

اثر نانوذرات مثلثی نقره بر سرعت تشکیل هیدرات متان

محبوبه رحمتی آبکنار^۱، مهرداد منطقیان^{۲*}، حسن پهلوانزاده^۲، ابولفضل محمدی^۱، سیده فرزانه بشارت^۲

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، تهران- بزرگراه جلال آل احمد- پل نصر- دانشگاه تربیت مدرس- دانشکده مهندسی شیمی
^۲ استاد دانشگاه، تهران- بزرگراه جلال آل احمد- پل نصر- دانشگاه تربیت مدرس- دانشکده مهندسی شیمی
^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، تهران- بزرگراه جلال آل احمد- پل نصر- دانشگاه تربیت مدرس- دانشکده فنی و مهندسی

چکیده

در انتقال گاز طبیعی از طریق هیدرات‌های گازی در صنعت دو مانع اساسی وجود دارد که یکی بالا بودن زمان تشکیل هیدرات و دیگری پایین بودن حجم گاز به دام افتاده در بلورهای هیدرات است. به تازگی محققین برای بهبود سرعت تشکیل و همچنین افزایش نسبت گاز به آب در هیدرات‌های گازی به استفاده از نانوذرات روی آورده‌اند. در این تحقیق از نانوذرات فلز نقره استفاده شده است که به روش کاهش شیمیایی سنتز شده‌اند. به منظور بررسی اثر نانوذرات سنتز شده بر سرعت تشکیل هیدرات‌های متان، آزمایش‌هایی در فشار ۴۷ بار و در دمای ۲°C انجام شده‌اند. در این فشار غلظت‌های مختلفی از سوسپانسیون نانوذرات نقره محتوی اشکال مثلثی با ثابت نگه داشتن حجم محلول نهایی به سیستم تزریق شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که زمان تشکیل هیدرات‌های متان در حضور نانوذرات نقره در شرایط دمایی و فشاری یکسان، نسبت به حالتی که تنها آب خالص در سیستم حضور داشته باشد، برای آزمایش‌های با فشار اولیه ۴۷ بار حدود ۹۷٪ کاهش یافته است.

کلمات کلیدی

هیدرات، متان، نانوذرات مثلثی نقره.

نکات برجسته پژوهش

- در حضور نانوذرات مثلثی نقره سرعت تشکیل هیدرات متان افزایش می‌یابد.
- زمان القای تشکیل هیدرات متان در حضور نانوذرات مثلثی نقره در حدود ۹۷٪ کاهش یافته است.
- با افزایش غلظت نانوذرات، زمان القا ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

یکی از روش‌های نگهداری و انتقال گاز طبیعی، استفاده از هیدرات‌های گازی است. امروزه توجه به تولید هیدرات‌های گازی در صنعت بیشتر از پیش باشد. فشار بالا و سرعت پایین تشکیل هیدرات از مشکلاتی است که صنعتی شدن این فرایند را با مشکل مواجه کرده است. به عبارتی مسئله‌ی اصلی در تشکیل هیدرات این است که چگونه می‌توان میزان انتقال حرارت و انتقال جرم گاز- مایع را افزایش داد [۱]. برای رفع این مشکلات تحقیقات گسترده‌ای صورت یافته است. برخی از محققان گزارش داده‌اند که استفاده از افزودنی‌ها به عنوان تسهیل کننده‌ی تشکیل هیدرات‌های گازی می‌تواند مفید باشد [۲]. تاکنون مواد مختلفی، از جمله مواد فعال سطحی، به عنوان این بهبود دهنده‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳ و ۴]. استفاده از این مواد باعث کاهش زمان القا و همچنین افزایش نرخ رشد هیدرات‌های گازی می‌شود. از روش‌های دیگری که برای سرعت بخشیدن به تشکیل هیدرات‌های گازی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، می‌توان به ایجاد اختلاط [۵] و استفاده از میدان‌های مغناطیسی [۶] اشاره نمود. تمامی این روش‌ها اثرات قابل ملاحظه‌ای در تسهیل تشکیل هیدرات‌ها دارند.

