

بررسی پارامترهای مؤثر بر ابعاد و توزیع ابعاد ذرات رسوب توریم اکسالات در راکتور همزن دار

محمدحسن خانی، علی اصغر قربانپور ^{*}خمسه

استادیار مهندسی شیمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۰۹ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۴/۲۰

پیام‌نگار: akhameh@aeoi.org.ir

چکیده

در چرخه تولید سوخت هسته‌ای توریم، رسوب‌گیری توریم اکسالات با استفاده از اسید اکسالیک، یکی از مراحل اصلی فرآوری به‌شمار می‌آید. در این تحقیق، هدف بررسی تأثیر متغیرهای دمای رسوب‌گیری، غلظت و دبی مواد، میزان همزدن، زمان و دمای هضم بر ابعاد ذرات توریم اکسالات و توزیع اندازه آن‌هاست. مشاهده شد که با افزایش غلظت و دبی مواد، ابعاد ذرات کمتر و توزیع ابعاد ذرات باریکتر شد. با افزایش میزان همزدن، ابعاد ذرات بزرگتر ولی یکنواختی آن‌ها ابتدا زیاد و سپس کمتر شد. همچنین با افزایش دمای واکنش و دمای هضم ابعاد ذرات بزرگتر اما یکنواختی ذرات کمتر شد. با تجزیه و تحلیل نتایج دمای بهینه ۱۰ درجه سلسیوس، غلظت و دبی بهینه اکسالات اسید، به ترتیب، ۱/۵ مولار و ۱۰ mL/min و سرعت همزدن ۱۵۰ rpm به دست آمد. زمان و دمای بهینه هضم، به ترتیب، ۶ ساعت و ۷۵ درجه سلسیوس تعیین شد.

کلیدواژه‌ها: رسوب‌گیری، توریم اکسالات، ابعاد ذرات، توزیع ابعاد ذرات، راکتور همزن دار.

۱. مقدمه

توریم نیترات، مرسوم‌ترین روش تولید توریم اکسید به‌شمار می‌آید. با توجه به این‌که در فرایند تولید توریم اکسید از اکسالات هیچ‌گونه عملیات خرد کردنی انجام نمی‌شود، مرحله رسوب‌گیری، تعیین‌کننده ابعاد و توزیع ابعاد ذرات است. در سال ۱۹۵۷، مک‌براید و همکارش توماس [۱] تأثیر متغیرهای آماده‌سازی را بر ابعاد بلوری پودر و مساحت ویژه آن بررسی کردند. با این روش همه ذرات توریم اکسید تولید شده به کوچکتر از ۵ میکرون رسید و میزان ذرات توریم اکسید بزرگتر از ۵ میکرون در محصول کمتر از ۱ تا ۲ درصد شد. در بخش دیگری از این پژوهش، مک‌براید و همکارش تفاوت مشخصات اکسید حاصل از روش گرمایی و

توریم اکسید به‌عنوان سوخت هسته‌ای، اخیراً به دلایلی، از جمله کمبود منابع اورانیوم و مزایای سوخت توریم از قبیل فراوانی منابع توریم، فراوری آسان و ویژگی‌های گرمافیزیکی مناسب و جز آنها مورد توجه برخی کشورها، از جمله ایران، قرار گرفته است. از مهم‌ترین ویژگی‌های مطلوب یک سوخت هسته‌ای، بالا بودن ضریب رسانندگی، مساحت ویژه و قابلیت کلوخه‌شدن است. پارامتر کلیدی تأثیرگذار بر این خواص گرمافیزیکی، ابعاد و توزیع اندازه ذرات توریم اکسید است. رسوب‌گیری توریم اکسالات از

* تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای

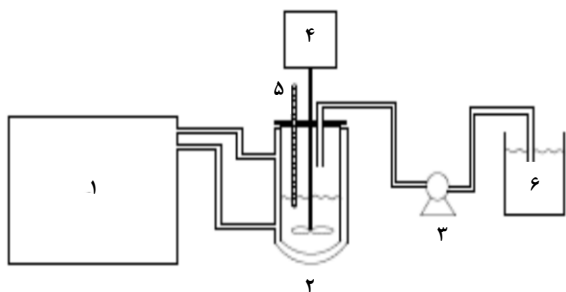
در بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر ابعاد رسوب به این نتایج رسیدند که در محدوده دمایی 1°C تا 60°C برای رسوب‌گیری و محدوده دمایی 800 تا 1200 درجه سلسیوس برای تجزیه، پودر تولیدی دارای چگالی $86/7$ تا $94/7$ درصد چگالی نظری است و حداکثر چگالی ($94/7\%$) برای پودر اکسیدی حاصل از دمای رسوب‌گیری 20°C و دمای تجزیه 900°C به دست آمد. در سال 2001 یایلی و اوکتای [۹] در یک تحقیق تأثیر ابعاد ذره و نوع همزدن را بر روی تجزیه گرمایی بررسی کردند که نتیجه آن تشابه ترکیب رسوب‌های توریم اکسالات به دست آمده با روش‌های همزدن مکانیکی و فراصوتی بود که شامل دو مول بلور آب هستند. آنها همچنین مشاهده کردند که به‌کارگیری روش‌های فراصوتی (35 kHz و 55 kHz) در ایجاد رسوب توریم اکسالات دی‌هیدراته منجر به کاهش در ابعاد ذره و توزیع ابعاد ذره و افزایش در مساحت ویژه سطح ذرات می‌شود و انرژی‌های فعال‌سازی مربوط به تجزیه حرارتی اکسالات رسوب‌یافته در شرایط همزدن، به‌صورت فراصوتی کمتر از اکسالات رسوب‌یافته در شرایط همزدن به صورت مکانیکی است. هلالی [۱۰] در سال 2017 روش‌های سنتی رسوب‌دهی برای استحصال انتخابی توریم از سنگ معدن موناژیت را بررسی کرد. عفیفی و همکاران [۱۱] طی تحقیقی در سال 2018 به فروشویی و رسوب دهی توریم از یک سنگ معدن جنوب شرقی مصر پرداخته‌اند.

