

Geliş Tarihi : 03/06/2026
Kabul Tarihi : 24/06/2026

Received Date : 03/06/2026
Accepted Date : 24/06/2026

BİYOKÜTLE TÜREVİ *PROSOPIS FARCTA* KATALİZÖRÜ KULLANILARAK ETİL ALKOL/PROPİLEN GLİKOL ÇÖZÜCÜ SİSTEMİNDE NaBH_4 'DEN HİDROJEN ÜRETİMİ

HYDROGEN PRODUCTION FROM NaBH_4 IN AN ETHANOL/PROPYLENE GLYCOL SOLVENT SYSTEM USING A BIOMASS-DERIVED PROSOPİUM CATALYST

Tülin AVCI HANSU^{1*} (ORCID: 0000-0001-5441-4696)
Abdulgani GÖZ² (ORCID: 0000-0001-7081-9482)
Ekrem ÇELEPKOLU³ (ORCID: 0009-0008-9420-1482)

¹Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

²Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Siirt, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Tülin AVCI HANSU

Öz

Artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtların sınırlı olması ve çevresel kaygılar, alternatif enerji kaynaklarına yönelimi hızlandırmıştır. Bu bağlamda hidrojen, yüksek enerji yoğunluğu ve çevre dostu özellikleri ile öne çıkan bir enerji taşıyıcısıdır. Bu çalışmada, hidrojen üretimi için sodyum borhidrür (NaBH_4) kullanılmış ve reaksiyonun verimini artırmak amacıyla biyokütle temelli bir katalizör geliştirilmiştir. Katalizör sentezinde, Siirt kırsalında yetişen *Prosopis farcta* bitkisinin meyvesi biyokütle kaynağı olarak kullanılmıştır. Biyokütle, %30 KOH ile kimyasal olarak aktive edilmiş, 75 °C'de 24 saat bekletildikten sonra 400 °C'de 45 dakika karbonize edilmiştir. Elde edilen katalizör yıkanarak kullanıma hazır hale getirilmiştir. Hidrojeni üretmek için çözücü ortamı olarak etil alkol ve propilen glikol çözücü karışımları kullanılmıştır. Hidrojen üretim verimini etkileyen NaBH_4 miktarı, katalizör miktarı ve sıcaklık parametreleri incelenmiştir. Yapılan deneyler ve hesaplamalarda aktivasyon enerjisi 20.209 kJ/mol ve ilk hızı 8126,3 mL H_2 /gcat/dk olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Prosopis Farcta, Sodyum borhidrür, Katalizör, Hidrojen enerjisi.

Abstract

The growing demand for energy, the limited supply of fossil fuels, and environmental concerns have accelerated the shift toward alternative energy sources. In this context, hydrogen stands out as an energy carrier due to its high energy density and environmentally friendly properties. In this study, sodium borohydride (NaBH_4) was used for hydrogen production, and a biomass-based catalyst was developed to enhance the reaction's efficiency. In the catalyst synthesis, the fruit of the *Prosopis farcta* plant, which grows in the rural areas of Siirt, was used as the biomass source. The biomass was chemically activated with 30% KOH, left to stand at 75 °C for 24 hours, and then carbonized at 400 °C for 45 minutes. The resulting catalyst was washed and prepared for use. A mixture of ethyl alcohol and propylene glycol solvents was used as the solvent medium for hydrogen production. The effects of NaBH_4 concentration, catalyst amount, and temperature on hydrogen production efficiency were investigated. In the experiments and calculations, the activation energy was determined to be 20,209 kJ/mol and the initial rate was calculated to be 8,126.3 mL H_2 /gcat/min.

Keywords: Prosopis Farcta, Sodium Borohydride, Catalyst, Hydrogen Energy.

