

تهیه ترکیب سوپراکسید پتاسیم به عنوان محصول احیاکننده هوا در محیط های بسته نظامی

سید مسعود بنی هاشمیان^۱، منوچهر فتح اللهی^{۲*}، محمود گرجی^۳، سید قربان حسینی^۴، سعید توانگر روستا^۵

۱- دانشجوی دکتری ۲ و ۳ و ۵- دانشیار ۴- استاد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۰، انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/۲۰۱۰۰۱.۱.۲۶۷۶۲۹۳۵.۱۴۰۳.۱۵۳.۳.۴>

چکیده

سوپراکسید پتاسیم (KO_2) به عنوان منبع شیمیایی تأمین اکسیژن و حذف دی اکسید کربن شناخته می شود که می تواند در دستگاه های احیا ساز هوای تنفسی در محیط های بسته نظامی مورد استفاده قرار گیرد. این ترکیب به شدت به رطوبت حساس بوده و در صورت تماس با آن اکسیژن آزاد می کند و به همین دلیل در محیط هایی با کمبود سطح اکسیژن کاربرد دارد. در این پژوهش، سوپراکسید پتاسیم برای اولین بار با روش گرمایش مقاومتی در جریان هوای خشک و گرم سنتز و تولید شد. نتایج به دست آمده از این روش شامل محتوای اکسیژن فعال، انرژی مصرفی و راندمان تولید محصول با نتایج به دست آمده از روش های دیگر سنتز و تولید ترکیب سوپراکسید پتاسیم مانند گرمایش IR در خلأ، گرمایش مایکروویو در جریان هوای خشک، و روش الکترو هیدرودینامیکی (EHD) توسط سایر محققین، مقایسه و ارزیابی شد. نتایج نشان داد که محتوای اکسیژن فعال محصول تولید شده با روش گرمایش مقاومتی در جریان هوای خشک و گرم ۱۳٪ بود در حالی که بیشترین مقدار آن حدود ۲۵٪ و با روش EHD به دست آمد. انرژی مصرفی روش گرمایش مقاومتی در جریان هوای خشک و گرم ($61.2 \text{ kWh/kg } KO_2$) بیشتر از سایر روش ها و مدت زمان انجام فرآیند در این روش (۳۵s) کمتر از روش های دیگر بود. همچنین راندمان تولید محصول با این روش (0.02 kg/h) بیشتر از روش EHD بود.

کلیدواژه ها: احیاکننده هوای تنفسی، سوپراکسید پتاسیم، محیط های بسته نظامی، گرمایش مقاومتی

Preparation of Potassium Superoxide Compound as an Air Revitalization Product in Enclosed Military Spaces

S. M. Banihashemian, M. Fathollahi*, M. Gorji, S. Gh. Hosseini, S. Tavangar Roosta

Malek Ashtar University of Technology

(Received: ۲۰۲۴/۰۳/۱۶, Revised: ۲۰۲۴/۰۴/۲۸, Accepted: ۲۰۲۴/۰۵/۰۱, Published: ۲۰۲۴/۰۵/۳۱)

Abstract

Potassium superoxide (KO_2) is known as a chemical source for oxygen supply and carbon dioxide removal, which can be used in respiratory air revitalization systems in enclosed military spaces. This compound is highly sensitive to moisture and releases oxygen upon contact with it, making it suitable for use in oxygen-deficient spaces. In this study, potassium superoxide was synthesized and produced for the first-time using resistance heating method at dry and hot air flow. The obtained results from this method—including active oxygen content, energy consumption, and production efficiency—were compared and evaluated with those from other potassium superoxide synthesis and production methods, such as IR heating under vacuum, microwave heating in dry air flow, and the electrohydrodynamic (EHD) method reported by other researchers. The results showed that the active oxygen content of the product obtained by resistance heating method at dry and hot air flow was ۱۳٪, whereas the highest value (~۲۵٪) was achieved using the EHD method. The energy consumption of the resistance heating method at dry and hot air flow ($61.2 \text{ kWh/kg } KO_2$) was higher than other methods, while the process duration (۳۵ seconds) was shorter than other techniques. Additionally, the production efficiency of this method (0.02 kg/hr) was higher than that of the EHD method.

Keywords: Air Revitalization, Potassium Superoxide, Enclosed Military Spaces, Resistance Heating.

*Corresponding Author E-mail: fathollahi.manoochehr@gmail.com

۱. مقدمه

سوپراکسیدپتاسیم (KO_2) یک ترکیب شیمیایی معدنی از فلز قلیایی است. این ماده یک جامد پارامغناطیس زردرنگ است که به رطوبت بسیار حساس است. این ترکیب به‌عنوان یک نمک پایدار از آنیون سوپر اکسید شناخته می‌شود و در شرایط مرطوب به سرعت تجزیه می‌شود [۱]. سوپراکسیدپتاسیم به‌طور مؤثری دی‌اکسیدکربن را از هوای تنفسی حذف می‌کند که این ویژگی آن را برای استفاده در دستگاه‌های تنفس در شرایط خاص مانند دستگاه‌های تنفسی مداربسته، فضاپیماها و زیردریایی‌ها مناسب می‌سازد. همچنین این ماده به‌عنوان منبع تولید اکسیژن در محیط‌های بسته عمل می‌کند که برای بقای انسان در محیط‌هایی با کمبود سطح اکسیژن مانند فضا یا زیر آب ضروری است (واکنش ۱) [۲].

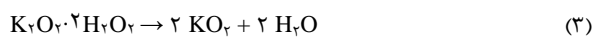


سوپراکسیدپتاسیم به‌عنوان یک ترکیب شیمیایی با ویژگی‌های منحصربه‌فرد، در محیط‌های بسته نقش مهمی در حذف آلودگی‌ها و مواد سمی مانند هیدروژن سولفید، ایندول، اسکاتول، کریسول و همچنین باکتری‌های موجود در مجاری تنفسی ایفا می‌کند. این ویژگی‌ها، سوپراکسیدپتاسیم را به گزینه‌ای مناسب برای استفاده در دستگاه‌های احیاکننده هوا تبدیل کرده است [۳].

مطالعات نشان داده‌اند که سوپراکسیدپتاسیم بهترین بازدهی را در میان ترکیبات پراکسید و سوپر اکسید فلزات قلیایی در آزادسازی اکسیژن دارد. به‌طوری‌که ۱ kg سوپراکسیدپتاسیم می‌تواند حدود ۰/۳۳۸ kg اکسیژن تولید کند و همچنین حدود ۰/۳۱۰ kg دی‌اکسیدکربن را حذف کند. این ویژگی خصوصاً در محیط‌های بسته که نیاز به کنترل کیفیت هوا وجود دارد، اهمیت زیادی دارد. میزان تولید و جذب توسط انسان و ماده شیمیایی با دو پارامتر MRQ^1 (نسبت حجمی دی‌اکسیدکربن آزاد شده به اکسیژن مورد نیاز برای انسان) و SRQ^2 (نسبت حجمی دی‌اکسیدکربن جذب شده به اکسیژن تولید شده ناشی از ماده شیمیایی) شناخته می‌شود. SRQ از پارامترهای مهم دستگاه‌های تنفسی است که مقدار مورد نیاز برای تنفس انسان ۰/۸۲ است. محدوده ضریب تنفسی سیستم (SRQ) سوپراکسیدپتاسیم نزدیک به محدوده ضریب تنفسی انسان (MRQ) است و می‌توان آن را به‌گونه‌ای کنترل کرد که روی ۰/۸۲ ثابت بماند. این امر باعث می‌شود تا این ترکیب برای استفاده در دستگاه‌های احیای هوا بسیار مناسب باشد. تولید سوپراکسیدپتاسیم با کیفیت بالا می‌تواند به افزایش کارایی دستگاه‌های احیای هوا کمک کند و امکان استفاده از آن را در

شرایط مختلف فراهم سازد. بنابراین، نیاز به توسعه روش‌های تولید آن برای بهره‌وری بیشتر احساس می‌شود [۴].

سوپراکسیدپتاسیم با روش‌های مختلفی تهیه و تولید می‌شود؛ اما به‌صورت تجاری از روش اکسیداسیون مستقیم بخار فلز پتاسیم در حضور اکسیژن به دست می‌آید [۵]. روش معمول برای تولید سوپراکسیدپتاسیم شامل واکنش هیدروکسید پتاسیم (KOH) با پروکسید هیدروژن (HO_2) در یک محلول آبی است. این فرآیند شامل دو مرحله است، در مرحله اول، هیدروکسید پتاسیم با پروکسید هیدروژن واکنش می‌دهد و پتاسیم پروکسید پراکسوهیدرات ($K_2O_2 \cdot 2H_2O$) تولید می‌شود (واکنش ۲). در مرحله دوم، محلول حد واسط پتاسیم پروکسید پراکسوهیدرات سنتز شده و بلافاصله رطوبت از محیط واکنش حذف می‌شود تا فاز جامد سوپراکسیدپتاسیم ایجاد گردد (واکنش ۳). این مرحله معمولاً تحت حرارت و با سرعت بالا انجام می‌شود [۶-۸].



