

Klor-Alkali Yöntemi ile $ZnCl_2$ Kullanarak Hidrojen Üretiminde Ekserji Analizi

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 05.01.2025

Kabul/Accepted: 06.08.2025

Yayınlandı/Published: 03.02.2026

Exergy Analysis in Hydrogen Production Using $ZnCl_2$ via the Chlor-Alkali Method

Serdal DAMARSEÇKİN^{*} 

Şırnak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Şırnak, Türkiye

©2026 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada, klor-alkali reaktörlerinde yaygın olarak tercih edilen sodyum klorür çözeltilerine alternatif olarak çinko klorür ($ZnCl_2$) çözeltisi kullanılarak hidrojen üretimine yönelik geliştirilen bir sistemin, farklı sıcaklık ve hücre voltajı koşullarındaki ekserji verimliliği deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, sabit elektrolit akış hızı (0,3 g/s) altında iki farklı sıcaklık (20 °C ve 45 °C) ve üç farklı hücre voltajı (5,0 V, 7,5 V ve 10,0 V) seviyesinde yürütülmüş, her bir parametre kombinasyonu için üç tekrar alınarak sonuçların istatistiksel güvenilirliği sağlanmıştır. Laboratuvar ölçeğindeki reaktörde, anot ve katot bölmeleri Zn^{2+} iyonlarının seçici geçişine imkân tanıyan Nafion 212 membranı ile ayrılmış ve her iki bölmede beşer adet grafit çubuk elektrot kullanılmıştır. Elektrolit akış hızının hidrojen ve klor gazı üretimi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu gözlemlendiğinden, bu parametre deneyler boyunca sabit tutulmuştur. Deneysel süreçte, anot bölgesinde oluşan reaktif klor nedeniyle elektrotlarda aşınma meydana gelmiş ve bu durum, üretilen klor miktarının hidrojen miktarına göre daha düşük olmasına yol açmıştır. Elde edilen verilere göre, en düşük hidrojen üretim hızı 20 °C ve 5,0 V koşullarında 0,625 mL/dk olarak ölçülürken, en yüksek üretim hızı 45 °C ve 10,0 V koşullarında 4,971 mL/dk seviyesine ulaşmıştır. Ekserji verimliliği açısından ise en düşük değer % 7,14 ile 20 °C ve 5,0 V'de, en yüksek değer ise % 9,58 ile 45 °C ve 10,0 V'de hesaplanmıştır. Bu kapsamda, $ZnCl_2$ çözeltisi ile çalışan sistemin hem yenilikçi bir klor-alkali teknolojisi sunduğu hem de literatürde ilk defa bu sistemin ekserji bazı performansının deneysel olarak değerlendirildiği ortaya konulmuştur. $ZnCl_2$ 'nin tercih edilmesi, hidrojenin yanı sıra değerli bir yan ürün olan $Zn(OH)_2$ üretimini sağlayarak sistemi çevresel ve ekonomik açıdan avantajlı kılmaktadır.

Abstract

In this study, a system developed for hydrogen production using zinc chloride ($ZnCl_2$) solution as an alternative to the commonly used sodium chloride solutions in chlor-alkali reactors was experimentally evaluated in terms of exergetic efficiency under different temperature and cell voltage conditions. Experiments were conducted at a constant electrolyte flow rate of 0,3 g/s, under two different temperatures (20 °C and 45 °C) and three different cell voltages (5,0 V, 7,5 V, and 10,0 V), with three repetitions for each parameter combination to ensure statistical reliability of the results. In the laboratory-scale reactor, the anode and cathode compartments were separated by a Nafion 212 membrane, allowing the selective passage of Zn^{2+} ions, and five graphite rod electrodes were used in each compartment. Since the electrolyte flow rate had a negligible effect on hydrogen and chlorine gas production, it was kept constant throughout the experiments. During the process, reactive chlorine in the anode compartment caused electrode degradation, resulting in lower chlorine production compared to hydrogen. According to the results, the lowest hydrogen production rate was measured as 0,625 mL/min at 20 °C and 5,0 V, while the highest rate reached 4,971 mL/min at 45 °C and 10,0 V. In terms of exergetic efficiency, the lowest value was calculated as 7,14 % at 20 °C and 5,0 V, and the highest as 9,58 % at 45 °C and 10,0 V. This study demonstrates both a novel chlor-alkali system using $ZnCl_2$ solution and presents the first experimental assessment of its exergetic performance in the literature. The use of $ZnCl_2$ offers environmental and economic advantages by enabling the production of both hydrogen and a valuable by-product, zinc hydroxide ($Zn(OH)_2$).