GİRİŞ

Biyokütle ve organik katı atıkların alternatif enerji kaynakları olarak kullanımı, gelecekteki önemli potansiyelleri göz önüne alındığında büyük ilgi gören bir konudur. Bu kaynakların kullanımı, temiz ve karbondioksit içermeyen bir enerji sisteminin kurulmasına katkıda bulunma potansiyeline sahiptir (Aziz ve ark., 2021). Biyokütle ve organik katı atıkların ikincil bir enerji kaynağına etkili bir şekilde dönüştürülmesi arzu edilen bir hedeftir. Biyokütle ve yan ürünleri, en umut verici yenilenebilir enerji kaynakları arasında kabul edilmektedir. Biyokütle, tüm canlı organizmalardan elde edilen organik maddeleri kapsar ve iki ana gruba ayrılır: lignoselülozik biyokütle ve lignoselülozik olmayan biyokütle (Burhenne ve ark., 2013; Sharma ve ark., 2020). Orman kaynaklı odunsu biyokütlenin yanı sıra tarımsal ve endüstriyel atık malzemelerin ana bileşenleri, selüloz, hemiselüloz, lignin, çeşitli ekstraktif maddeler ve kül gibi çeşitli elementlerden oluşur. Buna karşılık, ikincil kaynaklar olan mikro ve makro algler, lignin ve selülüzün yanı sıra yüksek düzeyde protein, lipit, sakarit ve çeşitli inorganik bileşenler içerir (Sharma ve ark., 2020; Li & Jiang, 2017). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında, biyokütle ve türevleri, yüksek karbon içeriği nedeniyle yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve depolanması nispeten kolaydır. Ayrıca, hidrojen (H_2), gelecekteki enerji sistemlerinde umut vaat eden bir ikincil enerji kaynağı ve verimli bir enerji taşıyıcısı olarak ortaya çıkmıştır (Aziz ve ark., 2021; Lai ve ark., 2021). Sodyum bor hidrit ($NaBH_4$) kullanılarak hidrojen üretimi için potansiyel bir kaynak olarak biyokütlenin değerlendirilmesi, sürdürülebilir enerji üretimi açısından önemli bir araştırma alanıdır. $NaBH_4$, yüksek hidrojen içeriği (yaklaşık %10,8) ve kontrollü hidroliz reaksiyonu nedeniyle hidrojen depolama ve üretimi için cazip bir bileşiktir (Lai ve ark., 2021). Bu çalışmada, bir tür orman atığı olan Prosopis farcta bitkisinin meyvesi biyokütle kaynağı olarak kullanılmıştır. Prosopis farcta, 30 ila 100 santimetre boyunda büyüyen çok yıllık bir çalıdır. Fabaceae (eski adıyla Papilionaceae) familyasına aittir. Bu tür, kuzeyde Rusya'dan doğu Hindistan ve Cezayir'e kadar uzanan geniş bir coğrafi dağılım sergilemektedir. Meyveleri koyu kahverengi pigmentasyona, oval şekle, kavisli bir kontura ve deriye benzer bir dokuya sahiptir (Miri ve ark., 2020). Bu çalışmanın konusu olan Prosopis farcta, Türkiye'nin Siirt ilinden toplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, biyokütle atıklarının yalnızca çevresel açıdan değil, aynı zamanda enerji uygulamalarında da yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle Prosopis farcta gibi doğal ve kolay erişilebilir bir biyokütle kaynağının katalizör üretiminde değerlendirilmesi, sürdürülebilir enerji teknolojileri açısından önemli bir yaklaşım sunmaktadır (Hansu, 2021). Literatürde, sodyum borohidürden (SB) hidrojen üretimi için genellikle hidroliz, etanoliz veya metanoliz reaksiyonları tercih edilmiştir (Hansu, 2023; Akdemir ve ark., 2021). Ancak, SB etanoliz reaksiyonunun çok yavaş olduğu ve etanolün metanolden daha yüksek bir yoğunluğa sahip olduğu; bunun da sistemin gravimetrik hidrojen yoğunluğunu azalttığı bildirilmiştir (Arzac & Fernández, 2015). Bu nedenlerle, çalışmamızda sodyum borohidürden hidrojen üretimi, etanol-propilen glikol çözelti karışımları sistemlerinde gerçekleştirilmiştir. Literatürde bu konu hakkında yeterli araştırma bulunmaması nedeniyle, bu çalışma bu alanda yeni ufuklar açmaktadır.

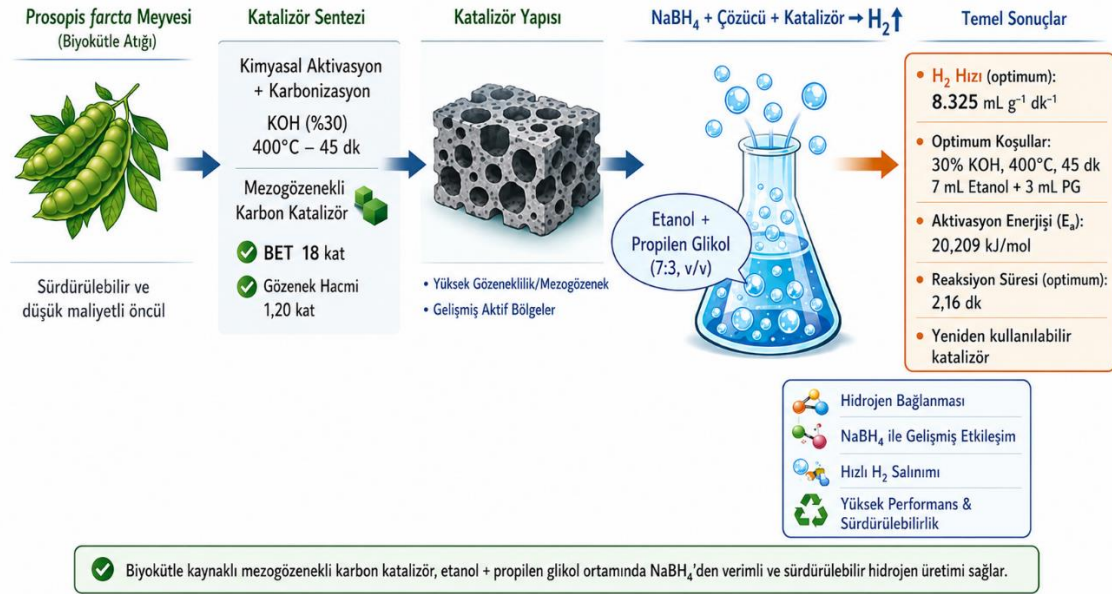
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Katalizörün Hazırlanması

Prosopis farcta meyveleri saflaştırma amacıyla dikkatlice yıkanmış, kontrollü koşullarda kurutulmuş ve ardından parçacık boyutunun azaltılması amacıyla öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Ön aktivasyon süreci sırasında, Prosopis farcta meyvesi farklı kimyasal aktivasyon işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda örnekler, kütlece %30 oranında KOH, %30 $ZnCl_2$ ve %30 CH_3COOH içeren çözeltiler ile muamele edilmiş, ardından 75 °C'ye ayarlanmış etüvde 24 saat süreyle kurutma işlemine tabi bırakılmıştır. Daha sonra numuneler, azot gazı atmosferi içinde 300°C'de 45 dakika süreyle karbonizasyona tabi tutuldu. Elde edilen katalizörler saflaştırma amacıyla dikkatlice yıkanmış, süzme işlemi uygulanarak fazla çözücü uzaklaştırılmış ve ardından ileri deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere uygun koşullarda muhafaza edilmiştir.