در تحقیق‌های قبلی تأثیر متغیرها بر توریم اکسید بررسی شده است و به تأثیرگذارترین مرحله فرایند تولید توریم اکسید پرداخته نشده است. در نتیجه، بررسی تأثیر متغیرهای فرایند بر مرحله رسوب‌گیری الزامی است. در این تحقیق تأثیر متغیرهای دمای واکنش، غلظت واکنش‌دهنده‌ها، میزان همزدن، دبی مواد، زمان و دمای هضم بر روی اندازه و توزیع ابعاد ذرات رسوب توریم اکسالات بررسی می‌شود.

۲. مواد و روش آزمایش

توریم نیترات (مرک آلمان) توزین شده را در حجم 50 ml آب مقطر حل و این مقدار به صورت یکجا در مخزن واکنش (ظرف دوجداره) ریخته شد. مقدار لازم از اکسالیک اسید (مرک) را در حجم 110 ml آب مقطر حل و با دبی معین از طریق پمپ پرستالتیک در مخزن اسید ریخته شد. بعد از اتمام اسید، دمای مخزن واکنش (دوغاب) را

تجزیه حرارتی اکسالات را بررسی کردند. بنابر مشاهدات آنان، اختلاف چشمگیری در خواص مشخصه اکسیدهای تهیه شده از روش تجزیه گرمایی اکسالات (در دمای 300°C در یک اتوکلاو بسته) با اکسید تولید شده به روش تجزیه حرارتی اکسالات پیش می‌آید. طی تحقیقی که توسط کینوشیتی و همکارش آوکی [۲] در سال 1964 انجام شد، مشاهده کردند که با افزایش دمای واکنش، ابعاد ذرات بزرگ و اختلاف ابعاد ذرات اکسالات توریم بیشتر می‌شود. تأثیر سرعت افزودن اسید بر ابعاد و توزیع ابعاد ذرات در سال 1959 به دست جانسون و همکارش وینجست [۳] انجام شد. بنابر نتایج به دست آمده، دبی جریان اسیدی می‌تواند پارامتر کنترل‌کننده نهایی ذرات باشد. الفکیه و همکاران در مؤسسه تحقیقات اتمی مصر [۴] با بررسی تأثیر دمای تکلیس بر تخلخل و رسانایی گرمای توریم اکسید پودر و فشرده مشاهده کردند که با کاهش تخلخل، مقادیر ضریب رسانش الکتریکی اکسید پودری و فشرده توریم اکسید به طور یکنواخت افزایش می‌یابد. در سال 1998 ، هوبرت و همکاران [۵] آزمایشی را ترتیب دادند که در آن تأثیر نوع ماده اولیه و دمای تکلیس بر ابعاد ذرات تولید بررسی و مشاهده شد که ریخت‌شناسی پودر به ماده اولیه بستگی دارد؛ در این خصوص برای ThO_2 تهیه شده از هیدروکسید، دانه‌هایی با شکل‌های نامنظم و زبر به دست آمد. از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر ابعاد ذره، دما و زمان هضم (گوارش) رسوب است. در تحقیقی که در شرکت ORNL [۶] انجام شد، اثر دما و مدت زمان تکلیس بر خلوص، ابعاد ذره، مشخصه بلورین، توانایی دوغاب شدن و زبری توریم اکسید تولیدی با حرارت‌دهی توریم اکسالات خالص بررسی شد. بنابر نتایج آزمایش‌های انجام شده با حرارت‌دهی در دمای 500°C برای مدت زمان 6 h بیشترین بازده تولید توریم دی‌اکسید (بیش از 98%) حاصل شد. از دیگر پارامترهای مهم در بهینه‌سازی شرایط تولید اکسید با قابلیت کلوخه‌شدن بالا، نوع و میزان همزدن است اثر این دو متغیر بر قابلیت کلوخه‌شدن اکسید توسط هارت [۷] در سال 1979 بررسی شد. ذرات توریم اکسید حاصل از رسوب به روش همزدن مغناطیسی در مقایسه با نمونه‌های تولید شده به روش همزدن فراصوتی (اولتراسونیک)، شکل‌های بلوری مطلوبی داشتند. در این نمونه‌ها، محصولی که با همزدن مغناطیسی تهیه می‌شود راحت‌تر از محصول تهیه شده به روش همزدن فراصوتی از صافی می‌گذرد. در سال 1979 ، گریفین و همکاران [۸]



شکل ۱. نمودار کلی چیدمان فرایند تولید رسوب توریم اکسالات. ۱- سیرکولاتور ۲- ظرف رسوب دهنده ۳- پمپ پرستالتیک ۴- همزن ۵- دماسنج ۶- مخزن اکسالیکی اسید.

می‌کنید. با افزایش دما، طبق نظریه وان ویمارن، ابعاد ذرات رسوب بزرگتر و توزیع ابعاد ذرات پهن تر می‌شود. کینوشیتا و همکاران [۲]، وانگ و همکاران [۱۲] در آزمایش‌های مربوط به تأثیر دما بر روی ابعاد ذرات رسوب توریم نیز به نتیجه مشابهی رسیده‌اند.

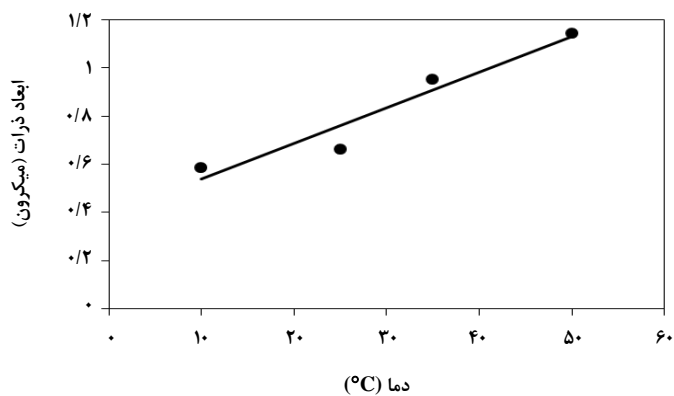
در دمای هضم تنظیم و به مدت مشخصی (زمان هضم) حرارت داده شد. بعد از عملیات هضم، حرارت‌دهی قطع و این امکان فراهم شد تا دوغاب به دمای محیط برسد. دوغاب توسط کاغذ صافی از صافی عبور کرد و کیک تشکیل شده در چند نوبت شسته شد. سپس کیک تشکیل شده خشک و پس از آن دوغاب کیک جامد را به صورت پودر در آورده و برای بررسی ابعاد ذرات به واحد عکس‌برداری فرستاده شد.

