

Atf İçin: Avcı Hansu T, Özarslan S, 2022. Katalizör Olarak PtAu/CNT Nanokompozit Kullanılarak Sodyum Borhidrür ve Potasyum Borhidrürün Hidrolizinden Hidrojen Üretimi kalenin Türkçe Başlığı. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(3): 1657 - 1664.

To Cite: Avcı Hansu T, Özarslan S, 2022. Hydrogen Production from Hydrolysis of Sodium Borohydride and Potassium Borohydride Using PtAu/CNT Nanocomposite as Catalyst. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(3): 1657 - 1664.

Katalizör Olarak PtAu/CNT Nanokompozit Kullanılarak Sodyum Borhidrür ve Potasyum Borhidrürün Hidrolizinden Hidrojen Üretimi

Tülin AVCI HANSU^{1*}, Saliha ÖZARSLAN²

ÖZET: Yenilenebilir enerji tükenme tehlikesi ile karşı karşıya olan fosil kaynakların yerine kullanılabilir güçlü bir adaydır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji ve temiz enerji kaynağı olarak hidrojen dikkat çekmektedir. Bu çalışmada hidrojen deposu olan metal hidritlerden sodyum bor hidrür (NaBH_4) ve potasyum bor hidrürün (KBH_4) hidrolizi sonucu hidrojen üretimi incelendi. Hidroliz reaksiyonlarında kullanılacak olan monometalik ve bimetalik katalizörler sentezlendi. Sentezlenen bu katalizörlerin yüzey karakterizasyonu X-ışını kırınımı spektroskopisi (XRD) ve yüzey alanı analizi (BET) analizleri kullanılarak yapıldı. Yapılan hidroliz deneyleri sonucunda NaBH_4 ortamında %10 $\text{Pt}_{80}\text{Au}_{20}/\text{CNT}$ katalizörü KBH_4 ortamında %10 $\text{Pt}_{60}\text{Au}_{40}/\text{CNT}$ katalizörü monometalik %10 Pt/CNT katalizörüne göre daha iyi katalitik aktivite göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, sodyum borhidrür, potasyum borhidrür, katalizör

Hydrogen Production from Hydrolysis of Sodium Borohydride and Potassium Borohydride Using PtAu/CNT Nanocomposite as Catalyst

ABSTRACT: Renewable energy is a strong candidate that can be used instead of fossil resources that are in danger of extinction. In this context, hydrogen draws attention as a renewable energy and clean energy source. In this study, hydrogen production as a result of hydrolysis of sodium borohydride (NaBH_4) and potassium borohydride (KBH_4) from metal hydrides, which are hydrogen storage, was investigated. Monometallic and bimetallic catalysts to be used in hydrolysis reactions were synthesized. Surface characterization of these synthesized catalysts was performed using X-ray diffraction spectroscopy (XRD) and surface area analysis (BET) analyses. As a result of hydrolysis experiments, 10% $\text{Pt}_{80}\text{Au}_{20}/\text{CNT}$ catalyst in NaBH_4 environment showed better catalytic activity than 10% $\text{Pt}_{60}\text{Au}_{40}/\text{CNT}$ catalyst in KBH_4 environment compared to monometallic 10% Pt/CNT catalyst.

Keywords: Hydrogen, sodium borohydride, potassium borohydride, catalyst

¹ Tülin AVCI HANSU ([Orcid ID: 0000-0001-5441-4696](https://orcid.org/0000-0001-5441-4696)), Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

² Saliha ÖZARSLAN ([Orcid ID: 0000-0001-5696-9644](https://orcid.org/0000-0001-5696-9644)), Amasya Üniversitesi, Amasya Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Amasya, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tülin AVCI HANSU, e-mail: tulinn_avci@hotmail.com, tulinn.hansu@siirt.edu.tr

