

تولید پیوسته هیدرات با استفاده از استاتیک میکسر

محمد بدیعی جوان^۱، فرشاد ورامینیان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز- دانشگاه سمنان

۲- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز- دانشگاه سمنان

چکیده

استفاده از همزن مشکلاتی در سیستم تشکیل هیدرات بوجود می آورد، که از جمله می توان به آب بندی، مصرف انرژی بالا، استهلاک زیاد و ... اشاره کرد. در هنگام تولید صنعتی هیدرات این مشکلات چندین برابر می شود پس به دنبال جایگزینی برای آن هستند تا هم عمل اختلاط را کامل انجام دهد و هم مشکلات همزن را نداشته باشد. یک راه استفاده از استاتیک میکسر است. در این تحقیق به بررسی استفاده از استاتیک میکسر در سیستم تشکیل هیدرات پرداخته شده است. استاتیک میکسر دارای مزایایی از جمله مصرف انرژی پایین، امکان ایجاد سیستم پیوسته تولید هیدرات، انعطاف پذیری بالا و ... اشاره کرد.

کلمات کلیدی

استاتیک میکسر، راکتور همزن دار، تشکیل هیدرات گازی

نکات برجسته پژوهش

- کم کردن مشکلات تولید هیدرات و به حداقل رساندن مصرف انرژی در این فرایند
- معرفی استاتیک میکسر به عنوان جایگزین برای همزن در فرایندهای مختلف از جمله فرایند تولید هیدرات
- امکان ایجاد سیستم پیوسته تولید هیدرات در مقیاس آزمایشگاهی

۱- مقدمه

استاتیک میکسر یک وسیله برای اختلاط دو سیال است. استاتیک میکسر برای اختلاط گازها، پراکنده کردن گاز در مایع یا مایعات مخلوط نشدنی استفاده می شود. این وسیله شامل اجزا های اختلاط در داخل یک لوله استوانه ای یا مربعی است که می توانند قطری از ۶ میلیمتر تا ۶ متر داشته باشند. اجزا های استاتیک میکسر شامل یک سری تیغه است که از فلز یا انواع پلاستیک ساخته می شود. همین طور، محفظه میکسر نیز می تواند از پلاستیک یا فلز ساخته شود. موادی که برای ساختار استاتیک میکسر استفاده می شود شامل پلی پروپیلن، تفلون و پلی استات است [۱].

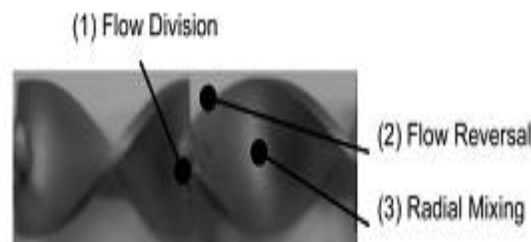
جریان مواد درون میکسر حرکت می کند و با عبور از اجزا های ثابت، به صورت پیوسته مخلوط می شود. اختلاط کامل به خیلی از عوامل همچون خواص جریان، قطر داخلی لوله، تعداد اجزا ها و طراحی آن ها و... وابسته است. استاتیک میکسر اولین بار در ۲۹ نوامبر ۱۹۶۵ توسط شرکت Arthur D. Little به عنوان یک وسیله مخلوط کننده، اختراع شد [۱].

یک استاتیک میکسر به صورت همزمان می تواند سه الگوی جریان، تقسیم جریان و اختلاط شعاعی و جریان برگشتی را تولید کند [۱].

تقسیم جریان: در جریان آرام، جریان ها با برخورد به لبه جلویی هر اجزا میکسر تقسیم می شوند و کانال هایی به وسیله شکل اجزا ها به وجود می آید. هر اجزا بعدی، جریان را به دو کانال بیشتر تقسیم می کند، در نتیجه در یک آزمایش جریان لایه ای بیشتری وجود می آید.

اختلاط شعاعی: هم در جریان آرام و هم مخشوش، دوران چرخشی یک سیال اطراف مرکز هیدرولیکی خودش در هر کانال میکسر باعث اختلاط شعاعی می شود. این نوع اختلاط گرادیان شعاعی در دما، سرعت و ترکیب مواد کاهش می یابد. جریان برگشتی: هم در جریان آرام و هم مخشوش، با برخورد جریان به نقطه تماس بین اجزا ها، جهت جریان معکوس می شود.

