

Polymerization
Quarterly, 2026
Volume 15, Number 4
Pages 40-50
ISSN: 2252-0449

Polysiloxanes and Their Blends as Antifoam Agents in Lubricant Production

Mehdi Sheikhi* and Abozar Soleymani

Product Engineering and Development Unit, Sepahan Oil Company, Postal Code
8143864755, Isfahan, Iran

Received: 7 July 2025, Accepted: 21 November 2025

Abstract

Foam formation in lubricants is a major challenge affecting the performance of industrial lubrication systems. It results from the accumulation and stabilization of air bubbles within the lubricant. This phenomenon not only reduces lubrication efficiency and increases equipment wear and operating temperature, but can also lead to serious problems such as diminished corrosion protection, accelerated oil oxidation, air lock, and even safety hazards such as leakage and fire. Foam formation and stability are influenced by various factors, including the chemical and physical properties of the lubricant, operating conditions, type and concentration of additives, and environmental contaminants. This review discusses the mechanisms of foam formation, the factors affecting foam stability, and the role of polymers as antifoaming agents. Polymeric antifoams suppress foam by reducing surface tension, destabilizing foam films, and facilitating air release from the lubricant. Studies show that the selection of an appropriate antifoam depends on the base oil, additive package, and operating conditions. Polydimethylsiloxane (PDMS), due to its low surface tension and high thermal stability is the most widely used silicone-based antifoam. In contrast, polyacrylate-based antifoams (such as T911 and T912) offer better compatibility with certain mineral oils and represent suitable alternatives. Furthermore, hybrid systems combining silicone and polyacrylate antifoams, or modifying formulations with nanoparticles such as silica or graphene improves the antifoaming performance. Ultimately, the selection of polymeric antifoams should be based on experimental evaluation and tailored to the specific characteristics of the lubrication system. This article can help to understand the mechanism of foam formation and current strategies for foam control in lubricants.

Key Words

antifoam,
lubricant,
polysiloxane,
polyacrylate,
polymer blend

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: m.sheykhi@sepahanoil.com

پلی سیلوکسان ها و آمیخته های آن ها به عنوان عوامل کف زدا در تولید روان ساز

مهدی شیخی* و ابوذر سلیمانی

اصفهان، پالایشگاه نفت سپاهان، واحد مهندسی و توسعه محصول، کد پستی ۸۱۴۳۸۶۴۷۵۵

دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۳۰

تشکیل کف در روان سازها از معضلات اساسی در عملکرد سامانه های صنعتی به شمار می رود که به دلیل تجمع و پایداری حباب های هوا در سیال رخ می دهد. این پدیده، نه تنها موجب کاهش بازده روان سازی، افزایش سایش و دمای تجهیزات می شود، بلکه می تواند به بروز مشکلات جدی نظیر کاهش خاصیت ضد خوردگی، افزایش اکسایش روغن، ایجاد هوا بندآوری (air lock) و حتی خطرات ایمنی مانند نشت و آتش سوزی منجر شود. عوامل متعددی از جمله خواص شیمیایی و فیزیکی روغن، شرایط عملیاتی، نوع و غلظت افزودنی ها و نیز آلودگی های محیطی در تشکیل و پایداری کف نقش دارند. در این مقاله، ضمن مرور سازوکار تشکیل کف و عوامل مؤثر بر آن، نقش پلیمرها به عنوان عوامل ضدکف بررسی شده است. پلیمرها به عنوان مواد ضدکف از طریق کاهش کشش سطحی، تخریب فیلم کف و آسان سازی خروج هوا عمل می کنند. مطالعات نشان می دهند، انتخاب ضدکف مناسب به نوع روغن پایه، ترکیب افزودنی ها و شرایط عملیاتی بستگی دارد. پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS) به دلیل کشش سطحی کم و پایداری گرمایی زیاد، کاربردی ترین ضدکف سیلیکونی است. در مقابل، ضدکف های پلی آکریلاتی (مانند T911 و T912) با سازگاری بهتر در برخی روغن های معدنی جایگزین مناسبی محسوب می شوند. ترکیب این دو گروه (عوامل هیبریدی) یا اصلاح آن ها با نانوذراتی چون سیلیکا یا گرافن، عملکرد ضدکف را بهبود می بخشد. در نهایت، استفاده از ضدکف های پلیمری باید با آزمون های تجربی و با توجه به ویژگی های سامانه روان ساز انتخاب شود. این مقاله می تواند به شناخت سازوکار تشکیل کف و روش های مقابله با آن کمک کند.

چکیده



مهدی شیخی



ابوذر سلیمانی

واژگان کلیدی

ضدکف،
روان ساز،
پلی سیلوکسان،
پلی آکریلات،
آمیخته پلیمری

مقدمه

تشکیل کف در روان‌سازها به دلیل تجمع و پایداری حباب‌های هوا در سیال رخ می‌دهد. تشکیل و ماندگاری کف تحت تأثیر خواص شیمیایی و فیزیکی روان‌ساز و همچنین شرایط عملیاتی شامل دما، فشار، سرعت گردش روان در سامانه و غیره است که آثار مخربی بر عملکرد روان‌ساز دارد. در برخی موارد، کف ممکن است به وسیله مواد افزودنی موجود در ترکیب روان‌ساز ایجاد شود. به عنوان مثال، بیشتر شوینده‌ها، ضد اکسندرها، مواد ضد خوردگی، منعقدکننده‌ها و سایر افزودنی‌های استفاده شده در روان‌های عمومی سطح فعال‌اند که موجب آسان‌سازی در پایداری حباب می‌شوند [۱]. سطح فعال‌ها در درجه اول پایداری حباب را افزایش می‌دهند تا اینکه به طور مستقیم تشکیل آن‌ها را تقویت کنند. آن‌ها با کاهش انرژی مورد نیاز برای حفظ رابط گاز و مایع، وجود و ماندگاری حباب‌ها را آسان‌تر می‌کنند. بدین دلیل است که سطح فعال‌ها اغلب در محصولات که نیاز به کف یا امولسیون‌های پایدار دارند، مانند صابون‌ها، مواد شوینده و برخی از انواع روان‌سازها یا سوخت‌ها استفاده می‌شوند [۲].

کاهش بازده روان‌سازی از اصلی‌ترین آثار مخرب کف محسوب می‌شود. مضرات تشکیل کف شامل موارد زیر است [۱، ۳]:

- ۱- کاهش عملکرد روان‌سازی و جلوگیری از کاهش سایش: کف پیوستگی لایه روان را در نقاط اصطکاکی از بین می‌برد، روان‌سازی را کاهش داده و قطعات را در معرض سایش و آسیب جدی قرار می‌دهد.
- ۲- کاهش قابلیت خنک‌سازی و دفع گرما: روان‌ساز کمک می‌کند تا گرمای حاصل از کارکرد تجهیزات دفع شود، اما وجود کف باعث کاهش این اثر خنک‌سازی شده و می‌تواند دمای دستگاه را افزایش دهد.

