

سینتیک هسته‌زایی نانوذرات پتاسیم کلراید در حضور پلی‌وینیل پیرولیدون

مهرداد منطقیان* و امیر فرآور

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۳/۰۴/۰۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۳/۰۵/۲۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۳/۰۶/۱۰

چکیده

یکی از روش‌های متداول تولید نانوذرات، رسوب‌دهی از فاز مایع است که به علت کنترل بهتر اندازه و مورفولوژی نانوذرات تولید شده با این روش، بسیار مورد توجه است. در این پژوهش، نانوذرات پتاسیم کلراید به روش کریستالیزاسیون القایی در حضور پلی‌وینیل پیرولیدون (PVP) تولید شده‌اند. همچنین زمان القای تشکیل نانوذرات برای تعیین سینتیک هسته‌زایی و محاسبه پارامترهای موثر در آن، اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان دهنده این است که مکانیسم هسته‌زایی در حضور و عدم حضور PVP به صورت هسته‌زایی اولیه باقی می‌ماند و افزایش غلظت PVP موجب افزایش کشش سطحی نانوذرات خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات پتاسیم کلراید، پلی‌وینیل پیرولیدون، کریستالیزاسیون القایی، هسته‌زایی.

۱- مقدمه

پایدارسازی به روش استقرار اجزا در فضا و یا ترکیبی از این دو روش. در روش اول از ترکیبات باردار استفاده می‌شود که وقتی در محلول حل می‌شوند، جذب ذرات شده و یک لایه دوگانه الکتریکی اطراف ذره تشکیل می‌دهند که باعث دافعه کلونی شده و از تجمع ذرات جلوگیری می‌کنند. در روش دوم از ماکرومولکول‌هایی نظیر پلیمرها استفاده می‌شود. این مولکول‌ها به سطح ذرات تشکیل شده می‌چسبند و با نزدیک شدن آنها به یکدیگر، درهم تنیده می‌شوند و از بهم چسبیدن ذرات جلوگیری می‌کنند. در روش سوم ماکرومولکول‌های باردار، ترکیبی از دو مکانیسم را بوجود می‌آورند [۲]. به عنوان مثال از پلی‌وینیل پیرولیدون و پلی‌وینیل استات برای پایدارسازی نانوذرات نقره [۳]، از پلی‌الکترولیت‌ها جهت پایدارسازی اکسید روی [۴]، از پلی‌متیل متاکریلیت

اولین قدم برای ورود به دنیای نانوفناوری، تولید نانوذرات است. نانوذرات به روش‌های گوناگونی تولید می‌شوند که یکی از این روش‌ها، رسوب از فاز مایع است. در این روش محلول فوق اشباعی از ماده مورد نظر تهیه می‌شود. از آنجائیکه سیستم تمایل به بازگشت به حالت تعادلی دارد، ذرات به صورت جامد از محلول خارج می‌شوند. پس از تشکیل هسته‌های اولیه می‌توان با استفاده از پایدارکننده از بهم پیوستن و کلوخه شدن ذرات جلوگیری کرد و آنها را در مقیاس نانومتری نگه داشت. بدین ترتیب نانوذرات تشکیل می‌شوند و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. سه روش عمده برای پایدارسازی نانوذرات بکار می‌روند. این سه روش عبارتند از پایدارسازی الکترواستاتیکی،

* عهده‌دار مکاتبات: مهرداد منطقیان

نشانی: تهران، بزرگراه جلال آل‌احمد، دانشگاه تربیت مدرس

تلفن: ۰۲۱-۸۲۸۸۳۳۳۳، دورنگار: ۰۲۱-۸۸۰۰۶۵۴۴، پست الکترونیکی: manteghi@modares.ac.ir

