

Reaktör Türlerinin ve Parametrelerinin Steam Reforming Prosesiyle Etanolden Hidrojen Üretimine Etkisinin Aspen Plus ile İncelenmesi

Mesut BEKİROĞULLARI^{*1}, Mustafa KAYA¹

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

Geliş tarihi: 26.03.2019

Kabul tarihi: 20.12.2019

Öz

Bu çalışmada etanolden hidrojen üretim prosesi Aspen Plus yardımıyla geliştirilmiştir. Geliştirilen simülasyon kullanılarak öncelikle üç farklı reaktör türünün etanol dönüşüm oranlarına etkisi incelenmiş olup RGibss reaktörünün REquilibrium ve RPlug reaktörlerin oranla en iyi dönüşüm oranına sahip olduğu belirlenmiştir. İki farklı aktivite katsayısı modeli olan UNIFAC ve UNIQUAC modelleri test edilmiş olup en iyi dönüşüm oranının UNIQUAC modelinde olduğu tespit edilmiştir. En iyi reaktör ve aktivite katsayısı modeli belirlendikten sonra, sıcaklık, basınç ve karışım oranı gibi reaktör çalışma parametrelerinin etanol dönüşüm oranına olan etkileri sırasıyla çalışılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde sıcaklık, basınç ve karışım oranı sırasıyla 500 °C, 1 atm ve 1/4 olarak belirlenmiştir. Son olarak üretilen hidrojen gazının saflaştırılıp kullanılabilir hale gelmesi için bir ayırıştırıcı kullanılmış olup %99,9 saflıkta saf H₂ elde edilmiştir. Elde edilen veriler Aspen Plus simülatörünün başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermekte olup bu tür başarılı simülasyonların deneysel maliyetleri ve zaman kaybını minimize edebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Aspen plus, Etanol, Hidrojen enerjisi, Steam reforming, Reactör şartları

Effect of Reactor Types and Operating Parameters for the Hydrogen Production through Steam Reforming Process of Ethanol

Abstract

In the present study, hydrogen production process from ethanol was developed with the aid of Aspen Plus. Firstly, the effect of reactor types on ethanol conversion rates was investigated by simulating three different reactors in Aspen Plus and it was determined that the RGibss reactor provided the best conversion rate compare to REquilibrium and RPlug. Two different activity coefficient models, UNIFAC and UNIQUAC, have been tested and the best conversion rate has attained with the use UNIQUAC model. Once the optimal best reactor type and activity coefficient model were decided, the effects of reactor operating parameters such as temperature, pressure and mixing ratio on ethanol conversion rate were studied respectively. Temperature, pressure and mixing ratio for the optimal conversion rate of ethanol were determined as 500 °C, 1 atm and 1/4 respectively. Finally, a separator was used to purify the hydrogen gas and pure H₂ with a purity of 99.9% was subsequently produced. The obtained data indicate that Aspen Plus simulator has been performed successfully and shows that such successful simulations can minimize experimental costs and time loss.

Keywords: Aspen plus, Ethanol, Hydrogen energy, Steam reforming, Reactor conditions

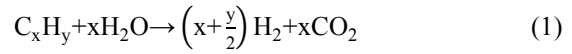
*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mesut BEKİROĞULLARI, mesutbekirogullari@siirt.edu.tr

1. GİRİŞ

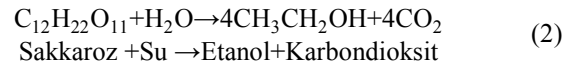
Artan küreselleşme ve sanayileşmeye paralel olarak enerji ihtiyacı da hızla artmaktadır. Günümüzde enerji ihtiyacının büyük bir kısmı petrol ve kömür gibi fosil yakıtlar (yenilemeyen) ile karşılanmaktadır. Fosil yakıtların hızla tükenmeye başlaması ve üretiminin ve kullanımın sebep olmuş olduğu küresel ısınma sorunlarından dolayı yenilebilir ve sürdürülebilir çevre dostu enerji kaynaklarına olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle ve hidrojen enerjisi yenilebilir enerji kaynaklarının başlıcalarındandır. Doğada en yaygın olarak bulunan element olan hidrojen doğada bileşikler halinde bulunmaktadır. Hidrojen genellikle suda, biyokütlerde ve hidrokarbonların yapısında yer alır. Hidrojen enerjisi bu bileşiklerin fiziksel ve kimyasal işlemlerle işlenmesi sonucu elde edilen enerji kaynağıdır. Hidrojen enerjisi doğal bir enerji kaynağı olmamakla beraber, çevre dostu, sürdürülebilir ve yenilebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Tüm bu avantajlarının yanı sıra hidrojen enerjisi düşük emisyon değerine, verimlilik, düşük maliyet ve yüksek kalorifik enerji içeriği sayesinde geleceğin en önemli enerji kaynakları arasında yer almaktadır [1-3].