- ۳- کاهش اثر تمیزکردن و پخش آلودگی: کف باعث افزایش سطح تماس روان با هوا می‌شود. در نتیجه در دماهای زیاد، اکسایش روان را شتاب می‌دهد و باعث تشکیل رسوبات و لجن در سامانه روان‌سازی می‌شود.

- ۴- کاهش خاصیت ضد زنگ و ضد خوردگی: کف باعث ایجاد حفره‌های هوا و تخریب لایه روغنی محافظ قطعات می‌شود که می‌تواند فرایند خوردگی را شتاب بخشد.

- ۵- ایجاد هوا بندآوری و قطع جریان روان: حباب‌های هوا در روان باعث فشرده شدن روان و ایجاد مقاومت در مسیر جریان شده که تأمین روان را مختل کرده و می‌تواند عملکرد سامانه را دچار خطای جدی کند.

- ۶- تشدید اکسایش و تخریب روان‌ساز: کف باعث افزایش

تماس روان با هوا می‌شود و در دمای زیاد، فرایند اکسایش و تجزیه روان را سرعت می‌بخشد که عمر مفید روان را کاهش می‌دهد.

۷- ایجاد خطرات ایمنی: حجم روان‌ساز به دلیل وجود کف افزایش می‌یابد و ممکن است روان از مخزن خارج شده، موجب نشت و حتی آتش‌سوزی شود.

پلیمرها نقش مهمی به عنوان عوامل ضد کف در روان‌سازها ایفا می‌کنند. این مواد با کاهش کشش سطحی و افزایش پایداری روان از تشکیل کف جلوگیری می‌کنند و عملکرد روان‌ساز را بهبود می‌بخشند. برخی از پلیمرهای رایج استفاده شده در این زمینه شامل پلی‌دی‌متیل سیلوکسان، پلی‌اتیلن گلیکول و کوپلیمرهای خاص هستند که به دلیل خواص منحصربه‌فرد آن‌ها در صنایع مختلف کاربرد دارند [۴]. پلیمرهای ضد کف با مهاجرت به سطح حباب‌های کف و کاهش کشش سطحی، باعث ترکیدن حباب‌ها می‌شوند. همچنین، برخی پلیمرها با ایجاد لایه محافظ روی سطح روان از ورود هوا به داخل روان‌ساز جلوگیری می‌کنند و پایداری آن را افزایش می‌دهند. در این مقاله، ابتدا سازوکار تشکیل کف مرور مختصری شده و سپس جایگاه پلیمرها، به ویژه پلی‌سیلوکسان‌ها، در رفع این چالش بررسی می‌شود.

عوامل مؤثر بر تشکیل کف و رفع آن

حباب‌های هوا می‌توانند در اثر اختلاط مکانیکی یا شیمیایی با روان ایجاد شوند. زمانی که کشش سطحی روان افزایش یابد، حباب‌ها پایدار شده و کف تشکیل می‌شود. این فرایند با معادله (۱) قابل توصیف است:

$$\Delta P = 2\gamma/r \quad (1)$$

که در آن، γ کشش سطحی، r شعاع حباب و ΔP اختلاف فشار درون حباب و محیط بیرون از حباب است. این فشار اضافی به دلیل شکل کروی حباب و نیروهای کشش سطحی است [۵]. این معادله نشان می‌دهد، اختلاف فشار درون حباب نسبت مستقیم با کشش سطحی و نسبت عکس با شعاع حباب دارد. به عبارتی، هرچه کشش سطحی بیشتر باشد، فشار درون حباب نسبت به بیرون بیشتر می‌شود. در این حالت، حباب‌ها پایداری بیشتری می‌شوند و کمتر به ترکیدن تمایل دارند. همچنین، هرچه شعاع حباب کوچک‌تر باشد، اختلاف فشار بیشتر می‌شود.

در صنعت روان‌سازی، لازم است که عامل ضد کف همواره به

سامانه اضافه شود. این موضوع به دلیل تجمع آلودگی ها و مواد کفزا در سامانه است که باعث می شود ساختار کف مقاوم تر و پایدارتر شود و ضدکف نتواند به شکل مؤثر با آن مقابله کند. افزون بر این، ذرات ضدکف ممکن است به شکل قطرات بزرگتر تجمع یابند و از پراکنش مناسب در محیط روغن کاسته شود. در نتیجه سطح تماس ضدکف با حباب ها کاهش می یابد و کارایی ضدکف کمتر می شود. تغییر شرایط فیزیکی و شیمیایی سامانه مانند دما، فشار و تغییر ترکیبات نفتی یا افزودنی ها نیز می تواند باعث کاهش کارآمدی ضدکف شود. به همین دلیل، اگرچه ضدکف مصرف مستقیم ندارد، نیاز به تنظیم میزان و نوع ضدکف و گاهی تعویض یا بازیابی سامانه برای حفظ عملکرد بهینه وجود دارد. عوامل مؤثر بر تشکیل و پایداری حباب را می توان به دو دسته تقسیم بندی کرد [۵،۶]:

الف- عوامل مکانیکی است:

- هم زدن شدید: فعالیت قطعاتی مانند چرخ دنده ها یا پمپ ها می تواند هوا را به روغن تزریق کند.

- طراحی نامناسب مخزن: بازگشت روغن به مخزن از ارتفاع زیاد یا نبود موج گیر کافی باعث ایجاد تلاطم و حباب زایی می شود.

- نشتی هوا: ورود هوا از طریق نشتی ها یا درزگیرهای معیوب، عامل دیگری است که موجب حباب زایی می شود.

ب- عوامل شیمیایی:

- آلودگی ها: وجود آب (حتی ۰/۱ درصد) و ذرات جامد به عنوان ناخالصی کشش سطحی را کاهش داده و پایداری حباب را افزایش می دهد. آب با کشش سطحی زیاد باعث تشکیل لایه های امولسیون و پراکنش مولکول ها می شود که به کاهش کشش سطحی کلی مخلوط روغن و آب می انجامد. این کاهش کشش سطحی با ایجاد شرایط خاص، ممکن است به جای کاهش کلی کف، باعث ایجاد کف نامناسب و پایدار شود که مشکلاتی در سامانه روان سازی ایجاد می کند.

- اکسایش: محصولات حاصل از اکسایش مانند اسیدها و پراکسیدها خاصیت ضدکف روغن را خنثی می کنند.

- افزودنی های نامناسب: برخی افزودنی ها (مانند شوینده ها) به عنوان پایه تشکیل کف عمل می کنند.

سازوکار حباب زدایی

دو نوع کف در فرایند کف زایی روغن روان ساز به وجود می آید: کف سطحی و کف داخلی. کف سطحی در سطح آزاد روغن در مخازن، کارتل ها یا مخازن ذخیره تشکیل می شود. این نوع کف ناشی از تجمع حباب های هوا در سطح روغن بوده و با عوامل ضدکف

کنترل می شود. عوامل ضدکف به کاهش کشش سطحی و نابودی فیلم های نازک اطراف حباب ها کمک می کنند و باعث از بین رفتن کف سطحی می شوند. کف سطحی شفاف تر و قابل مشاهده است و اثر مستقیم بر عملکرد سامانه روان سازی دارد.

