

مطالعه تجربی و بررسی ابعادی جداساز سرچاهی دوفازی

مهدی فدائی، محمدجواد عامری*، علی سلمانی و کیوان قربان‌پور

دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۸

چکیده

در این پژوهش هدف بررسی آزمایشگاهی عملکرد جداساز دوفازی مایع-گاز است. به همین منظور، جداساز دوفازی مایع-گاز با استفاده از روابط تجربی موجود طراحی گردید. در مدل‌های نیمه‌تجربی علاوه بر فرض‌های ساده شونده، تأثیر منحرف‌کننده ورودی جداساز بر فرآیند جدایش نادیده گرفته شده و قطر قطرات فاز ثانویه یک مقدار ثابت تعیین شده است که تمامی قطرات مایع در بالاترین نقطه جداساز قرار دارند و سپس از آن نقطه سقوط می‌کنند. مفاهیم مربوط به جریان آشفته در این روش مدنظر قرار نگرفته است. در این پژوهش، چرخه جریانی دوفازی مایع-گاز طراحی و ساخته شد. در چرخه جریانی ساخته شده، آب به‌عنوان سیال مایع و هوا به‌عنوان سیال گاز مورد استفاده قرار گرفتند. سیال آب و هوا در نقطه اختلاط که یک سه‌راهی 45° است، تشکیل جریان دوفازی داده و پس از طی مسافتی معادل با ۱۶۰ برابر قطر خط لوله، جریان توسعه یافته تشکیل می‌شود. محدوده دبی جریان آب و هوا به‌ترتیب برابر با $0-2/5 \text{ m}^3/\text{h}$ و $0-100$ است. فشار عملیاتی حداکثر 202450 Pa و دمای عملیاتی برابر با دمای محیط است. برای بررسی عملکرد جداساز دوفازی گاز-مایع، در خروجی گاز جداساز جریان گاز خروجی از نظر کسر حجمی آب و حداکثر قطر قطره‌های آب بررسی شدند. سپس با استفاده از نتایج تجربی به‌دست آمده و استفاده از آنالیز ابعادی رابطه کلی عملکرد جداساز دوفازی گاز-مایع برحسب کسر حجمی فاز مایع در گاز خروجی از جداساز تعیین گردید. از مهم‌ترین دست‌آوردهای این پژوهش فراهم نمودن بستر لازم جهت طراحی جداسازهای دوفازی گاز-مایع برای سرچاه با توجه به شرایط تولید است.

کلمات کلیدی: مطالعه، تجربی، ابعادی، جداساز سرچاهی، دوفازی.

مقدمه

یک جداساز کوچک مقیاس آغاز شد و به بررسی کارایی و شیوه طراحی جداسازهای چندفازی بزرگ مقیاس به‌روشنی دینامیک سیال محاسباتی ختم شد. نتایج کار این گروه به‌خوبی نشان داد که بهترین جدایش بین فازها زمانی اتفاق می‌افتد که پدیده حمل مجدد مایع توسط فاز گاز صورت نگیرد و در کنار آن جریان در قسمت جدایش گرانشی، به‌صورت

ویلیکسون و همکارانش [۱]، یکی از کامل‌ترین فرآیندهای طراحی جداساز را به‌کمک روش دینامیک سیال محاسباتی و روش‌های آزمایشگاهی انجام دادند. روند کاری آنها، از ساخت مدل آزمایشگاهی

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی: ameri@aut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2021.4073.2844)

دیواره می‌رسند، گیر افتاده و انرژی آنها به فاز پیوسته گاز انتقال پیدا می‌کند و هیچ پدیده حمل مجدد گاز به چشم نمی‌خورد. نتایج این روند حل برای تعیین دبی کاری مناسب جداساز با نتایج آزمایشگاهی هم‌خوانی مناسبی دارد. اما این روش در تعیین کارایی جداساز، دارای خطای بسیار بزرگی نسبت به نتایج آزمایشگاهی است. همان‌طور که ذکر شد، آن‌گونه به نظر می‌رسد که این روش در تعیین کارایی جداساز دچار مشکل بزرگی است. با این وجود، عده‌های ارائه شده توسط پور احمدی لاله خطای بسیار زیادی را نشان می‌دهد که علت این ضعف را می‌توان در شیوه مدل‌سازی جست‌وجو کرد. در روش دوم از کوپل دو معادله فاز گسسته و مدل حجم‌سیال برای شبیه‌سازی جریان دو فاز درون جداساز بهره گرفته شده است. از مدل حجم‌سیال برای شبیه‌سازی جریان دو فاز در ابعاد ماکروسکوپی بهره گرفته شده است. در مرحله بعد، فاز گسسته نفت از ورودی جداساز تزریق شده است و مسیر حرکت آن تا خروجی گاز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مدل، به جز در موارد بسیار محدود، چه در زمینه تعیین کارایی جداساز و چه در زمینه تعیین دبی مناسب کاری جداساز، بسیار به نتایج آزمایشگاهی نزدیک است. در این روش نیز برای شبیه‌سازی اثر توربولانسی از مدل کا-اِپسیلون بهره گرفته شده است. پور احمدی لاله و همکارانش [۵]، به بررسی جریان درون جداساز سرچاهی به‌روش دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. ابعاد این جداساز، همان ابعاد به‌کار برده شده در مقاله هانسن و همکارانش است. هدف از انجام این بررسی، تعیین کارایی این جداساز پس از افزایش دبی ورودی آب به درون جداساز در نظر گرفته شده است. در مقاله دیگر ارائه شده توسط پور احمدی لاله [۶]، برای حل مشکل کارایی جداساز در خروجی نفت، پیشنهادهایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در دسته اول این پیشنهادها، مکان و تعداد صفحات مشبک و همچنین، ارتفاع سطح

