

تأثیر قوام‌دهنده پلیمری P-1-D در کنترل تحرك پذیری گاز دی‌اکسید کربن در فرآیند ازدیاد برداشت نفت

نسیبه باشتی^۱، اصغر گندم‌کار^{۱*} و مهدی شریف^۲

۱- گروه مهندسی شیمی و نفت، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲- گروه مهندسی پلیمر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۷

چکیده

یکی از چالش‌های موجود در حین تزریق گاز، کنترل تحرك پذیری گاز است که به‌علت گرانیروی پایین موجب میان شکنی زود هنگام و در نتیجه، کاهش راندمان جابه‌جایی نفت مخزن می‌شود. در این مطالعه سعی شده است که از قوام‌دهنده پلیمری P-1-D با وزن مولکولی پایین (۹۱۰ g/mol) به منظور کنترل تحرك پذیری گاز دی‌اکسید کربن در شرایط مخزن استفاده شود. قوام‌دهنده‌های پلیمری با وزن مولکولی پایین جهت حلالیت در گاز نیاز به کمک حلال ندارند که می‌تواند کاربرد آنها را در فرآیند ازدیاد برداشت میدانی، نسبت به قوام‌دهنده‌های پلیمری با وزن مولکولی بالا در اولویت قرار دهد. برای این منظور، ابتدا فشار نقطه ابری شدن جهت ایجاد شرایط تک فاز گاز و پلیمر محاسبه شد. تأثیر قوام‌دهنده پلیمری بر روی گرانیروی دی‌اکسید کربن در غلظت‌های ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰، ۸۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ ppm مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، تأثیر قوام‌دهنده پلیمری P-1-D بر روی کشش بین سطحی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فشار نقطه ابری شدن برای گاز دی‌اکسید کربن و قوام‌دهنده پلیمری با افزایش غلظت قوام‌دهنده کاهش می‌یابد و همگی کمتر از فشار مخزن است. همچنین، قوام‌دهنده پلیمری موجب افزایش گرانیروی گاز دی‌اکسید کربن به میزان ۱۵/۷ برابر در غلظت ۸۰۰۰۰ ppm شده است که موجب کنترل تحرك پذیری گاز تزریقی خواهد شد. علاوه بر این، استفاده از قوام‌دهنده پلیمری موجب کاهش کشش بین سطحی شده است به نحوی که در غلظت ۱۰۰۰۰ ppm گاز تزریقی شرایط امتزاجی را خواهد داشت.

کلمات کلیدی: قوام‌دهنده پلیمری، تحرك پذیری گاز، گرانیروی، کشش بین سطحی، فشار نقطه ابری شدن

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی: agandomkar@shirazu.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.3944.2798)

مقدمه

پلیمری با وزن مولکولی بالا گرانیروی گاز را تا حد مطلوبی می‌تواند افزایش دهد. اما مشکلی که این قوام‌دهنده‌ها دارند استفاده از مقدار بسیار زیادی حلال کمکی، مانند تولوئن و یا هگزان، به منظور بهبود حلالیت قوام‌دهنده‌های با وزن مولکولی بالا در گاز است. بنابراین، جهت رفع این مشکل استفاده از قوام‌دهنده‌های پلیمری با وزن مولکولی پایین پیشنهاد می‌شود. اگر چه استفاده از قوام‌دهنده‌های پلیمری با وزن مولکولی پایین جهت حلالیت در گاز نیاز به کمک حلال ندارد، لذا اکثر این پلیمرها قادر به افزایش گرانیروی گاز به میزان مطلوبی نیستند. از این‌رو، تهیه یک پلیمر با وزن مولکولی پایین که بتواند گرانیروی گاز را تا حد مطلوبی افزایش دهد، یکی از چالش‌های پیش رو خواهد بود [۸-۷]. به منظور حلالیت قوام‌دهنده‌های پلیمری در گاز و تعیین فشار نقطه ابری شدن می‌توان از یک سیستم دما-فشار بالا که دارای یک محفظه شفاف به همراه میکروسکوپ باشد، استفاده نمود. از طریق میکروسکوپ، فرآیند تعادلی بین گاز و قوام‌دهنده پلیمری در دما و فشار مورد نظر قابل مشاهده خواهد بود [۷-۵]. تاکنون مطالعات بسیاری در مورد استفاده از قوام‌دهنده‌های پلیمری با وزن مولکولی بالا به منظور افزایش گرانیروی گاز دی‌اکسیدکربن انجام گرفته است. به‌عنوان مثال، هاریس و همکارانش دسته‌ای از قوام‌دهنده‌های پلیمری با وزن مولکولی بالا را که در افزایش گرانیروی دی‌اکسیدکربن مفید بودند، معرفی کردند. پلیمرها شامل پلی سیلین سیلوکسان، پلی سیلال کیلن سیلان، پلی دی‌کیل سیلال کیلن هستند. نتایج آنها نشان داد که به منظور حلالیت این قوام‌دهنده‌ها به مقدار قابل توجهی کمک حلال، مثلاً ۱۵٪ وزنی تولوئن، نیازمند است تا این پلیمرها در دی‌اکسیدکربن حل شده و گرانیروی گاز را افزایش دهند [۱۱]. بای و ایرانیک پلی‌دی متیل سیلوکسان با وزن مولکولی بالا (PDMS, MW = 197000 g/mol) را به‌عنوان قوام‌دهنده

تزیق گاز را می‌توان به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر جهت افزایش برداشت نفت از مخازن کربناته در نظر گرفت. در صورتی که شرایط گاز تزریقی در مخزن به‌صورت غیرامتزاجی باشد، کنترل تحرک‌پذیری آن از اهمیت به‌سزایی برخوردار خواهد بود. کنترل تحرک‌پذیری گاز تزریقی موجب افزایش راندمان جابه‌جایی و در نتیجه، باعث بهبود تولید نفت می‌گردد. برای این منظور، در برخی موارد تزریق متناوب آب و گاز و همچنین، تزریق فوم به‌عنوان روش‌های جایگزین جهت بهبود کنترل تحرک‌پذیری گاز تزریقی در نظر گرفته شده است [۱]. فعال شدن نیروی ثقل، به‌دلیل چگالی متفاوت آب و گاز تزریقی، در حین تزریق متناوب آب و گاز و همچنین، پایداری فوم تزریقی از جمله مشکلاتی است که موجب کاهش راندمان جابه‌جایی و عدم سهولت در به‌کارگیری این روش‌ها می‌شود [۴-۲]. لذا، در سال‌های اخیر سعی شده است که از قوام‌دهنده‌های پلیمری به منظور افزایش گرانیروی گاز تزریقی استفاده شود [۱۰-۵]. با توجه به گرانیروی بسیار پایین گاز در شرایط مخزن، افزایش گرانیروی گاز توسط قوام‌دهنده‌های پلیمری می‌تواند موجب کنترل تحرک‌پذیری گاز تزریقی گردد. پلیمرهایی که میزان حلالیت بسیار بالایی در گاز داشته و موجب افزایش گرانیروی گاز شوند، می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به اینکه گرانیروی گازهای هیدروکربنی و غیرهیدروکربنی در شرایط مخزن در حدود ۰/۰۵ cp-۰/۰۲ هستند، لذا قوام‌دهنده پلیمری می‌بایست قادر به افزایش گرانیروی گاز در حدود ۳۰-۱۰ برابر باشد تا اینکه گرانیروی گاز به گرانیروی نفت سبک مخزن نزدیک شود. قوام‌دهنده‌های پلیمری که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند به دو دسته قوام‌دهنده‌های پلیمری با وزن مولکولی بالا ($MW > 30000$ g/mol) و قوام‌دهنده‌های پلیمری با وزن مولکولی پایین هستند. استفاده از قوام‌دهنده‌های