تولید سوپراکسیدپتاسیم از طریق واکنش هیدروکسید پتاسیم با پروکسید هیدروژن یک فرآیند پیچیده است که نیازمند کنترل دقیق شرایط واکنش برای جلوگیری از اتلاف اکسیژن و افزایش کارایی تولید است. این روش تولید به‌عنوان یک فرآیند شیمیایی دارای چالش‌های خاصی است. یکی از چالش‌های اصلی در این فرآیند، واکنش گرمای هیدروکسید پتاسیم با پروکسید هیدروژن است که می‌تواند منجر به ازدست‌دادن قابل توجهی اکسیژن شود و کیفیت سوپراکسیدپتاسیم تولیدی را کاهش دهد. این واکنش به‌شدت گرمایزا است. این گرما می‌تواند باعث تبخیر و ازدست‌رفتن اکسیژن شود که در مراحل بعدی برای تولید محصول نهایی ضروری است. این مسئله به‌ویژه زمانی مشکل‌ساز می‌شود که کنترل دما در حین واکنش دشوار باشد. ماهیت بسیار واکنش‌پذیر هیدروکسید پتاسیم و پروکسید هیدروژن کنترل این واکنش را پیچیده می‌کند. تغییرات ناگهانی در دما یا فشار می‌تواند منجر به افزایش ناگهانی آزادسازی اکسیژن شود که ممکن است به کاهش بازده تولید سوپراکسیدپتاسیم منجر شود. شناسایی و مدیریت چالش‌های موجود در این فرآیند می‌تواند به بهبود بازده تولید سوپراکسیدپتاسیم کمک کند و امکان استفاده مؤثرتر از این ترکیب را در دستگاه‌های احیای هوا فراهم سازد [۹].

تولید سوپراکسیدپتاسیم به دلیل حساسیت این ترکیب به رطوبت و واکنش‌های نامطلوبی که ممکن است در حضور رطوبت رخ دهد، یکی دیگر از چالش‌های جدی است. رطوبت می‌تواند منجر به تجزیه سوپراکسیدپتاسیم و کاهش اثربخشی آن در کاربردهای مختلف شود و محصولات جانبی ناخواسته‌ای را ایجاد کند. در این راستا، فرآیند تولید سوپراکسیدپتاسیم باید با دقت انجام شود تا تأثیرات منفی رطوبت به حداقل برسد. برای به‌حداقل رساندن تأثیر منفی رطوبت، باید از دستگاه‌هایی استفاده

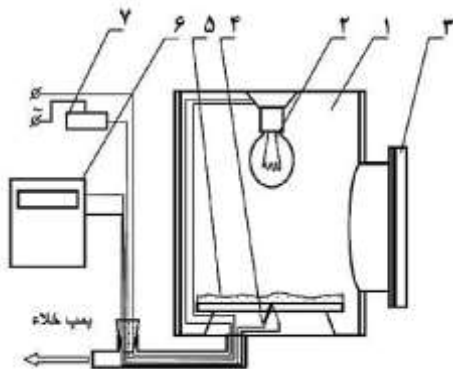
¹ Man's respiratory quotient

² System respiratory quotient

مربع شدت جریان و مقاومت آن است [۱۸-۲۰]. این روش باعث تولید حرارت یکنواخت در تمام نقاط ماده می‌شود که منجر به پردازش بهتر و یکنواخت‌تر مواد می‌گردد. مقدار انرژی حرارتی تولیدشده با جریان القا شده توسط مجذور قدرت میدان الکتریکی و هدایت الکتریکی رابطه مستقیم دارد [۲۱ و ۲۲].

گرمایش مقاومتی سریع‌تر از روش‌های دیگر عمل می‌کند. این روش انرژی را به طور مستقیم به حرارت تبدیل می‌کند و بنابراین اتلاف انرژی کمتری دارد. اغلب دستگاه‌های گرمایش با ایجاد مقاومت حرارتی دارای یک محلول الکترولیت به‌عنوان محیط رسانا، الکتروود و منبع تغذیه هستند. گرمایش مقاومتی عمدتاً در صنایع غذایی برای فرآوری مواد غذایی استفاده می‌شود. همچنین در صنایع شیمیایی و دارویی برای سنتز، خشک کردن و گرمایش مایعات و مواد جامد نیز کاربرد دارد [۲۳ و ۲۴].

در پژوهشی که توسط سایر محققین جهت سنتز سوپراکسیدپتاسیم بر روی بستر فایبرگلاس با روش گرمایش IR در خلأ [۱۲] انجام شد، یک محفظه خلأ صنعتی با حجم ۳۰ لیتر با حرارت تابشی مادون قرمز مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱. شما تیکی از چیدمان آزمایشگاهی گرمایش IR در خلأ برای تولید محصول احیاکننده بر پایه سوپراکسیدپتاسیم در بستر فایبرگلاس، (۱) محفظه خلأ، (۲) لامپ IR (مادون قرمز)، (۳) درب بارگیری، (۴) سنسور دما، (۵) بستر آغشته به محلول قلیایی، (۶) پتانسیومتر، (۷) رئوس تات [۱۲]

یک نمونه بستر فایبرگلاس به ابعاد 11×18 cm در محلول حد واسط $(K_2O \cdot 2H_2O)$ غوطه‌ور شده و در محفظه خلأ روی پایه فلئوروپلاستی قرار گرفت. به‌منظور کاهش فشار بخار آب روی محصول احیاکننده، یک جاذب زئولیتی در خط خلأ بین کابین خلأ و پمپ قرار گرفت. محفظه خلأ از جنس فولاد ضدزنگ به‌عنوان محفظه واکنش استفاده شد. لامپ IR بر روی بستر که به محلول قلیایی آغشته شده است در فاصله‌ای قرار می‌گیرد که تابش یکنواخت را روی تمام سطح آن فراهم کند. قدرت اشعه IR توسط رئوس تات خلأ از طریق شلنگ متصل به اتاق کنترل می‌شد. دما در منطقه واکنش در طول فرآیند با استفاده از یک ترموکوپل که به یک پتانسیومتر وصل شده است، ثبت می‌شد. بر

شود که امکان جداسازی سریع محصول از رطوبت تولیدشده در طول واکنش را فراهم کنند. این تجهیزات می‌توانند شامل دستگاه‌های خشک‌کن یا جداسازهای بخار باشند. همچنین فرآیند تولید باید به‌گونه‌ای باشد که شرایط دما و فشار به‌دقت کنترل شود تا از ایجاد بخار آب و رطوبت اضافی جلوگیری شود. انجام واکنش در یک محیط کنترل شده با رطوبت پایین می‌تواند به جلوگیری از تجزیه و واکنش‌های نامطلوب کمک کند [۱۰-۱۲].

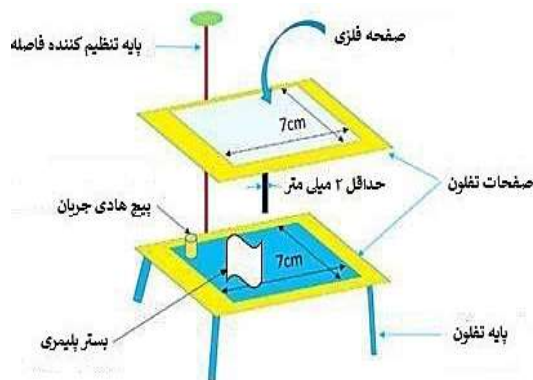
یکی از چالش‌های این فرآیند، واکنش جانبی بین سوپراکسیدپتاسیم و دی‌اکسیدکربن است. این واکنش جانبی می‌تواند منجر به مصرف محصول موردنظر و کاهش بازده تولید آن شود. در شرایطی که دی‌اکسیدکربن در محیط وجود داشته باشد، این گاز می‌تواند با سوپراکسیدپتاسیم واکنش دهد و بخشی از آن را به بی‌کربنات پتاسیم ($KHCO_3$) تبدیل کند (واکنش ۱). این واکنش نه تنها منجر به کاهش مقدار سوپراکسیدپتاسیم می‌شود، بلکه همچنین تولید محصول موردنظر را مختل می‌کند. برای جلوگیری از این واکنش جانبی و به حداکثر رساندن تولید سوپراکسیدپتاسیم، بهتر است حضور دی‌اکسیدکربن در محیط فرآیند به حداقل برسد. این کار می‌تواند شامل استفاده از گازهای بی‌اثر یا ایجاد شرایط خلأ باشد [۱۳].

