



بررسی تاثیر متغیرهای عملیاتی الکترولایزر برای افزایش کارایی در تولید گاز هیدروکسی با توجه به فرآیندهای حرارتی و الکتریکی

رضا شهرکی شهدآبادی¹، سید علی بهبهانی‌نیا^{2*}، سید محمد جواد حسینی کھساری³

1- دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

2- دانشیار، مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

*alibehbahania@kntu.ac.ir

چکیده

الکترولیز آب یکی از روش‌های کارآمد برای تولید گاز هیدروکسی به‌عنوان سوخت پاک محسوب می‌شود. این پژوهش به بررسی اثر نوع و غلظت الکترولیت (آب مقطر، آب شهری، پتاسیم هیدروکسید، سدیم هیدروکسید) دما و شدت جریان در یک الکترولایزر چندسلولی خشک با طراحی اختصاصی می‌پردازد. آزمایش‌ها در بازه‌های غلظت ۵ تا ۲۰٪ وزنی و دماهای ۲۳ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در این پژوهش از سیستم‌های اندازه‌گیری دقیق و تکرار سه‌باره آزمایش‌ها برای اطمینان از اعتبار داده‌ها، دقت و رویکرد سیستماتیک استفاده شده است. نتایج نشان دادند که ترکیب پتاسیم هیدروکسید با غلظت ۱۵ تا ۲۰٪ وزنی، در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و شدت جریان ۱۰ تا ۱۵ آمپر، بالاترین میزان تولید گاز (تا ۱۵۶ لیتر بر ساعت) را با مصرف انرژی بهینه (۱.۳ تا ۲ وات‌ساعت بر لیتر) فراهم می‌کند. همچنین با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید تا ۲۰٪، مقاومت محلول به طور مشخص کاهش و هدایت الکتریکی افزایش یافت، اما مقادیر بالاتر از این محدوده عملاً با افزایش بیش از حد مصرف انرژی و ریسک خوردگی همراه شدند. علاوه بر این، مقاومت اهمی الکترولایزر تابع نوع الکترولیت و سختی آب بوده و افزایش دما موجب بهبود بازدهی فرآیند شد.

کلیدواژه‌گان: الکترولایزر، تولید گاز هیدروکسی، الکترولیت‌های مختلف، پتاسیم هیدروکسید، سدیم هیدروکسید

Investigating the effect of electrolyzer operating variables to increase the efficiency in hydroxy gas production with regard to thermal and electrical processes

Reza Shahraki Shahdabadi¹, Seiyed Ali Behbahania^{2*}, Seiyed Mohammad javad Hosseini Khsari³

1- PhD Student, Energy Systems Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Energy Systems Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Mechanical Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran

* alibehbahania@kntu.ac.ir

Received: 31 January 2025 Accepted: 18 August 2025

Abstract

Water electrolysis is considered an efficient method for producing hydroxy gas as a clean fuel. This study investigates the effect of electrolyte type and concentration (distilled water, tap water, potassium hydroxide, sodium hydroxide), temperature, and current intensity in a custom-designed, multi-cell dry electrolyzer. Experiments were conducted with electrolyte concentrations ranging from 5 to 20% wt and temperatures from 23 to 70 °C. The research employed precise measurement systems and a three-repetition experimental design to ensure data validity, accuracy, and a systematic approach. The results indicated that a potassium hydroxide solution with a concentration of 15-20% wt, at a temperature of 70 °C and a current intensity of 10-15 A, provided the maximum gas production (up to 156 L/hr) with optimal energy consumption (1.3-2 Wh/L). Furthermore, increasing the potassium hydroxide concentration up to 20% significantly reduced the solution's resistance and increased electrical conductivity; however, values exceeding this range were practically associated with excessive energy consumption and corrosion risk. Additionally, the ohmic resistance of the

electrolyzer was dependent on the type of electrolyte and water hardness, and increasing the temperature improved the efficiency of the process.

Keywords: Electrolyzer, hydroxy gas production, various electrolytes, KOH, NaOH

1- مقدمه

امروزه سوخت‌های فسیلی جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف دارند اما با توجه به استفاده بی‌رویه این سوخت‌ها، آلاینده‌گی حاصل از سوخت‌های فسیلی افزایش یافته که باعث مشکلاتی مانند گرمایش کره زمین، آلاینده‌گی‌های زیست محیطی و ... شده است. راهکارهای مختلفی مانند استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی، بادی، زیست توده و ... در جهان در حال گسترش هستند تا استفاده از سوخت‌های فسیلی و اثرات مخرب آن‌ها را کاهش دهند [1]. از طرفی استفاده از سوخت‌های مکمل مانند گاز هیدروژن همراه با سوخت‌های فسیلی روزه‌روز در حال افزایش است. گاز هیدروژن قابلیت اشتعال بالایی دارد و به وفور در طبیعت و به ویژه آب وجود دارد [2]. این گاز قادر است تا آلاینده‌گی حاصل از احتراق را کاهش داده و باعث بهبود فرآیند احتراق شود. گاز هیدروژن در آب به فراوانی وجود دارد و با استفاده از فرآیندی به نام الکترولیز می‌توان با مصرف انرژی الکتریکی آب را به هیدروژن و اکسیژن تفکیک کرد. با مخلوط کردن هیدروژن و اکسیژن پس از فرآیند جداسازی از آب، گاز هیدروکسی حاصل می‌شود [3]. امروزه پژوهشگران تلاش می‌کنند تا با استفاده از فرآیند الکترولیز و کاهش مصرف انرژی در این فرآیند و دستیابی به میزان حجم گاز تولیدی بیشتر بپردازند [4]. در همین راستا در ادامه به بررسی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه پرداخته خواهد شد.

همانگونه که Alam¹ و همکاران (2017) گزارش کردند [5]، با تغییر جریان، ولتاژ و غلظت الکترولیت در فرآیند الکترولیز آب قلیایی و با استفاده از الکترودهای صفحه موازی استیل ۳۱۶، تولید گاز هیدروکسی به شکل محسوس افزایش یافت. نتایج تجربی این پژوهش نشان داد که با افزایش ولتاژ، دما و غلظت الکترولیت محلول قلیایی، تولید گاز هیدروکسی با کاهش مصرف انرژی الکتریکی، حدود ۳۰ تا ۴۰٪ رشد داشته است. همچنین روسدینساری^۲ و همکاران (2019) [6] با استفاده از فرآیند الکترولیز به بررسی بهینه‌ترین حالت برای تولید گاز هیدروکسی و مصرف انرژی پرداختند و بیان کردند که بهترین حالت عملکرد مربوط به غلظت ۵٪ جرمی سدیم هیدروکسید و شدت جریان ۱۵ آمپر است که در این شرایط میزان 1/028 لیتر بر دقیقه گاز هیدروکسی با بازده 89/13 درصد حاصل می‌شود. بر اساس نتایج سابرامیان^۳ و همکاران (2020) [7] تولید گاز هیدروکسی از طریق الکترولیز نه تنها به‌طور تجربی بلکه تحلیل عددی نیز مورد بررسی قرار گرفت که پیش‌بینی میزان تولید حداکثر 0/75 لیتر بر دقیقه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و شدت جریان ۴۰ آمپر را نشان داد. نتایج عددی در شرایط کاری مشابه، تولید 1/3 لیتر بر دقیقه گاز هیدروکسی را پیشنهاد می‌دهد. همچنین گاد^۴ و همکاران (2021) [8] نشان دادند که نوع الکترولیزر (خشک یا مرطوب) تأثیر مستقیم بر کارایی موتور دیزل و میزان آلاینده‌گی دارد؛ به‌طوری که در آزمایش آن‌ها، الکترولیزر خشک و تر به ترتیب 0/5 و 0/75 لیتر بر دقیقه گاز

هیدروکسی تولید کردند و افزودن این گاز بازده حرارتی موتور را به ترتیب ۱۶ و ۲۰ درصد افزایش داد، اما منجر به افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن به ترتیب ۳۵ و ۴۲ درصد شد. در پژوهش شریف و همکاران (2021) [9] تولید گاز هیدروکسی به عنوان منبع انرژی پاک برای موتور جرقه‌زنی مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج نشان داد افزایش نسبت جرمی سدیم هیدروکسید در آب به طور مستقیم باعث افزایش تولید گاز شده، در حالی که الکترولیت‌هایی مانند Na₂CO₃ و سرکه تأثیر قابل‌توجهی نداشتند. مطالعات یون و همکاران (2023) [10] نیز بر روی تولید هیدروژن آبی مبتنی بر احتراق سوخت با ادغام الکترولیز آب متمرکز بوده است و نشان دادند که رفرمینگ متان بخار همراه با سلول الکترولیز اکسید جامد، بالاترین راندمان حرارتی (85/2٪) و راندمان انرژی (80/5٪) را ارائه داده که نسبت به تنها رفرمینگ متان بخار (به ترتیب 78/4٪ و 70/4٪) مقادیر بالاتری است. همچنین طبق بررسی چنگ^۵ و همکاران (2023) [11] با استفاده از رویکرد یادگیری ماشین، پتانسیل تولید هیدروژن سبز از الکترولیز آب با انرژی خورشیدی در چین پیش‌بینی شد. نتایج آن‌ها نشان داد که تولید روزانه هیدروژن در منطقه فلات کوهستان، 32/5 × ۱۰۳ کیلوگرم بر کیلومتر مربع است و با استفاده از زمین‌های بلااستفاده در دو منطقه، انتظار می‌رود تولید سالانه به 8/3368 × ۱۰⁹ تن برسد. اساس تحقیقات وتامونی^۶ و همکاران (۲۰۲۳) [12] نیز، تأثیر دما بر تولید هیدروکسی با استفاده از الکترولیز آب قلیایی و دو سلول به صورت موازی مورد بررسی قرار گرفت؛ نتایج نشان داد که دما تأثیر قابل توجهی بر میزان تولید هیدروکسی ندارد، اگرچه تغییر غلظت الکترولیت باعث تغییر رنگ می‌شود. در ارزیابی لی و همکاران (۲۰۲۳) [13]، کارایی سیستم تولید هیدروژن با استفاده از نیروی هیدروولتاژیک تجدیدپذیر بررسی شد. آن‌ها گزارش کردند ژنراتور مبتنی بر اسفنج سلولزی در شرایط آزمایشگاهی قادر است گاز هیدروژن را با نرخ 0/81 میکرومول در ساعت تولید نماید. اوزان^۷ و همکاران (۲۰۲۳) [14] تحلیل کردند که هزینه تولید هیدروژن سبز توسط فناوری باد فراساحلی از ۶.۲۶ یورو بر کیلوگرم در سال ۲۰۲۳ تا 1/13 یورو بر کیلوگرم در سال ۲۰۵۰ کاهش خواهد یافت و هزینه کلی هیدروژن با احتساب حمل سوخت از 10/7 یورو در ۲۰۲۳ به 2/42 یورو در ۲۰۵۰ خواهد رسید. ساری^۸ و همکاران (۲۰۲۳) [15] تحلیل کردند که در الکترولیزر سلول خشک، استفاده از صفحات استیل ۳۱۶ در ترکیب با سدیم هیدروکسید به عنوان الکترولیت منجر به تولید هیدروژن با مصرف توان کمتر و راندمان بالاتر نسبت به فلزات دیگر مانند مس و آلومینیوم می‌شود، به‌گونه‌ای که میانگین مصرف برق برای استیل ۳۱۶ کمتر از سایرین بود. شهرکی و همکاران (۲۰۲۳) [16] با بررسی عملکرد الکترولیزر چند سلولی مبتنی بر پنل‌های خورشیدی نتیجه گرفتند که طراحی بهینه الکترولیزر با ۱۸، ۱۷ و ۱۵ صفحه وابسته به تعداد پنل‌های خورشیدی، بازدهی تولید را به ترتیب ۵۳۰،