تعداد کارهایی که به اثر نانوذرات بر روی تشکیل هیدرات‌های گازی پرداخته شده است بسیار کم و محدود می‌باشد. برای نخستین بار در سال ۲۰۰۶ میلادی از نانوذرات مس به عنوان تسهیل کننده‌ی تشکیل هیدرات‌های گازی یک گاز مبرد استفاده شده است [۷]. بعد از آن در سال ۲۰۱۰ میلادی برای تسهیل تشکیل هیدرات‌های متان از نانولوله‌های کربنی استفاده شده است [۸]. با توجه به خواص حرارتی نانوذرات و همچنین مساحت سطح بالای آن‌ها، لزوم بررسی اثر این ذرات بر روی تشکیل هیدرات‌های گازی احساس می‌گردد. یکی دیگر از نانوذراتی که برای تشکیل هیدرات متان مورد بررسی قرار گرفته است نانوذرات نقره می‌باشد که سنتز آن نسبت به نانولوله‌های کربنی ساده‌تر می‌باشد [۱]. فلز نقره در جدول تناوبی عنصرها بالاترین ضریب انتقال حرارت را داراست. در این کار سعی شده است از روشی برای سنتز نانوذرات استفاده شود که شکل غالب نانوذرات در سوسپانسیون ایجاد شده مثلثی باشد. علت انتخاب این شکل افزایش احتمالی میزان انتقال حرارت به علت داشتن گوشه می‌باشد که پیش‌بینی می‌شود اثر تسهیل کنندگی بیشتری بر روی تشکیل هیدرات‌های گازی متان بگذارد.

۲- بررسی اثر نانوذرات مثلثی نقره در تشکیل هیدرات‌های متان

۲-۱- سنتز نانوذرات مثلثی نقره

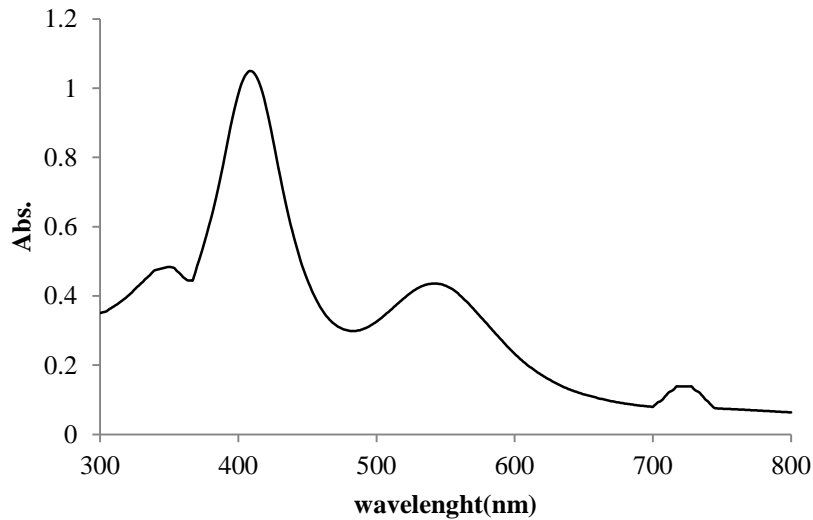
برای سنتز نانوذرات مثلثی شکل نقره از روش کاهش شیمیایی که توسط قادر و همکاران [۹] ارائه گشته، استفاده شده است. برای سنتز نانوذرات نقره ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول نیترات نقره ۰/۱ میلی‌مولار به همراه ۵ میلی‌لیتر محلول ۳۴ میلی‌مولار سیترات سدیم با سرعت ثابت هم زده می‌شود و در ادامه ۵ میلی‌لیتر محلول هیدرازین ۲ میلی‌مولار قطره قطره به آن اضافه می‌گردد، بعد از چند دقیقه محلول به زردی می‌گراید که ناشی از تشکیل نانوذرات کروی نقره در محلول می‌باشد با ادامه‌ی هم‌زدن رنگ سبز در محلول ایجاد می‌شود که با گذشت دقایقی، رنگ سبز غالب می‌گردد که نشان دهنده‌ی تولید نانوذرات مثلثی شکل می‌باشد. نانوذرات تولیدی بسیار پایدار هستند و تا هفته‌ها هیچ رسوبی از آن تشکیل نمی‌گردد. در سوسپانسیون ایجاد شده علاوه بر ذرات مثلثی، ذرات کروی نیز وجود دارد. برای کاهش ذرات کروی سوسپانسیون حاصل به مدت ۲۰ دقیقه با دور ۶۰۰۰ rpm سانتریفیوژ می‌گردد. نانو مثلث‌ها در ته ظرف جمع می‌شوند و پس از افزودن آب مقطر به صورت معلق در می‌آیند. نمونه‌ی به دست آمده سوسپانسیون اصلی برای انجام ادامه‌ی آزمایش‌ها می‌باشد و آزمون‌های SEM و UV-vis بر روی این نمونه انجام یافته است.

