

بررسی پدیده کف در برج جذب پالایشگاه گاز با روش بررسی سطح پاسخ و تعیین موثرترین ضدکف

توان کیخاونی^{۱*}، مجید ساده‌میری‌نژاد^۱ و مریم توکل مقدم^۲

۱- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام

۲- معاونت فناوری و روابط بین‌الملل، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۷ تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۱۸

چکیده

کف‌زایی یکی از اصلی‌ترین مشکلات در پالایش گاز است. به منظور حذف این پدیده نامطلوب از محلول شیمیایی به نام ضدکف استفاده می‌شود. این تحقیق با هدف بررسی و تعیین میزان بهینه پارامترهای موثر بر کف‌زایی و تعیین بهترین ضدکف در برج جذب پالایشگاه گاز ایلام انجام شده است. به این منظور طراحی آزمایش سطح پاسخ برای بررسی تاثیر متغیرهای موثر مانند غلظت آمین، شدت جریان گاز و دما و برهم‌کنش بین آنها بر میزان کف به عنوان پارامتر هدف به کار گرفته شد. آزمایش‌ها با محلول متیل‌دی‌اتانول آمین و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری میزان کف انجام شد. مدل درجه دوم برای تعیین ارتباط بین متغیرها و تابع هدف حاصل شد. نتایج، صحت مدل به دست آمده را اثبات نمود و نشان داد که میزان کف شدیداً به دما بستگی دارد. کمترین میزان کف (شرایط بهینه عملیاتی) در غلظت آمین ۳۵/۱۹ در صدوزنی، شدت جریان گاز ۱/۶۳ L/min و دما ۴۰/۲۱°C به دست آمد. در شرایط بهینه، آزمایش‌ها برای تعیین بهترین ضدکف بر روی دو نوع ضدکف با پایه سلیکونی (SAG 7133 و SAG 220) و دو نوع با پایه الکلی (KX-1415 و PN-30) انجام شد. در شرایط یکسان بهترین عملکرد با SAG 7133 به دست آمد.

کلمات کلیدی: کف‌زایی، ضدکف، فرایند جذب، بررسی سطح پاسخ، آمین.

مقدمه

می‌شود [۳ و ۲]. اهمیت موضوع کنترل کف با توجه به مصرف سالانه حدود ۷۰ تن ضدکف در پالایشگاه‌های کشور بیش از پیش نمایان است. از مهم‌ترین موارد کف‌زایی در محلول آمین می‌توان به حضور ذرات معلق جامد، هیدروکربن‌های مایع، مواد حاصل از تجزیه آمین، پایین بودن دمای آمین و دمای گاز ورودی به برج و هر ماده خارجی که وارد محلول آمین شود از قبیل گریس اشاره کرد [۱ و ۴]. فیلتراسیون در واحد شیرین‌سازی، کاهش

ترکیبات اسیدی و مشکلات ایجاد شده در اثر حضور این ترکیبات، پالایش گاز را ضروری می‌کند [۱]. کف‌زایی یکی از متداول‌ترین مشکلات در برج جذب است که باعث افزایش مصرف آمین، اختلاف فشار در بالا و پایین برج و در نهایت کاهش راندمان

جزییات و نحوه عملکرد ضدکف را منتشر می‌کنند و معمولاً در بیشتر موارد از سعی و خطا برای تعیین ضد کف مناسب با شرایط موجود استفاده می‌شود [۱۲]. بنابراین پژوهش در ارتباط با تعیین ضدکف هماهنگ با شرایط موجود نیز ضروری است.

توصیه‌هایی برای کاهش میزان مصرف مواد ضدکف در محلول‌های آمین وجود دارد. این توصیه‌ها می‌تواند به دلیل کاهش کارایی حذف گازهای اسیدی توسط محلول آمین در اثر حضور ماده ضدکف یا غیر فعال شدن مواد ضدکف با افزایش تمرکز در سطح باشد [۱۲]. بنابراین بهتر است که با تنظیم شرایط عملیاتی در واحد آمین سعی بر کاهش کف تولیدی شود. به عبارتی لازم است موثرترین عوامل موجود بر کف‌زایی مانند غلظت آمین، شدت جریان گاز و دما با توجه به شرایط موجود به‌گونه‌ای تنظیم شوند که کمترین کف تولید شود. تحقیقات محدودی در ارتباط با عوامل موثر بر کف‌زایی آمین صورت گرفته است. از جمله می‌توان به بررسی اثر غلظت [۱۳]، اثر دما و فشار [۱۴] اشاره کرد. با این حال این مطالعات تنها به‌صورت تاثیر یک متغیر بوده و بررسی همزمان تاثیر پارامترهای موثر تاکنون گزارش نشده است. با استفاده از طراحی آزمایش می‌توان تاثیر همزمان چند متغیر و برهم‌کنش بین آنها را بر یک پدیده (هدف) با کمترین تعداد آزمایش‌ها با روشی کم‌هزینه بررسی نمود [۱۵].

در این تحقیق از طراحی آزمایش سطح پاسخ برای تعیین مقدار بهینه پارامترهای موثر بر پدیده کف در برج جذب پالایشگاه گاز ایلام استفاده شده است. بدین منظور پارامترهای عملیاتی موثر مانند غلظت آمین، شدت جریان گاز و دما به‌عنوان متغیر و میزان کف به عنوان پارامتر هدف تعیین شدند. این متغیرها بر اساس پارامترهای تاثیرگذار بر پدیده کف در برج جذب انتخاب شده‌اند.

گرفتگی در مبدل‌ها و جلوگیری از ورود آلودگی‌های هیدروکربنی به داخل محلول آمین کاهش کف‌زایی را به دنبال دارد [۵]. اما این اقدامات به اندازه استفاده از ضد کف موثر نیستند. کف از حباب‌هایی از جنس مایع که مولکول‌های گاز را در بر می‌گیرند، تشکیل شده است. سطوح جداکننده محفظه حباب‌های مجاور به دلیل نازک بودن، هدف مواد ضدکف می‌باشند. عملکرد ضدکف به خواص شیمیایی محلول، عوامل فعال سطحی و شرایط عملیاتی بستگی دارد. ضدکف‌ها را می‌توان به سه دسته روغن‌های غیرقطبی (مواد معدنی و سیلیکون‌ها)، روغن‌های قطبی (الکل‌ها و اسیدهای چرب، الکیل‌آمین‌ها، الکیل‌آمیدها و ...) و ذرات جامد ناسازگار با آب تقسیم کرد [۶]. ضدکف‌های سیلیکونی پلیمرهایی با اتصالات سیلیکون (عمدتاً پلی دی‌متیل‌سیلوکسان) است. سیلیکون ترکیبی آبگریز است که برای استفاده به‌عنوان ضدکف در سیالات غیرآبی نظیر نفت مناسب است [۷]. در ضدکف‌هایی با پایه الکل از مقادیر بالای الکل به‌منظور کنترل کف در سیالات آبی استفاده شده است. عملکرد برخی از ضد کف‌ها نظیر SAG 7133 و SAG 8200 و ترکیب آنها با پلی‌پروپیلن‌گلیکول گزارش شده است. ترکیب با پلی‌پروپیلن‌گلیکول عملکرد آنها در محلول‌های آمین را بهبود داده است [۸]. مقالات زیادی نیز در ارتباط با انواع کف‌ها، پایداری آنها و مکانیسم تخریب [۹] و عملکرد ضدکف‌هایی با پایه نفتی بدون ذکر ضدکف خاصی [۱۰] منتشر شده است. ضدکف‌هایی با پایه سلیکونی مانند SAG 7133 و نوع غلیظ‌شده آن SAG 220 انتخاب‌های بسیار مناسبی برای کنترل کف در واحدهای آمین می‌باشند. در مقایسه با نمونه‌های مشابه می‌توان از مقادیر کمتر این ضدکف‌ها در واحدهای آمین استفاده کرد. از بین بردن سریع کف، مقاومت و دوام بالا، مقاومت گرمایی مناسب و بهره‌برداری آسان از جمله مزایای این ضدکف‌ها می‌باشند [۱۱]. شرکت‌های سازنده به ندرت