5. Cheng
6 Vethamony
7 Ozan
8 Sari

1. Alam
2. Rusdianasari
3. Subramanian
4. Gad

دما، نوع الکترولیت، غلظت الکترولیت و مقدار توان مصرفی الکترولیزر چند سلولی از نوع سلول خشک پرداخته خواهد شد. همچنین آب شهری با سختی-های متفاوت (از آب مقطر تا آب شور دریا) مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این پژوهش وابستگی ولتاژ به شدت جریان، شدت مصرف انرژی الکترولیزر، مقایسه هدایت الکتریکی الکترولیت‌های مختلف مانند آب مقطر، آب شور دریا، سدیم هیدروکسید (غلظت جرمی 5٪، 10٪، 20٪) و پتاسیم هیدروکسید (غلظت جرمی 5٪، 10٪، 20٪) بررسی خواهد شد. سپس میزان تولید گاز هیدروکسی در طول زمان، توان مصرفی الکترولیزر در طول زمان در غلظت‌های مختلف بررسی خواهد شد. نوآوری و وجه تمایز این پژوهش با دیگر مقالات در حوزه تولید گاز هیدروکسی و بهینه‌سازی فرآیند الکترولیز به موارد زیر بازمی‌گردد:

1-2- تمرکز جامع بر پارامترهای عملیاتی مختلف

این مطالعه به طور خاص به بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر نوع الکترولیت، غلظت الکترولیت، دما، توان مصرفی و سختی آب پرداخته است. برخلاف بسیاری از تحقیقات پیشین که تنها به یکی از این موارد می‌پرداختند، این تحقیق با بررسی هم‌زمان این عوامل و ارتباطات میان آن‌ها به درک جامع‌تری از بهینه‌سازی فرآیند تولید گاز هیدروکسی دست یافته است.

1-3- استفاده از غلظت‌های مختلف الکترولیت‌ها و مقایسه عملکرد

پژوهش حاضر به بررسی دقیق دو الکترولیت پتاسیم هیدروکسید (KOH) و سدیم هیدروکسید (NaOH) در سه غلظت مختلف پرداخته خواهد شد و مقایسه عملکرد میان این دو الکترولیت از نظر تولید گاز، هدایت الکتریکی و پایداری دمایی انجام خواهد شد.

1-4- تأثیر سختی آب بر تولید گاز و هدایت الکتریکی

در این تحقیق گستره‌ای از سختی آب شامل آب مقطر، آب شهری و آب شور دریا مورد ارزیابی قرار گرفته است که تا کنون در پژوهش دیگری بررسی نشده است.

1-5- تمرکز بر بهینه‌سازی مصرف انرژی

در این تحقیق محدوده بهینه مصرف انرژی و رفتار الکترولیزر در شدت جریان‌های مختلف بررسی شده است. همچنین، رفتار انرژی و توان مصرفی در شرایط مختلف عملیاتی با هدف کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری تحلیل شده است.

1-6- رویکرد دقیق و جامع آزمایشگاهی

استفاده از سیستم‌های اندازه‌گیری دقیق و تکرار سه‌باره آزمایش‌ها برای اطمینان از اعتبار داده‌ها، دقت و رویکرد سیستماتیک تحقیق را از دیگر مقالات متمایز کرده است.

ساختار این مقاله به شرح زیر است: پس از بیان مقدمه و معرفی پژوهش‌های اخیر مرتبط، بخش دوم به ارائه مواد، تجهیزات و روش انجام آزمایش‌ها اختصاص دارد. در بخش سوم، نتایج آزمایش‌های انجام‌شده همراه با تحلیل

۶۰۰ و ۵۳۳ لیتر بر متر مربع نشان داده است. نتایج پژوهش گرواش^۱ (۲۰۲۴) و همکاران [17] حاکی از آن است که الکترولیز با مدولاسیون عرض پالس (PWM) به صورت قابل توجهی بازده تولید هیدروژن را در بارهای کم جریان مستقیم بهبود می‌دهد و با جلوگیری از ایجاد گرمای بیش از حد، حداکثر راندمان عملکرد سیستم را حفظ می‌کند و مشکلات حرارتی موجود در روش‌های کنترل قبلی را نیز کاهش می‌دهد. همچنین، بنجامین و همکاران (۲۰۲۴) [18] تجزیه و تحلیل عملکرد افزودن گاز هیدروکسی به ژنراتور بنزینی را انجام دادند و به بررسی ارتباط بین تغییرات غلظت هیدروکسید پتاسیم و تولید گاز هیدروکسی در طول زمان، همچنین رابطه بین تغییرات ولتاژ و تولید گاز پرداختند. ستار و همکاران (2024) [19] به بررسی عملکرد تجربی الکترولیزر تولید کننده گاز هیدروکسی پرداختند. الکترولیزر ساخته شده توسط آن‌ها از جنس فولاد ضد زنگ و الکترولیت پتاسیم هیدروکسید بود. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان تولید گاز هیدروکسی در شدت جریان 16 آمپر و غلظت 2/5 گرم در لیتر پتاسیم هیدروکسید برابر با 11/72 میلی‌لیتر در دقیقه بر وات خواهد بود. از طرفی نایاک^۲ و همکاران (2024) [20] به بررسی میزان تولید گاز هیدروکسی از طریق الکترولیز به روش مدلسازی و تجربی پرداختند. این مدل محدوده مصرف انرژی را بین 72 تا 88 درصد با دمای عملیاتی 30 تا 80 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش تعداد صفحات الکترولیزر باعث افزایش ولتاژ و در نتیجه افزایش میزان تولید گاز هیدروکسی خواهد شد. موسی و همکارانش (2024) [21] به بررسی بازده تبدیل انرژی در فرآیند الکترولیز خشک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد افزایش ولتاژ (۱۰.۵ تا ۱۳ ولت) و غلظت پتاسیم هیدروکسید (۰.۰۵ تا ۰.۲۰ مولار)، باعث افزایش نرخ تولید گاز هیدروکسی و دمای محلول شده است. همچنین، سلول‌های خشک نسبت به نوع تر در همان شرایط عملکرد بهتری داشتند و برای بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر مناسب‌تر ارزیابی شدند. از طرفی موغال^۳ و همکاران (2024) [22] با آزمایش سه نوع آرایش الکترودی مختلف و بررسی غلظت‌های متفاوت پتاسیم هیدروکسید، نشان دادند که آرایش شامل یک صفحه خنثی و غلظت ۴ گرم بر لیتر پتاسیم هیدروکسید بیشترین بازده تولید گاز را دارد. پایداری عملکرد در این آرایش نیز بهتر از سایر حالت‌ها گزارش شد. اسناوی^۴ و همکاران (2025) [23] اثر ترکیب گاز هیدروکسی با سوخت بیودیزل را در عملکرد موتور دیزل بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که تزریق هیدروکسی به میزان ۵۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، باعث افزایش چشمگیر راندمان حرارتی در مخلوط‌های B40H و B30H شد که به ترتیب 7/95٪ و 8/68٪ بهبود یافتند همچنین اکل و همکاران (2025) [24] یک ژنراتور هیدروکسی بهبود یافته با سیستم خنک‌کننده طراحی کردند. این ژنراتور در شرایط بهینه (۳۰ گرم KOH و خنک‌کننده فعال) توانست بازده ۲۱.۴٪ در توان ۲۵ وات فراهم کند، که در مقایسه با مدل قبلی (۳۰ وات)، صرفه‌جویی انرژی ۱۶.۷٪ داشت. بررسی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که تولید گاز هیدروکسی و بهینه‌سازی مصرف انرژی الکترولیزر جهت دستیابی به گاز هیدروکسی بیشتر در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است. در همین راستا در این پژوهش به بررسی پارامترهای عملیاتی الکترولیزر مانند

³ Mughal

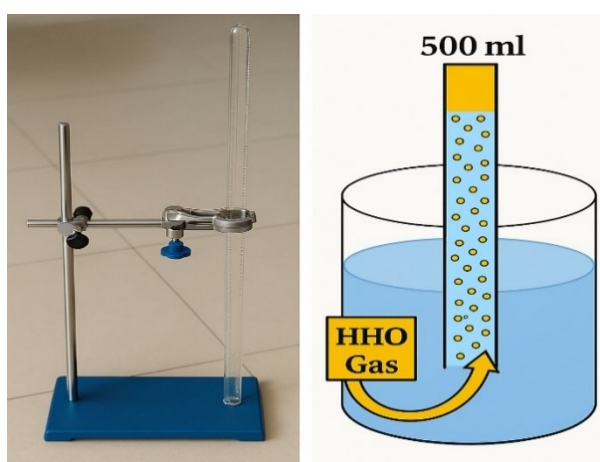
⁴ Asnawi

1 Gervash

2. Nayak

از یک سیستم جمع‌آوری گاز به روش جابه‌جایی آب بهره‌گیری شد. در این روش، یک استوانه مدرج پر از آب به حالت وارونه در مخزن آب قرار گرفت و شلنگ خروجی الکترولایزر به دهانه آن متصل شد. گاز تولیدشده به تدریج وارد استوانه شده و باعث خروج آب از آن می‌گردد. حجم گاز تولیدی بر اساس درجه‌بندی استوانه و با ثبت زمان پر شدن حجم مشخصی از آن اندازه‌گیری شد.