Hidrojen enerjisi doğal gaz, nafta, ağır yağlar, metanol, biyokütle, atıklar, kömür ve rüzgar enerjisi gibi birçok kaynaktan elde edilmektedir [3]. Hidrojen enerjisinde kimyasal enerji H-H bağları içerisinde depolanır ve oksijen ile yakıldığı zaman yanma ürünü olarak yalnızca su açığa çıkar ve buda hidrojen enerjisinin temiz bir enerji kaynağı olarak kabul görmesini sağlamaktadır [3]. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda enerji kaynakları ve çevre ile ilgili sorunlara çözüm bulmak amacıyla hidrojen enerjisine dayalı bir enerji altyapısının çözüm olabileceği düşünülmektedir. Önümüzde ki yıllarda sanayide (örneğin amonyak yapımı) ve enerji alanında (örneğin yakıt hücreleri) kullanılmak üzere hidrojene olan talebin hızla artması beklenmektedir. Bundan dolayı yakın gelecekte hidrojen enerjisi elde edilmesi için var olan bio-yakıt kaynaklarının kullanılması öncelikli olacaktır [4].

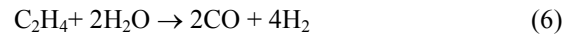
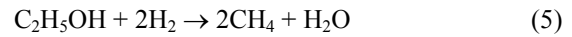
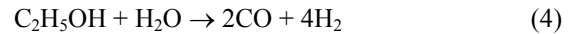
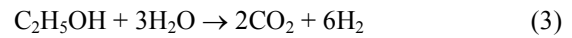
Günümüzde hidrojen gazı elde etmek için steam reforming, autothermal reforming ve partial oxidation prosesleri gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [5]. Belirtilen bu üç yöntem arasında steam reforming prosesi düşük sıcaklıkta çalışabilmesi ve oksijen ihtiyacı olmaması gibi önemli avantajlarından dolayı endüstriyel düzeyde en çok gelişmiş ve en yaygın kullanılan yöntemdir [6]. Steam reforming prosesinde hidrokarbonlardan hidrojen gazı eldesine ait reaksiyon stokiyo metrisi Eşitlik 1'deki gibidir [2];



Fosil yakıtlar sebep oldukları çevresel sorunlar ve bilinen fosil yakıt yataklarının hızla tükenmeye başlamasıyla hidrojen enerjisi elde edilmesinde kullanılmasında çok fazla tercih edilmemektedirler. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojen enerjisi elde edilmesinde kullanılması oldukça önem kazanmaktadır. Tüm bunlar dikkate alındığında fermantasyon prosesiyle oldukça yüksek miktarda üretilebilen etanol önemli bir kaynak haline gelmektedir (Eşitlik 2);



Hidrojen enerjisi elde etmek için kullanılacak en önemli hammadde kaynağı olan etanolün steam reforming prosesindeki reaksiyon gerçekleşme aşamaları şu şekildedir (Eşitlik 3-8);



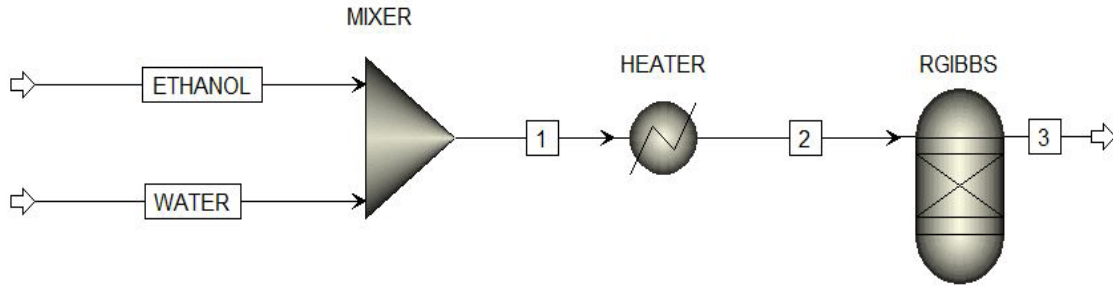
Steam reforming prosesi ile etanolden hidrojen gazı elde edilmesine ait genel reaksiyon akışı yukarıda verilmiştir [7,8]. Gerçekleşmesi beklenen diğer yan reaksiyonların daha detaylı bir listesi Wu ve arkadaşları [3] ve Murmura, ve arkadaşları [9] tarafından verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında gelecekte sanayi çaplı üretimine geçilmesine beklenen steam reforming prosesiyle etanolden hidrojen üretimine reaktör türünün ve parametrelerinin hidrojen üretimine etkisinin Aspen Plus ile incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan simülasyon programı içerisinde barındırdığı veri bankası sayesinde deneysel çalışma gerçekleştirilmeden önce üretime etki eden sıcaklık ve basınç gibi parametrelerin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca Aspen Plus simülatorü ekonomik analiz yapılmasına da imkan vermektedir. Bu çalışmada öncelikle steam reforming prosesinde kullanılması beklenen reaktör türleri etanol dönüşüm oranları göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Daha sonrasında belirlenen reaktör kullanılarak proseste kullanılacak olan en verimli termodinamik model (UNIFAC, UNIQUAC) belirlenmiştir. Son