آزمایش‌های لازم برای تعیین پارامترهای بهینه رسوب‌گیری توریم اکسالات از توریم نترات با استفاده از اکسالیکی اسید با استفاده از چیدمان، مطابق شکل (۱) انجام گرفت. در این تحقیق اثر پارامترهای مؤثر بر توزیع ابعاد ذرات رسوب توریم تشکیل یافته از قبیل دمای واکنش، غلظت اکسالیکی اسید، دبی اکسالیکی اسید، دما و زمان هضم بررسی شد.

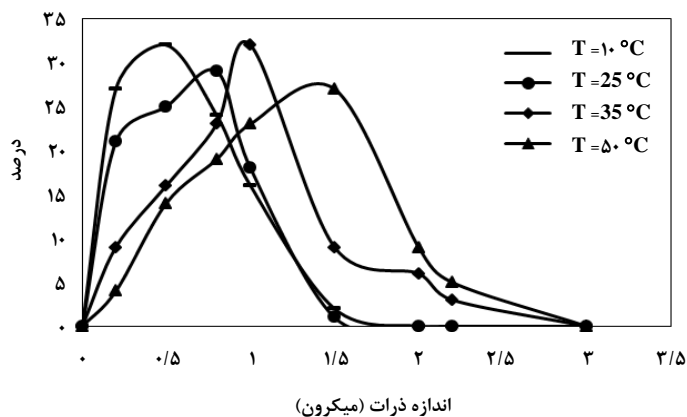
۳. نتایج و بحث

۳-۱ اثر دما

اثر دمای واکنش بر ابعاد و توزیع ابعاد ذرات را در شکل (۲) مشاهده



(الف)



(ب)

شکل ۲. اثر دمای واکنش بر ابعاد و توزیع ابعاد ذرات توریم اکسالات سنتز شده. (الف) ابعاد ذرات: (ب) توزیع ابعاد ذرات.

ذرات بعد از تشکیل به هم می‌چسبند نواحی مرده در راکتور پیش می‌آید. بدیهی است که با افزایش غلظت اکسالیک اسید چسبندگی زیاد می‌شود. در نتیجه غلظت، دبی و محل افزودن اکسالیک اسید بر ابعاد ذرات اثر می‌گذارد. در شکل ((۴-الف)) اثر غلظت اکسالیک اسید بر ابعاد ذرات توریم اکسالات و شکل ((۴-ب)) اثر غلظت اکسالیک اسید بر توزیع ابعاد ذرات توریم اکسالات را نشان می‌دهند. این نتایج با توجه به عکس‌های SEM حاصل شده است. در شکل ((۵)) عکس میکروسکوپ الکترونی مربوط به تأثیر غلظت اکسالیک اسید بر ابعاد و توزیع ابعاد ذرات را مشاهده می‌کنید. در شکل‌های ((۶)) و ((۷)) که، به ترتیب، مربوط به تأثیر دبی اکسالیک اسید بر ابعاد و توزیع ابعاد ذرات توریم اکسالات و عکس SEM محصول است. برای مقایسه بین میزان تأثیر غلظت و دبی اکسالیک اسید بر ابعاد ذرات توریم اکسالات در ادامه آورده شده است. با توجه به این نتایج، غلظت و دبی بهینه، به ترتیب، ۱/۵ مولار و ۱۰ میلی لیتر بر دقیقه است.

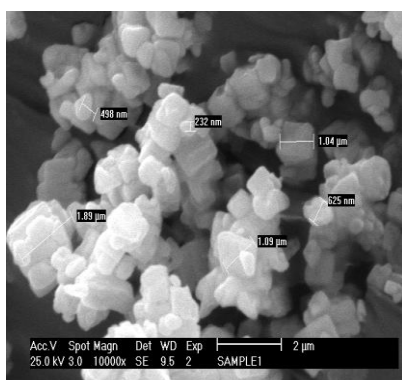
توزیع ابعاد ذرات بر خواص گرمافیزیکی پودر از جمله سطح ویژه، ضریب رسانایی، قابلیت کلوخه‌شدن، چگالی و غیره اثرهای متفاوت می‌گذارد. تأثیر افزایش دمای واکنش بر سطح ویژه در جدول (۱) درج شده است. شکل (۳) عکس‌های SEM مربوط به این تأثیر را نشان می‌دهد.

جدول ۱. کاهش سطح ویژه با دما.

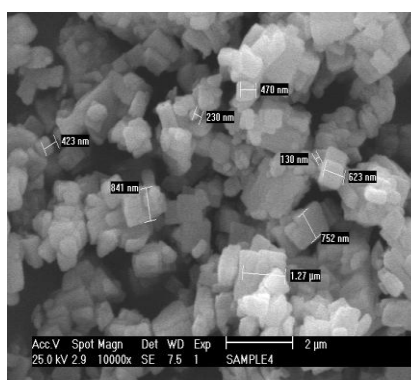
دما (°C)	سطح ویژه (m ² /g)
۱۰	۱۱/۷۶
۲۵	۶/۲۷۷
۵۰	۵/۷۴۴

۲-۳ اثر غلظت مواد و دبی اکسالیک اسید

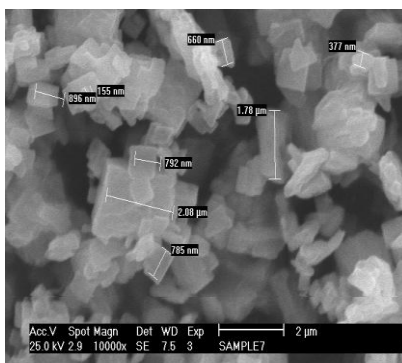
تأثیر غلظت و دبی اکسالیک اسید در اندازه ذرات توریم اکسالات و توزیع ابعاد آنها مشابه است. البته تأثیر غلظت با توجه به شیب خط داده‌ها خیلی بیشتر از دبی اکسالیک اسید می‌باشد. با توجه به اینکه



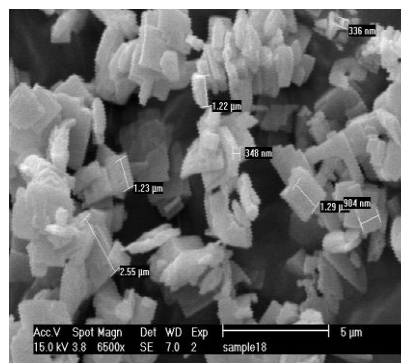
(ب)



