



بررسی شرایط عملکردی الکترولیزر تغلیظ آب سنگین مورد استفاده در رآکتور صفر قدرت اصفهان

سعید صلاحی^{۱*}، مهدی فرج پور^۲، صبا باصیری^۳، سیدمنصور نوربخش^۱

۱. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۱۴۶۵-۱۵۸۹، اصفهان - ایران
۲. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران
۳. دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان، صندوق پستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، اصفهان - ایران

*Email: Saeedsalahi_038@yahoo.com

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۷/۱۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴

چکیده

آب سنگین در رآکتورهای هسته‌ای به عنوان کندکننده نوترون مورد استفاده قرار می‌گیرد، نقش کندکنندگی به درجه خلوص آب سنگین بستگی دارد، تصفیه و تغلیظ آب سنگین در صنایع هسته‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به این که الکترولیز آب به انرژی الکتریکی زیادی نیازمند است، می‌بایست از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد. پارامترهای متعددی در بهینه‌سازی شرایط عملیاتی الکترولیزر نقش دارند و می‌توانند میزان گازهای خروجی، بازده انرژی و میزان پلاریزاسیون در فرایندهای الکترولیز را کنترل کنند. اما بررسی عملی نقش پارامترهای مختلف بر شرایط عملکردی الکترولیزرهای آب سنگین بسیار هزینه‌بر هستند. لذا در این مقاله نقش برخی از پارامترها از قبیل دمای سل و غلظت الکترولیت بر شرایط عملکردی الکترولیزر به وسیله معادلات دینامیکی مدل‌سازی شده است. بدین صورت که با معرفی انواع تلفات ولتاژ در سیستم الکترولیزر معادله‌ای برای ولتاژ الکترولیز به دست آمده است. معادله ولتاژ الکترولیزر به عنوان تابع هدف انتخاب شده و نقش پارامترهای ذکر شده در بهینه‌سازی مصرف انرژی بررسی شده‌اند. الکترولیزر مورد مطالعه از نوع قلیایی - پیشرفته است و دارای الکترولیت ۷٪ وزنی کربنات پتاسیم می‌باشد. این الکترولیزر وظیفه‌ی تغلیظ آب سنگین با درجه خلوص ۹۰٪/۹۹٫۸٪ را به عهده دارد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهند تنها با افزایش ده درصدی غلظت الکترولیت کربنات پتاسیم می‌توان پلاریزاسیون الکترولیزر را تا حد زیادی (۱۵٫۴٪) کاهش و از طرفی بازدهی انرژی الکتریکی را تا ۱۸٫۳٪ افزایش داد. همچنین نتایج مدل‌سازی بیانگر این است که با افزایش دما تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد الکترولیزر عملکرد بهتری خواهد داشت و از میزان پلاریزاسیون و مصرف انرژی الکتریکی ۴٪ کاسته می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: الکترولیزر، تغلیظ آب سنگین، بازده انرژی

Investigating the functional conditions of heavy water condenser electrolysis used in Isfahan Zero Power Reactor

S. Salahi^{1*}, M. Faragpor², S. Basiri³, S.M. Norbakhsh¹

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 81465-1589, Isfahan - Iran
2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran
3. Faculty of Engineering, Isfahan University of Technology, P.O. Box: 8415683111, Isfahan - Iran

Research Article

Received 4.10.2022, Accepted 5.3.2023

Abstract

The quality of heavy water performance in atomic power plants as a substitute for neutron particles depends on its degree of purity. The concentration of heavy water in the nuclear industry is of significant importance. The Heavy Water Reactor of Isfahan, in the nuclear sector, includes a heavy water purification and condensation system. This was launched at the same time as the reactor was built. For electrolysis of water and its isotopes, such as heavy water, it requires a lot of electrical energy, so it should be economical and workable. Several parameters contribute to the optimization of the operating conditions of the electrically operated apparatus. These parameters can control the number of exhaust gases, energy efficiency, and polarization in electrolysis processes. But the practical study of the role of various parameters on heavy water electrolyzer performance is very costly. Therefore, in this paper, the role of some parameters, such as tube temperature and electrolyte concentration, is modeled on the functional conditions of the electrolyzer by dynamic equations. And by introducing a variety of voltage losses in the electrolyzer system, an equation for the electrolysis voltage is obtained. The electrolyzer voltage equation is selected as the target function. The role of the parameters mentioned in energy efficiency optimization has been investigated. The electrolyzer is alkaline and contains 7% w/w potassium carbonate electrolytes. This electrolyzer has condensed heavy water with a purity of 90% to 99.8%. The results of modeling show that by increasing the concentration of potassium carbonate electrolyte by 10%, the electrolyzer polarization can be reduced (15.4%) and increase the electrical energy efficiency by up to 18.3%. Also, the results of the modeling show that by increasing the temperature to 25 °C, the electrolysis will perform better and reduce the polarization and energy consumption by 4%.