GİRİŞ

Ekonomik büyümeye paralel olarak ülkelerin enerji ihtiyacı artmaktadır. Sanayileşme yaşayan, gelişmekte olan çoğu ülke, artan endüstriyel enerji girdilerini ve elektrik üretimi talebini karşılamak için veya ulaşımda kullanılmak üzere petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil kaynaklı enerji ithalatına bağımlıdır (ATELGE, 2021). Geleneksel fosil yakıtların kullanımı, dışa bağımlılığın yanı sıra sera gazı emisyonlarının çevresel zararları ve öngörülemeyen, yüksek ve dalgalı enerji fiyatları gibi birçok dezavantaj barındırmaktadır. Bu sebeple fosil yakıtların yerine temiz ve sürdürülebilir yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı giderek daha popüler hale gelmektedir (Polat, 2021; Rahman & Velayutham, 2020). Araştırmacılar tükenmekte olan fosil kaynakların yerini alabilecek potansiyeli yüksek, temiz ve bol bulunabilen enerji kaynakları arayışı içindedir. Biyokütle, güneş enerjisi ve hidrojen, iyi bilinen yenilenebilir enerji türlerindedir. Bu yenilenebilir enerji türleri arasında hidrojen en yüksek kalorifik değere sahiptir ve dünyadaki en yaygın element olması nedeniyle hidrojen enerjisi, fosil yakıtların yerini alabilecek en umut verici enerji çözümü olarak kabul edilmektedir. Bu gibi nedenlerle yenilenebilir bir yakıt olan hidrojene olan ilgi son zamanlarda büyük ölçüde artmıştır. Çevre dostu bir yakıt olarak hidrojenin tercih edilmesi, birçok enerji kaynağından farklı yöntemlerle elde edilebilir olması, temiz yanma nitelikleri, yerli üretim potansiyeli ve yüksek verimlilik özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Kaya, 2019; Pareek et al., 2020). Ancak hidrojenin yakıt olarak kullanılmasının önünde büyük bir engel vardır: H₂ gazının depolanması. Hidrojeni depolamak için birçok yöntem önerilmiştir. En doğrudan yol, hidrojeni sıvı veya yüksek basınçlı gaz olarak depolamaktır (Jena, 2011). Ancak bu yaklaşımda, çok düşük kaynama sıcaklığına ve kritik sıcaklığa sahip olan H₂ gazının sıvılaştırılması veya basınçlandırılması için önemli miktarda enerji gerekir ve ayrıca aşırı düşük sıcaklık ve yüksek basınç nedeniyle birçok güvenlik endişesi oluşur (Cousins & Zhang, 2019). Alternatif olarak, kimyasal hidrürler yüksek atomik hidrojen yoğunlukları nedeniyle hidrojen depolanması için ideal bir aday olarak kabul edilmiştir. Diğer hidrojen depolama yöntemleriyle karşılaştırıldığında, kimyasal hidrürlerde depolama, yüksek hacimsel yoğunluğun yanı sıra, sıvı hidrojen depolamada olduğu gibi kriyojenik soğutmanın gerekli olmaması ve potansiyel sızıntıların olduğu yüksek basınçlı depolamadan daha güvenli olması gibi avantajlara sahiptir (Bannenberg et al., 2020). Sodyum bor hidrür (NaBH₄) ve potasyum bor hidrür (KBH₄) güvenli ve pratik hidrojen üretimi için kullanılan, hidrojen içeriği yüksek bor hidrür türlerindedir. NaBH₄ ve KBH₄ gibi bor hidrür bileşiklerinden hidrojen üretim oranlarını artırmak için bir katalizör kullanılması gerekir. Literatürde katalizör kullanılarak hidrojen üretimi ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Bunlara örnek verecek olursak F. Hansu Co-Cr-B katalizörü varlığında (F. Hansu, 2015), M. Kaya çalışmalarında kullanılmış kahve atığından ve mikroalge NiB yükleyerek katalizörler kullanarak hidrojen üretmiştir (Kaya, 2019, 2020). T. Hansu ve arkadaşları da Ru temelli katalizörler varlığında (Akdemir, Avci Hansu, Çağlar, Kaya, & Kivrak; Avci Hansu, Çağlar, Demir Kivrak, & Sahin; Avci Hansu, Sahin, Çağlar, & Demir Kivrak, 2021; T. A. Hansu, Sahin, Çağlar, & Kivrak, 2020) hidrojen üretimi çalışmaları yapmıştır. Katalizör kullanımı, hidroliz reaksiyonunda hidrojen üretiminin kontrol edilmesinde önemli bir rol oynar. Genel olarak, bazı metal türleri, bu tür hidroliz reaksiyonları için iyi bir katalitik performans sergiler (Balbay & Saka, 2018). Denklem 1-2'de NaBH₄ ve KBH₄ hidroliz reaksiyonları görülmektedir.



