

مدل‌های تشکیل رسوب نمکی در مبدل‌های حرارتی و روش‌های رسوب‌زدایی آن

سعید زینالی هریس^{۱*}، ماریا نوروزی گزکوه^۲

۱- استاد مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز

پیام‌نگار: s.zeinali@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، به بررسی مشکلات رسوب محلول‌های نمک، مدل‌های بررسی تشکیل رسوب و روش‌های رسوب‌زدایی این ترکیبات از مبدل‌ها پرداخته شد. محلول‌های نمک، به‌طور گسترده‌ای در بسیاری از فن‌آوری‌های صنعتی استفاده می‌شود، لذا محدودیت اصلی معرفی بسیاری از فن‌آوری‌های بخار-مایع دما بالا^۱، برای استفاده در محلول‌های نمکی، مشکلات ناشی از رسوب آن‌ها در مبدل‌های حرارتی است. روش‌های رسوب‌زدایی این سیال‌ها شامل رسوب‌زدایی برون‌خط و برخط می‌باشد که در این بین، هریک دارای معایب و مزایای مخصوص به خود است. در عمل، بسته به شرایط مختلف، ضوابط متعددی تعیین‌کننده مزایا و معایب هر یک از روش‌ها است. هم‌چنین کاهش رسوب بر اساس طراحی سیستم مبدل حرارتی، برای این سیال‌ها نیز می‌تواند مشکلات ناشی از رسوب را تا حدی برطرف نماید. از روش‌های نوین در رسوب‌زدایی می‌توان به شوک حرارتی، استفاده از پرتابه‌ها، جت آب و رسوب‌زدایی هیدرومکانیکی اشاره کرد.

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۹/۲۵

شماره صفحات: ۳۱ تا ۴۴

کلیدواژه‌ها: مبدل حرارتی،

رسوب، روش رسوب‌زدایی

برون‌خط، روش رسوب‌زدایی

برخط، محلول‌های نمکی

۱. مقدمه

طی دهه‌های اخیر، با گسترش ظرفیت‌های تولیدی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، استفاده از مبدل‌ها در چرخه تبادل و بازیافت انرژی از وسعت و اهمیت بیشتری برخوردار شده است. در بسیاری از مبدل‌های حرارتی از آب به دلیل بالا بودن ظرفیت حرارتی و در دسترس بودن، به‌عنوان سیال واسطه انتقال حرارت استفاده می‌شود. آب مورد استفاده برای خنک‌سازی در واحدی به نام برج خنک‌کننده

انرژی خود را به هوای متحرک محیط منتقل می‌کند تا سیکل گرمایش و سرمایش یا به عبارت دیگر سیکل تبادل حرارت کامل شود [۱]. از رایج‌ترین مشکلاتی که هنگام استفاده از محلول‌های نمک به‌عنوان سیال انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی رخ می‌دهد، تشکیل رسوب و ته‌نشینی مواد نامطلوب در این مبدل‌ها است [۲]. رسوب، نتیجه پدیده‌های انتقال حرارت، انتقال جرم و انتقال تکانه جهش (هومنتم) در شرایط گذرا است که بر روی سطوح مبدل حرارتی ایجاد می‌شود. بروز این پدیده‌ها علاوه بر افزایش هزینه‌های تمیزکاری و افت کیفیت محصول، در واقع باعث پایین آمدن بازده

* تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، گروه مهندسی شیمی
1. High Temperature Liquid-Vapor System

حرارتی، افزایش افت فشار و در نهایت، کاهش و از بین رفتن محصول نهایی می‌گردد. هم‌چنین پدیده رسوب‌گذاری می‌تواند باعث بروز خوردگی و یا از کار افتادگی مبدل حرارتی شود [۳]. در طراحی مبدل حرارتی باید مسأله رسوب را مهم در نظر گرفت تا مدت زمان بهره‌برداری از مبدل بیشتر شود و هم‌چنین باید در ساختار شیمیایی سیال خنک‌کننده (آب) دقت شود. به همین دلیل مطالعات زیادی پیرامون بررسی آزمایشگاهی و نظری تشکیل رسوب در تجهیزات گرمایی مختلف صورت گرفته و دانشمندان به روش‌های متفاوتی به بررسی این مسأله پرداخته‌اند [۴]. انتخاب این نوع محلول‌ها براساس شرایط عملیاتی، فرآیندی و تجزیه سیال (آب) صورت می‌گیرد [۱].