Keywords: Electrolyzer, Heavy water condensation, Energy efficiency

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 44 (1), Serial Number 106, 2024, P 39-45

مجله علوم و فنون هسته‌ای

دوره ۴۴، شماره ۴، جلد ۱۰۶، زمستان ۱۴۰۲، ص ۳۹-۴۵



۱. مقدمه

تصفیه و تغلیظ آب سنگین در صنایع هسته‌ای از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد نقش آب سنگین در رآکتورهای هسته‌ای به‌عنوان کندکننده ذرات نوترونی بستگی به درجه خلوص آن دارد. با توجه به بومی شدن صنعت هسته‌ای در کشور، اهمیت تولید و تغلیظ آب سنگین به‌عنوان کندکننده در رآکتورهای قدرت و تحقیقاتی با سوخت اورانیوم طبیعی برکسی پوشیده نیست، لذا کسب دانش و مهارت لازم در جهت بهره‌برداری ایمن از سیستم تغلیظ آب سنگین به منظور حفظ کیفیت آب سنگین امری ضروری است. جهت تولید و تغلیظ آب سنگین از روش های گوناگونی از جمله روش تقطیر و روش الکترولاایزر استفاده می‌شود. هر یک از این روش‌ها با توجه به کاربرد آن برای تأسیسات مورد نظر انتخاب می‌شود. از روش تقطیر بیش‌تر برای تولید آب سنگین از آب معمولی استفاده می‌شود، در حالی که از روش الکترولاایزر برای تغلیظ و بالا بردن درجه خلوص آب سنگین استفاده می‌شود. الکترولاایزر یا همان تجزیه الکتریکی، پیشرفته ترین فن‌آوری برای تولید دوتریم از آب سنگین است که طی آن جریان الکتریکی از آب سنگین عبور داده می‌شود و پتانسیل الکتریکی ایجاد شده باعث تشکیل و مهاجرت یون‌های مثبت دوتریم D^+ و هیدروژن H^+ به سمت کاتد (کاتولیت) و یون‌های OH^- و OD^- به سمت آند (آنولیت) می‌شود.

الکترولاایزر سیستمی است که با استفاده از جریان مستقیم الکتریکی آب را به ایزوتوپ‌های آن از جمله هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌کند. کاتد، آند، الکترولیت و جداکننده از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده الکترولاایزرها هستند [۱]. بر اساس نوع اجزای مذکور الکترولاایزرها به پنج دسته اصلی الکترولاایزرهای قلیایی سنتی، قلیایی پیشرفته، الکترولاایزرهای غشا پلیمری، الکترولاایزرهای غشا غیرآلی و الکترولاایزرهای اکسید جامد تقسیم‌بندی می‌شوند. در طراحی الکترولاایزرهای مختلف ویژگی‌های زیر مد نظر قرار می‌گیرند:

(۱) کارایی و عملکرد بالاتر
(۲) دامنه وسیع چگالی جریان که خود معادل سرعت تولید می‌باشد.

(۳) تولید هیدروژن و اکسیژن بسیار خالص

(۴) ایمنی بیش‌تر (عدم گردش الکترولیت خورنده)

(۵) جداسازی بهتر گازها

رآکتور آب سنگین اصفهان در بخش مهندسی هسته‌ای شامل سیستم تصفیه و تغلیظ آب سنگین می‌باشد که هم‌زمان با احداث رآکتور، آغاز به کار کرده است روش کار سیستم تغلیظ