ایجاد کمترین میزان کف‌زایی) ابتدا ۳۰۰ mL از محلول متیل‌دی‌اتانول‌آمین با غلظت مشخص وارد دستگاه کرده و با تنظیم شدت جریان و دمای آزمایش چند دقیقه برای هم دما شدن نمونه با حمام آب زمان داده می‌شود. سپس برای تزریق هوا به داخل نمونه دمنده را روشن و بعد از ثابت شدن میزان کف، حجم آن ثبت می‌شود. این روش برای همه آزمایش‌های طراحی شده تکرار می‌شود. بعد از تعیین شرایط عملیاتی بهینه، برای تعیین مناسب‌ترین ضدکف چهار نوع ضدکف رایج در پالایشگاه‌های گاز بر روی محلول آمین آزمایش شد. خصوصیات ضدکف‌های استفاده شده در جدول ۱ داده شده است. مؤثرترین و بهترین نوع ضدکف از نظر حذف کامل کف در مقدار یکسان مصرفی ضدکف تعیین شد.

جدول ۱ خصوصیات ضدکف‌های مورد آزمایش

پایه ضدکف	نام ضدکف	غلظت درصدوزنی
سیلیکونی	SAG 7133	۲۰٪
	SAG 220	
الکلی	KX -1415	۲/۵٪
	PN -30	

نحوه آزمایش به این صورت بود که بعد از قرار دادن نمونه داخل دستگاه و گذشت چند دقیقه برای هم دما شدن نمونه با حمام آب، دمنده هوا را روشن کرده و بعد از ثابت شدن کف حجم آن یادداشت شد. حال دمنده را خاموش کرده و مقدار ۰/۵ mL از محلول ضدکف را داخل نمونه ریخته و دمنده برای تزریق هوا به داخل نمونه روشن شده و بعد از ثابت شدن کف تغییرات مشاهده و ثبت می‌گردد. سپس تزریق گاز را قطع کرده و مقدار ۰/۵ mL دیگر از ماده ضدکف اضافه می‌شود. سپس دوباره دمنده هوا روشن و بعد از ثابت ماندن میزان کف، همان میزان ماده ضدکف اضافه می‌شود. این کار تا حذف کامل کف ادامه خواهد داشت.

انتخاب محدوده تغییرات غلظت آمین و دما بر اساس دامنه تغییرات این دو پارامتر در طول سال در پالایشگاه گاز ایلام انجام شد. محدوده تغییرات شدت جریان گاز ورودی بر اساس شرایط دستگاه آزمایش کف و یک سری آزمایش‌های اولیه برای تعیین بازه تغییرات شدت جریان صورت گرفت. نتایج، صحت مدل را اثبات نمود و تاثیرگذارترین متغیر بر کف در برج جذب مشخص گردید. مقدار هر کدام از متغیرها برای ایجاد کمترین کف تعیین شد. در پایان، در شرایط بهینه (شرایط عملیاتی برای کمترین کف‌زایی) ضدکف هماهنگ با شرایط موجود تعیین شد.

روش کار

شرح دستگاه و روش انجام آزمایش‌ها

از دستگاه Twin-unit Foaming Test Apparatus (SCAVINI) ساخت کشور ایتالیا برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. از این دستگاه در پالایشگاه‌های گاز برای مشاهده میزان کف‌زایی آمین و تعیین اثر نوع ماده ضدکف بر روی محلول آمین استفاده می‌شود. دستگاه مورد استفاده از دو محفظه شیشه‌ای پیرکس که به وسیله قاب فولادی متصل شده‌اند، تشکیل شده است. این محفظه‌ها به عنوان حمام آب برای تنظیم دمای آزمایش استفاده می‌شوند. بر روی این قاب‌ها فضایی برای وارد کردن ظرف نمونه آزمایش (استوانه مدرج) به داخل حمام آب تعبیه شده است. ظرف نمونه یک استوانه با سطح مقطع 1 mm^2 می‌باشد. میزان کف بر اساس حجم کف که معادل با ارتفاع کف است (با توجه به سطح مقطع استوانه) خوانده می‌شود. داخل محفظه حمام آب یک همزن تعبیه شده که این همزن وظیفه یکنواخت کردن دمای آب را بر عهده دارد. یک دبی‌سنج تنظیم شدت جریان هوا را بر عهده دارد. هوا از طریق دمنده تأمین و به وسیله یک شیلنگ و لوله فلزی وارد ظرف آزمایش می‌شود. برای انجام آزمایش تعیین شرایط بهینه (شرایط عملیاتی برای

P کمتر از ۰/۰۵ داشته باشد. دقت مدل با R^2 و R_{adj}^2 تعیین می‌گردد که به ترتیب نشان‌دهنده میزان نوسان در مقدار پاسخ و کسری از نوسانات پاسخ است که توسط مدل تفسیر می‌شوند [۱۶ و ۱۵]. متغیرها بر حسب مقادیر واقعی و کد در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. هدفه آزمایش با شرایط نشان داده شده در جدول ۳ انجام و میزان کف اندازه‌گیری شد.

جدول ۲ متغیرها و محدوده تغییرات آنها

مقدار و کد متغیر			متغیر
-۱	۰	+۱	
۳۵	۴۰	۴۵	غلظت آمین (A) (wt. %)
۱/۵	۲	۲/۵	شدت جریان گاز (B) (L/min)
۴۰	۵۰	۶۰	دما (°C)

طراحی آزمایش با استفاده از روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ (ترکیبی از تکنیک‌های ریاضی و آماری) دارای چهار مرحله: طراحی آزمایش‌ها، پردازش مدل، بررسی صحت مدل و بهینه‌سازی می‌باشد [۱۵]. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۱ (۷/۰/۱) انجام شده است. برای بیان رابطه بین متغیرها و پاسخ از چندجمله‌ای درجه دو استفاده شده است:

$$Y = A_0 + \sum A_i X_i + \sum A_{ii} X_i^2 + \sum A_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

A_{ii} ، A_i ، A_0 ، X ، Y به ترتیب پاسخ، متغیرهای مستقل، ضرایب ثابت، خطی و برهم‌کنش می‌باشند. آنالیز واریانس برای تایید تاثیر مدل استفاده می‌شود. مقدار F و P ($P > F$) برای تعیین تاثیر مدل از نظر آماری به کار می‌روند. یک مدل موثر باید F بالا و

جدول ۳ شرایط انجام آزمایش‌ها و نتایج

حجم کف ایجاد شده (mL)	متغیر			شماره آزمایش
	دما (°C)	B(L/min)	A (wt.%)	
۱۵۰	۰	+۱	+۱	۱
۱۷۰	۰	۰	۰	۲
۱۶۵	۰	۰	۰	۳
۱۳۰	۰	-۱	-۱	۴
۹۰	-۱	۰	+۱	۵
۱۷۰	+۱	۰	+۱	۶
۶۵	-۱	۰	-۱	۷
۱۵۰	۰	-۱	+۱	۸
۹۵	-۱	-۱	۰	۹
۲۳۰	+۱	+۱	۰	۱۰
۱۷۵	۰	۰	۰	۱۱
۱۸۰	+۱	۰	-۱	۱۲
۱۶۵	+۱	-۱	۰	۱۳
۱۱۵	-۱	+۱	۰	۱۴
۱۶۵	۰	+۱	-۱	۱۵
۱۶۵	۰	۰	۰	۱۶
۱۷۰	۰	۰	۰	۱۷