پلی ونیل استات، پلیمر آمورف پلی لاکتیک اسید، پلی ونیل اتیل اتر، پلی ونیل متوکسی متیل اتر و پلی متیل اکریلات از جمله قوام‌دهنده‌هایی هستند که قابل حلالیت در گاز دی‌اکسیدکربن را دارند [۵] و [۱۵]. برخی محققان جهت رفع مشکل استفاده از کمک حلال در حین استفاده از قوام‌دهنده‌های با وزن مولکولی بالا، از قوام‌دهنده‌های پلیمری با وزن مولکولی پایین، در حدود کمتر از 30000 g/mol ، جهت افزایش گرانیوی گاز دی‌اکسیدکربن و گاز های هیدروکربنی استفاده کردند. به‌عنوان مثال، لی و همکاران تری آلکیل تین فلئوراید را به‌عنوان یک قوام‌دهنده با وزن مولکولی پایین به منظور افزایش گرانیوی اتان، پروپان، و بوتان در نظر گرفتند. نتایج آنها نشان داد که این قوام‌دهنده گرانیوی پروپان و بوتان را به‌میزان ۱۴-۳ برابر افزایش می‌دهد [۱۸]. لی و همکارانش از دی‌سولفات‌های پلی‌یورتان فلئورینه شده محلول در دی‌اکسیدکربن با وزن مولکولی 29900 g/mol استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که غلظت ۴٪ وزنی پلیمر ذکر شده گرانیوی محلول را به‌میزان ۲/۷ برابر دی‌اکسیدکربن خالص در دمای اتاق و فشار $34/5 \text{ MPa}$ افزایش می‌دهد [۱۹]. همچنین، ژانگ و همکارانش دو پلیمر تجاری پلی‌ونیل اتیل اتر و P-1-D را جهت افزایش گرانیوی گاز دی‌اکسیدکربن مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج به‌دست آمده، گرانیوی دی‌اکسیدکربن به‌وسیله هر یک از این دو پلیمر حدوداً ۱۳ یا ۱۴ برابر بیشتر از گرانیوی دی‌اکسیدکربن خالص است [۲۰]. پری و همکارانش یک‌سری از پلی‌دی‌متیل سیلوکسان‌های با وزن مولکولی پایین و عامل‌دار شده با آمید-آروماتیک را سنتز کرده و توانایی حلالیت در گاز دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی را ارزیابی کردند. براساس نتایج آنها، پلی‌دی‌متیل سیلوکسان عامل‌دار شده با آنتراکینون-۲-کربوکسامید موجب افزایش گرانیوی گاز دی‌اکسیدکربن می‌شود [۲۱]. علاوه‌بر آن، آلینای و همکاران از PMHS، PDMS و

و تولوئن را به‌عنوان حلال کمکی جهت افزایش گرانیوی گاز دی‌اکسیدکربن در نظر گرفتند. آنها مشاهده کردند که با افزایش مقدار غلظت پلیمر، گرانیوی گاز دی‌اکسیدکربن به‌میزان قابل توجهی نسبت به دی‌اکسیدکربن خالص در شرایط یکسان افزایش می‌یابد [۱۲]. براساس مطالعات صورت گرفته، قوام‌دهنده‌های پلیمری فلئوردار با وزن مولکولی بالا می‌توانند بدون نیاز به کمک حلال باعث افزایش گرانیوی گاز دی‌اکسیدکربن شوند اما قیمت بالای ترکیبات فلئوردار و محدودیت های زیست محیطی مانع از کاربرد قوام‌دهنده‌های پلیمری فلئوردار می‌شود [۶ و ۱۳]. دی‌سیمون نشان دادند که پلی فلئورو اکریلات با وزن مولکولی بالا می‌تواند موجب افزایش گرانیوی گاز دی‌اکسیدکربن به اندازه ۱۹ برابر گرانیوی گاز خالص با استفاده از غلظت ۱/۵٪ وزنی در فشار 2715 psia شود [۱۴]. همچنین، قوام‌دهنده pLyFAST با وزن مولکولی بالا، گرانیوی گاز دی‌اکسیدکربن را حدود ۱۰ برابر گاز خالص در شرایط مخزن و با استفاده از غلظت پایین (حدود ۱٪ وزنی) افزایش می‌دهد [۱۵]. در پژوهشی دیگر، جیان هانگ و همکارانش از میان تمامی قوام‌دهنده‌ها، کوپلیمر فلئورو اکریلات- استایرن را برگزیدند، چرا که موجب افزایش قابل توجهی در گرانیوی شده بود. بیشتر این تحقیق تحت شرایط مخزن انجام شده است و مشاهده می‌شود که ۵٪ وزنی کوپلیمر گرانیوی دی‌اکسیدکربن را به‌میزان خیلی بالایی افزایش داده و گرانیوی چندین برابر می‌شود. فلئورو اکریلات به راحتی در دی‌اکسیدکربن حل می‌شود به طوری که نیاز به کمک حلال نیز نمی‌باشد [۱۶]. انیک و همکاران قوام‌دهنده پلیمری PFA با وزن مولکولی 200000 g/mol را جهت کنترل تحرک پذیری گاز دی‌اکسیدکربن سنتز کردند. آنها نشان دادند که این قوام‌دهنده پلیمری می‌تواند گرانیوی گاز دی‌اکسیدکربن را تا حدود ۴ برابر بدون نیاز به کمک حلال افزایش دهد [۱۷]. علاوه‌بر این، پلیمرهای دیگری با وزن مولکولی بالا مانند

قوام‌دهنده‌های پلیمری با وزن مولکولی بالا در گاز، مقدار بسیار زیادی کمک حلال نیاز است که می‌تواند کاربرد این قوام‌دهنده‌ها را در تست‌های میدانی با چالش روبرو کند. بنابراین، در این مطالعه سعی شده است که از یک قوام‌دهنده پلیمری (P-1-D) با وزن مولکولی پایین (۹۱۰ g/mol) جهت کنترل تحرک‌پذیری گاز دی‌اکسیدکربن استفاده شود. استفاده از این قوام‌دهنده غیرفلوئوردار، موجب عدم نیاز به کمک حلال خواهد شد و همچنین، مشکلات محیط زیستی را نیز مرتفع می‌نماید.

مواد آزمایشگاهی، تجهیزات، و روش کار

مواد آزمایشگاهی

در این مطالعه، از قوام‌دهنده پلیمری پلی-۱-دکان (P-1-D) با وزن مولکولی ۹۱۰ g/mol از شرکت مرک به منظور افزایش گرانشی گاز دی‌اکسیدکربن مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، تأثیر قوام‌دهنده پلیمری بر روی میزان کشش بین سطحی نفت و گاز دی‌اکسیدکربن مورد بررسی قرار گرفت. خصوصیات فیزیکی نفت خام مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۱، میزان درصد آسفالتن حدود ۴/۷ و درجه API نفت مورد استفاده ۲۵/۷۲ است.