کاملاً یکنواخت و دور از تلاطم باشد. البته ضعف بزرگ در این پژوهش، این است که درصد باز بودن صفحات مشبک شده در مدل‌های آزمایشگاهی و مدل‌های دینامیک سیال محاسباتی تفاوت داشتند و این پدیده از دقت مقایسه بسیار کاسته بود. کلیه مدل‌های استفاده شده در این مطالعه توسط نرم‌افزار فونیکس ۱/۵ تحلیل شده است. از مدل کا-اِپسیلون برای مدل کردن اثرات اغتشاش استفاده شده است، اما سایر خصوصیات روند تحلیل در این مطالعه ارائه نشده است. لی و همکارانش [۲]، برای حل مشکلات عملیاتی موجود در جداسازها چندین پیشنهاد عملیاتی را ارائه دادند و مؤثر بودن این پیشنهادها را از طریق روش دینامیک سیال محاسباتی ارزیابی کردند. مش‌بندی این مدل در محیط نرم‌افزار گمبیت انجام و تحلیل آن به کمک نرم‌افزار فلونت صورت گرفته است. هانسن [۳]، جریان دو فازی داخل جداساز افقی را شبیه‌سازی کرده بود. توزیع یک قطره گوسی فرض شده در نظر گرفته شده بود و شبیه‌سازی با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن انعقاد انجام شد. عملیات جدایش، تحت تأثیر مدل بزرگ شدن قطره برای در نظر گرفتن پدیده انعقاد شتاب گرفت. مؤلفان نتیجه گرفتند که دینامیک سیالات محاسباتی بهتر از بقیه روش‌ها می‌تواند پیش‌بینی‌ها را انجام دهد. پور احمدی لاله و همکاران [۴]، از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان درون چهار جداساز در ابعاد آزمایشگاهی بهره گرفتند. مدل توربولانسی مورد استفاده در این شبیه‌سازی، مدل شناخته شده کا-اِپسیلون است. در این مطالعه از دو روش متفاوت برای شبیه‌سازی جریان درون جداساز دو فاز بهره گرفته شده است. در روش اول از مدل چند فازی مدل فاز گسسته برای مسیریابی قطرات نفت درون فاز پیوسته گاز استفاده شده است. در روند حل، از یک دیواره بدون اصطکاک برای شبیه‌سازی سطح تماس نفت و گاز بهره گرفته شده است. هنگامی که قطرات نفت به این

و مدل حجم‌سیال در نرم افزار فلوننت استفاده شد. برای قرار دادن مدل فاز گسسته حجم‌سیال، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی از رفتار کلی فازی جریان سیال با استفاده از مدل حجم سیال، قطرات نفت و آب به نازل ورودی تزریق شده و توسط مدل فاز گسسته ردیابی شدند. با این مطالعه، نشان داده شد که اگرچه روش مدل فاز گسسته برای پیش‌بینی سرعت‌های اولیه موفقیت‌آمیز بود، با این حال نمودار تولیدی برای بازدهی جدایشی در مقابل سرعت گاز واقعی نبود. در واقع در روش مدل فاز گسسته، فاز پیوسته سیال در فرض‌های مدل در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین، اثر متقابل گاز-مایع و مخصوصاً اثر متقابل دینامیکی بین قطرات مایع و فاز پیوسته مایع را نمی‌توان در نظر گرفت. روش مدل فاز گسسته-حجم سیال نسبت به روش مدل فاز گسسته به دلیل آنکه مدل فاز پیوسته مایع را در محاسباتش در نظر می‌گرفت، دارای خطای کمتری بود. از نقطه نظر عملی، داده‌های بازدهی جدایشی به‌دست آمده و نمودارها صحیح بودند و عملکرد ضعیف روش مدل فاز گسسته، مانند جدایش عالی در سرعت‌های بیش‌تر از سرعت انتقال اولیه، کاملاً از بین رفت. تطابق خوبی بین رفتار شبیه‌سازی جدایش فازی و داده‌های آزمایشی و مشاهده‌ها در بیش‌تر مطالعات برقرار بود. در شبیه‌سازی توسعه یافته دینامیک سیالات محاسباتی، برای اولین بار، هم انعقاد قطره و هم جدایش آن‌ها مدل‌سازی شدند و نتایج نشان‌دهنده این بودند که با این که به‌ندرت انعقاد قطره اتفاق می‌افتاد، جدایش قطره‌ها به‌خصوص در سرعت‌های بالا اتفاقی عادی بود. به‌علاوه، توزیع اندازه ذره‌هایی که از خروجی گاز در جداسازهای مختلف خارج می‌شوند، اندازه‌گیری شده و نتایج نشان‌دهنده این بودند که حذف‌کننده‌های بخار ممکن است که در جداکننده‌های افقی نسبت به جداکننده‌های عمودی، دارای بازدهی بیشتری باشند.

تماس نفت و گاز مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که هیچ‌یک از این تغییرات بر کیفیت نفت خروجی از جداساز تأثیر به‌سزایی ندارد. از این رو، در دسته دوم پیشنهادها طراحی جداساز جدید با ابعاد مناسب به‌روش مونری و سروک، در دستور کار قرار گرفته است. در این طراحی جدید، کیفیت سیال نهایی در خروجی نفت به‌شدت بهبود یافته است. در این مقاله از مدل شناخته شده کا-ا‌پسیلون که برای بررسی جریان متلاطم استفاده شده است. همچنین، از ترکیب دو مدل فاز گسسته و مدل حجم‌سیال برای شبیه‌سازی جریان پایا بهره گرفته شده است. اخیراً، پوراحمدی لاله [۷]، روش جزئی‌تری برای استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به‌عنوان ابزاری برای مدل کردن و شبیه‌سازی کارایی جداسازهای چندفازی ارائه کرد. مدل‌های توسعه یافته دینامیک سیالات محاسباتی، جنبه‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی جداسازهای چندفازی را تأمین کردند. سه تحقیق اصلی مطالعاتی مبنی بر دینامیک سیالات محاسباتی در حین این پروژه تحقیقاتی انجام شد. اصلی‌ترین ویژگی‌ها و نتایج این تحقیقات به شکل زیر ارائه شد. به منظور شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی جداساز دو فازی در مقیاس صنعتی مقاله‌ای که توسط مونری و سروک [۸]، با عنوان مطالعه تحلیلی بازدهی جدایش مایع بخار^۱ ثبت شده از مدل آزمایشی میدان گازی پرایم وست^۱ به‌عنوان پایه‌ای برای مدل دینامیک سیالات محاسباتی برای تأمین داده‌های آزمایشی استفاده شد. دو روش در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی اجرا شد. استراتژی کلی در روش اول به این صورت بود که در فرآیند مدل‌سازی چندفازی برای مدل‌سازی فاز گسسته تنها بخش سیال بخار جداساز شبیه‌سازی شده بود. در این روش، سطح بین گاز و مایع، دیواره بدون اصطکاکی در نظر گرفته شده بود که قطراتی که با آن برخورد می‌کردند را در خود به دام می‌انداخت. در روش دوم، ترکیب مؤثری از مدل‌های چندفازی مدل فاز گسسته

