



ALÜMİNYUM Klorür ($AlCl_3$) Bazlı Klor-Alkali ELEKTROLİZİ İLE HİDROJEN ÜRETİMİNİN EKSERJİ TEMELLİ İNCELENMESİ

Serdal DAMARSEÇKİN^{1*}

¹Sirnak University, Faculty of Engineering, Department of Renewable Energy Systems Engineering, 73000, Şirnak, Türkiye

Özet: Bu çalışmada, klor-alkali proseslerinde geleneksel olarak tercih edilen sodyum klorür çözeltilerine alternatif oluşturabilecek nitelikte, alüminyum klorür ($AlCl_3$) esaslı bir elektroliz sistemi tasarlanmış ve sistemin farklı sıcaklık ve voltaj düzeylerinde sergilediği ekserji performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Deneysel düzenek, sabit elektrolit debisi (0,3 g/s) koşulunda, 20 °C ve 45 °C sıcaklıklar ile 5,0 V, 7,5 V ve 10,0 V hücre gerilimleri altında test edilmiştir. Çalışmada kullanılan laboratuvar tipi hücrede anot ve katot bölmeleri, Al^{3+} iyonlarının seçici geçişine imkân tanıyan Nafion 212 membranıyla birbirinden ayrılmıştır. Her iki bölmede beşer adet grafit elektrot kullanılmıştır. Elektrolit akış hızının hidrojen ve klor üretimi üzerindeki etkisi deneysel olarak önemsiz bulunmuş ve bu nedenle sabit tutulmuştur. Deney süresince anot bölgesinde meydana gelen klor gazı üretimi, elektrot yüzeylerinde kimyasal aşınmaya neden olmuş; bu durum, klor gazı veriminin hidrojen gazına kıyasla daha düşük olmasına neden olmuştur. Elde edilen deneysel bulgulara göre, hidrojen üretim hızı 20 °C sıcaklık ve 5,0 V gerilim altında en düşük seviyede olup 0,94 mL/dk olarak kaydedilmiş, buna karşılık 45 °C ve 10,0 V koşullarında 3,577 mL/dk ile en yüksek üretim hızına ulaşılmıştır. Ekserji verimliliği, düşük sıcaklık ve gerilim koşullarında % 1,544 seviyesinde kalırken, en yüksek verim % 4,98 ile yüksek sıcaklık ve voltaj kombinasyonunda gözlemlenmiştir. Bu kapsamda, $AlCl_3$ çözeltisiyle çalışan elektroliz sisteminin literatürde ilk kez termodinamik verimlilik (ekserji) açısından deneysel olarak incelendiği vurgulanmakta olup, bu tür sistemlerin klor-alkali teknolojileri içerisinde alternatif ve yenilikçi bir yaklaşım sunduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca, reaksiyon sonucunda hidrojenin yanı sıra, ekonomik değeri yüksek olan $Al(OH)_3$ bileşiğinin oluşması, sürecin çevresel sürdürülebilirliğini ve ekonomik cazibesini artıran önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar kelimeler: Hidrojen üretimi, Klor-alkali reaktör, Enerji, Ekserji

Exergy-Based Investigation of Hydrogen Production via Aluminum Chloride ($AlCl_3$)-Based Chlor-Alkali Electrolysis

Abstract: In this study, an electrolysis system based on aluminum chloride ($AlCl_3$) was designed as a potential alternative to the conventionally used sodium chloride solutions in chlor-alkali processes. The exergy performance of the system was experimentally investigated under varying temperature and cell voltage conditions. The experimental setup was tested at a constant electrolyte flow rate of 0.3 g/s, with temperature levels of 20 °C and 45 °C, and cell voltages of 5.0 V, 7.5 V, and 10.0 V. In the laboratory-scale cell used in the study, the anode and cathode compartments were separated by a Nafion 212 membrane, which allows the selective passage of Al^{3+} ions. Five graphite electrodes were employed in each compartment. Since the effect of electrolyte flow rate on hydrogen and chlorine gas production was found to be negligible, it was kept constant throughout the experiments. During operation, the generation of reactive chlorine at the anode side led to chemical degradation of the electrode surfaces, resulting in lower chlorine output compared to hydrogen production. According to the experimental findings, the lowest hydrogen generation rate was measured as 0.94 mL/min under 20 °C and 5.0 V conditions, while the highest rate reached 3,577 mL/min at 45 °C and 10.0 V. Regarding exergy efficiency, the lowest value was calculated as 1,544 % at low temperature and voltage, and the highest efficiency was recorded as 4,98 % under the highest tested conditions. This study highlights that the $AlCl_3$ -based system was experimentally evaluated for the first time in terms of thermodynamic (exergy) efficiency, offering a novel and alternative approach within chlor-alkali technologies. Moreover, in addition to hydrogen gas, the system facilitates the formation of aluminum hydroxide ($Al(OH)_3$), a value-added by-product, thereby enhancing both the environmental sustainability and economic feasibility of the process.