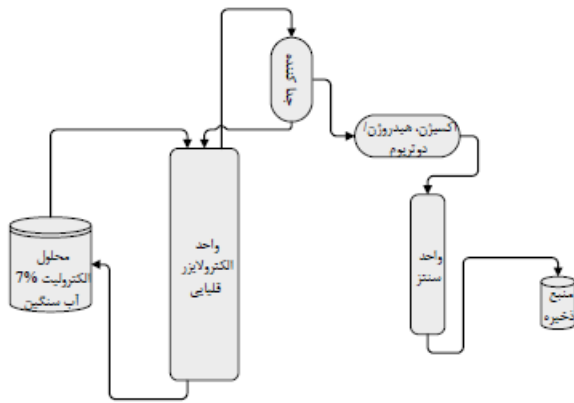
بر اساس الکترولاایزر آب سنگین برنامه‌ریزی شده است. الکترولاایزر مورد مطالعه در این طرح از نوع الکترولاایزرهای قلیایی پیشرفته است که وظیفه تغلیظ آب سنگین با درجه خلوص ۹۰ درصد را به ۹۹٫۸ درصد بر عهده دارد. پارامترهای عملیاتی متعددی بر میزان گازهای خروجی و بازده انرژی در فرایندهای الکترولاایزر مؤثر است که شامل میزان جریان، دما، نوع الکترولیت مورد استفاده، تغییر غلظت الکترولیت و غیره می‌باشند [۲]. افزایش غلظت الکترولیت تا مقدار مشخص (غلظت بهینه) می‌تواند توان مصرفی در الکترولیت را به واسطه کاهش مقاومت اهمی، کاهش و میزان ولتاژ ورودی به الکترولاایزر را نیز کاهش دهد. افزایش جریان (آمپر) به‌طور مداوم اگرچه باعث افزایش میزان گازهای خروجی و کوتاه شدن مدت زمان الکترولاایزر می‌شود ولی این امر مصرف انرژی الکتریکی را تا حد زیادی افزایش می‌دهد.

اما بررسی تجربی تأثیر همه پارامترهای ذکر شده بر بهینه‌سازی شرایط عملیاتی روی الکترولاایزر واحد تغلیظ رآکتور ZPR از نظر اقتصادی قابلیت اجرایی ندارند و نیازمند صرف هزینه بسیار زیادی می‌باشند. در این مقاله، از مدل‌سازی‌های دینامیکی برای بررسی تأثیر برخی پارامترها بر شرایط عملکردی الکترولاایزر استفاده شد. بدین صورت که با معرفی انواع تلفات ولتاژ در سیستم الکترولاایزر معادله‌ای برای ولتاژ الکترولاایزر به دست می‌آید و سپس این معادله به‌عنوان تابع هدف انتخاب و نقش برخی پارامترها از قبیل نوع الکترولیت (غلظت الکترولیت)، دمای سل و چگالی جریان در بهینه‌سازی مصرف انرژی بررسی می‌شوند.

تاکنون مدل‌سازی‌های مکانیکی-الکتریکی برای مطالعه پارامترهای الکتریکی و شیمیایی بر شرایط عملکردی الکترولاایزرهای قلیایی پیشرفته و غشا پلیمری به‌کار رفته‌اند. اساس این روش‌ها بدین صورت است که انواع تلفات ولتاژ در سیستم الکترولاایزر به افت پتانسیل‌های فعال‌سازی آند و کاتد و همچنین افت پتانسیل اهمی غشا پلیمری یا الکترولیت اختصاص می‌یابند [۳، ۴].

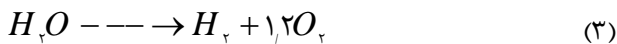
در این مقاله برای شبیه‌سازی و استخراج نتایج و در نهایت قرار دادن خروجی‌ها در معادله جهت مطالعه شرایط عملکردی الکترولاایزر قلیایی پیشرفته تغلیظ آب سنگین از برنامه متلب استفاده شده است. با این تفاوت که در بررسی انواع تلفات ولتاژ در سیستم، عبارت پتانسیل اهمی الکترولیت جایگزین عبارت افت پتانسیل اهمی غشا پلیمری می‌شود.





شکل ۱. شماتیک واحد تغلیظ (الکترولایزر) مدل سازی شده.

