
Araştırma Makalesi / Research Article

Co-La-B Katalizörünün Sentezlenmesi ve Yakıt Piliinde Kullanılması

Sabit HOROZ^{1*}, Arzu EKİNCİ², Ömer ŞAHİN³

¹Siirt Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Siirt

²Siirt Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, Siirt

³Siirt Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Siirt

(ORCID: 0000-0002-3238-8789) (ORCID: 0000-0002-3068-8657) (ORCID: 0000-0003-4575-3762)

Öz

Bu çalışmada, bir hidrojen jeneratörü tasarlamak için Co-La-B katalizörü kullanılarak katalizör miktarı, NaOH konsantrasyonu, NaBH₄ konsantrasyonu ve çözelti sıcaklığı gibi parametrelerin hidrojen üretim hızı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hidrojen üretim reaksiyonu için aktivasyon enerjisi 40,3 kJ mol⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Co-La-B katalizörünün varlığında elde edilen hidrojen üretim sistemi kullanarak, polimer elektrolit membran yakıt hücresi (PEMFC) yığını çalıştırılmıştır. Yerinde üretilen hidrojen, bir PEM yakıt pilinde kullanılarak o yakıt piline ait verim hesaplanmıştır. Üretilen hidrojenin zamanla akım ve gerilim üzerindeki değişimleri incelenmiştir. Yerinde üretilen hidrojenin tek hücreli PEM yakıt pilinde kullanılması ile akım ve gerilim değerlerinden, 0,65 W'lık bir güç değeri hesaplanmıştır. PEM yakıt pili uygulamasında güce ve ideal voltaja göre ortalama verim değerleri sırasıyla %62 ve %79 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan, Co-La-B katalizörünün PEM yakıt pili uygulamaları için ideal bir katalizör olduğu söylenebilir.

Anahtar kelimeler: PEM, Hidroliz, Co-La-B, Katalizör

Synthesis of Co-La-B Catalyst and Its Use in Fuel Cell

Abstract

In this study, the effect of parameters such as catalyst amount, NaOH concentration, NaBH₄ concentration and solution temperature on hydrogen production rate was investigated by using Co-La-B catalyst to design a hydrogen generator. The activation energy for the hydrogen production reaction was calculated as 40,3 kJ mol⁻¹. The polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) stack was run using the hydrogen generation system using the Co-La-B catalyst. Fuel cell efficiency was calculated by using in situ hydrogen produced in PEM fuel cell. The changes of hydrogen produced over current and voltage have been investigated. Using on-site hydrogen in a single-cell PEM fuel cell, a power value of 0,65 W was calculated from the current and voltage values. In PEM fuel cell application, average efficiency values according to power and ideal voltage were 62% and 79%, respectively. From the results, it can be said that the Co-La-B catalyst is an ideal catalyst for PEM fuel cell applications.

Keywords: PEM, Hydrolysis, Co-La-B, Catalyst.

1. Giriş

Fosil yakıtlardan sera gazı emisyonları ile ilgili problemleri çözmek için yenilenebilir enerji kaynağı araştırmaları, bilim dünyasında önemli bir yer almaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu sayesinde hidrojen gazı yenilenebilir enerjiyi depolamak için umut vericidir. Ayrıca, proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde (PEM), yakıt olarak hidrojen kullanıldığı zaman çevreyi kirletme emisyonu neredeyse sıfırdır [1]. Aynı zamanda, yerinde hidrojen üretimi PEM'e hidrojen sağlamak için potansiyel bir yol o haline gelmektedir. Bununla birlikte, temiz hidrojen teknolojisi için güvenli, uygun hidrojen depolama ve üretim sistemleri geliştirmek gerekmektedir. Basıncı gaz veya sıvı tankları, metal alaşımlar ve karbon nanotüpler [2] üzerine hidrojen depolanması ile ilgili önemli çalışmalar yapılmıştır. Ancak, tüm

*Sorumlu yazar: sabithoroz@siirt.edu.tr

Geliş Tarihi: 28.07.2019, Kabul Tarihi: 28.11.2019

bu sistemlerin ticari uygulamalarda hidrojen gereksinimini karşılama açısından enerji verimliliği çok düşüktür[3].