امروزه استاتیک میکسر کاربردهای وسیعی پیدا کرده است. یک کاربرد عمومی برای استاتیک میکسر شامل اختلاط دو ماده چسبنده است. دیگر کاربردها شامل تصفیه فاضلاب و فرآیندهای شیمیایی می شود. استاتیک میکسر ها می تواند در پالایشگاه نفت یا گاز استفاده شود. به عنوان مثال برای نمک زدایی نفت خام در استاتیک میکسر تولید پلیمر می تواند برای واکنش های پلیمراسیون یا برای اختلاط اضافه کننده های مایع استفاده کرد [۱].

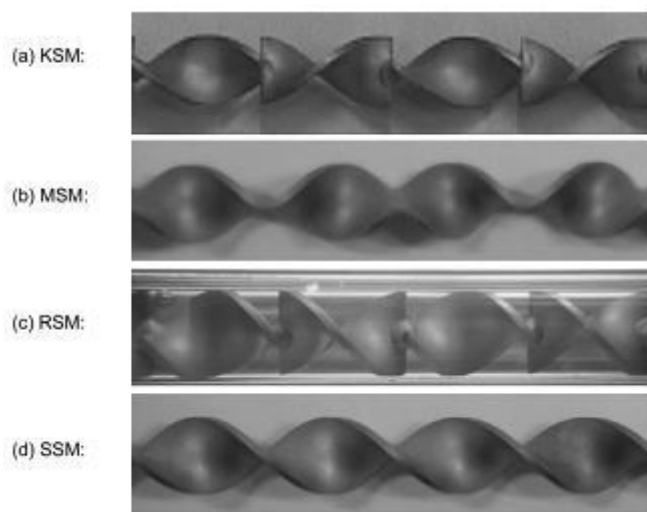


شکل ۱: نمایی نزدیک از اجزا های استاتیک میکسر [۱]

۲- کارهای انجام شده در این زمینه

۱-۲- تاثیر طراحی اجزاها بر سرعت تشکیل هیدرات

تاجیما و همکاران بر روی تاثیر شکل و هندسه اجزا های استاتیک میکسر در تولید هیدرات به مطالعه پرداخته اند. آنها در این پژوهش چهار استاتیک میکسر با هندسه متفاوت استفاده کرده اند که طراحی و ساخت آنها را برای فشار بالا در شرکت Noritake انجام شده است. همه ی میکسرها دارای ۲۴ اجزا مخلوط کننده با نسبت تناسب طول به قطر ۱/۵ هستند. قطر خارجی هر اجزا مخلوط کننده ۱۰/۶ میلی متر است که در شکل ۲ نشان داده شده اند [۲].



شکل ۲: شکل استاتیک میکسرها [۲]

قاعده کلی مخلوط کردن استاتیک میکسرها شامل سه عملکرد مخلوطی است: تقسیم جریان، جریان برگشتی و جریان شعاعی. یک جریان سیال که به داخل میکسر می رود، در جلوی اجزا های مخلوط کننده تقسیم می شود (تقسیم جریان). وقتی جریان از اجزاها عبور کرد، سیال به وسیله یک چرخش شعاعی در داخل اجزا های مخلوط کننده مخلوط می شود (جریان شعاعی). جهت جریان در نقطه تماس بین اجزاها معکوس می شود (جریان برگشتی). یک استاتیک میکسر خوب همه ی این سه نوع را فراهم می کند.