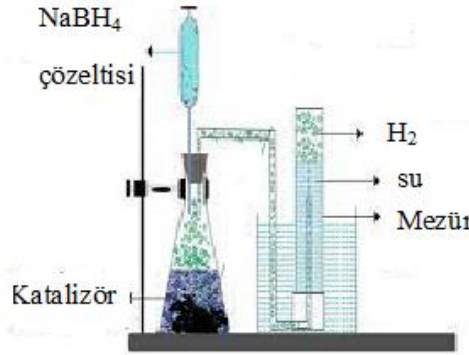
Bu çalışmada Pt ve Au metallerinin CNT destekli katalizörlerinin sodyum borhidrür hidrolizi incelenmiştir. Daha sonra Pt ve Au metalleri farklı atomik oranlarda CNT destekli sentezlenerek katalitik

aktiviteleri incelenmiştir. Hidroliz deneyleri sodyum borhidrür ve potasyum borhidrür çözeltilerine bimetalik katalizörler ilave edilerek yapılmıştır.

MATERYAL ve METOT

PtAu/CNT Nanokatalizörlerinin Sentezi

Tüm kimyasallar Sigma-Aldrich'ten satın alındı. Değişken Pt:Au atomik oranlarında ağırlıkça %10 PtAu/CNT katalizörleri NaBH₄ indirgeme yöntemi ile sentezlendi. Metal öncüleri olarak PtCl₂ ve AuCl₃ tuzları kullanılmış ve deiyonize su içinde dağıtılmıştır. Daha sonra bu karışıma 0.1 g CNT ve NaBH₄ eklenmiş ve 60 dakika karıştırılmıştır. Monometalik katalizörlerde aynı yöntemle sentezlendi. Elde edilen çökelti filtre kağıdı ile süzüldü. Daha sonra vakumlu etüvde 85 oC'de 12-13 saat kurutuldu. Sentezlenen katalizörler deneylerde kullanılmak üzere saklandı. Şekil 1'de hidrojen üretiminin şematik gösterimi verilmiştir. Deneyler bu sistem kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 1. Hidrojen Üretimi İçin Kullanılan Deney Sisteminin Şematik Gösterimi