Yüksek hidrojen depolamada yüksek verimleri olan sodyum borhidür (NaBH_4) oda sıcaklığında yerinde saf hidrojen üretme de en olası adaydır [4, 5]. Kimyasal hidrürler arasında olan sulu NaBH_4 ağırlıkça % 10,8 hidrojen depolama kabiliyetine sahip olması, alkali çözeltide kararlı olması, yanıcı olmaması ve doğada toksik halde bulunmamasından dolayı ideal bir hidrojen kaynağı olarak görülmektedir [6]. NaBH_4 'ün de-hidrojenasyonundan sonra elde edilen reaksiyon ürünü (boraks) çevre açısından temizdir ve reaktan üretmek için geri dönüştürülebilir [7]. Hidrojen oluşumunun NaBH_4 hidrolizinden elde edilen bu belirgin avantajları, taşınabilir PEM yakıt hücrelerinde kullanılmaktadır. Asil olmayan metal katalizörlerden çok daha düşük maliyetli ve daha zengin kaynakları olan Co-B, ilk olarak Schlesinger ve arkadaşlarının NaBH_4 hidrolizine yönelik bir katalizör olarak rapor edilmiştir. Co-B katalizörlerinin NaBH_4 hidrolizine karşı hazırlama ve katalitik aktivitelerini incelemek için çok sayıda çalışma yapılmıştır [8, 9]. Bununla birlikte, Co-B numunelerinin redüksiyon reaksiyonu güçlü ve egzotermik olduğundan, genellikle düşük yüzey alanı ve geniş ölçüde dağılmış partikül büyüklüğü nedeniyle kristalleşmeye karşı zayıf termal kararlılık göstermektedir. Literatürde Co-B'nin mikro yapı ve yüzey özelliklerinin katalitik performansında çok önemli bir rol oynadığı açıkça belirtilmiştir. Co-B katalizörünün katalitik aktivitesini daha da arttırmak için, Co-Ni-B [10], Co-P-B [11] ve Co-Cr-B [12] 'nin üç element katalizörü araştırılmıştır. İkinci metal aynı zamanda bir elektron verici ligand olarak da hareket eder, böylece reaksiyon kinetiğini destekleyen aktif metal atomlarındaki elektron yoğunluğunu artırmaktadır. Tüm bu katalizörler, Co-B'den NaBH_4 hidrolizine karşı daha iyi katalitik performans göstermiştir.

Yukarıda belirtilen bu avantajlar nedeniyle, hidrojen üretim kaynağı olarak NaBH_4 'ün uygulanabilirliği incelenmiştir. Bu çalışmada, La katkılılandırılmış Co-B katalizörü kimyasal çöktürme ve indirgenme yöntemiyle sentezlenmiştir. Lantan katkısının Co-B katalizörünün katalitik etkinliği üzerindeki etkisini incelemek için, Co-La-B katalizöründe Co/La molar oranı incelenmiştir. Co-La-B katalizörü, Co-B katalizörüne kıyasla, yüksek yüzey alanından dolayı daha üstün katalitik aktivite göstermiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Katalizör Sentezlenmesi

Bu çalışmada NaBH_4 hidrolizinde daha önce kullanılmayan Co-La-B katalizörleri kimyasal çöktürme ve indirgenme yöntemiyle sentezlenmiştir. Katalizörün detaylı üretimi aşağıda verilmiştir.

100 mL saf suya Co/La mol oranı 7:3 olacak şekilde kobalt klorür hegzahidrat ve lantan nitrat eklenerek karıştırılmıştır. Elde edilen metal çözeltisi buz banyosuna bırakılarak sıcaklığının 0-5 °C aralığında olması sağlanmıştır. Daha sonra 50 mL saf suya NaBH_4 hazırlanmış ve metal çözeltisi üzerine damla damla eklenmiştir. Elde edilen siyah çökeltideki yabancı maddeleri uzaklaştırmak için çökelek saf su ve etanol ile birkaç kez yıkanmıştır. Son olarak elde edilen ürün 8 saat boyunca 100 °C de azot gazı ortamında kurutulmuştur. Elde edilen katalizör NaBH_4 hidrolizinde kullanılmak için kapalı bir kaptan muhafaza edilmiştir.

2.2. NaBH_4 Hidrolizi

Elde edilen katalizör, NaBH_4 hidrolizinde kullanılmıştır. NaBH_4 hidroliz deneyleri 10 mL çözelti hacmi, 25 mg katalizör miktarı ve %2,5 NaBH_4 şartlarında gerçekleştirilmiştir. NaBH_4 hidrolizinde elde edilen hidrojen hacmi kümülatif yöntem kullanılarak zaman ile değişimi belirlenerek grafiklere geçirilmiştir. NaBH_4 hidroliz deneylerinde, Co/La metali oranı, NaOH konsantrasyonu, NaBH_4 konsantrasyonu, katalizör miktarı ve sıcaklık gibi farklı parametrelerin etkisi incelenmiştir. Ayrıca, bu katalizör varlığında NaBH_4 'ün bozunma kinetiği belirlenmiştir.