olarak, reaktör sıcaklığı, basıncı ve karışım oranı incelenerek en optimal sistem belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Aspen Plus simülatorü kullanılarak steam reforming prosesine ait proses akış şeması Şekil 1'de verildiği gibi oluşturulmuştur. Proses akış diyagramında da açıkça görüldüğü gibi proseste iki tane hammadde girişi (etanol ve su) vardır. Hammaddelerin giriş sıcaklık ve basınçları sırasıyla 25 °C ve 1 atm'dir. Her iki hammaddenin başlangıç akış hızları sırasıyla 10 kmol/s ve 30 kmol/s olarak belirlenmiştir. Bu iki hammadde bir karıştırıcı (mixer) kullanılarak karıştırılıp reaktör sıcaklığına getirilmek üzere bir ısıtıcıya (heater) gönderilmiştir. Isıtılan karışım daha sonra reaksiyonun gerçekleşeceği reaktöre gönderilmiştir. Öncelikli olarak farklı reaktör türlerinin ve kullanılan termodinamik modellerin (fluid package) etanol dönüşüm oranına olan etkileri incelenmiştir. Sıcaklığın ve basıncın dönüşüm oranına ve hidrojen üretim oranına olan etkilerini incelemek için sıcaklık 25-500 °C ve basınç ise 0,01-10 atm arasında değiştirilmiştir.



Şekil 1. Steam reforming prosesiyle etanolden hidrojen üretim prosesi

3. SONUÇ TARTIŞMA

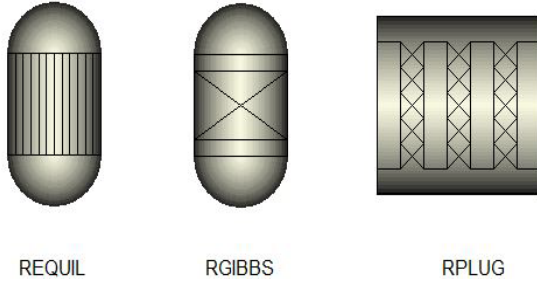
3.1. Reaktör Türünün Belirlenmesi

Farklı reaktör türlerinin etanol dönüşüm oranına ve hidrojen üretim oranına etkilerini incelemek için Aspen Plus simülatoründe yer alan RGibbs, REquilibrium ve RPlug reaktörleri sırasıyla simüle edilmiştir ve reaktörler aynı şartlar altında

karşılaştırılmıştır. Kullanılan üç reaktöre ait Aspen Plus görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir.

Reaktörlerin çalışma prensipleri değerlendirildiğinde, RGibbs reaktörü termodinamik denge halinde ürün konsantrasyonunu belirlemek için Gibbs serbest enerjisini en aza indirirken, REquilibrium reaktörü reaksiyona ait stokiyometriyi ve reaksiyonlar arasındaki kimyasal dengiyi kullanarak ürünlere

ait konsantrasyonu ve aralarındaki faz dengesini belirler. Öte yandan, RPlug reaktörü, reaktör boyu ve yarıçapına bağlı olarak gerçekleşecek reaksiyona ait kinetik parametreleri değerlendirerek oluşacak olan ürünleri konsantrasyonlarına dair detaylı bilgi verir.



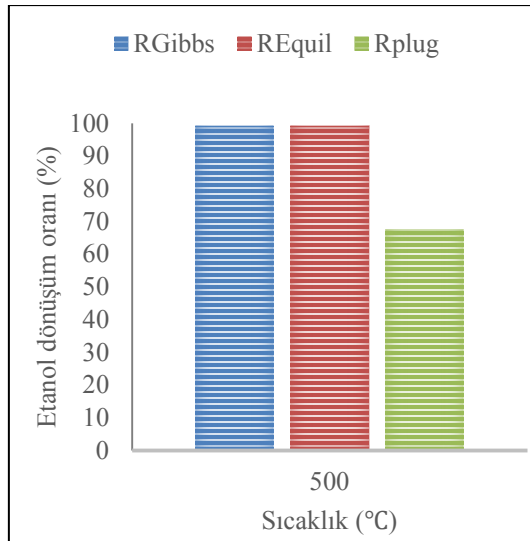
Şekil 2: Analiz edilen reaktör türleri

Reaktör türlerinin başarılı bir şekilde karşılaştırılabilmesi için bu aşamada sıcaklık 500 °C ve basınç ise 1 atm olarak belirlenmiştir. Etanol ve su arasındaki steam reforming prosesine ait reaksiyonun stokiyometrisi (etanol/su) 1/3'tür. Bu nedenle su ve etanol akış hızları sırasıyla 30 ve 10 kmol/s olarak belirlenmiştir. Burada RPlug reaktörü için yükseklik 1m ve yarıçap 0,1 m olarak alınmıştır. Ayrıca RPlug reaktörünün simüle