کف داخلی شامل حباب های هوا یا گاز کوچک است که درون روغن به طور پراکنده وجود دارند و در جریان روان ساز حرکت می کنند. این کف به راحتی به وسیله عوامل ضدکف سطحی از بین نمی رود. حتی ممکن است، افزودن ضدکف پایداری کف داخلی را به شدت افزایش دهد. دلیل این است که ضدکف ها بیشتر در سطح مایع عمل می کنند و نفوذپذیری به درون روغن و تکه تکه کردن حباب های ریز داخلی را ندارند. کف داخلی باعث مشکلاتی از قبیل کاهش کیفیت روان سازی، ایجاد سایش و افزایش دما می شود. برخی از این افزودنی ها باعث تجمع حباب ها می شوند. در حالی که برخی دیگر موجب کوچک شدن و سخت تر شدن حباب ها می شوند [۶].

برای دستیابی به روغن روان ساز با ویژگی های ضدکف مطلوب، باید روغن پایه خاص و افزودنی های مناسب ترکیب شوند. در میان خواص فیزیکی روغن روان ساز، عواملی از قبیل کشش سطحی، چگالی و گرانروکسسانی فیلم سطحی اثر درخور توجهی بر کف زایی دارند.

فرایند ضدکف دو ویژگی کلیدی زیر را دارد:

الف- کاهش کشش سطحی عامل ضدکف به مقدار کافی؛

ب- نامحلول بودن و پراکنش زیاد عامل ضدکف در روغن روان ساز [۷].

سازوکار ضدکف براساس کاهش پایداری فیلم نازک روغن اطراف حباب های هوا عمل می کند. افزودنی های ضدکف مانند پلی سیلوکسان ها و پلیمرهای آلی در امتداد فصل مشترک گاز-مایع قرار می گیرند و باعث نازک تر شدن و ناپایداری این فیلم می شوند. در این فرایند، آثار جریان های مارانگونی (Marangoni effects) نیز نقش مهمی ایفا می کنند. جریان مارانگونی ناشی از اختلاف کشش سطحی در سطح مایع است که می تواند موجب حرکت طولی مایع نسبت به سطح حباب شود و به پاره شدن فیلم نازک اطراف حباب کمک کند. به عبارت دیگر، با پراکنش ضدکف در سطح حباب، جریان های مارانگونی به انتقال مواد ضدکف در طول سطح حباب کمک می کنند. این فرایند باعث تخریب و ترکیدن حباب ها می شود که در نهایت به کاهش کف منجر می شود. همچنین سازوکار مزبور شامل ایجاد پل های نفتی نازک میان حباب هاست که با فشارهای مویینگی نامتعادل شکسته شده و به تخریب سریع تر لایه کف منجر

می‌شود. به‌طور خلاصه، ضدکف‌ها با تحریک جریان‌های مارانگونی در سطح حباب‌ها، باعث ناپایداری فیلم‌های نازک روغن و تخریب کف می‌شوند. این روند نقش کلیدی در کنترل کف در روغن‌های روان‌ساز دارد و بازدهی فرایند روان‌سازی را حفظ می‌کند.

کشش سطحی عوامل ضدکف معمولاً 16 mN.m^{-1} تا 21 mN.m^{-1} است، درحالی‌که کشش سطحی روغن معدنی روان‌ساز 30 mN.m^{-1} تا 50 mN.m^{-1} قرار دارد. هرچه تفاوت کشش سطحی عامل ضدکف با روغن روان‌ساز بیشتر باشد، عامل ضدکف سریع‌تر به فیلم کف نفوذ می‌کند و اثر بهتری می‌یابد. درعین حال، حل‌پذیری عامل ضدکف در روغن روان‌ساز باید در حد کم باشد. دراین صورت قابلیت ایجاد اثر ضدکف مطلوب را در غلظت‌های کم نیز دارد. در صورتی‌که حل‌پذیری عامل ضدکف در روغن روان‌ساز زیاد باشد، باعث کاهش کشش سطحی کل سامانه روان‌ساز می‌شود. در نتیجه تشکیل حباب‌ها را آسان‌سازی کرده و حذف آن‌ها را نیز دشوارتر می‌کند [۶].

سازوکار عوامل ضدکف به چند جنبه تقسیم می‌شود:

- ۱- کاهش کشش سطحی موضعی کف که باعث ترکیدن کف می‌شود.
- ۲- تخریب خاصیت کشسانی فیلم کف به وسیله عامل ضدکف که باعث از بین رفتن حباب‌ها می‌شود.
- ۳- آسان‌سازی تخلیه فیلم مایع به وسیله عامل ضدکف که به فروپاشی حباب‌ها منجر می‌شود.
- ۴- افزودن ذرات جامد آب‌گریز که باعث فروپاشی حباب‌ها می‌شود.
- ۵- استفاده از سطح فعال‌های حل‌کننده کف که باعث ترکیدن حباب‌ها می‌شود [۷].

پلیمرها به عنوان عوامل ضدکف در روان‌سازها

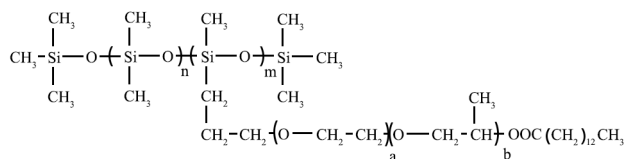
انواع مختلفی از ترکیبات ضدکف وجود دارند که شامل نوع روغنی، محلولی، امولسیون، پودری و ترکیبی می‌شوند. در این میان، ضدکف‌ها را می‌توان به دو گروه عمده غیرپلیمری و پلیمری دسته‌بندی کرد. ضدکف‌های غیرپلیمری شامل ترکیبات معدنی مانند زئولیت‌ها و سیلیکاها و همچنین کوچک‌مولکول‌های غیرپلیمری اعم از روغن‌های معدنی، الکل‌های چرب و استرها هستند. این مواد معمولاً با سازوکار فیزیکی و جذب حباب‌های کف، باعث کاهش و شکستن آن می‌شوند. در مقابل، ضدکف‌های پلیمری، به ویژه پلیمرهای سیلیکونی و غیرسیلیکونی، به دلیل کشش سطحی بسیار کم، پایداری شیمیایی و گرمایی زیاد و پراکنش مناسب در محیط‌های روغنی، به‌طور مؤثر باعث ناپایداری فیلم‌های نازک دور حباب‌ها می‌شوند و کف‌های پایدار را تخریب می‌کنند.