Anahtar Kelimeler: Hidrojen Üretimi; Klor-alkali reaktör; Enerji; Ekserji**Keywords:** Hydrogen Production; Chlor-Alkali Reactor; Energy; Exergy.

1. Giriş

Günümüzde sanayileşme, nüfus artışı ve hızlı şehirleşmenin etkisiyle enerjiye olan talep sürekli olarak artmaktadır. Ancak bu artış, büyük ölçüde fosil yakıtlara dayanan enerji üretimiyle karşılandığından, sera gazı emisyonları ve çevresel kirlilik gibi ciddi sorunları da beraberinde getirmektedir (Salameh vd. 2021). Bu nedenle, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmaz hale gelmiştir (Tarhan ve Çil 2021,

Zhao vd. 2021, Yagoob vd. 2022, Adebayo vd. 2021). Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) ile elde edilen “yeşil” hidrojen, karbon salımı oluşturmada enerji üretimine imkân tanınması sayesinde temiz enerji dönüşümünde önemli bir potansiyel taşımaktadır. Hidrojenin elektrokimyasal dönüşümünün kolay olması, yüksek enerji yoğunluğu ve hafifliği gibi avantajları, onu hem enerji taşıyıcısı hem de alternatif yakıt olarak ön plana çıkarmaktadır (Oliveira vd. 2021).

Hidrojen, günümüzde çoğunlukla amonyak ve metanol üretimi gibi endüstriyel alanlarda kullanılmakla birlikte, enerji taşıyıcısı olarak kullanımı giderek artmaktadır. Bu artan talep, hidrojen üretim yöntemlerine yönelik araştırmaları hızlandırmıştır. Ancak mevcut üretimin yaklaşık % 96'sı hâlen doğal gazın buhar reformasyonu gibi fosil kaynaklara dayanmaktadır (Bičáková ve Straka 2012, Konieczny vd. 2008, Hammer vd. 2004). Suyun elektrolizi gibi yenilenebilir yöntemlerin payı ise yaklaşık % 4 ile sınırlı kalmakta, buna rağmen enerji tüketiminin yüksek olması, bu yöntemin geniş çapta uygulanmasını engellemektedir (Sigurvinnsson vd. 2006, Zhang vd. 2015).

Bu noktada, klor-alkali reaktörleri, hem hidrojen hem de diğer değerli yan ürünlerin üretimine olanak tanıyan alternatif bir üretim yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Klor-alkali süreci, genellikle sodyum klorür ($NaCl$) çözeltisinin elektrolizi ile klor gazı (Cl_2), sodyum hidroksit ($NaOH$) ve hidrojen gazı (H_2) üretimini temel alır. Bu süreçte, membran destekli hücre tasarımı sayesinde iyon geçişi kontrollü biçimde sağlanır ve anot ile katot bölmeleri arasında istenmeyen karışımlar engellenir (Brinkmann 2014). Literatürde, hücre voltajı, sıcaklık, tuz konsantrasyonu ve membran tipi gibi parametrelerin hidrojen üretim verimliliği üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir (Rabbani vd. 2014). Ayrıca, farklı tuz türlerinin ($NaCl$, KCl , $CaCl_2$) klor-alkali sistemlerindeki performans farklılıkları da karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır (Erden ve Karakilcik 2024).

Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan sodyum klorür çözeltileri yerine, alternatif bir elektrolit olan çinko klorür ($ZnCl_2$) çözeltisinin kullanıldığı yenilikçi bir klor-alkali sistem önerilmektedir. $ZnCl_2$ 'nin tercih edilme nedeni, yalnızca hidrojen üretimi potansiyeli değil, aynı zamanda çinko hidroksit ($Zn(OH)_2$) gibi sanayi ve sağlık alanlarında geniş uygulama alanı bulan değerli bir yan ürün üretimini mümkün kılmasıdır (Damarseçkin 2024). Bu bağlamda çalışma, $ZnCl_2$ çözeltisi ile çalışan klor-alkali bir reaktörde farklı sıcaklık ve hücre voltajı koşulları altında hidrojen üretim performansının ve sistemin ekserji verimliliğinin deneysel olarak değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

Literatürde $ZnCl_2$ bazlı klor-alkali sistemlerle hidrojen üretimine yönelik çalışmalar oldukça sınırlı olup, bu sistemlerde ekserji verimliliği analizine dair kapsamlı bir değerlendirme bulunmamaktadır. Bu çalışma, $ZnCl_2$ çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilen hidrojen üretimi sürecinin ilk kez ekserji analizi ile birlikte ele almaktadır. Ayrıca, iyon seçici membran içeren bölmeli reaktör yapısında gerçekleşen elektrot aşınmasının gaz üretim verimi üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi,

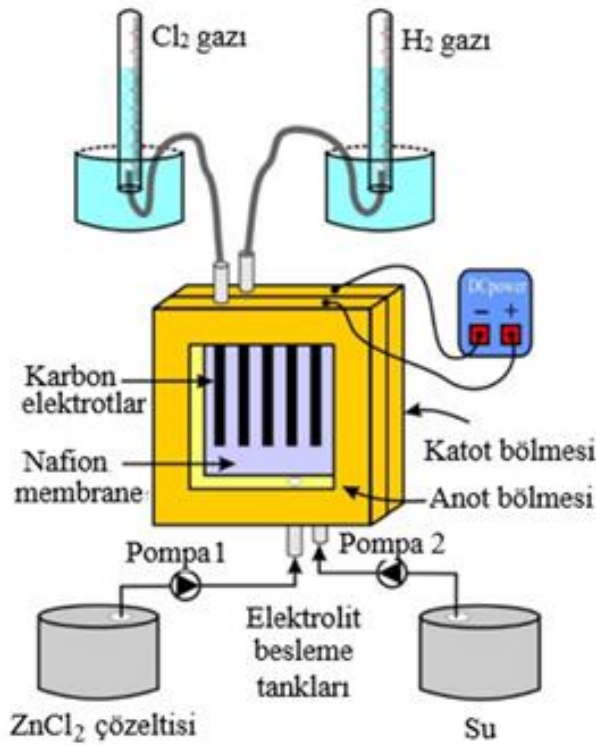
çalışmanın literatürdeki mevcut araştırmalardan ayrılmasını sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, yalnızca hidrojen üretimi açısından değil, aynı zamanda sistem verimliliği ve termodinamik performans değerlendirmesi açısından da literatüre önemli katkılar sunmakta, sürdürülebilir enerji dönüşümüne yönelik alternatif yöntemlerin geliştirilmesine ışık tutmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Deneylerde, 1M $ZnCl_2$ çözeltisi ve saf su, iki peristaltik pompa aracılığıyla sabit bir kütle akış hızında reaktöre beslenmiştir. Hidrojen üretimi, oda sıcaklığı (25 °C) ve atmosferik basınç (1 atm) koşullarında bir dereceli silindir kullanılarak hacimsel olarak ölçülmüştür. Bu hacimsel verilerin kütleye dönüştürülmesi, ideal gaz yasası temel alınarak gerçekleştirilebilir. Örneğin, 25 °C ve 1 atm koşullarında 100 L hacmindeki hidrojen gazı yaklaşık 8,1 g kütleyle sahiptir. Bu bağlamda, hidrojenin hacimsel verileri oran-orantı yöntemiyle kütle değerlerine dönüştürülebilir. Ayrıca, üretilen hidrojen ve klor gazlarının hacimleri, hacimsel yer değiştirme yöntemi kullanılarak dereceli silindirlerle ölçülmüştür. Deneylerde hücelere sırasıyla 5,0 V, 7,5 V ve 10,0 V voltajları uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Sabit kütle akış hızı 0,3 g/s olan iki peristaltik pompa, sırasıyla 1 M $ZnCl_2$ çözeltisini ve saf suyu anot ve katot bölmelerine pompalamak için kullanılmıştır. Deneyler, 20 °C ve 45 °C'lik iki farklı sıcaklık koşulunda yapılmıştır. Şekil 1 ve 2'de gösterilen diyagram, Çukurova Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Araştırma Laboratuvarı'ndaki klor-alkali sisteminin yapılandırmasını göstermektedir. Bu düzeneği, bir klor-alkali reaktörü, iki elektrolit besleme kabı (birinde saf su, diğerinde $ZnCl_2$ tuzlu su), iki elektrolit atık kabı, iki peristaltik pompa, bir doğru akım (DC) güç kaynağı ve iki dereceli silindiri içermektedir. Reaktörde anot ve katot için ayrılan bölmeler, CNC (bilgisayarlı sayısal kontrol) makinesi kullanılarak 'delrin' adı verilen bir malzemeden üretilmiştir. Bu malzeme, asitlere ve bazlara karşı yüksek direnç gösteren bir polimer türüdür.