P-1-D به‌عنوان قوام‌دهنده‌های با وزن مولکولی پایین جهت تزریق امتزاجی یک مخلوط گاز هیدروکربنی شامل ۶۰٪ متان، ۹٪ اتان، ۶٪ پروپان و ۲۵٪ دی‌اکسیدکربن استفاده کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که تزریق گاز در حضور قوام‌دهنده پلیمری P-1-D می‌تواند گرانشی گاز را بین ۲ الی ۷/۴ برابر افزایش داده و در نتیجه میزان ضریب بازیافت نفت نیز در حدود ۱۲٪ نسبت به تزریق مخلوط گاز بدون قوام‌دهنده پلیمری بهبود می‌یابد [۲۲]. همچنین، کوبالا و همکاران نشان دادند که قوام‌دهنده‌های پلیمری هیدروفلوئور با وزن مولکولی حدود ۴۰۰ g/mol، می‌تواند موجب بهبود گرانشی گاز دی‌اکسیدکربن گردد [۲۳]. علاوه‌برآن، تاپریال و همکاران گزارش دادند که قوام‌دهنده پلیمری پلی‌وینیل استات با وزن مولکولی حدود ۱۱۰۰۰ g/mol، قادر به افزایش ویسکوزیته گاز دی‌اکسیدکربن نخواهند بود [۲۴]. با توجه به موارد مطرح شده در بالا، قوام‌دهنده پلیمری می‌بایست قابلیت افزایش گرانشی گاز در حدود ۲۰ الی ۳۰ برابر را داشته باشد. لذا، انتخاب نوع پلیمر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از پلیمرهای فلوئوردار به دلیل قیمت بالا و عدم سازگاری با محیط زیست پیشنهاد نمی‌شود. همچنین به‌منظور حلالیت

جدول ۱ ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی نفت خام

| خواص فیزیکی نفت خام | ترکیب (درصد مولی) | نوع هیدروکربن |
|---------------------------------------|-------------------|----------------------------|
| چگالی ویژه (SG) (60 °F) (ASTM D40452) | ۲۸/۶ | نرمال پارافین |
| وزن مولکولی (IP-86) (g/mol) | ۲۶/۱ | ایزوپارافین |
| عدد اسیدی (KOH) (mg/g) | ۲۰/۲ | نفتا |
| عدد بازی (KOH) (mg/g) | ۲۱/۷ | آروماتیک |
| میزان آسفالتین (IP 143) (wt%) | ۱/۶ | C15 ⁺ اشباع شده |
| محتوای آب (ASTM D4377) (vol%) | ۱/۸ | C15 ⁺ آروماتیک |
| رسوبات پایه و آب (vol) (%BS and W) | ۱۰۰ | مجموع |

جدول ۲ آورده شده است.

اندازه‌گیری گرانیوی گاز در حضور قوام‌دهنده پلیمری

پس از آماده سازی همه مخلوط‌ها، از ویسکومتر گوی غلتان در دما و فشار بالا برای اندازه‌گیری گرانیوی نسبی گاز همراه با قوام‌دهنده پلیمری استفاده شد. تمام اندازه‌گیری گرانیوی در ۵۰۰ psia بالاتر از فشار نقطه ابر انجام شد تا مطمئن شویم که مخلوط گاز و قوام‌دهنده در شرایط تک فاز هستند. گرانیوی های نسبی به‌عنوان نسبت گرانیوی محلول P-1-D/CO₂ به گرانیوی دی‌اکسیدکربن خالص، در دما و فشار مختلف در نظر گرفته می‌شوند. در اثر حلالیت قوام‌دهنده در گاز، در این شرایط چگالی گاز تحت تأثیر پلیمر قرار نمی‌گیرد، لذا نسبت زمان سقوط بین دو نقطه، گرانیوی نسبی را نیز نشان می‌دهد [۲۶]. میزان دقت اندازه‌گیری با توجه به تکرار آزمایش حدود ۱/۰ ± است. آزمایش‌های طراحی شده برای اندازه‌گیری گرانیوی گاز به‌همراه قوام‌دهنده‌های پلیمری در جدول ۲ آورده شده است.

$$\mu_{\text{sol}}/\mu_{\text{o}} = V_{\text{sol}}/V_{\text{t}} \quad (1)$$

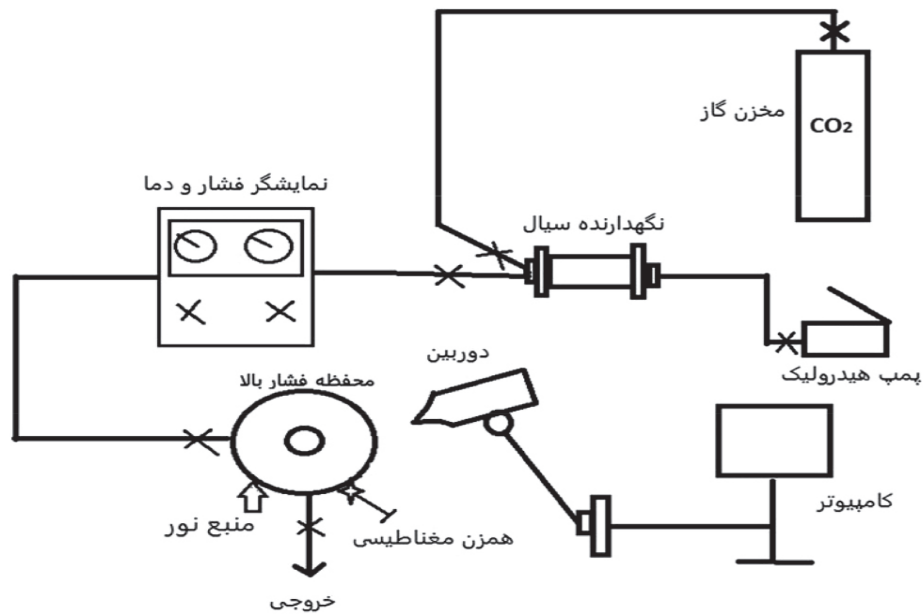
اندازه‌گیری کشش بین سطحی

دستگاه IFT ۷۰۰ در دما و فشار بالا جهت محاسبه کشش بین سطحی نفت مخزن و گاز مورد استفاده قرار گرفت. روش کار دستگاه به‌صورت قطره آویزان است. این دستگاه از یک دوربین، نور، محفظه فشار بالای شفاف، پمپ دستی، سنسور فشار و دما، و یک سیستم کامپیوتری تشکیل شده است. همچنین، جهت محاسبه کشش بین سطحی یک قطره نفت از انتهای سوزن موئینه در محفظه حاوی CO₂ به‌همراه قوام‌دهنده پلیمری در دما و فشار مورد نظر قرار می‌گیرد. سپس از طریق آنالیز شکل قطره میزان کشش بین سطحی محاسبه می‌شود. برای این منظور می‌بایست به سیستم زمان داده شود و بعد از اینکه شکل قطره نفت در بالک گاز به تعادل رسید و مقدار کشش بین سطحی در دما فشار مورد نظر ثابت شد، محاسبات انجام گیرد [۲۷ و ۲۸].