Yüzey Karakterizasyonu

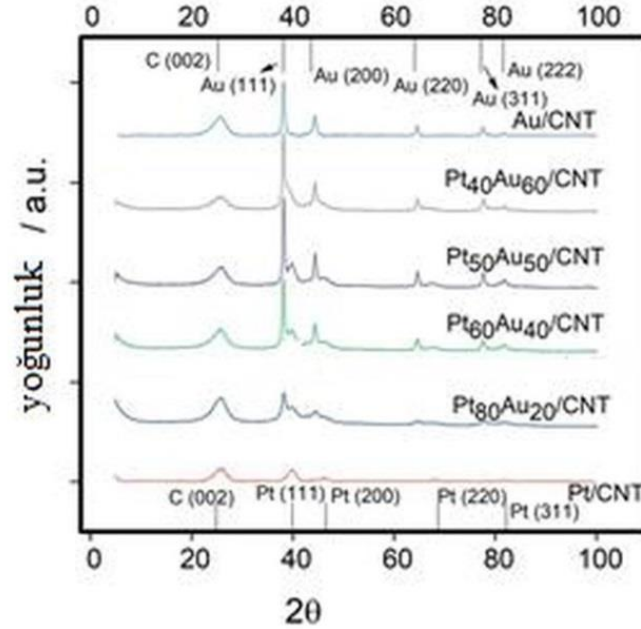
Sentezlenen katalizörler, yapısal özellikler hakkında bilgi elde etmek için XRD (Persee XD Serisi X-ışını difraktometresi, Cu Ka) kullanılarak karakterize edildi ve ortalama parçacık boyutlarını hesaplamak için Scherrer denklemi (El-Nagar, Mohammad, El-Deab, & El-Anadouli, 2017) kullanıldı. Hazırlanan katalizörlerin Brunauer-Emmett-Teller (BET) analizleri Micromeritics Tristar II 3020 kullanılarak yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Karakterizasyon Sonuçları

Şekil 1'de XRD desenleri Pt/CNT, Au/CNT ve PtAu/CNT'ye ait katalizörlerin kristallliğini göstermek için verilmiştir. Bütün katalizörlerin yaklaşık 26°deki kırınım tepe noktaları, desteklenen karbonun altıgen yapısının (0 0 2) düzlemi ile ilgilidir. Şekil 2'den görülebileceği gibi, 40.1°, 46.5°, 67.9° ve 81.8°deki piklerin özellikleri, sırasıyla yüz merkezi kübik (fcc) Pt'nin (111), (200), (220) ve (311) düzlemlerine atfedilmektedir. 38.2°, 44.3°, 64.6°, 77.7° ve 81.7°deki kırınım tepe noktaları Au (111),(200), (220), (311) ve (222) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Tüm fcc Pt ve Au pikleri, bimetalik katalizörlerden elde edilen XRD modellerinde gözlemlendi. Pt/CNT'nin XRD modelinden görülebileceği gibi, Pt (220) ve Pt (311) piklerinin yoğunlukları nispeten düşüktü ve bu pikler Au ilavesiyle hemen hemen kayboldu. Başka bir deyişle, bimetalik katalizörlerin XRD modeli, Au/CNT'ninkine benzerdir. Bu sonuç, Pt'nin Au (Liao et al., 2017) üzerine birikmesiyle açıklanabilir. Ayrıca (111) kırınım piklerinin iki ayrı Au ve Pt pikinden oluşması metallerin kısmi alaşımlandığını gösterir (Han et al., 2016). Artan Au oranı ile PtAu/CNT katalizörlerinin piklerinde

negatif kaymalar gözlemlendi. Bu durum, Pt ve Au'dan oluşan yeni bir fazın oluşumunu yani metaller arasında alaşım oluşumunu doğrular (Liu, Ding, Zhang, & Lei, 2012). Debye-Scherrer denklemi kullanılarak katalizörün partikül boyutu 10 ± 3 nm olarak bulunmuştur (Holzwarth & Gibson, 2011).



