

تعیین شرایط بهینه تولید و مشخصه یابی ذرات فرات پتاسیم تولید شده به روش الکتروشیمیایی

سینا صمیمی سده^۱، احسان صائب نوری^{۲*}، سید علی حسن زاده تبریزی^۳

۱- کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۳- دانشیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

*عهده دار مکاتبات: Ehsan.Saebnoori@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۳۰)

چکیده: راندمان تولید و انرژی مصرفی دو فاکتور مهم در تولید الکتروشیمیایی ذرات فرات پتاسیم هستند. در این پژوهش تاثیر پارامترهای مختلف مانند دانسیته جریان اعمالی، غلظت الکترولیت KOH و دمای آن بر راندمان تولید و انرژی مصرفی بررسی شد. در دانسیته جریان 40 mA.cm^{-2} و الکترولیت 13 M KOH با دمای 70°C شرایط بهینه تولید در مدت زمان ۲ ساعت بدست آمد. در این شرایط راندمان تولید برابر $84/63\%$ و جریان مصرفی برابر $5/05 \text{ kWh/kg}$ بود. با بدست آمدن شرایط بهینه تولید، تاثیر گذشت زمان تولید بر راندمان تولید، خلوص، فازهای تشکیل شده و اندازه ذرات فرات پتاسیم مورد بررسی قرار گرفت. با گذشت زمان در اثر تجزیه ذرات فرات پتاسیم، ترکیبات هیدروکسیدی و اکسیدی آهن شکل می گیرند که باعث کاهش خلوص و راندمان تولید می گردد. اندازه ذرات فرات پتاسیم به دو روش با استفاده از معادله دبای- شرر و شرر اصلاح شده اندازه گیری شد. با افزایش زمان تولید اندازه ذرات فرات پتاسیم افزایش یافت.

واژه های کلیدی:

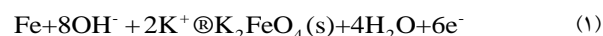
فرات پتاسیم، روش الکتروشیمیایی، خلوص، راندمان جریان، انرژی مصرفی.

۱- مقدمه

علاوه بر سه ظرفیت پایدار آهن یعنی آهن صفر، ۲+ و ۳+ ظرفیتی، محیطهای اکسید کننده به شدت قوی باعث ایجاد اکسیدهای آهن با ظرفیت ۴+، ۵+، ۶+ و ۸+ خواهند شد. حالت های اکسیدی آهن با ظرفیت بالا، معمولاً به نام فرات نامگذاری می شوند. در این میان آهن با ظرفیت ۶+ بنام فرات (VI) (FeO_4^{2-}) نامیده می شود که دارای پایداری بالا و سهولت در سنتز است. از مهمترین مینرال ها/نمک های فرات (VI)، فرات سدیم (Na_2FeO_4) و فرات پتاسیم

فرات (VI) یکی از پرکاربردترین و موثرترین مواد زیست سازگار در تصفیه آب و فاضلاب است [۴-۱]. در این میان فرات پتاسیم بالاترین پایداری را در میان گونه های فرات (VI) دارد [۵-۶]. فرات (VI) دارای خواص اکسیدکنندگی، ضد عفونی کننده و انعقاد دهنده بسیار قوی است. از آن در تصفیه آب و فاضلاب، حذف فلزات سنگین [۷] و عناصر خورنده [۱]، حذف محصولات خوردگی رادیواکتیو [۸]، آستر ممانعت کننده در برابر خوردگی [۹]، آندایزینگ فولاد [۱۰] و ... استفاده می شود.

۳- شکل گیری لایه پسیو که از تولید بیشتر ذرات فرات (VI) جلوگیری می کند [۲].



در یک محلول قلیایی قوی، راندمان جریان تولید فرات (VI) به میزان اکسید آهن، یون فرات (VI)، غلظت یون هیدروکسید، درجه حرارت، ناخالصی های نیکل (II) و کبالت (II) و ضخامت فیلم اکسیدی و یا هیدروکسیدی که در حین فرآیند بر روی سطح آند تشکیل می شود (پسیو شدن) بستگی دارد. در روش الکتروشیمیایی تولید فرات (VI) با گذشت زمان در اثر پسیو شدن، راندمان تولید (η) کاهش می یابد. این کاهش در راندمان در اثر تجزیه فرات (VI) به آهن دو و سه ظرفیتی نیز اتفاق می افتد. با وارد شدن آهن دو و سه ظرفیتی به الکترولیت تجزیه فرات (VI) افزایش می یابد [۱۵].

به طور کلی یون فرات (VI) به طور خود به خود طی واکنش (۴) تجزیه می شود. یعنی فرات (VI) در محلول ناپایدار است [۱۶]. نرخ تجزیه در خود محلول فرات (VI) به شدت بستگی به غلظت اولیه فرات (VI) در محلول، pH محلول، یون های موجود، قلیائیت و درجه حرارت دارد [۱۷].



مقدار فرات (VI) تولید شده در الکترولیت قلیایی قوی به ترکیب و ساختار فیلم پسیو وابسته است. فیلم پسیو تشکیل شده بر سطح آند در فرآیند تولید دارای یک ساختار دولایه شامل لایه داخلی با ترکیب Fe_3O_4 و لایه بیرونی با ترکیب Fe_2O_3 می باشد. در الکترولیت های قلیایی قوی لایه داخلی به مرور زمان حل شده و لایه خارجی ضخیم تر می گردد که این فرآیند با تخلخل و بی

(K_2FeO_4) هستند [۲]. طی تحقیقاتی که تاکنون بر روی این دو نمک انجام شده است در دماهای پایین راندمان تولید فرات سدیم بالاتر از فرات پتاسیم [۱۱] و در دماهای بالا راندمان تولید فرات پتاسیم بالاتر از فرات سدیم [۴] گزارش شده است. همچنین پایداری فرات پتاسیم بالاتر از فرات سدیم است [۴-۵]. فرات (VI) به سه روش عمده قابل تولید می باشد که شامل:

۱- اکسیداسیون خشک آهن در دمای بالا

۲- اکسیداسیون تر آهن (III) با استفاده از یک عامل اکسید کننده شیمیایی

۳- روش الکتروشیمیایی [۲].

یکی از روش های ساده، کم هزینه و سریع برای تولید فرات پتاسیم، روش الکتروشیمیایی است [۱۲-۱۳]. روش الکتروشیمیایی تولید فرات (VI) بسیار متداول تر از روش های شیمیایی تولید آن می باشد و دارای فرآیند تولیدی ساده و بدون نیاز به واکنشگرهای شیمیایی پیچیده و پرهزینه است.

پارامترهای مختلفی بر تولید الکتروشیمیایی فرات پتاسیم تاثیر دارند از آن جمله می توان به دانسیته جریان، دما، غلظت الکترولیت، جنس آند و کاتد و ... اشاره کرد. راندمان تولید و انرژی مصرفی دو پارامتر مهم در تولید فرات پتاسیم هستند که در مشخص کردن شرایط بهینه تولید نقش اساسی ایفا می کنند. اثر تغییرات پارامترهای مختلف، راندمان تولید و انرژی مصرفی در تولید فرات پتاسیم به روش الکتروشیمیایی در گذشته بررسی شده است [۱۴]. اما تاثیر زمان های سنتز طولانی مدت در راندمان تولید، اندازه ذرات، خلوص و فازهای تشکیل شده به صورت مجتمع و ارتباط آن ها با یکدیگر تا کنون مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است.