Keywords: Hydrogen production, Chlor-alkali reactor, Energy, Exergy

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Sirnak University, Faculty of Engineering, Department of Renewable Energy Systems Engineering, 73000, Şirnak, Türkiye

E mail: serdalseckin@hotmail.com (S. DAMARSEÇKİN)

Serdal DAMARSEÇKİN  <https://orcid.org/0000-0003-4427-6220>

Gönderi: 07 Ağustos 2025

Kabul: 09 Eylül 2025

Yayınlanma: 15 Eylül 2025

Received: August 07, 2025

Accepted: September 09, 2025

Published: September 15, 2025

Cite: Damarşekkin S. 2025. Exergy-based analysis of hydrogen production by aluminum chloride ($AlCl_3$) based chlor-alkali electrolysis. BSJ Eng Sci, 8(5): 1628-1633.

1. Giriş

Küresel ölçekte enerji ve sanayi sektörlerinde çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması, sera gazı salınımlarının azaltılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, karbon

ıçermeyen üretim süreçlerinin geliştirilmesi, emisyonların düşürülmesinde temel stratejilerden biri olarak öne çıkmaktadır. Hidrojen, özellikle yakıt hücreleri (Sabeeh vd. 2019; Singla vd., 2021) ve enerji dönüşüm



sistemleri (Shadidi vd., 2021) kapsamında, fosil kaynaklara çevreci bir alternatif sunması nedeniyle dikkat çekmekte ve geniş ölçekli uygulama potansiyeli taşımaktadır.

Hidrojen, günümüzde öncelikli olarak amonyak ve metanol gibi kimyasal bileşiklerin üretiminde kullanılmakta olup, son yıllarda enerji taşıyıcısı rolüyle stratejik bir konuma yükselmiştir. Bu gelişme, hidrojen üretim teknolojilerine yönelik bilimsel ve teknolojik ilginin artmasına neden olmuştur. Ancak mevcut üretim kapasitesinin büyük bir bölümü, doğal gazın buharla reformasyonu gibi fosil kaynaklara dayalı yöntemlerden sağlanmaktadır ve bu oran yaklaşık %96'dır (Hammer vd., 2004; Konieczny vd., 2008; Bičáková ve Straka, 2012). Alternatif olarak gösterilen ve çevresel açıdan daha sürdürülebilir olan suyun elektrolizi yöntemi ise küresel üretimde çok sınırlı bir paya (%4 civarında) sahiptir. Bunun temel nedeni, bu yöntemin yüksek enerji girdisi gerektirmesi ve bu nedenle ekonomik olarak dezavantajlı bir seçenek hâline gelmesidir (Sigurvinnsson vd., 2006; Zhang vd., 2015).

Bu bağlamda, klor-alkali elektroliz sistemleri, yalnızca hidrojen değil, aynı zamanda değerli yan ürünlerin eş zamanlı olarak üretilmesi açısından alternatif bir yaklaşım sunmaktadır. Bu süreçte, genellikle NaCl çözeltisinin elektrolizi gerçekleştirilmekte ve bunun sonucunda klor (Cl_2), hidrojen (H_2) ve sodyum hidroksit (NaOH) elde edilmektedir. Hücre tasarımlarında kullanılan membran yapılar, iyonların kontrollü geçişini sağlayarak anot ve katot bölümleri arasında istenmeyen iyonik karışımı önlemektedir (Brinkmann, 2014). Literatürde, işlem parametrelerinin (örneğin hücre gerilimi, sıcaklık, tuz konsantrasyonu ve membran türü) hidrojen üretim verimliliği üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir (Rabbani vd., 2014). Ayrıca, farklı klorür tuzlarının (NaCl, KCl, $CaCl_2$ gibi) bu sistemlerde oluşturduğu performans farkları karşılaştırmalı çalışmalarda ele alınmıştır (Erden ve Karakilcik, 2024).