(الف)

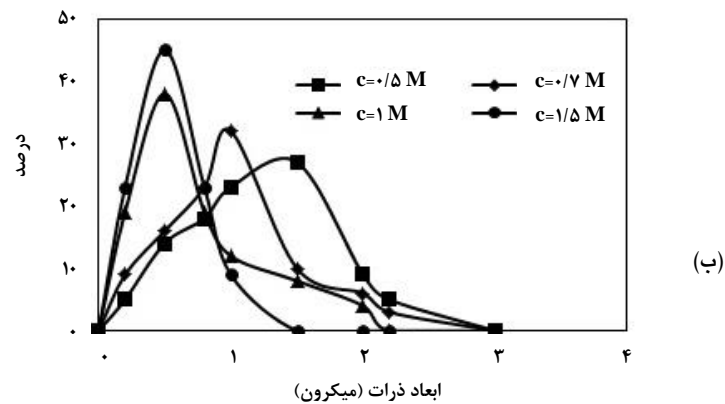
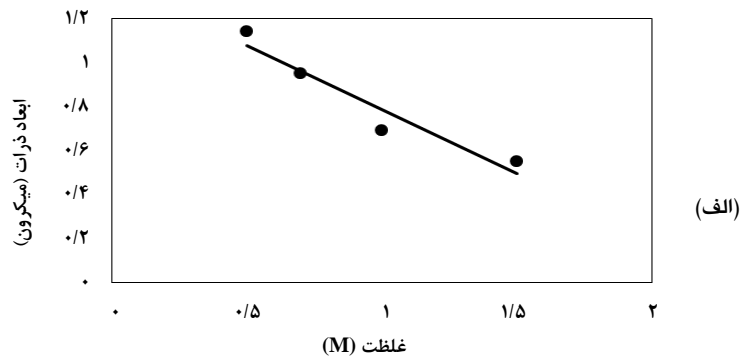


(ت)

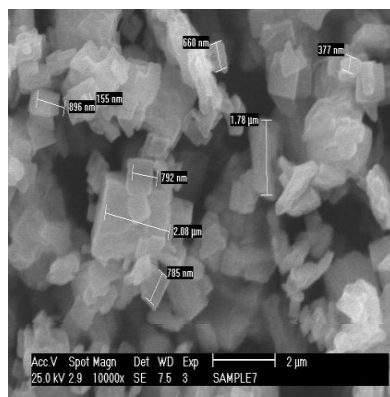


(پ)

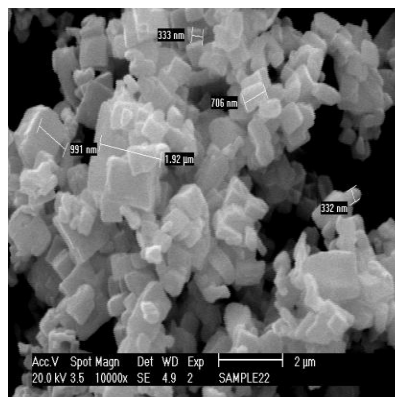
شکل ۳. عکس (SEM) نمونه‌های توریم اکسالات در دمای‌های واکنش مختلف: (الف) ۱۰ °C؛ (ب) ۲۵ °C؛ (پ) ۳۵ °C؛ (ت) ۵۰ °C.



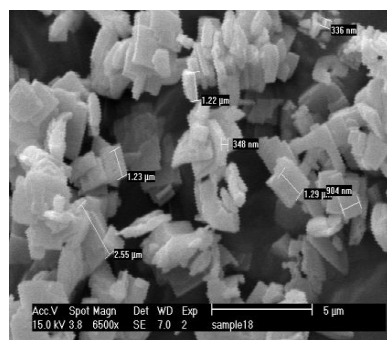
شکل ۴. اثر غلظت بر ابعاد و توزیع ذرات؛ (الف) ابعاد ذرات، (ب) توزیع ابعاد ذرات.



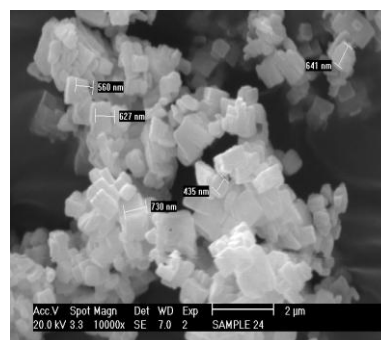
(ب)



(الف)

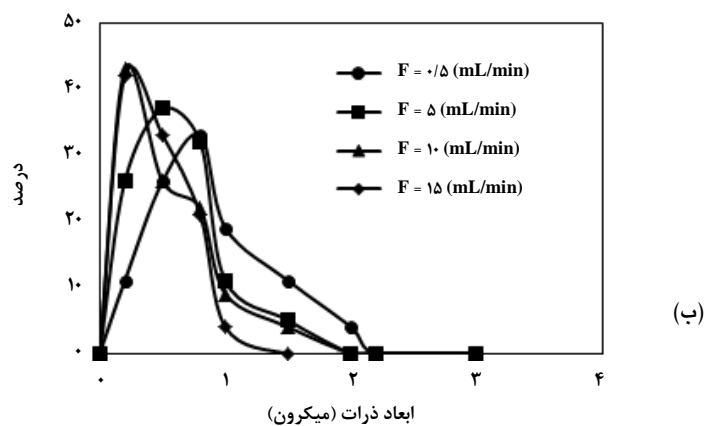
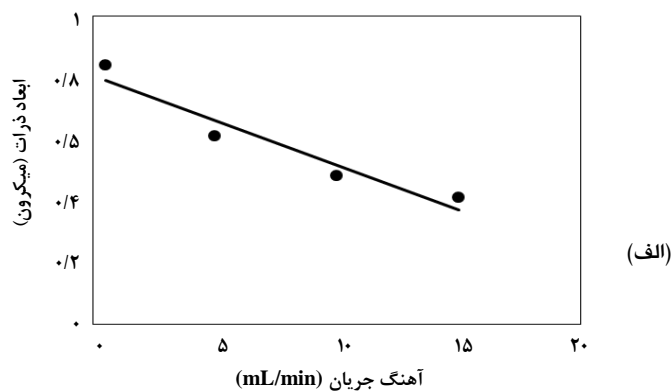


(ت)