نانوذرات نقره در آنالیز UV-vis دارای قله‌های متفاوتی هستند. به عنوان مثال نانوذرات کروی نقره دارای یک قله^۱ [۱۰ و ۱۱] و نانوذرات استوانه‌ای^۲ نقره دارای دو قله‌ی اصلی و یک قله‌ی کوچک [۱۲] در طیف جذب هستند. در طیف جذب

^۱ Peak

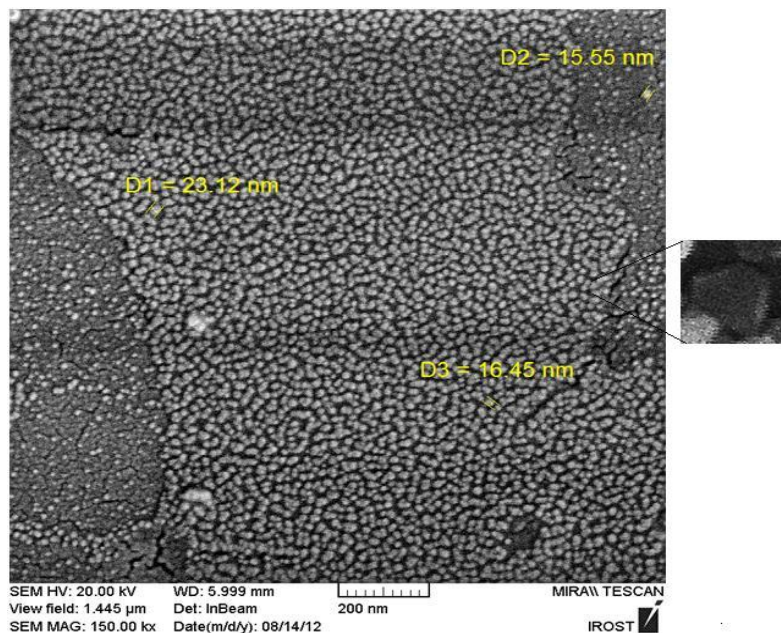
^۲ Nanorod

نانوذرات مثلثی چهار قله وجود دارد که در اثر تشدید الکترون‌های نانوذره با نوری که بر آن تابیده می‌شود، حاصل می‌گردد. -
شکل ۱ طیف جذب نانوذرات مثلثی نقره را نشان می‌دهد. در طیف جذب چهار قله در ۳۵۶ nm، ۴۰۴ nm، ۵۳۰ nm و ۷۱۰ nm مشاهده می‌شود که منطبق با نتایج کارهای دیگران می‌باشد [۱۲].



شکل ۱: طیف جذب UV-vis نانوذرات مثلثی نقره.

در شکل ۲ نمونه‌ای از عکس SEM نانوذرات تولید شده نشان داده شده است. میانگین اندازه‌ی نانوذرات سنتز شده با استفاده از نرم‌افزار Image J، ۲۰ نانومتر بدست آمده است.



شکل ۲: عکس SEM از نانوذرات سنتز شده.