تفاوت‌های ایجادشده در روش‌های ابداعی جدید برای تولید سوپراکسیدپتاسیم به عوامل متعددی بستگی دارد که شامل استفاده از روش‌های متنوع برای سنتز، افزودن کاتالیزورها و تثبیت‌کننده‌ها، و استفاده از نسبت‌های مولی مختلف می‌شود. استفاده از روش‌های مختلف برای سنتز سوپراکسیدپتاسیم می‌تواند به بهبود بازده و کیفیت محصول نهایی کمک کند. این روش‌ها ممکن است شامل شرایط متفاوت دما و فشار باشند. روش‌های مختلفی برای سنتز و حذف رطوبت وجود دارد که هر کدام با توجه به شرایط، به‌نوعی بر کیفیت نهایی محصول مؤثرند. روش‌هایی مانند گرمایش سنتی با هوای گرم و خشک، گرمایش ماکروویو، گرمایش IR در شرایط خلأ، گرمایش الکترو هیدرودینامیکی و گرمایش مقاومتی [۸ و ۱۴].

گرمایش مقاومتی که به‌عنوان گرمایش اهمی نیز شناخته می‌شود، یک فرآیند حرارتی است که در آن جریان الکتریکی (I) با عبور از یک محیط رسانا یا نیمه‌رسانا و به دلیل مقاومت الکتریکی (R) محیط یا ماده، تبدیل به حرارت می‌شود. این روش به دلیل کارایی و سرعت بالای آن در صنایع مختلف، به‌ویژه در صنایع غذایی و تصفیه و شیرین‌سازی آب مورد توجه قرار گرفته است [۱۵-۱۷]. در گرمایش مقاومتی، ماده‌ای که باید حرارت در آن ایجاد شود، به‌عنوان یک مقاومت الکتریکی در مدار قرار می‌گیرد. جریان الکتریکی از این مدار عبور کرده و حرارت به‌صورت حجمی در تمام سطح ماده تولید می‌شود. این فرآیند بر اساس قانون ژول است که بیان می‌کند حرارت تولیدشده در یک هادی متناسب با

به صورت عمودی با درج سوزن نوک تیز بر روی یک صفحه فلزی افقی ثابت است که بر روی آن بستر فایبرگلاس آغشته به محلول حد واسط ($K_2O \cdot 2H_2O$) قرار داده شد و فرآیند سنتز انجام شد. طول و قطر الکتروود سوزنی شکل به ترتیب ۲۰ mm و ۱/۵ mm بود و الکتروود صفحه‌ای به ابعاد ۷۰×۷۰ mm از جنس نیکل ساخته شد. فاصله بین الکتروود سوزنی و الکتروود صفحه‌ای متغیر بود. الکتروود سوزنی به منبع تغذیه جریان مستقیم (DC) ولتاژ بالای متغیر (۰-۳۰ kV) متصل شد [۲۶]. فرآیند خشک کردن الکتروود هیدرودینامیکی به تخلیه کرونایی حاصل از یون‌های گازی که در میدان الکتریکی صفحه‌ای قوی شتاب می‌گیرند، وابسته است. تخلیه کرونا یک تخلیه الکتریکی موضعی است که به همراه یونیزاسیون هوا در مجاورت الکتروود با شعاع انحنای کوچک و ولتاژ بالا رخ می‌دهد. برای تخلیه کرونا معمولاً از دو الکتروود، یکی با شعاع انحنای کوچک و دیگری با شعاع انحنای بزرگ مانند سیم و صفحه استفاده می‌شود [۲۷].

بر اساس نتایج منتشرشده، بهترین نمونه سوپراکسیدپتاسیم سنتز شده بر بستر فایبرگلاس پس از گذشت مدت زمان ۹۰ min و با محتوای اکسیژن فعال ۲۵٪ به دست آمد [۲۶].



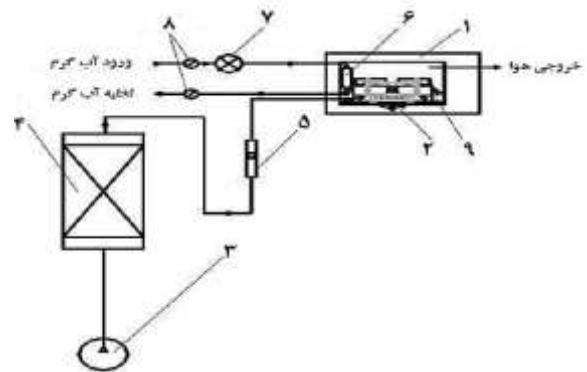
شکل ۳. شماتیک از چیدمان آزمایشگاهی سیستم الکترو هیدرودینامیکی (EHD) برای سنتز محصول احیاکننده بر پایه سوپراکسید پتاسیم در بستر فایبرگلاس [۲۶]

در این پژوهش، تکنیک گرمایش مقاومتی در جریان هوای خشک و گرم به عنوان یک روش جدید و برای اولین بار برای سنتز و تولید سوپراکسیدپتاسیم مورد استفاده قرار گرفته. شرایط متفاوتی برای بررسی اثر پارامترهای مختلف (ولتاژ و شکاف الکتروودها) بر سنتز و محتوای اکسیژن فعال محصول تولیدشده اعمال شد. نتایج به دست آمده از این روش با نتایج ارائه شده توسط پژوهش‌های دیگر در زمینه تولید محصول احیاکننده هوای تنفسی بر پایه سوپراکسیدپتاسیم مانند روش گرمایش IR در خلأ، روش گرمایش مایکروویو در جریان هوای خشک و روش الکترو هیدرودینامیکی (EHD)، مقایسه شد. روش‌های مختلف از لحاظ محتوای اکسیژن فعال، انرژی مصرفی و همچنین راندمان تولید محصول احیاکننده، مورد بررسی، مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. هدف از تحقیق حاضر، معرفی روش جدید سنتز و تولید سوپراکسیدپتاسیم و مقایسه

اساس نتایج منتشرشده از این پژوهش، محصولی با محتوای اکسیژن فعال ۲۴٪ در مدت زمان ۳۰ min به دست آمد.

همچنین در کار تحقیقاتی دیگری جهت سنتز سوپراکسیدپتاسیم بر روی بستر فایبرگلاس با روش گرمایش مایکروویو در جریان هوای خشک [۱۲]، بستر آغشته به محلول حد واسط ($K_2O \cdot 2H_2O$)، به ابعاد ۷×۷ cm در یک محفظه جهت سنتز بر روی پایه فلونئوروپلاستی قرار داده شد (شکل ۲). بخش اصلی این سیستم، یک ژنراتور تابش امواج مایکروویو با فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز و توان خروجی ۸۵۰ وات بود. یک محور جهت چرخاندن میز کار اطراف آن تعبیه شد که سبب توزیع یکنواخت انرژی مایکروویو در سطح محیط واکنش می‌شد. جهت تخلیه بخار آب درون محفظه یک جریان هوا به وسیله کمپرسور با دمای نقطه شبنم ایجاد شد که پس از عبور از یک جاذب و تماس با لوله جریان آب گرم، تأمین می‌شد. یک روتامتر جریان هوا را در ورودی محفظه اندازه‌گیری می‌کرد. برای توصیف فعل‌وانفعال یک موج الکترومغناطیس با مواد جاذب مایکروویو، فرآیند تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به انرژی گرمایی به عنوان یک پدیده توصیف می‌گردد. بر مبنای اصل ذخیره انرژی، موج الکترومغناطیسی تابشی روی یک ماده، بازتاب و تضعیف می‌شود یا از میان آن عبور می‌کند. پاسخ ماده به موج بستگی به مشخصه‌های ذاتی آن دارد [۲۵].

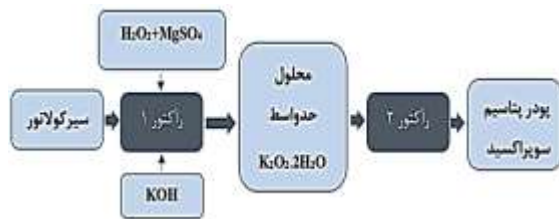
بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های، بهترین نمونه سوپراکسیدپتاسیم سنتز شده بر بستر فایبرگلاس پس از گذشت مدت زمان ۳۷ min به دست آمد که تحت آن محصولی با محتوای اکسیژن فعال ۱۸٪ تولید شد [۱۲].