2.3. PEM yakıt pili Uygulaması

Anot ve katot kısımlarında Pt/C katalizörü kullanılarak tasarlanan tek hücreli bir PEM yakıt pil sistemi, uygulama amaçlı olarak kullanılmıştır. PEM yakıt pili uygulamasında, Co-La-B katalizörü ile NaBH_4

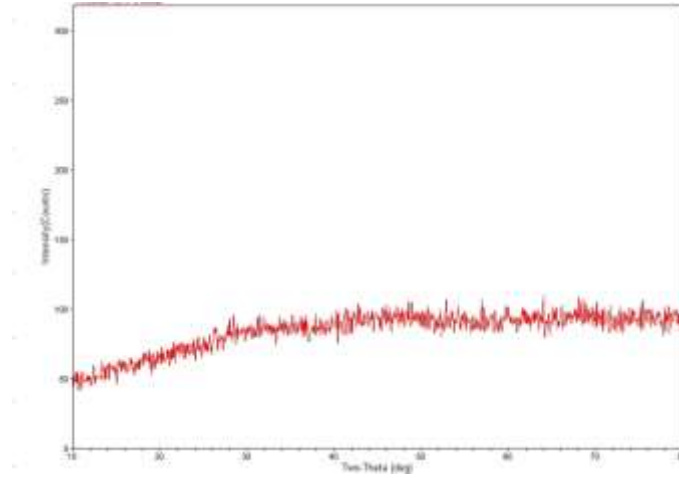
hidrolizinden üretilen hidrojen kullanılmıştır. Tasarlanan PEM yakıt pilinin hücre sıcaklığı 40 °C de sabit tutularak, 10 mL çözelti içerisinde 25 mg Co-La-B katalizörü kullanılarak sabit ve değişken yükler üzerinde akım-gerilim değerleri ölçülmüştür. Sabit yük üzerinden akım-gerilim- güç üretim değerleri belirli zaman aralıklarında yapılan ölçümlerle gözlemlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Katalizörün Analizi

3.1.1. XRD

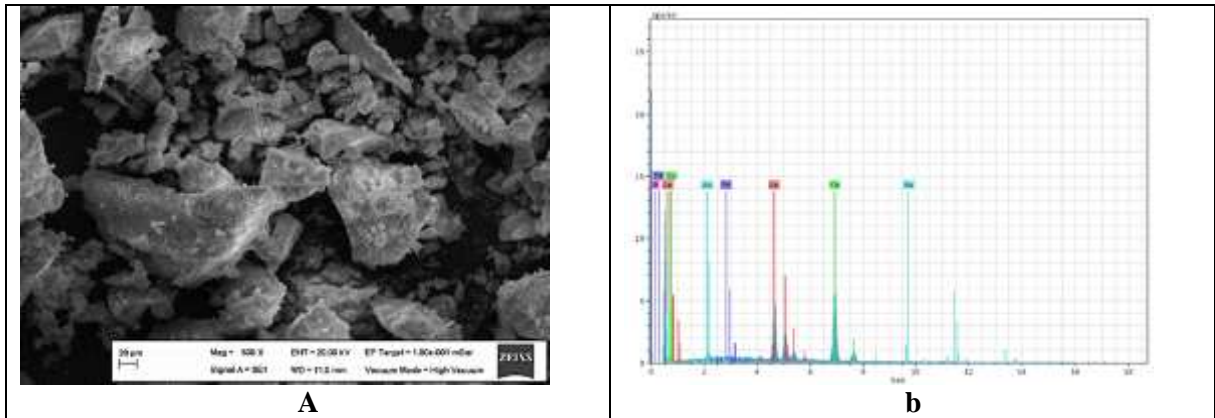
Co-La-B katalizör tozunun XRD kırınım deseni Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekilde kristal fazın belirgin kırınım tepe noktalarına ait herhangi bir pik olmadığından, hazırlanan Co-La-B katalizörünün amorf yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Co-La-B katalizörünün XRD kırınım deseni.

3.1.2. SEMve EDX Analizi

Sentezlenen Co-La-B katalizörünün SEMve EDX görüntüleri Şekil 2 a-b'de verilmiştir.