۲-۲- آزمایش‌های تشکیل هیدرات‌های متان

به منظور انجام آزمایش‌ها از یک راکتور ژاکت‌دار از جنس فولاد ضد زنگ به حجم داخلی 460 cm^3 استفاده شده است. محفظه‌ی داخلی این راکتور مجهز به دو شیر سوزنی با تحمل فشار 6000 Psi جهت تزریق و تخلیه آب و گاز می‌باشد. در جدار خارجی نیز دو منفذ برای ورود و خروج ماده‌ی سرد کننده تعبیه شده است. در این آزمایش‌ها از الکل صنعتی بعنوان ماده خنک کننده استفاده شده است. به منظور افزایش ضریب انتقال جرم و نفوذ گاز درون آب، دستگاه به گونه‌ای طراحی شده که جریان مایع درون سل^۳ مانند لایه‌ی ریزان باشد. برای این منظور با استفاده از یک الکتروموتور، چندین اهرم و بلبرینگ حرکت نوسانی راکتور (الکلنگی) فراهم می‌شود. حرکت راکتور باعث می‌شود تا فازهایی که در راکتور می‌توانند حضور داشته باشند (هیدرات، آب مایع و گاز) همواره با هم در تماس باشند که این مسئله برای انجام صحیح آزمایش‌ها ضروری می‌باشد. برای شروع هر آزمایش ابتدا راکتور با آب مقطر شسته می‌شود. برای تخلیه‌ی هوای درون راکتور از پمپ خلاء استفاده می‌شود. سپس آب مقطر و یا سوسپانسیون نانوذرات به راکتور تزریق می‌گردد. بعد از آن حمام دما روشن شده تا دمای راکتور به مقدار مورد نظر برسد. در این مرحله گاز متان به راکتور تولید هیدرات تزریق می‌شود تا فشار به مقدار مطلوب برسد. الکتروموتور روشن شده تا گاز و آب برای تولید هیدرات به خوبی مخلوط شوند. تشکیل هیدرات را با کاهش فشار می‌توان پیش‌بینی نمود. همچنین به دلیل گرمازا بودن تشکیل هیدرات در زمان تشکیل هیدرات اندکی افزایش دما در داخل راکتور مشاهده خواهد شد.

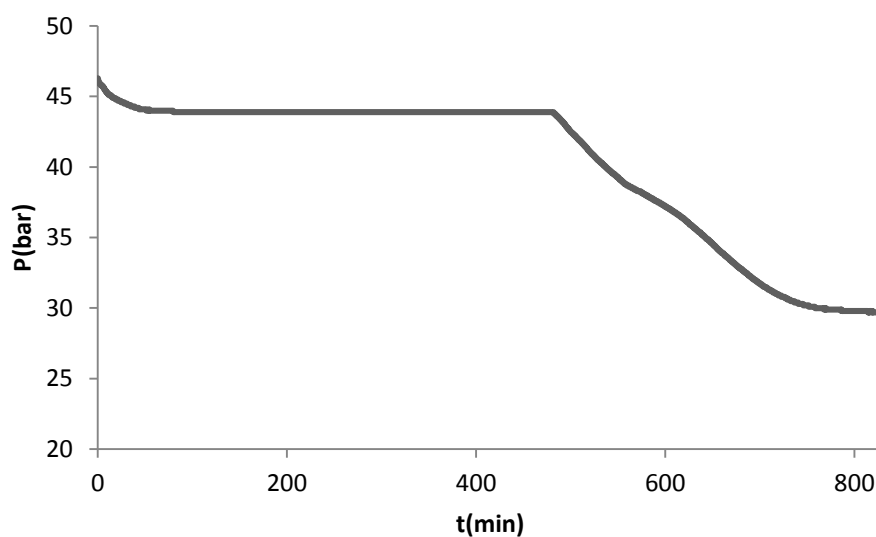
بعد از آنکه تغییرات فشار داخل راکتور با زمان بسیار ناچیز بود، در حدود $0/5$ بار به ازای هر ساعت، فرض می‌شود که تشکیل هیدرات پایان یافته است.

۱-۲-۲- بحث و نتایج

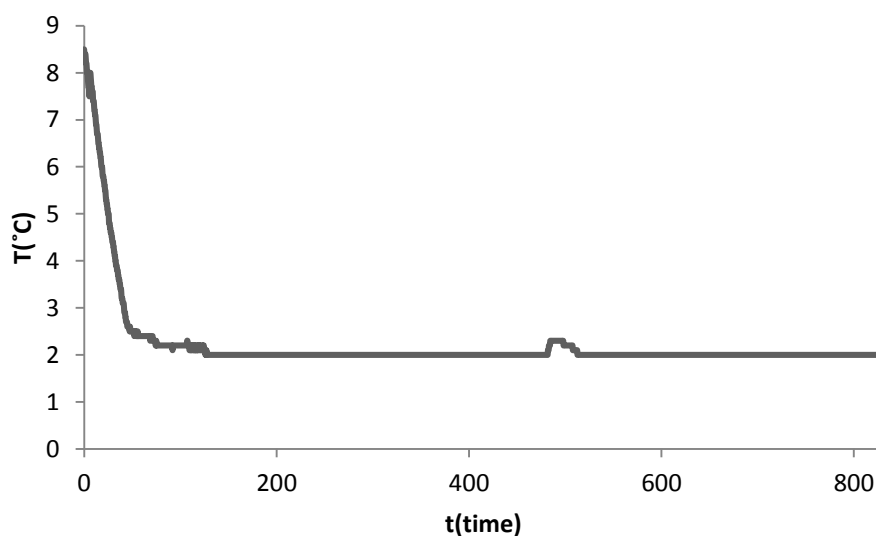
برای بررسی سرعت تشکیل هیدرات تمام آزمایش‌ها بر مبنای 100 میلی‌لیتر مایع انجام یافته است که غلظت سوسپانسیون در آن متفاوت می‌باشد. برای بررسی اثر حضور نانوذرات ابتدا آزمایش با 100 میلی‌لیتر آب مقطر بدون حضور نانوذرات انجام یافته است. ابتدا 100 میلی‌لیتر آب مقطر درون سل تشکیل هیدرات تزریق می‌گردد. سپس گاز متان با درجه خلوص $99/99$ به راکتور تزریق می‌شود تا فشار سل به 47 بار برسد. دمای سل روی 2 درجه سانتی‌گراد و دور الکتروموتور روی 25 rpm تنظیم شده است.