نمک‌های معدنی که به دلایل مختلف و در شرایط مختلف به حالت رسوب بر روی سطح که با سیال تبادل حرارت می‌کند، ته‌نشین می‌شود. بنابراین بررسی وجود یا عدم وجود آن‌ها در آب می‌تواند از نظر تبادل حرارت و چگونگی تحمیل هزینه‌ها بر سیستم اهمیت داشته باشد. هدف این تحقیق بررسی روش‌های اندازه‌گیری انتقال حرارت در نمک‌های محلول در آب است. این کار، توسط فناوری‌های نوینی انجام می‌گیرد و تأثیر مؤلفه‌های مختلف از جمله سرعت، شار حرارتی، دمای دیواره، غلظت و هم‌چنین ضریب انتقال حرارت محلول‌های نمک مورد بررسی قرار می‌گیرد. از طرفی، محلول‌های نمک به‌طور گسترده‌ای در بسیاری از فن‌آوری‌های صنعتی استفاده می‌شود، مانند محلول‌هایی که در ارتباط با شار حرارت بالا هستند. محدودیت اصلی معرفی بسیاری از امیدوارکننده‌های فن‌آوری‌های بخار گاز با درجه حرارت بالا با استفاده از محلول‌های نمکی، این است که سازوکارهای فرآیندهای انتقال حرارت و جرم و تبدیل گام (فاز)؛ از جمله محلول‌های تحت حرارت شدید و نحوه محاسبه تأثیر رسوب این محلول‌ها بر این مؤلفه‌ها، هنوز به اندازه کافی مورد مطالعه قرار نگرفته است [۵]، چرا که محلول‌های نمک در فن‌آوری‌های تبادل گرما (تبخیر، گرمایش و سرمایش) به دلیل مزایای قابل توجهی نسبت به آب و سایر مایعات استفاده می‌شوند. با این حال، نتایج علمی مهمی در مطالعات نظری و تجربی و نتایج مرتبط با پدیده رسوب و مشکلات مربوط به آن به دست نیامده است [۶ و ۷].

محلول‌های آب نمک را می‌توان به دو گروه مشخص تقسیم کرد؛ برای گروه اول نمک، نرخ تبخیر و ضریب انتقال حرارت با زمان افزایش می‌یابد. برای گروه دوم، میزان تبخیر به شدت با افزایش

غلظت نمک و کاهش ارتفاع لایه مایع، کاهش می‌یابد. این تفاوت در رفتار نمک، با تفاوت در منحنی‌های تعادل و خواص فیزیکی و شیمیایی نمک‌ها مشخص می‌شود. استفاده از طرح تحقیق ذکر شده دارای مزایایی نسبت به برخی دیگر (همرفت یا تابش گرمایی) است، اما یک محدودیت اصلی در درجه حرارت سیستم گرمایشی وجود دارد؛ به دلیل این واقعیت که در دماهای بالاتر از نقطه جوش مایعات مربوطه، قطرات می‌توانند در بستر ناپایدار، تغییر یابند و به صورت رسوب ته‌نشین شوند. این فرایندها ثبت سرعت و میدان دمایی مربوط به آن‌ها را پیچیده می‌کنند [۸].

این پدیده، وابستگی زیادی به ذرات محلول در جریان فرایند دارد و در اثر تغییرات دمایی جریان صورت می‌پذیرد، شکل‌گیری رسوب بلورین در مبدل‌های حرارتی و در محیط مایع، امری عادی است؛ اما این مشکل زمانی که با مبدل‌هایی سروکار داریم که در آن‌ها جریان آب سرد در گردش است و نمک‌های سخت رسوب می‌کند، آشکارتر می‌شود [۹].