Klor-alkali elektroliz süreçlerinde yaygın olarak kullanılan konvansiyonel tuz çözeltilerine alternatif bir yaklaşım olarak, bu çalışmada alüminyum klorür ($AlCl_3$) tabanlı yeni bir sistem önerilmektedir. $AlCl_3$ 'nin tercih edilmesi, yalnızca hidrojen gazı üretimi açısından değil, aynı zamanda elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan ve çeşitli sanayi dallarında (örneğin su arıtma, kozmetik ve kimya endüstrileri) yaygın olarak değerlendirilen alüminyum hidroksit ($Al(OH)_3$) gibi stratejik bir yan ürünün elde edilmesine de olanak sağlamaktadır (Damarseçkin, 2024).

Bu bağlamda, çalışma kapsamında iyon seçici membran içeren bölmeli bir elektroliz hücresinde, farklı sıcaklık ve hücre gerilimi seviyelerinde hidrojen üretim kapasitesi ile birlikte sistemin ekserji bazlı termodinamik performansı deneysel olarak analiz edilmiştir.

$AlCl_3$ esaslı elektroliz sistemlerine dair mevcut bilimsel literatür incelendiğinde, bu tür sistemlerin hem enerji verimliliği hem de termodinamik etkinliği yönünden

kapsamlı bir biçimde değerlendirilmediği görülmektedir. Bu çalışma, alüminyum klorür çözeltisinin elektrokimyasal hidrojen üretimi süreçlerinde kullanımına dair ilk detaylı ekserji analizi örneklerinden biri olma niteliğindedir. Ayrıca, deneysel düzende yer alan membranlı hücre yapısı içerisinde, anot bölgesinde gözlenen elektrot bozulmalarının gaz üretim performansı üzerindeki etkisi de araştırılmış ve bu etkileşimler sistem bütünlüğü bağlamında tartışılmıştır.

Elde edilen veriler, yalnızca hidrojen üretimine ilişkin değil; aynı zamanda reaktör tasarımında kullanılan malzeme ömrü, enerji dönüşüm verimliliği ve yan ürün geri kazanımı gibi çoklu parametreleri dikkate alan bütüncül bir değerlendirme sunmaktadır. Böylece, bu çalışma alternatif elektrolit kullanımıyla sürdürülebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemekte ve klor-alkali teknolojilerine yeni bir perspektif kazandırmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Deneysel çalışmada, elektrolit olarak hazırlanan 1 molar alüminyum klorür ($AlCl_3$) çözeltisi ile saf su, iki ayrı peristaltik pompa yardımıyla sabit kütleli debiyle (0,3 g/s) elektrokimyasal hücreye yönlendirilmiştir. Reaktörde oluşan hidrojen gazının hacmi, standart laboratuvar koşulları olan 25 °C sıcaklık ve 1 atm basınç altında dereceli silindir aracılığıyla belirlenmiştir. Elde edilen hacimsel değerlerin kütle cinsine dönüştürülmesi, ideal gaz kanunu esas alınarak gerçekleştirilmiş; örneğin, 25 °C ve 1 atm koşullarında 100 litre H_2 gazının yaklaşık 8,1 gramlık bir kütleye karşılık geldiği varsayılmıştır. Bu doğrultuda, ölçülen hacimsel miktarlar basit oranlama yöntemiyle kütleli değerlere çevrilmiştir. Hem hidrojen hem de klor gazının üretimi, hacimsel yer değişimi prensibine dayanan ölçüm tekniğiyle, dereceli silindirler kullanılarak ayrı ayrı izlenmiştir.

Deney sürecinde reaktör üzerine sırasıyla 5,0 V, 7,5 V ve 10,0 V düzeylerinde sabit doğru akım gerilimleri uygulanmış ve sistemin davranışı gözlemlenmiştir. Elektrolit ve saf su, aynı hatlar üzerinden anot ve katot bölümlerine yönlendirilmiş; deneyler ise iki farklı sıcaklık ortamında, 20 °C ve 45 °C'de gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, sıcaklık ve gerilim parametrelerinin hidrojen üretim performansı üzerindeki etkileri sistematik biçimde karşılaştırılmıştır.