Şekil 2. Pt/CNT, Au/CNT ve PtAu/CNT'lerin XRD Desenleri

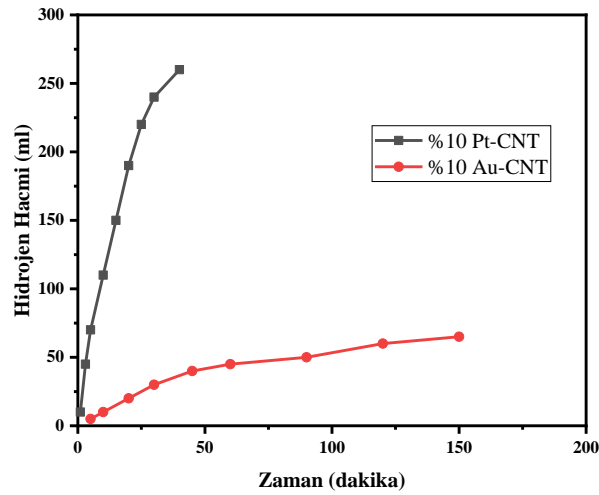
Ortalama gözenek çapları ve BET yüzey alanları monometalik ve bimetalik katalizörler Tablo 1'de verilmiştir. Hazırlanan katalizörlerin BJH yöntemi kullanılarak hesaplanan ortalama gözenek çapları 13 ile 29 nm arasında değişmiş ve bu sonuçlar katalizörlerin mezogözenekli yapısını desteklemiştir. Tablo 1'den, Au'nun Pt/CNT'ye eklenmesiyle BET yüzey alanının azaldığı görülebilir.

Tablo 1. Katalizörlerin BET yüzey alanları

Katalizör	BET yüzey alanı ($m^2 g^{-1}$)	Por Hacmi ($ml g^{-1}$)	Por Boyutu (nm)
Pt/CNT	265.2	1	14.1
Pt80Au20/CNT	256.4	0.93	13.4
Pt60Au40/CNT	206.6	1.1	22.3
Pt50Au50/CNT	197.4	1	26.6
Pt40Au60/CNT	166.0	0.83	28.7

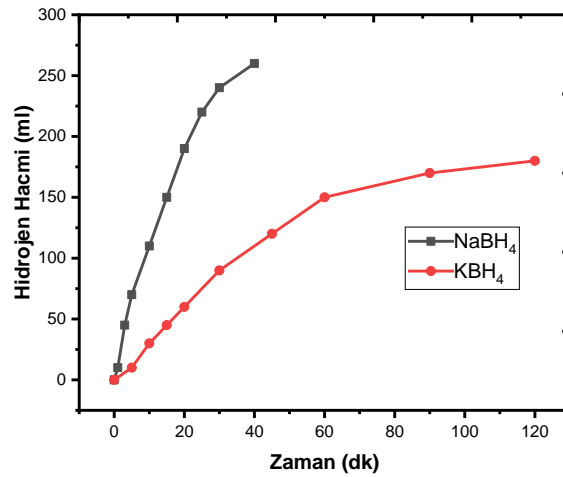
Hidroliz Deneyleri

%10 Pt/CNT ve %10 Au/CNT katalizörlerinin hidroliz reaksiyonundaki performansını incelemek için deneyler yapıldı. $30^\circ C$ 'de, %1 $NaBH_4$ çözeltisine 5 mg katalizör (%10 Pt/CNT ve %10 Au/CNT) ilave edilerek hidroliz deneyleri gerçekleştirildi. Üretilen hidrojen hacmine bağlı zaman grafiği şekil 2'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere %10 Pt/CNT katalizörü %10 Au/CNT katalizöründen daha iyi katalitik aktivite göstermiştir. Şekilde görüldüğü gibi %10 Pt/CNT katalizörü hidroliz reaksiyonu 40 dk gibi bir sürede tamamlarken %10 Au/CNT katalizörü hidroliz reaksiyonunu 150 dk gibi bir sürede tamamlayamamıştır. %10 Pt/CNT ve %10 Au/CNT katalizörlerinin ilk hızları sırası ile $27823.98 mlH_2/gkat.dk^{-1}$ ve $2115.072 mlH_2/gkat.dk^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Yapılan hidroliz deneyleri ve ilk hız hesaplamalarına bakılarak bimetalik katalizörler sentezlenmiştir. Birinci metal Pt ikinci metal olarak Au tercih edilmiş ve sentezlenen katalizörlerin KBH_4 , $NaBH_4$ hidroliz reaksiyonları incelenmiştir.