2.2. Hidrojen Üretimi Deneylerinin Yapılması

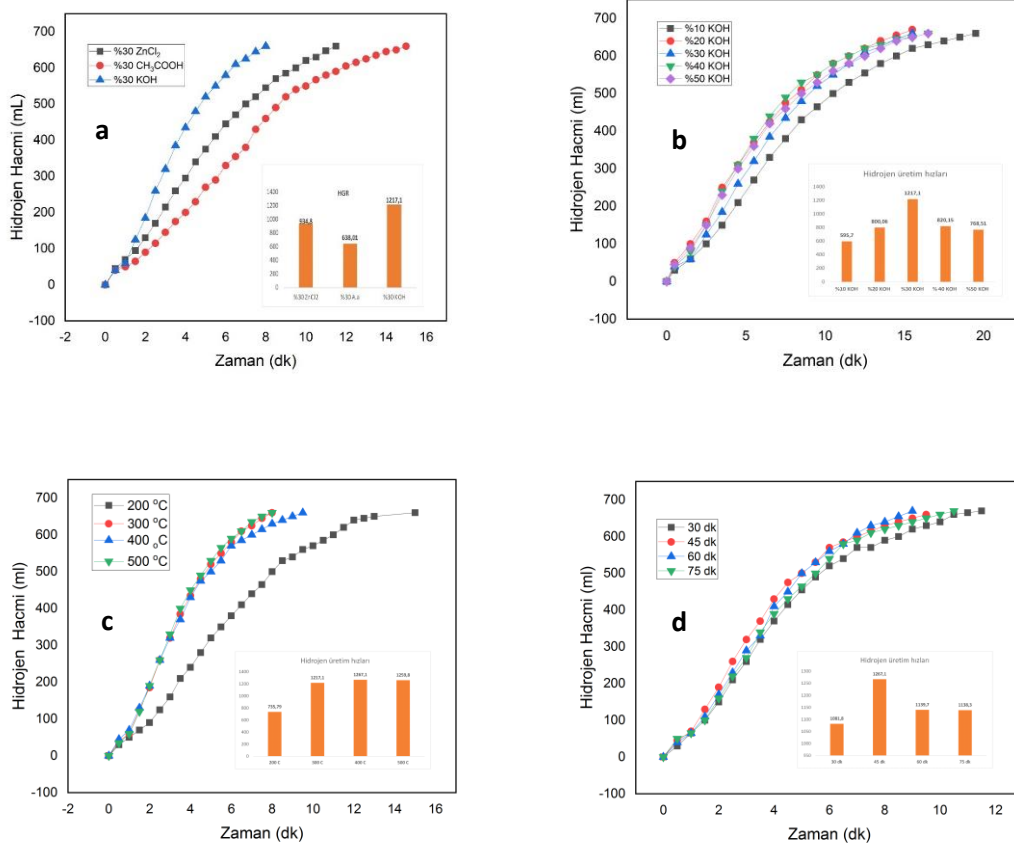
En etkili katalizörün aktivitesi, su yer değiştirme düzeneği aracılığıyla hidrojen oluşumu ölçülerek değerlendirildi (Şekil 1). Reaksiyon sırasında oluşan hidrojen miktarı sürekli olarak toplandı ve biriken hacim, katalitik performansı değerlendirmek üzere zamanın bir fonksiyonu olarak grafiğe aktarıldı. Şekil 1 hem katalizör üretimini hem de hidrojen üretiminin şematik gösterimi olarak verilmiştir.