این سیستم به دلیل ساختار ساده، عملکرد مطمئن و هزینه پایین، یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای جمع‌آوری گازهای آزمایشگاهی به شمار می‌رود و نیاز به تجهیزات الکترونیکی پیچیده ندارد. جهت کاهش خطای احتمالی ناشی از تغییرات محیطی یا نوسانات منبع تغذیه، هر آزمایش به‌صورت جداگانه سه مرتبه تکرار شد و میانگین نتایج به‌عنوان داده نهایی ثبت گردید. این رویکرد باعث افزایش دقت، قابلیت اطمینان و امکان مقایسه صحیح نتایج در شرایط مختلف شد.



شکل 2 سیستم اندازه‌گیری تولید گاز هیدروکسی

در ادامه محدودیت‌های پژوهش حاضر ذکر شده است. این پژوهش تنها به آزمایش‌های آزمایشگاهی محدود شده و کاربرد نتایج در محیط‌های صنعتی یا عملیاتی به علت خطرات استفاده از گاز هیدروکسی بررسی نشده است. تمرکز پژوهش بر دو نوع الکترولیت (پتاسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید) بوده که بیشترین کاربرد و تاثیر را در دیگر پژوهش‌ها از خود نشان داده‌اند. انواع سختی آب تنها به آب مقطر، آب شهری و آب شور دریا تا سختی 35200 محدود شده است. شدت جریان بیشینه و ولتاژ مصرفی بیشینه می‌تواند افزایش پیدا کند اما با توجه به منبع تغذیه‌های فعلی موجود امکان بررسی در ولتاژ و شدت جریان بالاتر وجود ندارد. همچنین طول عمر و پایداری سیستم در استفاده‌های طولانی‌مدت به علت مصرف شدت جریان بالا در بخش خانگی و دمای عملیاتی صرفاً تا 70 درجه سانتی‌گراد بررسی شده و تاثیر دماهای بالاتر با توجه به امکانات موجود فراهم نبود.

با توجه به طراحی روش آزمایشگاهی و متغیرهای مورد بررسی شامل نوع و غلظت الکترولیت‌ها، سختی آب، دما و شدت جریان، در ادامه داده‌های حاصل از آزمایش‌ها تحلیل شده‌اند تا اثر هر پارامتر بر تولید گاز هیدروکسی، ولتاژ سلول و مصرف انرژی بررسی گردد. در بخش نتایج، یافته‌های حاصل از تکرار سه‌باره آزمون‌ها برای هر شرایط عملیاتی به‌صورت تفصیلی ارائه شده و نشان

تغییرات هر متغیر ارائه خواهد شد. سپس در بخش چهارم، جمع‌بندی نتایج و پیشنهادهایی برای بهبود عملکرد الکترولایزر مطرح می‌شود.

2- مواد، تجهیزات و شرایط انجام آزمایش

در این بخش، ابتدا مشخصات دستگاه‌ها و مواد اولیه مورد استفاده شرح داده شده و سپس نحوه طراحی آزمایش و روش‌های اندازه‌گیری متغیرها بیان می‌شود.

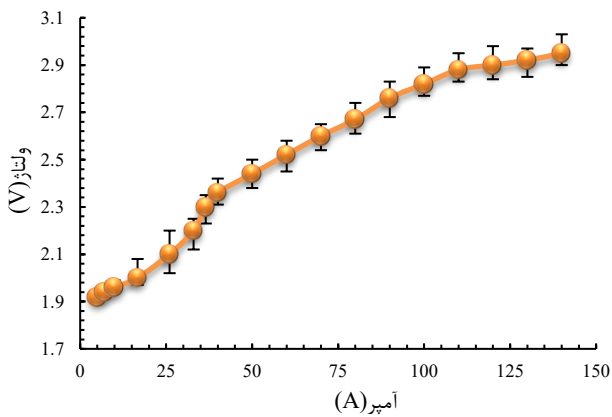
در شکل 1 مجموعه سیستم آزمایشگاهی متشکل از منبع تغذیه، مخزن گاز هیدروکسی، الکترولایزر و... نشان داده شده است. مخزن تعبیه شده از قسمت پایین آن الکترولیت وارد الکترولایزر شده و از قسمت میانی گاز خروجی از الکترولایزر که در شدت جریان‌های بالا حاوی کمی الکترولیت است، وارد مخزن می‌شود و از خروجی بالایی تعبیه شده مخزن گاز هیدروکسی جهت اندازه‌گیری و استفاده خارج می‌شود.



شکل 1 مجموعه سیستم آزمایشگاهی

در این پژوهش، برای تأمین انرژی مورد نیاز الکترولایزر از یک منبع تغذیه جریان مستقیم با قابلیت تنظیم شدت جریان در بازه ۱ تا ۱۴۰ آمپر و ولتاژ ۰ تا ۳۲ ولت استفاده شده است. این دامنه گسترده جریان و ولتاژ، امکان بررسی عملکرد الکترولایزر در شرایط کاری مختلف را فراهم می‌سازد. به‌منظور انتقال جریان بالا با حداقل افت ولتاژ و تلفات انرژی، از کابل‌های مسی ضخیم با مقاومت الکتریکی پایین استفاده گردید. از طرفی با توجه به اینکه تولید گاز هیدروکسی توسط الکترولایزر به صورت مقطعی بوده و تحت تأثیر شرایط تغذیه قرار دارد، اندازه‌گیری دقیق حجم گاز تولیدی ضرورت داشت. برای این منظور،

در محدوده جریان‌های پایین، شیب نمودار بیشتر بوده و افزایش ولتاژ محسوس‌تر است. این رفتار به عواملی نظیر افزایش مقاومت اهمی محلول الکترولیت، محدودیت در هدایت یونی و همچنین مقاومت داخلی اتصالات و صفحات الکترولایزر برمی‌گردد. با افزایش شدت جریان و ورود به محدوده‌های بالاتر، منحنی تغییرات به حالت اشباع نسبی نزدیک می‌شود و نرخ افزایش ولتاژ کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع آن است که با بالا رفتن جریان، فرآیندهای الکتروشیمیایی و انتقال جرم در سطح الکترودها به یک حالت پایدار نزدیک می‌شوند و مقاومت داخلی نسبی سلول کاهش اثر پیدا می‌کند. در این ناحیه، بخش بیشتری از انرژی الکتریکی مستقیماً صرف واکنش الکترولیز می‌گردد و نسبت اتلاف اهمی کمتر است، نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که انتخاب بازه بهینه‌ای از شدت جریان ضروری است؛ به گونه‌ای که ولتاژ سلول در محدوده‌ای قرار گیرد که هم بازده الکتروشیمیایی بالا باشد و هم تلفات انرژی و تولید گرمای ناخواسته به حداقل برسد. این موضوع برای بهره‌برداری اقتصادی از الکترولایزر اهمیت بالایی دارد، زیرا در جریان‌های بیش از حد بالا، علاوه بر کاهش بازده، احتمال آسیب به الکترودها و کاهش عمر مفید سیستم نیز افزایش می‌یابد.



شکل 3 تغییرات ولتاژ و شدت جریان مصرفی الکترولایزر

در شکل 4 نمودار شدت مصرفی انرژی الکترولایزر بر حسب شدت جریان مصرفی نشان داده شده است. محدوده بهینه مصرف انرژی الکترولایزر 10 تا 15 آمپر است، با افزایش شدت جریان مصرفی هر چند تولید گاز هیدروکسی افزایش پیدا می‌کند اما شدت مصرف انرژی نیز به صورت چشم‌گیری افزایش پیدا خواهد کرد که از 2 وات ساعت بر لیتر تا 3/1 وات ساعت بر لیتر افزایش پیدا خواهد کرد. دلیل این رفتار آن است که در جریان‌های بالا، بخشی از انرژی صرف تلفات اهمی و گرمایشی شده و بازدهی تولید گاز افت نسبی پیدا می‌کند. در ابتدای نمودار، با افزایش شدت جریان، شدت مصرف انرژی نیز افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده نیاز به انرژی بیشتر برای افزایش جریان و تولید بیشتر است. پس از رسیدن به حدود 50 آمپر، شدت مصرف انرژی به حالت پایداری می‌رسد و بین مقادیر 2/5 تا 3/5 وات ساعت به لیتر نوسان می‌کند که این مرحله نشان‌دهنده بهینه‌سازی در مصرف انرژی نسبت به جریان مصرفی است، جایی که افزایش جریان بیشتر به افزایش قابل توجهی در مصرف انرژی منجر نمی‌شود.

داده می‌شود که چگونه تغییر این پارامترها بر بهبود عملکرد و بهینه‌سازی فرآیند الکترولیز تأثیر می‌گذارند. هدف از این تحلیل، ارائه راهکارهای مؤثر برای افزایش بازده تولید گاز و کاهش مصرف انرژی در سامانه طراحی شده است. در این پژوهش، به منظور بررسی جامع رفتار الکترولایزر تولید گاز هیدروکسی، پارامترهای متعددی به عنوان متغیرهای کلیدی آزمایشات در نظر گرفته شدند. پارامترهای اصلی مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول 1 نشان داده شده است.

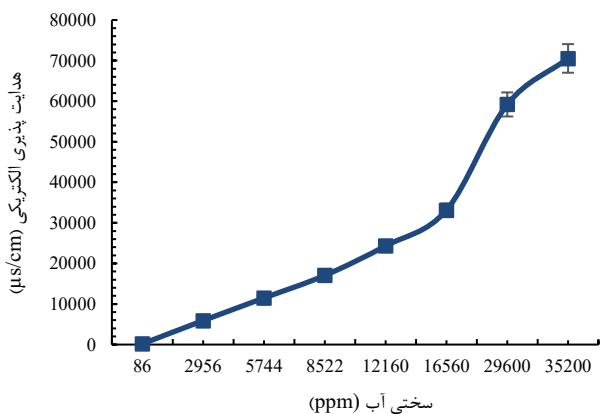
جدول 1: پارامترهای اصلی مورد استفاده در این پژوهش

پارامتر	واحد	بازه/مقدار	توضیحات
نوع الکترولیت	-	سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید، آب شهری، آب شور با سختی‌های مختلف	بررسی چهار نوع الکترولیت مختلف
غلظت الکترولیت	درصد وزنی	5% و 10% و 20%	درصد وزنی سدیم و پتاسیم هیدروکسید در آب
سختی آب	Mg/L	0، آب شهری (متغیر)، آب شور (سختی: 35200)	نشان دهنده میزان یون‌های محلول (شوری آب)
شدت جریان	آمپر	1 تا 140	شدت جریان عبوری از هر سلول الکترولایزر
ولتاژ سلول	ولت	1.9 تا 3.1	اختلاف پتانسیل الکتریکی بین صفحات سلول
دما محلول	درجه سانتیگراد	دما محیط تا 70 درجه	دما عملکردی سیستم در طول آزمایش
تولید گاز هیدروکسی	لیتر/ساعت	0-156	مقدار گاز هیدروکسی تولیدی
توان مصرفی	وات	وابسته به شرایط	ولتاژ * شدت جریان
مصرف ویژه انرژی	وات ساعت/لیتر	1.3-2	انرژی مصرفی برای تولید یک لیتر گاز هیدروکسی