مکانیزم های مختلفی برای تولید فرات (VI) به روش الکتروشیمیایی ارائه شده است. تولید فرات (VI) شامل سه مرحله است:

۱- تشکیل ذرات حد واسط

۲- تشکیل ذرات فرات (VI) و پسیو شدن الکترو

در این پژوهش ابتدا اثر تغییرات پارامترهای مختلفی مانند غلظت و دمای الکترولیت KOH و دانسیته جریان اعمالی بر راندمان تولید و انرژی مصرفی در تولید فرات پتاسیم به روش الکتروشیمیایی بررسی شد. در ادامه با بدست آمدن شرایط بهینه تولید تاثیر زمان‌های سنتز طولانی مدت بر راندمان تولید، اندازه ذرات، خلوص و فازهای تشکیل شده که در تحقیقات انجام شده در گذشته به آن کمتر پرداخته شده بود مورد بحث و بررسی قرار گرفت و ارتباط آن‌ها با یکدیگر مشخص شد.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

آند از جنس فولاد ساده کربنی به شکل سیم با مساحت سطح مقطع 68 cm^2 انتخاب شد. کاتد از جنس فولاد زنگ نزن به شکل ورق تخت با طول ۸ cm، عرض ۵ cm و ضخامت ۰/۵ mm انتخاب شد. ترکیب شیمیایی آند و کاتد در جدول (۱) آورده شده است.

نظمی بیشتر لایه پسیو می‌تواند همراه باشد. افزایش تخلخل باعث می‌گردد که لایه پسیو حفاظت کمتری انجام داده و میزان خوردگی آند آهنی، فرآیند تولید فرات (VI) با سرعت بالاتری انجام گیرد [۱۸].

فلزاتی همچون فولاد زنگ نزن، Cu، Pt و Ni در مقابل خوردگی قلیایی پایدار هستند و می‌توانند به عنوان کاتد در تولید فرات (VI) به روش الکتروشیمیایی انتخاب شوند. در این میان، فولاد زنگ نزن ارزان قیمت‌ترین و معمول‌ترین فلز پایدار (خوردگی قلیایی بسیار پایین) در الکترولیت KOH است [۱۳]. فولاد زنگ نزن در محیط قلیایی یک لایه رویین در حدود ۱ الی ۴ nm در سطح خود تشکیل می‌دهد. ساختار این لایه در محیط قلیایی، دو لایه است. لایه داخلی غنی از هیدروکسید و اکسید کروم و لایه خارجی غنی از اکسید آهن است [۱۹-۲۰].

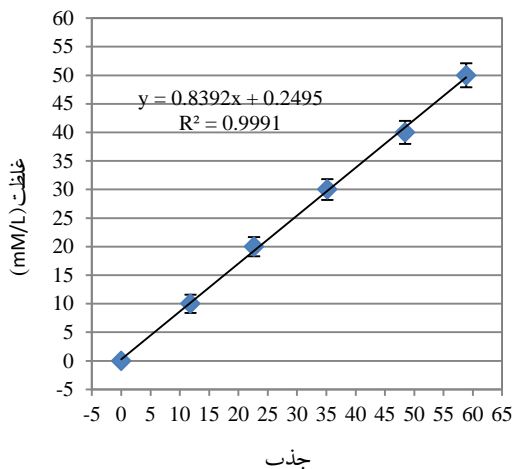
جدول (۱): ترکیب شیمیایی آند و کاتد

الکترو د	ترکیب شیمیایی % wt.											
	Ni	Cr	S	P	Mn	Si	C	Mo	Al	Co	Other	Fe
کاتد	۷/۳۰	۱۹/۳	۰/۰۱	۰/۰۲۸	۱/۸۱	۰/۲۹	۰/۰۶	۰/۱	۰/۰۱	۰/۲۰۱	...	۷۰/۳
آند	۰/۰۰۵	۰/۰۲۵	۰/۰۱۴	۰/۰۲۲	۰/۱۸۷	۰/۰۴۵	۰/۰۴۷	۰/۰۱۳	۰/۰۲۲	۰/۰۰۲	...	۹۹/۴

جهت تولید ذرات فرات پتاسیم به روش الکتروشیمیایی از دستگاه SK1760SL20A ساخت شرکت سانکو به عنوان منبع تغذیه تامین کننده جریان DC، برای اندازه گیری خلوص و غلظت ذرات فرات پتاسیم تولید شده در الکترولیت از دستگاه طیف سنجی امواج ماورابنفش - نور مرئی ساخت شرکت اپتیزن مدل 3220UV و به منظور بررسی ساختار فازی پودر سنتز شده از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) ساخت شرکت فیلیپس مدل PW3040 استفاده شد. الگوهای پراش با استفاده از لامپ

سل الکتروشیمیایی دارای ابعاد $40 \text{ mm} * 200 \text{ mm} * 200 \text{ mm}$ و از جنس پیرکس انتخاب شد. محفظه قسمت آند از کاتد به واسطه یک غشاء تبادل یونی از جنس پلیمر اسید سولفونیک پرفلورونیت^۱ با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و ابعاد $185 \text{ mm} * 185 \text{ mm}$ از یکدیگر جدا شد. محفظه اتمسفری حمام و سل الکتروشیمیایی کاملاً عایق شده و از دمش گاز خنثی برای خالی کردن گازهای موجود در اتمسفر حمام و سل قرار گرفته در آن استفاده شد.

سازی شده و توسط دستگاه طیف سنجی مقدار جذب آن در nm ۵۱۰ اندازه گیری شد (شکل (۱)).



شکل (۱): منحنی کالیبراسیون برای فرات پتاسیم جهت تبدیل مقدار جذب به غلظت

به منظور محاسبه راندمان جریان تولید فرات پتاسیم (η) از رابطه (۵) استفاده شد. مقدار C_{theor} مطابق با رابطه (۶) از قانون فارادی محاسبه شد [۱۷-۱۲].

$$\eta(\%) = \frac{C_{exp}}{C_{theor}} \times 100 \quad (5)$$

C_{exp} : غلظت فرات پتاسیم تولید شده در آزمایش‌ها

C_{theor} : غلظت فرات پتاسیم محاسبه شده از طریق قانون فارادی

$$C_{theor} = \frac{MIt}{nF} \quad (6)$$

I : شدت جریان (A)

t : مدت زمان انجام آزمایش (s)

F : عدد فارادی (96500 C.mol^{-1})

M : جرم مولکولی فرات پتاسیم ($198/04 \text{ g.mol}^{-1}$)

n : تعداد الکترون‌های موجود در واکنش

یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر میزان هزینه‌های تولید فرات پتاسیم، مقدار جریان مصرفی در فرآیند تولید است که از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

$$E.C = \frac{VIt}{m} \quad (7)$$

CuK α با طول موج nm 154/0، در محدوده زاویه $2\theta = 90$ و با اندازه گام 0/05 به دست آمد. جهت اندازه‌گیری هدایت الکتریکی ویژه از دستگاه هدایت سنج پرتابل ساخت شرکت متلر مدل SG3 استفاده شد.