نتایج و بحث

مدل سازی و کفایت مدل

مدل به دست آمده برای میزان کف تولیدی به عنوان پارامتر هدف بر اساس متغیرهای مستقل (غلظت آمین (A)، شدت جریان گاز (B) و دما (C) با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$V = 169 + 5/2A + 15B + 5.47C - 75.8AB - 75.8AC + 25.11BC - 62.22A^2 + 37.2B^2 - 13/20C^2 \quad (2)$$

میزان مؤثر بودن مدل از لحاظ آماری با ANOVA و آنالیز رگرسیون بررسی می‌شود. نتایج پردازش مدل در جدول ۴ ارائه شده است. میزان صحت مدل با مقادیر بالای F و مقادیر پایین P تایید می‌گردد. علاوه بر این، مقادیر R^2 و R_{adj}^2 به یک نزدیک می‌باشند. همچنین تفاوت کم بین این مقادیر دقت بالای مدل را اثبات می‌کنند. برای مدل به دست آمده تنها ۱/۶٪ انحراف مشاهده می‌گردد. ضمناً، مقادیر عدم برازش نیز مؤثر بودن مدل را اثبات می‌کند ($P < 0/05$) [۱۷ و ۱۵].

نمودار تغییرات باقی مانده بر حسب مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تمام نقاط

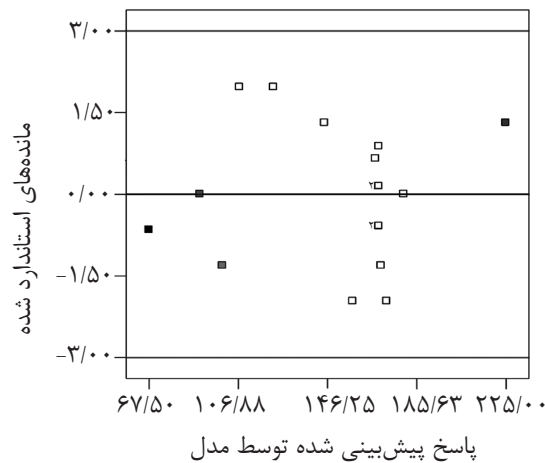
به صورت تصادفی در فاصله ثابت از باقی مانده‌ها توزیع شده‌اند. این مساله دقت مدل را نشان داده و صحت فرض ثابت بودن میزان انحراف را اثبات می‌کند. شکل ۱ عدم وجود الگویی مشخص در ساختار را نشان می‌دهد. پراکندگی یکسان در بالا و پایین محور افقی دلالت بر کفایت مدل دارد [۱۹ و ۱۸، ۱۵]. نمودار مقادیر واقعی پاسخ بر حسب مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. قرار گرفتن نقاط نزدیک به خط قطری نشان‌دهنده هماهنگی و نزدیکی مقادیر تجربی (آزمایشگاهی) و مقادیر به دست آمده از روی مدل می‌باشد. این مساله صحت پیش‌بینی میزان کف تولیدی توسط مدل را اثبات می‌کند [۲۰].

بررسی پارامترهای مؤثر در پدیده کف‌زایی

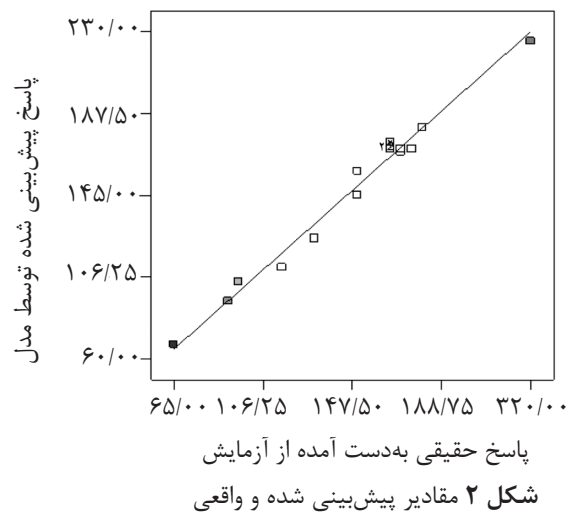
نحوه اثر بخشی پارامترهای مؤثر در پدیده کف‌زایی با استفاده از نمودار اختلال (شکل ۳) نشان داده می‌شود. این منحنی اثر هر کدام از پارامترها را در نقطه مرکزی نشان می‌دهد. شیب یا انحنای تند یک پارامتر بیانگر حساس بودن پاسخ به این پارامتر است. خط نسبتاً صاف، غیر حساس بودن پاسخ به متغیر را نشان می‌دهد [۱۶].

جدول ۴ آنالیز مدل

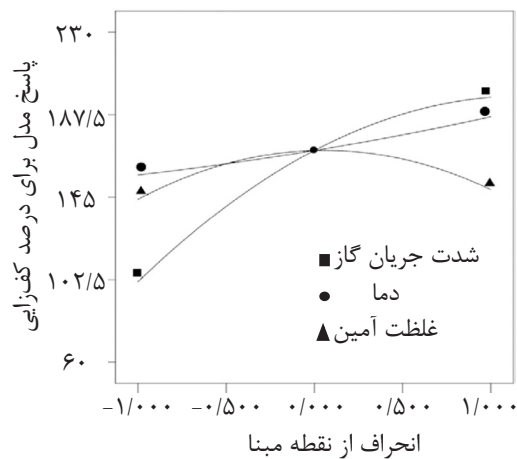
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	متوسط مربعات	F- Value	Prob>F P-Value
A	۱	۵۰	۵۰	۰/۸۶	۰/۳۸۴۹
B	۱	۱۸۰۰	۱۸۰۰	۳۰/۹۲	۰/۰۰۰۹
C	۱	۱۸۰۵۰	۱۸۰۵۰	۳۱۰/۰۶	< ۰/۰۰۰۱
AB	۱	۳۰۶/۲۵	۳۰۶/۲۵	۵/۲۶	۰/۰۵۵۵
AC	۱	۳۰۶/۲۵	۳۰۶/۲۵	۵/۲۶	۰/۰۵۵۵
BC	۱	۵۰۶/۲۵	۵۰۶/۲۵	۸/۷۰	۰/۰۲۱۴
A ²	۱	۲۱۵۵/۳۳	۲۱۵۵/۳۳	۳۷/۰۲	۰/۰۰۰۵
B ²	۱	۲۳/۷۵	۲۳/۷۵	۰/۴۱	۰/۵۴۳۳
C ²	۱	۱۷۰۵/۳۳	۱۷۰۵/۳۳	۲۹/۲۹	۰/۰۰۱۰
مدل	۹	۲۵۰۹۲/۵۰	۲۷۸۸/۰۶	۴۷/۸۹	< ۰/۰۰۰۱ با اهمیت
عدم برازش	۳	۳۳۷/۵۰	۱۱۲/۵۰	۶/۴۳	۰/۰۵۲۰ بی‌اهمیت
$R^2 = 0/9840$ $R_{adj}^2 = 0/9635$					



شکل ۱ نمودار تغییرات باقی مانده برحسب مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل



شکل ۲ مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی



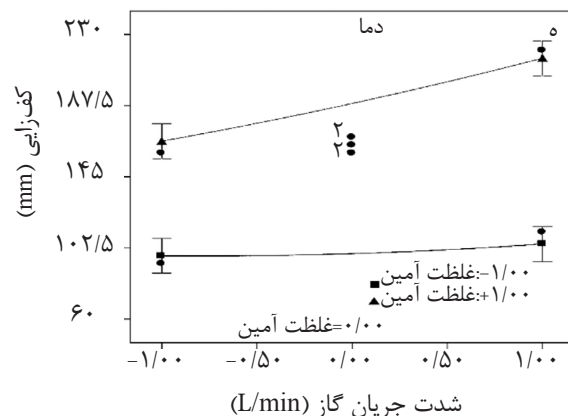
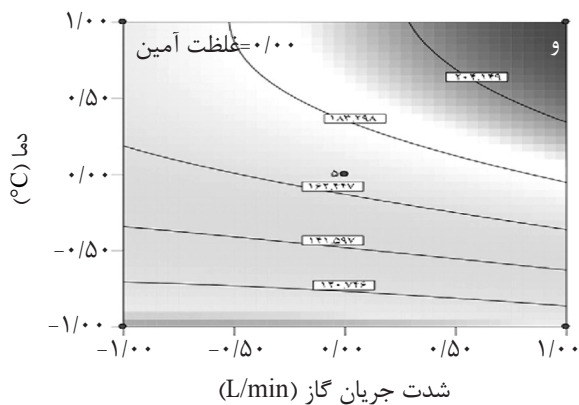
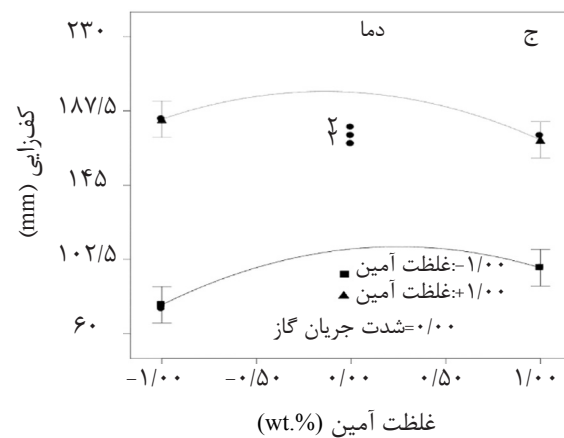
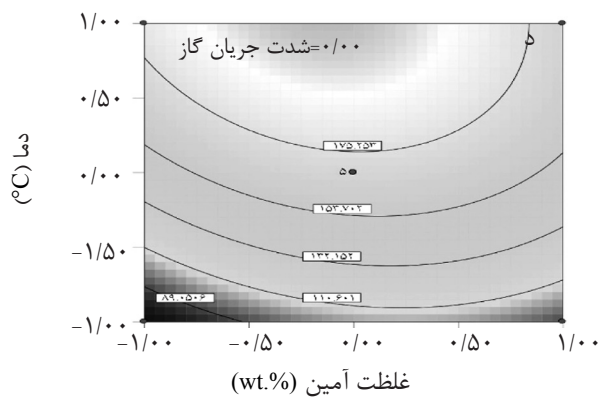
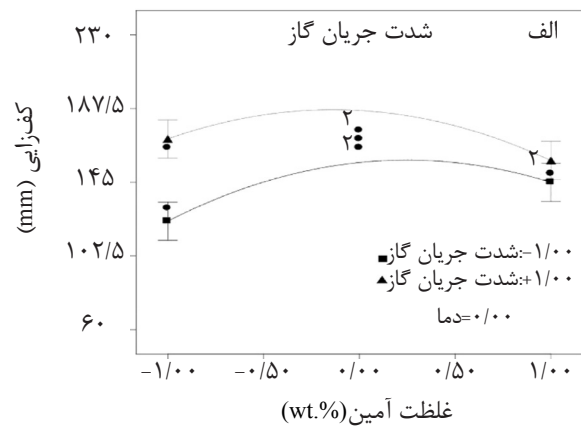
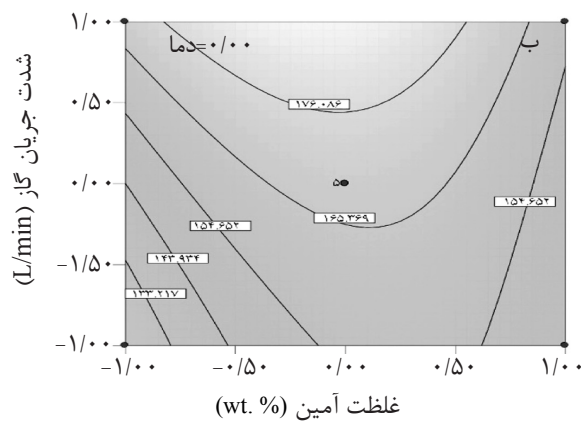
شکل ۳ منحنی اختلال برای پارامترهای مؤثر در کف‌زایی

توجه نیست و در محدوده تغییرات غلظت آمین (۳۵ تا ۴۵ درصدوزنی) تنها حدود ۰.۴٪ تغییر ایجاد می‌شود. میزان کف به شدت جریان گاز نیز چندان حساس نیست و تنها ۰.۱۹٪ تغییر در میزان

همان‌گونه که مشاهده می‌شود کف، شدیداً به پارامتر دما حساس است. با افزایش دما از نقطه ۱- تا نقطه ۱+ در حدود ۰.۹۲٪ تغییر در کف مشاهده می‌گردد. وابستگی میزان کف به غلظت آمین قابل

برهم‌کنش و میزان نشان داد. در این نمودارها شکل‌های بیضوی و دایره‌ای به ترتیب نشان‌دهنده میزان قابل توجه و ناچیز برهم‌کنش می‌باشند [۱۵]. نمودارهای برهم‌کنش و میزان در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

کف، به‌ازای تغییر شدت جریان از ۱/۵ تا ۲/۵ L/min مشاهده می‌شود. علاوه‌براین، نتایج ANOVA در جدول ۴ بیان می‌کند که در بین متغیرهای درجه دوم میزان کف به‌طور موثر از غلظت و دما تاثیر می‌پذیرد (مقدار P کمتر از ۰/۰۵). ماهیت و میزان برهم‌کنش بین متغیرها را می‌توان با نمودارهای