با روشن شدن الکتروموتور به طور همزمان ثبت دما و فشار درون راکتور هر 10 ثانیه یک بار به کمک نرم‌افزاری مناسب بر روی کامپیوتر شروع می‌شود. نتایج این آزمایش در شکل ۳ و ۴ آورده شده است.

زمان القا در تشکیل هیدرات به صورت تجربی از بررسی نمودارهای فشار بر حسب زمان و دما بر حسب زمان به دست می‌آید. زمانی که گاز به سامانه‌ی تشکیل هیدرات تزریق می‌گردد، اندکی افت فشار و دما مشاهده می‌شود که به علت سرمای شدن گاز درون راکتور و حل شدن مقداری از گاز درون آب و یا سوسپانسیون است. کاهش دما تا جایی مشاهده می‌شود که دمای سامانه به دمای مایع خنک کننده که در اینجا 2°C است برسد. بعد از آن فشار و دما مدتی ثابت می‌ماند که این مدت زمان به عنوان زمان القا در نظر گرفته می‌شود. فرایند تشکیل هیدرات گرمازا می‌باشد در نتیجه در پایان زمان القا و آغاز رشد هیدرات اندکی افزایش دما در سامانه مشاهده می‌گردد که با توجه به حضور مایع خنک کننده در جداره‌ی راکتور، دمای سامانه دوباره به دمای 2°C باز می‌گردد. همان طور که از دو نمودار مشخص است در پنجاه دقیقه‌ی آغازی پس از تزریق گاز در حدود دو بار کاهش فشار در سامانه مشاهده می‌شود که به علت حل شدن گاز درون آب می‌باشد. سپس به مدت 402 دقیقه فشار ثابت می‌ماند که این زمان به عنوان زمان القا تعبیر می‌گردد. بعد از آن رشد هیدرات آغاز می‌گردد که با مصرف گاز همراه می‌باشد و کاهش فشار در سامانه مشاهده می‌شود. این کاهش فشار تا رسیدن به تعادل در سامانه ادامه می‌یابد و بعد از آن دوباره فشار ثابت می‌ماند و فرایند تشکیل و رشد هیدرات متوقف می‌گردد.



شکل ۳: نمودار فشار- زمان هیدرات متان در فشار اولیه ۴۷ بار و دمای ۲ درجه سانتی‌گراد و در حضور ۱۰۰ میلی‌لیتر آب خالص.