همچنین، میزان درصد هیدروکربن‌های آروماتیک ۲۳/۵ و اشباع ۱/۶ است. شرایط دما و فشار مخزن برای تزریق قوام‌دهنده پلیمری به‌ترتیب ۸۰ °C و ۳۰۵۰ psia است.

اندازه‌گیری فشار نقطه ابری شدن

در این بخش، از دستگاه آنالیز تعادلات فازی جهت اندازه‌گیری فشار نقطه ابری شدن استفاده شده است. برای این منظور، پلیمر را داخل محفظه شفاف دما-فشار بالا که توسط میکروسکوپ قابل مشاهده است، قرار داده می‌شود. پس از آن، دمای محفظه توسط یک سیستم کنترلی PID در دمای مورد نظر تنظیم می‌گردد. در ادامه گاز دی‌اکسیدکربن را به آن تزریق کرده که موجب افزایش فشار سیستم می‌شود. از طریق مشاهدات زیر میکروسکوپ حلالیت قوام‌دهنده پلیمری در گاز و تک فاز شدن مخلوط در دما و فشار مورد نظر بررسی می‌شود. در این شرایط، افزایش فشار از طریق تزریق گاز دی‌اکسیدکربن انجام می‌گیرد. پس از تک فاز شدن مخلوط، فشار سیستم را حدود ۵۰۰ psia افزایش داده و سپس به منظور محاسبه دقیق فشار نقطه ابری شدن، فرآیند کاهش فشار را در بازه‌های ۲۰ psia انجام داده و در هر مرحله به سیستم حدود ۳۰ min زمان می‌دهیم تا به تعادل برسد. این فرآیند کاهش فشار تا زمانی که مخلوط مجدداً دوفازی گردد، ادامه می‌یابد و مادامی که مخلوط به‌حالت فوم دیده می‌شود و در آستانه دوفازی شدن قرار گرفته است، فشار سیستم برابر با فشار نقطه ابری شدن در نظر گرفته می‌شود. همچنین، این دستگاه دارای یک همزن مغناطیسی، منبع نور، پمپ هیدرولیکی، محفظه نگه دارنده سیال و سنسورهای دما و فشار است که در شکل ۱ دیده می‌شود [۲۵ و ۸]. طراحی آزمایشات به‌نحوی در نظر گرفته شده است که تأثیر دما و غلظت قوام‌دهنده پلیمری بر روی نقطه ابری شدن مورد ارزیابی قرار گیرد. آزمایش‌های طراحی شده از لحاظ تغییرات دما و غلظت قوام‌دهنده پلیمری در



شکل ۱ دستگاه آنالیز تعادلات فازی

جدول ۲ آزمایش‌های طراحی شده برای فشار نقطه ابری شدن، گرانیوی گاز به‌همراه قوام‌دهنده پلیمری، و کشش بین سطحی

| غلظت P-1-D (ppm) | دمای‌های طراحی شده جهت محاسبه فشار نقطه ابری شدن و گرانیوی گاز به‌همراه قوام‌دهنده پلیمری* | فشارهای طراحی شده جهت محاسبه کشش بین سطحی** |
|------------------|--|---|
| | دما (°C) | فشار (psia) |
| ۵۰۰۰ | ۲۵، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ | ۲۲۰۰، ۲۴۰۰، ۲۶۰۰، ۲۸۰۰، ۳۰۵۰ |
| ۱۰۰۰۰ | ۲۵، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ | ۲۲۰۰، ۲۴۰۰، ۲۶۰۰، ۲۸۰۰، ۳۰۵۰ |
| ۳۰۰۰۰ | ۲۵، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ | ۲۲۰۰، ۲۴۰۰، ۲۶۰۰، ۲۸۰۰، ۳۰۵۰ |
| ۵۰۰۰۰ | ۲۵، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ | ۲۲۰۰، ۲۴۰۰، ۲۶۰۰، ۲۸۰۰، ۳۰۵۰ |
| ۸۰۰۰۰ | ۲۵، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ | ۲۲۰۰، ۲۴۰۰، ۲۶۰۰، ۲۸۰۰، ۳۰۵۰ |
| ۱۰۰۰۰۰ | ۲۵، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ | ۲۲۰۰، ۲۴۰۰، ۲۶۰۰، ۲۸۰۰، ۳۰۵۰ |

* گرانیوی گاز در فشار ۵۰۰ psia بالاتر از فشار نقطه ابری شدن محاسبه شده است.
 ** کشش بین سطحی در دمای مخزن، ۸۰ °C محاسبه شده است.

شدن آورده شده است. با توجه به این نتایج، میزان فشار نقطه ابری شدن با افزایش دما روند افزایشی داشته است که می‌تواند به دلیل تأثیر دما بر میزان حلالیت باشد. همچنین، در دمای ثابت، با افزایش غلظت قوام‌دهنده میزان فشار نقطه ابری شدن افزایش یافته است. افزایش درجه حرارت در فشارهای پایین و متوسط باعث کاهش حلالیت اجزاء غیرفرار می‌شود. این رفتار با در نظر گرفتن چگالی گاز به‌عنوان معیاری برای حلالیت قابل توجیه است. افزایش درجه حرارت در فشار ثابت باعث کاهش چگالی سیال و افزایش فشار بخار اجزاء غیرفرار می‌شود. در فشارهای متوسط با افزایش درجه حرارت، چگالی گاز کاهش می‌یابد که باعث کاهش غلظت اجزاء غیرفرار در سیال می‌شود. علاوه بر این، در فشارهای بالاتر، تغییرات میزان چگالی گاز با افزایش دما، ناچیز است، لذا باعث حل شدن مقدار بیشتری از اجزاء غیر فرار در سیال می‌گردد. شکل ۲ تغییرات فشار نقطه ابری شدن برحسب دما را نشان می‌دهد. میزان فشار نقطه ابری شدن در دمای مخزن (80°C) با افزایش غلظت قوام‌دهنده از ۱۹۰۰ psi الی ۳۳۰۰ psi به ترتیب برای غلظت‌های ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ ppm افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه فشار مخزن ۳۰۵۰ psi است، غلظت ۱۰۰۰۰۰ ppm در فشار مخزن به‌صورت دوفاز خواهد بود و قابل کاربرد است.