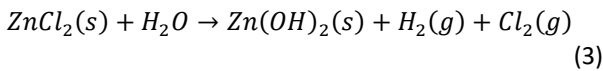
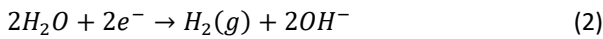


Şekil 1. Klor-alkali elektroliz sistemi

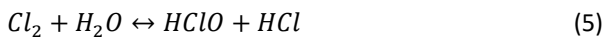
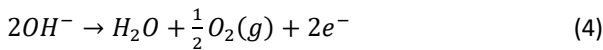


Şekil 2. Klor-Alkali Elektroliz Sisteminin şematik diyagramı.

Reaktörün anot ve katot bölmelerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sırasıyla denklem 1 ve 2 ile gösterilirken çinko klorür tuzunun su ile tepkimesi 3. denkleme verilmektedir.



Reaksiyon sürecinde $Zn(OH)_2$ yan ürün olarak ortaya çıkmakta ve çökelmektedir. Anot bölgesinde oluşan aktif klor ise oksijen (O_2), hipoklorit (ClO^-) ve klorat (ClO_3^-) gibi ürünlerin ortaya çıktığı aşağıdaki yan reaksiyonlar da meydana gelebilmektedir:



Bu reaksiyonlar, sistemde klor üretim hızının düşmesine ve anotta bulunan elektrotların aşınmasına neden olarak gaz üretim verimliliğini etkilemektedir.

Elde edilen deneysel veriler doğrultusunda, farklı sıcaklık ve gerilim değerlerinde elde edilen H_2 üretim oranları çizelge 1'de verilmektedir. Aynı şartlar altında teorik olarak eşit mol oranında Cl_2 gazı oluşması beklenirken, anotta bulunan elektrotlardaki aşınma ve klorun yan reaksiyonlara girmesi nedeniyle Cl_2 üretimi H_2 'ye göre daha düşük kalmaktadır.

Çizelge 1. H_2 ve Cl_2 gazlarının farklı sıcaklık ve voltaj değerlerinde birim zamanda üretilme miktarları.

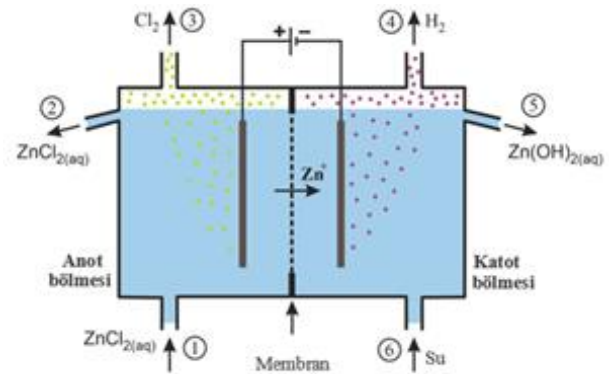
Sıcaklık (°C)	Voltaj (V)	H_2 Üretim (mL/dk)	Cl_2 Üretim (mL/dk)
20	5,0	0,625	0,0048
45	5,0	1,842	0,0158
20	7,5	1,25	0,0189
45	7,5	3,684	0,2105
20	10,0	1,944	0,4111
45	10,0	4,971	1,4205