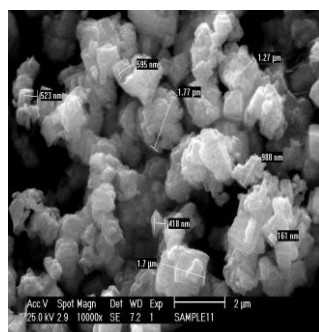


(پ)

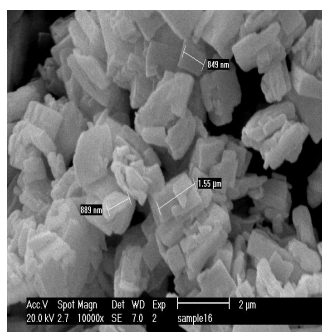
شکل ۵. عکس میکروسکوپ الکترونی پودر اکسالات در غلظت‌های مختلف؛ (الف) غلظت ۰/۵ M، (ب) غلظت ۰/۷ M، (پ) غلظت ۱ M، (ت) غلظت ۱/۵ M.



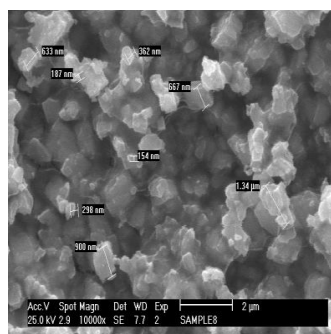
شکل ۶. اثر دبی اکسالیک اسید بر ابعاد ذرات و توزیع ابعاد ذرات: (الف) اثر دبی اکسالیک اسید بر ابعاد ذرات، (ب) اثر دبی اکسالیک اسید بر توزیع اندازه ذرات.



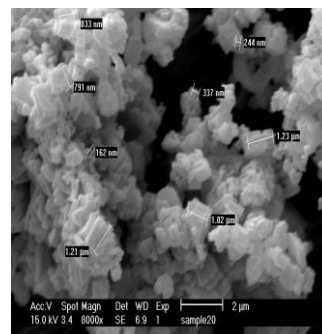
(ب)



(الف)



(ت)



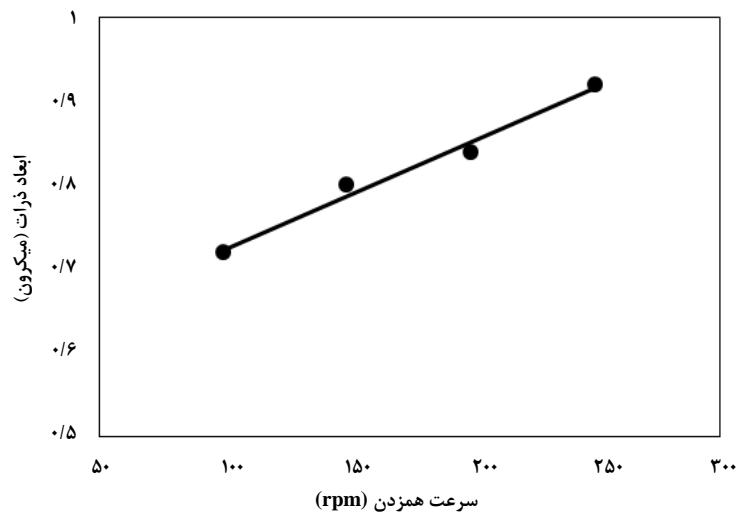
(پ)

شکل ۷. عکس میکروسکوپ الکترونی در دبی‌های مختلف: (الف) 0.5 mL/min، (ب) 5 mL/min، (پ) 10 mL/min، (ت) 15 mL/min.

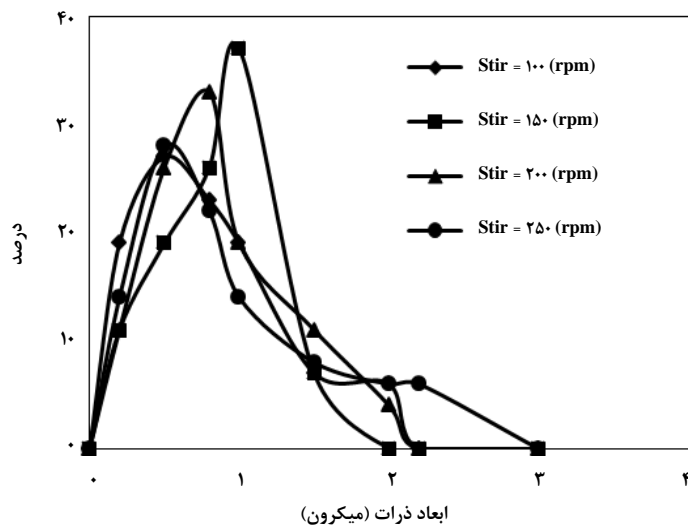
۳-۳- اثر همزدن

مورد استفاده ناپیوسته است، میکرو و ماکرو بودن سیال تاثیری در ابعاد ذرات ندارد [۱۳]. اگر به صورت کیفی به ترتیب افزودن مواد توجه کنیم، با توجه به این که محصول رسوب جامد است، ابعاد ذرات رسوب یافته به شدت همزدن بستگی دارد.

میزان اثر همزدن بر ابعاد و توزیع ابعاد ذرات در شکل‌های (۸) و (۹) دیده می‌شود. با توجه به این که ذرات بعد از تشکیل به هم می‌چسبند، سیال میکرو و ماکرو به وجود می‌آید. ولی چون راکتور

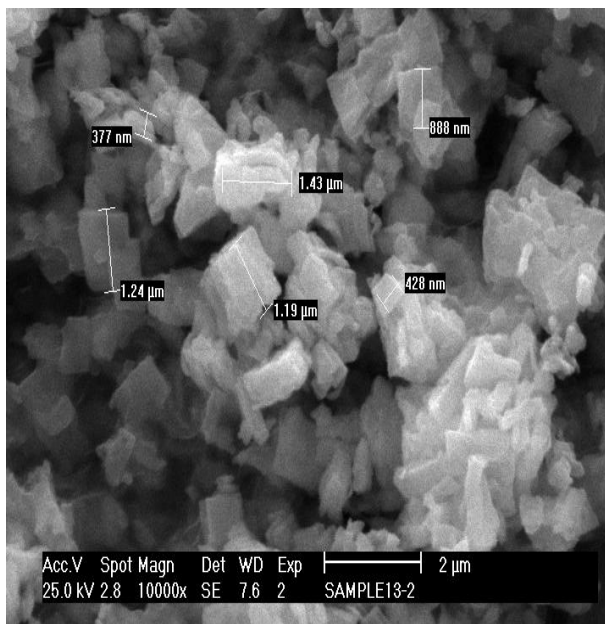


(الف)