واکنشی صورت گرفته است که منجر به ایجاد فوق اشباع زیاد و در نتیجه زمان القای القاهای کوچک می‌شود. در این پژوهش زمان القای تشکیل نانوذرات پتاسیم کلراید از طریق اضافه کردن ضد حلال اندازه‌گیری می‌شود که یک روش جدید در این زمینه محسوب می‌شود. همچنین اثر پایدار کننده‌ها بر مکانیسم هسته‌زایی نانوذرات و پارامترهای موثر بر هسته‌زایی بررسی نشده است. تولید نانوذرات و اندازه‌گیری زمان القای تشکیل آنها از طریق کریستالیزاسیون القایی در این پژوهش، برای اولین بار در دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. نانوذرات تشکیل شده با این روش با صرف کمترین انرژی و هزینه تولید می‌شوند. همچنین روش معرفی شده، می‌تواند برای تولید نانوذرات معدنی بسیار مناسب و کارآمد باشد.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد آزمایشگاهی

در این تحقیق، جهت انجام آزمایش‌ها از پتاسیم کلراید به عنوان حل شونده، پلی‌وینیل پیرولیدون با جرم مولی ۲۵۰۰۰ گرم بر مول برای پایدارسازی و استون به عنوان ضدحلال که از شرکت مرک آلمان تهیه شده‌اند با درجه خلوص آزمایشگاهی استفاده شد. حلال استفاده شده در این آزمایش، آب تقطیر شده است. پتاسیم کلراید در استون نامحلول است [۱۹] و از طرفی آب و استون به هر نسبتی در یکدیگر حل می‌شوند.

۲-۲- تولید نانوذرات

حلالیت پتاسیم کلراید در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در آب به میزان ۳۵/۵ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر است [۱۹]. به منظور ایجاد فوق اشباع توسط ضدحلال، در ابتدا محلولی با غلظت کمتر از غلظت تعادلی تهیه شد. سپس PVP به عنوان پایدار کننده با غلظت مشخص به محلول اضافه و محلول حاصله به مدت ۱۰ دقیقه توسط همزن مغناطیسی با دور ۵۰۰ rpm همزده شد تا PVP به خوبی حل شود. در مرحله بعد، دور همزن در ۲۰۰ rpm قرار گرفت تا تبخیر ناشی از همزدن، به حداقل مقدار ممکن برسد. در گام بعد، استون با آهنگ ثابت به سیستم اضافه شد تا با

(PMMA) در سنتز نانوذرات طلا [۵]، از مواد فعال سطحی کاتیونی برای پایدارسازی نانوذرات کلسیم کربنات استفاده شده است [۶]. همچنین اثر پایدار کننده‌های پلیمری و سورفکتانت‌ها بر اندازه و مورفولوژی نانوذرات نقره و مس [۷] و اثر PVP بر سینتیک هسته‌زایی نانوذرات نقره بررسی شده است [۸]. کریستالیزاسیون القایی به عنوان یکی از راه‌های جداسازی و خالص‌سازی که می‌تواند جایگزین روش‌های دیگری نظیر کریستالیزاسیون سرمایشی و تبخیری استفاده شود مطرح است. اساس این روش بر پایه انتخاب حلال و ضدحلال مناسب است. در این فرآیند با اضافه کردن ضدحلال به محلول می‌توان حلالیت ماده حل شونده را کاهش داد و آن را از محلول خارج کرد [۹].

تولید کریستال‌های گوگرد با استفاده از تولوئن به عنوان حلال و متانول به عنوان ضدحلال انجام شده است که در نهایت نانوکریستال‌های گوگرد تشکیل شده بوسیله فیلترینگ از ذرات میکرونی جدا شده‌اند [۱۰]. همچنین هسته‌زایی پاراستامول در طی یک فرآیند کریستالیزاسیون القایی مورد بررسی قرار گرفته است که در پژوهش صورت گرفته، از متانول به عنوان حلال و از آب به عنوان ضدحلال استفاده شده است [۱۱]. یک رویکرد تجربی برای آهنگ هسته‌زایی، استفاده از زمان القاست. به فاصله زمانی بین ایجاد فوق اشباع و بوجود آمدن اولین تغییرات فیزیکی به علت هسته‌زایی حل شونده در فرآیندهای کریستالیزاسیون، زمان القا (زمان تاخیر) گویند. زمان القا را نمی‌توان یک خصوصیت بنیادی برای سیستم تعریف کرد ولی با استفاده از آن و بهره‌گیری از تئوری کلاسیک هسته‌زایی، می‌توان درجه هسته‌زایی و کشش سطحی ذرات تشکیل شده را محاسبه کرد [۱۲]. اولین مباحث در مورد زمان القا برای بیان هسته‌زایی در سال ۱۹۸۸ صورت گرفت [۱۳]. بدنبال آن تحقیقات متعددی در مورد اثرگذاری عوامل مختلف از جمله اثر فوق اشباع، دما [۱۴، ۱۵]، حلال [۱۶]، سرعت همزن [۱۷] و مواد افزودنی [۱۸] بر زمان القا مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مفاهیم زمان القا در هسته‌زایی نانوذرات نقره [۱۴] و مس [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه‌گیری زمان القا در همه پژوهش‌های گذشته با استفاده از کریستالیزاسیون