3- نتایج

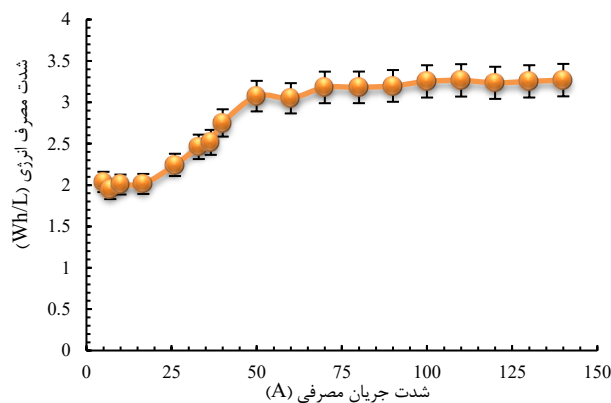
در این قسمت، یافته‌های حاصل از آزمایش‌ها به تفکیک تأثیر نوع الکترولیت، غلظت، شدت جریان و دما بر تولید گاز هیدروکسی و مصرف انرژی مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. شکل 3 روند تغییرات ولتاژ هر صفحه از الکترولایزر را بر حسب شدت جریان نشان می‌دهد. با افزایش شدت جریان، ولتاژ تقریباً خطی افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که ولتاژ از حدود 1/9 ولت در کمترین جریان به حدود 3/1 ولت در جریان‌های بالاتر افزایش پیدا می‌کند.

به طور چشم گیری افزایش می یابد. در مقادیر پایین سختی (86 ppm)، هدایت الکتریکی پایین است، اما با افزایش سختی به 35200 ppm، هدایت الکتریکی به حدود 80000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ می رسد. این رابطه نشان می دهد که با افزایش تعداد یون های موجود در آب، میزان هدایت الکتریکی نیز افزایش می یابد. همچنین نوسانات نمودار می تواند به عواملی نظیر نوسانات دما یا روش های اندازه گیری مرتبط باشد. هدایت الکتریکی معمولاً به عنوان نماینده ای از میزان مواد حل شده در آب به کار می رود. مواد معدنی مانند کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم می توانند به افزایش هدایت الکتریکی کمک کنند. از سوی دیگر، سختی آب معمولاً با مقدار بالای این یون ها (به ویژه کلسیم و منیزیم) مرتبط است و می تواند در کاربردهای صنعتی و خانگی مشکلاتی ایجاد کند و با توجه که به اینکه سختی آب دریا در محدوده 30000 ppm تا 35000 ppm است، می تواند به عنوان الکترولیت در تولید گاز هیدروکسی استفاده شود. تغییر در شیب نمودار هدایت الکتریکی در سختی های بالا به دلیل تغییر در ترکیب یونی آب و ورود یون های با رسانایی بالاتر (مانند یون های موجود در آب دریا) است. در سختی های پایین تر، افزایش هدایت ناشی از یون های معمول آب های شیرین است، در حالی که در سختی های بالاتر، ترکیب یونی به سمت ترکیبات آب دریا تغییر کرده و باعث افزایش سریع تر هدایت الکتریکی می شود.



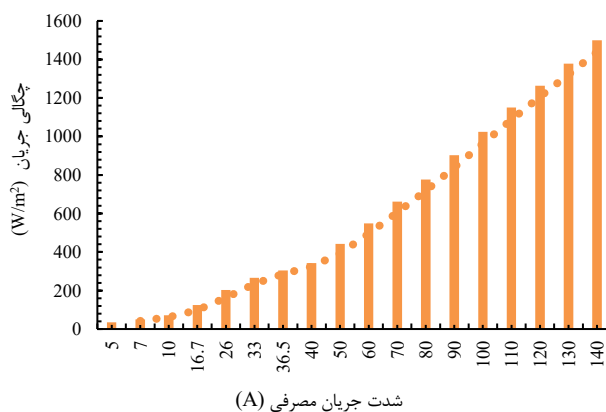
شکل 6 نمودار هدایت پذیری الکتریکی بر حسب سختی های مختلف آب

شکل 7 رابطه بین غلظت جرمی (%) دو محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) و پتاسیم هیدروکسید (KOH) و هدایت الکتریکی آنها را نشان می دهد. هر دو محلول با افزایش غلظت جرمی، افزایش هدایت الکتریکی را نشان می دهند. با افزایش غلظت از 1٪ به 20٪، هدایت الکتریکی هم برای سدیم هیدروکسید و هم برای پتاسیم هیدروکسید به طور معناداری افزایش می یابد. این افزایش نشانگر آن است که تعداد یون های آزاد در محلول بیشتر شده و در نتیجه هدایت الکتریکی افزایش می یابد. پتاسیم هیدروکسید در تمامی غلظت ها هدایت الکتریکی بیشتری نسبت به سدیم هیدروکسید دارد که می تواند به دلیل تفاوت در ویژگی های یون های K^+ و Na^+ باشد. هدایت الکتریکی پتاسیم هیدروکسید، به خصوص در غلظت های بالاتر، بیشتر از سدیم هیدروکسید است که نشان دهنده قابلیت بالاتر یون های K^+ در حمل بار الکتریکی است. در غلظت 1٪، هدایت سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید به ترتیب $21620 \mu\text{S}/\text{cm}$ و $23582 \mu\text{S}/\text{cm}$ است و در غلظت 20٪، هدایت سدیم هیدروکسید به $232589 \mu\text{S}/\text{cm}$ و پتاسیم هیدروکسید به $232589 \mu\text{S}/\text{cm}$



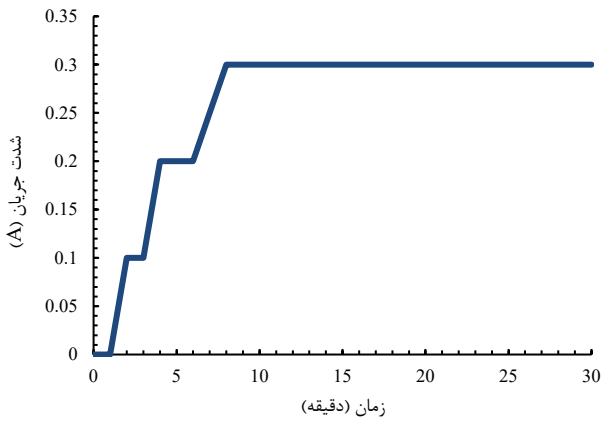
شکل 4 شدت مصرف انرژی الکترولایزر بر حسب شدت جریان

در شکل 5 نمودار چگالی جریان بر حسب شدت جریان مصرفی نشان داده شده است. چگالی جریان از تقسیم توان مصرفی الکترولایزر بر مساحت آن به دست می آید. در ابتدا، با افزایش جریان، یک رشد تقریباً خطی در چگالی جریان دیده می شود. این موضوع اهمیت انتخاب مناسب شدت جریان را برای بهینه سازی عملکرد سیستم نشان می دهد. با تنظیم صحیح جریان، می توان به حداکثر چگالی جریان رسید که موجب افزایش کارایی و کاهش هزینه های عملیاتی می شود. نتایج نشان می دهد که در بالاترین شدت جریان آزمایش شده که 140 آمپر است چگالی جریان به 1500 وات بر متر مربع می رسد و در کمترین شدت جریان مصرفی (5 آمپر) چگالی توان 35 وات بر متر مربع خواهد بود. این نتایج اهمیت انتخاب جریان مناسب برای کاهش هزینه های انرژی و افزایش کارایی سیستم در صنعت را نشان می دهد. افزایش بیش از حد جریان باعث داغ شدن بیش از حد سیستم، کاهش عمر الکتروود و افزایش تلفات انرژی می شود.



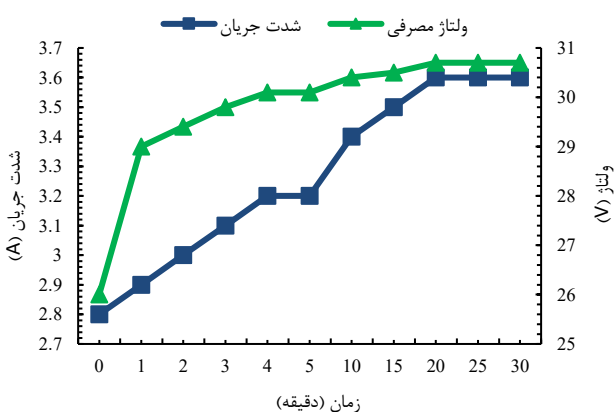
شکل 5 چگالی جریان بر حسب شدت جریان مصرفی الکترولایزر

تاکنون آزمایش ها با استفاده از غلظت 10٪ پتاسیم هیدروکسید انجام شده بود. در ادامه به بررسی الکترولیت های مختلف مانند آب مقطر، آب شور دریا، پتاسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید با غلظت های مختلف پرداخته شده است. شکل 6 رابطه بین سختی آب بر حسب ppm و هدایت الکتریکی آن بر حسب $\mu\text{S}/\text{cm}$ را نشان می دهد. این نمودار یک رابطه مثبت واضح میان سختی و هدایت آب را ارائه می دهد که با افزایش سختی آب، هدایت الکتریکی نیز



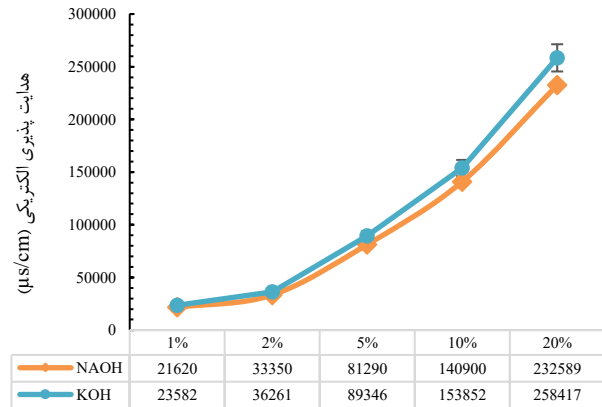
شکل 8 شدت جریان مصرفی الکترولیزر در مدت زمان 30 دقیقه با استفاده از آب مقطر

شکل 9 نمودار میزان ولتاژ و شدت جریان مصرفی الکترولیزر برای تولید گاز هیدروکسی با استفاده از آب شهری با سختی 500 را نشان می‌دهد. شدت جریان از حدود 2/8 آمپر شروع می‌شود و به تدریج افزایش یافته و به 3/25 آمپر می‌رسد. این افزایش نمایانگر بهبود کارایی در الکترولیز است. ولتاژ از 26 ولت شروع شده، به سرعت افزایش یافته و سپس در حدود 30 ولت ثابت می‌شود. این افزایش اولیه برای غلبه بر مقاومت مدار ضروری است. با استفاده از آب شهری، به دلیل وجود املاح، رسانایی بهتر از آب مقطر بوده و عملکرد الکترولیزر بهبود می‌یابد. این نمودار نشان‌دهنده تطبیق و پایداری عملکرد دستگاه با شرایط متغیر است. در شکل 9، شکستگی‌های ناگهانی و پله‌ای شدید دیده شده در آب مقطر (شکل 8) وجود ندارد. این به دلیل رسانایی بالاتر آب شهری و پایداری بیشتر شرایط الکترولیز است. با این حال، تغییرات تدریجی و ملایم در نمودار همچنان می‌تواند ناشی از تغییرات تدریجی در شرایط الکترولیز (دما، حباب‌های گاز، غلظت یون‌ها) و همچنین تنظیمات تدریجی سیستم برای دستیابی به عملکرد مطلوب باشد. نوسانات طبیعی فرآیند الکترولیز نیز می‌توانند به این تغییرات جزئی منجر شوند. در مقایسه با آب مقطر، نمودار آب شهری رفتار پایدارتر و هموارتری را نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده مناسب‌تر بودن آب شهری (با آب با رسانایی مناسب) برای فرآیند الکترولیز و تولید گاز هیدروکسی است.