Bir sistemi termodinamik açıdan incelemek için, o sisteme ilişkin kütle, enerji, entropi ve ekserji dengelerine yönelik denklemler oluşturulması gerekmektedir. Bu denklemler sayesinde, sistemin enerjetik ve ekserjetik performansı değerlendirilebilir (Cengel ve Boles 2013). Termodinamik bir süreçte, kütle ve enerji korunurken, entropi üretimi gerçekleşir ve tersinmezlikler sebebiyle ekserji kaybı ortaya çıkar. Ekserji, enerjinin niteliğini ifade eder ve belirli bir referans durumuna göre tanımlanır. Başka bir ifadeyle, ekserji analizi, bir sistemdeki faydalı enerji çıktısını artırmayı amaçlar (Dincer ve Rozen 2012). Bu bağlamda, tersinmezliklerin neden olduğu verim kayıplarını en aza indirmek için enerji analizine ek olarak ekserji analizinin yapılması da gereklidir (BoroumandJazi 2013). Bu nedenle, bir klor alkali reaktör için gerekli denge denklemleri, Şekil 3'teki akış şemasına göre yazılabilir.

Birim zaman başına reaktör için kütle denge denklemi şu şekilde verilir:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_6 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \quad (7)$$

Burada $\dot{m}_1$ ve $\dot{m}_6$ sırasıyla anot bölgesine aktarılan yoğunlaştırılmış tuzlu suyun ve anot bölgesine aktarılan suyun kütle akış hızlarıdır.



Şekil 3. - Klor-alkali reaktörünün akış şeması.

Benzer şekilde, $\dot{m}_2$ ve $\dot{m}_5$ sırasıyla anot bölgesinden akan seyreltilmiş tuzun ve katot bölgesinden akan yoğunlaştırılmış bazın kütle akış hızlarıdır. $\dot{m}_3$ ve $\dot{m}_4$ sırasıyla anot ve katot bölmelerinden akan klor ve hidrojen gazlarının kütle akış hızlarını temsil etmektedirler. Reaktör için birim zaman başına enerji dengesi denklemi şu şekilde verilmiştir:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_6 h_6 + \dot{W}_{in} + \dot{Q}_{in} = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_5 h_5 \quad (8)$$

burada h_{1-6} reaktörün bölmelerine giren ve çıkan özgül entalpiler ile kütle akış hızlarıdır, $\dot{W}_{in}$ reaktöre birim zaman başına verilen elektrik gücüdür ve $\dot{Q}_{in}$ çalışma sıcaklığı için elektrolitlere birim zaman başına verilen ısı enerjisi miktarıdır.

Elektrik gücü şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{W}_{in} = Vi \quad (9)$$

burada V ve i sırasıyla reaktöre uygulanan volt cinsinden voltaj ve reaktörden geçen ve amper birimine sahip akımdır.

Reaktör için birim zaman başına entropi denge denklemi ise şu şekilde verilir:

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{T_0} + \dot{m}_1 S_1 + \dot{m}_6 S_6 + \dot{S}_{pro.} = \dot{m}_2 S_2 + \dot{m}_3 S_3 + \dot{m}_4 S_4 + \dot{m}_5 S_5 \quad (10)$$

Burada S_{1-6} , reaktörün bölmelerine giren ve çıkan özgül entropiler ile kütle akış hızlarını, T_0 , ısı akışı yoluyla hücreye giren entropi hızını ve $\dot{S}_{pro.}$ üretilen entropi hızını ifade eder.