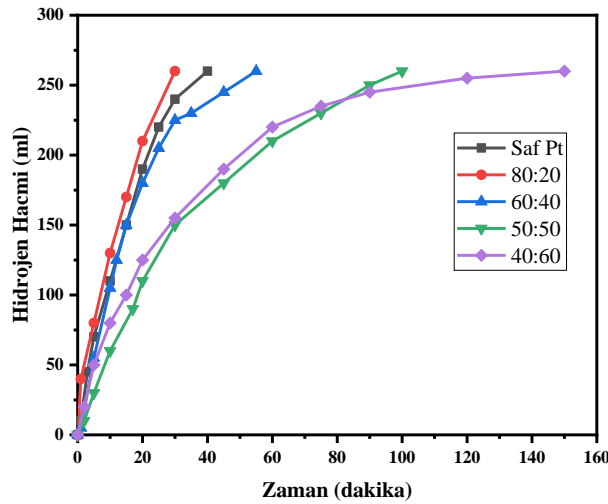
Şekil 3. Monometalik katalizörlerin NaBH₄ hidroliz Reaksiyonu (Reaksiyon koşulları; T=30 °C, %1 NaBH₄, 5 mg katalizör)

Şekil 4'te %10 Pt/CNT katalizörünün aynı koşullarda NaBH₄ ve KBH₄ hidroliz reaksiyonları sonucu hidrojen üretimine bağlı zaman grafiği verilmiştir. KBH₄ NaBH₄'e göre daha yavaş hidroliz olmaktadır.



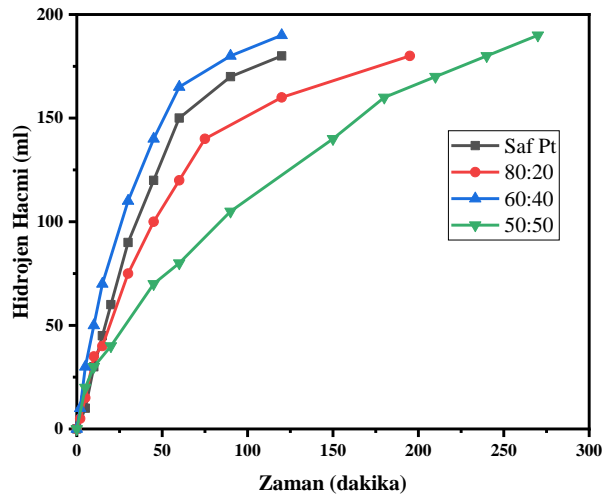
Şekil 4. %10 Pt/CNT Katalizörünün NaBH₄ ve KBH₄ hidroliz reaksiyonu (Reaksiyon koşulları; T=30 °C, %1 NaBH₄/KBH₄, 5 mg katalizör)

Farklı atomik oranlardaki %10 PtAu/CNT (80:20, 60:40, 50:50, 40:60) ve %10 Pt/CNT katalizörlerinin NaBH₄ hidroliz deneyleri yapıldı. 30 °C'de %1 NaBH₄ çözeltisi ortamına 5 mg katalizör ilave edilerek hidroliz deneyleri yapıldı. Üretilen hidrojen hacmine bağlı zaman grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere %10 Pt/CNT katalizörü hidroliz reaksiyonunu 40 dk'da tamamlarken %10 PtAu/CNT (80:20) katalizörü aynı koşullarda hidroliz reaksiyonunu 22 dk gibi bir sürede tamamlamaktadır. Buradan anlaşıldığı üzere Pt ve Au metalleri kendi aralarında alaşım oluşturduğu için katalitik aktivitesi artmaktadır. Bu davranış literatürdeki çalışmalarla doğrulanmıştır (Avcı Hansu et al., 2021; T. A. Hansu et al., 2020). Ayrıca alaşım oluşturduğu XRD desenlerinde de görülmüştür.