آزمایش‌های طراحی شده برای اندازه‌گیری کشش بین سطحی در جدول ۲ آورده شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

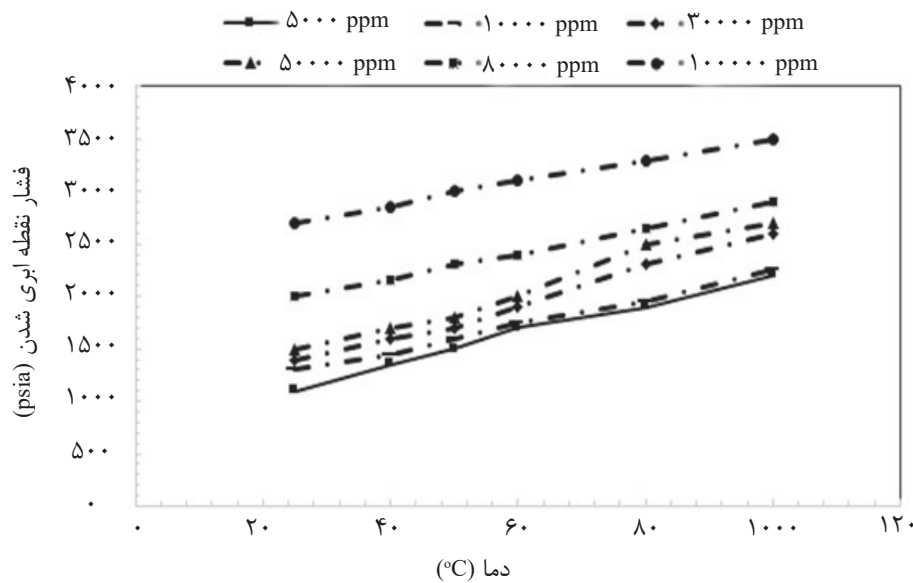
در این بخش، نتایج مربوط به اندازه‌گیری فشار نقطه ابری شدن، گرانیروی گاز در حضور قوام‌دهنده، و کشش بین سطحی به منظور کنترل تحرک‌پذیری دی‌اکسیدکربن در فرآیند تزریق آن به مخازن نفتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا، اقدام به اندازه‌گیری فشار نقطه ابری شدن در دما و فشارهای مختلف شده است. در ادامه، تأثیر قوام‌دهنده پلیمری P-1-D بر روی گرانیروی گاز دی‌اکسیدکربن در فشارهای بالاتر از فشار نقطه ابری شدن مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، میزان کشش بین سطحی گاز و نفت مخزن در حضور قوام‌دهنده و تأثیر آن بر روی میزان فشار امتزاجی بررسی گردید.

حلالیت قوام‌دهنده پلیمری در دی‌اکسیدکربن

برای اندازه‌گیری فشار نقطه ابری شدن، قوام‌دهنده پلیمری در غلظت‌های ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰، ۸۰۰۰۰ ppm و ۱۰۰۰۰۰۰ را زیر میکروسکوپ در دستگاه آنالیز تعادلات فازی قرار داده و سپس اقدام به تزریق دی‌اکسیدکربن در فشار و دماهای مورد نظر می‌شود. شرایط دما و غلظت‌هایی که قوام‌دهنده پلیمری با گاز دی‌اکسیدکربن تک فاز شدند در جدول ۳، تحت عنوان فشار نقطه ابری

جدول ۳ فشار نقطه ابری شدن در دماها و غلظت‌های مختلف از قوام‌دهنده پلیمری

| قوام‌دهنده پلیمری | غلظت P-1-D (ppm) | فشار نقطه ابری شدن (psia) | | | | | |
|-------------------|------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | | 25°C | 40°C | 50°C | 60°C | 80°C | 100°C |
| P-1-D | ۵۰۰۰ | ۱۱۰۰ | ۱۳۵۰ | ۱۵۰۰ | ۱۷۰۰ | ۱۹۰۰ | ۲۲۰۰ |
| | ۱۰۰۰۰ | ۱۳۰۰ | ۱۴۵۰ | ۱۶۰۰ | ۱۷۵۰ | ۱۹۵۰ | ۲۲۵۰ |
| | ۳۰۰۰۰ | ۱۴۰۰ | ۱۶۰۰ | ۱۷۰۰ | ۱۹۰۰ | ۲۳۰۰ | ۲۶۰۰ |
| | ۵۰۰۰۰ | ۱۵۰۰ | ۱۷۰۰ | ۱۸۰۰ | ۲۰۰۰ | ۲۵۰۰ | ۲۷۰۰ |
| | ۸۰۰۰۰ | ۲۰۰۰ | ۲۱۵۰ | ۲۳۰۰ | ۲۴۰۰ | ۲۶۵۰ | ۲۹۰۰ |
| | ۱۰۰۰۰۰ | ۲۷۰۰ | ۲۸۵۰ | ۳۰۰۰ | ۳۱۰۰ | ۳۳۰۰ | ۳۵۰۰ |



شکل ۲ تغییرات فشار نقطه ابری شدن بر حسب دما

می‌دهد که میزان گرانیوی گاز در حدود ۳/۵ الی ۱۶/۸ برابر می‌شود که این مقادیر در دمای مخزن در حدود ۸/۵ الی ۱۵/۷ برابر است. لذا با توجه به اینکه غلظت ۱۰۰۰۰۰ ppm قابل استفاده در شرایط مخزن ناست، حداکثر میزان افزایش گرانیوی مربوط به غلظت ۸۰۰۰۰ ppm است که حدود ۱۴ برابر گرانیوی گاز را افزایش می‌دهد. همچنین، شکل ۳ تغییرات گرانیوی نسبی بر حسب دما را نشان می‌دهد. میزان گرانیوی دی‌اکسیدکربن با افزایش دما، روند افزایشی را از خود نشان می‌دهد. از آنجایی که کنترل تحرک‌پذیری گاز یکی از چالش‌های مهم در حین فرآیندهای پایه‌گازی است، لذا با افزایش گرانیوی گاز از طریق قوام‌دهنده‌های پلیمری می‌توان تحرک‌پذیری گاز تزریقی را کنترل نمود. کنترل تحرک‌پذیری گاز تزریقی موجب تأخیر در زمان میان‌شکنی گاز شده و در نتیجه راندمان جابجایی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این نتایج گرانیوی نشان می‌دهد با افزایش فشار، P-1-D توانایی‌های بیشتری در تقویت گرانیوی CO₂ خواهد داشت. این به تکرار واحد مونومرهای P-1-D اشاره دارد به طوری که می‌تواند CO₂ ضخیم‌تر را ایجاد کند.

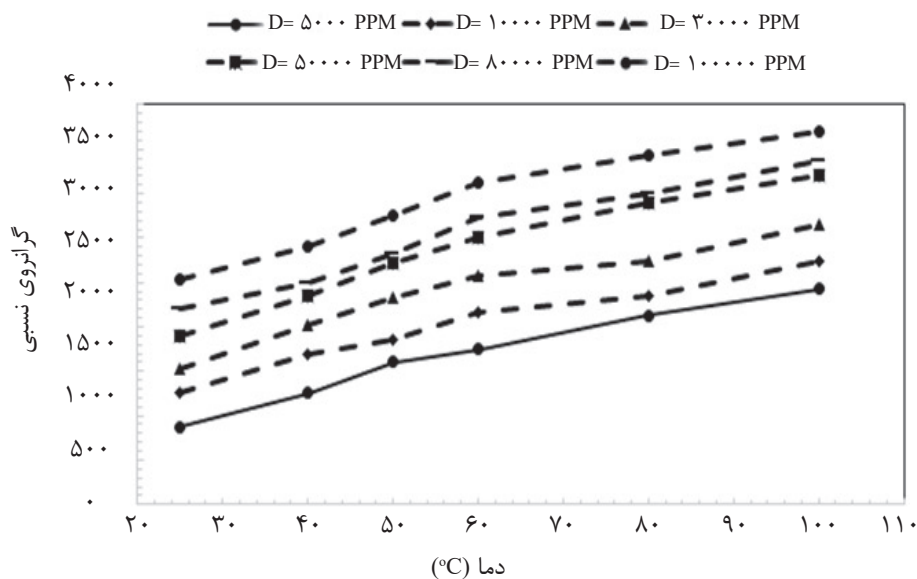
نتایج فشار نقطه ابری شدن نشان می‌دهد که با افزایش دما میزان حلالیت قوام‌دهنده پلیمری در گاز کاهش می‌یابد. آنتروپی مخلوط که تابعی از دما است، کنترل‌کننده این رفتار خواهد بود. بی‌نظمی یک سیستم دوجزیی به مراتب بیشتر از یک سیستم تک‌جزیی است. همچنین، چگالی گاز دی‌اکسیدکربن با افزایش دما کاهش یافته است در صورتی که افزایش دما تأثیر چندانی بر روی چگالی قوام‌دهنده پلیمری نخواهد داشت. در نتیجه با افزایش دما، اختلاف چگالی گاز و قوام‌دهنده پلیمری بیشتر شده و موجب می‌شود که مقدار آنتروپی مخلوط منفی گردد. در این شرایط افزایش دما باعث کاهش میزان حلالیت قوام‌دهنده پلیمری در گاز خواهد شد [۲۹].