از KOH با خلوص 98٪ تولید شرکت مرک و آب یونیزه شده ساخت شرکت اسکای جهت آماده‌سازی الکترولیت، از فرات پتاسیم با خلوص 97٪ تولید شرکت سیگما-آلدريج به منظور رسم منحنی‌های کالیبراسیون و از آن-هگزین با خلوص 95٪، آن-پنتین با خلوص 99٪، متانول با خلوص 99/9٪ و دی اتیل اتر با خلوص 99٪ ساخت شرکت سیگما-آلدريج برای شستشوی ذرات فرات پتاسیم استفاده شد.

با توجه به اینکه در این پژوهش یکی از اهداف بررسی خلوص فرات پتاسیم است؛ دلیل انتخاب آنند با خلوص بالاتر از 99٪، کاهش یافتن احتمال ورود ناخالصی‌ها از آنند به الکترولیت و تاثیر آن بر خلوص مواد تولید شده است.

به منظور کنترل دمای سل الکتروشیمیایی از یک حمام بزرگ آب با دمای یکسان با دمای اولیه سل برای کلیه آزمون‌ها استفاده شد. به ترتیب در کلیه آزمون‌ها از سرعت 248 دور بر دقیقه برای همزن مکانیکی و از سرعت 350 دور بر دقیقه برای همزن مغناطیسی جهت یکنواخت کردن دمای حمام در اطراف سل و یکنواخت کردن دما و ترکیب شیمیایی الکترولیت سل استفاده شد.

برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان راندمان جریان تولید فرات پتاسیم از آزمایش طیف سنجی امواج ماورا بنفش - نور مرئی استفاده شد. در اندازه‌گیری‌های اولیه مشخص شد که حداکثر مقدار جذب فرات پتاسیم در طول موج nm 510 اتفاق می‌افتد. بر همین اساس جهت تعیین غلظت فرات پتاسیم تمام اندازه‌گیری‌ها در طول موج nm 510 انجام شد. پس از مشخص شدن حداکثر مقدار جذب، جهت تبدیل مقدار جذب به غلظت از منحنی کالیبراسیون استفاده شد [۱۲-۷]. برای رسم کردن منحنی‌های کالیبراسیون، فرات پتاسیم در 5 غلظت متفاوت آماده

بنفش - نور مرئی قرار داده شد. سپس از رابطه ۸ خلوص ذرات محاسبه شد [۱۶].

$$K_2FeO_4 \text{ Purity} = \frac{A}{\varepsilon} \times 0.1 \times \frac{M}{\text{Wight of Sample}} \times 100\% \quad (8)$$

در این رابطه ε ، ضریب خاموشی^۲ است که بر اساس شکل (۱) (منحنی کالیبراسیون) رسم شده و با استفاده از رابطه بیر^۳ (رابطه (۹)) محاسبه شد. M ، جرم مولکولی فرات پتاسیم است. در واقع نسبت A/ε همان غلظت ذرات فرات پتاسیم در الکترولیت (با فرض عرض سل برابر ۱cm) است.

$$A = \varepsilon LC \quad (9)$$

(A) مقدار جذب (فاقد واحد)

(L) عرض سل کوآرتز بر اساس سانتیمتر

(ε) ضریب خاموشی برای فرات پتاسیم ($M^{-1}cm^{-1}$)

(C) غلظت بر اساس مول بر لیتر [۲۱].

اندازه بلورک های پودر فرات پتاسیم با توجه به اطلاعات مربوط به پراش پرتو ایکس (XRD) و با استفاده از رابطه دبای - شرر [۲۳] محاسبه گردید (رابطه (۱۰)).

$$d = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (10)$$

در این رابطه، k یک عدد ثابت وابسته به مورفولوژی ذرات (۰/۸۹)، d اندازه بلورک کریستال، β طول بیشینه در نصف ارتفاع (رادیان) و θ زاویه برحسب درجه است. همچنین اندازه بلورک های ذرات فرات پتاسیم طبق رابطه (۱۱) از روش نوین شرر اصلاح شده [۲۴] هم محاسبه شد. در این روش از رابطه شرر لگاریتم طبیعی (\ln) گرفته می شود:

$$\beta = \frac{k\lambda}{L \cos\theta} \ln \beta = \ln \frac{k\lambda}{L} + \frac{1}{\cos\theta} \quad (11)$$

V: اختلاف پتانسیل (v)

t: مدت زمان انجام آزمایش (h)

I: شدت جریان (A)

m: مقدار فرات پتاسیم تولید شده (kg)

E.C: انرژی مصرف شده (kWh/kg) [۲۱].

در این پژوهش اثر تغییر پارامترهای، دانسیته جریان اعمالی، دما و غلظت الکترولیت KOH بر میزان تولید ذرات فرات پتاسیم در مدت زمان ۲ ساعت بررسی شد. طراحی آزمون ها به صورت تغییر یک متغیر و ثابت نگهداشتن دیگر متغیرها انجام شد. به این صورت که، در ابتدای امر پارامترهای غلظت و دمای اولیه الکترولیت ثابت گرفته شد و تاثیر دانسیته جریان های اعمالی مختلف بر میزان فرات پتاسیم تولید شده بررسی شد. سپس تاثیر غلظت الکترولیت و در ادامه اثر دمای الکترولیت بر میزان ذرات فرات پتاسیم تولید شده مورد بررسی قرار گرفت.

پس از تولید ذرات فرات پتاسیم در الکترولیت، جهت جداسازی آن ها از کیف بوخنر و ارلن خلا استفاده شد. فرآیند شستشوی ذرات و خشک کردن آن ها شامل چهار مرحله می باشد. در مرحله اول ذرات جدا شده روی کاغذ صافی را چهار مرتبه و هر بار با ۲۵ mL آن-هگزین شستشو داده و فیلتر شد. در مرحله دوم از ۲۵ mL آن-پنتین و همانند مرحله قبل شستشو انجام گرفت. در مرحله سوم ذرات دو مرتبه با محلول متانول و هر مرتبه با ۱۰ mL شستشو داده شد. در مرحله آخر ذرات را در یک ظرف که جهت نگهداری ذرات در نظر گرفته شده بود ریخته و از ۲۰ mL دی اتیل اتر جهت خشک کردن ذرات استفاده گردید. سرانجام ذرات شستشو داده شده در خلاء کمتر از ۳۰ mmHg به مدت h ۲ نگهداری شد تا کاملاً خشک شوند [۲۲].