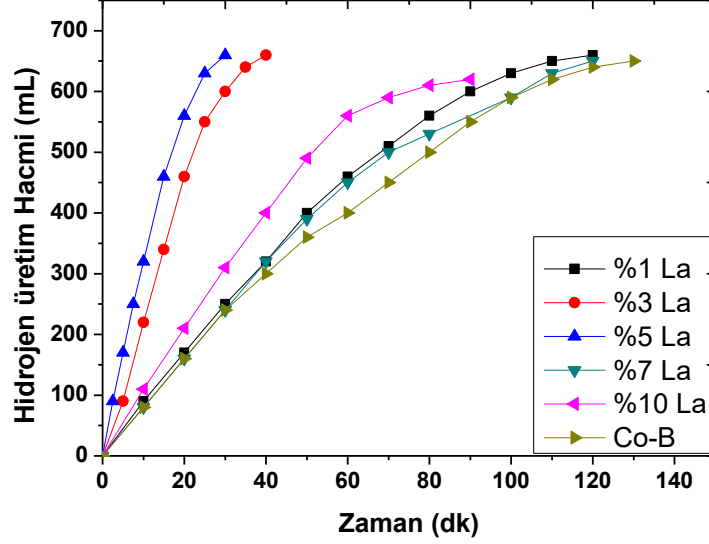
Şekil 2. (a) Co-La-B katalizörüne ait SEM görüntüsü (b)Co-La-B katalizörüne ait EDX spektrumları

Kaydedilen SEM görüntüsü, Co-La-B katalizörünün birkaç nanometrenin küresel şekline ve boyutuna sahip parçacıklarla benzer morfolojik özelliklere sahip olduğu hakkında bilgi vermektedir. Katalizör hazırlığı sırasında, NaBH₄'ün bir indirgeyici madde olarak kullanılması, birkaç nanometrenin üzerinde partikül büyümesini engelleyen hızlı bir Co-iyon indirgenmesine neden olduğu belirtilebilir. Şekil 2b'de gösterilen EDX sonuçlarına bakıldığında Co-La-B katalizörünün başarılı bir şekilde sentezlendiği görülmektedir.

3.2. NaBH₄ Hidrolizi

3.2.1. Co/La Mol Oranının Etkisi

Co-B katalizörünün katalitik aktivitesini artırmak için Co-B katalizörü La ile katkılandırılmıştır. Hazırlanan çözeltiye NaOH eklenmeden La katkısının miktarı %1-%10 aralığında incelenmiş ve farklı La konsantrasyonların zaman ile hidrojen hacim değişim grafiği Şekil 3'te verilmiştir.

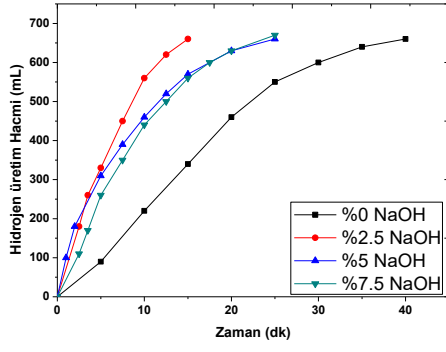


Şekil 3. Farklı La konsantrasyonları için hidrojen üretim hızının zaman ile değişimi.

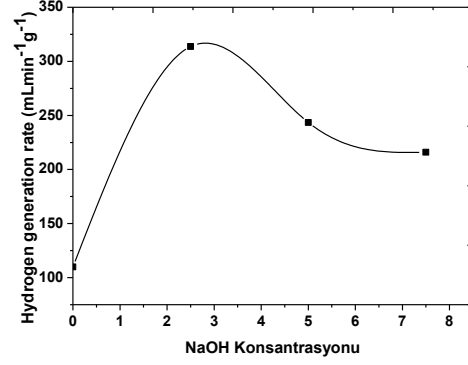
Namunelerin katalitik aktivitesi, alkali çözeltide NaBH₄ hidrolizi için değerlendirildi. 10 mL ağırlıkça % 2.5 NaBH₄ çözeltisinin hidrolizi için 25 mg katalizör kullanıldı. Şekil 3, 303 °K de karşılaştırmalı olarak farklı La metali konsantrasyonların da üretilen Co-La-B katalizörlerinin NaBH₄ hidrolizi için zamana karşı hidrojen hacminin eğrilerini gösterir. Şekil 3'den La katkı metalinin Co-B katalizörünün katalitik aktivitesi üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Co-B katalizörü %1 La ile katkılandığında katalizörün aktivitesi artmaktadır. Yani, La metali ile katkılama hem Co-B katalizörüne ait katalitik yüzey alanını hem de aktif bölge sayısını arttırdığını söylenebilir. Ayrıca, La katkı oranı %1'den % 5 arttırıldığında hidrojen üretim hızının arttığı daha sonra ise azaldığı görülmektedir. Bu durumun muhtemel nedeni olarak; La katkı oranı yüksek olduğunda tabakaların üst üste gelerek katalitik aktiviteyi azalttığı düşünülmektedir. En iyi La katkı oranının %5 olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak, yüzey alanı ve yapı, katalitik aktiviteyi etkileyen anahtar faktörlerdir. Bu nedenle, Co-La-B katalizörü, NaBH₄ hidrolizi için yüzeyde artan sayıda aktif bölge sağlayabilen özel bir yapı gösterir.