Şekil 1 ve Şekil 2'de sunulan diyagramlar, deneysel klor-alkali sisteminin temel yapılandırmasını gözler önüne sermektedir. Bu sistem; bir elektrokimyasal reaktör, iki adet elektrolit besleme haznesi (biri saf su, diğeri 1M $AlCl_3$ çözeltisi içeren), iki atık toplama kabı, çift yönlü peristaltik pompalar, bir doğru akım (DC) güç kaynağı ve gaz hacmini ölçmek için kullanılan iki adet dereceli silindirden oluşmaktadır.

Reaktör gövdesi, anot ve katot olmak üzere iki ayrı bölmeden meydana gelmekte olup, bu bölmeler CNC kontrollü işleme yöntemiyle yüksek kimyasal direnç özelliklerine sahip 'derlin' isimli polimer malzemeden imal edilmiştir. Bu malzeme, özellikle agresif kimyasal

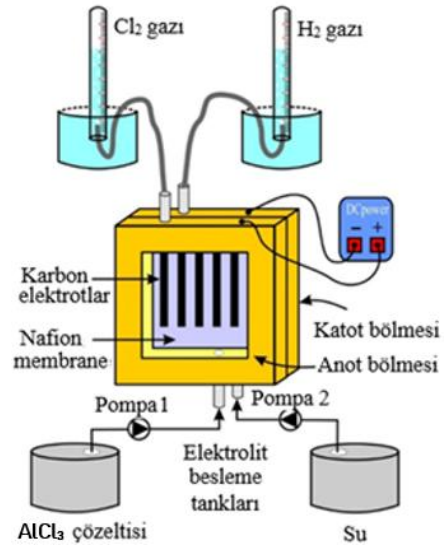
ortamlarda gösterdiği dayanıklılık nedeniyle tercih edilmiştir.

Sistemin temel işlevini sürdürebilmesi açısından en kritik bileşenleri membran ve elektrotlar oluşturmaktadır. Elektrot sistemi, her iki bölmede beşer adet olmak üzere toplamda 10 adet karbon çubuktan meydana gelmektedir. Karbon esaslı bu çubuklar, hem klor gazına karşı gösterdikleri yüksek kimyasal direnç hem de hidrojen üretim sürecine uygunlukları sayesinde elektrot malzemesi olarak seçilmiştir. Ayrıca, maliyet açısından avantaj sağlamaları, bu tercihleri destekleyici bir unsur olmuştur.

Her bir karbon elektrot çubuğu 0,2 cm yarıçapında ve 4 cm uzunluğundadır. Elektrotlar, membrana her iki taraftan da 0,5 cm mesafede, karşılıklı olarak simetrik biçimde konumlandırılmış beşli setler halinde yerleştirilmiştir. Elektrot çubukları arasında 1 cm aralık bırakılarak sistemin elektriksel ve iyonik geçirgenliği optimize edilmiştir. Bu düzenleme, hem gaz üretim verimini artırmak hem de elektrokimyasal kararlılığı sağlamak amacıyla planlanmıştır.



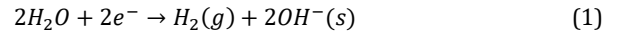
Şekil 1. Klor-alkali reaktörde elektroliz sistemi.



Şekil 2. Klor-alkali reaktörde elektroliz sisteminin şematik diyagramı.

Reaktörün anot ve katot bölmelerinde gerçekleşen elektrokimyasal süreçler aşağıda verilen yarı reaksiyonlarla tanımlanmaktadır. Katot bölgesinde, suyun indirgenmesi sonucu hidrojen gazı üretilirken; anot bölgesinde, alüminyum klorür çözeltisinden gelen klorür iyonları yükseltgenerek klor gazı açığa çıkmaktadır. Bu tepkimeler eşitlik 1 ve 2’de verilmektedir. Sistemin genel net reaksiyonu ise eşitlik 3’te verilmiştir.