آزمایشگاهی برای دریافت اطلاعات آزمایشگاهی صحیح بیش از پیش احساس می‌شود. هدف این پژوهش هم پیشبرد همین مورد است. هر یک از روش‌های طراحی جداساز مجموعه‌ای از ابعاد متفاوت را ارائه می‌دهند که در نهایت ابعاد بهینه باتوجه به ضریب لاغری تعیین می‌شود. این روش‌های متفاوت مقادیر بسیار متفاوتی را برای این ضریب نیز ارائه داده‌اند که عملاً استفاده از این روش را با هاله‌ای از ابهام روبه‌رو می‌سازد. تأثیر منحرف‌کننده‌های داخلی جداساز بر فرآیند جدایش نادیده گرفته شده است. قطر قطرات فاز ثانویه یک مقدار ثابت و از پیش تعیین شده است. در حل مسئله با استفاده از این روش این گونه فرض شده است که تمامی قطرات مایع در بالاترین نقطه جداساز قرار دارند و سپس از آن نقطه سقوط می‌کنند. درحالی‌که وجود منحرف‌کننده ورودی باعث می‌شود که تکانه ذرات مایع به سرعت کم شده و فقط تعداد کمی از این قطرات جدایش گرانشی خود را از بالاترین نقطه جداساز شروع کنند. مفاهیم مربوط به جریان آشفته در این روش مد نظر گرفته نشده است.

مراحل انجام آزمایش

در شکل ۱ ابعاد واقعی جداساز دوفازی مایع-گاز نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است ورودی جداساز به‌صورت زانویی 90° است و در قسمت انتهایی جداساز دارای خروجی‌های گاز و مایع است. برای کنترل سطح مایع از ارتفاع‌سنج استفاده گردید. همچنین، گیج‌های فشار و دما برای تنظیم فشار و دمای جداساز حین عملیات استفاده شد. تصویر واقعی جداساز دوفازی در شکل ۲ نشان داده شده است.

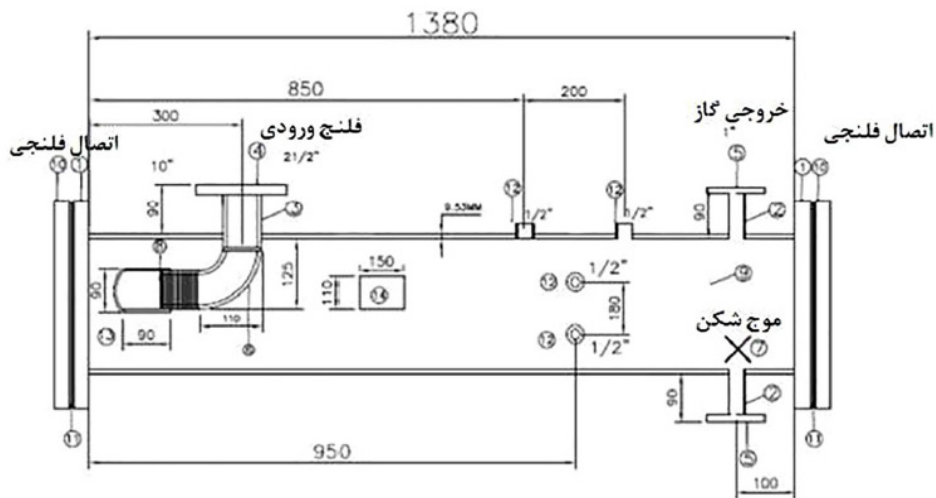
مدار جریان دوفازی (مایع-گاز)

جهت بررسی عملکرد جداساز دوفازی مایع-گاز مدار جریان دوفازی (مایع-گاز) طراحی و ساخته شد.

این تحقیق همچنین در مطالعه پوراحمدی لاله و همکاران [۴]، مشخص شده است. غفار خواه و همکاران [۹]، با استفاده از دو روش تعیین ابعاد تجربی آرنولد استوارت و مونری و سروک ابعاد جداساز چند فاز را تعیین نمودند. سپس با ترکیب دو مدل حجم‌سیال و مدل فاز گسسته به‌همراه مدل اغتشاش کا-پسیلون برای بررسی رفتار سیالات و کارایی جداسازی در جداساز استفاده کردند و برای مدل کردن سرعت سیال در فاز دیگر از مدل حرکت لحظه‌ای مجزا استفاده کردند. خروجی دینامیک سیالات محاسباتی نشان داد که اندازه سرعت و مقدار انرژی جنبشی در روش تجربی مونری و سروک از آرنولد استوارت بالاتر است و مقدار حمل مایع در جداساز مونری و سروک افزایش یافت. همچنین، جدایش نامناسب نفت-آب پیش‌بینی شده توسط جداساز مونری و سروک با استفاده از نتایج شبیه‌سازی نشان داده شد. به‌علاوه، خروجی شبیه‌سازی حاکی از بازدهی بالاتر جداساز آرنولد استوارت در قسمت پخش آب و نفت دارد. همچنین، انرژی جنبشی ذرات در فاز گاز با استفاده از روش مدل فاز گسسته تحلیل شد و در انتها پیشنهاد شد که بهترین روش تعیین ابعاد جداساز مقایسه روش نیمه تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی است.

بحثی بر کمبودها و مشکلات مدل‌های نیمه تجربی

مدل‌های نیمه تجربی از شرایط و فرض‌های ساده شونده‌ای استفاده می‌کنند که نتایج حاصل از آن‌ها را تا حدودی غیر قابل اعتماد می‌کند. بدین منظور شرکت‌های معتبر طراحی جداساز همواره از روش‌های آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی طراحی‌های حاصل از این روش و تعیین حدود پارامترهای مجهول این روش‌ها استفاده می‌کنند. لازم به ذکر است که این نوع از کارهای آزمایشگاهی بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر است و از طرف دیگر، هیچ شرکتی نتایج حاصل از این کارها را منتشر نمی‌کند. بنابراین لزوم وجود یک واحد پیش‌تاز