جهت بدست آوردن خلوص ذرات فرات پتاسیم از رابطه (۸) استفاده شد. به این ترتیب که مقدار مناسب از پودر فرات پتاسیم تولید شده در هر مرحله را در ۱۰۰ mL الکترولیت اشباع KOH به مدت زمان ۵ دقیقه با سرعت ۴۰۰ دور بر دقیقه در دمای ۰°C مخلوط کرده سپس مقداری از الکترولیت موجود در قسمت بالایی ظرف را برداشته و مورد آنالیز طیف سنجی امواج ماورا

تشکیل شوند [۷]. با افزایش دانسیته جریان سه اتفاق می‌افتد، ۱- با افزایش دانسیته جریان در اثر اتلاف حرارتی بالاتر، دمای الکترولیت افزایش یافته و این امر باعث افزایش نرخ تجزیه فرات (VI) می‌شود و راندمان تولید در دانسیته جریان‌های بالا کاهش می‌یابد [۷]. اما در این پژوهش به دلیل یکنواخت کردن دمای سل با مگنت و همزن مغناطیسی، همچنین استفاده از حمام با حجم زیاد و کنترل دقیق دمای سل در 65°C این اتفاق مشاهده نشد، ۲- با افزایش دانسیته جریان قسمت زیادی از جریانی که بین آند و کاتد اعمال شده صرف واکنش‌هایی غیر از انحلال آندی می‌شود. در واقع واکنش‌های کاتدی احیای اکسیژن [۱۱-۱۷] و هیدروژن [۱۲-۱۷] قسمت زیادی از جریان را مصرف می‌کنند و این امر باعث کاهش راندمان تولید فرات (VI) می‌شود، ۳- با افزایش دانسیته جریان تشکیل لایه پسیو در زمان‌های کمتری اتفاق می‌افتد [۲۵-۱۳] بنابراین نرخ و راندمان تولید ذرات فرات پتاسیم کاهش می‌یابد [۱۱]. همانطور که از شکل (۲) مشاهده می‌شود با افزایش دانسیته جریان شیب منحنی به شدت کاهش می‌یابد و این منحنی یک رفتار لگاریتمی از خود نشان می‌دهد.

اکنون با رسم تغییرات $\text{Ln}\beta$ بر حسب $\text{Ln}(1/\text{Cos}\theta)$ و با استفاده از روش کمترین مربعات به ترتیب عرض از مبدا و خطا بدست می‌آید که با قرار دادن در رابطه، اندازه بلورک را بر حسب نانومتر می‌توان محاسبه کرد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین شرایط بهینه در تولید پودر فرات پتاسیم

۳-۱-۱- تعیین جریان بهینه در تولید پودر فرات پتاسیم

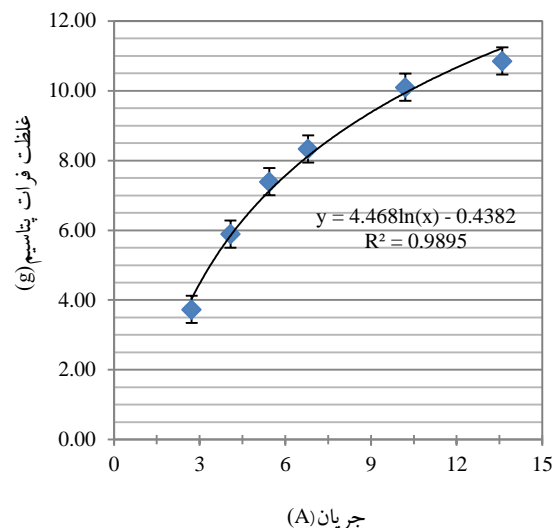
تولید ذرات فرات پتاسیم در الکترولیت 14 M KOH ، دمای ثابت 65°C و دانسیته جریان‌های مختلف در مدت زمان ۲ ساعت انجام شد. مطابق با جدول (۲) کمترین انرژی مصرفی در دانسیته جریان 40 mA.cm^{-2} بدست آمد. هرچند راندمان تولید در جریان 60 mA.cm^{-2} ، حدود ۳٪ بالاتر از جریان 40 mA.cm^{-2} است اما بدلیل انرژی مصرفی بسیار پایین‌تر در جریان 40 mA.cm^{-2} ، این جریان به عنوان جریان بهینه در تولید فرات پتاسیم انتخاب شد.

هرچقدر دانسیته جریان اعمالی کاهش یابد مقدار راندمان تولید افزایش می‌یابد. اما در دانسیته جریان‌های بسیار پایین به دلیل پتانسیل آندی ناکافی روند تولید فرات (VI) با نرخ پایین‌تری انجام شده و ممکن است گونه‌هایی از فرات با ظرفیت پایین‌تر نیز

جدول (۲): ارتباط دانسیته جریان با راندمان جریان و انرژی مصرف شده در تولید ذرات فرات پتاسیم

مصرف انرژی (kwh/kg)	راندمان جریان (%)	غلظت فرات پتاسیم		غلظت فرات پتاسیم (mM)	دانسیته جریان (mA.cm^{-2})	ولتاژ (V)	جریان (A)	ردیف
		C_{the} (g)	C_{exp} (g)					
۷/۶۶	۷۲/۰۳	۴/۰۶	۲/۹۲	۳/۷۳	۴۰	۴/۱۲	۲/۷۲	۱
۱۱/۲۰	۷۵/۸۸	۶/۰۹	۴/۶۲	۵/۸۹	۶۰	۶/۳۶	۴/۰۸	۲
۱۵/۴۳	۷۱/۳۸	۸/۱۲	۵/۸۰	۷/۳۹	۸۰	۸/۲۲	۵/۴۴	۳
۲۱/۰۱	۶۴/۳۶	۱۰/۱۵	۶/۵۳	۸/۳۳	۱۰۰	۱۰/۰۹	۶/۸	۴
۳۸/۰۴	۵۲/۰۰	۱۵/۲۲	۷/۹۲	۱۰/۱۰	۱۵۰	۱۴/۷۶	۱۰/۲	۵
۵۹/۷۳	۴۱/۹۱	۲۰/۳۰	۸/۵۱	۱۰/۸۵	۲۰۰	۱۸/۶۸	۱۳/۶	۶

مشاهده شد که با افزایش غلظت الکترولیت از ۸ تا ۱۶M، هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد. این کاهش در هدایت الکتریکی باعث کاهش در مقدار و راندمان تولید فرات (VI) می‌شود [۷]. از غلظت الکترولیت ۸ تا ۱۳ M مقدار یون OH⁻ افزایش می‌یابد. در این غلظت‌ها اثر افزایش یون OH⁻ نسب به تاثیر کاهش هدایت الکتریکی غالب بوده و بنابراین روند تولید فرات (VI) افزایش می‌یابد. اما در غلظت الکترولیت بالاتر از ۱۳ و اسکوزیته الکترولیت آنقدر افزایش می‌یابد که مقدار انتقال الکترون در سطح آند را کاهش می‌دهد و این کاهش در هدایت الکتریکی بر اثر افزایشی یون OH⁻ در تولید ذرات فرات پتاسیم غالب شده و باعث کاهش روند تولید می‌گردد. در الکترولیت KOH- ۸M به دلیل بالا بودن مقدار آب طبق واکنش (۴)، ذرات فرات پتاسیم تولید شده بسیار ناپایدار بوده و با سرعت بالایی تجزیه می‌شوند. این امر باعث شده که مصرف انرژی به شدت افزایش یابد چرا که قسمت زیادی از ذرات فرات پتاسیم به محض تولید شدن تجزیه می‌شوند. از سوی دیگر در الکترولیت‌های KOH با غلظت ۱۳ M و بالاتر از آن بدلیل پایین بودن مقدار آب آزاد و افزایش یون‌های OH⁻ پایداری ذرات فرات پتاسیم افزایش می‌یابد.