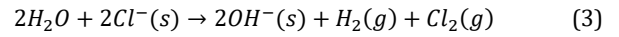
Katot (indirgenme) reaksiyonu:



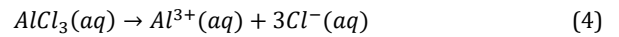
Anot (yükseltgenme) reaksiyonu:



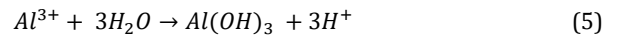
Toplam hücre reaksiyonu:



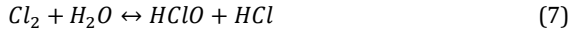
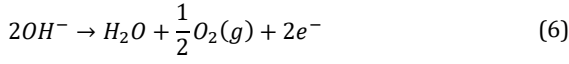
AlCl₃ katı halde suya bırakıldığında, öncelikle tamamen iyonlaşarak çözünür (eşitlik 4):



Bunun ardından, Al³⁺ iyonları suda hidroksil iyonlarıyla reaksiyona girerek hidroksit kompleksleri oluşturmaktadır. Bu süreç hidroliz olarak adlandırılır (eşitlik 5):



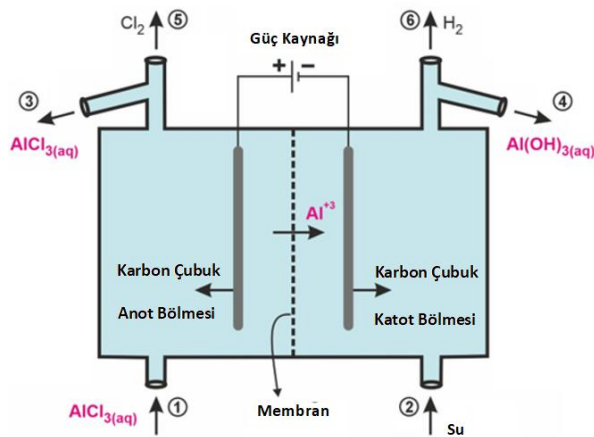
Reaksiyon sırasında, yan ürün olarak Al(OH)₃ bileşiği oluşmakta ve sistem içerisinde çökerek ayrılmaktadır. Diğer yandan, anot bölgesinde meydana gelen aktif klor türleri, oksijen (O₂), hipoklorit (ClO⁻) ve klorat (ClO₃⁻) gibi çeşitli bileşiklerin oluşumuna yol açan ikincil reaksiyonları da tetikleyebilmektedir (eşitlik 6-8).



Bu yan reaksiyonlar, klor gazının oluşum oranını azaltmakta ve anot bölgesindeki elektrotların kimyasal yıpranmasına yol açarak, sistemin genel gaz verimliliği üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır.

Farklı sıcaklık ve gerilim koşullarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen hidrojen üretim miktarları, deneysel bulgularla ortaya konmuştur. Teorik olarak bu koşullarda hidrojenle molce eşdeğer miktarda klor gazı üretilmesi beklenmektedir. Ancak, anot bölgesindeki elektrotların yüzeyinde meydana gelen yıpranmalar ve klor iyonlarının çeşitli yan reaksiyonlara katılması nedeniyle, klor gazı üretimi hidrojen gazına kıyasla daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir.

Bir sistemin termodinamik analizinin yapılabilmesi için, ilgili kütle, enerji, entropi ve ekserji dengelerine dayalı denklemlerin oluşturulması gereklidir. Bu temel denklemler aracılığıyla, sistemin enerji verimliliği ve ekserjetik davranışı değerlendirilebilir (Çengel ve Boles, 2013). Termodinamik süreçlerde, kütle ve enerji korunumu sağlanırken, sistemde entropi üretimi gerçekleşir ve bu üretim, süreçteki tersinmezlikler nedeniyle ekserji kayıplarına yol açar. Ekserji, enerjinin kullanılabilirliğini ve kalitesini temsil eder; bu da belirli bir referans çevre koşuluna göre tanımlanır. Başka bir ifadeyle, ekserji analizi sistemden elde edilebilecek maksimum faydalı işi değerlendirme imkânı sunar (Dincer ve Rosen, 2012). Bu çerçevede, enerji analizinin yanı sıra ekserji analizi de uygulanmalı, böylece tersinmezliklerin neden olduğu verim kayıpları minimize edilmelidir (BoroumandJazi, 2013). Bu kapsamda, bir klor-alkali reaktöre ilişkin denge denklemleri, Şekil 3'te sunulan akış diyagramı temel alınarak oluşturulabilir.



Şekil 3. Klor alkali reaktörünün akış şeması.