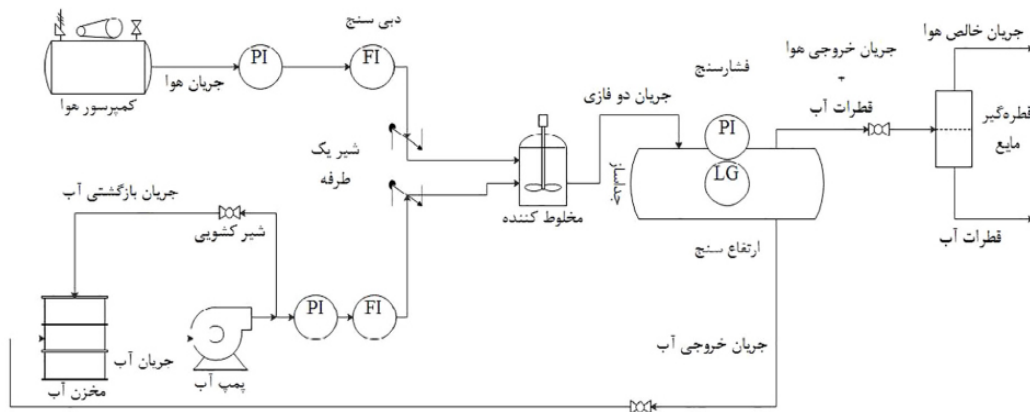
شکل ۱ جداساز دوفازی مایع-گاز طراحی شده



شکل ۲ تصویر واقعی جداساز دوفازی

به فازهای تشکیل دهنده جدا می‌شود. جداسازی اولیه توسط منحرف کننده ورودی انجام می‌شود و جداسازی ثانویه توسط نیروی گرانش انجام می‌شود. جداساز دوفازی گاز-مایع در حالت‌های مختلف که ارتفاع آب چند درصد ارتفاع کل جداساز باشد (۱۰، ۲۰، ...، ۹۰٪ ارتفاع کل جداساز) در دبی‌های مختلف مایع و گاز بررسی شد. در خروجی گاز با استفاده از یک قطره گیر و فیلتر که با توجه به کاتالوگ دستگاه که حداقل قطر قطرات مایع برابر با $20 \mu\text{m}$ را جذب می‌نماید. جهت بررسی عملکرد قطره گیر همراه با فیلتر، قطره گیر همراه با فیلتر بر روی خط جریان گاز نصب شد و با استفاده از سرنگ به داخل جریان گاز قطرات آب تزریق شد.

مدار جریان دوفازی طراحی و ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. جریان تک فاز آب به وسیله پمپ از مخزن آب به مدار جریان پمپ می‌شود و پس از اندازه گیری دبی آن توسط روماتر آب و تعیین دما و فشار جریان تک فاز آب، با جریان گاز ورودی از کمپرسور هوا در نقطه اختلاط که یک سه راهی 45° است تشکیل جریان دوفازی می‌دهد. جریان دوفازی پس از طی مسیری معادل با ۱۶۰ برابر قطر خط لوله جریان، توسعه یافته می‌گردد. جریان هوا نیز توسط کمپرسور هوا تأمین می‌شود و قبل از ورود به نقطه اختلاط دبی، دما و فشار آن توسط روماتر هوا، گیج دما و فشار اندازه گیری می‌شود. جریان دوفازی گاز و مایع پس از ورود به جداساز دوفازی و برخورد به منحرف کننده ورودی



شکل ۳ مدار دوفازی (مایع-گاز) طراحی و ساخته شده

مشابه از نظر دبی آب، دبی هوا، سطح مایع، دما و فشار عملیاتی تکرار شد و نتایج با هم مقایسه شدند. روابط تئوری مربوط به محاسبه طول مؤثر جدسازی در ادامه آورده شده‌اند.

محاسبه طول مؤثر جداساز دوفازی مایع-گاز

برای محاسبه ضریب درگ و سرعت حد از روابط ۱، ۲ و ۳ استفاده می‌شود. در روش زیر با استفاده از تکرار و حدس اولیه برای ضریب درگ، مقادیر همگرا شده برای ضریب درگ و سرعت حد به دست می‌آیند [۱۱].

مرحله اول: حدس اولیه برای ضریب درگ و قرار دادن در رابطه ۱

$$V_t = 0.00199 \left[\left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right) \left(\frac{d_m}{C_d} \right) \right]^{0.5} \quad (1)$$

مرحله دوم: محاسبه عدد رینولدز ذره حمل شده توسط جریان گاز (قطرات آب) با استفاده از رابطه ۲:

$$Re = 0.0049 \frac{\rho_g d_m v}{\mu} \quad (2)$$

مرحله سوم: محاسبه دوباره ضریب درگ با استفاده از رابطه ۳:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{Re^{0.5}} + 0.34 \quad (3)$$

و سپس محاسبه دوباره سرعت حد با استفاده از رابطه ۱ و این مراحل تا رسیدن به همگرایی سرعت حد و ضریب درگ ادامه پیدا می‌کند و در نهایت ضریب درگ و سرعت حد به دست می‌آیند.

پس از سه بار انجام آزمایش و اندازه‌گیری وزن قطره‌گیر همراه با فیلتر راندمان عملیاتی قطره گیر برابر با ۹۰٪ تعیین شد و مشاهده شد که حداقل ۹۰٪ قطرات آب موجود در جریان گاز را به دام می‌اندازد و می‌توان با استفاده از عکس‌برداری آنلاین قطر قطرات آب موجود در جریان هوا را اندازه‌گیری کرد و همچنین، کسر حجمی قطرات آب موجود در جریان هوا هم به صورت وزنی و هم به صورت عکس‌برداری تعیین می‌شود و بررسی‌ها نشان داد که میزان کسر حجمی اندازه‌گیری شده توسط روش وزنی و عکس‌برداری تفاوت بسیار ناچیزی دارند. تصویر واقعی مدار جریان دوفازی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، جریان دوفازی گاز-مایع پس از وارد شدن به جداساز دوفازی به جریان مایع و گاز جدا می‌شود. جریان آب برگشتی به مخزن آب برگشته و جریان گاز خروجی جهت اندازه‌گیری کسر حجمی آب و قطر قطرات مایع موجود در آن به داخل قطره‌گیر همراه با فیلتر هدایت می‌شود. برای اندازه‌گیری وزن قطرات گیر افتاده در قطره‌گیر همراه با فیلتر از ترازو با دقت ۰/۰۱ g اندازه‌گیری شد و عکس‌برداری با سیستم تصویر برداری با قابلیت زوم حداکثر ۱۰ برابر و دوربین با مشخصات ۳۰ فریم در ثانیه انجام شد. هرکدام از آزمایش‌ها سه بار در شرایط کاملاً