طبق رابطه ۳ میزان مولی آب واکنش داده برابر با میزان هیدروژن و میزان اکسیژن خروجی معادل نصف هیدروژن تولیدی می‌باشد.



$$\dot{N}_{O_2} = \frac{J}{4F} \quad (4)$$

که در این روابط J چگالی جریان برحسب آمپر بر متر مربع و F ثابت فارادی است. برای محاسبه چگالی جریان لازم است ناحیه سطح آندی و کاتدی مشخص و با آگاهی از جریان ورودی به الکترولایزر از رابطه ۵ تعیین شود:

$$J_i = \frac{I}{S_i}, \quad i = a, c \quad (5)$$

در معادله ۵، S سطح آند و کاتد می‌باشد، ساختار دو کاتد (داخلی و خارجی) و آند استوانه‌ای می‌باشند با این تفاوت که مطابق شکل ۲ کاتد خارجی از ناحیه سطحی بیش‌تری نسبت به کاتد داخلی برخوردار است بنابراین چگالی جریان کاتد خارجی به مراتب کم‌تر از کاتد داخلی است. ناحیه سطح کاتدی شامل مجموع سطوح کاتد داخلی و خارجی می‌باشد:

$$S_c = S_{int} + S_{ext} \quad (6)$$

۲. روش محاسباتی و تجربی

۱.۲ مدل‌سازی عملکردی الکترولایزر

الکترولایزر قلیایی در واحد تغلیظ رآکتور ZPR به صورت سیستم بسته مدل‌سازی و معادلات انرژی الکتریکی این سیستم تبدیل انرژی، مشخص شد. تا بر اساس آن بازدهی انرژی محاسبه و تأثیر تغییرات پارامترهای عملکردی نظیر میزان غلظت الکترولیت و دمای سل تعیین شود. در این بخش از اثرات ایزوتوپی H_2 و D_2 در محاسبات و مدل‌سازی صرف‌نظر شده است. به این دلیل که در ابتدای شروع الکترولیز کسر بسیار بالایی (بالای ۹۵ درصد) از مجموعه گازهای H_2 و D_2 خروجی از الکترولایزر شامل ایزوتوپ سبک‌تر یعنی هیدروژن است. بنابراین مدل‌سازی‌ها بر اساس میزان گازهای خروجی هیدروژن است.

مطابق شکل ۱ با استفاده از جریان مستقیم برق به یک سلول الکترولایزر آب به دو عنصر هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌شود. میزان کل انرژی مورد نیاز برای این فرایند برابر است با انرژی مورد نیاز جهت شکست آب بدون در نظر گرفتن اتلاف انرژی در سیستم‌های واقعی حال آن‌که در سیستم‌های واقعی اتلاف انرژی اجتناب‌ناپذیر است. از این‌رو عملکرد سیستم را می‌توان با استفاده از بازدهی انرژی (η) به صورت رابطه ۱ محاسبه نمود [۳، ۴].

$$\eta = \frac{\dot{N}_{H_2} LHV}{P_{elec}} \quad (1)$$

که در آن LHV ارزش حرارتی پایین هیدروژن، \dot{N}_{H_2} میزان هیدروژن خروجی از الکترولایزر در واحد زمان و P_{elec} میزان انرژی الکتریکی ورودی به الکترولایزر است. ارزش حرارتی پایین هیدروژن عبارت است از مقدار گرمایی که از واکنش هیدروژن با اکسیژن و تشکیل بخار آب حاصل می‌شود. این مقدار به دما وابسته است و برای هیدروژن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد معادل ۲۴۲ کیلوژول بر مول می‌باشد. همان‌طور که قبلاً گفته شد از اثرات ایزوتوپی در مدل‌سازی عملکردی الکترولایزر صرف‌نظر شده است. لذا در این بخش ارزش حرارتی پایین دوتریم معادل هیدروژن در نظر گرفته شده است. میزان هیدروژن خروجی از الکترولایزر از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$\dot{N}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (2)$$



که در این جا T دمای سل الکترولیزر و α فعالیت آب می باشد که برابر واحد است.

$$V_o = -1,229 \text{ ولت} \quad (12)$$

بر مبنای این معادلات، ولتاژ برگشت پذیر سل در دمای ۲۹۸ درجه کلوین $-1,222$ ولت است. افت ولتاژ فعال سازی در هر یک از الکترودهای آند و کاتد تا حدود زیادی به چگالی جریان تبدلی وابسته است. این پارامتر نشان دهنده آمادگی الکترودها برای واکنش الکتروشیمیایی است که بالا بودن میزان آن بیانگر آمادگی الکترودها برای انجام واکنش است:

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{J_{o,i}}} + \sqrt{\left(\frac{J}{\sqrt{J_{o,i}}} \right)^2 + 1} \right), i = a, c \quad (13)$$

در معادله ۱۴، $J_{o,i}$ چگالی جریان تبدلی، $J_{ref,i}$ چگالی جریان تبدلی مرجع و $E_{act,i}$ انرژی فعال سازی آند و کاتد می باشد.