Reaktör için birim zaman başına ekserji denge denklemi şu şekilde verilmiştir:

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

Burada, ex_{1-6} , reaktörün bölmelerine kütle akış hızlarıyla birlikte giren ve çıkan spesifik ekserji değerleridir. T_0 çevre sıcaklığını, T ise hücre sıcaklığını ifade eder. $\dot{Q}_{in}$ ve $\dot{W}_{in}$, sırasıyla ısı ve iş giriş hızlarını temsil ederken, Ex_d ekserji yıkım hızıdır. Ekserji yıkımı, doğrudan entropi üretimi ile orantılı olduğundan, Ex_d şu şekilde ifade edilir:

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

Sistemler bir veya daha fazla faydalı çıktıya sahip olabilir. Bu nedenle, verimlilik hesaplamaları tek bir faydalı çıktıya veya birden fazla çıktıya göre yapılabilir. Bu çalışma yalnızca hidrojen üretime odaklandığından, enerji verimliliği yalnızca hidrojen üretime dayanarak hesaplanır. Dolayısıyla, mevcut klor-alkali reaktörünün enerji verimliliği denklemi şu şekilde verilmiştir:

$$\eta_{en} = \frac{\dot{m}_1 HHV_{H_2}}{\dot{W}_{in} + \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_6 h_6} \quad (13)$$

Burada hidrojenin daha yüksek ısıtma değeri (HHV) ile gösterilir ve değeri 142MJ/kg' dır.

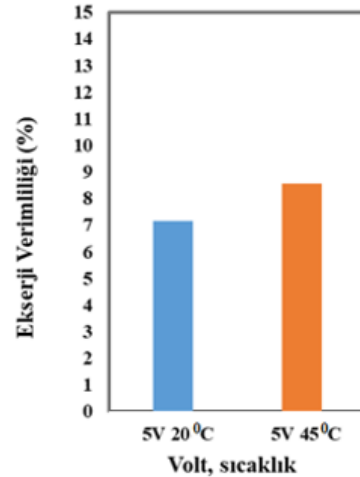
Ekserji verimliliğinin hesaplanması, sistemlerdeki tersinmezlik nedeniyle oluşan kayıplar ve yapılabilecek iyileştirmeler hakkında fikir verdiği için çok önemlidir. Dolayısıyla, mevcut klor-alkali reaktörünün yalnızca

hidrojen üretilmesiyle ilgili ekserji verimliliği denklemi şu şekilde verilmiştir:

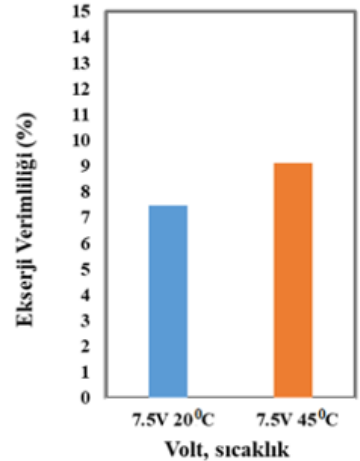
$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}_4 ex_4}{\dot{W}_{in} + \dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_6 ex_6} \quad (14)$$

3. Sonuçlar ve Tartışma

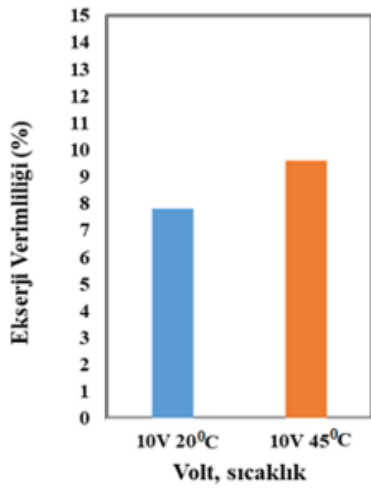
Bu çalışmada, $ZnCl_2$ çözeltisi kullanılarak geliştirilen klor-alkali reaktör sisteminin farklı sıcaklık ve hücre voltajı koşullarındaki hidrojen üretim performansı ve ekserji verimliliği incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4, 5 ve 6'da sunulmakta olup, sistemin ekserji verimliliğinin hem sıcaklık hem de uygulanan voltajla birlikte belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Şekil 4, sabit hücre gerilimi 5V ve 0.3 g/s elektrolit akışı altında, 20 °C ve 45 °C çalışma sıcaklıklarına göre $ZnCl_2$ tuzunun ekserji verimliliklerini göstermektedir. Aynı şekilde Şekil 5, sabit hücre gerilimi 7,5 V ve 0.3 g/s elektrolit akışı altında, 20 °C ve 45 °C çalışma sıcaklıklarına göre $ZnCl_2$ tuzunun ekserji verimliliklerini göstermektedir. Şekil 6, sabit hücre gerilimi 5 V ve 0.3 g/s elektrolit akışı altında, 20 °C ve 45 °C çalışma sıcaklıklarına göre $ZnCl_2$ tuzunun ekserji verimliliklerini göstermektedir.



