kirk, J., Kim, Y., Lee, Y. J., Kim, M., Min, D. S., Kim, P. S., ... & Jeong, H. (2023). Pushing the limits of sodium borohydride hydrolysis for on-board hydrogen generation systems. *Chemical Engineering Journal*, *466*, 143233.
- Koh, J. S., Kim, D. H., Lee, S. H., & Kim, M. S. (2023). Hydrogen generation system for fuel cells based on high pressure hydrolysis of solid-state sodium borohydride. *Energy Conversion and Management*, *281*, 116850.
- Kojima, Y., Suzuki, K. I., Fukumoto, K., Kawai, Y., Kimbara, M., Nakanishi, H., & Matsumoto, S. (2004). Development of 10 kW-scale hydrogen generator using chemical hydride. *Journal of Power Sources*, *125*(1), 22-26.
- Krcovoy, M. M., & Jacobson, R. W. (1979). The rate of decomposition of NaBH₄ in basic aqueous solution. *Ventron Alembic*, *15*, 2-3

- Kwon, S. M., Kim, M. J., Kang, S., & Kim, T. (2019). Development of a high-storage-density hydrogen generator using solid-state NaBH₄ as a hydrogen source for unmanned aerial vehicles. *Applied Energy*, *251*, 113331.
- Lapeña-Rey, N., Blanco, J. A., Ferreyra, E., Lemus, J. L., Pereira, S., & Serrot, E. (2017). A fuel cell powered unmanned aerial vehicle for low altitude surveillance missions. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(10), 6926-6940.
- Li, S. C., & Wang, F. C. (2016). The development of a sodium borohydride hydrogen generation system for proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(4), 3038-3051.
- Liu, C. H., Chen, B. H., Hsueh, C. L., Ku, J. R., Jeng, M. S., & Tsau, F. (2009). Hydrogen generation from hydrolysis of sodium borohydride using Ni–Ru nanocomposite as catalysts. *International journal of hydrogen energy*, *34*(5), 2153-2163.
- Lu, D., He, Z., Zhong, C., Lv, P., & Liu, W. (2023). Hierarchical Porous NiCo/HZIF-8 Catalyst for Highly Efficient Hydrogen Generation from Sodium Borohydride Hydrolysis. *The Journal of Physical Chemistry C*.
- Min, X., Chai, D., Ding, K., Li, R., & Zhang, X. (2023). Hydrogen generation by hydrolysis of solid sodium borohydride for portable PEMFC applications. *Fuel*, *350*, 128777.
- Okumus, E., San, F. G. B., Okur, O., Turk, B. E., Cengelci, E., Kilic, M., ... & Yazici, M. S. (2017). Development of boron-based hydrogen and fuel cell system for small unmanned aerial vehicle. *international journal of hydrogen energy*, *42*(4), 2691-2697.
- Prosini, P. P., & Gislou, P. (2006). A hydrogen refill for cellular phone. *Journal of power sources*, *161*(1), 290-293.
- Richardson, B. S., Birdwell, J. F., Pin, F. G., Jansen, J. F., & Lind, R. F. (2005). Sodium borohydride based hybrid power system. *Journal of Power Sources*, *145*(1), 21-29.
- Wu, Y., Altuner, E. E., Tiri, R. N. E. H., Bekmezci, M., Gulbagca, F., Aygun, A., ... & Karimi-Maleh, H. (2023). Hydrogen generation from methanolysis of sodium borohydride using waste coffee oil modified zinc oxide nanoparticles and their

photocatalytic activities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(17), 6613-6623.



DİZİN

A

akustik · 36
alkali · 19, 27, 37, 41
Arrhenius · ix, 44, 45
Asit · x

B

batarya · 27, 38, 43, 45, 52
benzin · 15
biyoyakıt · 30

Ç

çevre · 17, 21, 28, 36, 47

D

dizel · 47

E

emisyoy · 48

F

fosil · 18, 26, 36
Fourier · 21

H

hibrit · 21, 24, 26, 27, 28, 37, 43,
45, 46

İ

İHA · 32, iv, vii, ix, xi, 14, 15,
16, 17, 26, 28, 29, 30, 32, 33,
36, 37, 38, 39, 43, 44, 45, 46,
47, 48, 49, 50, 51, 52

J

Jet · 36

K

katalizör · 14, 19, 21, 23, 24, 25,
27, 33, 34, 35, 41, 42, 44

L

lityum · 26, 28, 36, 38

M

metaborat · 24, 34, 40
metanol · 22, 29, 47
mobil · 18, 25, 37
motor · 46

O

oksijen · 12, 47

P

pentahidrat · 40
plazma · ix, 42, 43
proton · 24, 25, 47, 54, 55, 56

R

reaktif · iv, 38
reaktör · 23, 24, 27, 39, 44

S

seyir · 27, 45, 46
sodyumborhidrür · iv, 14, 19, 29,
32, 34, 38, 51

Ş

şarj · 12, 15, 16, 45

T

termal · 15, 22, 30, 42, 48
turboprop · 47

V

voltaj · 43, 45

Y

yanma · 19, 35, 36, 47, 49, 52



TEKNOVERSİTE



teknoversite AYRICALIĞINDASINIZ

İSTE