Reaktörün birim zamanda kütle dengesine ilişkin denklem şu formda yazılır (Damarseçkin, 2024) (eşitlik 9):

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_6 \quad (9)$$

Anot bölgesine verilen yoğunlaştırılmış tuzlu suyun kütle akış hızı $\dot{m}_1$, saf suyun kütle akış hızı ise $\dot{m}_2$ olarak gösterilmektedir. $\dot{m}_3$ ve $\dot{m}_4$ değerleri, sırasıyla anot bölgesinden akan seyreltilmiş tuzlu su ve katot bölgesinden akan konsantre bazın kütle akış hızlarını göstermektedir. Aynı zamanda, $\dot{m}_5$ ve $\dot{m}_6$ değerleri, anot ve katot bölmelerinden çıkan klor ve hidrojen gazlarının kütle akış hızlarını ifade eder.

Sistemde tüketilen elektrik enerjisi aşağıdaki formülle hesaplanır (eşitlik 10):

$$\dot{W}_{in} = V i t \quad (10)$$

Burada V , i ve t sırasıyla reaktöre uygulanan voltaj (volt cinsinden) ile reaktörden geçen akım (amper cinsinden) ve geçen süre (saniye cinsinden) değerleridir. Belirli bir zaman diliminde reaktör için ekserji denge denklemi şu formda yazılabilir (eşitlik 11):

$$\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_2 ex_2 = \dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_4 ex_4 + \dot{m}_5 ex_5 + Ex_d \quad (11)$$

Burada, ex_{1-6} , reaktörün farklı bölmelerine kütle akış hızlarıyla birlikte giren ve çıkan özgül ekserji değerlerini göstermektedir. T_0 çevre sıcaklığını, T ise hücre sıcaklığını belirtmektedir. Isı girişi ve iş girişi hızları sırasıyla $\dot{Q}_{in}$ ve $\dot{W}_{in}$ ile ifade edilirken, Ex_d ise ekserji tahribat hızını temsil eder. Ekserji tahribatı, entropi üretimi ile doğru orantılı olduğundan, Ex_d aşağıdaki şekilde tanımlanabilir (eşitlik 12):

$$Ex_d = T_0 \dot{S}_{pro}. \quad (12)$$

Burada $\dot{S}_{pro}$, üretilen entropi hızını ifade eder.

Ekserji verimliliğinin hesaplanması, sistemdeki tersinmezliklerin yol açtığı enerji kayıplarının analiz edilmesi ve performans artırıcı önlemlerin belirlenmesi bakımından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, mevcut klor-alkali reaktörün sadece hidrojen üretim sürecine ilişkin ekserji verimliliği, aşağıda verilen denklem çerçevesinde tanımlanmıştır:

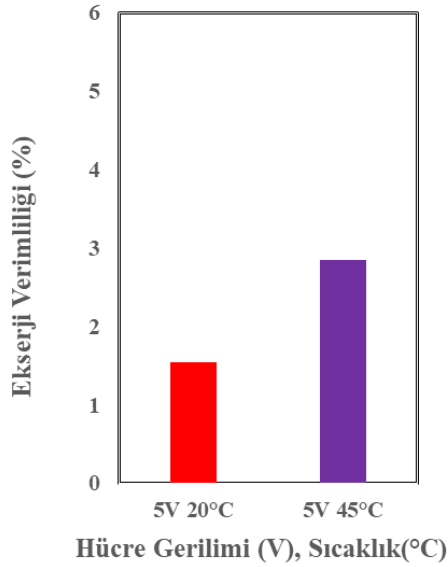
$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}_6 ex_6}{\dot{W}_{in} + \dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_2 ex_2} \quad (13)$$

3. Bulgular ve Tartışma

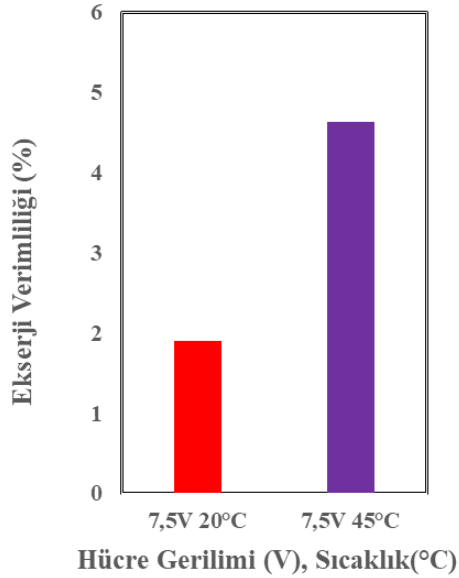
Bu çalışmada, $AlCl_3$ çözeltisi kullanılarak yapılandırılan klor-alkali reaktör sisteminin farklı termodinamik koşullar altındaki (sıcaklık ve hücre voltajı) hidrojen üretim performansı ile ekserji temelli ikinci yasa verimliliği analiz edilmiştir. Şekil 4, 5 ve 6'da sunulan veriler doğrultusunda, sistemin ekserji verimliliğinde hem sıcaklık artışı hem de hücreye uygulanan potansiyel farkının yükseltilmesiyle birlikte belirgin bir artış gözlemlenmiştir.