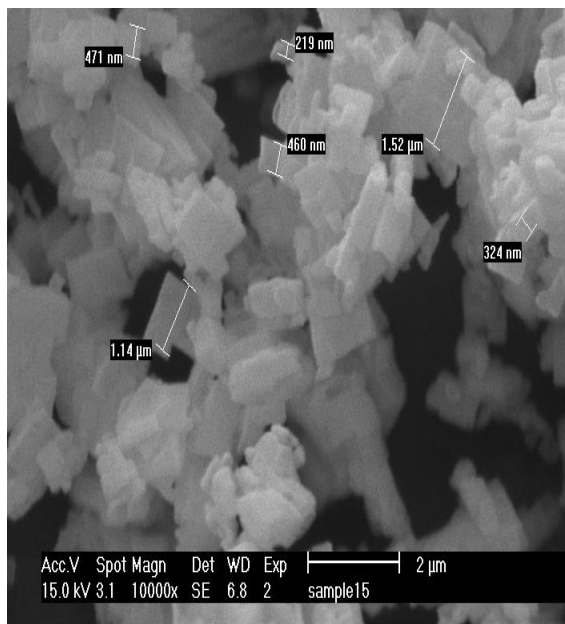


(ب)

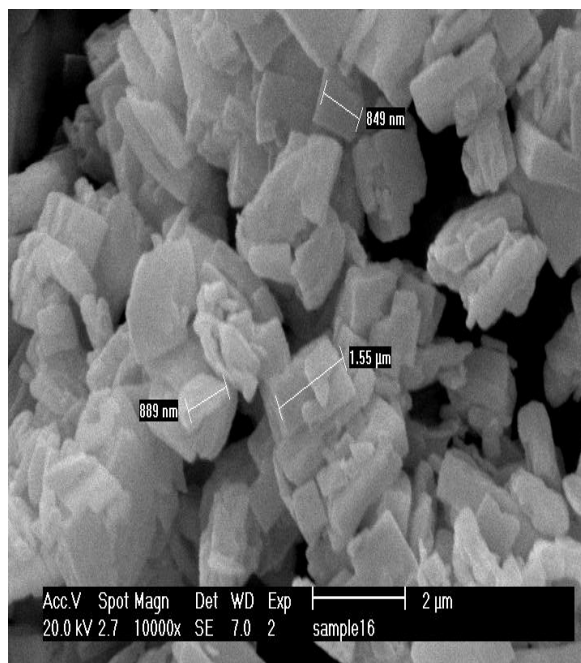
شکل ۸. تأثیر میزان همزدن بر ابعاد و توزیع ابعاد ذرات؛ (الف) تأثیر همزدن بر ابعاد ذرات، (ب) تأثیر همزدن بر توزیع ابعاد ذرات.



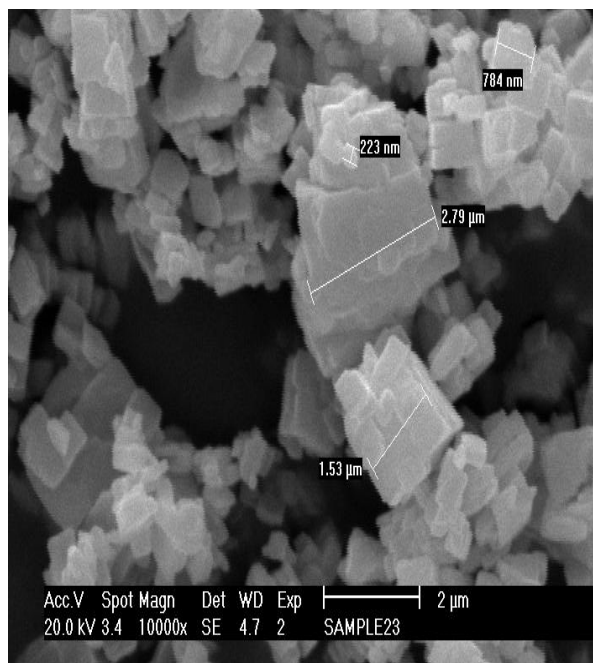
(ب)



(الف)



(ت)



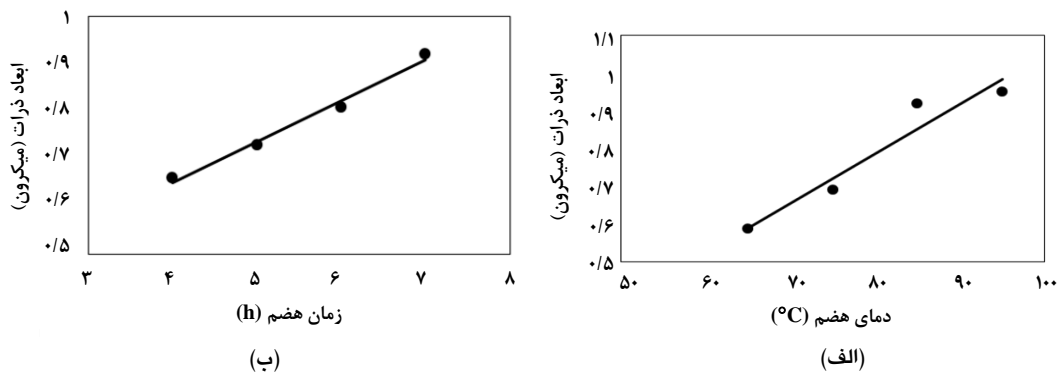
(پ)

شکل ۹. عکس میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها در سرعت‌ها مختلف هم‌زدن: (الف) $rpm=100$ ، (ب) $rpm=150$ ، (پ) $rpm=200$ ، (ت) $rpm=250$.

ذرات توریم اکسالات بزرگ‌تر می‌شود اما توزیع ابعاد ذرات توریم اکسالات یکنواخت‌تر می‌شود. به نظر می‌رسد که زمان اثر گرما جوشی را در رسوب کم می‌کند و باعث یکنواختی ذرات توریم اکسالات می‌شود.