در سیستم‌های مایع، آنچه را که رسوب بلورین به کمکش شرح داده می‌شود، رسوب لایه‌ای^۱ و یا رسوب آرایش‌یافته^۲ می‌گویند و این بیشتر برای رسوب‌هایی کاربرد دارد که به صورت چسبنده می‌باشند و به راحتی از سطح جدا نمی‌شوند. به‌طور کلی دانشمندان بر این باورند که این رسوب‌ها خودشان روی سطوح شکل گرفته‌اند. رسوب‌های نرم‌تر که لجن^۳ نام دارند، بلورهایی هستند که در جریان بالک مایع شکل گرفته‌اند، به‌صورت ذره‌ای روی سطح مبدل‌ها، جمع می‌شوند و بیشتر به‌صورت کلوخه‌ای هستند تا این که از نظم خاصی برخوردار باشند.

شایان ذکر است که رسوب بلورین تنها مربوط به سیستم‌های آبکی نمی‌باشد، بلکه زمانی که هیدروکربن‌های واکسی نیز سرد می‌شوند، رسوب‌های بلورین واکسی روی سطحی که سرد می‌شود به‌مقدار زیادی رسوب می‌کند. باید توجه داشت برای این که پدیده رسوب رخ دهد باید شرایطی مانند محدودیت حل شدن و هم‌چنین، دمایی بیشتر از مقدار تعیین شده در فرایند را داشته باشیم. اگر حرارت‌دهی در یک مبدل حرارتی رخ دهد، بیشترین تبادل دمایی در سطح تماس مایع و جامد می‌باشد و در این شرایط است که رسوب رخ می‌دهد [۱۰].

1. Scaling
2. Scale Formation
3. Sludge

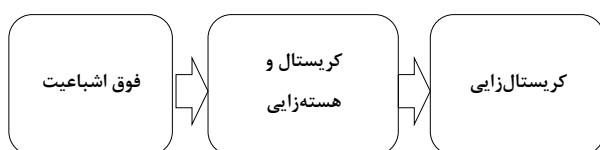
پروپیلن جدا شده بود. نتایج نشان داده‌است که بعد از ۷۰۰۰ دقیقه از شروع فرایند، مقدار کاهش ضریب انتقال حرارت برای محلول بدون وجود ذرات، تنها ۶ درصد بوده، درحالی‌که این مقدار برای حالتی که ذرات در سیستم وجود داشته‌اند ۱۵ درصد بوده‌است. این ذرات قادر هستند درجایی که امکان تشکیل بلور وجود دارد، همانند مناطقی که کمتر تحت تأثیر دما هستند و مناطقی که تحت جریان درهم شدیدتری قرار دارند، همانند خروجی مبدل‌ها تشکیل رسوب دهند. تأثیر این ذرات بر افت فشار به‌گونه‌ای است که عملاً منجر به افزایش افت فشاری حدود ۵۰۰ درصد می‌شود. در صورتی که بدون وجود ذرات، مقدار این افت فشار چیزی حدود ۲۵ درصد افزایش می‌یابد [۱۱].

دانشمندان دیگری همانند هاسون و زهاوی [۱۲] نشان داده‌اند که وجود ذرات سولفات کلسیم منجر به افزایش میزان تبلور تا حدود ۴ برابر می‌شود. میدیس و همکاران [۱۳] نیز نتایج مشابهی را برای رسوب بلورین روی مبدل‌های لوله‌ای شکل که توسط الکتریسیته گرم می‌شوند، بدست آورده‌است. وجود ذرات سولفات کلسیم که در محلول به‌صورت حل نشده‌باشند، سبب رسوب می‌شوند و بدین ترتیب بلورهای رسوب حاصل شده روی سطوح انتقال حرارت ساکن می‌شوند و سبب رشد بیشتر کریستال‌ها می‌شوند.

کارابلاس و همکاران [۱۴] اظهار داشته که افزایش نرخ رسوب در حضور ذرات معلق، بیشتر در نتیجه تبلور دیواره‌ها است و نه رسوب ذرات، به‌علاوه، ذرات موجود در محلول سبب می‌شوند تا پدیده رسوب در غلظت‌هایی کمتر از فوق اشباع نیز رخ دهد.