3.2.2. NaOH etkisi

NaBH₄'ün herhangi bir katalizör olmadan sudaki hidroliz reaksiyonu, reaksiyon çözeltisine ait pH'ın kontrol edilmesiyle baskılanır. Bu nedenle, NaOH konsantrasyonunun hidroliz reaksiyonu üzerindeki etkisinin araştırılması önemlidir. NaOH etkisinin incelendiği deneyler 40 °C ortam sıcaklığı, 10 mL çözelti hacmi %2,5 NaBH₄ ve 25 mg katalizör miktarı şartlarında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4(a-b) de verilmiştir.



(a)



(b)

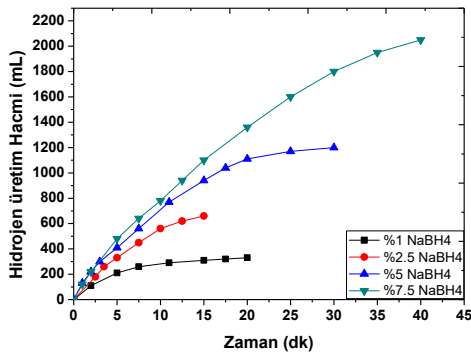
Şekil 4. (a) Farklı NaOH konsantrasyonları için hidrojen hacminin zaman ile değişim grafiği. (b) Farklı NaOH konsantrasyonunun fonksiyonu olarak hidrojen üretim oranı.

Şekil 4(a-b)'de NaOH konsantrasyon miktarı, %0'dan %2,5'a arttırıldığında hidrojen üretim başlangıç hızının arttığı daha sonra ise azaldığı görülmektedir. Bunun muhtemel sebebi, çözelti ortamında fazla miktarda bulunan OH^- iyonunun NaBH_4 'ün hidrolizinde sterik etki yaptığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, aşırı NaOH konsantrasyonu, NaBO_2 'nin (hidroliz reaksiyonunun yan ürünü) çözünürlüğünün azalmasına ve ardından çözülden sonradan çökelmeye ve katalizörün yüzeyine tutunarak hidroliz reaksiyonunu engellemeye neden olduğu belirtilmiştir [11,13,14]. Diğer parametrelerin etkisi % 2,5 NaOH ortamında incelenmiştir.

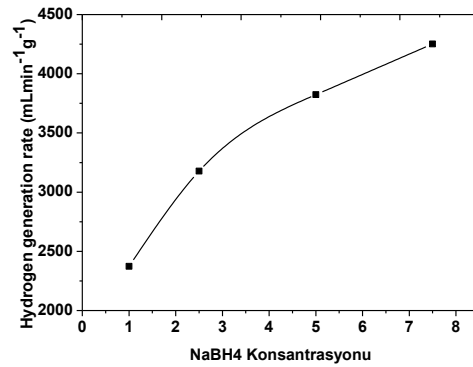
Bor türleri az miktarda bulunan La^{3+} yüzeyi üzerinde OH^- iyonlarının emilmesiyle katalize edilir. Bu nedenle, düşük bir başlangıçtaki OH^- iyon konsantrasyonu, La^{3+} iyon türlerini dinamik olarak kaplamak için yeterlidir. Reaksiyon ilerledikçe OH^- iyonları, H_2O moleküllerinin parçalanmasıyla sağlanmaktadır. Bu durum, daha yüksek NaOH konsantrasyonun da sabit hidrojen üretim hızını açıklamaktadır.

3.2.3. NaBH_4 etkisi

NaBH_4 konsantrasyonunun hidrojen üretim hızı üzerindeki etkisi, katalizör ve NaOH konsantrasyonu sabit tutularak, dört farklı NaBH_4 konsantrasyonu kullanarak bir dizi deney yapılarak incelendi. Şekil 5(a-b), dört farklı NaBH_4 konsantrasyonu kullanılarak alkalın NaBH_4 çözeltisinin hidrolizinden elde edilen, zamana bağlı olarak üretilen hidrojen hacmi ve hidrojen üretim oranı grafiğini sunar. NaBH_4 konsantrasyonu arttığında, hidrojen üretim hızının arttığı görülmektedir. Daha yüksek NaBH_4 konsantrasyonu, daha yüksek hidrojen depolaması sağlar, ancak fazla NaBH_4 konsantrasyonu, düşük çözünürlüğü nedeniyle aktif bölgeleri bloke edebilecek daha yüksek miktarda NaBO_2 üretimi yapar.