Şekil 5. Monometalik ve bimetalik katalizörlerin hidroliz reaksiyonu (Reaksiyon koşulları; T=30 °C, %1 NaBH₄, 5 mg katalizör)

Farklı atomik oranlardaki %10 PtAu/CNT (80:20, 60:40, 50:50) ve %10 Pt/CNT katalizörlerinin KBH₄ hidroliz deneyleri yapıldı. 30 °C'de %KBH₄ çözeltisi ortamına 5 mg katalizör ilave edilerek hidroliz deneyleri yapıldı. Üretilen hidrojen hacmine bağlı zaman grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere %10 Pt/CNT ve %10 PtAu/CNT (60:40) katalizörleri reaksiyonu hemen hemen aynı sürede tamamlamaktadır. Fakat grafiğe bakıldığında Pt₆₀Au₄₀/CNT katalizörü reaksiyonun başladığı ilk zamanlarda daha hızlı reaksiyonu tamamlama eğilimindedir. Ayrıca KBH₄ tamamen hidroliz olduğunda 180 ml hidrojen hacmi beklenmektedir. Şekil 6'ya bakıldığında Pt₆₀Au₄₀/CNT katalizörü 190 ml kadar hidrojen hacmi üretmiştir. Bu KBH₄ tartımı yapılırken hatadan kaynaklanmaktadır. 180 ml hidrojen hacmine 90 dk da ulaşmıştır. %10 Pt/CNT ve %10 Pt₆₀Au₄₀/CNT katalizörlerinin KBH₄ hidrolizi için ilk hızları sırasıyla 2198.824 ve 4696.114 mlH₂gkat.dk⁻¹ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. Monometalik ve bimetalik katalizörlerin hidroliz reaksiyonu (Reaksiyon koşulları; T=30 °C, %1 KBH₄, 5 mg katalizör)

SONUÇ

Bu çalışmada monometalik ve bimetalik katalizörlerin KBH₄ ve NaBH₄ hidroliz performansı incelenmiştir. KBH₄, NaBH₄'e göre daha yavaş hidroliz olmaktadır. Bundan dolayı potasyum borhidrürün hidrolizi ile ilgili az sayıda çalışma mevcuttur. Yapılan deneylerden de bunu göstermiş olduk. Aynı koşullarda monometalik katalizör NaBH₄'te daha hızlı hidroliz olmuştur. %10 Pt/CNT ve