۴-۳ بررسی تأثیر دما و زمان هضم

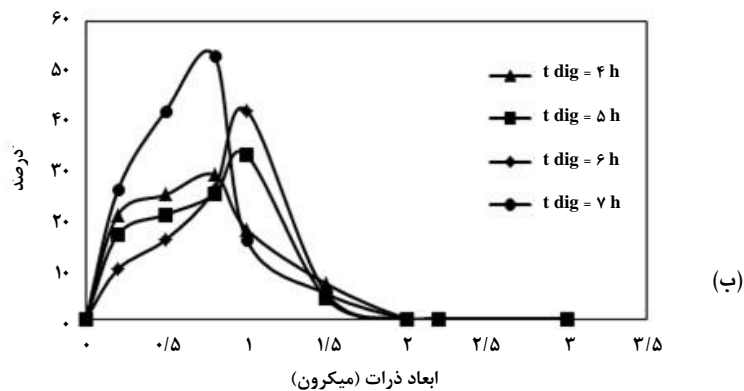
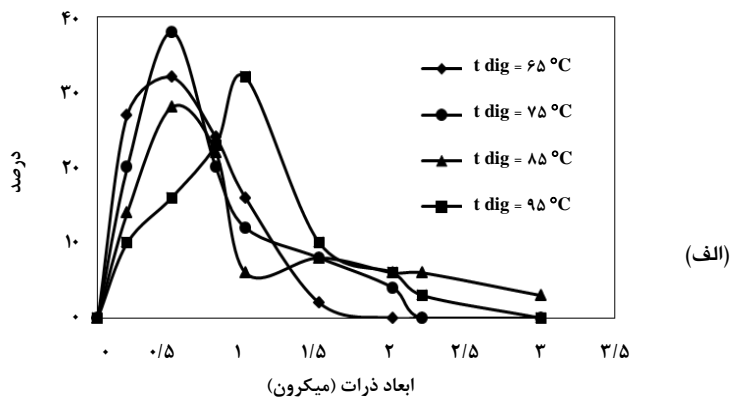
از متغیرهای مهم در ابعاد ذرات و توزیع ابعاد آن‌ها، دما و زمان هضم است. چگونگی تأثیر زمان هضم در شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) مشاهده می‌شود. مطابق این شکل‌ها، با افزایش زمان هضم ابعاد



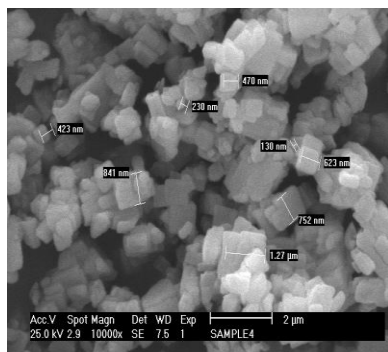
شکل ۱۰. تأثیر دما و مدت زمان هضم بر ابعاد ذرات: (الف) اثر دمای هضم بر ابعاد ذرات، (ب) اثر مدت زمان هضم بر ابعاد ذرات.

دمای هضم این قضیه صدق نمی‌کند و با افزایش دما، ابعاد ذرات بیشتر می‌شود ولی توزیع ابعاد ذرات یکنواخت‌تر می‌شود (شکل‌های (۱۰) تا (۱۳)). بنابراین دمای بهینه هضم ۷۵ درجه سلسیوس و مدت زمان بهینه هضم ۶ ساعت تعیین می‌شود.

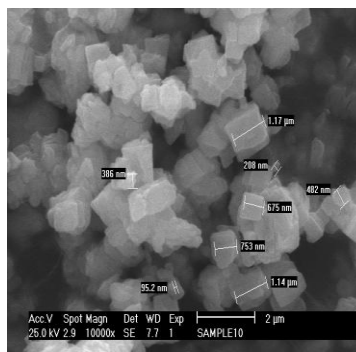
همانطور که در شکل‌ها نیز مشهود است، با افزایش مدت زمان هضم ابعاد ذرات بزرگ‌تر می‌شود. ولی با افزایش مدت زمان هضم، توزیع ابعاد ذرات بیشتر می‌شود. علت این آن است که با افزایش مدت زمان هضم گرما جوشی ذرات کمتر می‌شود. ولی درباره



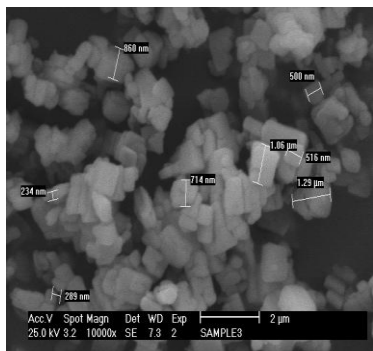
شکل ۱۱. تأثیر دما و مدت زمان هضم بر توزیع ابعاد ذرات: (الف) اثر دمای هضم بر توزیع ابعاد ذرات، (ب) اثر مدت زمان هضم بر توزیع ابعاد ذرات.



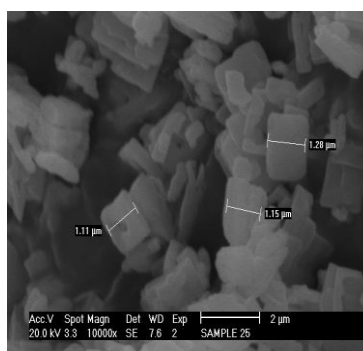
(ب)



(الف)

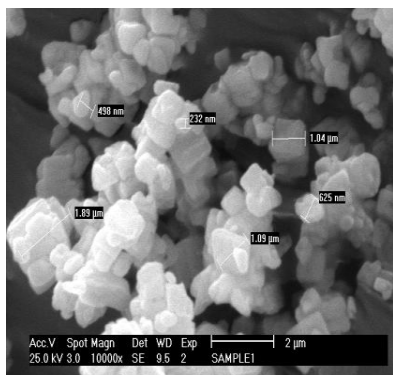


(ت)

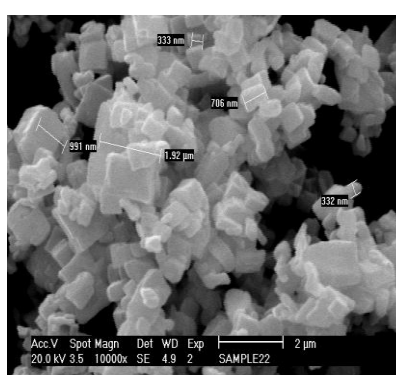


(پ)

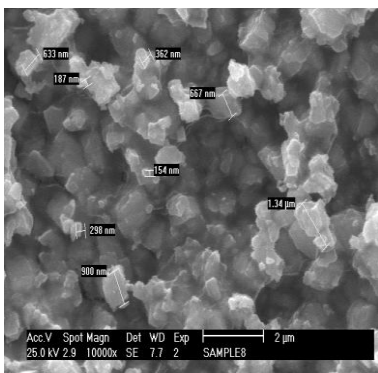
شکل ۱۲. عکس میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها در مدت زمانهای متفاوت هضم: (الف) ۴h، (ب) ۵h، (پ) ۶h، (ت) ۷h.