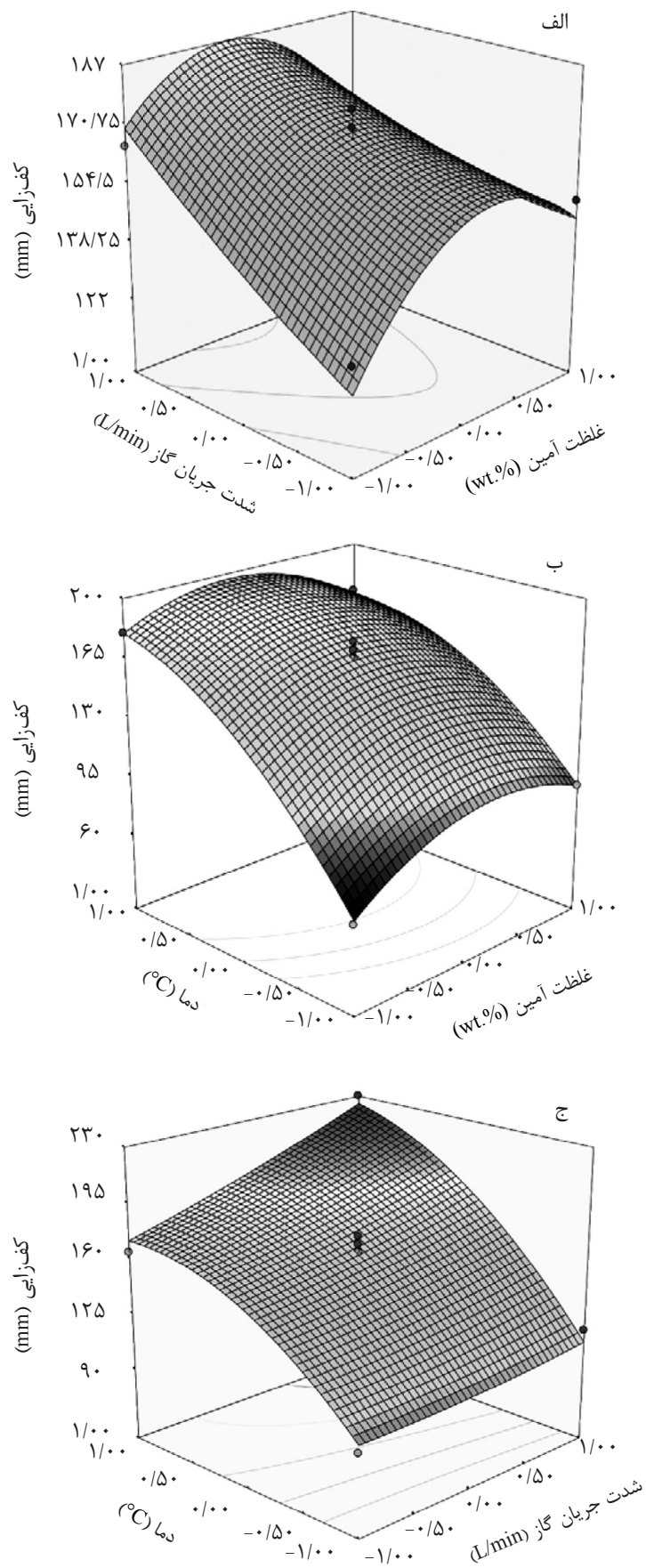


شکل ۴ نمودارهای برهم‌کنش و میزان

کشش سطحی، افزایش میزان کف را به دنبال دارد. دما و سرعت جریان دو عامل مساعد برای بالا رفتن میزان کف تولیدی می‌باشند. در نتیجه میزان کف در سرعت جریان و دماهای بالا به بیشینه مقدار خود می‌رسد. این پدیده در اثر کاهش کشش سطحی به دلیل افزایش دما [۲۱] و افزایش سرعت جریان صورت می‌گیرد. افزایش دما در سرعت جریان‌های بالا تاثیر قابل توجه‌تری دارد. در حالی که در دماهای پایین، تاثیر افزایش سرعت جریان چندان قابل توجه نیست. در دماهای پایین (محدوده بین ۴۰ تا ۴۵°C) میزان کف با افزایش سرعت جریان یا ثابت بوده یا با نرخ بسیار کندی تغییر می‌کند (نواحی پایین نمودار ۴-و). در دماهای بالا افزایش سرعت بسیار موثر بوده و میزان کف به محدوده نواحی تیره‌تر وارد می‌شود. ثابت بودن کف در دمای پایین با افزایش سرعت جریان و افزایش قابل توجه آن در دمای بالا در نمودار برهم‌کنش دما و شدت جریان (۴-ه) نیز اثبات شده است.

نمودارهای سطح بین دو متغیر مستقل در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار متغیر سوم در نقطه مرکزی قرار دارد. این نمودارها برای بررسی برهم‌کنش بین متغیرها و تعیین مقدار بهینه هر متغیر برای رسیدن به بهترین پاسخ به کار می‌روند [۱۵]. روندهای مشابه با شکل ۴ در این نمودار مشاهده می‌شود. نمودار (۵-الف) نشان می‌دهد که کف همواره با افزایش شدت جریان افزایش می‌یابد. در حالی که افزایش غلظت، در غلظت‌های پایین باعث افزایش کف و در غلظت‌های بالا باعث کاهش ناچیز آن می‌شود. غلظت در مقایسه با شدت جریان متغیر تاثیرگذاری نیست (جدول ۴). در نتیجه در غلظت‌های پایین، روند کف‌زایی توسط شدت جریان کنترل می‌شود. با افزایش غلظت، تاثیر این پارامتر مشخص شده و کاهش کف مشاهده می‌شود. کاهش غلظت محلول آمین باعث کاهش انحلال هیدروکربن‌ها و در نتیجه افزایش میزان کف تولیدی می‌شود [۲۲].

اثر برهم‌کنش بین غلظت آمین و شدت جریان (نمودار ۴-الف) بیان می‌کند که کف‌زایی ابتدا با افزایش غلظت آمین تا حدی افزایش یافته، سپس تا محدوده‌ای ثابت بوده و در ادامه با افزایش بیشتر غلظت، کاهش می‌یابد. روند و شدت تغییر میزان کف در شدت جریان‌های پایین بیشتر از شدت جریان‌های بالا می‌باشد. در غلظت ثابت همواره با افزایش سرعت جریان میزان کف تولیدی افزایش می‌یابد. ولی در شدت جریان ثابت روند تولید میزان کف یکسان نیست. به عبارتی تا بالاتر از غلظت ۴۰ درصد وزنی (نقطه صفر) میزان کف تولیدی با غلظت افزایش یافته و سپس کاهش میزان کف با افزایش غلظت مشاهده می‌شود. به طور کلی حضور آب به عنوان رقیق کننده در محلول آمین تشکیل کف را تشدید می‌کند. در نتیجه با افزایش غلظت محلول آمین به عبارتی کمتر شدن مقدار آب در محلول، میزان کف تشکیل شده کاهش می‌یابد [۱۳]. با این حال در غلظت‌های پایین آمین، افزایش غلظت از آنجاییکه پارامتر چندان تاثیرگذاری نیست، نمی‌تواند باعث کاهش میزان کف شود. در نتیجه چون سرعت جریان بسیار تاثیرگذارتر از غلظت است (جدول ۴)، میزان کف افزایش می‌یابد. ولی در محدوده غلظت‌های نزدیک به نقطه بیشینه، میزان کف تولیدی با افزایش غلظت کاهش می‌یابد. تاثیر افزایش غلظت آمین در دماهای بالا و پایین تقریباً یکسان است (نمودار ۴-ج). تا محدوده غلظت حدود ۴۰ درصد وزنی افزایش و سپس کاهش میزان کف تولیدی مشاهده می‌شود. هر چند قابل ذکر است که در غلظت ثابت همواره با افزایش دما، میزان کف تولیدی افزایش می‌یابد. در نمودار (۴-د) نیز مشاهده می‌شود که با افزایش دما رنگ نمودار از ناحیه تیره‌تر (میزان کف کمینه) به نواحی روشن‌تر (میزان کف تولیدی بالا) تغییر می‌یابد. افزایش میزان کف با افزایش دما به دلیل تغییرات کشش سطحی صورت می‌گیرد. کشش سطحی محلول آمین با افزایش دما کاهش می‌یابد [۲۱]. کاهش



شکل ۵ منحنی‌های سه‌بعدی تأثیر متغیرها بر میزان کف تولیدی

کف توسط مدل، تعیین می‌شود. کمترین میزان کف در غلظت آمین ۳۵/۱۹ wt.%، شدت جریان گاز $1/63 \text{ L/min}$ و دما $40/21^\circ\text{C}$ به دست می‌آید. برای اطمینان از صحت مدل، آزمایش کف در شرایط عملیاتی بهینه انجام شد. در شرایط مذکور حجم کف تولید شده برابر 65 mL به دست آمد. خطایی برابر با ۱/۹۶٪ برای مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل نسبت به مقدار تجربی نشان‌دهنده صحت مدل و دقت بالای آن در پیش‌بینی میزان کف تولیدی می‌باشد.