شکل ۴ تصویر واقعی چرخه جریان دو فازی

روش قابل استفاده است. در ادامه انجام آنالیز ابعادی برای جداساز دو فازی گاز-مایع به صورت جزئی بیان شده است. تمام پارامترهای درگیر در مسئله از جمله متغیرهای وابسته و مستقل در **جدول ۱** نشان داده شده‌اند. با توجه به جدول ۲ تعداد متغیرهای مستقل برای جداساز دو فازی گاز-مایع برابر با ۱۷ عدد تعیین می‌شود یا به عبارت دیگر $m=17$. در **جدول ۲** ابعاد اصلی مسئله برای جداساز دو فازی گاز-مایع بیان شده است. با توجه به **جدول ۲** مشاهده می‌شود که تعداد ابعاد اصلی مسئله برابر با ۴ عدد است یا به عبارتی $n=4$. پس از بیان کردن تمام متغیرهای مستقل و وابسته به صورت ابعاد اصلی از بین پارامترهای مستقل و وابسته به تعداد ابعاد اصلی مسئله پارامتر تکرار شونده انتخاب می‌شود به صورتی که پارامترهای انتخاب شده دارای تمامی ابعاد اصلی مسئله باشند. پارامترهای انتخاب شده عبارت‌اند از سرعت حد، دما، چگالی گاز و دبی گاز. باید به تعداد اختلاف پارامترها و ابعاد اصلی مسئله گروه‌های بدون بعد انتخاب شوند. گروه‌های بدون بعد به دست آمده در **جدول ۳** نشان داده شده‌اند. در **شکل ۳** نمودار حاصل ضرب گروه‌های بی‌بعد $\pi_7 * \pi_8$ برحسب کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز رسم شده است. برای **شکل ۳** مقدار پارامتر بی‌بعد Q_G/Q_L حداکثر برابر با ۴۰ است.

ضریب درگ به دست آمده در این مرحله برای محاسبه طول مؤثر و قطر جداساز در رابطه ۴ استفاده می‌شود.

$$D^* L_{\text{eff}} = 420 * \left(\frac{TZQ_g}{p} \right) \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{0.5} \quad (4)$$

رابطه ۴ رابطه قید ظرفیت گاز است. قید ظرفیت مایع به صورت رابطه ۵ است.

$$D^2 L_{\text{eff}} = \frac{t_f Q_L}{0.7} \quad (5)$$

با استفاده از رابطه ۴ طول مؤثر برای جداساز برحسب ظرفیت گاز تعیین شد. سپس در سطح مایع برابر با ۱۰٪، ۲۰٪، و ۹۰٪ کل ارتفاع جداساز، کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی و حداکثر قطر قطرات آب تعیین شد. برای اندازه‌گیری قطر قطرات آب در جریان گاز خروجی، از سیستم تصویربرداری با قابلیت زوم حداکثر ۱۰ برابر و دوربین با قابلیت فیلم‌برداری ۳۰ فریم در ثانیه استفاده شد. با توجه به پارامترهای جریان دو فازی (آب و هوا) در فشار ۲ bar و استفاده از بکر مشخص شد که الگوی جریان حلقوی در خط جریان برقرار است. از رابطه ۶ برای تعیین کسر حجمی هوا در جریان دو فازی (آب و هوا) استفاده شد [۱۰].

$$\alpha = \left[1 + \frac{(1-\chi)}{\chi} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) S \right]^{-1} \quad (6)$$

آنالیز ابعادی

یکی از جنبه‌های بسیار مهم و قابل توجه در آنالیز ابعادی این است که این روش زمانی که کلیه روش‌های دیگر قابل استفاده نباشند این

جدول ۱ متغیرهای مستقل و وابسته برای جداساز دوفازی گاز-مایع

متغیرهای مستقل											
متغیر	واحد	تعریف	متغیر	واحد	تعریف	متغیر	واحد	تعریف	متغیر	واحد	تعریف
D	m	قطر جداساز	Q_g	m^3/s	دبی گاز	P	Pa	فشار عملیاتی	v_t	m/s	سرعت حد
L_{eff}	m	طول مؤثر	Q_L	m^3/s	دبی مایع	T	$^{\circ}C$	دما	C_d	----	ضریب درگ
ρ_g	kg/m^3	چگالی گاز	ρ_L	kg/m^3	چگالی مایع	d_m	m	قطر قطره مایع	Z	----	ضریب تراکم‌پذیری
t_r	s	زمان ماند	μ_L	Pa.s	ویسکوزیته مایع	μ_g	Pa.s	ویسکوزیته گاز	β	----	کسر حجمی آب در خروجی گاز
H_L	----	کسر جزئی آب در خروجی مایع									

جدول ۲ ابعاد اصلی مسئله

ابعاد اصلی			
بعد	تعریف	بعد	تعریف
M	جرم	T	دما
L	طول	t	زمان

جدول ۳ گروه‌های بدون بعد مسئله

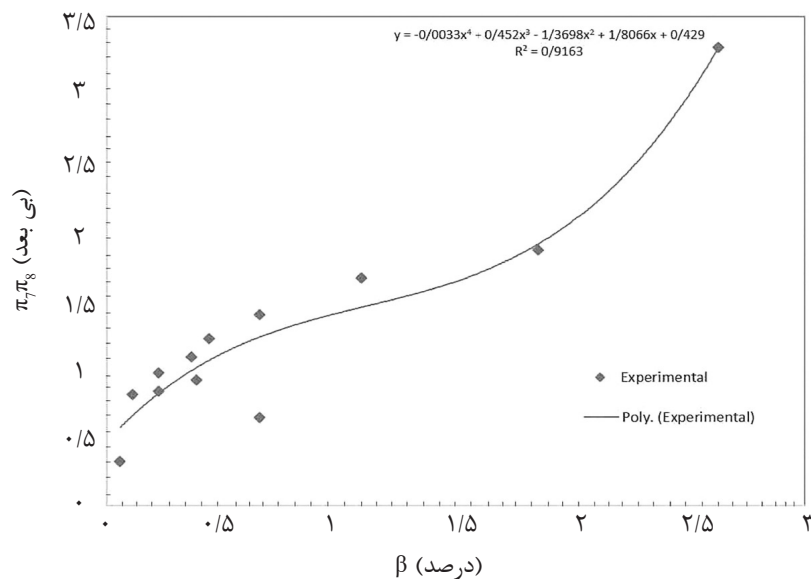
π_1	$\mu_L * Q_g / \rho_g * v_t^2$	π_4	ρ_L / ρ_g	π_7	$L_{eff} * \sqrt{v_t} / \sqrt{Q_g}$
π_2	$\mu_g * Q_g / \rho_g * v_t^2$	π_5	Q_L / Q_g	π_8	$D * \sqrt{v_t} / \sqrt{Q_g}$
π_3	$P / \rho_g * v_t^2$	π_6	$t_r * v_t^{3/2} / \sqrt{Q_g}$	π_9	$d_m * \sqrt{v_t} / \sqrt{Q_g}$