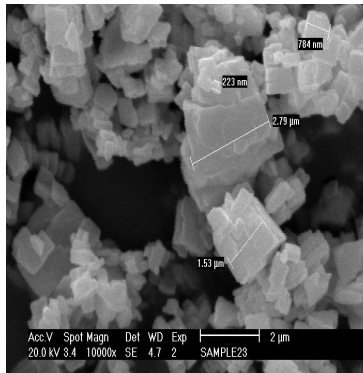
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۱۳. عکس میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها در دماهای متفاوت هضم: (الف) ۶۵ °C، (ب) ۷۵ °C، (پ) ۸۵ °C، (ت) ۹۵ °C.

- [4] El-Fekey, S. A., Farah, M. Y., El-Mamoon Yehia, M., "Effect of porosity on the thermal conductivity of ThO₂ formed after pyrolysis of thorium oxalate and nitrate", Arab Republic of Egypt Atomic Energy Establishment, Nuclear Chemistry Department, Rep-225, (1979).
- [5] Hubert, S., Barthelet, K., Fourest, B., Lagarde, G., Dacheux, N., Baglan, N., "Effect of the crystallinity on the leaching of thorium dioxide", DPHD/SDOS, BP 6, F-92265, Fontenay-aux- Roses (France), (1998).
- [6] Swartout, J. A., Thompson, W. E., "Homogeneous reactor project quarterly progress report", ORNL-1605, July 31, (1953).
- [7] Hart, P. E., "Thoria development activities-annual report", Prepared for the U.S. Department of Energy, PNL-2973, (1979).
- [8] Griffin, C. W., Hsieh, K. A., Matthews, R. B., White, G. D., "ThO₂-Based pellet fuels - their properties, methods of fabrication and irradiation performance", Prepared for the U.S. Department of Energy, PNL-3064, (1979).
- [9] Oktay, E., Yayli, A., "Physical properties of thorium oxalate powders and their influence on the thermal decomposition", Journal of Nuclear Materials, 288(1), 76-82, (2001).
- [10] Helaly, O. S., "Application of the alternative traditional and selective precipitation routes for recovery of high grade thorium concentrates from Egyptian crude monazite sand", Arab J. Nucl. Sci. Appl., 50(3), 85-103, (2017).
- [11] Afifi, S. Y., Saad, M. Z., Yousef, L. A., Ismail, A. H., "Leaching and precipitation of thorium ions from cataclastic rocks, Abu Rusheid area, south eastern desert, Egypt", Arab J. Nucl. Sci. Appl., 51(2), 10 - 19, (2018).
- [12] Wang, F., Yan, C., Cao, C., Wang, P., Huang, H., Jiang, H., Lin, J., Cheng, Z., Zhu, Z., "Synthesis of thorium sol for fabricating fuel kernels", Nucl. Sci. Tech., DOI 10.1007/s41365-017-0243-6, (2017).
- [13] Doretto, L., Ferrara, L., Barison, G., "Determination of thorium isotopes in gas lantern mantles by alpha spectrometry", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 141(1), 203-208, (1990).

۴. نتیجه گیری کلی

در این تحقیق اثر متغیرهای فرایندی بر ابعاد و توزیع ابعاد ذرات پودر توریم اکسلات بررسی شد. با بررسی عکس ها و نمودارهای ابعاد و توزیع ابعاد ذرات مشخص شد که از میان متغیرهای بررسی شده دمای واکنش و غلظت بیشترین و همزدن کمترین اثر را بر ابعاد ذرات دارند. با افزایش دما، ابعاد ذرات بیشتر و یکنواختی کمتر شد. همچنین، با افزایش غلظت و دبی اکسالیس اسید ابعاد ذرات کمتر و یکنواختی بیشتر شد. با افزایش سرعت همزدن، یکنواختی توزیع ابعاد ذرات در ابتدا افزایش و سپس کاهش داشت. با افزایش دمای هضم، ابعاد ذرات و یکنواختی ابعاد ذرات کمتر شد. مدت زمان هضم اثر متفاوتی بر توزیع ابعاد ذرات داشت به این معنی که با افزایش مدت زمان واکنش، ابعاد ذرات بزرگتر شد و انتظار می رفت توزیع نایکنواخت تر شود، ولی دامنه یکنواختی افزایش یافت. روند کلی نتایج آزمایش های تجربی با نتایج موجود در مراجع [۱۲ و ۲] در شرایط مشابه همخوانی مناسبی دارند. شرایط بهینه فرایند بررسی شد و دمای بهینه واکنش ۱۰ درجه سلسیوس، غلظت و دبی بهینه اکسالیس اسید، به ترتیب ۱/۵ مولار و ۱۰ میلی لیتر بر دقیقه، و سرعت همزدن ۱۵۰ دور در دقیقه تعیین شد. همچنین، مدت زمان بهینه هضم ۶ ساعت و دمای بهینه هضم ۷۵ درجه سلسیوس مشخص شد.

مراجع

- [1] McBride, J. P., Thomas, D. G., "Technology of aqueous suspensions", R. N. Lyon, and L. E. Morse, Oak Ridge National Laboratory, (1957).
- [2] Kinoshita, H., Aoki, Sh., Takagi, A., Kobayashi, Y., "Fabrication of thorium oxide fuel element (I) thermal decomposition of thorium oxalate and particle size growth of thorium oxide by heating", FAPIG (Tokyo), pages 378-383, (1964).
- [3] Johnsson, K. O., Winget, R. H., "Pilot plant preparation of thorium and thorium-uranium oxides", Oak Ridge National Laboratory, ORNL-2853, (1959).