از طرف دیگر، استاتیک میکسرهای اصلاح شده که حداقل یکی از سه مورد مخلوط کردنی که در بالا توضیح داده شد را ندارد که به صورت خلاصه در شکل ۳ آمده است.

functions	flow division	flow reversal	radial mixing
image of the section of the flow			
KSM	yes	yes	yes
MSM	no	yes	yes
RSM	yes	no	yes
SSM	no	no	yes

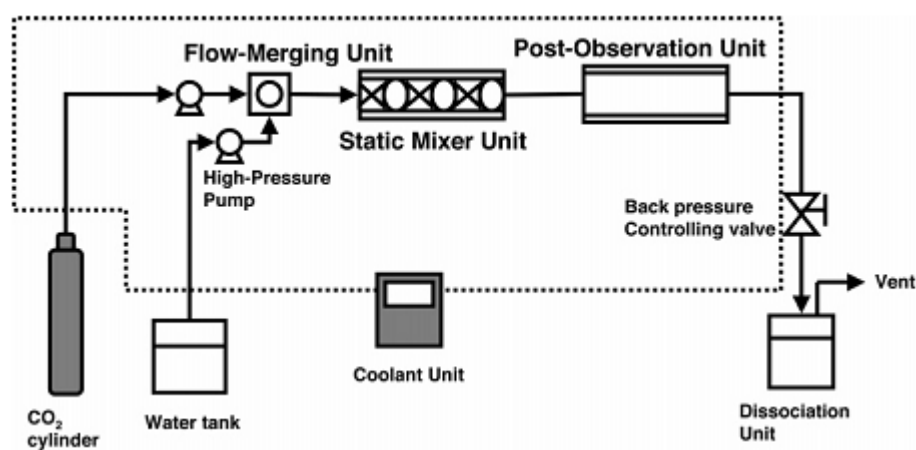
شکل ۳: نوع جریان در استاتیک میکسرها [۲]

استاتیک میکسر نوع M (MSM) با دونوع اجزا مخلوط کننده با زاویه صفر درجه به هم وصل شده اند. پس تقسیم جریان در این نوع وجود ندارد.

استاتیک میکسر نوع R (RSM)، استاتیک میکسری است که همه ی اجزا های مخلوط کننده ی آن با زاویه ۱۸۰ درجه به سمت راست پیچ خوردگی دارد و در نتیجه جریان برگشتی در نقطه تماس بین اجزا ها وجود ندارد و به عبارتی جریان برگشتی نداریم.

استاتیک میکسر حلزونی (SSM) استاتیک میکسری است که همه ی اجزا های مخلوط کننده ی آن با زاویه ی صفر درجه به سمت راست پیچ خوردند و در نتیجه جریان برگشتی و تقسیم جریان در آن وجود ندارد.

شکل ۴ سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده برای تولید هیدرات را نشان می دهد. همه ی آزمایش ها هم فشار (۷ مگاپاسکال) و هم دما (۲۷۷ کلوین)، در ناحیه پایدار ترمودینامیکی تشکیل هیدرات CO₂ انجام می شود.



شکل ۴: شماتیک دستگاه آزمایش [۲]

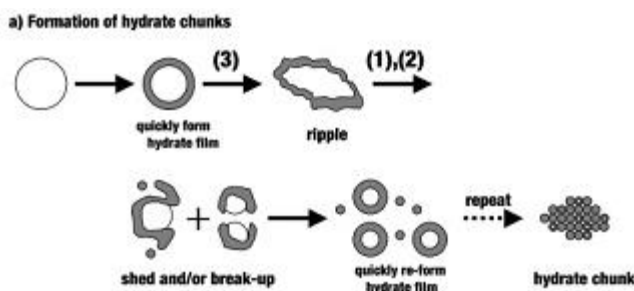
رفتار تشکیل هیدرات و اختلاط به وسیله یک دوربین دیجیتال در واحد مشاهده که بعد از واحد استاتیک میکسر است ضبط شده و عکس های گرفته شده مورد بررسی قرار می گیرد. آنالیزهای اختلاط و رفتارهای تشکیل هیدرات به عنوان تابعی از سرعت جریان CO_2 مایع و آب در چهار استاتیک میکسر بدست آورده و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند که نتایج زیر بدست آمده است.

تقسیم جریان برای تشکیل تکه های بزرگ هیدرات در استاتیک میکسر مهم است اما ضروری نیست. با کمک تابع جریان برگشتی، تکه های بزرگ هیدرات تحت شرایط سرعت پایین تر آب (ناحیه جریان آرام) و سرعت CO_2 بالاتر تشکیل می شود. جریان برگشتی برای از بین بردن لایه هیدرات روی سطح CO_2 مایع لازم است. در نتیجه تکه های هیدرات پراکنده در کنار قطرات کوچک CO_2 مایع می توانند تحت شرایط سرعت بالاتر آب بدست آیند (ناحیه انتقال به سمت ناحیه جریان مغشوش) تنها اختلاط شعاعی ممکن است به اندازه کافی در تشکیل تکه های بزرگ هیدرات یا ذرات تأثیر نداشته باشد اما امکان دارد در تشکیل آن ها به کمک دیگر تابع های جریان بیاید [۲].