۲. سازوکار تبلور

به طور کلی نرخ و یا شدت تبلور توسط میزان فوق اشباعیت بر سیستم دیکته می‌شود. ترتیب‌مراحلی که منجر به شکل‌گیری رسوب می‌شوند به صورت زیر (شکل (۱)) می‌باشند.



شکل ۱. مراحل تبلور محلول‌های نمک در مبدل‌ها

غلظت مواد موجود در محلول به‌عنوان تابعی از دما، به‌طور کلی بر دو نوع است؛ معمولاً غلظت مواد با افزایش دما زیاد می‌شود، اما شماری از نمک‌ها همانند سولفات کلسیم، سیلیکات منیزیم و کربنات لیتیم که به‌طور معمول در آب دریا و یا مناطق شوره‌زار پیدا می‌شوند در یک‌دمای معین، ویژگی حل شدن معکوس را از خود نشان می‌دهند. محلول‌هایی که حاوی مواد با قابلیت حل شدن مستقیم هستند، روی سطوح سرد، به‌صورت بلور رسوب می‌نمایند و محلول‌هایی که حاوی مواد با قابلیت حل شدن معکوس می‌باشند، روی سطوح گرم رسوب می‌کنند. محلول‌هایی که حاوی یک نوع نمک هستند، به‌صورت بلورین و با قدرت چسبندگی بالا روی سطوح رسوب می‌کنند، این نوع رسوب به‌سختی از سطح جدا می‌شود و به‌صورت تابع خطی از زمان رشد می‌نماید. هم‌چنان‌که لایه رسوب ضخیم‌تر می‌شود، دمای سطح و به‌دنبال آن، نرخ رسوب‌کردن کاهش می‌یابد. قبل از این‌که رشد واقعی رسوب شروع شود، دوره رشد نهفته وجود دارد؛ محلول‌هایی که مشتمل بر مخلوطی از انواع نمک‌ها هستند، در هنگام رسوب‌کردن، از الگوی منظمی پیروی نمی‌کنند و ساختار آن‌ها از قدرت چسبندگی کمتری نسبت به محلول‌های حاوی یک نوع نمک برخوردار است. نتیجتاً رسوب به راحتی در اثر تماس با جریان سیال از سطح انتقال حرارت جدا می‌شود [۱۱].

وجود ذرات در محلول فرایند، می‌تواند به‌عنوان مقدمه‌ای برای هسته‌زایی در فرایند تبلور مورد توجه قرارگیرد. از فن هسته‌زایی به‌طور موفقیت‌آمیزی در زمینه‌های مختلف استفاده شده‌است، هم برای ساخت محصولات بلوری و هم به‌عنوان یک امتیاز جهت این‌که تبلور روی این هسته‌ها صورت گرفته و بدین ترتیب از پدیده رسوب، روی سطح مبدل جلوگیری شود، عملاً احتیاجی نیست که این هسته‌ها از جنس خود بلورها باشد، اما در بعضی خواص باید شبیه بلورها باشد؛ از جمله خواص بلورنگاری (کریستالوگرافی) فضای شبکه‌ای و نظم اتمی [۹]. علی‌رغم مقدار کم آن‌ها (بیشتر از ۱۵ ppm) این ذرات برای اولین بار که به‌صورت هسته در محلول دیده شوند دارای اهمیت ویژه‌ای خواهند شد، اندازه این ذرات تا حدود ۱۰۰ میکرومتر نیز می‌رسد، اما اندازه بیشتر آن‌ها بین ۲۰-۱۰ میکرومتر می‌باشد [۱۰].