شکل (۲): میزان ذرات فرات پتاسیم تولید شده در دمای اولیه ۶۵ °C، الکترولیت ۱۴ M KOH و دانسیته جریان‌های اعمالی متفاوت

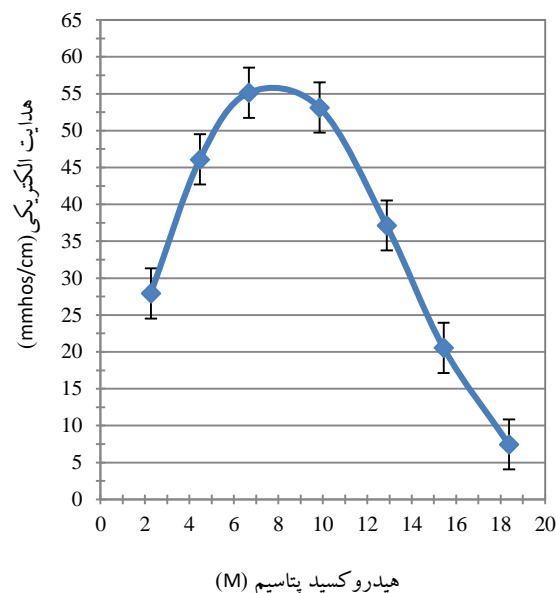
۳-۱-۲- تعیین غلظت الکترولیت بهینه در تولید ذرات فرات پتاسیم

با بدست آمدن دانسیته جریان بهینه، تولید ذرات فرات پتاسیم تحت دانسیته جریان ۴۰ mA.cm⁻²، دمای ثابت ۶۵°C و غلظت‌های مختلف الکترولیت انجام شد. نتایج آزمون طیف سنجی امواج ماورا بنفش- نور مرئی طبق جدول (۳) نشان داد بالاترین میزان فرات پتاسیم و کمترین انرژی مصرفی در الکترولیت ۱۳ M KOH بدست می‌آید. با توجه به شکل (۳)

جدول (۳): ارتباط غلظت الکترولیت KOH با راندمان جریان و انرژی مصرف شده در تولید ذرات فرات پتاسیم

ردیف	غلظت KOH (M)	ولتاژ (V)	غلظت فرات پتاسیم (mM)	C_{exp} (g)	راندمان جریان (%)	مصرف انرژی (kwh/kg)
۱	۸	۲/۲۰	۱/۷۵	۱/۳۷	۳۳/۸۵	۸/۷۱
۲	۱۰	۲/۲۹	۲/۲۸	۱/۷۹	۴۴/۰۷	۶/۹۶
۳	۱۲	۲/۵۵	۳/۱۰	۲/۴۳	۵۹/۸۵	۵/۷۱
۴	۱۳	۳/۳۳	۴/۲۳	۳/۳۱	۸۱/۶۰	۵/۴۷
۵	۱۴	۴/۱۲	۳/۷۳	۲/۹۲	۷۲/۰۳	۷/۶۶
۶	۱۶	۷/۰۶	۳/۲۴	۲/۵۴	۶۲/۵۵	۱۵/۱۳

با بدست آمدن دانسیته جریان و غلظت الکترولیت بهینه، تولید ذرات فرات پتاسیم تحت دانسیته جریان 40 mA.cm^{-2} ، غلظت الکترولیت 13 M KOH و در دماهای مختلف الکترولیت انجام شد. نتایج آزمون طیف سنجی امواج ماورا بنفش - نور مرئی طبق جدول (۴) نشان داد بالاترین میزان تولید ذرات فرات پتاسیم و کمترین انرژی مصرفی در دمای 70°C بدست می آید. با افزایش دمای الکترولیت، هدایت الکتریکی (شکل (۴)) و اکتیویته $\text{OH}^- [26]$ افزایش می یابد و این امر سبب افزایش نرخ تولید ذرات فرات پتاسیم می شود. از طرف دیگر، افزایش دمای الکترولیت نرخ تجزیه ذرات فرات پتاسیم را افزایش می دهد. به نظر می رسد بهینه ترین حالت برای تولید فرات پتاسیم در دمای 70°C اتفاق می افتد. در دماهای بالاتر از 70°C تاثیر افزایش دما بر افزایش نرخ تجزیه ذرات غالب بوده، کاهش مقدار و راندمان تولید ذرات فرات پتاسیم را به همراه خواهد داشت.



شکل (۳): ارتباط غلظت الکترلیت با هدایت الکتریکی در دمای 65°C

۳-۱-۳- تعیین دمای بهینه در تولید ذرات فرات پتاسیم

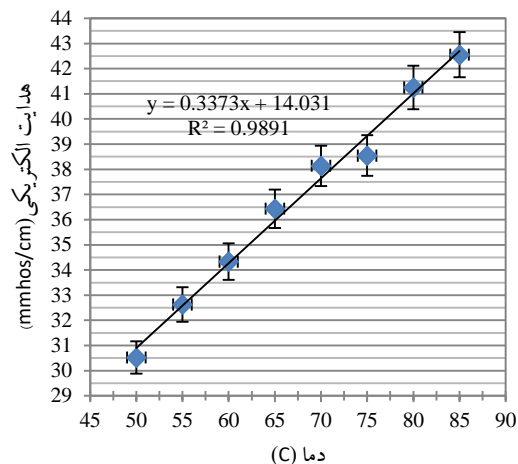
جدول (۴): ارتباط دمای اولیه با راندمان جریان و انرژی مصرف شده در تولید فرات پتاسیم

ردیف	دمای الکترولیت ($^\circ \text{C}$)	ولتاژ (V)	غلظت فرات پتاسیم (mM)	C_{exp} (g)	راندمان جریان (%)	انرژی (kwh/kg)
۱	۵۰	۴/۱۴	۳/۴۸	۲/۷۳	۶۷/۲۹	۸/۲۴
۲	۶۰	۳/۶۱	۳/۹۳	۳/۰۸	۷۵/۹۶	۶/۳۷
۳	۶۵	۳/۳۳	۴/۲۳	۳/۳۱	۸۱/۶۰	۵/۴۷
۴	۷۰	۳/۱۹	۴/۳۸	۳/۴۴	۸۴/۶۳	۵/۰۵
۵	۷۵	۳/۰۱	۴/۰۵	۳/۱۷	۷۸/۱۷	۵/۱۶
۶	۸۰	۲/۹۳	۳/۵۴	۲/۷۸	۶۸/۴۴	۵/۷۴
۷	۸۵	۲/۸۲	۲/۴۸	۱/۹۵	۴۷/۹۱	۷/۸۹

(Fe_3O_4 , FeO) و واکنش الکترولیت با اتمسفر محیط (مانند Na_2CO_3) ایجاد می‌شوند [۱۸]. در این پژوهش بدلیل ایزوله کردن سل و حمام از محیط از ایجاد واکنش‌های ناخواسته بین اتمسفر محیط و الکترولیت جلوگیری شد.