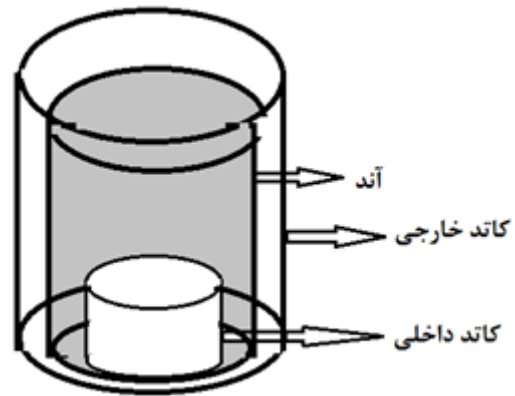
$$J_{o,i} = J_i^{ref} \exp \left(-\frac{E_{act,i}}{RT} \right), i = a, c \quad (14)$$

برای آند از جنس نیکل و کاتد فولادی مقدار چگالی جریان تبدلی مرجع به ترتیب 10^{-2} و 10^{-3} آمپر بر متر مربع گزارش شده است. همچنین انرژی فعال سازی آند و کاتد به ترتیب معادل ۷۶ و ۱۸ کیلوژول بر مول می باشد.

افت پتانسیل اهمیک به دلیل مقاومت الکتریکی در سلول های الکترولیزر حاصل می شود. و از آن جایی که مقاومت الکترودها و صفحات در الکترولیزر ZPR بسیار پایین است، لذا جهت محاسبه افت پتانسیل اهمیک تنها مقاومت اهمی الکترولیت در نظر گرفته می شود. افت پتانسیل اهمی الکترولیت نشانگر مقاومت یونی آن در برابر حرکت و انتقال هیدروژن می باشد در این قسمت مقاومت اهمیک بر حسب چگالی جریان از معادله ۱۵ محاسبه می گردد:

$$V_{ohmic} = J \cdot \Omega \quad (15)$$

مقاومت اهمی الکترولیت بر حسب اهم و J چگالی جریان است. مقاومت اهمی محلول کربنات پتاسیم در غلظت های مختلف و دمای ۲۹۸ درجه کلوین در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲. شماتیک نواحی سطح کاتدی و آندی.

در معادله ۶، S_{int} و S_{ext} به ترتیب مساحت کاتد داخلی و خارجی می باشد. انرژی الکتریکی مورد نیاز الکترولیزر با استفاده از معادله ۷ محاسبه می شود:

$$P_{elec} = J \cdot V \quad (7)$$

در معادله ۷ ولتاژ سیستم الکترولیزر و J همان چگالی جریان است. مقدار ولتاژ الکترولیزر با استفاده از معادله ۸ از حاصل جمع ولتاژ برگشت پذیر (V_0)، به همراه افت ولتاژ فعال سازی در آند ($V_{act,a}$) و کاتد ($V_{act,c}$) و ولتاژ اهمیک (V_{ohmic}) به دست می آید.

$$V = V_0 + V_{act,c} + V_{act,a} + V_{ohmic} \quad (8)$$

ولتاژ برگشت پذیر که معادل اختلاف پتانسیل احیای گونه های کاتد و آند است. با استفاده از معادله نرنست محاسبه می شود به این صورت که معادله نرنست برای نیم واکنش های اکسایش (تولید اکسیژن) و کاهش (تولید هیدروژن) به صورت زیر است:

$$E_a = +1,229 + \left(\frac{RT}{4F} \right) \ln \left\{ \frac{[H_2O^+]}{[O_2]} \right\}, E^{\circ} = +1,175V \quad (9)$$