شکل 9 ولتاژ و شدت جریان الکترولیزر نسبت به زمان با استفاده از آب شهری

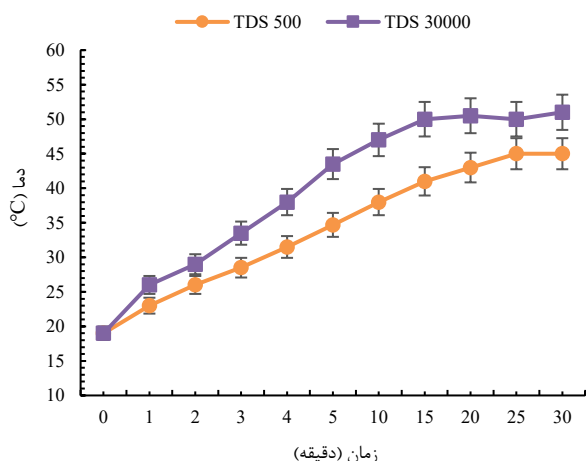
258417 می‌رسد. این اعداد نشان‌دهنده تفاوت‌های جزئی اما معنادار در هدایت الکتریکی بین دو محلول هستند. نمودارها رابطه غیرخطی را نشان می‌دهند که به نظر می‌رسد در غلظت‌های پایین‌تر نسبتاً یکنواخت است و با افزایش غلظت این رابطه شدیدتر می‌شود. این رفتارها معمولاً ناشی از افزایش تعاملات یون‌ها در محلول و تغییر رفتار آنها در غلظت‌های مختلف است. نمودار به وضوح نشان‌دهنده تاثیر غلظت جرمی بر هدایت الکتریکی دو محلول است.



غلظت جرمی (%)

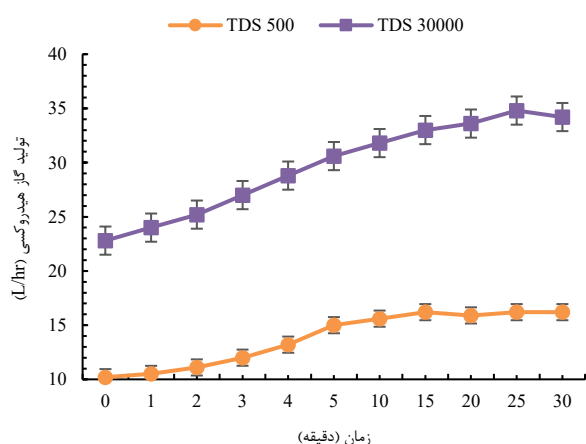
شکل 7 نمودار هدایت پذیری الکتریکی بر حسب غلظت جرمی‌های مختلف سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید

شکل 8 نمودار شدت جریان مصرفی الکترولیزر در مقابل زمان را با استفاده از آب مقطر با سختی نزدیک به صفر نشان می‌دهد. در ابتدا، شدت جریان صفر است و به تدریج افزایش می‌یابد. این افزایش به صورت پله‌ای اتفاق می‌افتد که نشان‌دهنده تنظیمات ثابت در هر مرحله است. در نهایت، جریان به یک مقدار ثابت حدود 0/3 آمپر می‌رسد که نشان می‌دهد سیستم به تعادل دینامیکی دست یافته است. استفاده از آب مقطر، به دلیل رسانایی بسیار پایین، باعث می‌شود که تولید گاز هیدروکسی بسیار ناچیز باشد و عملاً تولید گاز هیدروکسی به صفر خواهد رسید. محتمل‌ترین دلیل برای تغییرات ناگهانی و شکستگی‌ها در نمودار شکل 8، افزایش پله‌ای ولتاژ یا توان اعمالی به الکترولیزر برای غلبه بر رسانایی بسیار پایین آب مقطر است. آب مقطر به خودی خود یون‌های کمی برای هدایت جریان دارد، بنابراین برای ایجاد جریان قابل توجه و شروع الکترولیز، نیاز است که ولتاژ یا توان به صورت مرحله‌ای افزایش یابد. هر پله افزایش، باعث جهش ناگهانی در شدت جریان می‌شود و نمودار پله‌ای شکل را ایجاد می‌کند. همچنین قابل ذکر است که تغییرات شدت جریان با استفاده از آب مقطر بسیار جزئی بوده و باعث پله‌ای شدن نمودار گردیده است.

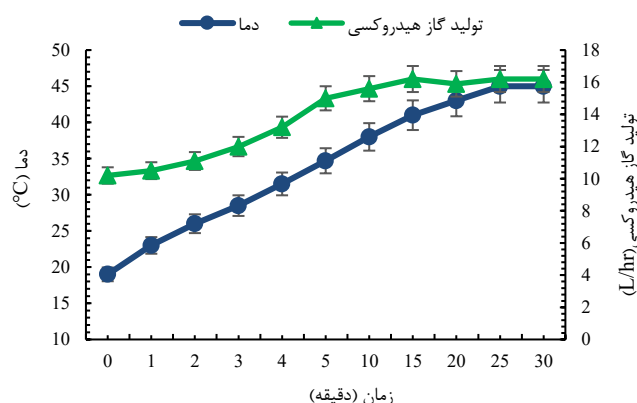


شکل 11 نمودار روند تغییرات دما نسبت به زمان با استفاده از آب با سختی 500 و 30000

شکل 12 به بررسی اثر غلظت‌های مختلف سختی آب (مواد جامد محلول کل) بر تولید گاز هیدروکسی در یک الکترولایزر را نشان می‌دهد. در این نمودار سختی‌های 500 و 30000 بر روی میزان تولید گاز در یک دوره زمانی 30 دقیقه‌ای مقایسه می‌شوند. در نمودار آب با سختی 500، تولید گاز به تدریج و آهسته تا نزدیک به 16 لیتر در ساعت افزایش می‌یابد و یک حالت تقریباً پایدار را در پایان زمان آزمایش نشان می‌دهد. این نشان‌دهنده تولید پایدار اما به نسبت کمتر گاز در سختی پایین‌تر است زیرا رسانایی آب در سختی پایین‌تر کمتر خواهد بود. در مقابل، منحنی با سختی 30000 افزایش شیب‌دارتر و سریع‌تری را نشان می‌دهد که تولید گاز را تا حدود 35 لیتر در ساعت می‌رساند. این امر نشان‌دهنده عملکرد بهتر و کارایی بالاتر سیستم الکترولایزر در سختی‌های بالاتر است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش غلظت یون‌ها و مواد معدنی در آب، رسانایی الکتریکی بهبود یافته و منجر به افزایش تولید گاز می‌شود. این امر تأکید دارد که سختی‌های بالاتر آب، کارآمدتر و بهینه‌تر برای تولید گاز عمل می‌کنند زیرا آب رسانایی بیشتری در سختی بالاتر دارد. همچنین، لازم به ذکر است که علی‌رغم افزایش تولید گاز در سختی بالا، می‌تواند خطرات بالقوه‌ای همچون رسوب‌گذاری یا مشکلات مکانیکی را به همراه داشته باشد، لذا مدیریت و کنترل دقیق پارامترها برای جلوگیری از این مشکلات ضروری است.

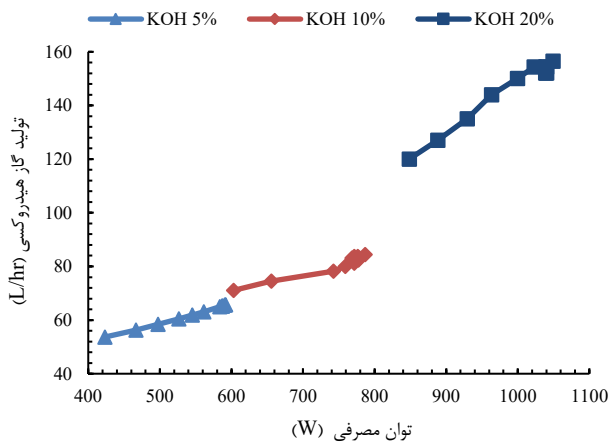


شکل 10 نمودار روند تغییرات دما و تولید گاز هیدروکسی را نسبت به زمان نشان می‌دهد. محور افقی زمان را در بازه 0 تا 30 دقیقه نمایش می‌دهد. محور عمودی سمت چپ دما را با شروع از حدود 20 درجه سانتی‌گراد و افزایش به نزدیک 35 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. این افزایش دما ناشی از فرآیند گرمای در سیستم الکترولایزر است. محور عمودی سمت راست تولید گاز هیدروکسی را به لیتر بر ساعت نشان می‌دهد که در ابتدا با سرعت افزایش می‌یابد و سپس به حدود 16 لیتر بر ساعت می‌رسد و به حالت نسبتاً ثابتی می‌رسد. این روند می‌تواند به دلیل رسیدن سیستم به حالت پایدار و بهینه تولید باشد. رابطه نزدیکی بین افزایش دما و تولید گاز مشاهده می‌شود که افزایش دما می‌تواند اثر مثبتی بر تولید گاز هیدروکسی دارد. این اثر مثبت می‌تواند به دلایل افزایش سرعت واکنش‌های الکتروشیمیایی، کاهش مقاومت الکترولیت با افزایش دما و بهبود انتقال جرم باشد. به طور کلی، این نمودار نمایانگر این است که فعالیت حرارتی و تولید هیدروکسی باعث افزایش کارایی سامانه الکترولایزر می‌شود.