گرفته شد و در نهایت با توجه به استوکیومتری غلظت پتاسیم کلراید تعادلی محاسبه گردید.

نتایج بدست آمده در غلظت‌های متفاوت PVP در جدول ۱ نشان داده شده است. این نمونه‌گیری‌ها در غلظت‌های اولیه ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ میلی‌مولار PVP، به منظور شناخت اثر این پایدار کننده بر هسته‌زایی تکرار شده است.

جدول ۱: فوق اشباع و زمان القا بدست آمده در غلظت اولیه ۰/۲ میلی‌مولار PVP.

غلظت اولیه PVP (mM)	غلظت اولیه (g/ml)	غلظت تعادلی (g/ml)	فوق اشباع	زمان القا (ثانیه)
۰/۲	۰/۰۲۲۲۸	۰/۰۲۰۲۸	۱/۰۹۸۷۴	۳۲
	۰/۰۳۲۴۶۸	۰/۰۲۸۱۱	۱/۱۵۴۸	۲۰
	۰/۰۴۲۰۸	۰/۰۳۳۵۴	۱/۲۵۴۸	۱۳
	۰/۰۵۱۹۴	۰/۰۴۷۷۷	۱/۰۸۷۴	۴۲
	۰/۰۶۰۹۲	۰/۰۴۴۶	۱/۳۶۵۸	۱۰
۰/۴	۰/۰۲۲۳۲	۰/۰۱۸۳۸	۱/۳۱۴	۱۹
	۰/۰۳۳۹۵	۰/۰۲۴۸۸	۱/۳۶۵	۱۲
	۰/۰۴۲۵۸	۰/۰۳۷۸۷	۱/۱۲۴۵	۳۴
	۰/۰۵۱۹	۰/۰۴۳۷۱	۱/۱۸۷	۲۱
	۰/۰۶۲۳۳	۰/۰۵۰۴۵	۱/۲۳۵	۱۶
۰/۶	۰/۰۲۲۳۵	۰/۰۲۰۵۵	۱/۰۸۷۴	۱۳۲
	۰/۰۳۳۶۴	۰/۰۳۰۷۱	۱/۰۹۵۴	۱۲۴
	۰/۰۴۲۵۹	۰/۰۳۸۶۳	۱/۱۰۲۳	۹۱
	۰/۰۵۱۶۸	۰/۰۴۵۱	۱/۱۴۵۸	۳۷
	۰/۰۶۲۱۱	۰/۰۴۹۴۹	۱/۲۵۴۸	۱۵
۰/۸	۰/۰۲۲۶	۰/۰۲۰۵	۱/۰۹۷۸	۲۳۶
	۰/۰۳۳۳	۰/۰۲۷۸۵	۱/۱۹۷۸	۳۷
	۰/۰۴۲۳	۰/۰۳۴۸	۱/۲۱۵۴	۲۹
	۰/۰۵۲۲	۰/۰۴۶۵	۱/۱۲۱۵	۹۹
	۰/۰۶۱۸۳	۰/۰۵۳۲	۱/۱۶۲۱	۴۷
۱	۰/۰۲۲۸۶	۰/۰۲۰۳	۱/۱۲۴	۱۰۶
	۰/۰۳۴۴۲	۰/۰۲۸۳	۱/۲۱۳۲	۳۷
	۰/۰۴۳۳	۰/۰۳۶۱۴	۱/۱۹۸۷	۴۱
	۰/۰۵۲۵	۰/۰۴۰۳۵	۱/۳۰۲۱	۲۴
	۰/۰۶۲۲۷	۰/۰۵۳۹	۱/۱۵۴	۶۱