شکل ۲. شماتیک از چیدمان آزمایشگاهی گرمایش مایکروویو در جریان هوای خشک جهت تولید محصول احیاکننده بر پایه سوپراکسیدپتاسیم در بستر فایبرگلاس، (۱) ژنراتور تابش مایکروویو، (۲) ظرف شیشه‌ای مقاوم در برابر حرارت، (۳) کمپرسور، (۴) جاذب، (۵) روتامتر، (۶) مخزن جریان برای آب، (۷) واتر متر، (۸) ترمومتر، (۹) قاب فولادی ضدزنگ [۱۲]

در مطالعه دیگری، سنتز سوپراکسیدپتاسیم بر روی بستر فایبرگلاس با روش الکترو هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفت [۲۶]. شماتیک از چیدمان آزمایشگاهی سیستم EHD در شکل (۳) نشان داده شده است. این سیستم شامل یک الکتروود نصب شده

منتقل می‌گردد؛ بنابراین خروج محصول حد واسط از رآکتور (۱) و انتقال آن به رآکتور (۲) این فرآیند را ناپیوسته کرده است. نمودار جریان فرآیند در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴. فرآیند سنتز سوپراکسید پتاسیم

۲-۲-۱. سنتز محلول حد واسط پتاسیم پر اکسید پراکسو هیدرات ($K_2O_2 \cdot 2H_2O$) - رآکتور (۱)

سنتز سوپراکسید پتاسیم مطابق نمودار جریان نشان داده شده در شکل (۴) در دو مرحله انجام می‌شود. ابتدا باید محلول حد واسط سنتز شده و سپس محلول به دست آمده در رآکتور گرمایش مقاومتری قرار داده شود تا سوپراکسید پتاسیم به دست آید. محلول حد واسط پتاسیم پروکسید پراکسو هیدرات ($K_2O_2 \cdot 2H_2O$) بسیار اکسند بوده و با رسیدن به سد انرژی فعال سازی و از دست دادن آب و دریافت انرژی آزاد شده ناشی از تبخیر آب، منجر به تبدیل K_2O_2 به KO_2 می‌شود.

به منظور سنتز محلول حد واسط، $0/24$ gr منیزیم سولفات ($MgSO_4$) به عنوان پایدارکننده به یک بالن حجمی (رآکتور (۱) در شکل (۴)) حاوی $88/25$ gr H_2O_2 ۵۰٪ (جهت تثبیت هیدروژن پراکسید) اضافه شد (با نسبت جرمی $1:368$) و محتوای بالن خوب هم زده شد تا $MgSO_4$ کاملاً حل شود. سپس بالن حجمی داخل سیرکولاتور سرمایه‌گذاری قرار داده شد تا دمای محلول کنترل شود. سپس $49/5$ gr KOH (با نسبت جرمی $1:178$) را مرحله به مرحله و به مقدار خیلی کم به محلول حاوی $MgSO_4$ و H_2O_2 اضافه کرده به صورتی که دمای محلول فراتر از ۵ درجه سلسیوس نرود. پس از اتمام اضافه کردن KOH به محلول، محلول به مدت ۳۰ min هم زده شد تا اجزای حل نشده به صورت کامل در محلول حل شود. پس از آن، محلول قلیایی $K_2O_2 \cdot 2H_2O$ به دست آمده داخل یخچال قرار داده شد. نسبت‌های جرمی باتوجه به آزمایش‌های بهینه گذشته انتخاب شدند. همچنین اطلاعات موجود از مقالات و آزمایش‌های نشان می‌دهد که بهترین زمان استفاده از محلول حدود ۱۵ ساعت پس از سنتز آن است. در مرحله بعد به منظور سنتز، حذف سریع رطوبت و تولید ذرات KO_2 ، محلول قلیایی حد واسط $K_2O_2 \cdot 2H_2O$ در رآکتور (۲) در شکل (۴) قرار داده شد و آزمایش‌ها انجام شد.

۲-۲-۲. چیدمان گرمایش مقاومتری - رآکتور (۲)

روش‌های مختلف سنتز و تولید این ماده به عنوان محصول احیاکننده هوای تنفسی در محیط‌های بسته نظامی و ارزیابی نقاط قوت و ضعف هر روش است.

۲. بخش تجربی

۲-۱. مواد شیمیایی و تجهیزات

تمام مواد شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش شامل هیدروژن پراکسید، منیزیم سولفات، پتاسیم هیدروکسید، نیترات کبالت، پتاسیم پرمنگنات و اسیدسولفوریک در درجه‌های تجزیه‌ای از نمایندگان شرکت‌های مرک (آلمان)، پاشا (ترکیه) و یونید (کره جنوبی) در ایران تهیه شدند. پتاس پولکی حاوی حداکثر ۱۰ ppm کاتیون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} در عیار تجاری و ترجیحاً خشک استفاده شد. آب به عنوان حلال مورد استفاده در این آزمایش‌های دیونیزه و تقطیر مضاعف شد.

به منظور تأمین ولتاژ اعمالی به سیستم از یک منبع تغذیه جریان متناوب (AC) ولتاژ متغیر (۰-۳۰۰ V) و توان خروجی ۳ kVA ساخت شرکت امگا تایوان استفاده شد. برای ایجاد جریان هوای خشک و گرم از یک دمنده جریان هوا با سرعت دمش $70-240$ L/min و توان ۱۱۰۰ W ساخت کشور ایران استفاده شد. همچنین برای تهیه محلول قلیایی حد واسط از یک سیرکولاتور ساخت ایران، برای اندازه‌گیری جریان از یک مولتی‌متر ساخت چین و برای توزین نمونه‌های از یک ترازوی دیجیتال ساخت لهستان استفاده شد.

۲-۲. فرآیند سنتز سوپراکسید پتاسیم

بررسی‌های صورت گرفته در مورد روش‌های مختلف سنتز سوپراکسید پتاسیم نشان داد که روش‌های مرسوم مورد استفاده شامل معیبهی همچون عدم مشخص بودن زمان پایان واکنش، کیفیت پایین محصول، زمان ماندگاری کم، محتوای اکسیژن پایین و سرعت نامناسب در آزادسازی اکسیژن هستند. از این رو، با مطالعات و بررسی‌های انجام شده به منظور تولید ماده‌ای با کیفیت، یک سیستم ایجاد گرمایش مقاومتری برای سنتز و تولید سوپراکسید پتاسیم ساخته و به کار گرفته شد. مزیت اصلی این روش نسبت به روش‌های دیگر در مشخص بودن زمان پایان واکنش است که با قطع گرمایش از آسیب حرارتی به محصول احیا ساز جلوگیری می‌کند و به صورت بصری نیز قابل مشاهده است. مزیت روش‌های سنتز سوپراکسید پتاسیم نسبت به روش‌های سنتز کلاسیک، گرمایش یکنواخت، توان مصرفی پایین و هزینه عملیاتی کم آن است. فرآیند سنتز ترکیب احیا ساز هوای تنفسی به صورت ناپیوسته انجام می‌شود. بدین صورت که در هر مرحله، نمونه به دست آمده از رآکتور (۱) به رآکتور (۲) که هدف این تحقیق است، وارد شده و فرآیند انجام می‌شود و سپس محصول تولیدی خارج می‌شود. در این فرآیند محلول حد واسط به رآکتور (۲)

این دمنده جریان هوای خشک و گرم را با سرعت دمش L/min ۷۰-۲۴۰ و توان W ۱۱۰۰ فراهم می‌کند.

به‌طور کلی اتمام فرآیند با قطع جریان عبوری به دلیل خشک شدن محیط و تبدیل محیط نیمه‌رسانا به نارسانا محرز می‌شود که باید با سنتز و تبدیل محلول حد واسط به سوپراکسیدپتاسیم، با دیدن رنگ زرد در محفظه واکنش که همان رنگ محصول است، همراه باشد.

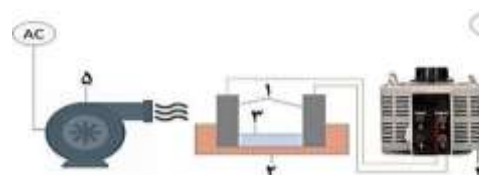
برای بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فرآیند گرمایش مقاومتی برای تولید سوپراکسیدپتاسیم، شرایط عملیاتی مختلف با استفاده از طراحی آزمایش به روش تا گوجی طراحی و اجرا شد. این پارامترها شامل ولتاژ و فاصله الکترودها بودند که همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده است، تغییر کردند. واکنش تا حصول محصول زرد رنگ سوپراکسیدپتاسیم به خوبی پیش رفت و رطوبت تولید شده در کنار سوپراکسیدپتاسیم به‌عنوان محصول واکنش سنتز به طور کامل حذف شد و پودر سوپراکسیدپتاسیم زرد رنگ خشک و پایدار به دست آمد (شکل ۶). نتایج به‌دست آمده در جدول (۱) نشان داده شده است.

بر اساس نتایج آزمایشات، شرایط مختلف برای تولید محصول در نظر گرفته شد که نهایتاً محصولی با محتوای اکسیژن فعال ۱۳٪ در مدت زمان ۳۵ s به دست آمد.



شکل ۶. سوپراکسیدپتاسیم تولید شده با روش گرمایش مقاومتی با عبور جریان هوای خشک و گرم

شکل (۵) شما تیکی از چیدمان آزمایشگاهی رآکتور گرمایش مقاومتی برای سنتز و تولید محصول در شرایط گرمایش مقاومتی در جریان هوای خشک و گرم را نشان می‌دهد.