تعیین مؤثرترین ضدکف

عملکرد چهار نوع ضدکف (جدول ۲) در شرایط عملیاتی بهینه به صورت جداگانه بررسی شد. کمترین میزان کف در استفاده از SAG 7133 به دست آمد. نتایج آزمایش در جدول ۵ ارائه شده است. استفاده از ضدکف‌هایی با پایه سیلیکونی همواره در صنایع نفت و گاز متداول تر است. ضدکف با پایه الکلی به دلیل ساختار و مواد تشکیل دهنده‌اش مناسب محلول‌های آبی می‌باشد. ضدکف‌هایی با پایه سیلیکونی مانند SAG 7133 و نوع غلیظ شده آن SAG220 انتخاب‌های مناسبی برای کنترل کف در واحدهای آمین می‌باشند. نتایج آزمایش مؤثر بودن SAG 7133 نسبت به SAG220 را نشان داد. دلیل این مساله این است که همواره محلول با غلظت کمتر می‌تواند در کنترل کف مؤثرتر باشد [۱۱].

پخش کردن یک گاز در مایع باعث ایجاد کف در مایع می‌شود. این مساله اساساً به نوع مایع بستگی نداشته و عامل اصلی ایجاد کف کاهش کشش سطحی می‌باشد [۲۲]. در اینجا نیز مشاهده می‌شود با افزایش شدت جریان از $1/5$ تا $2/5 \text{ L/min}$ میزان کف افزایش می‌یابد. طبق نمودار در غلظت‌های مختلف با افزایش شدت جریان میزان کف افزایش می‌یابد. دما نیز بر میزان کف، تاثیر مشابه شدت جریان را دارد. دما یکی از پارامترهای مهم در واکنش جذب گازهای اسیدی است. فرآیند جذب گرمازا بوده و به همین دلیل در برج‌های جذب دمای آمین خروجی بیشتر از دمای ورودی می‌باشد [۲۳]. در یک مایع با افزایش دما مولکول‌هایی که روی سطح قرار دارند با نیروی جاذبه کمتری به داخل مایع کشیده می‌شوند. بنابراین کشش سطحی مایع کاهش می‌یابد. در محدوده خاص دما باید طوری تنظیم شود که پدیده کف‌زایی را به دنبال نداشته باشد. با افزایش دما، حجم کف نیز افزایش پیدا می‌کند و در غلظت‌های مختلف کمترین کف در کمترین دما ایجاد شده است. با کاهش شدت جریان و دما مقدار کف به تدریج کاهش یافته است. همچنین مقدار P-Value به دست آمده برای دما نشان دهنده حساسیت میزان کف به این پارامتر می‌باشد (جدول ۴).

تعیین شرایط بهینه

شرایط عملیاتی بهینه با هدف تولید کمترین میزان

جدول ۵ میزان کف تولیدی در حضور ضدکف SAG 7133

مقدار ضدکف (mL)	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵
حجم کف (mL)	۳۰	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۰	۰

نتیجه گیری

به عنوان پارامتر هدف تعیین گردید. نتایج، صحت مدل به دست آمده را اثبات نمود. میزان کف شدیداً به دما بستگی دارد. کمترین کف در غلظت آمین ۳۵/۱۹ wt.٪، شدت جریان گاز ۱/۶۳ L/min و دما ۴۰/۲۱°C به دست آمد. در شرایط بهینه، بهترین ماده ضدکف، SAG 7133 تعیین شد.

در این تحقیق اثر پارامترهای موثر بر پدیده کف در برج جذب پالایشگاه گاز ایلام با استفاده از طراحی آزمایش سطح پاسخ بررسی شد. پارامترهای عملیاتی موثر بر پدیده کف مانند غلظت آمین، شدت جریان گاز و دما به عنوان متغیر و میزان کف

مراجع

- [۱]. عروجی ر.، وطنی ض.، "بررسی آلودگی در سیستم‌های آمینی و مشکلات آن"، مدیریت برنامه‌ریزی تلفیقی شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۳.
- [2]. Veldman R. , "Alkanolamine solution corrosion mechanisms and inhibition from heat stable salts and CO₂" Paper No. 496, Nace Corrosion 2000.
- [3]. Rooney P. C. and DuPart M., "Corrosion in alkanolamine plants: causes and minimization," Paper No 494, Nace Corrosion 2000.
- [4]. Vonphul S. and Stern L., "Antifoam_What Is It?," Laurance Reid Gas Conditioning Conference., Norman, OK, 2005.
- [۵]. امیری ا.، حقیقی اصل ع. و احسانی م. ر.، "نسبت بهینه فیلتراسیون جریان برگشتی در فرآیند شیرین‌سازی گاز برای ممانعت از پدیده کف‌کنندگی"، یازدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، تهران، ۱۳۸۵.
- [6]. Abdolahi F., Moosavian M. A. and Vatani A., "The mechanism of action of antifoams," Journal of Applied Science, Vol. 5, pp. 1122-1129, 2005.
- [7]. Hofer R., Jost F. and Schuwug er J. M., "Foams and foam control," Encyclopedia of industrial chemistry, Wiley-VCH Weinheim, 2000.
- [8]. Kocozo K. and Quinn D. G., "Low foaming gas processing compositions and used thereof," US patent NO. 7678835, 2010.
- [9]. Hill C. and Eastoe J., "Foams: from nature to industry," Advances in Colloid and Interface Sci., doi: 10.1016/j.cis.2017.05.013, 2017.
- [10]. Miller C. A., "Antifoaming in aqueous foams," Current Opinion in Colloid & Interface Sci., Vol. 13, PP. 177-182, 2008.
- [11]. Company Momentive, "Performance SAG7133," <https://www.momentive.com/products/show-technical-data-sheet.aspx?id=14332>, 2015
- [12]. Cummings L., "Control of foaming in amine systems," D-Foam, Incorporated, 2007.
- [13]. Ratman I., Kusworo T. D. and Ismail A. F., "Foam behaviour of an aqueous solution of piperazine- N-Methyldiethanolamine (MDEA) blend as a function of the type of impurities and concentrations," Internat. J. of Waste Resources, Vol. 1, PP. 8-14, 2011.
- [14]. Yanicki G. and Trebble M. A., "Experimental measurements of foaming tendencies in aqueous gas sweet

- ening solutions containing mdea over a temperature range of 297–358k and a pressure range of 101–500 kPa,” Chem. Eng. Commun. Vol. 193, PP. 1151–1163, 2006.
- [15]. Kikhavani T., Ashrafizadeh S. N. and Van der Bruggen B., “Identification of optimum synthesis conditions for a novel anion exchange membrane by response surface methodology,” J. Appl. Polym. Sci., Vol. 131, pp.39888-39904, 2014.
- [16]. Montgomery D. C., “Design and analysis of experiments,” Wiley., New York., 3th ed., 1991.
- [17]. Bas D. and Boyaci I. H., “Modeling and optimization I: usability of response surface methodology,” J. Food Engine., Vol. 78 ,pp. 836–845, 2007.
- [18]. Lizama C., Freer J., Baeza J. and Mansilla H. D., “Optimized photodegradation of reactive blue 19 on TiO₂ and ZnO suspensions,” Catalysis Today., Vol. 76, pp. 235-246, 2002.
- [19]. Murugesan K., Dhamija A., Nam I. H., Kim Y. M. and Chang Y. S., “Decolourization of reactive black 5 by laccase: Optimization by response surface methodology,” Dyes and Pigments., Vol. 75, pp.176-184, 2007.
- [20]. Myers R. H. and Montgomery D. C., “Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments,” Wiley., New York., 1995.
- [21]. Yusoff R., Shamiri A., Aroua M. K., Ahmady A., Shafeeyan M.S ., Lee W. S. and Lim S. L., Burhanuddin S.N.M., “Physical properties of aqueous mixtures of N-methyldiethanolamine (MDEA) and ionic liquids,” Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 20, pp. 3349–3355, 2014.
- [22] Bikerman J. J. , “Formation and Structure,” Foams New York., Springer-Verlag., Chap. 2., pp. 24–25, 1973.
- [۲۳]. صدیقی س، سیف محدثی ر، “مدل فرایند جذب دی‌اکسیدکربن در برج‌های آکنده به‌وسیله محلول ۲-آمینو-۲-متیل-۱-پروپانول،” نشریه پژوهش‌های کاربردی در شیمی، سال ششم، شماره چهارم، زمستان ۹۱.