دو آزمایش متفاوت برای بررسی تأثیر ذرات روی پدیده رسوب صورت گرفته‌است که در آزمایش اول ذرات از محلول جدا نشده بود، ولی در آزمایش دوم این ذرات توسط فیلترهایی از جنس پلی‌اتیلن و

۳. دستیابی به محلول فوق اشباع

درجه فوق اشباعیت بیشتر به عنوان ابزاری برای اشباعیت در نظر گرفته می شود و به صورت نسبت بین غلظت بالک به غلظت اشباع بیان می شود.

$$(۱) \quad \text{غلظت اشباع/غلظت بالک} = \text{درجه فوق اشباع}$$

اگر ناحیه ای که فوق اشباعیت در آن رخ می دهد در ناحیه تماس بین سطح و مایع باشد، رسوب در آن ناحیه به راحتی شکل می گیرد؛ اما اگر ناحیه فوق اشباعیت روی سطح تماس مبدل نباشد کریستال ها در جریان بالک شکل می گیرند و ذرات کم کم باعث تشکیل رسوب روی سطح مبدل می شود، البته امکان دارد که بعضی از بلورها با جریان در هم جارو شده و به مناطق دیگری منتقل شوند. حالت های متفاوتی که منجر به محلول فوق اشباع می شود، به شرح زیر می باشد:

- انحلال نمک با حلالیت نرمال در دمایی کمتر از دمای حل شدن آن در محلول.
- انحلال معکوس نمک های محلول در دمایی بالاتر از دمای حل شدن.
- بخار شدن محلول بیشتر از آنچه که برای محدودیت های حل شدن گونه های مختلف تعریف شده است.
- مخلوط شدن جریان های مختلف که منجر به ایجاد حالت فوق اشباع می شود.
- تغییر pH محلول فرآیندی [۱۱].

۴. شکل گیری هسته

این مسأله بیشتر مربوط به حالتی است که فاز بلورینه شکل می گیرد و می تواند هم به صورت مصنوعی و هم خود به خودی انجام شود. زمانی که هسته سازی را به صورت القای مصنوعی داریم، انرژی مورد نیاز برای تشکیل سطح جدید به طور قابل ملاحظه ای کم می شود؛ در نتیجه فرایند شکل گیری هسته با سرعت بیشتری انجام می شود. فاکتورهایی که سبب افزایش سرعت شکل گیری هسته می شود عبارتند از: خلوص محلول و شرایط سطح. از نظر انتقال حرارت، این فاز از اهمیت ویژه ای برخوردار است؛ چرا که منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت می شود. در ادامه شکل گیری هسته،

رشد بلورها را داریم. توزیع دمایی که وابسته به شرایط جریان حاضر در مبدل می باشد و در محل های مختلف مقدار متفاوتی دارد، بر محل رسوب گذاری روی سطح مبدل اثر گذار است. شایان ذکر است که وجود هسته های مناسب، به شکل گیری بلور و ایجاد رسوب در مبدل های حرارتی کمک می کند که البته این هسته ها می توانند، هم شامل ناخالصی های جامد موجود در محلول به صورت سوسپانسیون و هم مکان هایی روی سطح مبدل ها باشند. در فرایندهای صنعتی هر دو حالت بالا در شکل گیری رسوب روی مبدل ها کمک می نماید [۱۱].

۵. رشد بلورها

رشد بلورها از شکل گیری هسته های پایا که در نواحی فوق اشباع رخ می دهد، پیروی می کند. به طور خلاصه رشد آن ها وابسته به انرژی سطوح است، در واقع شکل بلورها با کمترین مقدار انرژی مورد نیاز سطح به روش های زیر سازماندهی می شود:

الف) جذب سطحی مداوم که سبب شکل گیری لایه لایه، روی سطح بلور می شود.

ب) نفوذ^۱ که چگونگی رشد کریستال ها با اختلاف غلظت بین سطح بلور و توده جریان کنترل می شود.

فرایند نفوذ و یا انتقال جرم، پیش نیاز اولیه برای ایجاد بلورهای جدید روی بلورهای قبلی است، البته گاهی انتقال جرم مرحله ای است که تعیینگر شدت تبلور است، به ویژه زمانی که بلورسازی روی سطوحی که قبلاً روی آن ها لایه رسوب شکل گرفته می باشد. در نواحی دورتر از سطح، انتقال جرم نسبت به جریان در هم تأثیر کمتری بر تبلور دارد و مرحله کنترل کننده شدت تبلور ممکن است نرخ و یا شدت به هم پیوستن مواد جدید به بلور باشد [۱۵].