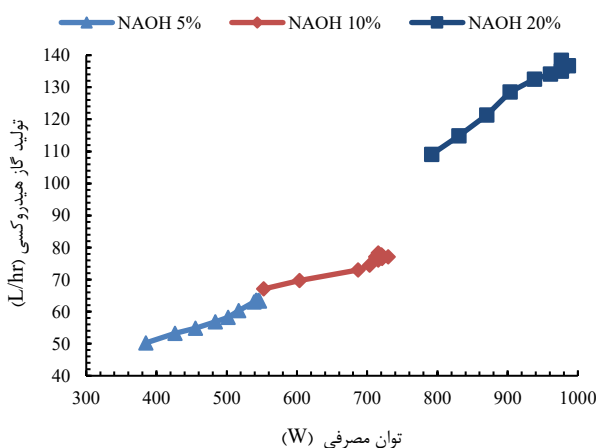
شکل 10 نمودار روند تغییرات دما و تولید گاز هیدروکسی نسبت به زمان با استفاده از آب شهری با سختی 500

شکل 11 نشان می‌دهد چطور تفاوت در سختی آب می‌تواند به تغییرات دمایی منجر شود که تاثیر مستقیمی بر کارایی و تولید گاز دارد. در این شکل، دو مقدار سختی (500 و 30000) بر روی دمای سیستم به مرور زمان تحلیل شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سختی آب، یعنی از 500ppm به 30000ppm، دمای سیستم نیز افزایش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که افزایش غلظت یون‌ها و مواد معدنی در آب، رسانایی الکتریکی را بهبود بخشیده و منجر به افزایش کارایی الکترولایزر می‌شود. در نتیجه، افزایش دما یکی از نشانه‌های تولید بیشتر گاز و کارایی بهینه‌تر در فرآیند الکترولایزر است. افزایش سریع‌تر و بیشتر دما در سختی‌های بالاتر نشان می‌دهد که خواص الکتروشیمیایی سیستم بهبود یافته و این امر می‌تواند به کاهش مدت زمان تولید و بهره‌وری بیشتر منجر شود. با این حال، توجه به این نکته ضروری است که غلظت بالای سختی آب ممکن است خطر رسوب‌گذاری یا سایر مشکلات مکانیکی و شیمیایی را در سیستم افزایش دهد که مدیریت و کنترل دقیق پارامترها را می‌طلبد.



شکل 13 توان مصرفی و تولید گاز هیدروکسی برای سه غلظت مختلف پتاسیم هیدروکسید (5٪، 10٪ و 20٪)

شکل 14 نشان‌دهنده رابطه بین توان مصرفی (W) و تولید گاز هیدروکسی (L/h) برای سه غلظت مختلف سدیم هیدروکسید یعنی 5٪، 10٪ و 20٪ است. در غلظت 5٪ سدیم هیدروکسید تولید گاز هیدروکسی از حدود 50 لیتر بر ساعت شروع می‌شود و با افزایش توان مصرفی به 539 وات، به حدود 63 لیتر بر ساعت می‌رسد، که بیانگر کارایی پایین‌تر در این غلظت است. در غلظت 10٪ سدیم هیدروکسید تولید گاز از حدود 67 لیتر بر ساعت آغاز می‌شود و با افزایش توان به 730 وات، به حدود 76 لیتر بر ساعت افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده افزایش کارایی در این غلظت است. در غلظت 20٪ سدیم هیدروکسید تولید گاز از حدود 110 لیتر بر ساعت شروع شده و با افزایش توان تا 986 وات، به حدود 138 لیتر بر ساعت می‌رسد. این افزایش کارایی و بهره‌وری بالا در این غلظت را نشان می‌دهد. به طور کلی، با افزایش غلظت سدیم هیدروکسید، تولید گاز هیدروکسی افزایش یافته و کارایی سیستم بهبود می‌یابد. این نتایج می‌تواند به بهبود عملکرد و کارایی الکترولیزرها کمک کند، هرچند نیاز به مدیریت دقیق شرایط و تدابیر ایمنی برای جلوگیری از افزایش دما و خطرات احتمالی وجود دارد. همچنین باید به تغییرات هزینه‌های عملیاتی توجه داشت، زیرا غلظت‌های بالاتر ممکن است منجر به هزینه‌های بیشتر شود.

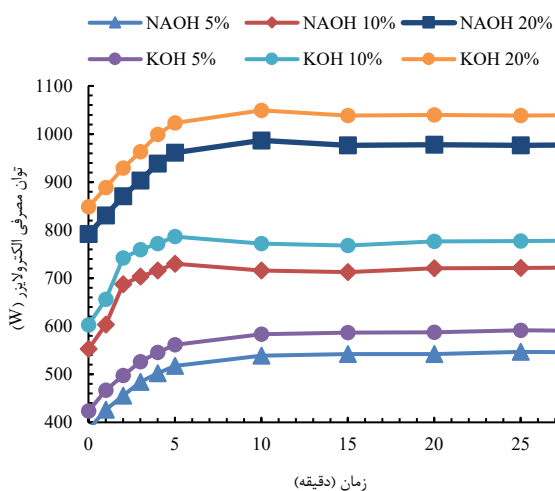


شکل 14 توان مصرفی و تولید گاز هیدروکسی برای سه غلظت مختلف سدیم هیدروکسید (5٪، 10٪ و 20٪)

شکل 12 نمودار تولید گاز هیدروکسی نسبت به زمان با استفاده از آب با سختی 500 و 30000

شکل 13 نشان‌دهنده رابطه بین توان مصرفی (W) و تولید گاز هیدروکسی (L/h) برای سه غلظت مختلف پتاسیم هیدروکسید یعنی 5٪، 10٪ و 20٪ است. در غلظت پتاسیم هیدروکسید 5٪، تولید گاز هیدروکسی از حدود 55 لیتر بر ساعت آغاز می‌شود و با افزایش توان مصرفی به 589 وات، به حدود 65 لیتر بر ساعت می‌رسد، که نشان‌دهنده کارایی کمتر در این غلظت است. در غلظت 10٪ پتاسیم هیدروکسید، تولید گاز از حدود 71 لیتر بر ساعت شروع می‌شود و با افزایش توان به 786 وات، به حدود 84 لیتر بر ساعت می‌رسد، که بهبود در کارایی را نشان می‌دهد. در غلظت 20٪ پتاسیم هیدروکسید، تولید از حدود 120 لیتر بر ساعت آغاز می‌شود و با افزایش توان به 1150 وات، به حدود 154 لیتر بر ساعت می‌رسد. این افزایش نشان‌دهنده بهره‌وری بالاتر و تولید بیشتر گاز هیدروکسی با غلظت‌های بالاتر پتاسیم هیدروکسید است. به طور کلی، با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید، تولید گاز هیدروکسی افزایش یافته و کارایی سیستم بهبود می‌یابد. با این حال، کنترل دقیق شرایط عملیاتی و مدیریت دما برای جلوگیری از خطرات ضروری است. افزایش غلظت می‌تواند سبب بهینه‌سازی عملکرد الکترولیز شود، اما احتمال افزایش هزینه‌های عملیاتی و نیاز به تدابیر ایمنی بیشتر نیز وجود دارد. فاصله قابل توجه بین نمودارهای پتاسیم هیدروکسید با غلظت 10٪ و پتاسیم هیدروکسید با غلظت 20٪ ناشی از افزایش چشمگیر رسانایی الکتریکی محلول 20٪ نسبت به 10٪ است. این رسانایی بالاتر منجر به جریان بیشتر، تلفات اهمی کمتر و راندمان بهتر در غلظت 20٪ می‌شود که در نهایت باعث تولید گاز هیدروکسی بیشتر در توان مصرفی یکسان می‌گردد. همچنین افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید تأثیر غیرخطی بر رسانایی محلول دارد. در غلظت‌های پایین‌تر (مانند 5٪ و 10٪)، تعداد یون‌های هیدروکسید (OH^-) محدود است و با افزایش غلظت رسانایی محلول بهبود می‌یابد، اما به دلیل تعداد نسبتاً کم یون‌ها، تغییرات بازده الکترولیز کمتر محسوس است. در مقابل، افزایش غلظت به 20٪ موجب افزایش قابل توجه تعداد یون‌های OH^- و کاهش مقاومت الکتریکی محلول می‌شود. این کاهش مقاومت به واکنش‌های الکتروشیمیایی در الکترودها کمک کرده و منجر به افزایش راندمان تولید گاز هیدروکسی برای توان مشخص می‌شود. همچنین، این تغییرات باعث ایجاد فاصله بیشتر بین پتاسیم هیدروکسید با غلظت 10٪ و پتاسیم هیدروکسید با غلظت 20٪ در مقایسه با غلظت 5٪ و 10٪ می‌شود.

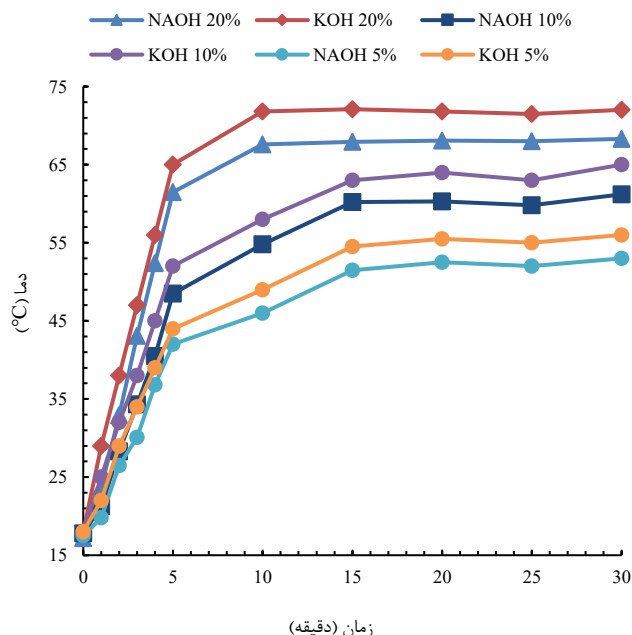
شکل 16 نشان‌دهنده تغییرات توان مصرفی الکترولایزر تولیدکننده گاز هیدروکسی بر حسب زمان برای الکترولیت‌های سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید در سه غلظت مختلف 5٪، 10٪ و 20٪ است. در غلظت 20٪، پتاسیم هیدروکسید با توان مصرفی بیش از 1000 وات بالاترین مصرف توان را دارد و در کمترین زمان به این سطح می‌رسد که نشان‌دهنده نیاز به انرژی زیاد برای واکنش و تولید گرما است. سدیم هیدروکسید 20٪ نیز توان مصرفی بالایی دارد که کمی کمتر از پتاسیم هیدروکسید است، اما همچنان در محدوده بیش از 900 وات قرار دارد. در غلظت 10٪، پتاسیم هیدروکسید توان مصرفی در حدود 800 وات دارد که نشان‌دهنده کاهش مصرف توان نسبت به غلظت بالاتر است. سدیم هیدروکسید 10٪ در حدود 750 وات است که نسبت به پتاسیم هیدروکسید کمتر است. در غلظت 5٪، پتاسیم هیدروکسید توان مصرفی حدود 600 وات دارد که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه در مصرف توان نسبت به غلظت‌های بالاتر است. سدیم هیدروکسید 5٪ کمترین مصرف توان به میزان حدوداً 500 وات را دارد که نشان‌دهنده کارایی کمتر در این غلظت است. افزایش غلظت باعث افزایش مصرف توان می‌شود که می‌تواند به دلیل افزایش سرعت واکنش‌ها و تولید گرما باشد. غلظت‌های بالاتر نیازمند مدیریت بهتر برای جلوگیری از مصرف بیش از حد انرژی و حرارت است. به طور کلی، پتاسیم هیدروکسید در هر غلظت مصرف توان بالاتری نسبت به سدیم هیدروکسید دارد که به دلیل هدایت یونی بهتر و واکنش‌پذیری بالاتر پتاسیم هیدروکسید در شرایط الکترولایزر باشد. کنترل دقیق مصرف انرژی و دما برای جلوگیری از آسیب‌های احتمالی و افزایش کارایی دستگاه ضروری است. این تحلیل نشان می‌دهد که انتخاب غلظت مناسب و نوع الکترولیت تأثیر زیادی بر کارایی و مصرف انرژی الکترولایزر دارد و مدیریت صحیح پارامترها می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیند کمک کند.