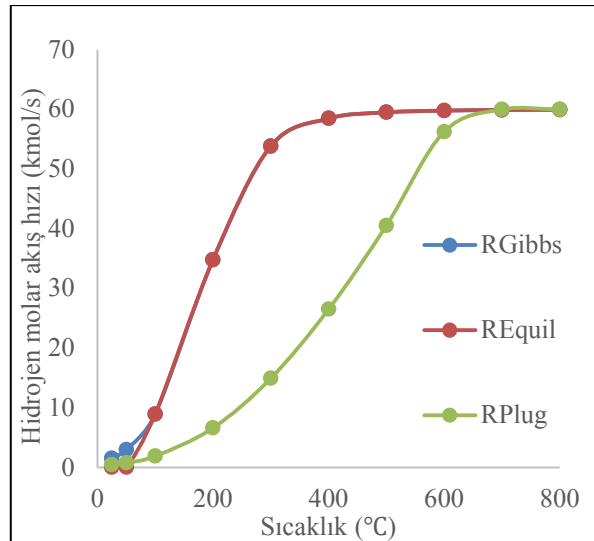
edilebilmesi için gerçekleşecek reaksiyonun kinetik parametreleri şu şekilde alınmıştır: $k=0,088$, $E=18,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ ve $T_0=300 \text{ } ^\circ\text{C}$ [10].

Termodinamik model olarak ise burada UNIQUAC kullanılmıştır. Reaktör performansları Şekil 3 A-B'de verilen etanol dönüşüm oranları ve hidrojen üretimi molar akış hızları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Farklı reaktörlerin etanol dönüşüm oranlarına olan etkisini gösteren Şekil 3 A'dan da görüleceği gibi belirlenen sıcaklıkta RGibbs ve REquilibrium reaktörlerinde etanol dönüşümü %100 iken RPlug reaktöründe bu oran %60 civarındadır. Bu sonuç Şekil 3 B'de gösterilen hidrojen molar akış hızı incelendiğinde de açıkça görülmektedir. Burada RGibbs ve REquilibrium reaktörlerinin 400 °C civarında maksimum hidrojen molar akış hızına eriştiği gözlemlenirken, bu oran RPlug için 700 °C civarındadır. Bununla beraber düşük sıcaklıklarda ise RGibbs reaktörünün REquilibrium reaktörüne oranla daha yüksek hidrojen molar akış hızına sahip olduğu gözlenmektedir. Bu nedenle bundan sonraki aşamalarda en elverişli reaktör olması nedeniyle RGibbs reaktörü kullanılmıştır.

A)



B)



Şekil 3. Reaktör türlerinin etanol dönüşüm oranlarına ve hidrojen molar akış hızına etkisi

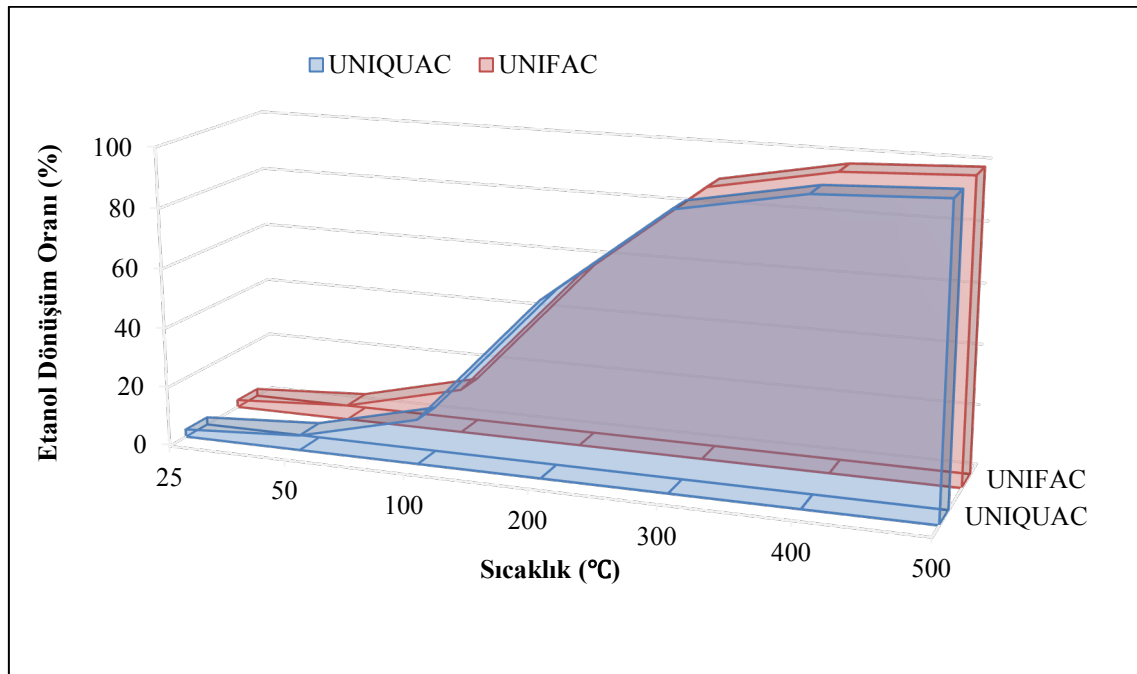
Şekil 3 B ayrıca reaktör sıcaklığının hidrojen molar akış hızına dolayısıyla etanol dönüşüm oranına olan etkilerini de açıkça göstermektedir. Şekilden de görüleceği gibi sıcaklık arttıkça etanol dönüşüm oranına bağlı olarak hidrojen akış hızı hızla artmakta ve 400 °C civarında maksimum değere ulaşmaktadır. Başlangıç sıcaklığı olan 25 °C hidrojen molar akış hızı 1,51 kmol/s iken 400 °C bu değer 59,50 kmol/s olmaktadır. Aynı şekilde etanol dönüşüm oranı incelendiğinde ise dönüşüm oranı 25 °C %2,5 iken 400 °C bu oran %99,18 olmaktadır.