برای تهیه مدلی برای پیش بینی شدت رسوب گذاری، شناخت کافی از سازوکار فرایند رسوب گذاری ضروری می باشد و این درک زمانی به دست می آید که در ابتدا فرایند رسوب گذاری را توسط یک پیش ماده و یا به عبارتی دیگر، یک ماده حل شده در محلول، به تنهایی مورد بررسی قرار دهیم. اتصال مواد جدید به شبکه بلورین روی سطح مبدل های حرارتی ممکن است به عنوان یک واکنش شیمیایی در نظر گرفته شود؛ بنابراین ممکن است برای این حالت از تحلیل ریاضی شیمی واکنش استفاده گردد، بدین ترتیب نرخ شکل گیری رسوب تابعی از AK_r خواهد بود.

با توجه به سازوکار رسوب بلورین می‌بینیم که در مدل کرن و سیتون میزان فوق اشباعیت لحاظ نشده که این مشکل توسط مدل هاسون و زهاوی [۱۲] به صورت زیر حل شده است.

$$\frac{dm_f}{dt} = K^1 AP \Omega \frac{-E}{RTs} \quad (5)$$

در رابطه فوق، پارامترها به صورت زیر است:

$$m_f = \text{جرم ته‌نشین شده}$$

$$K = \text{ثابت}$$

$$A = \text{مساحتی که رسوب صورت می‌گیرد.}$$

$$P = \text{احتمال چسبندگی}$$

$$Ts = \text{دمای سطح}$$

Ω در رابطه (۵) فاکتور تجربی می‌باشد که در واقع شامل میزان فوق اشباعیت و ترکیب نمک حل شده در محلول می‌باشد و P نیز ثابت تجربی مربوط به میزان چسبندگی مواد بر روی بلور است و عبارت است از نسبت واقعی موادی که روی لایه رسوب باقی می‌مانند به موادی که روی آن منتقل می‌شوند و سبب رشد رسوب می‌گردند [۱۱].

برای زمانی که واکنش کنترل‌کننده رشد بلورها باشد، مدل زیر ارائه شده است و می‌توان موارد نرخ رشد بلورها را به صورت تابع زیر نشان داد.

$$R = K(\Delta C)^n \quad (6)$$

که در این معادله n برابر یک انتقال جرم به طور کلی کنترل‌کننده است و بزرگ‌تر از یک برای زمانی که واکنش سطحی کنترل‌کننده باشد.

زمانی که سرعت رشد تحت تأثیر هم واکنش و هم انتقال جرم باشد، معادلات زیر را داریم:

$$R = K(C - C_s)^n \quad (7)$$

$$K_m = (C - C_i) \quad (8)$$

$$K_r = (C_i - C_s)^2 \quad (9)$$

در این رابطه A مساحت مکانی است که رشد بلورها در آن رخ می‌دهد و K_r نرخ ثابتی است که فرایند شیمیایی را برای تبلور شرح می‌دهد [۱۵].

$$Kr = A_1 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (2)$$

مشکلی که در این مدل داریم به دست آوردن مقدار ضریب تجربی A_1 و E است.

در رابطه فوق، پارامترها به صورت زیر است:

$$A_1 = \text{ثابت تجربی}$$

$$E = \text{انرژی فعال‌سازی}$$

$$R = \text{ثابت جهانی گازها}$$

$$T = \text{دمای مطلق}$$

اولین مدل کلی که برای بیان چگونگی فرایند رسوب بلورین بیان شده، توسط کرن و سیتون [۱۶] می‌باشد. در این مدل فرض شده که رابطه بین رسوب و زمان از منحنی لگاریتمی تبعیت می‌نماید؛ این رابطه بیشتر به تأثیرات سرعت جریان و متقابلاً تغییرات نیروی برشی که منجر به رسوب می‌شود می‌پردازد. در صورتی که افزایش انتقال جرم، سبب افزایش رسوب‌گذاری می‌شود، نیروی برشی میزان چسبندگی بلورها را به سطح، کاهش داده، منجر به رسوب‌برداری می‌شود. بنابراین اگر افزایش سرعت، سبب غالب شدن انتقال جرم شود، شدت رسوب‌گذاری را زیاد می‌کند (بیشتر در مورد نمک‌های خالص) و در صورتی که منجر به زیاد شدن نیروی برشی فصل مشترک رسوب و سطح شود، سبب نقصان رسوب‌گذاری می‌شود. (این مسأله بیشتر در مورد مخلوط نمک‌ها که رسوب حاصل از آن‌ها از چسبندگی کمی برخوردار است، صادق می‌باشد).