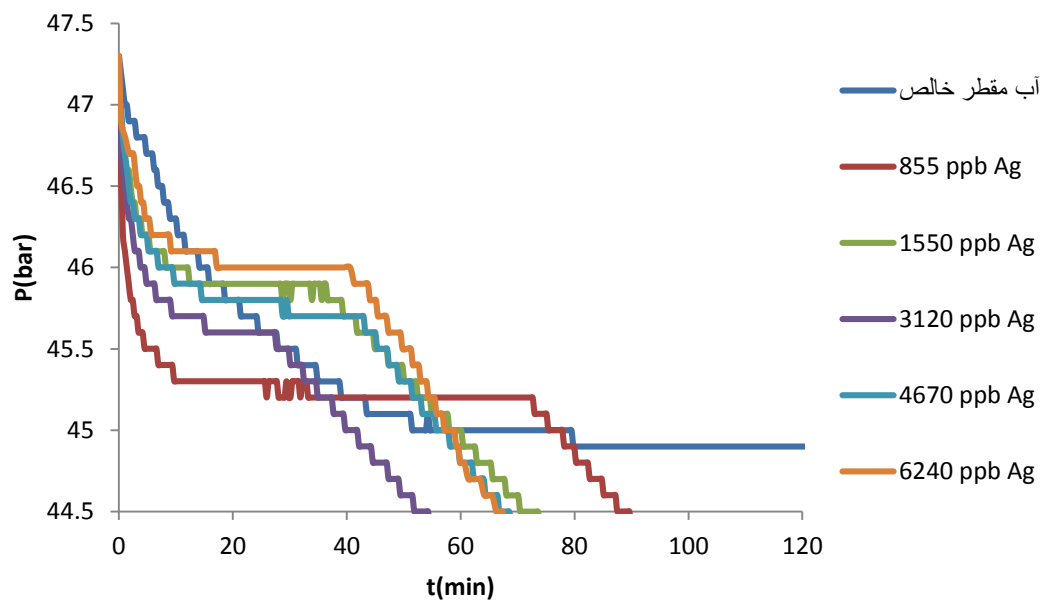
شکل ۴: نمودار دما- زمان تشکیل هیدرات متان در فشار ۴۷ بار و دمای ۱ درجه سانتی‌گراد و در حضور ۱۰۰ میلی‌لیتر آب خالص.

برای آزمایش‌های مربوط به تعیین زمان القا از سوسپانسیون‌های با غلظت‌های مختلفی از نانوذرات نقره استفاده شده است. نحوه‌ی آماده‌سازی سوسپانسیون‌های نانوذرات به صورت حجمی بوده که در جدول ۱ آمده است. در شکل ۵ نمودارهای زمان القا برای مقادیر مختلف نانوذرات نقره در فشار اولیه‌ی ۴۷ بار و دمای ۲ درجه سانتی‌گراد آورده شده است. مشاهده می‌شود که زمان القا در حضور آب خالص از حالت‌های دیگر که در حضور سوسپانسیونی از نانوذرات نقره رخ می‌دهد، بیشتر می‌شود.

باشد. با اضافه شدن نانوذرات سرعت هسته‌زایی و تشکیل هیدرات افزایش می‌یابد. در جدول ۲ زمان القای مربوط به غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره آورده شده است.

جدول ۱: میزان نقره‌ی موجود در آزمایش‌های مربوط به زمان القا.

میزان سوسپانسیون نانوذرات نقره (ml)	میزان آب مقطر افزوده شده (ml)	غلظت سوسپانسیون نهایی (ppb)
۰	۱۰۰	۰
۵	۹۵	۸۵۵
۱۰	۹۰	۱۵۵۰
۲۰	۸۰	۳۱۲۰
۳۰	۷۰	۴۶۷۰
۴۰	۶۰	۶۲۴۰



شکل ۵: مقایسه زمان القا در فشار اولیه ۴۷ بار و دمای ۲ درجه سانتی‌گراد در حضور مقادیر مختلف نانوذرات.

جدول ۲: زمان القای تشکیل هیدرات متان در غلظت‌های مختلف سوسپانسیون نانوذرات نقره محتوی اشکال مثلثی در آزمایش‌های با فشار اولیه‌ی ۴۷ بار و دمای ۲ درجه سانتی‌گراد.

شماره‌ی آزمایش	غلظت سوسپانسیون نانوذرات نقره (ppb)	زمان القای تشکیل هیدرات متان (min)
۱-۱	۰	۴۰۲
۲-۱	۸۵۵	۳۹/۴
۳-۱	۱۵۵۰	۲۱/۵
۴-۱	۳۱۲۰	۱۲/۲
۵-۱	۴۶۷۰	۱۴
۶-۱	۶۲۴۰	۲۱/۷

مشاهده می‌شود که حضور نانوذرات نقره موجب کاهش قابل ملاحظه‌ی زمان القا در سامانه می‌شود. حضور نانوذرات نقره به دلایل زیر موجب تسهیل تشکیل هیدرات‌های متان می‌شود:

- این نانوذرات فلزی آب را به نانوسیالی با ضریب انتقال حرارت بسیار بالا تبدیل می‌کنند. در کار مشابه [۱] که با استفاده از نانوذرات کروی نقره در فشار اولیه‌ی ۴۷ بار انجام شده نیز کاهش زمان القا مشاهده می‌گردد اما این کاهش در حضور نانوذرات مثلثی نقره بیشتر می‌باشد. با توجه به شکل این نانوذرات انتقال حرارت به علت وجود گوشه در این حالت راحت‌تر و سریع‌تر اتفاق می‌افتد. این موضوع از این جهت اهمیت می‌یابد که پدیده‌ی جوانه‌زنی هیدرات‌های گازی (هسته‌زایی) و از جمله هیدرات‌های متان گرم‌است. در این شرایط هر چه بهتر گرمای آزاد شده در سیستم پخش شود، شرایط برای ادامه‌ی فرآیند جوانه‌زنی بهتر فراهم خواهد شد. در واقع هنگامی که گرمای آزاد شده سریع‌تر در سیستم پخش می‌شود، مایع خنک کننده‌ی موجود در دیواره‌ی راکتور نیز سریع‌تر می‌تواند دما را پایین آورده و دوباره شرایط را برای جوانه زنی فراهم آورد.
 - نانوذرات نقره خود به عنوان محل‌های مناسب جدیدی جهت جوانه‌زنی ناهمگن هیدرات‌های متان عمل می‌کنند. جوانه‌زنی هیدرات‌های گازی به صورت ناهمگن کار بسیار کم‌تری نسبت به جوانه زنی همگن نیاز دارد [۱۳]. به همین دلیل در محلول حاوی نانوذرات نقره جوانه‌زنی راحت‌تر صورت می‌پذیرد. در نتیجه زمان لازم برای جوانه‌زنی هیدرات‌های متان یا همان زمان القا کاهش خواهد یافت.
 - نسبت سطح به حجم ذرات در مقیاس نانو به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در نتیجه در فصل مشترک آب/گاز، سطح در دسترس گاز، که همان سطح انتقال جرم می‌باشد، بسیار افزایش خواهد یافت. این امر موجب می‌شود تا میزان انتقال جرم از فاز گاز به آب به شدت افزایش یابد که این موضوع نه تنها می‌تواند زمان القای تشکیل هیدرات‌های متان را کاهش دهد، بلکه حجم گاز به دام افتاده در کریستال‌های هیدرات را هم افزایش خواهد داد. در واقع هنگامی که مقدار بیشتری از گاز به درون آب نفوذ کند احتمال تشکیل جوانه‌های هیدرات‌های آن گاز نیز بالا می‌رود.
- دلایل بالا به خوبی آن‌چه را که در حضور نانوذرات نقره در راکتور تشکیل هیدرات‌های متان رخ می‌دهد، توضیح می‌دهند. اما به طور قطع نمیتوان اثر تسهیل کنندگی حضور نانوذرات نقره‌ی محتوی اشکال مثلثی را محدود به این موارد دانست. همان‌طور که از نتایج آزمایش‌ها مشخص است، روند کاهش اولیه‌ی زمان القا و سپس افزایش آن در غلظت‌های مختلف سوسپانسیون نانوذرات نقره مشاهده می‌شود. با افزایش غلظت نانوذرات سنتز شده پس از مقدار بهینه، شرایط برای به هم پیوستن نانوذرات نقره فراهم‌تر است. به عبارت بهتر در غلظت‌های بالاتر تعداد ذرات موجود در محیط بیشتر بوده و در نتیجه احتمال برخورد آن‌ها با یکدیگر و به هم پیوستنشان بالا می‌رود. در چنین شرایطی انتظار می‌رود که ذرات کلوخه شده و از اثر تسهیل کنندگی آن‌ها در تشکیل هیدرات‌های متان کاسته شود. کلوخه شدن ذرات بر هر سه عاملی که در ابتدا به عنوان دلایل تسهیل کنندگی نانوذرات نقره برشمرده شد، اثر منفی می‌گذارد. در واقع ذرات درشت‌تر نقره سیالی با هدایت حرارتی پایین‌تر پدید می‌آورند. از سوی دیگر با کلوخه شدن ذرات، مکان‌های جوانه‌زنی کمتری جهت جوانه‌زنی ناهمگن هیدرات‌های متان در دسترس خواهد بود. علاوه بر این با افزایش اندازه ذرات نسبت سطح به حجم آن‌ها کاهش می‌یابد. به همین دلیل نه تنها دیگر نمی‌توانند سطح انتقال جرم را افزایش دهند بلکه حتی در غلظت‌های بالا به عنوان سدی در برابر انتقال گاز به آب عمل می‌کنند. در چنین شرایطی مقدار گاز کمتری نسبت به غلظت‌های پایین‌تر وارد آب شده و احتمال تشکیل جوانه‌های هیدرات‌های متان پایین می‌آید. بدین ترتیب زمان القای تشکیل هیدرات‌های متان نیز افزایش می‌یابد. کاهش نسبت سطح به حجم ذرات موجب کاهش میزان سطح در دسترس برای جوانه‌زنی هیدرات‌های متان نیز می‌شود.