صرف‌نظر از نوع ماده ضدکف، ترکیب استفاده‌شده باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- الف- قدرت ضدکف زیاد با مقدار مصرف کم؛
 - ب- عدم تأثیر بر ویژگی‌های اساسی سامانه کف‌زا؛
 - پ- کشش سطحی کم؛
 - ت- تعادل مناسب با سطح؛
 - ث- پراکنش و نفوذپذیری خوب؛
 - ج- مقاومت گرمایی زیاد؛
 - چ- پایداری شیمیایی مناسب و مقاومت زیاد در برابر اکسایش؛
 - ح- حل‌پذیری و نفوذپذیری مناسب نسبت به گاز؛
 - خ- حل‌پذیری کم در محلول کف‌زا؛
 - د- عدم فعالیت فیزیولوژیکی و ایمنی زیاد.
- هیچ ماده ضدکفی وجود ندارد که تمام این ویژگی‌ها را به‌طور هم‌زمان داشته باشد و هر ضدکف فقط در یک یا چند روغن خاص مؤثر است. بنابراین، انتخاب ماده ضدکف نیاز به انجام آزمایش‌های اولیه دارد و باید به غلظت افزوده‌شده نیز توجه شود [۸،۹].
- پلیمرهای ضدکف به سه دسته پلیمرهای سیلیکونی، غیرسیلیکونی و ترکیبی تقسیم می‌شوند. در ادامه به شرح شیمی این پلیمرها پرداخته می‌شود.

پلیمرهای سیلیکونی

پلیمرهای سیلیکونی از مهم‌ترین و مؤثرترین خانواده‌های ضدکف در صنعت روان‌سازها به‌شمار می‌روند. آن‌ها به دلیل ساختار ویژه زنجیری شامل پیوندهای سیلیکون-اکسیژن (Si-O) و گروه‌های آلی جانبی، ویژگی‌های منحصر به فردی مانند پایداری گرمایی زیاد، آب‌گریزی و کشش سطحی بسیار کم دارند. این خواص باعث می‌شود تا پلیمرهای سیلیکونی به‌طور مؤثر بتوانند فیلم‌های نازک روغنی اطراف حباب‌های هوا را ناپایدار کرده و با تخریب ساختار کف، از افزایش بیش از حد کف در سامانه‌های روان‌ساز جلوگیری کنند. از مزایای این مواد می‌توان به مصرف کم، کارایی زیاد در شرایط دمایی گسترده و سازگاری خوب با اغلب روغن‌های پایه اشاره کرد. البته معایبی نیز وجود دارد، از جمله حساسیت به شرایط اختلاط که ممکن است باعث تجمع و ته‌نشینی شود. همچنین، محدودیت‌هایی در برخی از شرایط عملیاتی که کارایی ضدکف کاهش می‌یابد. بنابراین، مطالعه و اصلاح ساختار پلیمرهای سیلیکونی به منظور بهبود پراکنش، ثبات و عملکرد آن‌ها در برابر عوامل مختلف محیطی و عملیاتی اهمیت زیادی دارد. پژوهش‌های اخیر افزون‌بر تأکید بر این ویژگی‌ها برای افزایش درخور توجه

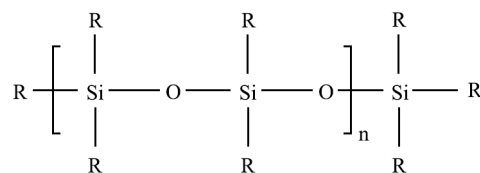


شکل ۲- ساختار پلی سیلوکسان اصلاح شده با پلی (اتر-استر) [۱۴].

نوع عامل ضدکف پلی اتر و سیلیکونی را به طور هم زمان دارد که موجب می شود، ترکیب خواص بهبود یافته ای از کشش سطحی، سرعت حباب زدایی، پایداری و مقدار مورد نیاز را داشته باشد [۱۳]. هر چند ضدکف مناسب باید حل پذیری و پراکنش ضعیفی در محیط کف داشته باشد، وجود زنجیرهای پلی اتر یا پلی استر که بخش هایی با خاصیت آب دوستی و نیز چربی دوستی کنترل شده دارند، باعث ایجاد تعادل بهینه میان حل پذیری و پراکنش در فاز روغنی می شود. این تعادل موجب می شود، ضدکف به راحتی در محیط پراکنده شود، به سطح حباب ها برسد و فیلم نازک کف را تخریب کند، بدون اینکه در روغن به طور کامل حل شود و اثر آن را از دست بدهد. افزون بر این، اصلاح ساختار با پلی اتر و پلی استر باعث افزایش پایداری شیمیایی و گرمایی ضدکف می شود، در نتیجه عملکرد بهینه تری در کنترل کف در شرایط عملیاتی مختلف دارد. Yinchen و همکاران نوعی عامل ضدکف پلی (اتر-استر) اصلاح شده سیلیکونی را معرفی کردند که شامل سیلیس آب گریز، پلی (اتر-استر) اصلاح شده سیلیکونی، امولسیون کننده Span 80 و Tween 80 و عامل گرانروی افزای گلیسرول مونواسترات بود (شکل ۲). کشش سطحی محلول پلی (اتر-استر)-سیلیکونی در غلظت ۰/۳ g.L⁻¹، ۲۸/۶ mN.m⁻¹ محاسبه شده و زمان ضدکف برای آن ۵ s اندازه گیری شد که نسبت به عامل ضدکف تجاری پلی اتر GPE و X-100F عملکرد بهتری داشت، اما نسبت به عامل ضدکف SAG عملکرد ضعیف تری را نشان داد [۱۴].

Qiufeng و همکاران، پلی اکسی پروپیلن پلی اکسی اتیلن اکسی پروپیل -b- پلی دی متیل سیلوکسان با هیدروکسیل سرپوشانده (PESO) را به عنوان عامل ضدکف نانو سنتز کردند که سرعت کف زدایی زیادی داشت (شکل ۳) [۱۵].

Luan و همکاران با هدف بهبود ویژگی های تریبولوژیکی و ضدکف سازی پلی سیلوکسان، مشتقی از آن را با انتهای اپوکسی (UC-276) را به دو صورت اصلاح کردند. در حالت اول، پلیمر با پایانه دی ایزواکتیل فسفات اصلاح شده (UCP204) و در حالت دوم با ترکیب دی اکتیل دی تیوفسفات (UCT2003) اصلاح شد (شکل ۴).

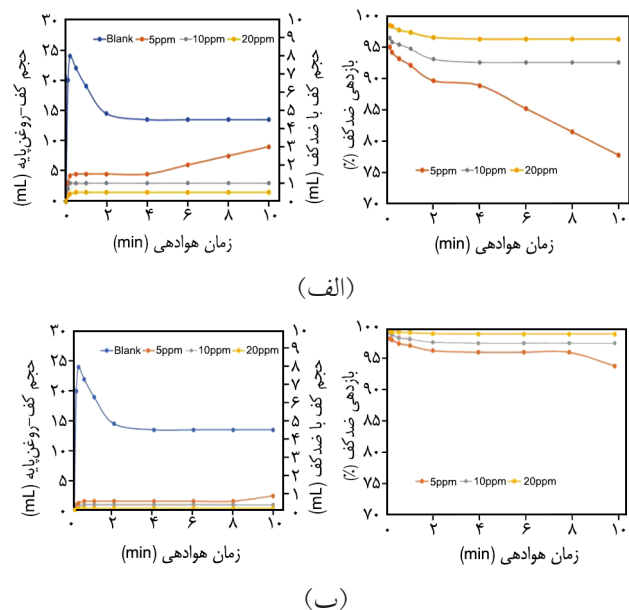


شکل ۱- ساختار پلی سیلوکسان ها. اگر R گروه متیل باشد، ترکیب پلی دی متیل سیلوکسان است.