Şekil 1. Katalizör sentezinin ve hidrojen üretiminin şematik gösterimi

3. Bulgular

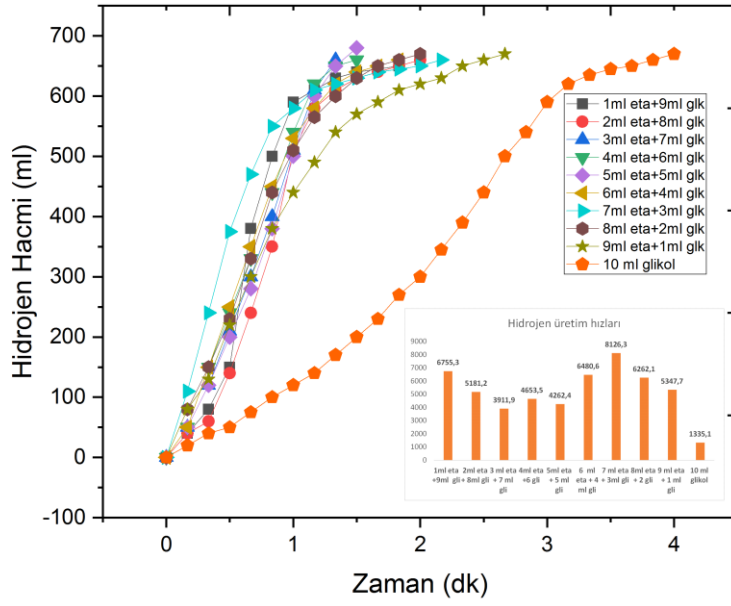
Prosopis Farcta meyvesinin katalizöre dönüştürülmesi sırasında, katalitik aktivitesi en yüksek katalizörlerin belirlenebilmesi amacıyla farklı kimyasal ajan oranları, karbonizasyon sıcaklıkları ve karbonizasyon süreleri sistematik olarak değerlendirilmiştir. (Şekil 2 (a-d)). Sodyum borhidrür'ün metanoliz reaksiyonu ile hidrojen üretiminde, farklı kimyasal ajanlarla ön aktivasyon uygulanarak sentezlenen katalizörler kullanılmıştır. Hidrojen üretim deneyleri; 30 °C sıcaklıkta, 10 mL metanol, 0.25 g NaBH₄ ve 0.1 g katalizör varlığında gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon süresince oluşan hidrojen hacmi zamana bağlı olarak takip edilmiş ve elde edilen hidrojen hacmi–zaman grafikleri Şekil 2a'da sunulmuştur. Şekil 2a'da verilen grafikte görüldüğü üzere KOH kimyasalı ile işlem görmüş olan katalizör reaksiyonu en kısa sürede tamamlamıştır. Elde edilen deneyler sonucuna göre ilk hız hesaplaması yapılmıştır. Bu sonuçlar da Şekil 2'de grafik içinde verilmiştir. KOH, ZnCl₂ ve CH₃COOH kimyasalları ile muamele edilmiş katalizörlerin ilk hızları sırasıyla 1217.1, 934.8 ve 638.08 mLH₂ g_{cat}⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre en iyi katalitik aktiviteyi KOH ajanı ile ön aktivasyona tabi tutulan katalizör göstermiştir. Kimyasal ajan oranının katalitik aktivite üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla, Prosopis farcta meyvesi kütlece farklı oranlarda (%10, %20, %30, %40 ve %50) KOH ile karıştırılarak aktive edilmiştir. Elde edilen katalizörlerin hidrojen üretim performansları değerlendirilmiş, reaksiyon süresince oluşan hidrojen hacimleri zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Deneyler sonucunda çizilen grafik Şekil 2b'de verilmiş ve grafikten görüldüğü gibi %30 KOH ile muamele edilen katalizör reaksiyonu en kısa sürede tamamlamıştır. Bu katalizörlere ait ilk hızlar hesaplanarak Şekil 2b'deki grafik içerisinde sunulmuştur. Farklı kimyasal aktivasyon oranları (%10–50) için hesaplanan hidrojen üretim hızları sırasıyla 595.7, 800.06, 1271.1, 820.25 ve 768.53 mL H₂ g_{kat}⁻¹ olarak belirlenmiştir. Katalizör sentezinde karbonizasyon sıcaklığının katalitik aktivite ve hidrojen üretim performansı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları Şekil 2c'de sunulmuştur. Ayrıca, reaksiyonlara ait başlangıç hızlarının hesaplanmasıyla elde edilen grafikler de aynı şekil içerisinde gösterilmiştir. Farklı karbonizasyon sıcaklıkları için (200-500 °C) hidrojen üretimine ait ilk hızları sırasıyla 735.79, 1271.1, 1267.3 ve 1259.8 mLH₂ g_{cat}⁻¹ olarak belirlenmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ve yapılan hesaplamalarda en iyi katalitik aktivite 400 °C'de karbonizasyon işlemine tabi tutulan katalizör olarak belirlenmiştir. Katalizör üretiminde karbonizasyon süresinin katalitik aktivite ve hidrojen üretim performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları Şekil 2d'de sunulmuştur. Reaksiyonlara ait başlangıç hızlarının hesaplanmasıyla elde edilen grafikler de aynı şekilde verilmiştir. Elde edilen bulgular ve yapılan hesaplamalar doğrultusunda, en yüksek katalitik aktivitenin 400 °C'de 45 dakika süreyle karbonizasyona tabi tutulan katalizör tarafından sergilendiği belirlenmiştir. Elde edilen *Prosopis Farcta* katalizörü PFK olarak adlandırılmıştır.



Şekil 2. Farklı kimyasal ve ajan oranları, karbonizasyon sıcaklıkları ve karbonizasyon sürelerine ait zamana bağlı hacim grafiği