شکل ۵. شما تیکی از چیدمان گرمایش مقاومتی با عبور جریان هوای خشک و گرم برای سنتز پودر سوپراکسیدپتاسیم. (۱) الکترود، (۲) ظرف واکنش، (۳) محلول حد واسط $K_2O \cdot 2H_2O$ ، (۴) منبع تغذیه جریان متناوب، (۵) دمنده جریان هوا

این سیستم شامل یک ظرف واکنش از جنس تفلون نسوز است که کانال‌هایی به طول 5 cm و 10 cm ، عرض $1/2\text{ cm}$ و ارتفاع (عمق) $1/5\text{ cm}$ ، در آن تعبیه شدند. دو الکترود از جنس استیل ضدزنگ 306 به ابعاد $50 \times 12 \times 1.5\text{ mm}$ برش خورده و در دو انتهای کانال قرار گرفتند. یک دمنده جریان هوای خشک و گرم نیز به کار گرفته شد که به‌صورت موازی جریان را از روی کانال عبور می‌داد. فاصله بین الکترودها در کانال‌های مختلف متغیر است. الکترودها به‌وسیله دو سیم به منبع تغذیه جریان متناوب (AC) با ولتاژ متغیر ($0-300\text{ V}$) متصل می‌شوند.

۲-۳-۲. سنتز سوپراکسیدپتاسیم با روش گرمایش مقاومتی

جهت سنتز سوپراکسیدپتاسیم در رآکتور گرمایش مقاومتی، ۲ میلی‌لیتر از محلول حد واسط $(K_2O \cdot 2H_2O)$ درون کانال‌های ظرف واکنش ریخته شد و دو الکترود مستطیل شکل در دو طرف کانال جای‌گذاری شد. الکترودها توسط دو سیم به منبع تغذیه جریان متناوب وصل شد و با تنظیم ولتاژ مشخصی جریان وصل شد. همچنین ظرف واکنش به‌صورت موازی در مسیر عبور جریان هوای خشک و گرم دمیده شده توسط یک دمنده قرار گرفت (شکل ۵).

جدول ۱. تأثیر ولتاژ و فاصله الکترودها (گرادیان ولتاژ) بر کارایی آزمون‌های سنتز سوپراکسیدپتاسیم در چیدمان گرمایش مقاومتی در جریان هوای خشک و گرم

نمونه	فاصله الکترود (cm)	ولتاژ (V)	گرادیان ولتاژ (V/cm)	جریان (A)	زمان (s)	محتوای اکسیژن فعال (%)	انرژی مصرفی (kWh/kg KO_2)
S1	۵	۱۵۰	۳۰	۰/۶	۴۴	۱۰	۷۲/۷
S2	۵	۱۸۰	۳۶	۰/۶۸	۳۹	۱۲	۶۶/۲
S3	۵	۲۱۰	۴۲	۰/۷۵	۳۵	۱۳	۶۱/۲
S4	۱۰	۲۱۰	۲۱	۰/۴۴	۵۵	۷	۸۹/۴
S5	۱۰	۲۴۰	۲۴	۰/۵	۴۷	۸	۷۹/۳

۳-۲. تعیین محتوای اکسیژن فعال

برای اندازه‌گیری و تعیین محتوای اکسیژن فعال موجود در نمونه تولیدشده سوپراکسیدپتاسیم، به‌صورت زیر عمل می‌شود:

ابتدا مقدار مشخصی، بین 0.2 gr تا 0.4 gr از سوپراکسیدپتاسیم سنتز شده وزن شده (w_i) و درون یک بشر 50 mL ریخته شد. سپس 10 میلی‌لیتر محلول آبی نیترات کبالت 5% (وزنی/حجمی) توسط یک پیپت به بشر حاوی سوپراکسیدپتاسیم اضافه شد. با افزودن محلول آبی نیترات کبالت، کل محتوای اکسیژن سوپراکسیدپتاسیم به‌صورت گاز آزاد شده و وزن جدید از روی ترازو یادداشت شد (w_f). سپس محتوای اکسیژن فعال نمونه با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد [۲۹ و ۲۸].

$$\% \text{O}_{\text{fact}} (\text{wt} \%) = ((w_f - w_i) / w_i) \times 100 \quad (4)$$

۴-۲. مصرف انرژی

مقدار انرژی مصرفی فرآیند سنتز محصول احیا ساز هوای تنفسی به‌صورت مقدار انرژی مورد نیاز برای تبخیر واحد جرم آب و برحسب kWh/kg محاسبه شد. این کمیت که معمولاً به‌عنوان انرژی ویژه یا راندمان انرژی نیز شناخته می‌شود، برحسب دو متغیر یعنی توان الکتریکی (kW) و سرعت حذف رطوبت (kg/h) و با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد:

$$\eta = ((V \times I) / \Delta m) \Delta t \quad (5)$$

که در آن V ولتاژ (V) و I جریان (A) از نمایشگر منبع تغذیه جریان متناوب و مولتی‌متر تعیین شد و Δm از تعادل به‌عنوان کاهش جرم (حذف آب/تولید سوپراکسیدپتاسیم) در مدت زمان Δt تعیین شد [۳۰]. در تمام آزمایش‌ها راندمان انرژی در طول مدت‌زمان انجام فرآیند محاسبه شد.

۵-۲. راندمان تولید

راندمان تولید محصول احیا ساز هوای تنفسی بر پایه سوپراکسیدپتاسیم به‌صورت مقدار وزنی تولید سوپراکسیدپتاسیم در هر ساعت و برحسب kg/h محاسبه شد. این کمیت که معمولاً به‌عنوان مقدار تولید محصول احیاکننده هوای تنفسی نیز شناخته می‌شود، برحسب دو کمیت مقدار تولید محصول (kg) و مدت‌زمان انجام فرآیند برای تولید 1 kg از محصول (h) محاسبه می‌شود [۱۲].

۳. نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد، هدف از پژوهش حاضر بررسی یک روش جدید برای تهیه و تولید محصول احیاکننده هوای تنفسی بر پایه سوپراکسیدپتاسیم و مقایسه نتایج حاصل با نتایج سایر روش‌های سنتز و تولید این ماده است. این روش شامل یک فرآیند دومرحله‌ای به‌صورت تهیه محلول قلیایی $\text{K}_2\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ و سپس

سنتز آن با روش‌های مختلف گرمایش به‌منظور دستیابی به محصول نهایی است. برای دستیابی به این هدف، شرایط عملیاتی مختلف و تغییر در پارامترهای آزمایشی در روش گرمایش مقاومتی در جریان هوای خشک و گرم مورد بررسی قرار گرفته (جدول ۱). سپس نتایج حاصل از این روش با نتایج ارائه‌شده توسط محققین دیگر در سایر پژوهش‌های مرتبط با سنتز این محصول با استفاده از روش‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفت.

۳-۱. محتوای اکسیژن فعال نمونه‌های سنتز شده

پس از پایان فرآیند محتوای اکسیژن فعال نمونه‌های به‌دست‌آمده محاسبه شد. در فاصله الکترودهای 5 cm ، با افزایش ولتاژ (افزایش گرادیان ولتاژ)، محتوای اکسیژن فعال محصول به‌دست‌آمده افزایش یافت، به‌طوری‌که بیشترین محتوای اکسیژن فعال در ولتاژ 210 V (گرادیان ولتاژ 42 V/cm)، 13% بود (نمونه S_3). به‌عبارت‌دیگر، افزایش ولتاژ در فاصله الکترودهای ثابت سبب افزایش محتوای اکسیژن فعال می‌شود، زیرا درصد رطوبت در ولتاژ بالا، میدان الکتریکی یا گرادیان ولتاژ بالا کاهش می‌یابد و میزان تبدیل KOH به KO_2 را کاهش می‌دهد [۲۶]. در فاصله الکترودهای 10 cm ، با افزایش ولتاژ و افزایش گرادیان ولتاژ، محتوای اکسیژن فعال محصول به‌دست‌آمده افزایش یافته است، به‌طوری‌که بیشترین محتوای اکسیژن فعال در ولتاژ 240 V (گرادیان ولتاژ 24 V/cm)، 8% است (نمونه S_5). این نتیجه ناشی از افزایش جریان الکتریکی عبوری از محیط واکنش با افزایش ولتاژ (افزایش گرادیان ولتاژ) و نیز کاهش زمان فرآیند است. این نتایج با نتایج مطالعات پیشین که در آن افزایش ولتاژ اعمال‌شده باعث افزایش سرعت حذف رطوبت شده است، تطابق خوبی را نشان می‌دهد [۲۶ و ۳۱ و ۳۲].