شکل 16 تغییرات توان مصرفی الکترولایزر با گذشت زمان در سه غلظت مختلف سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید (5٪، 10٪ و 20٪)

شکل 17 نشان‌دهنده تولید گاز هیدروکسی (لیتر بر ساعت) در سه غلظت مختلف سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید (5٪، 10٪ و 20٪) است. در غلظت 20٪، پتاسیم هیدروکسید حدود 156 لیتر بر ساعت گاز تولید می‌کند که بیشترین میزان تولید است، در حالی که سدیم هیدروکسید در این

شکل 15 تغییرات دما با گذشت زمان را در سه غلظت مختلف سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید (5٪، 10٪ و 20٪) نشان می‌دهد. در غلظت 20٪، هر دو ترکیب سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید بیشترین افزایش دما را نشان می‌دهند که دما در حدود 10 دقیقه به 70 درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این موضوع نشان‌دهنده این است که هر دوی این الکترولیت‌ها با این غلظت، واکنش الکترولایزر را به شدت تسریع می‌کنند و به تولید گرمای بالاتری منجر می‌شوند. در این سطح غلظت، پتاسیم هیدروکسید دمای کمی بالاتری تولید می‌کند که به خواص شیمیایی متفاوت و ظرفیت انتقال یون بهتر پتاسیم هیدروکسید مرتبط باشد. در غلظت 10٪، هر دو الکترولیت سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید رشد دمایی متوسطی را نشان می‌دهند و دما در حدود 60 تا 65 درجه سانتی‌گراد تثبیت می‌شود. در این مرحله، تفاوت دمایی بین سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید کاهش می‌یابد، اما پتاسیم هیدروکسید هنوز کمی دمای بیشتری نسبت به سدیم هیدروکسید دارد. در غلظت 5٪، سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید کمترین افزایش دما را دارند و دما به حدود 50 تا 55 درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در این غلظت، تفاوت عملکردی بین سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید کمتر است، هر چند پتاسیم هیدروکسید همچنان به طور مختصر دمای بالاتری تولید می‌کند. به طور کلی، افزایش غلظت الکترولیت (هر دو سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید) باعث افزایش سرعت واکنش الکترولایزر و تولید گرمای بیشتر می‌شود. این امر کارایی سیستم را بهبود می‌بخشد، اما نیازمند مدیریت دقیق دما است تا بهینه عمل کند و خطرات حرارتی کاهش یابد. همچنین، پتاسیم هیدروکسید معمولاً کمی دمای بالاتری نسبت به سدیم هیدروکسید تولید می‌کند که به دلیل ویژگی‌های هدایت یون‌ها و واکنش‌پذیری بهتر پتاسیم هیدروکسید در شرایط الکترولایزر باشد.



شکل 15 تغییرات دما با گذشت زمان در سه غلظت مختلف سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید (5٪، 10٪ و 20٪)

مقطر به دلیل نبود یون‌های آزاد، تقریباً غیرفعال عمل کرد. این نتایج استفاده از منابع آب شور یا شهری را به‌ویژه در مناطق دارای محدودیت آبی، برای کاهش هزینه‌های تصفیه و افزایش راندمان، توجیه‌پذیر می‌سازد (البته با در نظر گرفتن مسائل خوردگی و رسوب‌گذاری در کاربردهای بلندمدت).

3-4- اثر شدت جریان و ولتاژ

تحلیل نمودارهای جریان-ولتاژ و مصرف انرژی نشان داد که اگرچه افزایش جریان باعث افزایش تولید گاز می‌شود، اما عبور از محدوده بهینه (۱۰ تا ۱۵ آمپر) موجب افزایش تلفات انرژی و کاهش کارایی می‌گردد. از این‌رو، تعیین جریان بهینه با هدف رسیدن به بازده انرژی بالاتر ضروری است.

4-4- نقش دما و پایداری عملیاتی

افزایش دمای محلول باعث افزایش نرخ واکنش‌های الکترولیتیکی و کاهش مقاومت داخلی شد. بهترین عملکرد در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد. با این حال، دماهای بالاتر مورد بررسی قرار نگرفت و احتمال بروز مشکلات فنی یا کاهش پایداری در آن محدوده تأیید نشده است. بنابراین، کنترل دما به عنوان یک متغیر کلیدی در حفظ پایداری و طول عمر سامانه مطرح می‌شود.

5- نتیجه گیری کلی

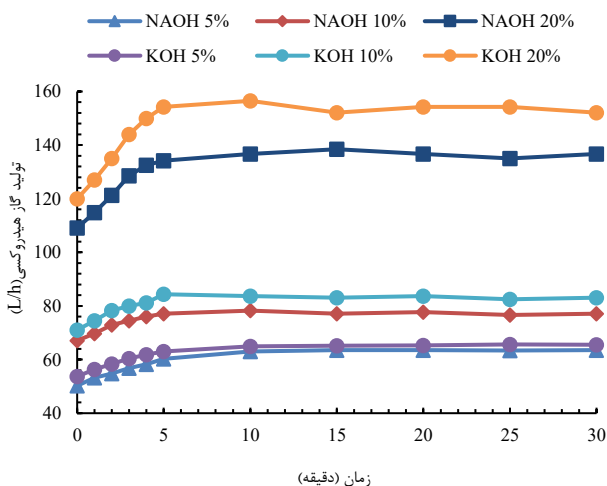
در این تحقیق، الکترولاایزر چند سلولی از نوع خشک با هدف بهینه‌سازی تولید گاز هیدروکسی از منظر مصرف انرژی و تأثیرگذاری متغیرهای کلیدی چون نوع و غلظت الکترولیت، دمای عملکردی و شدت جریان مورد بررسی جامع آزمایشگاهی قرار گرفت. مطالعه حاضر برخلاف پژوهش‌های پیشین تنها بر یک یا چند پارامتر محدود تکیه نکرده، بلکه طیف کاملی از شرایط عملیاتی شامل انواع مختلف الکترولیت‌ها (آب مقطر، آب شهری با سختی‌های گوناگون، محلول‌های پتاسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید با غلظت‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی)، محدوده گسترده شدت جریان (تا ۱۴۰ آمپر) و تأثیر دما (۲۳ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد) را به صورت سیستماتیک تحلیل نموده است.

یافته‌های کمی و کیفی پژوهش حاکی از آن است که پتاسیم هیدروکسید با غلظت ۱۵ تا ۲۰ درصد وزنی، در مقایسه با دیگر الکترولیت‌ها (نظیر سدیم هیدروکسید و آب خالص/آب شهری) بیشترین بازده تولید گاز و کمترین مقاومت اهمی را ایجاد کرده است؛ به طوری که در شرایط بهینه (پتاسیم هیدروکسید، ۱۵~۲۰٪، دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و شدت جریان ۱۰ تا ۱۵ آمپر)، بیشترین دبی تولید گاز هیدروکسی ۱۵۶ لیتر بر ساعت و مصرف ویژه انرژی در بازه ۳/۱ تا ۲ وات‌ساعت بر لیتر به دست آمد. همچنین با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید تا ۲۰٪، مقاومت محلول به طور مشخص کاهش و هدایت الکتریکی افزایش یافت، اما مقادیر بالاتر از این محدوده عملاً با افزایش بیش از حد مصرف انرژی و ریسک خوردگی همراه شدند.

روند تغییرات شدت جریان نشان داد با افزایش جریان از ۱ تا ۵۰ آمپر، مصرف ویژه انرژی کاهش و مقدار تولید گاز رشد شتابنده دارد؛ بالاتر از این مقدار وضعیت شبه‌پایدار رخ می‌دهد و رشد تولید گاز کندتر می‌شود.

افزایش دمای محلول از ۲۳ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد، موجب کاهش مقاومت داخلی و افزایش هدایت یونی شد. این مساله به اهمیت کنترل و ارتقای دمای عملکردی برای بهبود مداوم فرآیند صحه می‌گذارد.

غلظت حدود ۱۳۸ لیتر بر ساعت تولید دارد. برای غلظت ۱۰٪، پتاسیم هیدروکسید حدود ۸۳ لیتر بر ساعت و سدیم هیدروکسید حدود ۷۸ لیتر بر ساعت تولید می‌کند. در غلظت ۵٪، هر دو پتاسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید بین ۶۲ تا ۶۵ لیتر بر ساعت تولید دارند، اگرچه پتاسیم هیدروکسید همچنان کمی برتری دارد. افزایش غلظت به تولید گاز بیشتری منجر می‌شود که نشانگر افزایش کارایی واکنش‌هاست. با این حال، کنترل انرژی و دما در این شرایط برای بهینه‌سازی عملکرد ضروری است. پتاسیم هیدروکسید به طور کلی در هر غلظتی تولید بیشتری نسبت به سدیم هیدروکسید دارد. این نتایج نشان می‌دهند که انتخاب مناسب غلظت و نوع الکترولیت می‌تواند به بهبود کارایی و بهره‌وری الکترولاایزر در تولید گاز هیدروکسی کمک کند.