(a)

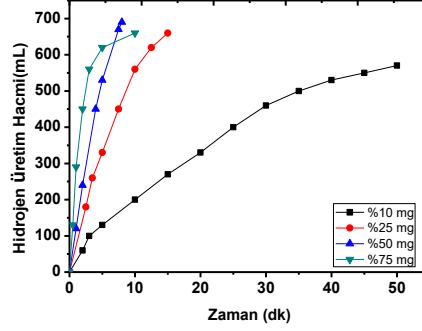


(b)

Şekil 5. (a) Farklı NaBH_4 konsantrasyonları için hidrojen hacminin zaman ile değişim grafiği. (b) Farklı NaBH_4 konsantrasyonunun fonksiyonu olarak hidrojen üretim oranı

3.2.4. Katalizör miktarının etkisi

Katalizör miktarının etkisinin incelendiği deneyler 40 °C ortam sıcaklığı, 10 mL çözelti hacmi %2,5 NaOH ve %2,5 NaBH₄ konsantrasyonu şartlarında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir.

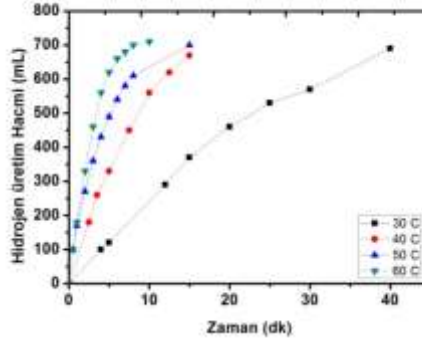


Şekil 6. Farklı katalizör miktarlarının için hidrojen hacminin zaman ile değişim grafiği.

Şekil 6'da görüleceği üzere katalizör miktarı arttıkça hidroliz olayı daha hızlı bir şekilde gerçekleşmiş ve hidrojen üretim hızı da artmaktadır. Artan katalizör miktarıyla birlikte aktif bölge sayısının da arttığı söylenebilir. Sonuç olarak, NaBH₄ hidroliz olayının katalizör kontrollü olduğunu söyleyebiliriz.

3.2.5. Sıcaklık etkisi

Sıcaklık etkisinin incelendiği deneyler 10 mL çözelti hacmi, %2,5 NaOH, %2,5 NaBH₄ konsantrasyonu ve 25 mg katalizör miktarı şartlarında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Farklı sıcaklıklar için hidrojen üretim hacminin zaman ile değişim grafiği.

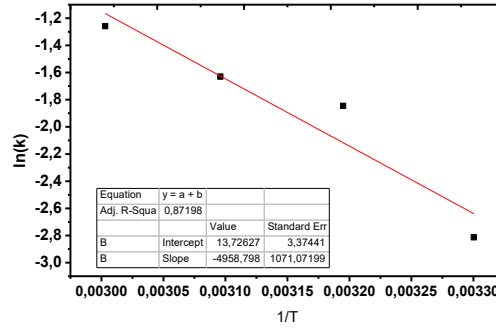
Şekil 7'de görüldüğü gibi artan sıcaklık ile birlikte hidroliz hızı artmaktadır. Ayrıca, artan sıcaklık ile birlikte çözeltide bulunan BH₄⁻ iyonlarının hızının arttığı dolayısıyla hidroliz hızının da arttığı düşünülmektedir.

Farklı sıcaklıklarda herhangi bir reaksiyonun yürüyüşünün ölçülmesindeki en temel sebeplerden bir tanesi de reaksiyon hız sabitinin belirlenmesi ve buna bağlı olarak reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli olan aktivasyon enerjisinin belirlenmesidir. Bu nedenle öncelikle farklı sıcaklıklardaki hız sabitlerini belirlemek üzere n. derecede bir reaksiyon baz alınmış ve reaksiyona ait hız sabiti değerleri hesaplanmıştır.

Alkali NaBH₄ çözeltisinin katalitik hidroliz hızı, reaksiyon sıcaklığındaki artışa bağlı olarak üssel olarak arttığı ve 60 °C'de maksimum bir değer elde edilmiştir. Hidrojen üretim hızının sıcaklığa bağımlılığı genellikle Eşitlik (1)'de gösterilen Arrhenius denklemi ile ifade edilir.

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (1)$$

Burada k: reaksiyon hızı ($\text{mL g}^{-1}\text{dak}^{-1}$), k_0 : reaksiyon sabiti ($\text{mL g}^{-1}\text{dak}^{-1}$), E_a : aktivasyon enerjisi (J mol^{-1}), R: gaz sabitidir ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) ve T: mutlak sıcaklıktır ($^{\circ}\text{K}$).



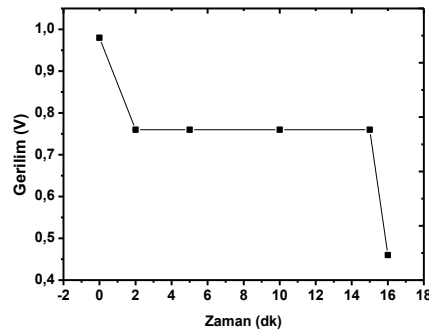
Şekil 8. $\ln(k)$ - $1/T$ değişim grafiği.