Petroleum Research

Petroleum Research 2018(June-July), Vol. 28, No. 99. 43-48

DOI: 10.22078/pr.2017.2652.2305

Investigating the Foaming Phenomenon in the Absorption Tower of Gas Refinery Using Response Surface Methodology and Determining the Effective Antifoam

Tavan Kikhavani*¹, Majid Sademirinejad¹ and Maryam Tavakol Moghadam²

1. Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ilam university, Iran

2. Deputy of Technology and International Affairs, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

kikhavani@iust.ac.ir

Received: July/29/2017

Accepted: December/09/2017

Abstract

Foaming phenomenon is one of the main problems in the gas refining process. Antifoams can be used for solving this undesirable problem. The current study was carried out with the aim of determining the optimum amount of effective parameters on foaming phenomenon in the absorption tower of Ilam gas refinery. An experimental design was used to quantify the effects of variables, including the amine concentration, the gas flow rate, and temperature, on amount of foam as response. The experiments were carried out using MDEA and foam measuring apparatus. A quadratic model was developed to correlate the relationship between variables and the response. The results demonstrated the accuracy of the model and show that the foaming strongly depended on temperature. The optimum operating condition with the less amount of foam can be obtained with an amine concentration of 35.19 (wt.%), gas flow rate of 1.63 (L/min), and temperature of 40.21 (°C). The best antifoam was determined among four different kind of antifoam i.e., silicon based (SAG 7133 and SAG 220) and alcohol based (KX-1415 and PN-30) in the optimum operating condition. SAG 7133 was chosen as the most effective antifoam.

Keywords: Foaming, Antifoam, Adsorption Process, Response Surface Methodology, Amine.

Introduction

Foaming phenomenon is one of the main problems in the gas refining process. Foaming can be occurred due to the present of suspense solids, liquid hydrocarbons, low amine temperature, low inlet gas temperature, and so on [1, 2]. Foaming phenomenon can be reduced by filtering, control of hydrocarbons pollution and reduction of fouling in heat exchangers [3]. However, none of these solutions cannot be effective more than using antifoam. Antifoams can be used for solving this undesirable problem. The current study was carried out with the aim of determining the optimum amount of effective parameters on foaming phenomenon in the absorption tower of Ilam gas refinery. Operation parameters such as amine concentration, gas flow rate, and temperature were chosen as variables. In addition, selecting these variables was carried out based on foaming phenomenon in absorption tower. A quadratic model was developed to correlate the relationship between variables and the response. The optimum operating conditions with the less amount of foam were obtained. At last, the best antifoam was determined among four different kind of antifoams.

Methodology

Foam Measuring Apparatus

Foaming measurement experiments were carried out using SCAVINI (Twin- unit Faming Test Apparatus). 300 mL of Dyethanolamine (DMEA) solution was used for each experiment. After obtaining optimum condition, the experiments were continued for determining the appropriate antifoam. The properties of used antifoams are shown in Table 1.

Table 1: properties of antifoams.

Antifoam base	Antifoam	Concentration(wt.%)
silicon	SAG 7133	20%
	SAG 220	
Alcohol	KX -1415	2.5%
	PN -30	

Experimental Design

RSM is a combination of mathematical and statistical techniques. It has four steps: experimental design, model fitting, model validation, and optimization [4]. The experimental design was carried out using Design Expert software version 7.0.1. The Box Behnken design with a quadratic model was employed to correlate the three independent variables. The relation between response and variables can be expressed by a second order polynomial function that consists of linear, quadratic and interactive components, as follows:

$$Y = A_0 + \sum A_i X_i + \sum A_{ii} X_i^2 + \sum A_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

where, Y , X , A_0 , A_i , A_{ii} are the response variable, independent variables, intercept, linear, quadratic, and interaction constant coefficients, respectively. Analysis of variance (ANOVA) has been used to check and justify the significance of the model. The F-value and Prob.>F were employed to determine the statistical significance of the model. A significant model should have a high F-value and a Prob>F below 0.05. The R^2 and R^2_{adj} show a measure of the variability in the response values and the fraction of variation of the response explained by the model adjusted for degrees of freedom, respectively [4, 5].

The variables with the coded and actual values are shown in Table 2. 17 experiments were conducted at different combinations of variable factors by using the Box-Behnken design (Table 3).

Table 2: Levels and codes of the Box- Behnken experimental design.

VARIABLE FACTOR	CODE LEVEL		
	-1	0	+1
A: AMINE CONCENTARION(% .wt)	35	40	45
B: GAS FLOW RATE (L/min)	1.5	2	2.5
C: TEMPERATURE (°C)	40	50	60

Table 3: Experimental values of the Box-Behnken design.

Runs	Variable			Foam volume (mL)
	C	B	A	
1	0	+1	+1	150
2	0	0	0	170
3	0	0	0	165
4	0	-1	-1	130
5	-1	0	+1	90
6	+1	0	+1	170
7	-1	0	-1	65
8	0	-1	+1	150
9	-1	-1	0	95
10	+1	+1	0	230
11	0	0	0	175
12	+1	0	-1	180
13	+1	-1	0	165
14	-1	+1	0	115
15	0	+1	-1	165
16	0	0	0	165
17	0	0	0	170

Discussion and Results

Experimental Design and Model Fitting

The final regression equations based on amine concentration (A), gas flow rate (B) and temperature (C) in term of coded form was obtained as follows:

$$V=169+2.5A+15B+47.5C-8.78 AB-8.75 AC+11.25 BC-22.62 A^2+2.37 B^2-20.13 C^2 \quad (2)$$

The statistical significance of foam model terms was examined via ANOVA and regression analysis. The fitting results of equation model is shown in Table 4. The reliability of the fitted model can

be confirmed by the high values of F and the very low values of probability. Furthermore, the values of R^2 and R^2_{adj} are close to 1. Also, the very small difference between R^2 and R^2_{adj} shows the accuracy of the models. The model did not explain only 1.16% of the total variance. The values of lack of fit confirm the significance of the developed model (P-value > 0.05).

The normal probability versus residual is shown in Fig. 1. A residual distribution close to a straight line is an indicator of the accuracy of the model.

Table 4: Analysis of variance for the regressive model.