Farklı Çözücü Ortamlarının Hidrojen Üretimine Etkisi

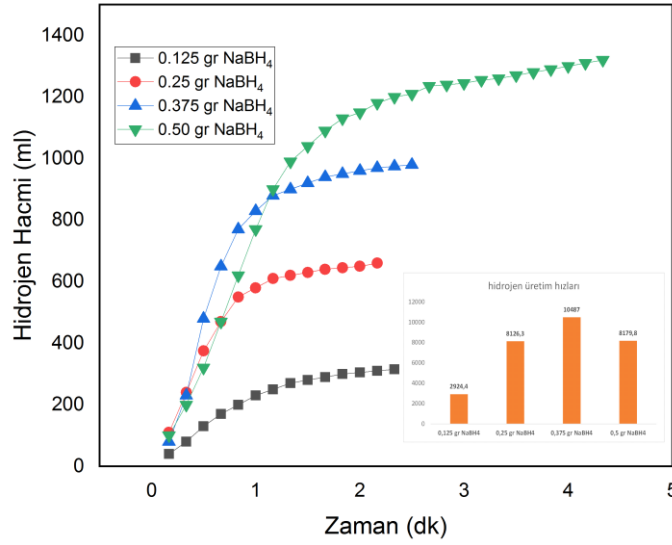
Farklı oranlarda etanol ve propilen glikol karışımından oluşturulan toplam 10 mL çözücü ortamında gerçekleştirilen hidrojen üretim deneylerine ait sonuçlar Şekil 3'te sunulmuştur. Deneyler, 30 °C sıcaklıkta, 0.1 g katalizör ve 0.25 g Sodium borohydride varlığında yürütülmüş; zamana bağlı hidrojen üretim grafikleri ile reaksiyonların başlangıç hızları aynı şekil içerisinde verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, PFK katalizörü en yüksek katalitik aktiviteyi 7 mL etanol + 3 mL propilen glikol karışımından oluşan çözücü ortamında göstermiştir. Saf propilen glikol ortamında başlangıç hidrojen üretim hızı 1335.1 mL H₂ g_{kat}⁻¹ olarak hesaplanırken, 7 mL etanol + 3 mL propilen glikol içeren çözücü sisteminde bu değer 8126.3 mL H₂ g_{kat}⁻¹ dk⁻¹ ulaşmıştır. Ayrıca reaksiyonun saf propilen glikol ortamında 3.83 dakikada tamamlandığı, çözücü karışımı kullanılan sistemde ise reaksiyon süresinin 2.16 dakikaya düştüğü belirlenmiştir. Bu sonuçlar, etanol-propilen glikol karışımının kullanılmasıyla başlangıç hızının saf propilen glikol ortamına kıyasla yaklaşık 6 kat arttığını göstermektedir.



Şekil 3. Farklı oranlardaki Et+PG çözücü ortamındaki hidrojen üretimi

Hidrojen Üretimine NaBH₄ Miktarının Etkisi

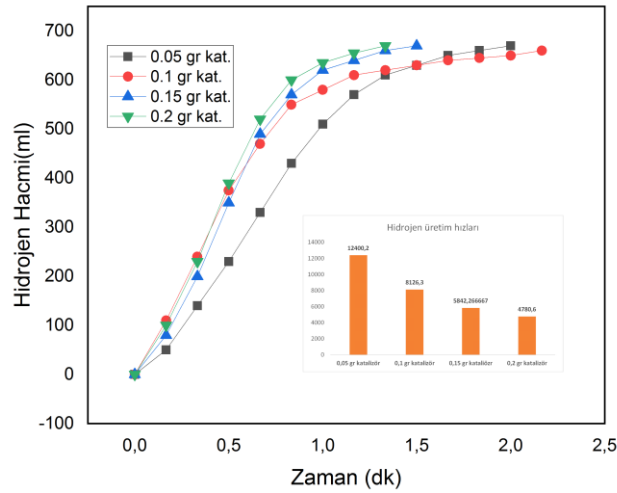
Hidrojen üretim hızına etki eden NaBH₄ derişimi, katalizör miktarı ve sıcaklık gibi parametreler optimum çözücü ortamına karar verildikten sonra incelenmiştir. %30 KOH kimyasal ajanı ile ön aktivasyon yapılmış olan *Prosopis Farcta* meyvesi-katalizörünün (PFK) farklı NaBH₄ konsantrasyonları (0.125, 0.25, 0.375 ve 0.5 gr NaBH₄) ile hidrojen üretimi verimine etkisi, Şekil 4'de gösterildiği gibi incelenmiştir. Hidrojen üretimi deneyleri 30 °C'de 7 ml etanol + 3 ml propilen gliserol, farklı miktarlarda NaBH₄ ve 0.1 gr katalizör ortamında gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon ortamındaki NaBH₄ miktarının artırılması hidrojen üretimi miktarını olumlu yönde etkilerken reaksiyon süresinin artmasına neden olmuştur. Hidrojen üretimi ilk hızları Şekil 4 içerisinde verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi reaksiyonu en kısa sürede yaklaşık 1 dakika ile 0,125 g NaBH₄ ve 0,25 g NaBH₄ kullanılan deney tamamlamıştır. 0,5 gr NaBH₄ kullanılan deneyde reaksiyon 2 dakikada tamamlanmıştır. Farklı konsantrasyonlar için reaksiyon hızları sırasıyla 6600, 11325, 6159,4 ve 8996,4 mLH₂ g_{cat} dk⁻¹ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. NaBH₄ miktarının hidrojen üretimine etkisi,