کاهش حلالیت پتاسیم کلراید، فوق اشباع را ایجاد کند. این روند تا کدر شدن محلول (خروج نانوذرات از محلول) ادامه یافت.

۲-۳- اندازه‌گیری زمان القا و مقدار فوق اشباع

پس از اضافه کردن هر قطره از ضدحلال به محلول، به مدت ۵ دقیقه زمان اندازه‌گیری می‌شود تا تغییرات فیزیکی در سیستم رخ دهد. در صورت عدم کدر شدن محلول، زمان سنج به مقدار اولیه (صفر) بازگشته و قطره‌ای دیگر از ضدحلال به محلول افزوده می‌شود. این روند تا کدر شدن محلول (تشکیل نانوذرات) ادامه می‌یابد و فاصله زمانی بین آخرین قطره اضافه شده به محلول و کدر شدن محلول به عنوان زمان القا در نظر گرفته می‌شود. نسبت غلظت اولیه محلول، C (در لحظه اضافه شدن آخرین قطره ضدحلال) به غلظت تعادلی پتاسیم کلراید در محلول (C*) به عنوان فوق اشباع (S) تعریف می‌گردد [۱۲].

$$S = \frac{C}{C^*} \quad (1)$$

برای اندازه‌گیری غلظت اولیه، وزن مشخصی از پتاسیم کلراید در ۱۰ میلی‌لیتر آب به حجم می‌رسد. سپس استون قطره قطره تا کدر شدن محلول اضافه می‌شود و در پایان فرآیند حجم استون مصرفی اندازه‌گیری می‌شود. با مشخص بودن وزن پتاسیم کلراید اولیه و حجم آب و استون مصرفی، غلظت اولیه محلول محاسبه خواهد شد. لازم بذکر است در تمام مدت آزمایش دمای محلول اندازه‌گیری شده است و مقدار آن 25 ± 1 درجه سانتیگراد ثابت نگه داشته شده است.

برای اندازه‌گیری غلظت تعادلی، محلول به مدت یک روز تا ته‌نشین شدن کامل ذرات نگهداری می‌شود. برای اطمینان از جدایی دو فاز، محلول به مدت ۱۰ دقیقه درون دستگاه سانتریفیوژ با دور ۳۰۰۰ rpm قرار داده می‌شود. در مرحله بعدی ۵ میلی‌لیتر از محلول شفاف باقی مانده، برای تعیین غلظت تعادلی پتاسیم کلراید مورد آنالیز غلظت‌سنجی قرار می‌گیرد.

برای تعیین این غلظت، از روش مور [۲۰] که یک تیتراسیون رسوبی برای تعیین غلظت کلر است، بهره

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین مکانیسم هسته‌زایی

بر اساس تئوری کلاسیک هسته‌زایی، در صورتی که مکانیسم هسته‌زایی اولیه همگن باشد رابطه زیر برای بیان آهنگ هسته‌زایی ارائه می‌شود [۱۲]:

$$J = K \exp\left(-\frac{16\pi\gamma^3 V_m^2}{3(kT)^3 (\ln S)^2}\right) \quad (2)$$

که در این رابطه J آهنگ هسته‌زایی، K ثابت هسته‌زایی، γ کشش سطحی، V_m حجم مولکولی، k ثابت استفان-بولتزمن و T دمای آزمایش است. بنابر تئوری کلاسیک، زمان القا با عکس آهنگ هسته‌زایی متناسب است، در نتیجه رابطه زیر برای زمان القا حاصل خواهد شد [۱۲].