Bu nedenle, Arrhenius eğimi aktivasyon enerjisini hesaplamak için kullanılır. NaBH_4 hidrolizinin aktivasyon enerjisi, $1/T$ 'nin bir fonksiyonu olarak $\ln(k)$ ya göre elde edilmiştir. Lineer doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır.

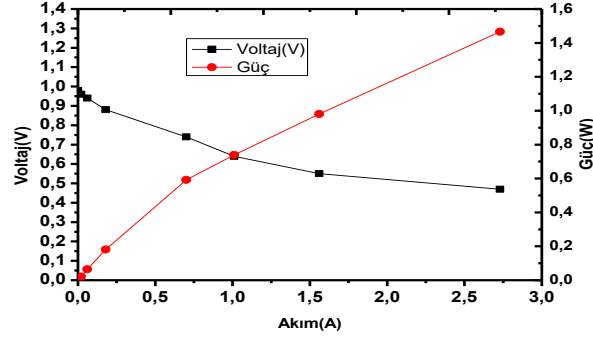
Şekil 8'de gösterilen Arrhenius grafiğinin eğimi kullanılarak Co-La-B katalizörünün aktivasyon enerjisi $40,3 \text{ kJmol}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Daha önceki çalışmalarda Co-B (68 kJmol^{-1}) [2], Co-Mo-B/nikel foam ($44,3 \text{ kJmol}^{-1}$) [15] için hesaplanan aktivasyon enerjileri ile karşılaştırıldığında sentezlemiş olduğumuz katalizörün yüksek aktiviteli olduğu açıkça görülmektedir.

3.3. Co-La-B katalizörünün PEM Yakıt Pili Uygulaması

PEM yakıt pili uygulamasında, Co-La-B katalizörü ile NaBH_4 hidrolizinden üretilen hidrojen kullanılmıştır. PEM yakıt pili hücre sıcaklığı $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de sabit tutularak, 10 mL çözelti içerisinde 25 mg Co-La-B katalizörü kullanılarak sabit bir yük üzerinden akım, gerilim ve güç üretim değerleri belirli zaman aralıklarında yapılan ölçümlerle gözlemlenmiştir. Elde edilen ölçümlerin grafiksel analizleri yapılmıştır. Co-La-B katalizörü yardımıyla üretilen hidrojen gazının PEM yakıt pili uygulamasında zamanla değişen gerilim grafiği Şekil 9'da gösterilmiştir. Katalizörün PEM yakıt pili performans değerlerini gösteren akım-gerilim-güç eğrileri de Şekil 10'da verilmiştir. Güce ve ideal voltaja göre ortalama verim değeri sırasıyla % 62 ve % 79 olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler, Sezgin [16] ve Ersoyoglu ve ark. [17] tarafından yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen verimlilik değerlerine yakın çıkmıştır.



Şekil 9. Gerilimin zamanla değişimi



Şekil 10. Gerilim-Akım-Güç eğrisi

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Co-La-B katalizörü kimyasal çöktürme ve indirgenme yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. La ilavesi, Co-B katalizörünün katalitik aktivitesini artırmıştır. Katalizörlerin katalitik aktiviteleri, farklı NaBH₄ konsantrasyonları, NaOH konsantrasyonları, katalizör miktarları ve reaksiyon sıcaklıkları için araştırılmıştır. Üretilen hidrojenin hacmi, ağırlıkça % 1'den % 7,5'e yükselen NaBH₄ konsantrasyonu ile birlikte giderek artmıştır. NaOH konsantrasyonu ağırlıkça %2,5'e arttırıldığında hidrojen üretim hızının maksimum değere ulaştığı ve daha sonra ise artan NaOH konsantrasyonuna bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Artan NaOH konsantrasyonu ile hidrojen üretim hızı azalırken artan katalizör miktarı ile hidrojen üretim hızının arttığı tespit edilmiştir. Artan sıcaklıkla beraber hidrojen üretim hızının özellikle 40 °C den itibaren çok ciddi şekilde arttığı belirlenmiştir. Bunun muhtemel nedeni, La katkı metalinin yüksek sıcaklıklarda yani 40°C den sonra aktifliğinin artması olabilir. Reaksiyon dinamikleri denkleminde lnk ve 1/T arasındaki ilişkiye dayanarak, Co-La-B katalizörü varlığında aktivasyon enerjisi değeri, 40,3 kJ mol⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Yerinde üretilen hidrojenin tek hücreli PEM yakıt pilinde kullanılması ile akım ve gerilim değerlerinden, maksimum 0,65 W'lık bir güç değeri hesaplanmıştır. PEM yakıt pili uygulamasında güce ve ideal voltaja göre ortalama verim değerleri sırasıyla %62 ve %79 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan, Co-La-B katalizörünün PEM yakıt pili uygulamaları için kullanılabilir olduğunu görülmektedir.