طی‌شده برای قطرهای که در بالاترین ارتفاع جداساز قرار دارد تا به سطح مایع برسد افزایش یافته و مسلماً به طول بیشتری جهت جداسازی نیاز دارد. با توجه به **جدول ۴** کاهش سطح مایع در جداساز و افزایش دبی گاز باعث افزایش طول مؤثر جهت جداسازی قطره‌های مایع با قطر μm ۱۰۰ می‌شوند. مبنای محاسبات تئوری در **جدول ۴** برای قطره‌های مایع با قطر μm ۱۰۰ می‌باشد. همان‌طور که در **جدول ۴** دیده می‌شود برای حالتی که سطح مایع ۱۰٪ ارتفاع کل جداساز باشد در فشار ۲۰۲۴۵۰ Pa و دبی آب و گاز به ترتیب برابر با ۱ و $20 \text{ m}^3/h$ باشند، طول مؤثر محاسبه شده برای جداسازی قطرات آب با قطر μm ۱۰۰ برابر با ۹۴ cm به‌دست می‌آید و با توجه به اینکه خروجی گاز در فاصله ۸۰ cm از ورودی جریان دوفازی قرار گرفته است به همین دلیل قطرات آب با قطر بیشتر از μm ۱۰۰ (برابر با $315 \mu m$) در خروجی گاز مشاهده می‌شوند.

همان‌طور که از **شکل ۳** مشخص است اگر حاصل ضرب گروه‌های بی بعد $\pi_7 * \pi_8$ از مقدار $2/22$ بیشتر شود کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز دوفازی گاز-مایع از ۲٪ بیشتر می‌شود. با استفاده از نمودار **شکل ۵** می‌توان برای جداساز دوفازی گاز-مایع با استفاده از حاصل ضرب گروه‌های بدون بعد $\pi_7 * \pi_8$ عملکرد جداساز را در فرآیند جداسازی فازهای گاز و مایع بررسی کرد.

تفسیر نتایج تجربی

با استفاده از رابطه ۴ طول مؤثر جداساز مایع-گاز برای حالت‌هایی که سطح مایع برابر با ۱۰٪، ۵۰٪ و ۹۰٪ ارتفاع کل جداساز باشد محاسبه شد که در **جدول ۴** این نتایج نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در **جدول ۴** نشان داده شده است هرچقدر سطح مایع در جداساز دوفازی مایع-گاز پایین‌تر باشد طول مؤثر جداسازی برای قطره‌های با قطر μm ۱۰۰ بیشتر می‌گردد به این صورت که مسافت



شکل ۵ نمودار عملکرد جداساز دوفازی گاز-مایع برای حداکثر برابر با ۴۰

جدول ۴ نتایج تجربی برای جداساز شکل ۱

ارتفاع مایع (%)	فشار (Pa)	دما (K)	چگالی گاز	چگالی آب	ضریب تراکم‌پذیری	ضریب درگ	طول موثر (m)	حداکثر قطر قطره مایع خروجی در خروجی گاز (μm)
۱۰	۱۹۹۹۴۸	۲۹۸	۲/۳۵	۹۹۸	۰/۹۹	۷/۷۲	۰/۹۴	۳۱۵
۱۰	۲۴۸۲۱۲	۲۹۸	۲/۹۶	۹۹۸	۰/۹۹	۷/۷۲	۰/۹۶	۴۲۸
۵۰	۱۹۹۹۴۸	۲۹۸	۲/۳۵	۹۹۸	۰/۹۹	۷/۷۲	۰/۵۳	۱۲۹
۵۰	۲۴۸۲۱۲	۲۹۸	۲/۹۶	۹۹۸	۰/۹۹	۷/۷۲	۰/۹۴	۱۳۸
۵۰	۱۹۹۹۴۸	۲۹۸	۲/۳۵	۹۹۸	۰/۹۹	۷/۷۲	۰/۹۸	۴۵۰
۹۰	۱۹۹۹۴۸	۲۹۸	۲/۳۵	۹۹۸	۰/۹۹	۷/۷۲	۰/۱۰	<۶۲

جریان دوفازی نصب می‌شود قطرات با قطر $222 \mu\text{m}$ در خروجی گاز مشاهده شدند. درحالتی که سطح مایع ۹۰٪ ارتفاع کل جداساز دوفازی مایع-گاز و فشار عملیاتی برابر با 202450 Pa و دبی آب و مایع به ترتیب برابر با ۱ و $20 \text{ m}^3/\text{h}$ باشند طول موثر برای جداسازی قطرات با قطر $100 \mu\text{m}$ برابر با ۱۰ cm تعیین می‌شود که در خروجی گاز با فاصله ۸۰ cm از ورودی جریان دوفازی قطرات با قطر کمتر از $62 \mu\text{m}$ مشاهده شدند و در خروجی گاز با فاصله ۴۰ cm از ورودی جریان دوفازی قطرات آب با قطر حداکثری برابر با $62 \mu\text{m}$ مشاهده شدند. مشاهده می‌شود که با افزایش سطح آب از ۵۰٪ کل ارتفاع جداساز دوفازی مایع-گاز به ۹۰٪، قطر

و به همین ترتیب وقتی خروجی گاز در فاصله ۴۰ cm از ورودی نصب می‌شود قطرات با قطر بزرگتر از $315 \mu\text{m}$ (برابر با $470 \mu\text{m}$) در خروجی گاز مشاهده می‌شوند. درحالتی که سطح مایع ۵۰٪ ارتفاع کل جداساز مایع-گاز و فشار عملیاتی برابر با 202450 Pa و دبی آب و مایع به ترتیب برابر با ۱ و $20 \text{ m}^3/\text{h}$ باشند طول موثر جداسازی برای قطرات با قطر $100 \mu\text{m}$ برابر با ۵۳ cm تعیین می‌شود که در خروجی گاز با فاصله ۸۰ cm از ورودی جریان دوفازی قطرات با قطر $129 \mu\text{m}$ مشاهده شدند که وجود قطرات با قطر بزرگتر از $100 \mu\text{m}$ به دلیل پدیده حمل مجدد قطرات مایع توسط جریان گاز می‌باشد و درحالتی که خروجی گاز در فاصله ۴۰ cm از ورودی

برای قطره‌ای که در بالاترین ارتفاع جداساز قرار دارد تا به سطح مایع برسد افزایش یافته و مسلماً به طول بیشتری جهت جداسازی نیاز دارد. همچنین، کاهش سطح مایع در جداساز و افزایش دبی‌گاز باعث افزایش طول مؤثر جهت جداسازی قطره‌های مایع با قطر $100 \mu\text{m}$ می‌شوند. در این مطالعه نشان داده شد که با افزایش سطح آب از 50% کل ارتفاع جداساز دوفازی مایع-گاز به 90% ، قطر حداکثری قطرات آب به‌طور متوسط 72% کاهش می‌یابد و با کاهش سطح مایع از 50% کل ارتفاع جداساز دوفازی مایع-گاز به 10% ، قطر حداکثری قطرات آب به‌طور متوسط 211% افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج پژوهش تجربی و آنالیز ابعادی، مشخص است اگر حاصل ضرب گروه‌های بی بعد $\pi_7 * \pi_8$ از مقدار $2/22$ بیشتر شود کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز دوفازی گاز-مایع از 2% بیشتر می‌شود. با استفاده از نمودار شکل ۳ می‌توان برای جداساز دوفازی گاز-مایع با استفاده از حاصل ضرب گروه‌های بدون بعد $\pi_7 * \pi_8$ عملکرد جداساز را در فرآیند جداسازی فازهای گاز و مایع بررسی کرد. از مهم‌ترین دست‌آوردهای این پژوهش فراهم نمودن بستر لازم جهت طراحی جداسازهای دوفازی گاز-مایع برای سرچاه با توجه به شرایط تولید می‌باشد.