P-Value Prob>F	F- Value	MS	SS	DF	Source
0.3849	0.86	50	50	1	A
0.0009	30.92	1800	1800	1	B
0.0001>	310.06	18050	18050	1	C
0.0555	5.26	306.25	306.25	1	AB
0.0555	5.26	306.25	306.25	1	AC
0.0214	8.70	506.25	506.25	1	BC
0.0005	37.02	2155.33	2155.33	1	A ²
0.5433	0.41	23.75	23.75	1	B ²
0.0010	29.29	1705.33	1705.33	1	C ²
0.0001>	47.89	2788.06	25092.50	9	Model
0.0520	6.43	112.50	337.50	3	Lack of fot
R ² =0.9840		R ² _{adj} =0.9635			

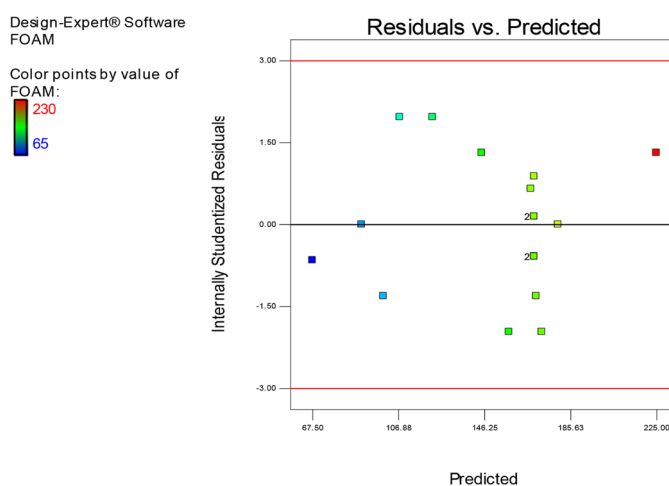


Fig. 1: Plot of stundarized residual vs. predicte.

If the residuals fall near a straight line, the errors are evenly distributed, which supports the adequacy of the least-square fit [4, 5]. As can be seen in Fig. 1, the residuals distribute normally close to a straight line. The plot of the actual responses vs. the predicted values is presented in Fig. 2. As shown, the points are close to the diagonal. This shows a high correlation between experimental and predicted values and confirms the reliability of the foaming model.

Effects of Variables on Foaming

The shapes of the interaction and contour plots

can show the nature of the interactions between variables and factors. Elliptical and circular shapes of the contour plots indicate prominent and negligible interactions, respectively [4]. The interaction graphs of obtained model are shown in Fig. 3

Optimum Conditions

The optimum operating condition with the less amount of foam can be obtained with an amine concentration of 35.19 (wt.%), gas flow rate of 1.63 lit/min, and temperature of 40.21°C.

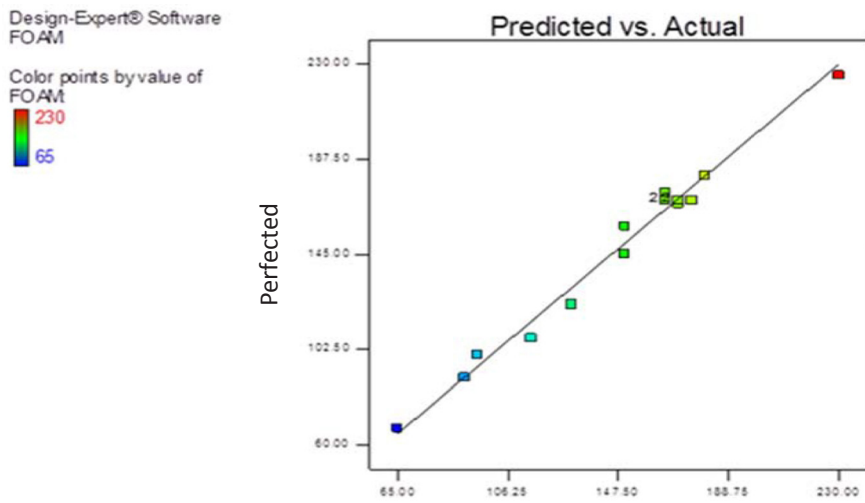


Fig. 2: Plot of predicted values vs. actual responses.

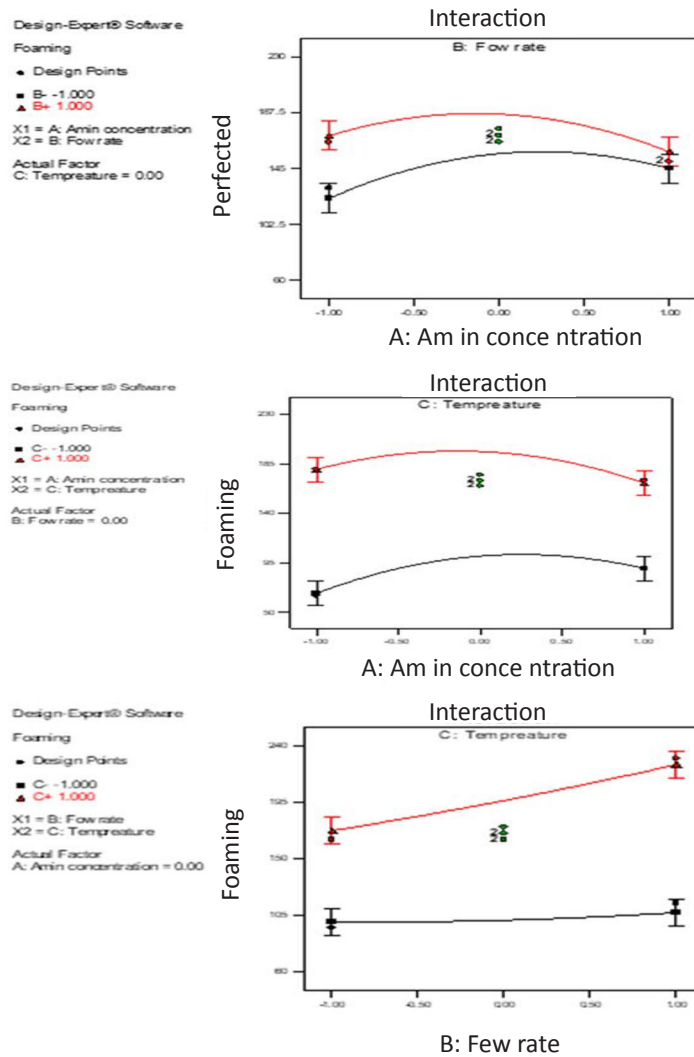


Fig. 3: Interaction graphs of model.

Effective Antifoam

The best antifoam was determined among four different kind of antifoams (silicon based (SAG 7133 and SAG 220) and alcohol based (KX-1415 and PN-30)) in the optimum operating condition. SAG 7133 was chosen as the most effective antifoam.

Conclusion

Foaming is one of the main problems in the gas refining process. Antifoams can be used for solving this undesirable problem. The effects of variable parameters on the foaming in the absorption tower of Ilam gas refinery were studied. An experimental design was used to quantify the effects of variables including the amine concentration, gas flow rate, and temperature, on amount of foam as response. it shows that the foaming is strongly depended on temperature. The optimum operating condition with the less amount of foam can be obtained with an amine concentration of 35.19 (wt.%), flow rate of 1.63 L/min, and temperature of 40.21°C .SAG 7133 was chosen as the most effective antifoam

References

- [1] Aroji R., Vatani z., "investigation the pollution of amine systems and their problems," Iranian Oil Company, 2014.
- [2]. Abdolahi F., Moosavian M. A. and Vatani A., "The mechanism of action of antifoams," Journal of Applied Science, Vol. 5, pp. 1122-1129, 2005.
- [3] Amir A., Haghighiasl A. and Ehsani M. R., "Optimum ratio of filtration recycling in gas sweetening process for foaming phenomenon," 11th National Chemical Engineering Conference, Tehran, Iran, 2006.

- [4]. Kikhavani T., Ashrafizadeh S. N. and Van der Bruggen B., "Identification of optimum synthesis conditions for a novel anion exchange membrane by response surface methodology," J. Appl. Polym. Sci., Vol. 131, pp.39888-39904, 2014.
- [5]. Montgomery D. C., "Design and analysis of experiments," Wiley., New York., 3rd ed., 1991.