اثر بخشی و دوام عملکرد ضدکف به توسعه ترکیبات هیبریدی و اصلاح شده با پلی اتر و نانوذرات پرداخته اند. این دیدگاه ها در کنار شناخت کلی از ساختار و عملکرد پلیمرهای سیلیکونی، پایه مناسبی را برای درک بهتر نقش آن ها در کنترل کف در روان سازها فراهم می کند [۱۰].

رایج ترین عامل ضدکف سیلیکونی، پلی دی متیل سیلوکسان (T901) است که معمولاً با نام دی متیکون شناخته می شود. این ماده مایع گرانرو شفاف، بی بو، بی طعم و غیرسمی است که در زنجیر اصلی آن ساختار Si-O-Si دارد و نوعی مایع آلی غیرقطبی محسوب می شود (شکل ۱). مهم ترین ویژگی های این ترکیبات عبارتند از: کشش سطحی کم (۲۱ mN.m⁻¹ تا ۲۵ mN.m⁻¹ در دمای ۳۵ °C)، قابلیت ضدکف عالی در روغن یا آب، پراکنش پایدار در روغن روان ساز، کاهش کشش سطحی فیلم روغنی که باعث بی ثباتی کف و حذف آن می شود، مقدار مصرف کم (حدود ۰/۰۰۱ درصد) برای اثر ضدکف مناسب، پایداری گرمایی و مقاومت زیاد در برابر اکسایش و دمای زیاد و عدم واکنش با سایر افزودنی های روغن روان ساز [۱۱].

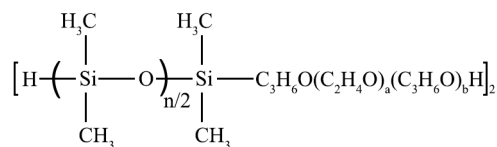
ترکیب T901 نسبت به نحوه آمیخته سازی حساس است و تمایل به ته نشینی و تجمع در روغن روان ساز دارد که به کاهش عملکرد ضدکف پس از ذخیره سازی منجر می شود. Zhang و همکاران نشان دادند، با افزایش مقدار T901، ذرات ریز عامل ضدکف تجمع می یابند و قطره تشکیل می دهند. این کار باعث آسیب به کشش سطحی روغن روان ساز و ایجاد پدیده های نامطلوبی مانند کاهش عملکرد ضدکف و افزایش کدورت روغن روان ساز می شود [۱۲]. در سال های اخیر، عامل ضدکف پلی سیلوکسان اصلاح شده با پلی اتر به عنوان یک موضوع پژوهشی پرطرفدار مطرح شده است. تمرکز اصلی این پژوهش ها بر اتصال بخش های پلی اتر به زنجیر پلی سیلوکسان از طریق پلیمرشدن دسته ای یا پیوندی است. بخش های زنجیر پلی اتر آب دوست باعث حل ناپذیری در فاز روغنی شده و بخش های زنجیر پلی سیلوکسان موجب کاهش کشش سطحی می شود. این نوع عامل ضدکف مزایای هر دو



شکل ۵- کارایی: (الف) PDMS و (ب) RGO-ODA/PDMS به عنوان عوامل ضدکف برای روغن مدل [۱۷].

هوادهی به ۱۳/۵ mL کاهش یافت که نشانگر پایداری نسبی کف در شرایط آزمایشگاهی بود (شکل ۵). افزودن PDMS (۵ ppm) موجب کاهش درخور توجه کف شد، به طوری که حجم اولیه کف به ۵ mL کاهش یافت و پس از ۱۰ min هوادهی، حجم کف به ۱۰ mL افزایش یافت. این مقدار نشانگر بازده ضدکفی حدود ۶۹/۵ درصد بود. ترکیب PDMS/RGO-ODA عملکرد بهتری نسبت به PDMS داشت. حجم اولیه کف در شرایط یکسان ۱/۵ mL اندازه گیری شد و پس از ۱۰ min تنها به ۳ mL افزایش یافت. این داده ها نشان داد، بازده ضدکف این ترکیب حدود ۸۸/۹ درصد بود که بهبود درخور توجهی در مقایسه با PDMS خالص دارد. این نتایج حاکی از آن بود که استفاده از نانورق های گرافن اکسید کاهش یافته آلکیل دار شده (RGO-ODA) باعث افزایش پایداری گرمایی و بهبود عملکرد ضدکف می شود و آن را گزینه ای مناسب تر برای کاربردهای صنعتی می سازد [۱۷].

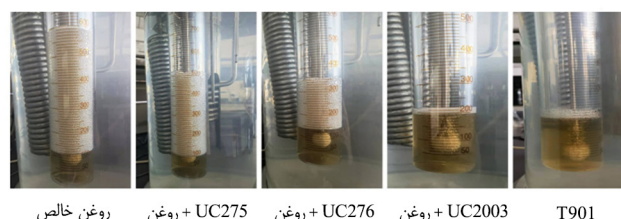
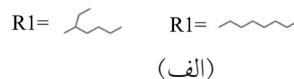
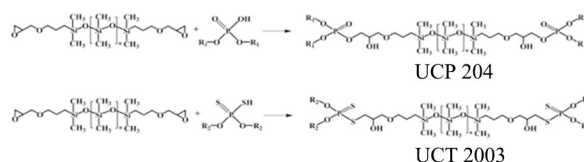
Chen و همکاران، اثر روغن های پلی (دی متیل سیلوکسان) و نانوذرات سیلیکا را بر کف کردن روغن ها بررسی کردند. نتایج کمی نشان داد، گرانروی PDMS اثر مستقیمی بر عملکرد ضدکف دارد. برای مثال، PDMS با گرانروی ۱۰۰۰ mPa.s ۹۴ درصد از کف را کاهش دهد. درحالی که PDMS با گرانروی ۵۰ mPa.s اثر منفی داشت. غلظت PDMS نیز بر میزان کف اثرگذار است. افزایش غلظت PDMS از ۱/۱ درصد وزنی به ۰/۵ درصد وزنی موجب افزایش اثر ضدکف تا ۹۰ درصد شد. همچنین نتایج



شکل ۳- ساختار PESO [۱۵].

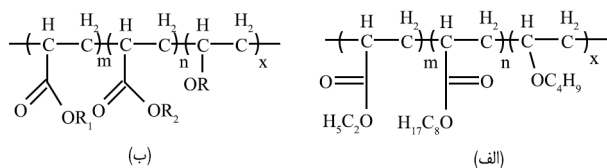
نتایج نشان داد، روغن های سیلیکون اصلاح شده موجب کاهش ضریب اصطکاک تا ۶۲/۷ درصد و کاهش حجم سایش می شوند. علت آن، تشکیل فیلم های روان سازی مرزی با عناصر فسفر و گوگرد بود. همچنین، همان طور که در شکل ۳ ب نشان داده شده است، روغن های اصلاح شده، به ویژه UCT203، عملکرد ضدکف سازی بهتری نسبت به عوامل تجاری دارد و اثر آن در طول زمان حفظ می شود. این رفتار به کاهش کشش سطحی و بهبود پراکنش نسبت داده شد [۱۶].