تأثیر قوام‌دهنده‌های پلیمری بر روی میزان گرانیوی گاز دی‌اکسیدکربن

تأثیر قوام‌دهنده‌های پلیمری بر روی گرانیوی گاز دی‌اکسیدکربن در غلظت‌های ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰، ۸۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ ppm مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی گرانیوی نسبی گاز دی‌اکسیدکربن به همراه قوام‌دهنده پلیمری در جدول ۴ آورده شده است. نتایج نشان

جدول ۴ تغییرات گرانروی نسبی گاز در دما و غلظت‌های مختلف

| قوام‌دهنده پلیمری | غلظت P-1-D (ppm) | گرانروی نسبی در P= فشار نقطه ابری شدن + ۵۰۰ psia | | | | | |
|-------------------|------------------|--|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | ۲۵ °C | ۴۰ °C | ۵۰ °C | ۶۰ °C | ۸۰ °C | ۱۰۰ °C |
| P-1-D | ۵۰۰۰ | ۳/۵ | ۵ | ۶/۴ | ۷ | ۸/۵ | ۹/۷ |
| | ۱۰۰۰۰ | ۵ | ۶/۸ | ۷/۴ | ۸/۷ | ۹/۴ | ۱۱ |
| | ۳۰۰۰۰ | ۶/۱ | ۸/۱ | ۹/۳ | ۱۰/۳ | ۱۱ | ۱۲/۶ |
| | ۵۰۰۰۰ | ۷/۶ | ۹/۴ | ۱۰/۹ | ۱۲ | ۱۳/۶ | ۱۴/۸ |
| | ۸۰۰۰۰ | ۸/۸ | ۱۰ | ۱۱/۳ | ۱۲/۹ | ۱۴ | ۱۵/۵ |
| | ۱۰۰۰۰۰ | ۱۰/۱ | ۱۱/۶ | ۱۳ | ۱۴/۵ | ۱۵/۷ | ۱۶/۸ |



شکل ۳ تغییرات گرانروی برحسب دما در غلظت‌های مختلف

نقطه ابری شدن برای غلظت ۱۰۰۰۰۰ ppm، بیش از فشار مخزن است، لذا در این نقاط فشاری، شرایط تک فاز مهیا نبوده و نمی‌توان تأثیر آن را بررزی میزان کشش بین سطحی بررسی نمود. در نتیجه برای غلظت ۱۰۰۰۰۰ ppm، می‌بایست مقادیر کشش بین سطحی را در فشار بیشتر از فشار مخزن محاسبه نمود که با توجه به کاربردی نبودن آن ضروری است. نتایج نشان می‌دهد که کشش بین سطحی نفت خام و دی‌اکسیدکربن در حضور قوام‌دهنده با افزایش فشار کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش غلظت قوام‌دهنده به ۵۰۰۰ ppm، موجب می‌شود که میزان کشش بین سطحی از ۶/۵ به ۲/۱ dyn/cm در شرایط دما و فشار مخزن کاهش یابد.

بنابراین، P-1-D می‌تواند یک قوام‌دهنده مناسب برای دستیابی به حلالیت خوب در دی‌اکسیدکربن در شرایط بالاتر از فشار نقطه ابر باشد.

کشش بین سطحی و حداقل فشار امتزاجی

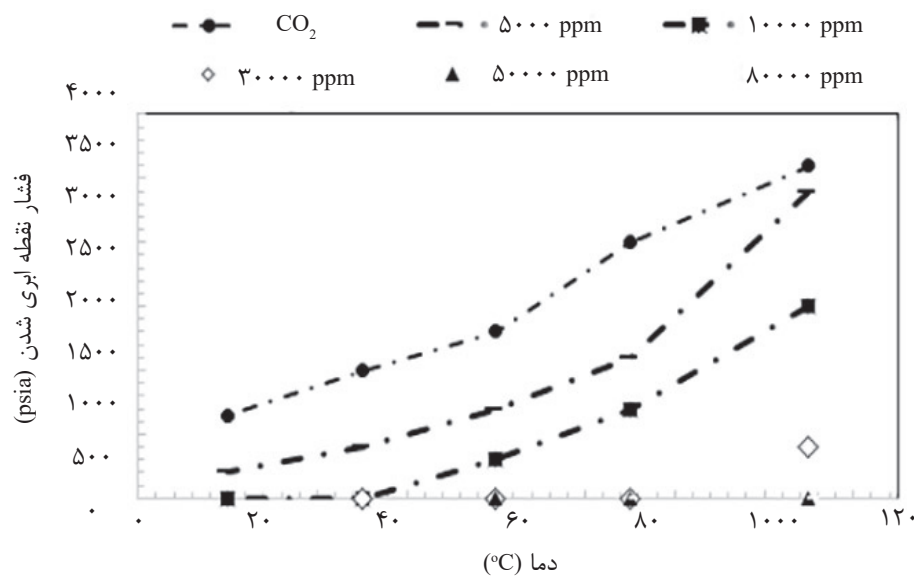
نتایج مربوط به تأثیر قوام‌دهنده پلیمری بررزی کشش بین سطحی در جدول ۵ برای پلیمر با غلظت‌های ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰، ۸۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ ppm آورده شده است. میزان کشش بین سطحی در نقاط فشاری که بالاتر از فشار نقطه ابری شدن (شرایط تک فاز) قرار دارند، محاسبه شده است. با توجه به اینکه حداکثر فشار مورد نظر جهت محاسبه کش بین سطحی، فشار مخزن در نظر گرفته شده است (Pres= 3050 psia)، و میزان فشار