علائم و نشانه‌ها

- D : قطر جداساز (m)
 ρ_g : چگالی گاز (Kg/m^3)
 L_{eff} : طول مؤثر جداساز (m)
 ρ_l : چگالی مایع (Kg/m^3)
 T : دمای جداساز (K)
 C_D : ضریب درگ ----
 Z : ضریب تراکم‌پذیری گاز ----
 d_m : قطر قطره مایع (Micron)
 P : فشار جداساز (Pa)
 Q_g : دبی گاز (m^3/s)
 V_f : سرعت حد (m/s)

حداکثری قطرات آب به‌طور متوسط 72% کاهش می‌یابد و با کاهش سطح مایع از 50% کل ارتفاع جداساز دوفازی مایع-گاز به 10% ، قطر حداکثری قطرات آب به‌طور متوسط 211% افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که با افزایش دبی‌گاز در جریان ورودی به جداساز دوفازی مایع-گاز کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که با افزایش دبی فاز گاز از $20 \text{ m}^3/\text{h}$ تا $40 \text{ m}^3/\text{h}$ درحالتی که جداساز تا نیمه از آب پر باشد و فشار عملیاتی نیز برابر با 202450 Pa و دبی آب برابر با $1 \text{ m}^3/\text{h}$ باشد کسر حجمی آب در گاز خروجی برابر با $1/8\%$ می‌باشد. در این حالت طول مؤثر برابر با 98 cm است به‌طوری‌که وقتی فاصله نمونه‌گیر تا ورودی جداساز کمتر از 98 cm (80 cm) باشد قطرات آب با قطر $450 \mu\text{m}$ در خروجی گاز مشاهده شدند درحالی‌که وقتی فاصله نمونه‌گیر تا ورودی جداساز کمتر از 98 cm (40 cm) باشد قطرات آب با قطر $780 \mu\text{m}$ در خروجی گاز مشاهده شدند در حالت اول کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز برابر با $1/8\%$ و در حالت دوم برابر با $2/5\%$ بود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش هدف بررسی آزمایشگاهی عملکرد جداساز دوفازی مایع-گاز می‌باشد. به همین منظور جداساز دوفازی مایع-گاز با استفاده از روابط تجربی موجود برای طراحی جداسازهای دوفازی مایع-گاز طراحی گردید. در این پژوهش، گروه‌های بی‌بعد برای مدل‌سازی و بررسی عملکرد جداساز دوفازی گاز-مایع در حالت‌های مختلف توسعه داده شدند. از مهم‌ترین دست‌آوردهای این پژوهش فراهم نمودن بستر لازم جهت طراحی جداسازهای دوفازی گاز-مایع برای سرچاه با توجه به شرایط تولید می‌باشد. همان‌طور که نشان داده شد، هرچقدر سطح مایع در جداساز دوفازی مایع-گاز پایین‌تر باشد طول مؤثر جداسازی برای قطره‌های با قطر $100 \mu\text{m}$ بیشتر می‌گردد به این صورت که مسافت طی شده

x : کیفیت فاز گاز ----

Q_L : دبی مایع (m^3/s)

S : نسبت لغزش ----

مراجع

- [1]. Wilkinson D, Waldie B, Lee H Y (2000) Baffle plate configurations to enhance separation in horizontal primary separators, *Chemical Engineering Journal*, 77, 3: 221-226.
- [2]. Lee J m, khan r, phelps d w (2009) Debottlenecking and computational fluid dynamics (CFD) studies of high and low pressure production separators, *SPE Projects, Facilities and Construction*, 4, 04: 124-131.
- [3]. Hansen E W (2001) Phenomenological modelling and simulation of fluid flow and separation behavior in offshore gravity separators, *Asme-Publications-Pvp*, 431: 23-30.
- [4]. Pourahmadi Laleh A, Svrcek W Y, Monnery W D (2011) Computational fluid dynamics simulation of pilot-plant-scale two-phase separators, *Chemical Engineering and Technology*, 34, 2: 296-306.
- [5]. Pourahmadi Laleh A, Svrcek W Y, Monnery W (2012) Computational fluid dynamics-based study of an oilfield separator--Part I: a realistic simulation, *Oil and Gas Facilities*, 1, 06: 57-68.
- [6]. Pourahmadi Laleh A, Svrcek W Y, Monnery W (2013) Computational fluid dynamics-based study of an oilfield separator--Part II: an optimum design, *Oil and Gas Facilities*, 2, 01: 52-59.
- [7]. Laleh P (2010) CFD simulation of multiphase separators, 72: 03.
- [8]. Monnery W D, Svrcek W Y (2000) Analytical study of liquid/vapor separation efficiency, study developed for Petroleum Technology Alliance Canada.
- [9]. Ghaffarkhah A, Shahrabi MA, Moraveji M K, Eslami H (2017) Application of CFD for designing conventional three phase oilfield separator, *Egyptian Journal of Petroleum*, 26, 2: 413-420.
- [10]. Fadaei M, Ameli F, Hashemabadi S H (2019) Experimental study and CFD simulation of two-phase flow measurement using orifice flow meter, *Journal of Petroleum Research*, 29, 98-5: 85-96.
- [11]. Frank M, Kamenicky R, Drikakis D, Thomas L, Ledin H, Wood T (2019) Multiphase flow effects in a horizontal oil and gas separator, *Energies*, 12, 11: 2116.