با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بالا می توان مکانیسم های تشکیل هیدرات را که در استاتیک میکسر تولید می شود، به صورت زیر بیان کرد.

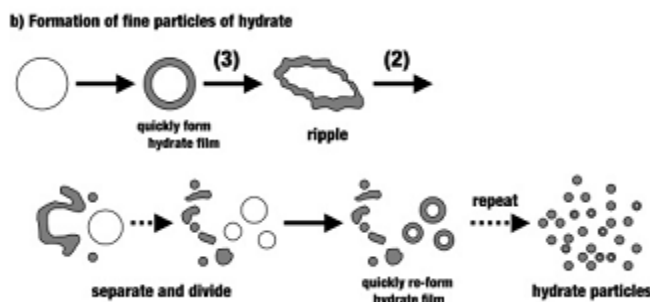
(a) تشکیل تکه های بزرگ هیدرات: تشکیل تکه های بزرگ هیدرات تحت شرایط سرعت بالاتر CO_2 مایع و سرعت پایین تر آب مشاهده شده است. تحت همچنین شرایطی، در یکی از استاتیک میکسرهای مورد مطالعه قطرات CO_2 مایع تجمع یافته نیز تشکیل شده است. وقتی تجمع قطرات CO_2 مایع به قسمت جلوی اجزا های اختلاط KSM یا RSM برخورد می کنند، با توجه به وجود آمدن تابع تقسیم جریان، تجمعات قطرات CO_2 مایع به قطرات کوچکتر تقسیم می شوند. روی سطح قطره های تقسیم شده، یک لایه هیدرات جدید تشکیل می شود. وقتی جریان از داخل میکسر عبور می کند، با توجه به تقسیم جریان در جلوی هر اجزا، تقسیم قطرات و تشکیل لایه های جدید هیدرات روی سطح قطرات پی در پی اتفاق می افتد. در نتیجه اندازه قطرات کاهش می یابد و به تناسب آن هیدرات روی قطرات CO_2 افزایش می یابد. وقتی تناسب هیدرات به اندازه کافی بالا رفت، تجمع قطرات CO_2 مایع می تواند تکه های بزرگ هیدرات را بوجود آورد. عملکرد جریان برگشتی ممکن است اندکی درگیر تشکیل تکه های بزرگ هیدرات شود، مخصوصاً تحت شرایط سرعت های بالا، جایی که تقسیم تجمعات قطرات CO_2 مایع می تواند اتفاق بیفتد. یک چنین تقسیمی به وسیله جریان برگشتی می تواند با مشاهده یک کاهش در اندازه قطرات در تجمعات قطرات CO_2 مایع با افزایش سرعت جریان CO_2 مایع در MSM تأیید شود. لایه هیدرات روی سطح، ممکن است از روی سطح قطرات CO_2 مایع به وسیله یک برش قوی که با جریان برگشتی در شرایط سرعت های بالاتر بوجود می آید، جدا شود. جدا شدن لایه هیدرات و تجمع قطرات CO_2 مایع باعث تشکیل تکه های بزرگ هیدرات می شود. بنابراین نقش جریان برگشتی در تشکیل تکه های بزرگ هیدرات در سرعت های بالاتر CO_2 مایع، بیشتر است.

مکانیسم های اندیشیده شده تشکیل شکافتن هیدرات به صورت خلاصه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: مکانیسم تشکیل ذرات درشت هیدرات [۲]

(b) تشکیل ذرات ریز هیدرات: ذرات پراکنده هیدرات در شرایط سرعت بالاتر تنها با استاتیک میکسری که دارای جریان برگشتی است درست می شود. مکانیسم برای تشکیل ذرات هیدرات می تواند تابع مهمی از تأثیر جداسدن لایه هیدرات از قطرات CO₂ مایع به وسیله جریان برگشتی می باشد (شکل ۶).