Şekil 4, 0,3 g/s sabit elektrolit akış oranı ve 5 V sabit hücre gerilimi altında, $AlCl_3$ çözeltisinin 20 °C ve 45 °C çalışma sıcaklıklarındaki ekserji verimliliği değerlerini sunmaktadır. Benzer şekilde, Şekil 5'te 7.5 V sabit hücre

gerilimi koşulunda, aynı elektrolit akışı ve sıcaklık değerleri için elde edilen ekserji verimlilikleri karşılaştırılmaktadır. Şekil 6 ise sistem 10 V gerilimle çalıştırıldığında, yine 20 °C ve 45 °C sıcaklıklarındaki termodinamik performans değişimlerini göstermektedir.



Şekil 4. Farklı sıcaklıklarda test edilen çözeltilerin ekserji verimlilikleri.

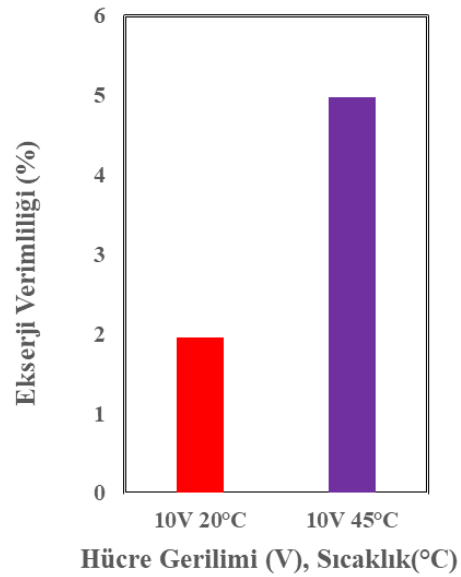


Şekil 5. Farklı sıcaklıklarda test edilen çözeltilerin ekserji verimlilikleri.

5 V hücre gerilimi altında AlCl_3 çözeltisiyle yürütülen deneysel çalışmalarda, 20 °C'de % 1,544 olan ekserji verimliliği, 45 °C'ye çıkarıldığında % 2,854'e ulaşmıştır; bu bulgular Şekil 4'te sunulmaktadır. 7,5 V gerilimle yapılan çalışmalarda ise verimlilik % 1,895'den % 4,63'e yükselmiş olup ilgili sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir. 10 V'luk deneylerde ise ekserji verimliliği % 1,951'den % 4,98'e artmış ve bu eğilim Şekil 6'da gözlemlenmiştir. Bu artışın, sıcaklık yükseldikçe AlCl_3 çözeltisinde iyon taşınımının kolaylaşması ve elektrot yüzeyinde

oluşabilecek pasif tabakaların çözünerek elektrokimyasal reaksiyon hızını artırmasıyla ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Roy vd. (2022) yaptıkları çalışmada belirttikleri gibi, bu tür çözeltilerde sıcaklık artışı reaksiyon kinetiği üzerinde olumlu etki yaratmaktadır.

Elde edilen bulgular, genel eğilim açısından Erden ve Karakılıç'ın (2024) farklı elektrolit tuzlarıyla gerçekleştirdiği çalışmalarla örtüşmektedir. Bulunan değerler Tablo 1'de gösterilmektedir. Bununla birlikte, bu çalışma, AlCl_3 çözeltisinin kullanıldığı sistemler özelinde ekserji analizi gerçekleştiren literatürdeki ilk örneklerden biri olma niteliği taşımaktadır. Öte yandan, deneysel süreçte gözlemlenen anot yüzeyi bozulmaları, AlCl_3 çözeltisinin aktif klor üretimi sırasında anot malzemesiyle kimyasal olarak etkileşime girerek yapısal aşınmalara yol açabileceğine işaret etmektedir. Bu durum, sistem tasarımı anod malzemesinin kimyasal dayanımının dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6. Farklı sıcaklıklarda test edilen çözeltilerin ekserji verimlilikleri.