Experimental Study and Dimensional Analysis of Two-phase Well-Head Separator

Mehdi Fadaei, Mohammad Javad Ameri*, Ali Salmani, Keyvan Ghorbanpour

1. Petroleum Faculty, AmirKabir University of technology

ameri@aut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2021.4073.2844

Received: February/07/2021

Accepted: June/08/2021

Introduction

One of the most comprehensive designing processes of separator was performed using CFD modeling and experimental methods by Wilkinson et al [1]. They manufactured a small scale laboratory separator, and then they investigated the functionality and designing methods of large scale multi-phase separators using CFD modeling. Their study showed that if re-entrainment phenomenon was not occurred, the best separation between phases will be occurred, and also the turbulent effects was not be observed in gravity settlement section. In this paper, the opening percent of porous plates were not the same in the laboratory and CFD simulation. Lee et al [2] proposed some instructions to solve operational problems of separators and investigated their effectiveness using CFD modeling. Hansen et al [3] simulated two-phase flow in horizontal separators and they observed that the CFD simulation can predict the results for multi-phase separators better than other methods. Four laboratory separators were modeled using CFD by Pourahmadi laleh et al [4]. They investigated the treatment of fluids effects and separator performance in separation process. They used VOF multiphase flow model with DPM in CFD modeling process. They showed that velocity and kinetic energy magnitudes which were determined by monery-srveck method are more than arnold-stwart method and re-entrainment was increased in monery-srveck separator. Kinetic energy of particles in gas phase was investigated using DPM and after that he suggested the best way of determining the separator dimensions is comparing the CFD and

empirical results.

Experimental Procedure

The empirical study of performance of two-phase (gas-liquid) separator was the most important goal of this study. The two-phase separator was designed using empirical correlations. The simplifying assumptions were considered in these empirical correlations that lead to make the obtained results of these correlations less trustable. Companies do not publish the results of their empirical investigations and determine the range of unknown parameters. The effects of the inlet diverter and fundamentals of turbulent flow were neglected in the empirical correlations. Two-phase (gas-liquid) flow loop was designed and manufactured. Air and water flows were mixed at the mixing section that was a 45 degree Tee. The maximum operational pressure was equal to 202650 Pascal and operational temperature was equal to environmental temperature. The liquid fraction of gas flow in gad outlet section and the diameter of liquid droplets in gas flow were measured using liquid droplets trapper with a filter which was mounted at gas outlet section. It was observed that in Figure 1 if the liquid level in the separator be lower, the effective length for liquid droplets separation increases, Also the volume fraction of liquid in gas flow increases. Increasing the gas flow rate had the same effect on the effective length for liquid droplets separation. The CFD modeling results were compared with the experimental result, and it was seen that the average difference was lower than 4%.

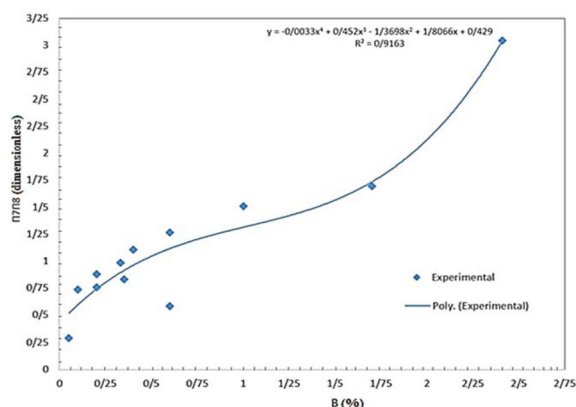


Fig. 5 performance diagram of gas-liquid separator

It was observed that if the air and water flow rates were equal to 20 and 1 m³/h, respectively, the measured effective length for liquid droplets separation should be equal to 94 cm. When the liquid droplets trapper with filter was mounted at 80 cm long from inlet diverter, liquid droplets with bigger diameter (315 micron) were observed.

Results and Discussion

It was observed that if the air and water flow rates be equal to 20 and 1 m³/h, respectively, the measured effective length for liquid droplets separation would be equal to 94 cm. When the liquid droplets trapper with filter was mounted at 80 cm long from inlet diverter, liquid droplets with bigger diameter (315 micron) were observed. The CFD modeling results were compared with the experimental result. It was seen that the average error was lower than 4%. The performance diagram of gas-liquid separator is shown as following.

Conclusions

The purpose of this study was to investigate the performance of two-phase liquid-gas separator experimentally. For this purpose, two-phase liquid-gas separators were designed using existing empirical relations to design two-phase liquid-gas separators. These empirical relations (quasi-empirical models) use simplified terms and assumptions that make the results unreliable. For this purpose, reputable companies designing multiphase separators always use laboratory methods to validate the designs obtained by this method and to determine the limits of unknown parameters. It should be noted that laboratory tests are costly and time consuming and on the other hand no company publishes the results of these laboratory

tests. Therefore, the need for a laboratory unit to obtain correct laboratory information is increasingly felt, and the purpose of this study is to advance this. Each separation design method offers a set of different dimensions that ultimately determine the optimum dimensions with respect to the slenderness ratio. Also, different methods have provided very different values for this coefficient, which practically makes the use of this method ambiguous. The effect of inlet diverter of the separator on the designing process as well as the diameter of the secondary phase droplets is a fixed and predetermined amount. However, the presence of the inlet diverter causes the momentum of the liquid particles to decrease rapidly and only a few of these droplets begin their gravitational separation from the highest point of separator vessel. The concepts of turbulent flow are not considered in the empirical methods. Using the results of experimental investigation and dimensional analysis, as shown in Figure 5, if the multiplication of the dimensional groups $\pi_7 * \pi_8$ exceeds 2.22, the volume fraction of water at the gas outlet will increase by more than 2% for the two-phase gas-liquid separator. Using the diagram of Fig. 5, we can determine the separator performance in the gas and liquid phase separation process for two-phase gas-liquid separation using the result of multiplication of dimensional groups $\pi_7 * \pi_8$. One of the most important achievements of this research is to provide the suitable platform for designing two-phase gas-liquid separators for wells according to production conditions.

References

1. Wilkinson D, Waldie B, Lee H Y (2000) Baffle plate configurations to enhance separation in horizontal primary separators. *Chemical Engineering Journal*, 77, 3: 221-226.
2. Lee J m, khan R, phelps D W (2009) Debottlenecking & computational fluid dynamics (CFD) studies of high and low pressure production separators, *SPE Projects, Facilities and Construction*, 4: 124-131.
3. Hansen E W (2001) Phenomenological modelling and simulation of fluid flow and separation behavior in offshore gravity separators, *Asme-Publications-Pvp*, 431: 23-30.
4. Pourahmadi Laleh A, Svrcek W Y, Monnery, W D (2011) Computational fluid dynamics simulation of pilot-plant-scale two-phase separators. *Chemical engineering & technology*, 34, 2: 296-306.