در سنتز و تولید سوپراکسیدپتاسیم در بستر فایبرگلاس با استفاده از روش گرمایش IR در خلأ [۱۲]، افزایش مدت‌زمان فرآیند سبب افزایش محتوای اکسیژن فعال محصول تولیدشده شد. اما این افزایش محتوای اکسیژن فعال با افزایش زمان فرآیند دائمی نیست و با طولانی‌تر شدن زمان انجام فرآیند به‌تدریج محتوای اکسیژن فعال نمونه سنتز شده کاهش یافت. این کاهش مشخصاً به دلیل طولانی‌شدن مدت‌زمان فرآیند و آزادشدن اکسیژن محبوس در ماده تولیدشده به دلیل شرایط محیطی بود. بنابراین بهترین نمونه سنتز شده در مدت‌زمان 30 min و با محتوای اکسیژن فعال 24% به دست آمد.

استفاده از روش گرمایش مایکروویو در جریان هوای خشک برای سنتز سوپراکسیدپتاسیم در بستر فایبرگلاس [۱۲]، سبب تولید محصول احیاکننده هوای تنفسی با محتوای اکسیژن فعال 18% در مدت‌زمان 37 min شد.

انرژی مصرفی نمونه‌های سنتز شده به‌ازای هر kg سوپراکسیدپتاسیم به‌دست‌آمده با روش گرمایش مقاومتی در جریان هوای خشک و گرم در فاصله‌های مختلف (گرادیان ولتاژهای مختلف) در جدول (۱) نشان داده شده است. طبق نتایج ارائه شده، افزایش گرادیان ولتاژ در فاصله‌های الکترودهای ثابت منجر به کاهش انرژی مصرفی می‌شود. در این روش افزایش گرادیان ولتاژ، به سبب افزایش ولتاژ و جریان اعمالی به سیستم، باعث کاهش مدت زمان انجام فرآیند شده و انرژی مصرفی فرآیند را کاهش می‌دهد [۳۱ و ۳۳ و ۳۴].

بر اساس داده‌های جدول (۱)، نمونه S۳ کمترین مصرف انرژی را با $61/2 \text{ kWh/kg KO}_2$ و بیشترین میزان محتوای اکسیژن فعال (۱۳٪) را در میان نمونه‌های به‌دست‌آمده داشت. بنابراین این نمونه به‌عنوان نمونه بهینه در نظر گرفته شد.

در سنتز و خشک کردن سوپراکسیدپتاسیم در بستر فایبرگلاس با استفاده از روش گرمایش IR در خلأ [۱۲]، میزان انرژی مصرفی برای تولید محصول احیاکننده با محتوای اکسیژن فعال ۲۴٪، 40 kWh/kg KO_2 تولید شده در بستر فایبرگلاس بوده است. این مقدار مصرف برای سنتز نمونه‌های مختلف متفاوت بوده که نهایتاً سنتز نمونه ذکر شده بهینه‌ترین حالت ممکن است.

استفاده از روش گرمایش میکروویو در جریان هوای خشک برای سنتز سوپراکسیدپتاسیم در بستر فایبرگلاس [۱۲]، سبب تولید محصول احیاکننده هوای تنفسی با محتوای اکسیژن فعال ۱۸٪ با مصرف انرژی 20 kWh/kg KO_2 تولید شده در بستر فایبرگلاس شده است. انرژی مصرفی نمونه‌های سنتز شده سوپراکسیدپتاسیم در بستر فایبرگلاس با روش گرمایش الکترو هیدرودینامیکی (EHD) [۲۶] در شرایط مختلف، توسط محققین منتشر شده است. بر طبق داده‌های منتشر شده، با افزایش فاصله الکترو و همچنین افزایش ولتاژ اعمالی، انرژی مصرفی فرآیند افزایش یافته است. در نهایت، بهینه‌ترین حالت، تولید محصول احیاکننده با انرژی مصرفی $11/7 \text{ kWh/kg KO}_2$ تولید شده در بستر فایبرگلاس با محتوای اکسیژن فعال ۲۵٪ است.

جدول ۳. انرژی مصرفی نمونه‌های سنتز شده بر پایه سوپراکسیدپتاسیم با روش‌های مختلف

روش	زمان	انرژی مصرفی (kWh/kg KO_2)
گرمایش مقاومتی	۳۵s	۶۱/۲
IR	۳۰ min	۴۰
مایکروویو	۳۷ min	۲۰
EHD	۹۰ min	۱۱/۷

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر و همچنین نتایج ارائه شده توسط سایر پژوهش‌ها، بهینه‌ترین نتایج جهت مقایسه در جدول (۳) و شکل (۸) ارائه شده است. به این اساس، مصرف انرژی روش EHD برای سنتز و تولید محصول احیاکننده کمتر از

باتوجه به نتایج ارائه شده از سنتز سوپراکسیدپتاسیم در بستر فایبرگلاس با روش الکترو هیدرودینامیکی (EHD) [۲۶]، افزایش ولتاژ در فاصله الکترودهای ثابت، باعث افزایش محتوای اکسیژن فعال شده بود. به‌گونه‌ای که بهترین نمونه سنتز شده در فاصله الکترودهای $1/2 \text{ cm}$ ، با اعمال ولتاژ 10 kV ، در مدت زمان 90 min و با محتوای اکسیژن فعال ۲۵٪ به دست آمد.

باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر و همچنین نتایج ارائه شده توسط سایر پژوهش‌ها، بهینه‌ترین نتایج جهت مقایسه در جدول (۲) و شکل (۷) ارائه شده است. به این اساس، نمونه سنتز شده با روش الکترو هیدرودینامیکی (EHD) دارای محتوای اکسیژن فعال بیشتری (۲۵٪) در مقایسه با سایر روش‌های سنتز بررسی شده بوده است. همچنین طولانی‌ترین مدت زمان فرآیند هم با 90 min مربوط به روش EHD است. محتوای اکسیژن فعال نمونه‌های سنتز شده با روش گرمایش مقاومتی نسبت به روش‌های دیگر کمتر است، که در مدت زمان 35 s به‌دست‌آمده است. که اختلاف فراوانی با سایر روش‌ها از لحاظ مدت زمان دستیابی به محصول نهایی به حساب می‌آید. اما همین زمان کوتاه فرآیند باعث تسریع مراحل انجام واکنش و آزاد شدن مقداری از محتوای اکسیژن محصول در حین تشکیل سوپراکسیدپتاسیم می‌شود و در نتیجه کیفیت محصول نهایی را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر نمونه سنتز شده با روش گرمایش IR با محتوای اکسیژن فعال ۲۴٪ در مدت زمانی کوتاه‌تر از روش EHD (30 min)، بهینه‌ترین روش تولید محصول در بین روش‌های بررسی شده است.

جدول ۲. محتوای اکسیژن فعال نمونه‌های سنتز شده بر پایه سوپراکسیدپتاسیم با روش‌های مختلف

روش	زمان	محتوای اکسیژن فعال (%)
گرمایش مقاومتی	۳۵s	۱۳
IR	۳۰ min	۲۴
مایکروویو	۳۷ min	۱۸
EHD	۹۰ min	۲۵

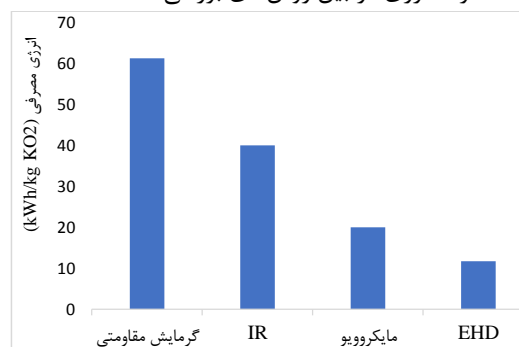


شکل ۷. محتوای اکسیژن فعال نمونه‌های سنتز شده بر پایه سوپراکسیدپتاسیم با روش‌های مختلف