Tablo 1. Bazı tuz örneklerinin enerji ve ekserji verim değerleri (Erden ve Karakılıç, 2024)

Tuz	NaCl	KCl	CaCl_2	AlCl_3
Enerji				
30 °C	21,83	24,51	1196	-
(%)				
Enerji				
70 °C	18,36	21,29	16,11	-
(%)				
Ekserji				(20°C)
30 °C	14,87	16,52	9,83	1,951
(%)				
Ekserji				(45°C)
70 °C	11,79	13,94	12,04	4,98
(%)				

4. Sonuç

Elde edilen bulgular, ekserji verimliliği ve sistem davranışı açısından değerlendirildiğinde, $AlCl_3$ tabanlı klor-alkali sistemlerin sürdürülebilir hidrojen üretiminde potansiyel bir seçenek olarak dikkate alınabileceğini ortaya koymaktadır.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	S.D.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

- Bičáková O, Straka P. 2012. Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness. *Int J Hydrogen Energy*, 37: 16. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.120>
- Boroumandjazi G, Rismanchi B, Saidur R. 2013. A review on exergy analysis of industrial sector. *Renew Sustain Energy Rev*, 27: 198–203. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.018>
- Brinkmann T, Santonja GG, Schorcht F, Roudier S, Sancho LD. 2014. Best available techniques (BAT) reference document for

the production of chlor-alkali. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies.

- Cengel YA, Boles MA. 2013. Termodinamik. 7. baskı. Palme Yayıncılık. Ankara, Türkiye, pp: 35-39.
- Damarşekin S. 2024. Hydrogen production from $ZnCl_2$ salt: Application of chlor-alkali method. *Int J Hydrogen Energy*, 88: 888–897. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.233>
- Dincer I, Rosen MA. 2012. Energy, environment, and sustainable development. Elsevier, Oxford, USA, pp: 56-96.
- Erden M, Karakilcik M. 2024. Experimental investigation of hydrogen production performance of various salts with a chlor-alkali method. *Int J Hydrogen Energy*, 52: 546–560. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.002>
- Hammer Th, Kappes Th, Baldauf M. 2004. Plasma catalytic hybrid processes: gas discharge initiation and plasma activation of catalytic processes. *Catal Today*, 89: 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2004.03.059>
- Konieczny A, Mondal K, Wiltowski T, Dydo P. 2008. Catalyst development for thermocatalytic decomposition of methane to hydrogen. *Int J Hydrogen Energy*, 33: 1. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.07.010>
- Rabbani M, Dincer I, Naterer GF. 2014. Experimental investigation of processing parameters and effects on chlor-alkali products in an electrolysis-based chlor-alkali reactor. *Chem Eng Process*, 82: 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.06.004>
- Roy H, Barua S, Ahmed T, Mehnaz F, Islam MdS, Mujtaba IM. 2022. A sustainable integration approach of chlor-alkali industries for the production of PVC and clean fuel hydrogen: prospects and Bangladesh perspectives. *Processes*, 10: 1638. <https://doi.org/10.3390/pr10081638>
- Sabeeh G, Palanki S, Sylvester ND, El-Sharkh MY. 2019. Modeling and analysis of a hydrogen reformer for fuel cell applications. *Heat Transf Eng*, 40(13–14): 1153–1161. <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1457262>
- Shadidi B, Najafi G, Yusaf T. 2021. A review of hydrogen as a fuel in internal combustion engines. *Energies*, 14(19): 6209. <https://doi.org/10.3390/en14196209>
- Sigurvinsson J, Mansilla C, Arnason B, Bontemps A, Mareşal A, Sigfusson TI, Werkoff F. 2006. Heat transfer problems for the production of hydrogen from geothermal energy. *Energy Convers Manag*, 47: 20. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.05.030>
- Singla MK, Nijhawan P, Oberoi AS. 2021. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environ Sci Pollut Res Int*, 28(13): 15607–15626. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12231-8>
- Zhang X, O'Brien JE, Tao G, Zhou C, Housley GK. 2015. Experimental design, operation, and results of a 4 kW high temperature steam electrolysis experiment. *J Power Sources*, 297:90–97. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.085>