Hidrojen Üretimine Katalizör Miktarının Etkisi

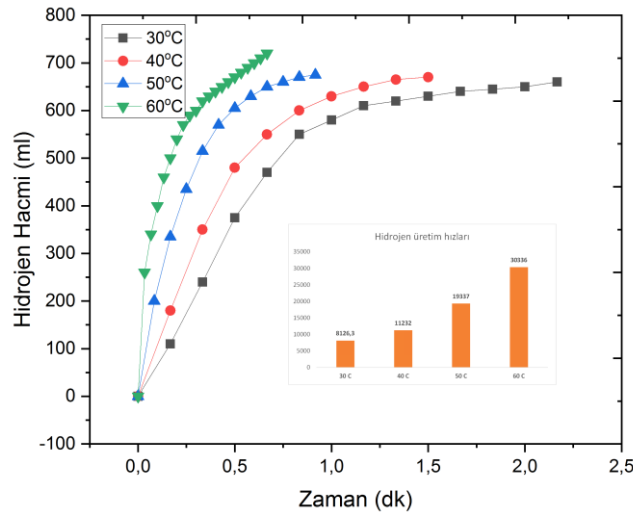
SB'den hidrojen üretimi verimi, kullanılan katalizörün miktarına ve yapısına bağlıdır. Bu nedenle hidrojen üretimi verimi üzerine farklı katalizör miktarlarının (0,05, 0,1, 0,15, 0,2 g) etkisi araştırılmıştır. Deneyler 30 °C'de 7 ml etanol + 3 ml propilen glikol, farklı miktarlarda katalizör ve 0.25 gr NaBH₄ varlığında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'de katalizör miktarı değişikliğine bağlı olarak hidrojen üretim verimleri ve reaksiyon süreleri gösterilmektedir. Katalizör miktarı arttıkça reaksiyonu tamamlama süreleri de azalmaktadır. Katalizör miktarının yükselmesi, reaktan moleküllerinin katalitik yüzey ile temas olasılığını artırarak reaksiyon hızını yükseltmektedir. Bunun sonucunda, reaksiyon için gerekli aktivasyon enerjisi daha etkin bir şekilde aşılakta ve daha kısa sürede yüksek dönüşüm değerlerine ulaşmaktadır. Farklı miktarlardaki katalizörlerin ilk hızlarına ait grafikte Şekil 5 içerisinde verilmiştir. Katalizör miktarının artırılmasına rağmen başlangıç hızının azalması; sistemde meydana gelen kütle transferi sınırlamaları, aktif yüzeylerin aglomerasyonu ve reaktan-aktif merkez etkileşimindeki değişimlerle açıklanabilmektedir. Özellikle 0.05 g katalizör miktarında katalitik yüzeylerin reaksiyon ortamına daha homojen dağıldığı ve aktif merkezlerin reaktantlarla daha etkin temas ettiği düşünülmektedir. Bu durum, reaksiyonun başlangıç aşamasında daha yüksek hidrojen üretim hızının elde edilmesine katkı sağlamıştır. Buna karşılık, katalizör miktarının 0.2 g'a çıkarılmasıyla birlikte ortamda bulunan katı partikül yoğunluğu artmış ve katalizör parçacıkları arasında aglomerasyon meydana gelmiş olabilir. Bu aglomerasyon, aktif yüzey alanının etkin kullanımını azaltarak bazı aktif bölgelerin erişilebilirliğini sınırlandırmaktadır. Ayrıca yüksek katalizör miktarı, çözücü ortamın viskozitesinin etkisiyle birlikte difüzyon direncini artırabilmekte ve NaBH₄ moleküllerinin aktif merkezlere taşınmasını zorlaştırabilmektedir. Etanol ve propilen glikol gibi organik çözücülerin bulunduğu sistemlerde bu durum daha belirgin hâle gelmekte, reaktantların katalizör yüzeyine ulaşma hızı düşmektedir.



Şekil 5. Katalizör miktarının hidrojen üretimine etkisi

Hidrojen Üretimine Sıcaklığın Etkisi

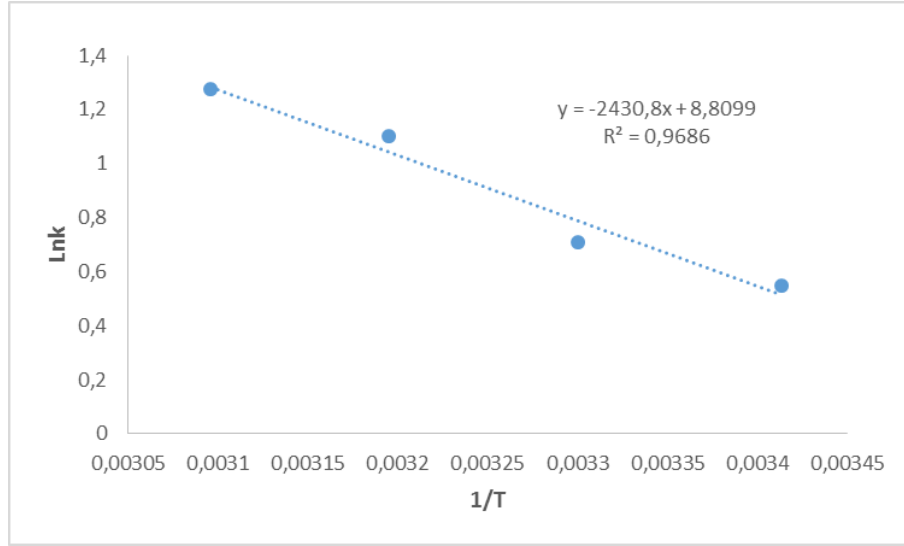
Sıcaklık deneyleri, %30 KOH ile muamele edilmiş 0,1 g *Prosopis Farcta* meyvesi katalizörü (PFK), 0,25 NaBH₄ ve 7 ml etanol + 3 ml propilen glikol çözeltisi kullanılarak farklı sıcaklıklarda (30, 40, 50, 60 °C) yapılmıştır. Yapılan deneylerin zamana bağlı hidrojen üretim grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere 30 °C'de reaksiyon 6,3 dakikada tamamlanırken 60 °C'de 2,6 dakikada tamamlanmaktadır. Bunun temel sebebi sıcaklık arttıkça moleküllerin çarpışma hızı ve enerjilerinin artmasıdır. Şekil 'de sıcaklık azaldıkça reaksiyon süresinin arttığı görülmektedir. Buna paralel olarak hidrojen verimi de azalmaktadır. Dolayısıyla reaksiyon sıcaklığının artması hidrojen üretimi verimine ve reaksiyon süresine pozitif etki göstermektedir.