$$t_{ind} = K' \exp\left(\frac{16\pi\gamma^3 V_m^2}{3(kT)^3 (\ln S)^2}\right) \quad (3)$$

از این جهت اگر با رسم نمودار لگاریتمی زمان القا در مقابل $\frac{1}{(T)^3 (\ln S)^2}$ خطی راست بدست آید، مکانیسم هسته‌زایی اولیه همگن است و از شیب آن جهت محاسبه کشش سطحی نانوذرات می‌توان استفاده کرد. بدین ترتیب اگر شیب این خط برابر A در نظر گرفته شود، کشش سطحی بین ذرات تشکیل شده و محلول از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۲]:

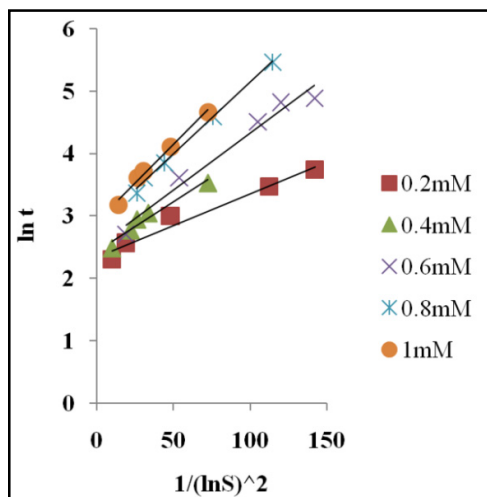
$$\gamma = k \left(\frac{3A}{16\pi V_m^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

همچنین بر اساس نتایج تجربی رابطه زیر برای هسته‌زایی ثانویه پیشنهاد شده است [۲۱]:

$$t_{ind} = ZS^{-n} \quad (5)$$

که در این رابطه Z ثابت هسته‌زایی و n درجه هسته‌زایی ثانویه می‌باشد. اگر نمودار $\ln t_{ind}$ در مقابل $\ln S$ رسم گردد

و خطی راست حاصل شود، می‌توان نتیجه گرفت که مکانیسم هسته‌زایی ثانویه است و از آن می‌توان درجه و ثابت هسته‌زایی را محاسبه کرد [۲۱].



شکل ۱: نمودار $\ln t$ در مقابل $\frac{1}{(\ln S)^2}$ در غلظت‌های متفاوت PVP (غلظت‌های PVP در کنار نمودار آورده شده است).

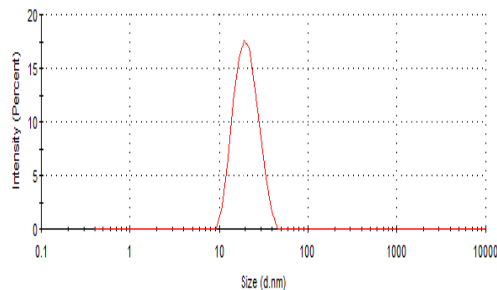
نمودارهای مربوط به رابطه ۳ که حاصل از نتایج آزمایشگاهی هستند برای غلظت‌های متفاوت PVP در شکل ۱ رسم شده‌اند.

جدول ۲: برازش داده‌های آزمایشگاهی برای تعیین مکانیسم هسته‌زایی نانوذرات پتاسیم کلراید.

مقدار R^2 برای نمودار هسته‌زایی ثانویه	مقدار R^2 برای نمودار هسته‌زایی اولیه همگن	غلظت اولیه PVP (میلی مولار)
۰/۹۲۸۱	۰/۹۶۴۵	۰/۲
۰/۹۱۱۲	۰/۹۴۹۹	۰/۴
۰/۹۴۶۱	۰/۹۶۹۴	۰/۶
۰/۹۳۳	۰/۹۹۶۴	۰/۸
۰/۹۲۱۸	۰/۹۸۹۵	۱