% 10 Pt₆₀Au₄₀/CNT katalizörlerinin KBH₄ hidrolizi için ilk hızları sırasıyla 2198.824 ve 4696.114 mlH₂gkat.dk⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Bimetalik katalizörün ilk hızı monometalik katalizöre göre 2 kat artmıştır. Monometalik katalizöre ikinci metal eklenerek oluşan bimetalik katalizör daha iyi katalitik aktivite göstermiştir. Bunun temel nedeni metaller arasında alaşım fazı oluşmasıdır. Ayrıca ikinci metal kullanılarak katalizör daha kararlı hale gelmiştir. Bu çalışma; elde ettiği sonuçlar doğrultusunda başka çalışmalara da öncülük etmektedir. Çünkü ikinci metalin katalitik aktiviteyi arttırdığı deney ve karakterizasyonlarla ispat edilmiştir. Buradan yola çıkarak üçüncü metal eklenerek trimetalik katalizörler sentezlenebilir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Akdemir, M., Avcı Hansu, T., Çağlar, A., Kaya, M., & Kivrak, H. (2021) Ruthenium Modified Defatted Spent Coffee Catalysts For Supercapacitor And Hydrolysis Application. *Energy Storage*, 3(4), e243.
- ATELGE, R. (2021) Kısmi Yük Koşullarında Dizel-Biyogaz Kullanılarak Çift Yakıtlı Dizel Motorun Enerji ve Ekserji Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(27), 334-346.
- ATELGE, R. (2021). Türkiye'de Sığır Gübresinden Biyoyakıt Olarak Biyogaz Üretiminin Potansiyeli ve 2030 ve 2053 Yıllarında Karbon Emisyonlarının Azaltılmasına Öngörülen Etkisi. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 5(1), 56-64.
- Avcı Hansu, T., Çağlar, A., Demir Kivrak, H., & Sahin, O. Structure of ruthenium nanocatalysts of bismuth, investigation of its effect on hydrolysis performance and kinetic studies. *Energy Storage*, e267.
- Avcı Hansu, T., Sahin, O., Çağlar, A., & Demir Kivrak, H. (2021). Untangling the cobalt promotion role for ruthenium in sodium borohydride dehydrogenation with multiwalled carbon nanotube-supported binary ruthenium cobalt catalyst. *International Journal of Energy Research*, 45(4), 6054-6066.
- Balbay, A., & Saka, C. (2018). Semi-methanolysis reaction of potassium borohydride with phosphoric acid for effective hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(46), 21299-21306.
- Bannenber, L., Heere, M., Benzidi, H., Montero, J., Dematteis, E., Suwarno, S., . . . Wegner, W. (2020). Metal (boro-) hydrides for high energy density storage and relevant emerging technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Cousins, K., & Zhang, R. (2019). Highly Porous Organic Polymers for Hydrogen Fuel Storage. *Polymers*, 11(4), 690.
- El-Nagar, G. A., Mohammad, A. M., El-Deab, M. S., & El-Anadouli, B. E. (2017). Propitious dendritic Cu₂O–Pt nanostructured anodes for direct formic acid fuel cells. *ACS applied materials & interfaces*, 9(23), 19766-19772.
- Han, Y., Ouyang, Y., Xie, Z., Chen, J., Chang, F., & Yu, G. (2016). Controlled growth of Pt–Au alloy nanowires and their performance for formic acid electrooxidation. *Journal of Materials Science & Technology*, 32(7), 639-645.

- 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.
- Hansu, T. A., Sahin, O., Caglar, A., & Kivrak, H. (2020). A remarkable Mo doped Ru catalyst for hydrogen generation from sodium borohydride: the effect of Mo addition and estimation of kinetic parameters. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 131(2), 661-676.
- Holzwarth, U., & Gibson, N. (2011). The Scherrer equation versus the 'Debye-Scherrer equation'. *Nature nanotechnology*, 6(9), 534-534.
- Jena, P. (2011). Materials for hydrogen storage: past, present, and future. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2(3), 206-211.
- Kaya, M. (2019). NiB loaded acetic acid treated microalgae strain (*Spirulina Platensis*) to use as a catalyst for hydrogen generation from sodium borohydride methanolysis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(20), 2549-2560.
- Kaya, M. (2020). Evaluating organic waste sources (spent coffee ground) as metal-free catalyst for hydrogen generation by the methanolysis of sodium borohydride. *International journal of hydrogen energy*, 45(23), 12743-12754.
- Liao, M., Li, W., Xi, X., Luo, C., Gui, S., Jiang, C., . . . Chen, B. H. (2017). Highly active Au@Pt cluster catalyst for formic acid electrooxidation. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 791, 124-130.
- Liu, Y., Ding, Y., Zhang, Y., & Lei, Y. (2012). Pt–Au nanocorals, Pt nanofibers and Au microparticles prepared by electrospinning and calcination for nonenzymatic glucose sensing in neutral and alkaline environment. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 171, 954-961.
- Pareek, A., Dom, R., Gupta, J., Chandran, J., Adep, V., & Borse, P. H. (2020). Insights into renewable hydrogen energy: Recent advances and prospects. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 319-327.
- Polat, B. (2021). The impact of renewable and nonrenewable energy consumption on economic growth: a dynamic panel data approach. *Asia-Pacific Journal of Accounting & Economics*, 28(5), 592-603.
- Rahman, M. M., & Velayutham, E. (2020). Renewable and non-renewable energy consumption-economic growth nexus: new evidence from South Asia. *Renewable Energy*, 147, 399-408.