Şekil 4. Çalışma sıcaklığına göre test edilen tuzların ekserji verimliliği.



Şekil 5. Çalışma sıcaklığına göre test edilen tuzların ekserji verimliliği.



Şekil 6. Çalışma sıcaklığına göre test edilen tuzların ekserji verimliliği.

5V'ta çalışılan koşullarda ekserji verimliliği, 20 °C'de % 7,14 iken 45 °C'de % 8,55'e yükselmiştir (Şekil 4). Benzer şekilde, 7,5 V'ta % 7,48'den % 9,11'e (Şekil 5) ve 10 V'ta % 7,82'den % 9,58'e (Şekil 6) çıkmıştır. Bu artış, yüksek sıcaklıklarda $ZnCl_2$ çözeltisi içinde oluşan oksit tabakasının çözünmesiyle reaksiyon kinetiğinin hızlanmasından kaynaklanmaktadır (Roy vd. 2022).

Çizelge 2. Farklı tuz çözeltileriyle gerçekleştirilen klor-alkali reaksiyonlarının enerji ve ekserji analizleri.

	Kullanılan Elektrolit Türü	Enerji Verimliliği (%)	Ekserji Verimliliği (%)
Damarseckin 2024	$ZnCl_2$	10,11-13,89	-
Erden vd. 2024	NaCl	18,36-21,83	11,79-14,87
Erden vd. 2024	KCl	21,29-24,51	13,94-16,52
Erden vd. 2024	$CaCl_2$	11,96-16,11	9,83-12,04
Bu Çalışma	$ZnCl_2$	-	7,14-9,58

Çizelge 2'de verilen değerler incelendiğinde bu çalışmada farklı sıcaklık ve voltajlarda $ZnCl_2$ kullanılarak elde edilen ekserji verimliliği % 7,14 – % 9,58 aralığında değerler bulunmuştur. Damarseckin 2024'teki yaptığı çalışmada benzer sıcaklıklarda (20 °C ve 45 °C) gerçekleştirdiği çalışmada enerji verimlilikleri % 10,11 – % 13,89. Buna karşılık, Erden vd. 2024 tarafından daha yüksek sıcaklık aralıklarında (30 °C – 70 °C) yapılan çalışmalarda, NaCl, KCl ve $CaCl_2$ çözeltileri ile elde edilen enerji ve ekserji verimlilikleri verilmiştir.

Sonuçlar, genel eğilim itibarıyla Erden ve Karakilcik (2024) tarafından farklı tuzlarla yapılan çalışmalarla uyumlu olmakla birlikte, bu çalışma literatürde $ZnCl_2$ çözeltisiyle yapılan ilk ekserji temelli değerlendirme olma özelliğini taşımaktadır. Ayrıca, sistemde gözlenen anot aşınması, $ZnCl_2$ 'nin reaktif klor üretimiyle birlikte anot malzemesi üzerinde oluşturduğu kimyasal etkilerin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

$ZnCl_2$ 'nin kullanımı, sadece hidrojen üretimini değil, aynı zamanda değerli bir yan ürün olan $Zn(OH)_2$ 'nin elde

edilmesini de mümkün kılmaktadır. Bu durum, NaCl gibi yaygın elektrolitlere kıyasla $ZnCl_2$ 'yi hem çevresel hem ekonomik açıdan avantajlı kılmakta, bu yönüyle çalışma, sadece üretim miktarına değil, ürün çeşitliliğine de katkı sağlayan özgün bir yaklaşım sunmaktadır.