۳- نتیجه گیری

افزودن نانوذرات نقره محتوی اشکال مثلثی به رآکتور موجب کاهش زمان القای هیدرات‌های متان شده است؛ به طوری که در گروه آزمایش‌هایی که در فشار اولیه‌ی ۴۷ بار آغاز شده اند در حضور سوسپانسیون ۳۱۲۰ ppb نانوذره، این متغیر نسبت به حالتی که تنها آب مقطر خالص حضور دارد، در حدود ۹۷٪ کاهش یافته است. همچنین با افزایش غلظت نانوذرات در محیط ابتدا زمان القا کاهش می‌یابد اما از مقداری به بعد دیگر این متغیر نه تنها کاهش نمی‌یابد بلکه افزایش پیدا می‌کند. البته باز هم مقدار زمان القا بسیار کم‌تر از مقدار آن در حضور آب خالص می‌باشد.

مراجع

- [۱] صمد، ارژنگ، منطقیان، مهرداد، میردامادی، محسن، موسوی صفوی، سید محمود، محمدی، ابولفضل، "اثر نانوسیالات حاوی نانوذرات نقره در تسهیل تشکیل هیدرات‌های متان"، اولین همایش ملی هیدرات‌های گازی ایران، ۲۸ و ۲۹ اردیبهشت ۹۰.
- [2] Zhong Y, Rogers RE. "Surfactant effects on gas hydrate formation". Chemical Engineering Science.2000;55(19):4175-87.
- [3] Ganji H, Manteghian M, RahimiMofrad H. "Effect of mixed compounds on methane hydrate formation and dissociation rates and storage capacity". Fuel Processing Technology.2007;88(9):891-5.
- [4] Ganji H, Manteghian M, Sadaghianizadeh K, Omidkhah MR, RahimiMofrad H. "Effect of different surfactants on methane hydrate formation rate, stability and storage capacity". Fuel.2007;86(3):434-41.
- [5] Englezos P, Kalogerakis N, Dholabhai PD, Bishnoi PR. "Kinetics of formation of methane and ethane gas hydrates". Chemical Engineering Science. 1987;42(11):2647-58.
- [6] Yong L, Deqing L, Kaihua G, Shuanshi F. "REFRIGERANT GAS HYDRATE GROWTH UNDER INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD". CIESC Journal. 2002 2010-07-29;53(11):1103-4.
- [7] Li J, Liang D, Guo K, Wang R, Fan S. "Formation and dissociation of HFC134a gas hydrate in nano-copper suspension". Energy Conversion and Management. 2006;47(2):201-10.
- [8] Park S-S, Lee S-B, Kim N-J. "Effect of multi-walled carbon nanotubes on methane hydrate formation". Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2010;16(4):551-5.
- [9] Manteghian M, Ghader S, Kokabi M, Sarraf Mamoozy R. "Preparation of truncated triangular silver nanoparticles by a simple and rapid method in aqueous solution". Polish Journal of Chemistry, 2007; (81)1555-1565.
- [10] Aswathy B, Avadhani GS, Sumithra IS, Suji S, Sony G. "Microwave assisted synthesis and UV-Vis spectroscopic studies of silver nanoparticles synthesized using vanillin as a reducing agent". Journal of Molecular Liquids. 2011;159(2):165-9.
- [11] Sun Y, Xia Y. "Triangular Nanoplates of Silver: Synthesis, Characterization, and Use as Sacrificial Templates For Generating Triangular Nanorings of Gold". Advanced Materials.2003;15(9):695-9.
- [۱۲] Deivaraj TC, Lala NL, Lee JY. "Solvent-induced shape evolution of PVP protected spherical silver nanoparticles into triangular nanoplates and nanorods". Journal of Colloid and Interface Science.2005;289(2):402-9.
- [13] Kashchiev D, Firoozabadi A. "Induction time in crystallization of gas hydrates". Journal of Crystal Growth. 2003;250(3-4):499-515.