اما همانطور که از جدول (۵) مشاهده می‌شود در زمان‌های کمتر از ۲ ساعت علی‌رغم پایین بودن نرخ تجزیه فرات پتاسیم راندمان جریان همچنان کاهش یافته است که با فرض ثابت بودن نسبت واکنش‌های کاتدی به آنودی با گذشت زمان، دلیل آن فقط و فقط می‌تواند پسیو شدن آند باشد. با افزایش زمان تولید پسیو شدن آند و تجزیه ذرات فرات پتاسیم اتفاق می‌افتد [۱۳]. این دو عامل باعث افت راندمان تولید با گذشت زمان مطابق با جدول (۵) شد. ضریب خاموشی بر اساس نتایج بدست آمده از منحنی‌های کالیبراسیون و رابطه (۹) برابر $1189 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ بدست آمد.

بارسای^۶ و همکاران نیز نتایج مشابهی بدست آوردند و اعلام کردند که در زمان‌های سنتز بیشتر از ۷۵ دقیقه تاثیر تجزیه فرات (VI) در کاهش راندمان بسیار بیشتر از پسیو شدن آند آهنی است [۱۷].

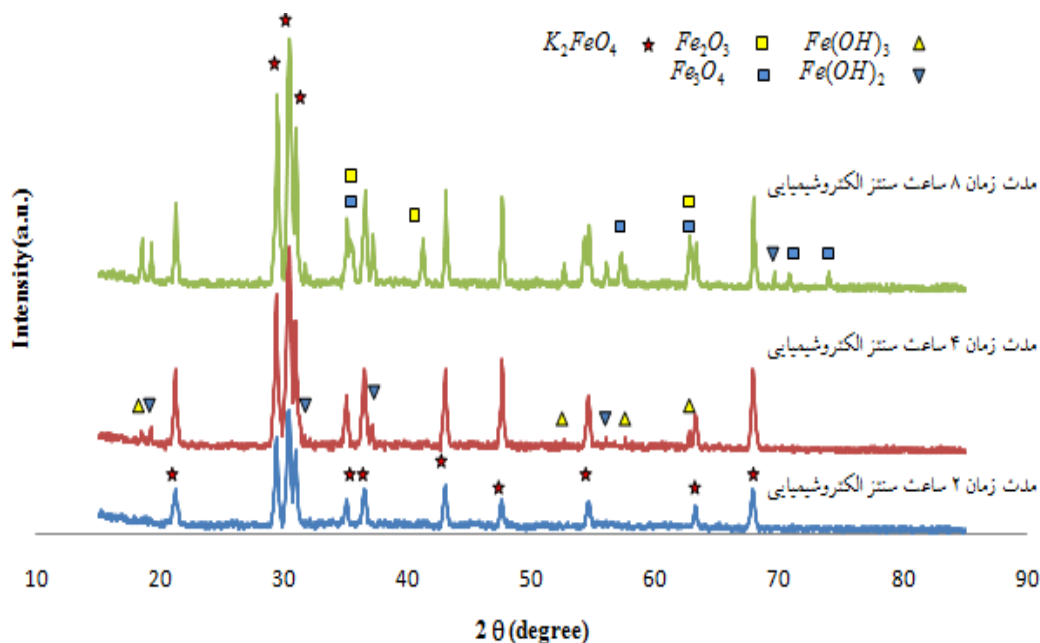


شکل (۴): ارتباط دمای الکترولیت با هدایت الکتریکی در الکترولیت ۱۳ M KOH-

۳-۲- بررسی راندمان جریان، خلوص و اندازه ذرات فرات پتاسیم تولید شده در شرایط بهینه در مدت زمان‌های مختلف تولید

همانطور که از شکل (۵)، شکل الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) مشخص است با افزایش زمان تولید فازهای دیگری همانند هیدروکسید آهن (III)، هیدروکسید آهن (II)، مگنتیت و هماتیت علاوه بر ذرات فرات پتاسیم شکل گرفتند که همین امر باعث کاهش خلوص ذرات فرات پتاسیم با گذشت زمان تولید طبق جدول (۵) شد. مطابق با جدول (۵) با افزایش زمان تولید از ۰/۵ به ۲ ساعت خلوص ذرات فرات پتاسیم تنها به اندازه ۰/۴٪ کاهش می‌یابد و با افزایش زمان از ۴ به ۸ و ۱۶ ساعت به یکباره خلوص از ۹۶/۷ به ۹۰/۰۱٪ و سپس ۶۳/۶٪ کاهش می‌یابد که این امر ناشی از افزایش نرخ تجزیه فرات پتاسیم به ترکیبات هیدروکسیدی و اکسیدی آهن است. در واقع با ورود این ترکیبات به الکترولیت نرخ تجزیه فرات (VI) شتاب بیشتری می‌گیرد (اثر گلوله برفی^۴) [۲۷]. بنابراین یکی از عوامل به شدت تاثیر گذار بر کاهش راندمان تولید در مدت زمان‌های سنتز بیش از ۴ ساعت، تجزیه فرات پتاسیم است.

دی کونیک^۵ و همکاران در بررسی‌های خود نشان دادند با افزایش زمان سنتز در الکترولیت NaOH ناخالصی‌هایی ایجاد می‌شوند که این ناخالصی‌ها در اثر تجزیه فرات (VI) (مانند



شکل (۵): الگوهای پراش پرتو ایکس پودر فرات پتاسیم تولید شده در زمان‌های مختلف

جدول (۵): ارتباط زمان تولید با راندمان جریان و خلوص در شرایط بهینه تولید ذرات فرات پتاسیم

خلوص ذرات (%)	راندمان جریان (%)	غلظت فرات پتاسیم		غلظت فرات پتاسیم (mM)	زمان (h)	ردیف
		C_{the} (g)	C_{exp} (g)			
۹۸/۶	۹۱/۲۵	۱/۰۱	۰/۹۳	۱/۱۸	۰/۵	۱
۹۸/۵	۸۹/۲۹	۲/۰۳	۱/۸۱	۲/۳۱	۱	۲
۹۸/۲	۸۴/۶۳	۴/۰۶	۳/۴۴	۴/۳۸	۲	۳
۹۶/۷	۶۳/۹۰	۸/۱۲	۵/۱۹	۶/۶۲	۴	۴
۹۰/۱	۳۸/۵۹	۱۶/۲۴	۶/۲۷	۷/۹۹	۸	۵
۶۳/۶	۱۹/۲۷	۳۲/۴۸	۶/۲۶	۷/۹۸	۱۶	۶