Bu sonuçlar, hem ekserji verimliliği hem de sistem tasarımı açısından $ZnCl_2$ bazlı klor-alkali sistemlerin sürdürülebilir hidrojen üretimi için güçlü bir alternatif oluşturabileceğini göstermektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak
Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

4. Kaynaklar

- Adebayo, TS. Awosusi, AA. Oladipupo, SD. Agyekum, EB. Jayakumar, A. and Kumar, NM., 2021. Dominance of fossil fuels in Japan's national energy mix and implications for environmental sustainability. *Int J Environ Res Publ Health*. 18:7347.
- Bičáková, O. and Straka, P., 2012. Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness. *Int J Hydrogen Energy*. 37:16
- BoroumandJazi, G. Rismanchi, B. and Saidur, R., 2013. A review on exergy analysis of industrial sector. *Renew Sustain Energy Rev*. 27:198–203.
- Brinkmann, T. Santonja, GG. Schorcht, F. Roudier, S. and 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. and Boles, MA., 2013. Termodinamik. Yedinci baskı. Ankara: Palme yayıncılık.
- Damarseckin, S., 2024. Hydrogen production from $ZnCl_2$ salt: Application of chlor-alkali method. *Int J Hydrogen Energy*. 88:888-897
- Dincer, I. and Rosen, MA., 2012. Energy, environment, and sustainable development. Oxford: Elsevier.
- Erden, M. and Karakilcik, M., 2024. Experimental investigation of hydrogen production performance of various salts with a chlor-alkali method. *Int J Hydrogen Energy*. 52:546–60.
- Hammer, Th. Kappes, Th. and Baldauf, M., 2004. Plasma catalytic hybrid processes: gas discharge initiation and

- plasma activation of catalytic processes. *Catalysis Today*. Energy Conversion and Management. 89:1-2
- Konieczny, A. Mondal, K. Wiltowski, T. and Dydo, P., 2008. Catalyst development for thermocatalytic decomposition of methane to hydrogen. *Int J Hydrogen Energy*. 33:1
- Longden, T. Beck, F.J. Jotzo, F. Andrews, R. and Prasad, M., 2022. Clean hydrogen comparing the emissions and costs of fossil fuel versus renewable electricity based hydrogen. *Appl Energy*. 306:118145. Part B.
- Oliveira, AM. Beswick, RR. and Yan, Y., 2021. A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Curr. Opin. Chem. Eng*. 33:100701.
- Rabbani, M. Dincer, I. and Naterer, GF., 2014. Experimental investigation of processing parameters and effects on chloralkali products in an electrolysis based chloralkali reactor. *Chem Eng Process*. 82:9–18.
- Roy, H. Barua, S. Ahmed, T. Mehnaz, F. Islam, MdS. and 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.
- Salameh, T. Abdelkareem, MA. Olabi, AG. Sayed, ET. Al Chaderchi, M. and Rezk, H., 2021. Integrated standalone hybrid solar PV, fuel cell and diesel generator power system for battery or supercapacitor storage systems in Khorfakkan, United Arab Emirates. *Int J Hydrogen Energy*. 46:6014-27.
- Sigurvinsson, J. Mansilla, C. Arnason, B. Bontemps, A. Mareşal, A. Sigfusson, TI. and Werkoff, F., 2006. Heat transfer problems for the production of hydrogen from geothermal energy. 47:20
- Tarhan, C. and Çil, MAA., 2021. Study on hydrogen, the clean energy of the future: hydrogen storage methods. *J Energy Storage*. 40:102676
- Yang, J. Sudik, A. Wolverton, C. and Siegel, DJ., 2010. High capacity hydrogen storage materials: attributes for automotive applications and techniques for materials discovery. *Chem Soc Rev*. 39:656–75.
- Yaqoob, SJ. Motahhir, S. and Agyekum. EB., 2022. A new model for a photovoltaic panel using Proteus software tool under arbitrary environmental conditions. *J Clean Prod*. 333:130074.
- Zhang, X. O'Brien, J.E. Tao, G. Zhou, C. and Housley, G.K., 2015. Experimental design, operation, and results of a 4 kW high temperature steam electrolysis experiment. *Journal of Power Sources*. 297:90-97
- Zhao, Y. Ramzan, M. Adebayo, TS. Oladipupo, SD. Adeshola, I. and Agyekum, EB., 2021. Role of renewable energy consumption and technological innovation to achieve carbon neutrality in Spain: fresh insights from wavelet coherence and spectral causality approaches. *Front. Environ Sci*. 9:769067.