3.2. Termodinamik (Fluid Package) Modelin Belirlenmesi

Farklı termodinamik modeller bünyesinde barındırdıkları farklı reaksiyonlar nedeniyle çok farklı ürün ve yan ürün oluşumları meydana getirmektedirler. Örneğin, metan, etilen, asetaldehit ve aseton gibi yan ürünlerin oluşumuna katkıda bulunan dehidrasyon, dehidrojenasyon ve piroliz gibi reaksiyonlar. Dolayısıyla ürün oluşumlarının tamamen proseste seçilen termodinamik modele bağlı olduğu

düşünüldüğünde, proseste kullanılacak olan termodinamik modellerin başarılı bir şekilde karşılaştırılması zorunlu hale gelmektedir.

Etanolden steam reforming prosesiyle hidrojen eldesi prosesinde durum modelleri ve aktivite katsayısı modelleri (activity coefficient ve equations of state) sıklıkla tercih edilmektedirler. Peng-Robinson ve Soave-Redlich-Kwong modelleri en yaygın kullanılan durum (quation of state) modelleridir ve hidrokarbonlar ve hafif gaz karışımları için geliştirilmişlerdir. Öte yandan UNIFAC ve UNIQUAC aktivite katsayısı modelleri (activity coefficient) düşük basınçlarda ideal olmayan sistemlerde sıklıkla tercih edilmektedirler. Öte yandan seçilen modeller prosesin veriminde yan ürün oluşumuna bağlı olarak oldukça etkilemektedirler. Bu çalışma kapsamında Şekil 4'te de verildiği gibi iki farklı aktivite katsayısı modeli karşılaştırılmış olup en iyi dönüşüm oranını veren model belirlenmiştir. Burada sıcaklık 500 °C ve basınç ise 1 atm olarak alınmıştır. Su ve etanol akış hızları sırasıyla 30 ve 10 kmol/s olarak alınmış olup reaktör olarak RGibbs kullanılmıştır.



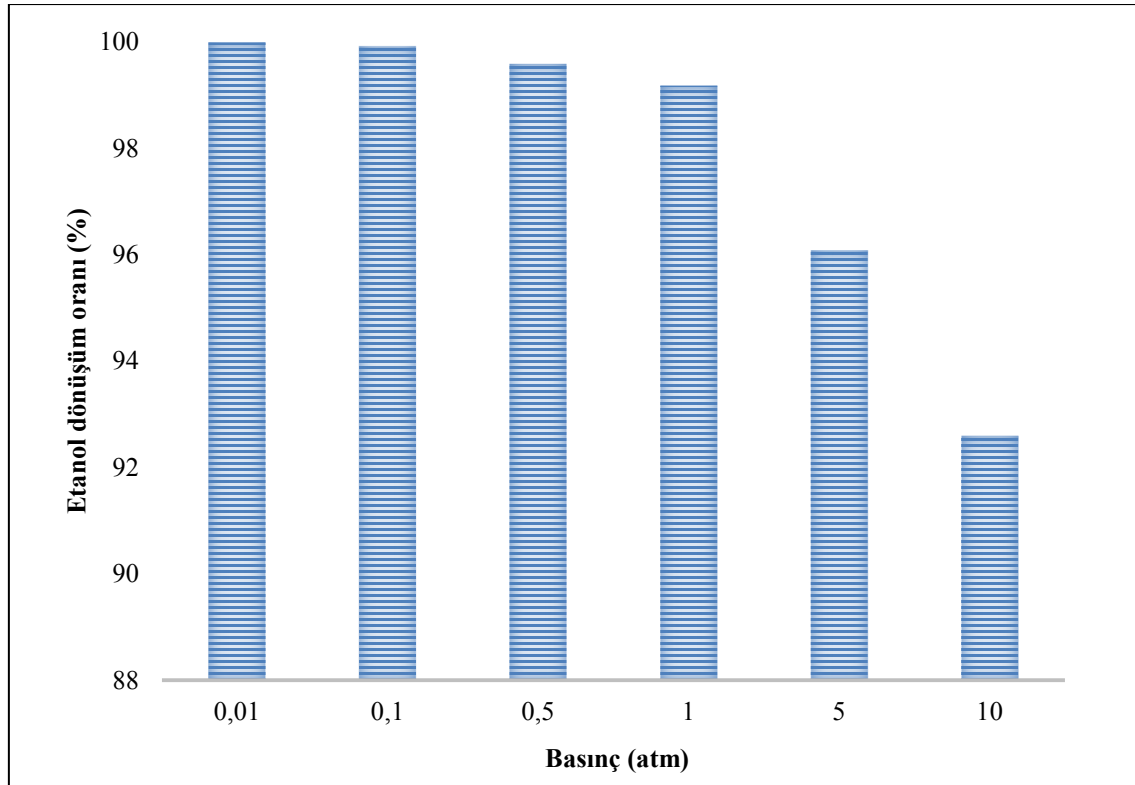
Şekil 4. Aktivite katsayısı modellerinin etanol dönüşüm oranına etkisi