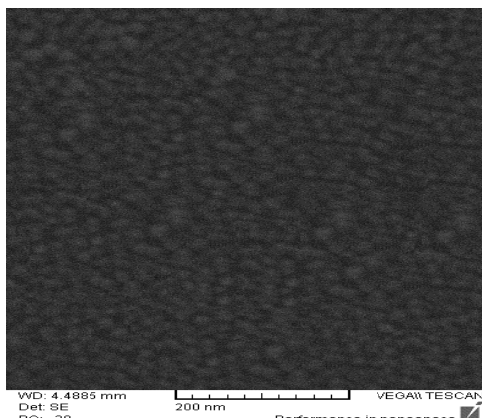
نمودار مربوط به رابطه ۵ نیز رسم شده است و نتایج مربوط به برازش داده‌های آزمایشگاهی در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. تطابق بهتر رابطه مربوط به هسته‌زایی اولیه همگن، برتری این مکانیسم در تولید نانوذرات پتاسیم کلراید در شرایط آزمایشگاهی را نشان

به عنوان نمونه، تحت آنالیز تفرق نور دینامیکی (DLS) قرار گرفته است که نتیجه آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲: نتیجه آنالیز DLS برای آزمایش ۴.

همانطور که مشاهده می‌شود همه ذرات تشکیل شده اندازه‌ای بین ۹ تا ۵۰ نانومتر و غالب ذرات، اندازه‌ای در حدود ۱۹/۵ نانومتر دارند. این نتیجه نشان از عملکرد مناسب PVP در تولید نانوذرات پتاسیم کلراید دارد. PVP به روش استریکی نانوذرات را پایدار می‌کند و عملکرد مناسبی در محیط‌های یونی دارد، در نتیجه یک پایدار کننده مناسب جهت تولید نانوذرات معدنی محسوب می‌شود [۲۲]. همچنین برای تعیین اندازه و مورفولوژی نانوذرات تشکیل شده، از این نمونه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی عکس برداری گردید.



شکل ۳: تصویر SEM نانوذرات پتاسیم کلراید (آزمایش ۴).

تصویر SEM گرفته شده از نانوذرات تایید کننده و همسو با آنالیز DLS است و اندازه نانومتری ذرات تشکیل شده را تایید می‌کند.

می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده و رابطه ۴، می‌توان کشش سطحی نانوذرات پتاسیم کلراید در غلظت‌های مختلف PVP را محاسبه کرد و تأثیر غلظت آن را بر کشش سطحی مشاهده نمود. نتایج محاسبه کشش سطحی در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳: کشش سطحی نانوذرات پتاسیم

کلراید در غلظت‌های مختلف PVP.

شماره آزمایش	غلظت اولیه PVP (میلی مولار)	کشش سطحی ($\frac{mJ}{m^2}$)
۱	۰/۲	۲/۲۱
۲	۰/۴	۲/۵۷
۳	۰/۶	۲/۶۹
۴	۰/۸	۲/۹۱
۵	۱	۲/۹۸

همانطور که نتایج نشان می‌دهد، افزایش غلظت PVP موجب افزایش کشش سطحی نانوذرات شده است. بطور معمول افزودن مواد فعال سطحی موجب کاهش کشش سطحی می‌شود. به نظر می‌رسد با گذر از غلظت بحرانی مایسل، مولکول‌های PVP کارایی خود را از دست می‌دهند و به دور هم جمع می‌شوند، در نتیجه با افزایش غلظت آن، مولکول‌های PVP بیشتری از سطح نانوذرات تشکیل شده جدا شده و دور هم جمع می‌شوند و باعث افزایش کشش سطحی نانوذرات می‌شوند. پس از بدست آوردن مقادیر مختلف کشش سطحی در مقابل غلظت‌های مختلف پایدار کننده، در محدوده غلظت و دمای تعیین شده، می‌توان ارتباط غلظت اولیه PVP در محلول را با کشش سطحی نانوذرات پتاسیم کلراید، با رابطه زیر نشان داد:

$$\gamma = -0.8716C_{PVP}^2 + 1.9864C_{PVP} + 1.87 \quad (۶)$$

مقدار R^2 برای رابطه بدست آمده برابر ۰/۹۸۵۹ می‌باشد.