در پژوهشی که اخیرا نتایج آن منتشر شده است، از کامپوزیت گرافن اکسید کاهش یافته آلکیل دار شده (RGO-ODA) و پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS) به عنوان عامل ضدکف استفاده کردند. این ترکیب، به منظور پراکنش بهتر نانوذرات در روغن، با اکتادسیل آمین اصلاح شده و سپس با پلیمر ترکیب شد. وجود نانوذرات، نه تنها بر پایداری گرمایی روغن اثرگذار بود، بلکه به عنوان عامل مؤثری بر کاهش کف زایی عمل کرد. حجم اولیه کف بدون استفاده از ضدکف حدود ۲۴ mL بود و پس از ۱۰ min



(ب)

شکل ۴- (الف) ساختار دو پلیمر اصلاح شده UCP204 و UCT2003 و (ب) حجم کف در روغن حاوی افزودنی های مختلف [۱۶].



شکل ۶- ساختار: (الف) T911 و (ب) T912 [۱۹].

عامل ضدکف غیرسیلیکونی به کار می‌رود. با این حال، ماده ضدکف غیرسیلیکونی حل‌پذیری بیشتری در روغن معدنی دارد و تأثیر آن در از بین بردن کف به خوبی ماده ضدکف سیلیکونی نیست. همچنین، مقدار اضافه شده آن بیش از ماده ضدکف سیلیکونی است. در میان این ضدکف‌ها، کاربردی‌ترین پلی‌آکریلات T912 و T911 است که نوعی مایع چسبناک شفاف غیرسمی و بی‌رنگ است [۱۹]. ساختار آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

پلی‌آکریلات‌ها دارای مزایایی از قبیل ایجاد قطر بزرگ‌تر در حباب‌های تولیدشده، عدم حساسیت به روش‌های مختلف اختلاط، بازده کف‌زدایی زیاد و پایداری در محیط‌های اسیدی است [۲۰]. از آنجاکه اثر حباب‌زدایی (bubble suppression) یک عامل ضدکف غیرسیلیکونی بیش از اثر حذف کف است، استنباط می‌شود که سازوکار عمل کف‌زدای غیرسیلیکونی افزایش کشش سطحی بین روغن روان‌ساز و هوا باشد که تمایل سامانه اصلی به کشش سطحی کم را تغییر می‌دهد. اعتقاد بر این است که این ترکیبات تنها قابلیت افزایش کشش سطحی را در روغن‌های حاوی سطح فعال دارند. بنابراین، خاصیت کف‌زدایی عامل ضدکف غیرسیلیکونی متأثر از سطح فعال موجود در سامانه است. همچنین، عملکرد این ترکیبات به طور ویژه متأثر از وجود سایر افزودنی‌های موجود در سامانه است. برای مثال مشاهده شده است، در صورتی که T912 در نمونه حاوی کلسیم آلکیل سالیسیلات یا باریم دی‌نویل نفتالین سولفونات استفاده شود، به دلیل سازگاری ضعیف عامل ضدکف غیرسیلیکونی با افزودنی‌های مزبور، رفتار ضدکف مطلوبی ایجاد نمی‌شود [۲۱].

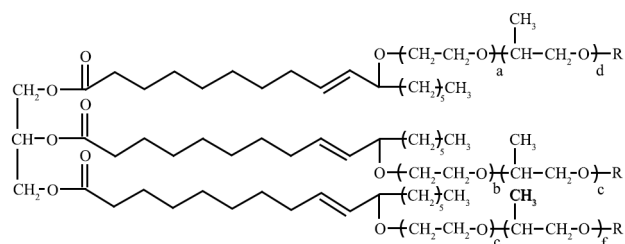
Wu و همکاران، نوعی عامل ضدکف غیرسیلیکونی برپایه کوپلیمری از ۲-اتیل هگزیل آکریلات و وینیل استات با نسبت ۰/۴۸ تا ۰/۵۲ را سنتز کردند که پایداری کف ۰ mm داشت و عملکرد بهینه‌ای در کاهش تشکیل کف نشان داد. این کوپلیمر با کاهش کشش سطحی روغن و ایجاد ناپایداری در حباب‌های هوا عمل می‌کند. ساختار آب‌گریز اتیل هگزیل آکریلات امکان ایجاد اختلال در ساختار کف را فراهم می‌کند. در حالی که بخش‌های قطبی وینیل استات سازگاری با پایه روغن را بهبود می‌بخشد. نمونه‌های

نشان داد، وجود نانوذرات سیلیکا می‌تواند بر پایداری کف اثرگذار باشد. در این راستا، یکی از مؤلفه‌های اصلی میزان آب‌دوستی و آب‌گریزی ذرات است. با افزایش آب‌گریزی، پایداری کف افزایش یافت و نانوذرات با زاویه تماس ۱۵۲° بیشترین تأثیر را داشتند. این داده‌ها نشان داد، انتخاب صحیح گرانروی و غلظت PDMS و همچنین آب‌گریزی و غلظت نانوذرات می‌تواند اثر چشمگیری بر عملکرد عامل ضدکف داشته باشد [۱۸].

عوامل ضدکف غیرسیلیکونی

عوامل ضدکف غیرسیلیکونی نیز بخش مهمی از افزودنی‌های کنترل‌کننده کف را در روان‌سازها تشکیل می‌دهند که به‌ویژه در مواردی کاربرد دارند که استفاده طولانی‌مدت از ضدکف‌های سیلیکونی باعث کاهش اثربخشی یا ایجاد مشکلات می‌شود. این مواد عمدتاً از خانواده پلیمرهای آکریلاتی، کوپلیمرها و ترکیبات برپایه صابون‌های پایه‌فلزی اسید چرب تشکیل می‌شوند و به دلیل حل‌پذیری بیشتر در روغن‌های معدنی، پراکنش بهتری در برخی سامانه‌ها دارند. مزیت این گروه از ضدکف‌ها ایجاد آثار مؤثر بر افزایش کشش سطحی موضعی و سرکوب تشکیل حباب است که در برخی شرایط حتی عملکرد بهتری نسبت به ضدکف‌های سیلیکونی ارائه می‌دهند. با وجود این، معایبی مثل نیاز به غلظت بیشتر برای دستیابی به اثر مطلوب، حساسیت نسبت به وجود سطح‌فعال‌ها، سایر افزودنی‌ها و نوع ترکیب پایه روغن باعث می‌شود که انتخاب و طراحی این عوامل با دقت بیشتری انجام شود. همچنین محدودیت‌هایی در سازگاری با برخی افزودنی‌های معمول در روغن‌های صنعتی وجود دارد که می‌تواند کارایی ضدکف را کاهش دهد. اصلاح این ترکیبات با کوپلیمرهای خاص و ترکیب آن‌ها با سایر مواد ضدکف بهبود عملکرد و پایداری را به همراه دارد. به‌طور کلی، عوامل ضدکف غیرسیلیکونی مکمل مهمی برای طیف گسترده‌ای از کاربردها هستند و انتخاب آن‌ها باید با توجه به خصوصیات ویژه روان‌ساز، شرایط عملیاتی و سازگاری با سایر افزودنی‌ها انجام گیرد. این دیدگاه‌های کلی و مفهومی در کنار نکات اصلی موجود در مطالعات مختلف، چارچوب مناسبی برای فهم نقش و اهمیت عوامل ضدکف غیرسیلیکونی در صنعت روان‌ساز فراهم می‌کند [۱۹، ۲۰].