شکل ۶: مکانیسم تشکیل ذرات ریز هیدرات [۲]

لایه هیدرات جدا شده و قطرات CO₂ در جریان آب پراکنده می شوند و تجمع فاز CO₂ در شرایط توربولنت اتفاق نمی افتد. در این تحقیق، تجزیه کیفی تنها روی تشکیل هیدرات CO₂ از CO₂ مایع و آب در استاتیک میکسر انجام شده است. برای طراحی بهینه یک استاتیک میکسر برای فرآیند تشکیل هیدرات، کنترل اندازه و تبدیل هیدرات CO₂ باید بررسی شود. علاوه بر این، اتلاف انرژی لازم برای عبور از اجزا های اختلاط را نیز باید در نظر گرفت.

۲-۲. تأثیر استاتیک میکسر بر تشکیل هیدرات و مقایسه انرژی مصرفی آن با سیستم همزن دار

تاجیما و همکاران در پژوهشی دیگر بر روی استفاده از استاتیک میکسر در سیستم تولید هیدرات به مقایسه دو حالت

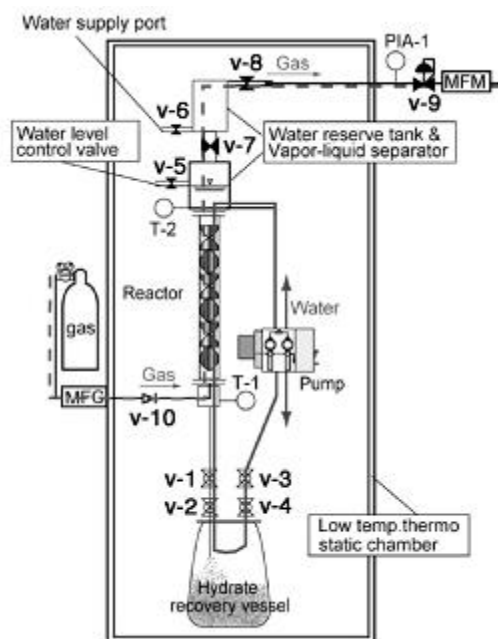
بدون استاتیک میکسر و با استاتیک میکسر پرداخته اند.

بدون استاتیک میکسر، تنها قطرات CO₂ مایع با یک لایه نازک هیدرات در سطح تماس با فاز مایع مشاهده می شود. با استفاده از استاتیک میکسر، دو دلیل باعث افزایش سرعت تشکیل هیدرات می شود. در ابتدا اندازه قطرات CO₂ مایع بعد از عبور از استاتیک میکسر کاهش می یابد و این منجر به افزایش سطح تماس می شود و در ادامه عبور از استاتیک میکسر و برخورد با اجزا های ثابت، باعث جدا شدن فیلم هیدرات از سطح تماس بین CO₂ مایع و آب و در نتیجه افزایش دوباره سطح تماس می شود [۳].

آنها با محاسباتی که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که انرژی درخواستی همزن برای تشکیل هیدرات در راکتورهای همزن دار، مصرف انرژی استاتیک میکسر حدوداً دو برابر مصرف انرژی استاتیک میکسر است و این اختلاف در اندازه های بزرگ تر بیشتر می شود [۳].

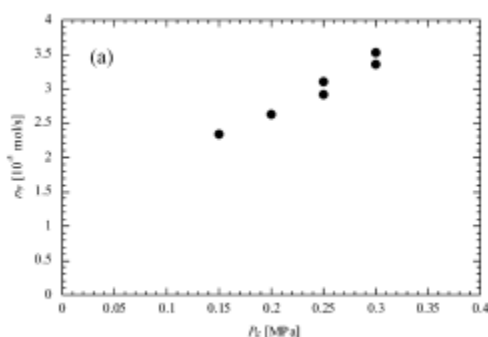
۲-۳. استاتیک میکسر وسیله ای برای پیوسته کردن سیستم تولید هیدرات

تاجیما و همکاران با استفاده از استاتیک میکسر سیستم پیوسته ای برای تولید هیدرات درست کردند که در شکل ۷ سیستم آزمایشگاهی آنها برای تشکیل و بازیابی هیدرات HFC-134a نشان داده شده است [۴].