Şekil 6. Sıcaklığın hidrojen üretimine etkisi

Denklem 1'de verilen Arrhenius denklemi, PFK tarafından katalize edilen sodyum borhidrür etanol + propilen glikol aktivasyon enerjisini belirlemek için uygulanmıştır. Etanoliz+ propilen glikoliz reaksiyonu için lnk'ye karşı 1/T

grafığı doğrusaldır (Şekil 7). Aktivasyon enerjisi, düz çizginin eğiminden hesaplanmış ve 20,209 kJ/mol olarak belirlenmiştir. Reaksiyon derecesi n deneme yanılma yöntemiyle 0,9 olarak bulunmuştur.



Şekil 7. 1/T'ye karşı Lnk grafiği

4. Tartışma

Bu çalışmada, biyokütle olan Prosopis farcta meyvesinden düşük maliyetli ve çevre dostu bir karbon bazlı katalizör sentezlenmiş ve sodyum borhidrürden (NaBH₄) hidrojen üretiminde etkili bir şekilde kullanılmıştır. Ön aktivasyon aşamasında kullanılan kimyasal çözücülerin katalitik performans üzerinde bariz etkileri olduğu belirlenmiştir. KOH ile aktive edilen katalizörün ZnCl₂ ve CH₃COOH ile aktive edilen katalizörlere göre daha yüksek hidrojen üretim hızına sahip olduğu görülmüştür. Bunun muhtemel sebebi, KOH'un karbon yapısında daha gelişmiş gözeneklilik oluşturması ve aktif yüzey alanını artırmasıyla açıklanabilir. Özellikle %30 KOH oranında hazırlanan katalizörün en yüksek aktiviteyi göstermesi, optimum kimyasal aktivasyon seviyesinin aşılması durumunda gözenek yapısının bozulabileceğini ve aktif bölgelerin azalabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde karbonizasyon sıcaklığının ve süresinin de katalitik performans üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. 400 °C'de ve 45 dakika süreyle karbonize edilen katalizörün en yüksek aktiviteyi göstermesi, bu koşullarda karbon yapısının hem yeterli gözenek gelişimine hem de uygun yüzey kimyasına sahip olduğunu göstermektedir. Çalışmanın en dikkat çekici bulgularından biri, hidrojen üretiminde kullanılan çözücü sisteminin reaksiyon performansı üzerindeki etkisidir. Literatürde çoğunlukla metanoliz ve hidroliz reaksiyonları tercih edilirken, bu çalışmada etanol–propilen glikol karışımının kullanılmasıyla oldukça yüksek hidrojen üretim hızlarına ulaşılmıştır. Özellikle 7 mL etanol + 3 mL propilen glikol karışımında elde edilen 8126.3 mL H₂ gkat⁻¹ dk⁻¹ başlangıç hızı, saf propilen glikol ortamına göre yaklaşık altı kat daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, etanolün düşük viskoziteye sahip olması nedeniyle kütle transferini kolaylaştırması ve propilen glikolün NaBH₄ stabilitesi üzerindeki olumlu etkisi ile açıklanabilir. Böylece iki çözücünün sinerjik etkisi sayesinde hem reaksiyon süresi kısalmış hem de hidrojen üretim verimi önemli ölçüde artmıştır. Bu sonuç, literatürde sınırlı sayıda çalışılan etanol–propilen glikol sistemlerinin hidrojen üretimi açısından önemli bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak bu çalışma, Prosopis farcta biyokütlesinden sentezlenen karbon bazlı katalizörün NaBH₄'den hidrojen üretiminde etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Özellikle etanol–propilen glikol çözücü sisteminin kullanılmasıyla yüksek hidrojen üretim hızlarına ulaşılması, çalışmanın literatüre önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, biyokütle temelli katalizörlerin sürdürülebilir hidrojen üretimi teknolojilerinde düşük maliyetli ve çevre dostu alternatifler olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

5. Sonuç

Bu çalışmada, *Prosopis farcta* meyvesi kullanılarak KOH ile kimyasal aktivasyon ve ardından karbonizasyon işlemiyle yüksek gözenekli karbon bazlı bir katalizör sentezlenmiş ve bu katalizör sodyum borhidrür (NaBH_4) çözeltisinden hidrojen üretimi amacıyla kullanılmıştır. Literatürden farklı olarak bu çalışmada etanol+ propilen glikol karışımı kullanılarak SB'den hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir. Hidrojen üretim verimini etkileyen SB miktarı, katalizör miktarı ve sıcaklık gibi parametreler incelenmiştir. Yapılan deneyler ve hesaplamalarda etanol + propilen glikol ortamında optimum koşullarda hidrojen üretimi ilk hızı $8325 \text{ mLH}_2 \text{ g}_{\text{cat}} \text{ dk}^{-1}$ ve aktivasyon enerjisi $20,209 \text{ kJ/mol}$ olarak bulunmuştur.