شکل 17 تغییرات تولید گاز هیدروکسی با گذشت زمان در سه غلظت مختلف سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید (۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪)

4- بحث

هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی تولید گاز هیدروکسی در یک سامانه الکترولاایزر خشک از طریق بررسی تأثیر متغیرهای کلیدی شامل نوع و غلظت الکترولیت، سختی آب، شدت جریان و دمای محلول بود. در این بخش، نتایج حاصل در چارچوب اهداف تحقیق تحلیل می‌شوند تا ارتباط بین پارامترهای تجربی و کارایی فرآیند تبیین گردد.

4-1- تأثیر نوع و غلظت الکترولیت بر عملکرد الکترولاایزر

یافته‌ها نشان داد که نوع الکترولیت نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد سیستم دارد. پتاسیم هیدروکسید، به دلیل تحرک یونی بالاتر و رسانایی بهتر نسبت به سدیم هیدروکسید، در تمامی غلظت‌ها عملکرد برتری داشت. بیشینه تولید گاز و راندمان انرژی در غلظت‌های ۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی مشاهده شد که نشان‌دهنده وجود یک نقطه بهینه برای غلظت الکترولیت است. غلظت‌های بالاتر، با افزایش ویسکوزیته و افت تبادل یونی، به کاهش بازده منجر شدند.

4-2- بررسی تأثیر سختی آب

در مقایسه با آب مقطر، استفاده از آب‌های با سختی بالا (مانند آب شور یا شهری) موجب افزایش قابل توجه هدایت الکتریکی و نرخ تولید گاز شد. آب

V	ولتاژ مصرفی الکترولايزر (ولت)
W	وات
Wh	وات ساعت
$^{\circ}C$	درجه سانتی گراد

علائم یونانی

$\mu s/cm$ واحد هدایت پذیری الکتریکی (میکروزیمنس بر سانتی متر)

6- مراجع

- [1] J. Paparao and S. Murugan, "Dual-fuel diesel engine run with injected pilot biodiesel-diesel fuel blend with inducted oxy-hydrogen (HHO) gas," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 40, pp. 17788-17807, 2022.
- [2] P. K. Rejeti, S. K. Barik, and S. Balakrishna, "Novel Application of Electrolysis on Vehicle: Hydrogen Fuel Cell," in *Applications of Computational Methods in Manufacturing and Product Design: Select Proceedings of IPDIMS 2020: Springer*, 2022, pp. 165-178.
- [3] J. Babu et al., "Production of HHO gas in the water-electrolysis unit and the influences of its introduction to CI engine along with diesel-biodiesel blends at varying injection pressures," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 865-885, 2024.
- [4] B. Subramanian and S. Ismail, "Production and use of HHO gas in IC engines," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 14, pp. 7140-7154, 2018.
- [5] N. Alam and K. Pandey, "Experimental study of hydroxy gas (HHO) production with variation in current, voltage and electrolyte concentration," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 225, no. 1: IOP Publishing, p. 012197.
- [6] Y. Bow and T. Dewi, "HHO gas generation in hydrogen generator using electrolysis," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 258, no. 1: IOP Publishing, p. 012007.
- [7] B. Subramanian and V. Thangavel, "Analysis of onsite HHO gas generation system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 28, pp. 14218-14231, 2020.
- [8] M. Gad and S. A. Razeq, "Impact of HHO produced from dry and wet cell electrolyzers on diesel engine performance, emissions and combustion characteristics," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 43, pp. 22277-22291, 2021.
- [9] Y. A. Sharif, S. S. Jasim, R. A. Khalefa, and S. J. Taher, "Experimental Investigation of the Hydroxy Gas Generation as a Clean Energy Source for Spark Ignition Engine Operation Using Different Electrolytes," *Polytechnic Journal*, vol. 11, no. 1, p. 4, 2021.
- [10] S. Yun, J. Lee, H. Cho, and J. Kim, "Oxy-fuel combustion-based blue hydrogen production with the integration of water electrolysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 291, p. 117275, 2023.
- [11] G. Cheng et al., "Analysis and prediction of green hydrogen production potential by photovoltaic-powered water electrolysis using machine learning in China," *Energy*, p. 129302, 2023.
- [12] A. B. Vethamony and V. Thangavel, "Experiments on the effect of temperature on HHO production by Alkaline water electrolysis," *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [13] S.-H. Lee et al., "A novel water electrolysis hydrogen production system powered by a renewable hydrovoltaic power generator," *Chemical Engineering Journal*, vol. 495, p. 153411, 2024.
- [14] O. Akdağ, "The operation and applicability to hydrogen fuel technology of green hydrogen production by water electrolysis using offshore wind power," *Journal of Cleaner Production*, vol. 425, p. 138863, 2023.
- [15] T. P. Sari, A. A. Rosidah, M. Satria, S. Chalimah, A. Sadrina, and R. B. Anggoro, "The Parameter Experimental on the Dry Cell Type of Water Electrolysis for the HHO Gas Production," *Nusantara Science and Technology Proceedings*, pp. 78-82, 2023.
- [16] R. S. Shahdabadi, M. Zamen, and S. V. Hosseini, "Adaptive design for the connection of multicell HHO generator with solar

بر اساس تحلیل جامع داده‌ها، ترکیب الکترولیت پتاسیم هیدروکسید در بازه ۱۵ تا ۲۰٪ وزنی، شدت جریان بهینه ۱۰ تا ۱۵ آمپر و دمای کاری ۷۰ درجه سانتی‌گراد، به عنوان وضعیت کاملاً بهینه و توصیه‌شده برای دستیابی همزمان به بیشینه دبی تولیدی (۱۵۶ لیتر در ساعت)، کمترین مصرف انرژی (۳/۱ تا ۲ وات ساعت بر لیتر) و پایداری عملیاتی الکترولايزر معرفی می‌گردد. این مطالعه با تأیید وابستگی خطی بین ولتاژ و جریان، اثبات برتری پتاسیم هیدروکسید، تبیین نقش کلیدی دما و تحلیل سیستماتیک انواع آب، زمینه علمی و عملی مناسبی برای طراحی و بهره‌برداری صنعتی و آزمایشگاهی را فراهم آورده است.

6- چشم‌انداز تحقیقات آینده

یافته‌های این پژوهش مبنایی برای تحقیقات آتی فراهم می‌کند و بر توسعه روش‌های نوآورانه برای کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی تولید گاز هیدروکسی در شرایط مختلف تمرکز دارد. تحقیقات آینده می‌توانند به بهبود طراحی و فناوری الکترولايزرها و توسعه سیستم‌هایی که می‌توانند به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک کنند، بپردازند. در ادامه تعدادی از پیشنهادات برای تحقیقات آتی بیان شده است.

1- بررسی الکترولیت‌های جایگزین: آزمایش الکترولیت‌های دیگر به جز پتاسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید برای شناسایی ترکیبات با کارایی بالاتر و صرفه‌جویی بیشتر در انرژی.

2- بررسی شرایط عملیاتی مختلف: آزمایش فرآیند در دماهای بسیار بالا یا پایین‌تر از 70 درجه سانتی‌گراد و ارزیابی تأثیر آنها بر میزان تولید گاز و مصرف انرژی.

3- استفاده از انواع مختلف آب: بررسی رفتار الکترولايزر با منابع آب متنوع مانند آب‌های زیرزمینی، دریاچه‌ها، و ضایعات صنعتی.

4- بهینه‌سازی پارامترهای الکتریکی: بررسی اثر روش‌های نوین مانند مدولاسیون عرض پالس یا تغییرات فرکانسی برای کاهش مصرف انرژی و افزایش تولید گاز.

این پیشنهادات می‌توانند به توسعه فناوری‌های پیشرفته‌تر در تولید گاز هیدروکسی کمک کرده و بازدهی فرآیند را بهبود بخشند. این تحقیق پتانسیل‌های بالای تولید هیدروکسی با روش الکترولیز را با در نظر گرفتن پارامترهای عملیاتی مورد مطالعه و تأکید بر انتخاب الکترولیت مناسب به خوبی نشان داده است. یافته‌ها می‌توانند مستقیماً در جهت ارتقا و بهبود سیستم‌های فعلی و توسعه راهکارهای پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های سنتی مورد استفاده قرار گیرند.

5- فهرست علائم

A	شدت جریان مصرفی الکترولايزر (آمپر)
DC	برق جریان مستقیم
HHO	گاز هیدروکسی
KOH	پتاسیم هیدروکسید
K	پتاسیم
L	لیتر
Na	سدیم
ppm	یک بخش به ازای یک میلیون

- photovoltaic panels," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 86, pp. 33422-33433, 2023.
- [17] M. Gerwash, "The impact of pulse width modulation (PWM) on the generation of hydroxy gas (HHO)," *Industrial Technology Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 31-49, 2024.
- [18] B. S. Oluwadare, S. A. Adeleye, and T. O. Oni, "Performance Analysis of Hydroxyl (HHO) Gas Addition on a Gasoline Generator," *European Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 334-354, 2024.
- [19] S. A. Mutlag, A. R. H. Jassim, O. I. Abd, and K. W. Abid, "Experimental performance of HHO gas generator," in *AIP Conference Proceedings*, 2024, vol. 3009, no. 1: AIP Publishing.
- [20] A. K. Nayak, A. K. Rout, A. K. Dewangan, and G. S. Sinha, "Investigation of the Petition-fuel production as HHO-gas through developed electrolyser by using the mathematical model with experimental performance analysis," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, vol. 2818, no. 1: IOP Publishing, p. 012018.
- [21] A. M. Mousa, H. A. Sayed, K. A. Ali, N. S. Elkaoud, and W. A. Mahmoud, "Energy-conversion efficiency for producing oxyhydrogen gas using a simple generator based on water electrolysis," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 25312, 2024.
- [22] W. Mughal, P. Ji, U. Rauf, L. Junping, A. Waheed, and P. Kumar, "Stability and performance investigation using different electrode configurations and electrolyte compositions in an oxyhydrogen gas generator," *RSC advances*, vol. 14, no. 53, pp. 39131-39141, 2024.
- [23] A. Asnawi, M. Muhammad, R. Putra, and N. Islami, "Effect of Hydroxy Gas Enrichment and Higher Biodiesel Concentration on Diesel Engine Performance," *Automotive Experiences*, vol. 8, no. 1, 2025.
- [24] C. Akl, J. Dgheim, and N. El Hajj, "Design, Development, and Performance Evaluation of an Oxyhydrogen (HHO) Generator for Enhanced Fuel Efficiency," *Sustainability*, vol. 17, no. 9, p. 3811, 2025.