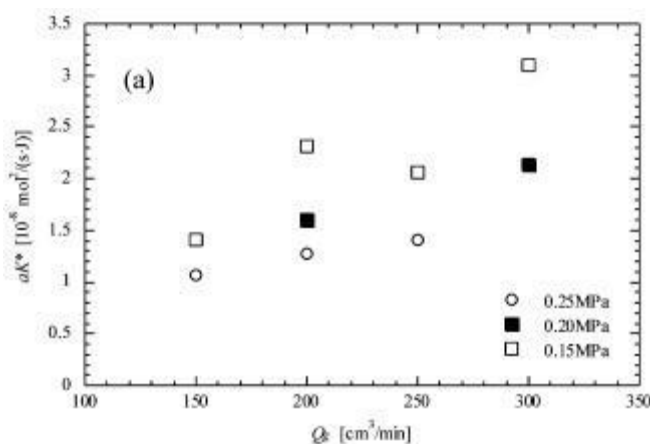
شکل ۷: شماتیک دستگاه آزمایش [۴]

آنها در ابتدا به بررسی تاثیر افزایش فشار در سیستم تولید هیدرات پرداختند که نتایج زیر را بدست آوردند.



شکل ۸: تأثیر فشار عملیاتی روی سرعت تشکیل هیدرات [۴]

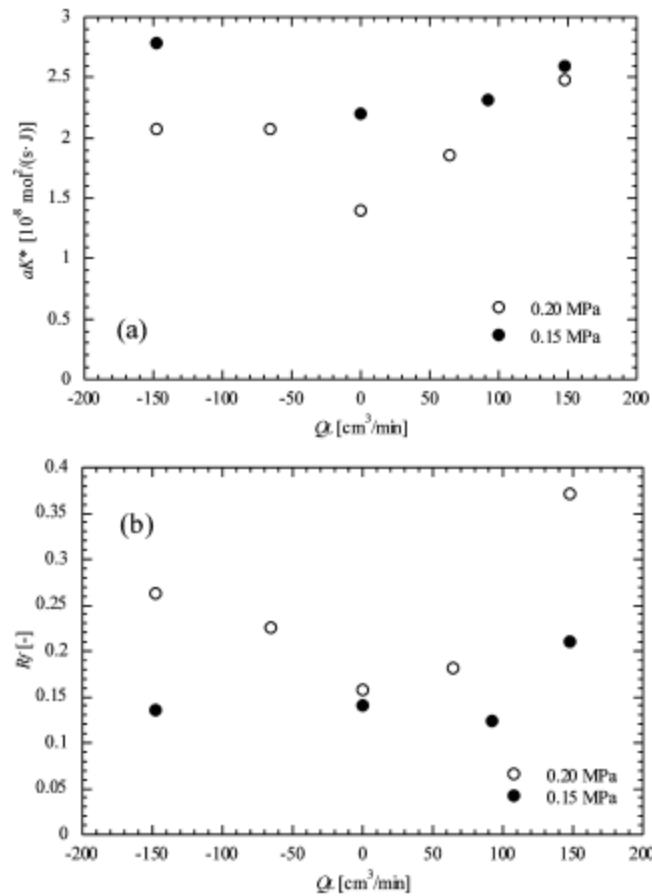
پلاگ هیدرات از هیدرات HFC-134a که به صورت لایه ای روی سطح حباب ها تشکیل شده بدست می آید. از آنجایی که دوغاب هیدرات شامل ذرات خیلی کوچک هیدرات HFC-134a در آب و لایه هیدرات که به ندرت روی سطح حباب ها بوجود می آید است. دوغاب هیدرات (تشکیل شده در ۰/۱۵ مگاپاسکال) با افزایش فشار عملیاتی به پلاگ هیدرات (تشکیل شده در فشار بالای ۰/۲۵ مگاپاسکال) تبدیل می شود. در فشار ۰/۲ مگاپاسکال هیدرات مخلوطی از پلاگ و دوغاب است [۴]. آنها در مرحله دوم به بررسی تأثیر سرعت جریان گاز تغذیه پرداختند که نتایج زیر را بدست آوردند.