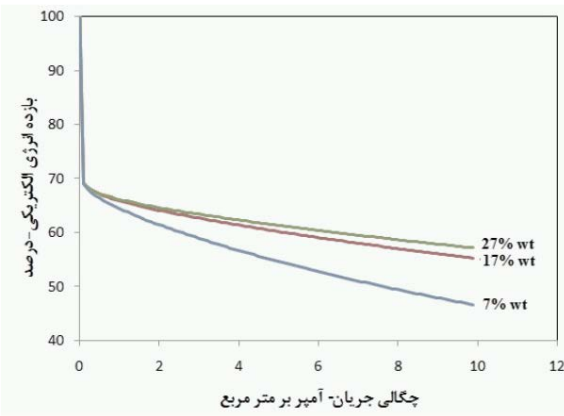
$$E_c = 0,000 + \left(\frac{RT}{2F} \right) \ln \left\{ \frac{[H_2O^+]}{[H_2]} \right\}, E^{\circ} = -0,414V \quad (10)$$

معادله کلی پتانسیل برگشت پذیر سل اساس معادلات نرنست و بر حسب فشارهای جزئی گازهای خروجی به صورت معادله ۱۱ قابل بازنویسی است.

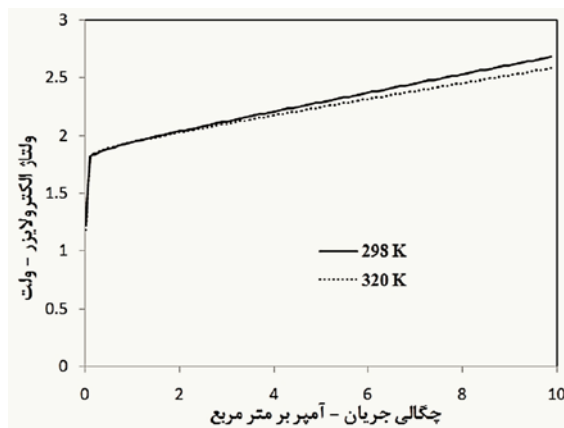
$$E = E_c + \left(\frac{RT}{2F} \right) \ln \left\{ \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right\} \quad (11)$$

1. Nernst

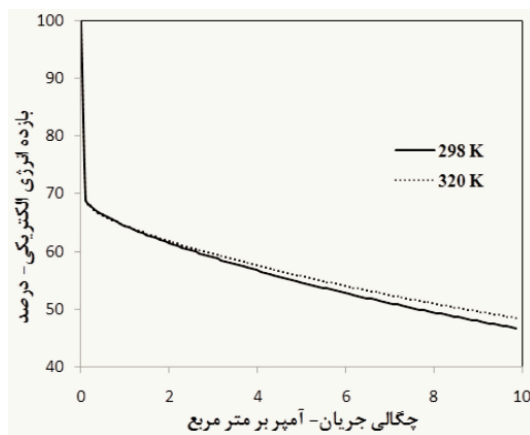




شکل ۴. بازدهی انرژی الکتریکی الکترولایزر در درصدهای وزنی (wt%) مختلف از کربنات پتاسیم.



شکل ۵. بررسی تأثیر دما بر پلاریزاسیون الکترولایزر.



شکل ۶. بررسی تأثیر دما بر بازده انرژی الکتریکی الکترولایزر.

بنابراین با افزایش دما الکترولایزرها عملکرد بهتری خواهند داشت. زیرا در دماهای بالاتر، الکترودهای الکترولایزر فعال تر می‌شود. به بیان دیگر، با افزایش دما، چگالی جریان تبدیلی افزایش یافته و افت پتانسیل فعال‌سازی کم‌تر می‌شود که سبب کاهش انرژی الکتریکی ورودی به الکترولایزر و افزایش بازدهی سیستم می‌شود البته افزایش دما در الکترولایزر تغلیظ آب