Şekil 4'ten de açıkça görüldüğü gibi seçilen her iki aktivite katsayısı modeli çalışılan sıcaklık aralığında neredeyse aynı dönüşüm yüzdesine sahiptir. Burada UNIQUAC modelinin UNIFAC modeline oranla çalışılan sıcaklık aralığında yaklaşık %0,15'lik bir farkla daha iyi dönüşüm oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Sonuçların birbirine çok yakın olmasının en önemli nedenlerinden bir tanesi de her iki modelinde H_2 , CO_2 , CO , H_2O ürün ve yan ürünlerine sahip olmasındandır. Sonuç olarak daha iyi dönüşüm oranına sahip olduğu için bundan sonra çalışmaya UNIQUAC modeli devam edilmiştir.

3.3. Reaktör Basıncının Etkisi

Reaktör basıncının etanol dönüşüm oranına olan etkisi Şekil 5'te verilmiştir. Burada yine yukarıda belirtildiği gibi sıcaklık $500\text{ }^\circ\text{C}$ ve basınç ise 1 atm olarak alınmıştır. Ayrıca su ve etanol akış hızları sırasıyla 30 ve 10 kmol/s olarak alınmıştır. Reaktör

olarak RGibbs ve aktivite katsayısı modeli olarak UNIQUAC kullanılmıştır. Şekil 5'ten de görülebileceği gibi basınç etkisi 0,01 atm ile 10 atm arasında çalışılmıştır. Yüksek basınçlarda dönüşüm oranının düşük olduğu ve yüksek basıncın reaksiyonu negatif etkilediği Şekil 5'te açıkça görülmektedir. Artan basınçla beraber dönüşüm oranının azaldığı tespit edilmiştir. Bunun en önemli nedenlerinden bir tanesi bu reaksiyonun buhar (steam) modunda gerçekleşmesidir. Dolayısıyla basınç arttıkça buhar fazındaki reaktant konsantrasyonu azalmakta ve ürün oluşum hızı azalmaktadır. Öte yandan basıncın azalmasıyla beraber dönüşüm oranının arttığı da açıkça görülmektedir. Her ne kadar çok düşük basınçlarda dönüşüm oranı daha yüksek olsada, vakum ortamını sağlamak ekstra bir maliyet getireceğinden dolayı bu çalışma kalan aşamalarında %99 civarında dönüşüm oranı elde edilen atmosferik basınç kullanılmıştır.