جدول (۶): اندازه کریستالیت‌های به دست آمده در زمان‌های ۲، ۴ و ۸ ساعت

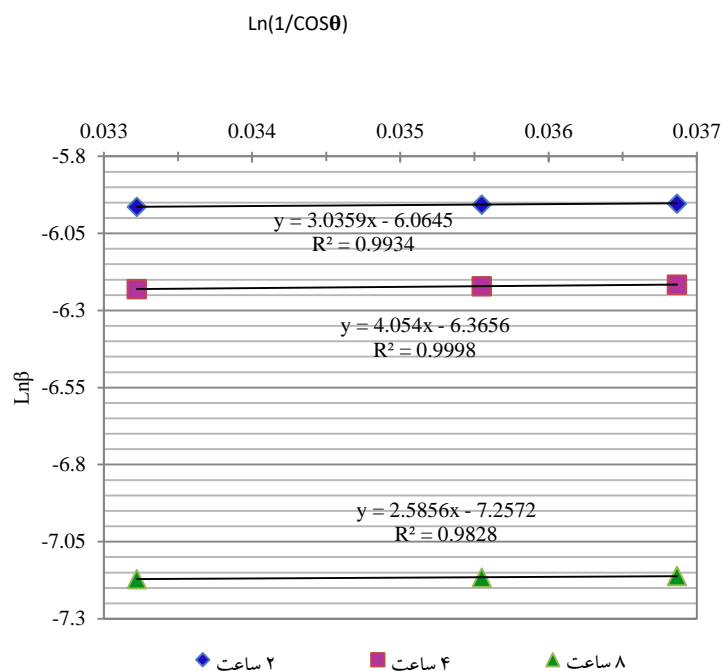
از فرات پتاسیم با استفاده از نتایج پراش پرتو ایکس

روش اصلاح شده	روش دبای - شرر		
$2 \pm 58 \text{ nm}$	$3 \pm 54 \text{ nm}$	۲ ساعت	مدت زمان سنتز ذرات
$3 \pm 78 \text{ nm}$	$6 \pm 72 \text{ nm}$	۴ ساعت	
$5 \pm 195 \text{ nm}$	$10 \pm 187 \text{ nm}$	۸ ساعت	

در جدول (۶) اندازه کریستالیت‌ها و در شکل (۶) منحنی‌های

مربوط به فرات پتاسیم بدست آمده در زمان‌های مختلف با

استفاده از نتایج پراش پرتو ایکس نشان داده شده است.



شکل (۶): منحنی نسبت $\text{Ln}\beta$ بر حسب $\text{Ln}(1/\text{Cos}\theta)$ بر اساس داده‌های پیک‌های فاز فرات پتاسیم در الگوی پراش پرتو ایکس

می‌شوند [۴]. این ذرات در محیط به شدت قلیایی می‌توانند تشکیل ذرات درشت فرات (VI) را بدهند.

۴- نتیجه گیری

در صورت نیاز به ذراتی با خلوص حداقل ۹۶٪ و ابعاد کمتر از ۱۰۰ nm باید فرآیند سنتز الکتروشیمیایی فرات پتاسیم در مدت زمان کمتر از ۴ ساعت انجام شود. اگر این مدت به ۲ ساعت تقلیل یابد ابعاد ذرات کاهش، خلوص و راندمان جریان تولید افزایش می‌یابد. علت کاهش خلوص، تجزیه ذرات فرات پتاسیم به ترکیبات هیدروکسیدی و اکسیدی آهن است. در زمان‌های پایین (کمتر از ۲ ساعت) عامل اصلی در کاهش راندمان، پسیو شدن آند و در مدت زمان‌های طولانی (بیش از ۴ ساعت)، تجزیه ذرات فرات پتاسیم است. شرایط بهینه تولید ذرات فرات پتاسیم در دانسیته جریان $40 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ، الکترولیت 13 M KOH و دمای 70°C در مدت زمان ۲ ساعت بدست آمد. تحت این شرایط غلظت، اندازه ذرات، خلوص، انرژی مصرفی و

همانطور که از جدول (۶) مشخص است با افزایش زمان الکتروسنتز اندازه ذرات فرات پتاسیم افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان در مکانیزم تولید ذرات فرات پتاسیم به روش الکتروشیمیایی جستجو کرد [۲، ۱۷]. همانطور که گفته شد در ابتدای امر ذرات حد واسطه تولید شده و در مرحله بعد ذرات فرات پتاسیم تولید می‌شوند. همزمان با تولید ذرات فرات پتاسیم، پسیو شدن آند نیز اتفاق می‌افتد. در ابتدا تعداد نقاط فعال در سنتز الکتروشیمیایی فرات (VI) زیاد است. ذرات سنتز شده دارای ابعاد کوچک و گستره توزیع محدودی می‌باشند. اما در ادامه با پسیو شدن سطح و کاهش نقاط فعال و ادامه سنتز از نقاط ترجیحی از سطح [۱۳، ۲۹-۲۸]، با تمرکز دانسیته جریان بیشتر در این نقاط ذرات بزرگتری از سطح جدا می‌شود و اندازه ذرات فرات پتاسیم افزایش می‌یابد. همچنین در پاره‌ای از شرایط، لایه‌های عمدتاً اکسیدی و بعضاً هیدروکسیدی که در اثر پسیو شدن در سطح آند تشکیل می‌شوند با مرور زمان پوسته پوسته شده یا ترک خورده و خرد می‌شوند و نهایتاً از سطح جدا