مهم‌ترین عامل ضدکف غیرسیلیکونی به خانواده آکریلات‌ها اشاره دارد. برای برخی از روغن‌های روان‌ساز مانند روغن‌های توربین و هیدرولیک، چون استفاده طولانی‌مدت از ماده کف‌زدای سیلیکونی باعث ازدست رفتن عملکرد کف‌زدایی می‌شود، معمولاً



شکل ۷- ساختار روغن کرچک اصلاح شده با پلی اکسی اتیلن و پلی اکسی لاکتون اولئات [۲۴].

تثبیت پایداری عملکرد در محدوده دمایی و فشارهای متنوع است. با این حال لازم است، نسبت ها و فرایندها تهیه ترکیبات با دقت زیاد تنظیم شود تا از سازگاری شیمیایی و پراکنش مناسب در روغن اطمینان حاصل شود و مشکلاتی مانند افزایش گرانروی یا کاهش پایداری افزودنی به حداقل برسد. همچنین محدودیت هایی در برخی سامانه ها به دلیل تفاوت در ماهیت افزودنی ها و روغن پایه وجود دارد که نیازمند آزمون های دقیق و طراحی سامانده است. در نهایت، اتخاذ راهبرد استفاده از ضدکف های ترکیبی، ضمن ارائه عملکرد بهینه تر، امکان کنترل بهتر و انعطاف پذیری بیشتر در مواجهه با چالش های صنعتی مرتبط با کف را فراهم می آورد و به توسعه روان سازه های با کیفیت و طول عمر بیشتر کمک می کند. این نگرش کلی، مبنای تبیین نقش و اهمیت ضدکف های ترکیبی در بهبود سامانه های روان ساز است [۲۷-۲۵].

مواد ضدکف سیلیکونی و غیرسیلیکونی مزایا و محدودیت های ویژه دارند [۲۵]. در برخی موارد، استفاده از عوامل کفزدای سیلیکونی یا غیرسیلیکونی به تنهایی نمی تواند الزامات کفزدایی روغن روان ساز را از نظر انتشار هوا، کفزدایی، فناوری ترکیب، شرایط محیطی قابل اجرا و غیره برآورده کند. به عنوان مثال، روغن موتور احتراق داخلی با روغن دنده تفاوت هایی دارد. چون روغن پایه و مواد افزودنی استفاده شده در هر یک متفاوت است، ماهیت کف کردن روغن نیز متفاوت می شود. اگر فقط از عامل سیلیکونی یا مواد ضدکف غیرسیلیکونی استفاده شود، اثر کفزدایی ممکن است به نتیجه مورد انتظار نرسد. برای روغن های هیدرولیک، توربین و غیره، عمق پالایش روغن کافی نیست یا مواد افزودنی مختلف آن باعث می شود، اثر یک عامل کفزا به اندازه کافی خوب نباشد. بنابراین، در پاسخ به این شرایط و بسته به وضعیت واقعی روغن روان ساز دو نوع ماده کفزا براساس نسبت ها و فرایند مناسب ترکیب می شوند. چند مورد از مواد ضدکف ترکیبی توسط مؤسسه پژوهشی پالایشگاه شانگهای ساخته شده است. T921 یکی از عوامل ترکیبی

با مقدار بیشتر از اتیل هگزیل آکریلات بهترین عملکرد ضدکفی را نشان داده و زمان فروپاشی کف را تا ۸۰ درصد کاهش دادند [۲۲]. این مطالعه نشان داد، کوپلیمرهای مزبور با ترکیب بهینه شده می توانند جایگزین مناسبی برای ضدکف های سیلیکونی مرسوم باشند و عملکرد چندمنظوره را در روغن های روان ساز ارائه دهند. Jing و همکاران، ساخت یک عامل ضدکف غیرسیلیکونی از نوع ترپلیمر را گزارش کردند که از کوپلیمر شدن سه مونومر، یعنی آکریلات، اتیلن استات و یک ترکیب اپوکسی تشکیل شده بود. نسبت جرمی این مونومرها به ترتیب ۶۰-۴۰ درصد آکریلات، ۳۰-۱۰ درصد اتیلن استات و ۴۰-۲۰ درصد ترکیب اپوکسی بود که این خود شامل مخلوطی از پروپیلن اکسید و اپوکسی بوتان می شود. این عامل ضدکف به طور یکنواخت در روغن روان ساز پراکنده می شود و به طور مؤثر از تشکیل کف جلوگیری می کند. این کوپلیمر برای استفاده در روان سازه ها مناسب بوده و محصول ترکیبی آن دارای عملکرد ضدکف کارآمد و پایداری طولانی مدت است که می تواند نیازهای عملی استفاده از روغن را برآورده کند [۲۳].

افزون بر آکریلات ها، مواد دیگری نیز به عنوان عوامل حباب زدای روان ساز معرفی شده اند. یکی از این مسیرها برای ساخت ضدکف های غیرسیلیکونی استفاده از صابون پایه فلزی اسید چرب به عنوان ماده اصلی ضدکف و روغن گیاهی و مشتقات آن به عنوان پایه است. به دلیل عدم حل پذیری صابون پایه فلزی اسید چرب در روغن گیاهی، نیاز است تا روغن گیاهی اصلاح شود و قابلیت حمل پایدار این صابون را بیابد. بررسی ها نشان داده است، روغن کرچک اصلاح شده با پلی اکسی اتیلن و پلی اکسی لاکتون اولئات موجب بهبود سازگاری صابون پایه فلزی اسید چرب با روغن کرچک می شود (شکل ۷). این راهبرد، نه تنها عملکرد ضدکف را بهبود می دهد، بلکه پایداری طولانی مدت آن را نیز تضمین می کند [۲۴].

عوامل ضدکف ترکیبی

عوامل ضدکف ترکیبی نقش اساسی در بهبود عملکرد و گستردگی کاربرد افزودنی های ضدکف در روان سازه ها ایفا می کنند. زیرا ترکیب دو یا چند نوع ماده ضدکف با ویژگی ها و سازوکارهای متفاوت، می تواند نقاط ضعف هریک را جبران و مزایای آن ها را تقویت کند. این مواد معمولاً شامل ترکیبی از پلیمرهای سیلیکونی و غیرسیلیکونی هستند که به طور هدفمند براساس شکل گیری کف، نوع روغن پایه و شرایط عملیاتی گزینش می شوند. مزیت اصلی این گونه مواد، قابلیت بهبود هم زمان خواص ضدکف مانند کاهش کف سطحی و کف داخلی، افزایش سرعت آزادسازی هوا و

روغن‌های دیگر نیز کارایی زیادی دارد [۲۸].

نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد، کنترل و کاهش کف در روان‌سازها، به‌ویژه در صنایع حساس، امری ضروری و حیاتی است. پلیمرها به عنوان عوامل ضدکف، نقش کلیدی در بهبود پایداری و عملکرد روغن‌های روان‌ساز ایفا می‌کنند. انتخاب نوع و ساختار مناسب پلیمر، توجه به غلظت مصرفی، سازگاری با سایر افزودنی‌ها و شرایط عملیاتی از عوامل تعیین‌کننده در اثربخشی این مواد است. پلیمرهای سیلیکونی به دلیل کشش سطحی کم و پایداری گرمایی زیاد، بیشترین کاربرد را دارند. با این حال، پلیمرهای غیرسیلیکونی و ترکیبی نیز بسته به نوع روغن و شرایط فراوری می‌توانند گزینه‌های مناسبی باشند. استفاده از نانوذرات و اصلاح ساختار پلیمرها، افق‌های جدیدی را در افزایش بازده ضدکف و پایداری روغن‌ها گشوده است. در نهایت، انتخاب عامل ضدکف مناسب باید براساس آزمون‌های تجربی و با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص هر سامانه انجام گیرد تا ضمن حفظ خواص اصلی روغن، از بروز مشکلات ناشی از کف جلوگیری شود.

مراجع

1. Suja V.C., Kar A., Cates W., Remmert S.M., and Fuller G.G., Foam Stability in Filtered Lubricants Containing Antifoams, *J. Colloid Interface Sci.*, **567**, 1-9, 2020.
2. Denkov N.D., Tcholakova S., Golemanov K., Ananthpadmanabhan K.P., and Lips A., The Role of Surfactant Type and Bubble Surface Mobility in Foam Rheology, *Soft Matter*, **5**(18), 3389-3408, 2009.
3. Prolic T.C. and Lepusic A., Effect of Foaming on the Antiwear Properties of Lubricating Oils, *Goriva I Maziva*, **51**, 38, 2012.
4. Calhoun S.G., Suja V.C., and Fuller G.G., Foaming and Antifoaming in Non-Aqueous Liquids, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, **57**, 101558, 2022.
5. Ab Rasid S.A., Mahmood S.M., Kechut N.I., and Akbari S., A Review on Parameters Affecting Nanoparticles Stabilized Foam Performance Based on Recent Analyses, *J. Petrol. Sci. Eng.*, **208**, 109475, 2022.
6. Ren C., Zhang X., Jia M. et al., Antifoaming Agent for Lubricating Oil: Preparation, Mechanism and Application, *Molecules*, **28**(7), 3152, 2023.
7. Bhatt S., Saraf S., and Bera A., Perspectives of Foam Generation Techniques and Future Directions of Nanoparticle-Stabilized CO₂ Foam for Enhanced Oil Recovery, *Energy Fuel*, **37**, 1472-1494, 2023.
8. Centers P.W., Behavior of Silicone Antifoam Additives in: Synthetic Ester Lubricants, *Tribol. Trans.*, **36**, 381-386, 1993.
9. Zaki N., Antifoam Agents, in: *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 53-56, 2014.
10. Callaghan I.C., Antifoams for Nonaqueous Systems in the Oil Industry, in *Defoaming*, CRC, pp. 119-150, 2017.
11. Feng Z.F., Review of Antifoaming Agents for Lubricating Oils, *Proc. 2001 Annu. Meet. China Petrol. Lubr. Sci. Technol. Inf. Station*, Beijing, China, 310-317, 2001.
12. Zhang L. and Wang Y., Effect of Antifoaming Agent on Lubricating Oil, *Lubr. Oil*, **34**, 40-43, 2019.
13. Zhang F.J. and Wang M., Research Progress of Silicone Defoamer, *J. Xuchang Univ.*, **31**, 76-79, 2012.

14. Dou Y.C., Guo R., Qiao Y., and Shi D.N., Preparation of Poly(ether-ester) Modified Silicone Defoaming Agent, *Fine Chem.*, **31**, 2014.
15. An Q.F., Guo K., Li M.T., and Huang L.X., Synthesis and Characterization of Polyether-*b*-Polysiloxane and Its Applications in Antifoaming Agent, *Silicone Mater.*, **22**, 344-348, 2008.
16. Luan X., Zhang E., Chen Y. et al., Chemically Modified Silicone Oil with Enhanced Tribological and Anti-Foaming Properties, *Lubricants*, **10**, 364, 2022.
17. Memarian A. and Hosseinpour N., Poly(dimethylsiloxane)-Doped Alkylated Reduced Graphene Oxide Nanostructured Antifoam for Oil Phase, *Energy Fuel*, **39**, 6791-6802, 2025.
18. Chen J., Huang X., He L., and Luo X., Foaming of Oils: Effect of Poly(dimethylsiloxanes) and Silica Nanoparticles, *ACS Omega*, **4**, 6502-6510, 2019.
19. Guo L., Hu J.Q., and Yao T., Antifoam Additives in Lubricants, *Chem. Ind. Times*, **29**, 27-29, 2015.
20. Feng H.C., Ge Q.W., Wang X.L., Wang Y.H., and Ji C.Y., Effect of the Defoaming Agent on the Properties of Lubricating Oil, *Lubr. Oil*, **25**, 24-27, 2010.
21. Huang W.X., Lecture 17: The Action Mechanism, Main Varieties and Applications of Antifoaming Agents, *Pet. Prod. Appl. Res.*, **36**, 83-94, 2018.
22. Wu Y., Li S.P., and Chang J.H., Synthesis and Performance of 2-EHA/VAC Copolymer Super-Antifoaming Agents for Lubricating Oils, *Mod. Chem. Ind.*, **34**, 92-95, 2014.
23. Li L. and Xiong J., A Terpolymer Type Non-Silicone Antifoaming Agent and Its Preparation Method, *China Pat. CN108359513B*, 2021.
24. Chen Y.J., Zhang Z., Liu Y. et al., A Non-Silicone Defoamer and Its Preparation Method, *China Pat. CN108786189B*, 2019.
25. Chen P.H., Jiang H.L., Shu H.Y., and Zhao T.T., Study and Progress Trend of Organicsilicon Antifoam, *Jiangxi Chem. Ind.*, **3**, 5-7, 2007.
26. Cen Z.Y., Chen B.Y., and Yang S.J., Talking about Antifoaming Agents in Lubricating Oils, *J. Shandong Ind. Technol.*, **6**, 38, 2019.
27. Cao Y.F., Development and Application of 410 Antifoam Package, *Lubr. Oil*, **12**, 43-45, 1997.
28. Xu W., Shui L., Zhang J. et al., The Utility Model Relates to a Compound Antifoaming Agent for Lubricating Oil and Its Application, *China Pat. CN104232246B*, 2017.