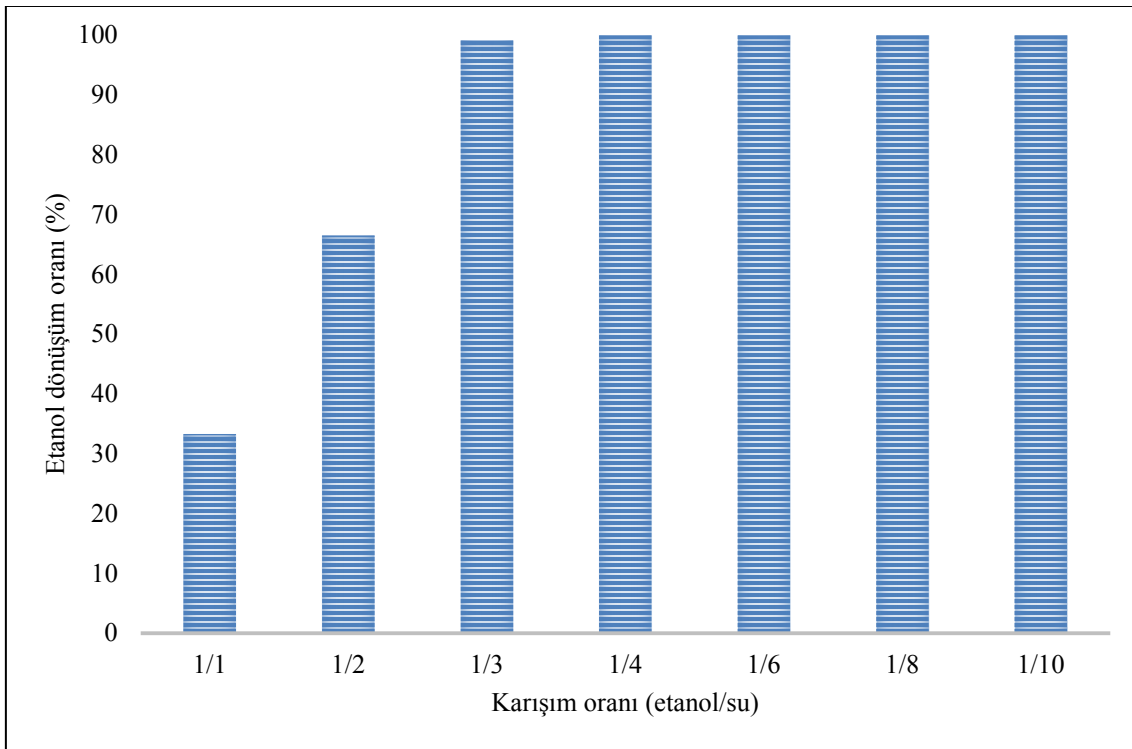


Şekil 5: Reaktör basıncının etanol dönüşüm oranına etkisi

3.4. Etanol/Su Karışım Oranının Dönüşüm Oranına Etkisi

Kimyasal reaksiyonlarda reaktantlar arasındaki karışım oranı, reaksiyon verimliliğini önemli derecede etkilemektedir. Bu çalışma da incelenen etanolün steam reforming prosesinde de bu etkiyi gözlemleyebilmek ve verimi arttırmak için en iyi karışım oranı belirlemek adına farklı karışım oranları incelenmiştir. Farklı etanol/su karışım oranlarının dönüşüm oranına etkisi Şekil 6'da verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi düşük etanol/su karışım oranlarında (1/1 ve 1/2) etanol

dönüşüm oranı oldukça düşüktür. Bunun en önemli nedeni de etanolün reaksiyona girmesi için ortam yeterli su bulunmamasıdır. Öte yandan 1/3 etanol su karışım oranında her iki reaktant yeterli konsantrasyona sahiptir ve verim %99,17'dir. Bununla beraber su oranını arttırmak 1/3'ten 1/4'e arttırmak dönüşüm oranını daha da arttırmış ve %100 değerine ulaşılmıştır. Bu noktadan sonra ortama ekstradan su eklemek reaksiyon verimliliği zaten %100 değerine ulaştığı için etkilememiştir. Dolayısıyla en verimli etanol/su karışım oranı bu çalışmada 1/4 olarak belirlenmiştir.

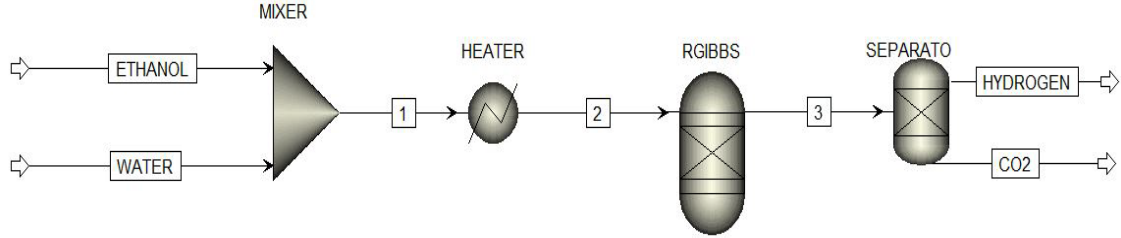


Şekil 6: Etanol/su karışım oranının dönüşüm oranına etkisi

3.5. Üretilen Hidrojenin Saflaştırılması

Etanolün su ile reaksiyonundan gerçekleşen steam reforming prosesinde ana ürün olan hidrojenin saflaştırılması ve kullanılabilir hale getirilebilmesi için yan ürün olan karbondioksitten ayrıştırılması gerekmektedir. Bu nedenle bir ayrıştırıcının eklendiği Şekil 7'de verilen simülasyon

geliştirilmiştir. Burada RGibbs reaktöründen çıkan ve H₂ ve CO₂ karışımını içeren üç numaralı stream ayrıştırıcıya (separator) gönderilmiştir. Burada separatöre H₂ ve CO₂ ayrıştırılması için 1/1 ayrıştırma komutu girilmiştir. Sonuç olarak %99.9 saflığa sahip H₂ ve CO₂ iki ayrı stream olarak edilmiştir.