6. Sonuç ve Literatürle Karşılaştırma

Literatürde farklı çözücü ortamlarında NaBH_4 'den hidrojen üretimi reaksiyonları gerçekleştirilmiştir. Literatürde Tablo 1'de literatürdeki organik ve metal bazlı katalizör varlığında NaBH_4 'den hidrojen üretimi ile ilgili ilk hız ve aktivasyon enerjilerine ait tablo verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere bu çalışma kapsamında sentezlenen katalizörün metal bazlı katalizörlerden bile daha aktif olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Literatür karşılaştırması

Katalizör	Hidrojen Üretim Hızı	Ea (kJ/mol)	Çözücü ortamı	Referans
Cr ₂ O ₃ /CaCO ₃	12750	23.37	Metanol	(Alshammari ve ark., 2024)
Cr modifiye Co-B	3400	37	Su	(Fernandes ve ark., 2009)
Atık seramik fritler	10027	22.88	Metanol	(Rüzgar ve ark., 2024)
Kitosan-zeolit-H	10428	50	Etilen Glikol	(Saka, 2023)
Chit-Mont-H	40396	27.53	Metanol/propilen glikol	(Saka, 2024a)
P ile katkılanmış kitosan-alümina	25964	30.62	Metanol/etilen glikol	(Saka, 2024b)
Prosopis Farcta (PFK)	8126.3	20.209	Etanol/propilen glikol	Bu çalışma

7. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar umut verici olmakla birlikte çeşitli geliştirme alanları bulunmaktadır. Gelecek çalışmalarda katalizörün modifiye edilerek daha aktif hale getirilmesi önerilmektedir.

Yapay Zeka Katkı Beyanı

Bu makale tamamen herhangi bir yapay zeka aracının yardımı olmadan yazılmış, düzenlenmiş, analiz edilmiş ve hazırlanmıştır. Metin, veri analizi ve şekiller dahil tüm içeriğin yalnızca yazarlar tarafından oluşturulduğunu beyan ederim.

KAYNAKÇA

Akdemir, M., Avcı Hansu, T., Caglar, A., Kaya, M., & Demir Kivrak, H. (2021). Ruthenium modified defatted spent coffee catalysts for supercapacitor and methanolysis application. *Energy Storage*, 3(4), e243.

- Alshammari, M., Alshammari, K., Alhassan, S., Alshammari, A. H., Alotaibi, T., Alotibi, S., ... & Taha, T. A. M. (2024). A high-performance Cr₂O₃/CaCO₃ nanocomposite catalyst for rapid hydrogen generation from NaBH₄. *Nanomaterials*, 14(4), 333.
- Arzac, G. M., & Fernández, A. (2015). Hydrogen production through sodium borohydride ethanolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(15), 5326-5332.
- Aziz, M., Darmawan, A., & Juangsa, F. B. (2021). Hydrogen production from biomasses and wastes: A technological review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(68), 33756-33781.
- Burhenne, L., Messmer, J., Aicher, T., & Laborie, M. P. (2013). The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 101, 177-184.
- 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(1-2), 68-74.
- Hansu, T. A. (2021). Study of the activity of a novel green catalyst used in the production of hydrogen from methanolysis of sodium borohydride. *MANAS Journal of Engineering*, 9(2), 115-121.
- Hansu, T. A. (2023). Exergy and energy analysis of hydrogen production by the degradation of sodium borohydride in the presence of novel Ru based catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(18), 6778-6787.
- Lai, J. L., Luo, W. J., Kuan, Y. D., & Zhang, P. J. (2021). The effect of hydrogen production rate of the via different preparation of Co-based catalyst with sodium borohydride. *Catalysts*, 11(5), 528.
- Li, D. C., & Jiang, H. (2017). The thermochemical conversion of non-lignocellulosic biomass to form biochar: a review on characterizations and mechanism elucidation. *Bioresource technology*, 246, 57-68.
- Miri, A., Khatami, M., Ebrahimi, O., & Sarani, M. (2020). Cytotoxic and antifungal studies of biosynthesized zinc oxide nanoparticles using extract of *Prosopis farcta* fruit. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 13(1), 27-33.
- Rüzgar, D., Yıldız, D., Kaya, Ş., verdu Martinez, J., Yeşilbursa, G., & Kıvrak, H. D. (2024). Waste ceramic frit as novel catalyst triggering sodium borohydride methanolysis reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 56, 1038-1048.
- Saka, C. (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.
- Saka, C. (2024a). Fabrication of protonated chitosan/montmorillonite catalyst for hydrogen production via sodium borohydride in the optimum methanol/propylene glycol mixture. *International Journal of Hydrogen Energy*, 65, 410-420.
- Saka, C. (2024b). Rapid and robust hydrogen generation from sodium borohydride in optimum mixture of methanol and ethylene glycol using phosphorus-doped chitosan polymer matrix dispersed on alumina nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*, 401, 124654.
- Sharma, S., Basu, S., Shetti, N. P., & Aminabhavi, T. M. (2020). Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy. *Science of the Total Environment*, 713, 136633.