۳-۲- اندازه و مورفولوژی نانوذرات تشکیل شده

به منظور اثبات تشکیل نانوذرات پتاسیم کلراید، ذرات تشکیل شده در حضور PVP با غلظت اولیه ۰/۸ میلی مولار

- [3] M. Cho, S. Kim, I. Kim, B. Kim, Y. Lee, J. Nam, *Macromol. Res.*, **18**, 2010, 1070.
- [4] K.L. Ying, T.E. Hsieh, Y.F. Hsieh, *Ceram. Int.*, **35**, 2009, 1165.
- [5] M.R. Johan, L. Chong, N.A. Hamizi, *Electrochemical Science*, **7**, 2012, 4567.
- [6] S. M. El-Sheikh, S. El-Sherbiny, A. Barhoum, Y. Deng, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, **422**, 2013, 44.
- [7] R. Patakfalvi, S. Papp, I. Dekany, *Nanoparticle Res.*, **9**, 2006, 353.
- [8] K.S. Tan, K.Y. Cheong, *J. Nanopart. Res.*, **15**, 2013, 1537.
- [9] S. Mostafa-Nowee, A. Abbas, J.A. Romagnoli, *Chem. Eng. Sci.*, **63**, 2008, 5457.
- [10] E. Hojaj, M. Manteghian, *Nanosains Nanoteknologi*, **2009**, 2009, 32.
- [11] C.T. Ociardha, P.J. Frawley, N.A. Mitchell, *Crystal Growth*, **328**, 2011, 50.
- [12] J.W. Mullin, "Crystallization", Butterworth-Heinemann, 2001.
- [13] O. Sohnel, J.W. Mullin, *Colloid Interface Sci.*, **123**, 1988, 43.
- [14] S. Ghader, M. Manteghian, M. Kokabi, R.S. Mamoory, *Chem. Eng. Technol.*, **30**, 2007, 1129.
- [15] M.A. Mahabadi, *Nanosains Nanoteknologi*, 2009, 32.
- [16] R. Kanagadurai, R. Durairajan, R. Sankar, G. Sivanesan, S.P. Elangovan, *J. Chem.*, **7**, 2010, 137.
- [17] C. Xu, D. Liu, W. Chen, *Crystal Growth*, **310**, 2008, 4138.
- [18] R. Isopescu, C. Mateescu, M. Mihai, G. Dabija, *Chem. Eng. Res. Des.*, **88**, 2010, 1450.
- [19] D.R. Lide, "CRC Handbook of Chemistry and Physics", CRC press, 2004.
- [20] D. Skoog, D. West, F.L. Holler, "Fundamentals of Analytical Chemistry", Cengage Learning, 2013.
- [21] A. Myerson, "Handbook of Industrial Crystallization", Butterworth-Heinemann, 2002.
- [22] J. Shi, Ph.D Thesis, Ohio State University, 2002.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نانوذرات پتاسیم کلراید با روش کریستالیزاسیون القایی تولید شدند. با استفاده از روش معرفی شده می‌توان نانوذرات معدنی دیگری نیز تولید کرد. همچنین زمان القای تشکیل نانوذرات در غلظت‌های متفاوت PVP به منظور تشخیص مکانیسم هسته‌زایی و تعیین پارامترهای هسته‌زایی، اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دهنده این مطلب است که در شرایط این پژوهش، با افزایش غلظت PVP در محیط، مکانیسم هسته‌زایی تغییر نخواهد کرد و کشش سطحی نانوذرات تشکیل شده افزایش می‌یابد. همچنین آنالیز SEM و DLS تشکیل نانوذرات پتاسیم کلراید را تایید می‌کند و نشان می‌دهند که PVP عملکرد مطلوبی در پایدارسازی نانوذرات پتاسیم کلراید دارد.

مراجع

- [1] M. Hosokawa, K. Nogi, T. Yokoyama, "Nanoparticle Technology Handbook", Amsterdam, Elsevier, 2007.
- [2] M. Iijima, H. Kamiya, *Kona Powder and Particle*, **27**, 2009, 119.