Yazarların Katkısı

Çalışmada tüm yazarlar eşit oranda katkı sunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Chen B., Chen S., Bandal H.A., Ntiamoah R.A., Jadhav A.R., Kim H. 2018. Cobalt nanoparticles supported on magnetic core-shell structured carbon as a highly efficient catalyst for hydrogen generation from NaBH₄ hydrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (19): 9296-9306.
- [2] Liu B.H., Li Z.P., Suda S. 2006. Nickel- and cobalt-based catalysts for hydrogen generation by hydrolysis of borohydride. *Journal of Alloys and Compounds*, 415 (1): 288-293.
- [3] Nikolaidis P., Poullikkas A. 2017. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67: 597-611.

- [4] Ouyang L., Liu J., Felderhoff M., Wang H., Zhu M. 2017. Enhancing the Regeneration Process of Consumed NaBH₄ for Hydrogen Storage. *Advanced Energy Materials*, 7 (19): 1700299.
- [5] Sen B., Kuyuldar E., Demirkiran B., Onal O.T., Şavk A. 2018. Highly efficient polymer supported monodisperse ruthenium-nickel nanocomposites for dehydrocoupling of dimethylamine borane. *Journal of Colloid and Interface Science*, 526: 480-486.
- [6] Koska A., Toshikj N., Hoett S., Bernaud L., Demirci U.B. 2017. Volcano Plot for Bimetallic Catalysts in Hydrogen Generation by Hydrolysis of Sodium Borohydride. *Journal of Chemical Education*, 94 (8): 1163-1166.
- [7] Izgi M.S., Şahin Ö., Baytar O., Saka C. 2019. Catalytic activity of cobalt-boron-fluoride particles with different solvent mediums on sodium borohydride hydrolysis for hydrogen generation. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-12.
- [8] Baytar O. 2018. Investigation of high-activity activated carbon-supported Co-Cr-B catalyst in the generation of hydrogen from hydrolysis of sodium borohydride. *Acta Chimica Slovenica*, 65 (2): 9.
- [9] Kılınç D., Şahin Ö. 2019. Effective TiO₂ supported Cu-Complex catalyst in NaBH₄ hydrolysis reaction to hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (34): 18858-18865.
- [10] Fernandes R., Patel N., Miotello A., Filippi M. 2009. Studies on catalytic behavior of Co-Ni-B in hydrogen production by hydrolysis of NaBH₄. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 298 (1): 1-6.
- [11] Patel N., Fernandes R., Miotello A. 2009. Hydrogen generation by hydrolysis of NaBH₄ with efficient Co-P-B catalyst: A kinetic study. *Journal of Power Sources*, 188: 411-420.
- [12] Fernandes R., Patel N., Miotello A. 2009. Hydrogen generation by hydrolysis of alkaline NaBH₄ solution with Cr-promoted Co-B amorphous catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, 92 (1): 68-74.
- [13] Ingersoll J.C., Mani N., Thenmozhiyal J.C., Muthaiah A. 2007. Catalytic hydrolysis of sodium borohydride by a novel nickel-cobalt-boride catalyst. *Journal of Power Sources*, 173 (1): 450-457.
- [14] Paskevicius M., Jepsen L.H., Schouwink P., Cerny R., Ravensback D.B., Filinchuk Y., Dornheim M., Besenbacher F., Jensen T.R. 2017. Metal borohydrides and derivatives – synthesis, structure and properties. *Chemical Society Reviews*, 46 (5): 1565-1634.
- [15] Dai H.-B., Gao L.L., Liang Y., Kang X.D., Wang P. 2010. Promoted hydrogen generation from ammonia borane aqueous solution using cobalt-molybdenum-boron/nickel foam catalyst. *Journal of Power Sources*, 195 (1): 307-312.
- [16] Sezgin B., Caglayan D.G., Devrim Y., Steenberg T., Eroglu I. 2016. Modeling and sensitivity analysis of high temperature PEM fuel cells by using Comsol Multiphysics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (23): 10001-10009.
- [17] Ersoyoglu A.S., Ata S., Dincer K., Önal G., Yılmaz Y. 2017. Modeling of the Effects of Cyclic Voltammetry (CV) Using Fuzzy Logic with Different Membership Functions for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM) with Polyvinyl Alcohol/Nano Silver (PVA/Ag). *Nano Hybrids and Composites*, 16: 67-72.