جدول ۵ مقادیر کشش بین سطحی در دما و فشارهای مختلف

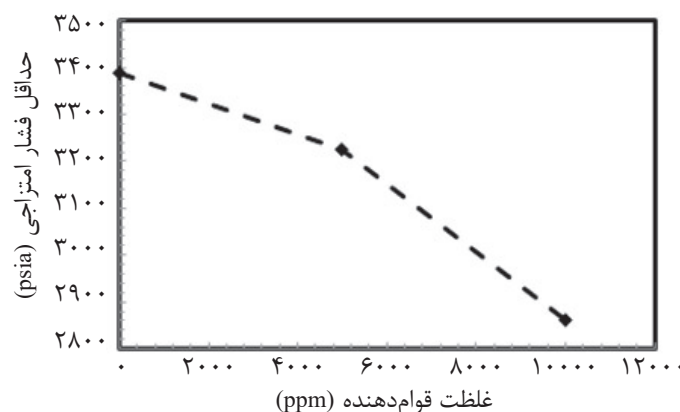
| قوام‌دهنده | غلظت P-1-D (ppm) | IFT (dyn/cm) Oil/CO ₂ thickener, Tres= 80 °C MMP (pure CO ₂) =3390 psia | | | | |
|----------------------|------------------|--|-------------|-------------|-------------|-----------------------------|
| | | P=۲۲۰۰ psia | P=۲۴۰۰ psia | P=۲۶۰۰ psia | P=۲۸۰۰ psia | P _{res} =۳۰۵۰ psia |
| CO ₂ خالص | ۰ | ۳۶ | ۲۰ | ۱۳ | ۱۰ | ۶/۵ |
| P-1-D | ۵۰۰۰ | ۲۴ | ۱۱ | ۷ | ۴ | ۲/۱ |
| | ۱۰۰۰۰ | ۱۵ | ۷ | ۳ | ۰ | ۰ |
| | ۳۰۰۰۰ | - | ۴ | ۰ | ۰ | ۰ |
| | ۵۰۰۰۰ | - | - | ۰ | ۰ | ۰ |
| | ۸۰۰۰۰ | - | - | - | ۰ | ۰ |
| | ۱۰۰۰۰۰ | - | - | - | - | - |

حضور ۵۰۰۰ ppm و ۱۰۰۰۰ ppm قوام‌دهنده به ترتیب ۳۳۹۰، ۳۲۲۵، و ۲۸۶۰ psia است، شکل ۴. با توجه به فشار مخزن، به منظور ایجاد شرایط امتزاجی نیاز به استفاده از قوام‌دهنده پلیمری با حداقل غلظت ۱۰۰۰۰ ppm است. همچنین، شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش میزان غلظت قوام‌دهنده پلیمری میزان حداقل فشار امتزاجی کاهش می‌یابد. آلهینای و همکاران از P-1-D به‌عنوان قوام‌دهنده با وزن مولکولی پایین جهت تزریق امتزاجی یک مخلوط گاز هیدروکربنی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که تزریق گاز در حضور قوام‌دهنده پلیمری می‌تواند گرانیروی گاز را بین ۲ الی ۷/۴ برابر افزایش خواهد داد. علاوه‌بر آن، میزان ضریب بازیافت نفت نیز در حدود ۱۲٪ نسبت به تزریق مخلوط گاز بدون قوام‌دهنده پلیمری بهبود می‌یابد [۲۲]. در انتها، لازم به ذکر است که در این مطالعه رفتار فاز دی‌اکسیدکربن و قوام‌دهنده پلیمری با وزن مولکولی بالای مورد بررسی قرار نگرفته است زیرا به مقدار زیادی کمک حلال (تولونن) احتیاج دارد که باعث می‌شود کاربرد آن را در شرایط مخزن با محدودیت‌هایی روبه‌رو کند.

همچنین، این مقدار برای غلظت ۱۰۰۰۰ ppm از قوام‌دهنده، صفر خواهد بود که نشان‌دهنده شرایط امتزاجی خواهد بود. با توجه به نتایج، در فشارهای بالا، مقدار کش بین سطحی در غلظت‌های کمتری به صفر می‌رسد. میزان گاز دی‌اکسیدکربن حاوی قوام‌دهنده دارای چگالی بیشتری نسبت به گاز خالص است و باعث می‌شود که اختلاف چگالی آن با نفت خام کمتر شده و بنابراین کشش بین سطحی کاهش می‌یابد [۳۰]. علاوه‌بر آن، میزان کشش بین سطحی با افزایش غلظت قوام‌دهنده پلیمری روند کاهشی خواهد داشت که این مقدار در فشارهای بالا مشهودتر است. میزان کشش بین سطحی گاز دی‌اکسیدکربن خالص در شرایط مخزن حدود ۶/۵ dyn/cm است که موجب ایجاد شرایط غیرامتزاجی و در نتیجه، کاهش میزان نفت تولیدی خواهد شد. با حلالیت قوام‌دهنده پلیمری در گاز دی‌اکسیدکربن علاوه‌بر افزایش گرانیروی، موجب کاهش کشش بین سطحی نیز می‌گردد و شرایط تزریق گاز در حضور قوام‌دهنده به‌صورت امتزاجی خواهد بود. میزان حداقل فشار امتزاجی محاسبه شده به‌روش حذف کشش بین سطحی نشان می‌دهد که این مقدار برای گاز خالص و در



شکل ۴ تغییر کشش بین سطحی نفت و گاز در حضور قوام‌دهنده‌های پلیمری



شکل ۵ تاثیر غلظت قوام‌دهنده پلیمری بر روی حداقل فشار امتزاجی

از ۸۰۰۰۰ ppm) و گازی دی‌اکسیدکربن در فشاری کمتر از فشار مخزن به‌صورت تک فاز خواهند بود. ۳- میزان گرانیروی گاز خالص دی‌اکسیدکربن در شرایط مخزن حدود ۰/۰۴۸۴ cp است که با استفاده از قوام‌دهنده پلیمری به‌میزان حداکثر (۰/۷۶ cp) ۱۵/۷ برابر در غلظت ۸۰۰۰۰ ppm رسیده است. ۴- قوام‌دهنده پلیمری موجب کاهش کشش بین سطحی نفت و گاز از ۶/۵ به صفر برای به‌ترتیب گاز خالص و ۱۰۰۰۰ ppm پلیمر در شرایط مخزن شده است. ۵- تزریق گاز دی‌اکسیدکربن خالص به مخزن به‌صورت غیرامتزاجی خواهد بود و در صورتی که با افزودن ۱۰۰۰۰ ppm قوام‌دهنده پلیمری موجب می‌شود شرایط امتزاجی حاصل شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تاثیر قوام‌دهنده پلیمری P-I-D بر روی میزان تحرک‌پذیری گاز دی‌اکسیدکربن مورد ارزیابی قرار گرفت. میزان حلالیت قوام‌دهنده در گاز دی‌اکسیدکربن از طریق محاسبه فشار نقطه ابری شدن بررسی گردید. علاوه‌براین، تاثیر قوام‌دهنده پلیمری بر روی میزان گرانیروی نسبی، کشش بین سطحی، و حداقل فشار امتزاجی بررسی گردیده و نتایج آن در زیر آورده شده است.