۳-۲. مصرف انرژی نمونه‌های سنتز شده

در این پژوهش، ضمن سنتز و تولید محصول احیاکننده هوای تنفسی بر پایه سوپراکسیدپتاسیم با روش گرمایش مقاومتی در جریان هوای خشک و گرم برای اولین بار، به ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از این روش و مقایسه آن‌ها با نتایج ارائه‌شده توسط پژوهش‌های دیگر در زمینه سنتز و تولید این ماده با روش‌های دیگر پرداخته شد. با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته، سرعت انجام واکنش در روش گرمایش مقاومتی بسیار بیشتر از روش‌های دیگر است که همین امر باعث کوتاه‌تر شدن زمان تولید محصول و افزایش راندمان تولیدشده است. به طوری که راندمان تولید روش گرمایش مقاومتی ($0/02 \text{ kg/h}$) بسیار بیشتر از روش EHD ($0/002 \text{ kg/h}$) است. در نتیجه، می‌توان با استفاده از این روش در کمترین زمان به محصول نهایی دست‌یافت. اما برای بهبود کیفیت محصول تولیدی و بهینه‌کردن انرژی مصرفی آن، به پژوهش‌ها و بررسی‌های بیشتری نیاز است. با مقایسه نتایج ارائه‌شده مشخص شد که محتوای اکسیژن فعال محصول تولیدشده با روش EHD (25%) و روش گرمایش IR (24%)، نسبت به سایر روش‌ها بیشتر بود. این میزان محتوای اکسیژن فعال در مدت‌زمان 90 min با روش EHD و 30 min با روش گرمایش IR به دست آمد. در حالی که میزان مصرف انرژی برای این منظور، 40 kWh/kg KO_2 تولیدشده با روش EHD و حدود 40 kWh/kg KO_2 تولیدشده با روش گرمایش IR بوده است. در نتیجه، انرژی مصرفی روش EHD نسبت به روش‌های دیگر کمتر است. از لحاظ راندمان یا مقدار تولید محصول احیاکننده، روش گرمایش مایکروویو، راندمان تولید بالاتری نسبت به روش‌های دیگر است. روش EHD به دلیل مدت‌زمان طولانی‌تر انجام فرآیند نسبت به سایر روش‌ها، کمترین میزان راندمان تولید محصول احیاکننده را داشت. راندمان تولید محصول نقش کلیدی در افزایش مقیاس و صنعتی‌سازی فرآیندها دارد و اهمیت آن را می‌توان در چند جنبه اصلی بررسی کرد. راندمان بالای تولید به معنای استفاده بهینه از منابع (مواد اولیه، انرژی، نیروی کار و زمان) است. این امر منجر به کاهش هزینه‌های تولیدشده و سودآوری را افزایش می‌دهد. با بهبود راندمان تولید، زمان تولید هر واحد محصول کاهش می‌یابد و این امکان را فراهم می‌سازد تا در مدت‌زمان مشخص، مقدار بیشتری از محصول تولید شود. همچنین افزایش راندمان تولید، فرآیند انتقال از تولید آزمایشی یا کوچ مقیاس به تولید انبوه و صنعتی را تسهیل می‌کند که در موضوع صنعتی‌سازی، این یک موضوع حیاتی است. در مجموع، راندمان تولید محصول نه تنها بر بهره‌وری و سودآوری تأثیر مستقیم دارد، بلکه نقش اساسی در افزایش مقیاس تولید، صنعتی‌سازی و حتی رقابت‌پذیری شرکت‌ها ایفا می‌کند. بهبود مستمر راندمان، یکی از اهداف کلیدی در هر فرآیند تولیدی است و به عنوان یک عامل تعیین‌کننده در موفقیت بلندمدت محسوب می‌شود. سرعت بالای سنتز سوپراکسیدپتاسیم با روش گرمایش مقاومتی و کاهش زیاد زمان واکنش در مقایسه با روش‌های دیگر، باعث راندمان تولید مطلوب این روش شده و در کنار مزیت اصلی

سایر روش‌های سنتز بررسی‌شده است. پس‌از آن، روش‌های گرمایش مایکروویو، گرمایش IR و گرمایش مقاومتی به ترتیب مصرف انرژی بیشتری برای تولید محصول احیاکننده بر پایه سوپراکسیدپتاسیم دارند. همچنین روش EHD دارای طولانی‌ترین مدت‌زمان انجام فرآیند (90 min) و نیز محتوای اکسیژن فعال بالاتری (25%) در مقایسه با روش‌های بررسی‌شده است. اما با توجه به مصرف انرژی پایین این روش و اختلاف فراوان آن در مقایسه با سایر روش‌های بررسی‌شده، روش EHD بهینه‌ترین روش از لحاظ مصرف انرژی در بین روش‌های بررسی‌شده است.



شکل ۸. انرژی مصرفی نمونه‌های سنتز شده بر پایه سوپراکسیدپتاسیم با روش‌های مختلف

۳-۳. راندمان تولید روش‌های مختلف

میزان تولید محصول احیاکننده بر حسب kg در هر h یا راندمان تولید محصول در هر یک از روش‌های بررسی‌شده در جدول (۴) نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده، راندمان یا مقدار تولید محصول احیاکننده بر پایه سوپراکسیدپتاسیم با استفاده از روش گرمایش مایکروویو بیشتر از روش‌های دیگر است. به گونه‌ای که اختلاف فراوانی بین این روش با سایر روش‌های بررسی‌شده وجود دارد. همچنین راندمان تولید محصول در روش EHD به‌طور فراوانی کمتر از سایر روش‌ها است، که این راندمان کم تولید به دلیل زمان طولانی انجام فرآیند در این روش نسبت به سایر روش‌ها است، به طوری که مدت‌زمان انجام فرآیند و تولید محصول نهایی در روش EHD حدود سه برابر روش‌های گرمایش IR و گرمایش مایکروویو است. بنابراین، از لحاظ راندمان یا مقدار تولید محصول احیاکننده بر پایه سوپراکسیدپتاسیم، روش گرمایش مایکروویو بهینه‌ترین روش از میان روش‌های بررسی‌شده است.

جدول ۴. راندمان (مقدار) تولید محصول سنتز شده بر پایه سوپراکسیدپتاسیم با روش‌های مختلف

روش	راندمان (مقدار) تولید محصول احیاکننده (kg/hr)
گرمایش مقاومتی	$0/02$
IR	$0/04$
مایکروویو	$0/12$
EHD	$0/002$