۲.۲ بررسی اثر غلظت کربنات پتاسیم

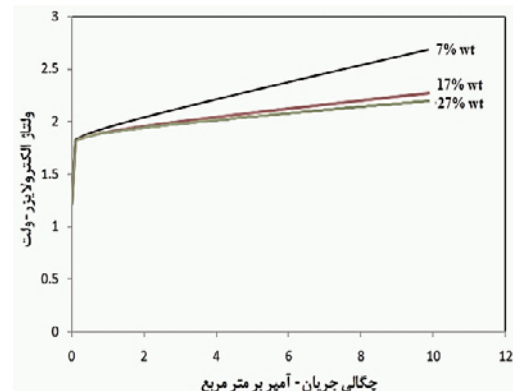
در شکل‌های ۳ و ۴ نمودارهای پلاریزه الکترولایزر و بازدهی انرژی الکترولایزر در سه غلظت مختلف از کربنات پتاسیم (هر یک با اختلاف ده درصد) نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که به ازای درصدهای وزنی (wt%) مختلف از کربنات پتاسیم با افزایش چگالی جریان الکترولایزر ولتاژ الکترولایزر افزایش و بازده انرژی کاهش می‌یابد. این امر بدین دلیل است که با افزایش چگالی جریان افت ولتاژ فعال‌سازی آند و کاتد و ولتاژ اهمی الکترولایزر افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش در هیدروژن تولید شده در واحد زمان و به عبارتی افزایش در چگالی جریان باعث افزایش در ولتاژ سل می‌شود که نتیجه آن کاهش بازدهی انرژی می‌باشد. هم‌چنین در غلظت‌های بالا از کربنات پتاسیم شاهد کاهش ولتاژ و افزایش بازدهی انرژی سل به دست آمده هستیم. روند کاهش ولتاژ و افزایش بازدهی انرژی سل با افزایش ده درصد وزنی کربنات پتاسیم شدیدتر از افزایش ۲۰ درصدی (نسبت به غلظت ۷ درصد) در غلظت کربنات پتاسیم می‌باشد. بنابراین غلظت ۱۷ درصد کربنات پتاسیم یک غلظت بهینه در کاهش ولتاژ و افزایش بازدهی انرژی سل می‌باشد، چرا که علاوه بر کاهش شدیدتر ولتاژ سل در غلظت ۱۷ درصد نسبت به ۲۷ درصد، نیاز به تهیه نمک کم‌تری جهت استفاده در ترکیب الکترولیت می‌باشد که از جنبه اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است.

۳.۲ بررسی اثر دما بر عملکرد الکترولایزر

در شکل‌های ۵ و ۶ نمودارهای ولتاژ الکترولایزر و بازدهی انرژی الکتریکی الکترولایزر در دو دمای ۲۹۸ و ۳۲۰ درجه کلوین نشان داده شده است.

در محدوده چگالی جریان خیلی پایین، انرژی الکتریکی مورد نیاز با افزایش چگالی جریان به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد. از این‌رو بازدهی انرژی الکترولایزر با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابد.



شکل ۳. پلاریزه الکترولایزر در درصدهای وزنی (wt%) مختلف از کربنات پتاسیم.



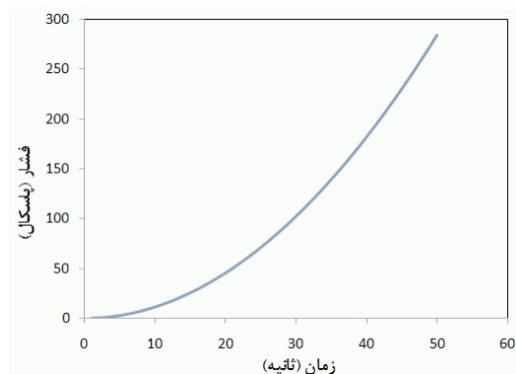
۳. نتیجه‌گیری

جهت بهینه‌سازی توان مصرفی در الکترولیت الکترولايزر ZPR نیازی به تغییر نمک نمی‌باشد اما استفاده از غلظت‌های بالاتر کرنات پتاسیم تا حد زیادی انرژی الکتریکی مصرفی در الکترولايزر را کاهش می‌دهد و می‌توان با اعمال جریان‌های بالاتر میزان الکترولیز آب سنگین را افزایش داد، در نتیجه مدت زمان تغلیظ آب سنگین را کاهش داد. همچنین با بررسی دقیق‌تر این موضوع به روش‌های مدل‌سازی دینامیکی الکترولايزر با معرفی انواع تلفات ولتاژ در سیستم الکترولايزر معادله‌ای برای ولتاژ الکترولايزر به دست آمد. معادله ولتاژ الکترولايزر به عنوان تابع هدف انتخاب شد و تأثیر برخی پارامترها از قبیل نوع الکترولیت، غلظت الکترولیت، دما و چگالی جریان در بهینه‌سازی مصرف انرژی بررسی شدند. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهند که پلاریزاسیون و بازده انرژی الکتریکی الکترولايزر با افزایش ده درصدی غلظت کرنات پتاسیم با شدت بیش‌تری نسبت به افزایش ۲۰ درصدی آن تغییر می‌یابد. لذا غلظت ۱۷ درصد از کرنات پتاسیم به عنوان یک غلظت بهینه به شمار آمده و در الکترولايزر آب سنگین قابل جایگزین با غلظت ۷ درصد وزنی می‌باشد. همچنین نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهند که در غلظت ۱۷ درصد از کرنات پتاسیم و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد پلاریزاسیون الکترولايزر تا ۱۵/۴٪ کاهش و از طرفی بازدهی انرژی الکتریکی را تا ۱۸/۳٪ افزایش می‌یابد. اگر چه نقش دما بر پارامترهای عملکردی از قبیل ولتاژ و بازدهی انرژی الکترولايزر زیاد نبود، اما به‌طور کلی نتایج مدل‌سازی‌های ولتاژ-جریان نشان داده که الکترولايزر در دماهای بالاتر عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