Şekil 7. Üretilen hidrojenin saflaştırılması

4. SONUÇ

Doğada bileşikleri halinde bulunan en yaygın element olan hidrojenen elde edilecek olan hidrojen enerjisinin yakın gelecekte içten yanmalı motorlarda yakıt olarak ve yakıt hücreleri yardımıyla elektrik enerjisi üretiminde çok önemli bir yere sahip olması beklenmektedir. Günümüzde hidrojen enerjisi üretmek için kullanılan en yaygın yöntemlerden bir tanesi steam reforming prosesidir. Bu çalışmada Aspen Plus simülatörü kullanılarak reaktör türlerinin ve çalışma parametrelerinin hidrojen etanol dönüşüm oranına ve hidrojen molar akış hızına olan etkisi incelenmiştir. Reaktör türleri olarak RGibbs, REquilibrium ve RPlug reaktörlerinin dönüşüm oranına olan etkileri incelenmiştir ve en verimli reaktör olarak RGibbs belirlenmiştir. Ayrıca UNIFAC ve UNIQUAC termodinamik modellerinin dönüşüm oranına olan etkileri incelenmiş olup en verimli model olarak UNIQUAC belirlenmiştir. Çalışma parametreleri olarak sıcaklık, basınç ve karışım oranları çalışılmış olup en iyi değerler sırasıyla 500 °C, 1 atm ve etanol/su oranı 1/4 olarak tespit edilmiştir. Son olarak üretilen hidrojenin saflaştırılması için bir ayrıştırıcı (separator) kullanılarak gerçekleştirilmiş olup %99.9 saflıkta saf H₂ elde edilmiştir. Sonuç olarak etanolden steam reforming prosesiyle H₂ üretimi Aspen Plus ile başarılı bir şekilde analiz edilmiştir. Aspen Plus simülatöründen etanolden steam reforming prosesiyle H₂ üretimi için elde edilen optimal değerler deneysel H₂ üretimi için büyük bir potansiyel olduğunu göstermiştir. Geliştirilen simülasyon ayrıca deney maliyetini zaman kaybını minimize etmektedir. Dolayısıyla başarılı bir şekilde geliştirilen bu tür simülasyonlar

proseslerin tasarımı, kontrolü ve optimizasyonu hakkında oldukça faydalı bilgiler sağlamaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. Kaya, M., Bekiroğulları, M., Saka, C., 2019. Highly Efficient CoB Catalyst Using a Support Material Based on Spirulina Microalgal Strain Treated with ZnCl₂ for Hydrogen Generation Via Sodium Borohydride Methanolysis. International Journal of Energy Research.
2. Navarro, R.M., Pena, M.A. and Fierro, J.L.G., 2007. Hydrogen Production Reactions from Carbon Feedstocks: Fossil Fuels and Biomass. Chemical Reviews, 107, 3952-3991.
3. Wu, Y.J., Santos, J.C., Li, P., Yu, J.G., Cunha, A.F., Rodrigues, A.E., 2014. Simplified Kinetic Model for Steam Reforming of Ethanol on a Ni/Al₂O₃ Catalyst. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 92, 116-130.
4. Hosseini, S.E., Wahid, M.A., 2016. Hydrogen Production from Renewable and Sustainable Energy Resources: Promising Green Energy Carrier for Clean Development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57, 850-866.
5. Dincer, I., Acar, C., 2015. Review and Evaluation of Hydrogen Production Methods for Better Sustainability. International Journal of Hydrogen Energy, 40, 11094-11111.
6. Soyal-Baltacıoğlu, F., Aksoylu, A.E., Önsan, Z.I., 2008. Steam Reforming of Ethanol Over Pt-Ni Catalysts. Catalysis Today, 138, 183-186.
7. Özkan, G., Özkan, G., Şahbudak, B., 2016. The Effect of Water/ethanol Mol Ratio to H₂ Yield and Selectivity for Hydrogen Production from Reforming of Ethanol with the Pd-NiO, Ni-Cu-Pd/activated Carbon Catalysts, Gazi

Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31s.

8. Özkan, G., Şahbudak, B., Özkan, G., 2019. Effect of Molar Ratio of Water/Ethanol on Hydrogen Selectivity in Catalytic Production of Hydrogen Using Steam Reforming of Ethanol, International Journal of Hydrogen Energy, 44, 9823-9829.
9. Murmura, M.A., Patrascu, M., Annesini, M.C., Palma, V., Ruocco, C., Sheintuch, M., 2015. Directing Selectivity of Ethanol Steam Reforming in Membrane Reactors. International Journal of Hydrogen Energy, 40, 5837-5848.
10. Ciambelli, P., Palma, V., Ruggiero, A., 2010. Low Temperature Catalytic Steam Reforming of Ethanol. 2. Preliminary Kinetic Investigation of Pt/CeO₂ Catalysts. Applied Catalysis B: Environmental, 96, 190-197.