۴. نتیجه‌گیری

- [۱۳] Ferapontov, Y. A.; Ul'yanova, M.; Sazhneva, T. "Kinetics and Mechanism of Decomposition of Peroxide Compounds in the Liquid Phase of the KOH-H₂O₂-H₂O System in Vessels Made of Various Materials"; Russ. J. Appl. Chem. ۲۰۰۹, ۸۲, ۸۲۶-۸۳۱. doi:10.1134/S1070427209050140.
- [۱۴] Alem-Rajabif, A.; Lai, F. C. "EHD-Enhanced Drying of Partially Wetted Glass Beads"; Drying Technol. ۲۰۰۵, ۲۳, ۵۹۷-۶۰۹. doi:10.1081/DRT-200054150.
- [۱۵] Amatore, C.; Berthou, M.; He'bert, S. "Fundamental Principles of Electrochemical Ohmic Heating of Solutions"; J. Electroanal. Chem. ۱۹۹۸, ۴۵۷, ۱۹۱-۲۰۳. doi:10.1016/S0022-0728(98)00306-4.
- [۱۶] Rubinstein, I. "Physical Electrochemistry: Principles, Methods and Applications"; Marcel Dekker: New York, ۱۹۹۵, ۴۷۷-۴۸۹. doi:10.5860/choice.33-1543.
- [۱۷] Eigen, M. "Methods for Investigation of Ionic Reactions in Aqueous Solutions with Half-times as short as 10⁻⁹ sec. Application to Neutralization and Hydrolysis Reactions"; Discuss. Faraday Soc. ۱۹۵۴, ۱۷, ۱۹۴-۲۰۵. doi:10.1039/DF9541700194.
- [۱۸] Sakr, M.; Liu, S. "A Comprehensive Review on Applications of Ohmic Heating (OH)"; Renewable Sustainable Energy Rev. ۲۰۱۴, ۳۹, ۲۶۲-۲۶۹. doi:10.1016/j.rser.2014.07.061.
- [۱۹] Jan, B.; Shams, R.; Rizvi, Q. Ul. E. H.; Manzoor, A. "Ohmic Heating Technology for Food Processing: A Review of Recent Developments"; J. Postharvest Technol. ۲۰۲۱, ۹, ۲۰-۳۴.
- [۲۰] Sastry, S. "Ohmic Heating and Moderate Electric Field Processing"; Food Sci. Technol. Int. (London, U. K.). ۲۰۰۸, ۱۴, ۴۱۹-۴۲۲. doi:10.1177/1082133208098813.
- [۲۱] Palaniappan, S.; Sastry, S. K. "Electrical Conductivities of Selected Solid Foods During Ohmic Heating"; J. Food Process Eng. ۱۹۹۱, ۱۴, ۲۲۱-۲۳۶. doi:10.1111/j.1745-۴۵۳۰.1991.tb0093.x.
- [۲۲] Muhammad, A. I.; Shitu, A.; Tadda, M. A. "Ohmic Heating as Alternative Preservation Technique-a Review"; Arid Zone J. Eng. Technol. Environ. ۲۰۱۹, ۱۵, ۲۶۸-۲۷۷.
- [۲۳] Alkanan, Z. T.; Altemimi, A. B.; Al-Hilphy, A. R. S.; Watson, D. G.; Pratap-Singh, A. "Ohmic Heating in the Food Industry: Developments in Concepts and Applications During ۲۰۱۳-۲۰۲۰"; Appl. Sci. ۲۰۲۱, ۱۱, ۲۵۰۷. doi:10.3390/app11062507.
- [۲۴] Kumar, T. "A Review on Ohmic Heating Technology: Principle, Applications and Scope"; Int. J. Agric. Environ. Biotechnol. ۲۰۱۸, ۱۱, ۶۷۹-۶۸۷. doi:10.30۹۵۴/۰۹۷۴-۱۷۱۲.۰۸.۲۰۱۸.۱۰.
- [۲۵] Nejati Jahromi, M.; Zarezadeh, E.; Sazdar, A. M. "Design and Simulation a Microwave Absorbption Coating Structure to Reduce RCS Using the PSO Method"; Adv. Defence Sci. Technol. ۲۰۲۰, ۱۱, ۱۷۵-۱۸۳ (In Persian). doi:10.1016/j.26762935.1399.11.267.
- [۲۶] Hosseini, S. Gh.; Fathollahi, M.; Motamedalshariaty, S. H.; Shokouhian, R. "Fabrication of Potassium Superoxide/Fiberglass Nanocomposite as Chemical Air Revitalization System by Novel Electrohydrodynamic Technique"; J. Electrostat. ۲۰۲۰, ۱۰۸, ۱۰۳۵۲۲. doi:10.1016/j.jelstat.2020.103522.
- [۲۷] Zamani, A.; Khoshkhou, R.; Hashemzadeh, Gh. "Experimental Study of Three Lifters Using Positive and این روش نسبت به روش‌های دیگر یعنی مشخص بودن پایان واکنش، بررسی بیشتر و افزایش مقیاس این روش تولید را حائز اهمیت می‌کند. به این ترتیب، انتخاب روش سنتز و تولید محصول احیاکننده بر پایه سوپراکسید پتاسیم می‌تواند باتوجه به شرایط و نیازهای هر پروژه متفاوت باشد. آنچه حائز اهمیت است، انتخاب بهینه‌ترین و بهترین روش با در نظر گرفتن ملاحظات کمی، کیفی، زمانی، اقتصادی و دیگر ملاحظات برای تولید محصول بهینه و مقرون به صرفه است.
- ## ۶. مراجع ها
- [۱] Haraldsdottir, A.; Kabamba, P. T.; Ulsoy, A. G. "Sensitivity Reduction by State Derivative Feedback"; J. Dyn. Syst., Meas., Control. ۱۹۸۸, ۱۱۰, ۸۴-۹۳. doi:10.1115/1.3152655.
- [۲] Nuckols, M. L.; Smith, K. A. "The Characterization of Carbon Dioxide Absorbing Agents for Life Support Equipment"; ASME: Phoenix ۱۹۸۲, ۱۴۶-۱۵۲.
- [۳] Holquist, J. B.; Klaus, D. M.; Graf, J. C. "Characterization of Potassium Superoxide and a Novel Packed Bed Configuration for Closed Environment Air Revitalization"; Proc. ۴th Int. Conf. Environmental Systems ۲۰۱۴, ۱۳-۱۷.
- [۴] Gladyshev, N. F.; Gladysheva, T. V.; Dvoretzky, S. I.; Putin, S. B.; Ulyanova, M. A.; Ferapontov Yu, A. "Regenerative Products of New Generation: Technology and Hardware Design"; Mashinostroenie: Moscow ۲۰۰۷, ۱۵۶.
- [۵] Schechter, W. H. "Sodium Superoxide Production"; US Patent ۲,۶۴۸,۵۹۶, ۱۹۵۳.
- [۶] Gladysheva, T. V.; Gladyshev, N. F.; Plotnikov, M. Y.; Dorokhov, R.; Dvoretzky, S. I.; Karelin, A. "Kinetics of Carbon Dioxide Chemisorption and Oxygen Release Under Static Conditions by Nanocrystalline KO₂ Deposited on a Fiber-Glass Matrix"; Russ. J. Appl. Chem. ۲۰۱۵, ۸۸, ۱۰۱۵-۱۰۱۹. doi:10.1134/S1070427215060191.
- [۷] Mas, J.; Argudo, M.; Labanda, J.; Llorens, J. "Mass and Volume Efficient CO₂ Removal and O₂ Generation System"; SAE ۲۰۰۷, ۰۱, ۳۲۵۱. doi:10.4271/2007-01-2251.
- [۸] Gladysheva, T. V.; Gladyshev, N. F.; Dvoretzky, S. I. "Advanced Composite Material for Air Regeneration Systems of Individual and Collective Protection"; Adv. Mater. Technol. ۲۰۱۶, ۱, ۴۴-۵۵. doi:10.17277/amt.2016.01.pp.049-055.
- [۹] Reinsberg, P. H.; Koellisch, A.; Bawol, P. P.; Baltruschat, H. "K-O₂ Electrochemistry: Achieving Highly Reversible Peroxide Formation"; Phys. Chem. Chem. Phys. ۲۰۱۹, ۲۱, ۴۲۸۶-۴۲۹۴. doi:10.1039/C9CP06362A.
- [۱۰] Zhdanov, D.; Ul'yanova, M.; Ferapontov, Y. A. "A Study of the Kinetics of Synthesis of Potassium Superoxide from an Alkaline Solution of Hydrogen Peroxide"; Russ. J. Appl. Chem. ۲۰۰۵, ۷۸, ۱۸۴-۱۸۷. doi:10.1007/s11167-005-0255-6.
- [۱۱] Janik, I.; Tripathi, G. N. R. "The Nature of the Superoxide Radical Anion in Water"; J. Chem. Phys. ۲۰۱۳, ۱۳۹, 014302. doi:10.1063/1.4811697.
- [۱۲] Gladysheva, T. V.; Gladyshev, N. F.; Dvoretzky, S. I. "Nanocrystalline Regenerative Product, The synthesis. Properties. Application"; Spektr: Moscow, ۲۰۱۴, ۵۲-۷۵. doi:10.14489/4442-0081-00.

- Seawater”; Desalination. ۲۰۱۱, ۲۸۰, ۲۱۷-۲۲۲. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.desal.۲۰۱۱.۰۷.۰۱۰.
- [۳۲] Richa, R.; Shahi, N. Ch.; Lohani, U. C.; Kothakota, A.; Pandiselvam, R.; Sagarika, N.; Singh, A.; Omre, P. K.; Kumar, A. “Design and Development of Resistance Heating Apparatus-Cumsolar Drying System for Enhancing Fish Drying Rate”; J. Food Process Eng. ۲۰۲۲, ۴۵, e۱۳۸۳۹. doi:۱۰.۱۱۱۱/jfpe.۱۳۸۳۹.
- [۳۳] Sürme, S. A.; Sabancı, S. “The Usage of Ohmic Heating in Milk Evaporation and Evaluation of Electrical Conductivity and Performance Analysis”; J. Food Process. Preserv. ۲۰۲۱, ۴۵(۹), e۱۵۵۲۲. doi:۱۰.۱۱۱۱/jfpp.۱۵۵۲۲.
- [۳۴] Tunç, M. T.; Akdogan, A.; Baltacı, C.; Kaya, Z.; Odabas, H. I. “Production of Grape Pekmez by Ohmic Heating-Assisted Vacuum Evaporation”; Food Sci. Technol. Int. ۲۰۲۲, ۲۸, ۷۲-۸۴. doi:۱۰.۱۱۷۷/۱۰۸۲۰۱۳۲۲۱۹۹۱۶۱۶
- Negative Corona Discharge”; Adv. Defence Sci. & Technol. ۲۰۲۳, ۱۳, ۲۵۱-۲۶۲ (In Persian). dor:۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۷۶۲۹۳۵.۱۴۰۱.۱۳.۴.۵.۴
- [۳۵] Shokouhian, R.; Hosseini, S. Gh.; Fathollahi, M.; Motamedalshariaty, S. H. “Preparation and Characterization of Potassium Superoxide Particles as Chemical Air Revitalization Component”; Chem. Eng. Technol. ۲۰۲۱, ۴۴, ۱۴۴۷-۱۴۵۹. doi:۱۰.۱۰۰۲/ceat.۲۰۲۰۰۰۵۹۲.
- [۳۶] Chegeni, A.; Babaeipour, V.; Fathollahi, M.; Hosseini, S. Gh. “In-situ Synthesis of KO₂ Nanocrystals on Porous Fiberglass Matrix as an Air Regenerative Product”; Iran. J. Chem. Chem. Eng. ۲۰۲۲, ۴۱, ۳۶۰۰-۳۶۲۰. doi:۱۰.۲۱-۹۹۸۶/۲۰۲۲/۱۱/۳۵۲۱-۳۵۴۱ .
- [۳۷] Martynenko, A.; Zheng, W. “Electrohydrodynamic Drying of Apple Slices: Energy and Quality Aspects”; J. Food Eng. ۲۰۱۶, ۱۶۸, ۲۱۵-۲۲۲. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.jfoodeng.۲۰۱۵.۰۷.۰۴۳.
- [۳۸] Assiry, A. M. “Application of Ohmic Heating Technique to Approach Near-ZLD During the Evaporation Process of