- [11] X. Yu & S. Licht, "Advances in electrochemical Fe (VI) synthesis and analysis", *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 38, No. 6, pp. 731-742, 2008.
- [12] M. Alsheyab, J. Q. Jiang & C. Stanford, "Electrochemical generation of ferrate (VI): Determination of optimum conditions", *Desalination*, Vol. 254, No. 1, pp. 175-178, 2010.
- [13] W. He, H. Shao, Q. Chen, J. Wang & J. Zhang, "Polarization Characteristic of Iron Anode in Concentrated NaOH Solution", *Acta Physico-Chimica Sinica*, Vol. 23, No. 10, pp. 1525-1530, 2007.
- [14] W. He, J. Wang, H. Shao, J. Zhang & C. n. Cao, "Novel KOH electrolyte for one-step electrochemical synthesis of high purity solid K₂FeO₄: Comparison with NaOH", *Electrochemistry communications*, Vol. 7, No. 6, pp. 607-611, 2005.
- [15] W. He, J. Wang, C. Yang & J. Zhang, "The rapid electrochemical preparation of dissolved ferrate(VI): Effects of various operating parameters", *Electrochimica Acta*, Vol. 51, No. 10 pp. 1967-1973, 2006.
- [16] Y. L. Wei, Y. S. Wang & C. H. Liu, "Preparation of Potassium Ferrate from Spent Steel Pickling Liquid", *Metals*, Vol. 5, NO. 4, pp. 1770-1787, 2015.
- [17] S. Barişçi, F. Ulu, H. Sarkka, A. Dimoglo & M. Sillanpaa, "Electrosynthesis of Ferrate (VI) ion using high purity iron electrodes: optimization of influencing parameters on the process and investigating its stability", *Int. J. Electrochem. Sci*, Vol. 9, pp. 3099-3117, 2014.
- [18] M. De Koninck, T. Brousse & D. Bélanger, "The electrochemical generation of ferrate at pressed iron powder electrodes: effect of various operating parameters", *Electrochimica Acta*, Vol. 48, No. 10, pp. 1425-1433, 2003.
- [19] آ. فتح الحسینی و ا. ایمان طلب، "بررسی رفتار الکتروشیمیایی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ کم کربن در یک محلول قلیایی با روش موت - شاتکی و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی"، فصلنامه علمی تخصصی مهندسی مواد مجلسی، سال هشتم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۳.
- [20] A. Fattah-alhosseini & M. M. Khalvan, "Semiconducting properties of passive films راندمان تولید ذرات فرات پتاسیم به ترتیب برابر ۴/۳۸ mM، ۵۴ تا ۵۸ nm، ۹۸/۲٪ و ۵/۰۵ kwh/kg، ۸۴/۶۳٪ است.
- ### ۵- مراجع
- [1] V. Shastry, "Waste Water Treatment Using Eco Friendly Oxidising Agent Fe (VI) ", *Hydrology: Current Research (Previously JWWTa)*, 2011.
- [2] D. Tiwari & S. M. Lee, "Ferrate (VI) in the Treatment of Wastewaters: A New Generation Green Chemical", *INTECH Open Access Publisher*, 2011.
- [3] V. K. Sharma, "Oxidation of inorganic contaminants by ferrates (VI, V, and IV)-kinetics and mechanisms: A review", *Journal of Environmental Management*, Vol. 92, No. 4, pp. 1051-1073, 2011.
- [4] D. Ghernaout & M. Naceur, "Ferrate (VI): In situ generation and water treatment-A review", *Desalination and Water Treatment*, Vol. 30, No. 1-3, pp. 319-332, 2011.
- [5] Z. Mácová, K. Bouzek & V. K. Sharma, "The influence of electrolyte composition on electrochemical ferrate (VI) synthesis. Part I: anodic dissolution kinetics of pure iron", *Journal of applied electrochemistry*, Vol. 40, No. 5, pp. 1019-1028, 2010.
- [6] F. Lapique & G. Valentin, "Direct electrochemical preparation of solid potassium ferrate", *Electrochemistry Communications*, Vol. 4, No. 10, pp. 764-766, 2002.
- [7] L. Ding, "Removal of methyl mercaptan from foul gas by in-situ production of ferrate (VI) for odour control", *The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong*, 2013.
- [8] P. Bonnici & R. Denault, "Process for treatment of oxide films prior to chemical cleaning", 1984.
- [9] B. F. Monzyk, J. A. Ford, J. T. Stropki, D. N. Clark, V. V. Gadkari & K. P. Mitchell, "Corrosion resistant primer coating", *Google Patents*, 2014.
- [10] T. Burleigh, P. Schmuki & S. Virtanen, "Properties of the Nanoporous Anodic Oxide Electrochemically Grown on Steel in Hot 50% NaOH", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 156, No. 1, pp. C45-C53, 2009.

- [5] De Koninck
[6] Barışçı

formed on AISI 420 stainless steel in nitric acid solutions”, *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 1, No. 4, pp. 15-22, 2013.

[21] A. D. P. RIOS, “Dewatering of Biosolids by Sodium Ferrate”, University of Central Florida Orlando, Florida, 2004.

[22] C. Li, X. Li & N. Graham, “A study of the preparation and reactivity of potassium ferrate”, *Chemosphere*, Vol. 61, No. 4, pp. 537-543, 2005.

[23] L. Bragg & W. H. Bragg, “The crystalline state: a general survey”, Bell, 1949.

[۲۴] ا. منشی و س. سلطان عطار، "به کارگیری روشی نوین در اندازه گیری نانو ذرات با استفاده از رابطه شرر و پراش پرتو ایکس"، فصلنامه علمی تخصصی مهندسی مواد مجلسی، سال دوم، شماره ششم، پاییز ۱۳۸۷.

[25] Z. Ding, C. Yang & Q. Wu, “The electrochemical generation of ferrate at porous magnetite electrode”, *Electrochimica Acta*, Vol. 49, No. 19, pp. 3155-3159, 2004.

[26] J. Y. Zou & D. T. Chin, “Mechanism of steel corrosion in concentrated NaOH solutions”, *Electrochimica Acta*, Vol. 32, No. 12, pp. 1751-1756, 1987.

[27] H. Wang, Y. Liu, F. Zeng & S. Song, “Electrochemical Synthesis of Ferrate (VI) by Regular Anodic Replacement”, *Int. J. Electrochem. Sci*, Vol. 10, pp. 7966-7976, 2015.

[28] M. Alsheyab, J. Q. Jiang & C. Stanford, “On-line production of ferrate with an electrochemical method and its potential application for wastewater treatment – A review”, *Journal of Environmental Management*. Vol. 90, No. 3, pp. 1350-1356, 2009.

[29] H. Shao, J. Wang, W. He, J. Zhang & C. Cao, “EIS analysis on the anodic dissolution kinetics of pure iron in a highly alkaline solution”, *Electrochemistry communications*, Vol. 7, No. 12, pp. 1429-1433, 2005.

۶- پی نوشت

- [1] Perfluorinated sulfonic acid polymer membrane
[2] Extinction coefficient
[3] Beer's law
[4] Snowball Effect

Determination of optimum production condition and characterization of Potassium Ferrate particles synthesized by electrochemical method

Sina Samimi sede¹, Ehsan Saebnoori*², Seyed Ali Hassanzadeh Tabrizi³

1- M.Sc., Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Assistant Professor, Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

3- Associate Professor, Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

*Corresponding author: Ehsan.Saebnoori@gmail.com

Abstract

Production efficiency and energy consumption are two important factors in electrochemical synthesis of potassium ferrate particles. In this research, the effects of different parameters including applied current density, KOH electrolyte concentration and its temperature on production efficiency and energy consumption have been studied. The condition of optimized production has achieved in current density of 40 mA.cm⁻², 13M KOH electrolyte with temperature of 70 °C for two hours. In this situation, the production efficiency was 84.63% and the energy consumption was 5.05 kwh/kg. In next step, the effect of time duration on production efficiency, purity, formed phases and the size of potassium ferrate particles has been investigated in optimal condition. The results showed that due to decomposition of potassium ferrate particles with time, iron hydroxides and oxides components have been formed which reduces the purity and production efficiency. The sizes of potassium ferrate particles were measured by two methods of Debye-Scherrer and modified Debye-Scherrer. This revealed that the size of potassium ferrate particles increases as time passes.

Keywords:

Potassium Ferrate, Electrochemical Method, Purity, Current Efficiency, Energy Consumption.

Journal homepage: ma.iaumajlesi.ac.ir

Please cite this article using:

Sina Samimi sede, Ehsan Saebnoori, Seyed Ali Hassanzadeh Tabrizi, Determination of optimum production condition and characterization of Potassium Ferrate particles synthesized by electrochemical method, in Persian, New Process in Material Engineering, 2018, 12(1), 139-152.