سنگین نمی‌تواند تا بی‌نهایت ادامه داشته باشد چرا که در دماهای بالاتر از ۳۱۳ درجه کلوین امکان تبخیر آب سنگین و ورود آن به محفظه جداسازی (کندانسور) افزایش می‌یابد.

۴.۲ محاسبه فشار کندانسور

گازهای حاصل از الکترولايزر بعد از خروج وارد محفظه‌ی جداکننده^۱ (کندانسور) می‌شوند. اگر چه انتظار می‌رود مخلوط این گازها فقط شامل هیدروژن، دوتریم و اکسیژن باشد ولی به دلیل اعمال جریان به الکترولايزر و گرم شدن آن تا حدود ۳۱۳ درجه کلوین احتمال بخار شدن آب و ورود آن به کندانسور وجود دارد. در محفظه‌ی کندانسور با سرد کردن مخلوط گازها، بخار آب احتمالی از مخلوط جدا می‌شود. در این‌جا با استفاده از مدل‌سازی‌های ارائه شده در این طرح، میزان گازهای خروجی و فشار درون کندانسور محاسبه شده است. قابل ذکر است که جهت محاسبه دقیق میزان گازهای خروجی در هر لحظه از زمان می‌بایستی الگوی نوسانی جریان برای الکترولايزر ZPR مشخص باشد. بدین صورت که با تغییر جریان نسبت به زمان، آهنگ تولید گازهای خروجی نیز تغییر یافته تا به تدریج جریان به ۵۰ آمپر ورودی برسد. در عین حال انتظار می‌رود با گذشت زمان، فشار کندانسور به دلیل ازدیاد گازهای خروجی از الکترولايزر افزایش یابد. در آن‌جا که الگوی نوسانی جریان الکترولايزر ZPR نسبت به زمان در دسترس نمی‌باشد مبنای محاسبات بر اساس تغییرات جریان با آهنگ ۱ آمپر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. تغییرات فشار درون کندانسور (برحسب پاسکال) نسبت به زمان (ثانیه) در شکل ۷ نشان داده شده است. فشار درون کندانسور نسبت به زمان با اعمال جریان ۵۰ آمپر اول به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. قابل ذکر است که دمای کندانسور ۲۵ درجه سانتی‌گراد و حداکثر فشار درون آن نباید از ۳/۸ بار تجاوز کند. در این‌جا از فشار جزیی بخار آب صرف‌نظر شده است چرا که بخار آب از مخلوط جدا می‌شود.



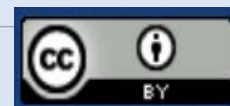
شکل ۷. تغییرات فشار کندانسور برحسب زمان با اعمال ۵۰ آمپر جریان اولیه به الکترولايزر.



1. S.K. Das, S.U. Choi, H.E. Patel, *Heat transfer in nanofluids—a review*, *Heat Transfer Engineering*, **27**, 3-19 (2006).
2. W. Yu, et al, *Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements*, *Heat Transfer Engineering*, **29**, 432-460 (2008).
3. W. Yu, H. Xie, *A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications*, *Journal of Nanomaterials*, (2012).
4. E. Michaelides, *Transport properties of nanofluids—a critical review*, *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, **38**, 1-79 (2013).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

سعید صلاحی، مهدی فرج پور، صبا باصیری، سیدمنصور نوربخش (۱۴۰۲)، بررسی شرایط عملکردی الکترولاایزر تغلیظ آب سنگین مورد استفاده در رآکتور صفر قدرت اصفهان، ۱۰۶، ۳۹-۴۵

DOI: 10.24200/nst.2023.1221.1795

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1551.html