- ۱- میزان فشار نقطه ابری شدن با افزایش دما و غلظت قوام‌دهنده پلیمری افزایش می‌یابد.
- ۲- با توجه به نتایج فشار نقطه ابری شدن، واضح است که قوام‌دهنده پلیمری (در غلظت‌های کمتر

Poly Dimethyl Siloxane : *PDMS*

Proportional–Integral–Derivative : *PID*

Poly Methyl Hydro Siloxane : *PMHS*

(psia) Reservoir Pressure : *Pres*

(°C) Reservoir Temperature : *Tres*

علائم و نشانه‌ها

(dye/ccm) Interfacial Tension : *IFT*

(psia) Minimum Miscibility Pressure : *MMP*

Molecular Weight : *MW*

Poly 1-decene : *P-1-D*

مراجع

- [1]. Gandomkar A. and Kharrat R., "Tertiary fWAG process on gas and water invaded zones, an experimental study," Journal of Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Vol. 34, Issue 20, pp. 1913-1922, 2012.
- [2]. Merchant D., "A Look at conventional WAG recovery beyond 80% HCPV injected in CO₂ Tertiary Floods," SPE International Conference on CO₂ Capture, Storage, and Utilization, New Orleans, Louisiana, USA, SPE 139516, 2010.
- [3]. Kumar S. and Mandal A., "A comprehensive review on chemically enhanced water alternating gas/CO₂ (CE-WAG) injection for enhanced oil recovery," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 157, pp. 696-715, 2017.
- [4]. Afzali Sh., Rezaei N. and Zendejboudi S., "A comprehensive review on enhanced oil recovery by water alternating Gas (WAG) injection," Fuel, Vol. 227, pp. 218-246, 2018.
- [5]. Enick R. M., Olsen D., Ammer J. and Schuller W., "Mobility and conformance control for CO₂ EOR via thickeners, foams, and gels- A literature review of 40 years of research and pilot tests," Eighteenth SPE improved oil recovery symposium held in Tulsa, SPE 154122, Tulsa, Oklahoma, USA, 14-18 April, 2012.
- [6]. Huang Zh., Shi Ch., Xu J., Enick R. and Beckman E. J., "Enhancement of the viscosity of carbon dioxide using styrene/fluoroacrylate copolymers," Macro molecules, Vol. 33, pp. 5437-5442, 2000.
- [7]. Lee J. J., Dhuwe A., Stephen D., Eric J. and Enick R. M., "Polymeric and small molecule thickeners for CO₂, ethane, propane and butane for improved mobility control," SPE Improved Oil recovery conference, tulsas, SPE 179587, 2016.
- [8]. Miller M. B., Chen D. L., Xie H. B., Luebke D. R. and Enick R. M., "Solubility of CO₂ in CO₂-philic oligomers; cosmothem predictions and experimental results," fluid phase equilibria, Vol. 287, Issue 1, pp.26-32, 2009.
- [9]. Miller M. B., Luebke D. R. and Enick R. M., "CO₂-philic oligomers as novel solvents for CO₂ absorption," Energy & Fuels, Vol. 24, Issue 11, pp. 6214-6219, 2010.
- [10]. Newman D. A., Hoefling T. A., Beckman E. J. and Enick R. M., "Phase behavior of fluoroether-functional amphiphiles in supercritical carbon dioxide," Journal of Supercritical Fluids, Vol. 6, Issue 4, pp. 205-210, 1993.
- [11]. Harris T. V., Irani C. A., and Pretzer W. R., U.S. Patent 4,913,235, 1990.
- [12]. Bae J. H. and Irani C. A., "The thickened CO₂ process utilizing a commercial silicon polymer and toluene as cosolvent is technically viable," SPE Advanced Technology Series, 1993.
- [13]. DeSimone J. M., Barcenas G. L., Mawson S. and Takishima S., "Phase behavior of poly(1,1-dihydroper fluoro

- octyl acrylate) in supercritical carbon dioxide,* Fluid Phase Equilib, Vol. 146, Issue 1-2, pp. 325-337, 1998.
- [14]. McClain J. B., Betts D. E., DeSimone J. M., Poly. Preprints, 1996.
- [15]. Enick R., Kilic S. and Beckman E. J., "Fluoroacrylate-aromatic acrylate copolymers for viscosity enhancement of carbon dioxide," The Journal of Supercritical Fluids, Vol. 146, pp. 38-46, 2019.
- [16]. Jianhang X., Xu J., Ph.D Dissertation, University of Pittsburgh, 2003.
- [17]. Enick R., Lee J. J., Cummings S. D. and Zuberi A., "Fluoroacrylate polymers as CO₂-soluble conformance control agents," SPE 190176, 2018.
- [18]. Lee J. J., Dhuwe A., Stephen D., Eric J. and Enick R. M., "Polymeric and small molecule thickeners for CO₂, ethane, propane and butane for improved mobility control," SPE Improved Oil Recovery Conference, Tulsa, SPE 179587, 2016.
- [19]. Shi C., Enick R. M., Beckman E. J. and Karmana E., "Phase behavior of CO₂-perfluoropolyether oil mixtures and CO₂-perfluoropolyether chelating agent mixtures," Journal of Supercritical Fluid, 1998.
- [20]. Zhang Sh., Yuehui She and Yongan G., "Evaluation of polymers as direct thickeners for CO₂ enhanced oil recovery," Vol. 56, No. 4, pp. 1069-1079, 2011.
- [21]. Perry R., Michael J., Mark D. and Enick R., "Anthraquinone siloxanes as thickening agents for supercritical CO₂," Energy and Fuels, Vol. 30, Issue 7, pp. 5990-5998, 2016.
- [22]. Alhinai N., Saeedi A. and Wood C., "Experimental study of miscible thickened natural gas Injection for enhanced Oil Recovery," Energy & Fuels, Vol. 31, Issue 5, pp. 4951-4965, 2017.
- [23]. Kubala G. and Mackay B., "Set of carbon dioxide-based fracturing liquids," US Patent 7, 726, 404, 2010.
- [24]. Tapriyal D. and Enick R., "Poly(vinyl acetate), Poly(1-O-(vinyl-oxo) ethyl-2,3,4,6-tetra Oacetyl-D- glucopyranoside) and Amorphous poly (Lactic acide) are the Most CO₂-soluble Oxygenated Hydrocarbone-Based Polymers," Journal of supercritical Fluids, Vol. Issue 3, 46, pp. 252-257, 2008.
- [25]. Lang S., Frerich S. and Pollak S., "Solubility of pressurised carbon dioxide in three different poly dimethyl siloxanes," Fluid Phase Equilibria Journal, Vol. 491, pp. 12-22, 2019.
- [26]. Dhuwe A., Klara A., Sullivan J. and Enick R., "Assessment of solubility and viscosity of ultra-high molecular weight polymeric thickeners in ethane, propane and butane for miscible EOR," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 145, pp. 266-278, 2016.
- [27]. Mutailipu M., Jiang L., Liu X. and Zhao J., "CO₂ and alkane minimum miscible pressure estimation by the extrapolation of interfacial tension," Fluid Phase Equilibria Journal, Vol. 494, pp. 103-114, 2019.
- [28]. Ghorbani M., Gandomkar A., Momeni and Safavi S., "Modified vanishing interfacial tension (vit) test for CO₂-Oil minimum miscibility pressure (mmp) measurement," Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 20, pp. 92-98, 2014.
- [29]. Joung S., Park J. and Kim S., "High-pressure phase behavior of polymer solvent systems with addition of supercritical CO₂ at temperatures from 323.15 K to 503.15 K," Journal of Chemical & Engineering Data, Vol. 47, Issue 2, pp. 270-273, 2002.
- [30]. Iezzi A., Enick R. and Brady J., "Direct viscosity enhancement of carbon dioxide," 1989.