شکل ۹: تأثیر سرعت جریان گاز تغذیه روی سرعت تشکیل هیدرات [۴]

یک افزایش در سرعت جریان گاز منجر به افزایش تأثیر اختلاط در یک میکسر می شود. این افزایش در تأثیر اختلاط می تواند سطح تماس حباب گاز HFC-134a و آب را افزایش دهد و باعث افزایش سرعت کلی تشکیل هیدرات شود. تأثیر سرعت

جریان گاز تغذیه روی تشکیل هیدرات در شکل ۹ بررسی شده است. ثابت سرعت تشکیل هیدرات با افزایش سرعت گاز تغذیه افزایش می‌یابد. تشکیل دوغاب هیدرات در ۰/۱۵ مگاپاسکال، زمانیکه سرعت جریان گاز دوبرابر شود، ثابت سرعت نیز دوبرابر افزایش می‌یابد. این نتایج به علت افزایش سطح تماس گاز-آب و افزایش در سرعت جداسازی هیدرات از سطح حباب است [۴]. آنها در مرحله سوم به بررسی تأثیر سرعت جریان آب و هم جهت جریان آب در مقایسه با جریان گاز در راکتور پرداختند که نتایج زیر را بدست آوردند.



شکل ۱۰: تأثیر سرعت جریان آب روی سرعت تشکیل هیدرات [۴]

با جریان موافق گاز و آب سطح تماس و تأثیر اختلاط استاتیک میکسر افزایش می‌یابد و زمان اقامت حباب های HFC-134a در راکتور به دلیل اینکه آنها سریعتر بالامی رود با جریان آب، کاهش می‌یابد. در مقابل، یک جریان مختلف جهت زمان اقامت را افزایش می‌دهد. هیدرات HFC-134a از سطح تماس حباب ها به دلیل یک افزایش در نیروی برشی روی سطح گاز-آب تشکیل می‌شود و در نتیجه در هر دو جهت جریان آب، سرعت تشکیل

هیدرات را افزایش می‌یابد [۴].

۳- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی استفاده از استاتیک میکسر در سیستم تشکیل هیدرات پرداخته شده که به نتایج زیر رسیده شده است:

- ۱- طراحی اجزاها در استاتیک میکسر بر سرعت تشکیل هیدرات تاثیر زیادی دارد.
- ۲- انرژی درخواستی همزن برای تشکیل هیدرات در راکتورهای همزن دار حدوداً دو برابر مصرف انرژی استاتیک میکسر است و این اختلاف در سایزهای بزرگ تر بیشتر می‌شود.
- ۳- استفاده از استاتیک میکسر باعث آسانتر شدن سیستم پیوسته تولید هیدرات می‌شود.
- ۴- جریان مختلف جهت گاز و آب در استاتیک میکسر به دلیل افزایش زمان اقامت سرعت تشکیل هیدرات را افزایش می‌یابد.

۴- منابع

- [۱] بدیعی جوان، محمد، بررسی روش‌های جدید تولید هیدرات، سمینار کارشناسی ارشد. آبان ۱۳۹۱
- [2] Tajima, Yamasaki, Kiyono, Hideo, Akihiro, Fumio, Effect of Mixing Function of Static Mixer on the Formation of CO₂ Hydrate from the Two-Phase Flow of Liquid CO₂ and Water, Carbon Dioxide Capture and Sequestration, Volume 86, Issues 14-15, Pages 1667-1678, October 2005
- [3] Tajima, Yamasaki, Kiyono, Hideo, Akihiro, Fumio, Continuous Formation of CO₂ Hydrate via a Kenics-Type Static Mixer, Natural Gas Hydrate / Clathrate, Volume 56, Issues 1-3, Pages 75-81, March 2005
- [4] Tajima, Nagata, Abe, Yamasaki, Kiyono, Yamagiwa, Hideo, Toru, Yutaka, Akihiro, Fumio, Kazuaki, HFC-134a Hydrate Formation Kinetics during Continuous Gas Hydrate Formation with a Kenics Static Mixer for Gas Separation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 16-1 Onogawa, Tsukuba, Japan, 2010