$$R_f = R_{f\infty} \left(1 - \exp\left(\frac{t-t_D}{t_c}\right)\right) \quad (3)$$

در این معادله R_f و R_{∞} به ترتیب، مقاومت رسوب در لحظه t و مقدار جانبی می‌باشند. t_D نیز زمان آغازین و t_c میزان چسبندگی رسوب هستند.

اگر مقدار زمان آغازین کم باشد در این صورت خواهیم داشت:

$$R_f = R_{f\infty} \left(1 - \exp\left(\frac{t}{t_c}\right)\right) \quad (4)$$

اگر ضریب انتقال جرم زیاد باشد و یا شدت رشد کم باشد معادله ۱۰ به معادله ۱۱ تبدیل می‌شود [۱۵].

$$R_f = \frac{F_1 T^2 + F_2 T + F_3}{1 + \exp(K_p K_r (C_b - C_s)^2 (t - \frac{t_{ind} + t_{asy}}{2}))} \quad (13)$$

که در رابطه بالا t_{ind} و t_{asy} به ترتیب زمان آغازین و زمان رسیدن به رشد رسوب مجانبی هستند.

$$R = K_r^f [(C - C_s) - \frac{R}{K_m}]^2 \quad (10)$$

$$R = K_r (C - C_s)^2 \quad (11)$$

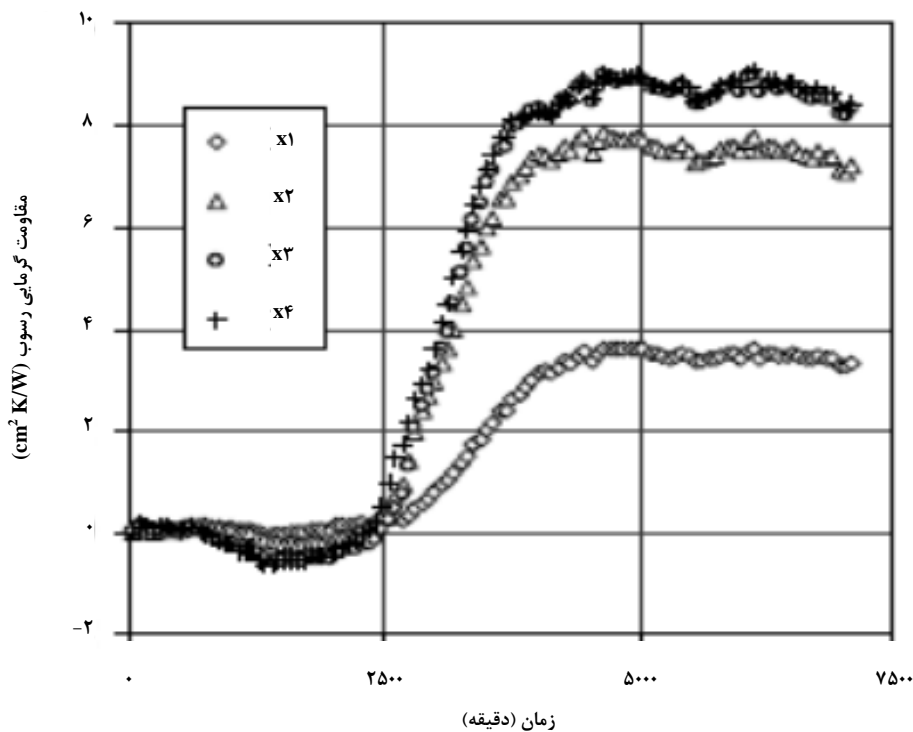
۶. مقایسه بین مدل ارائه شده و مقادیر آزمایشگاهی

از رابطه (۱۲) می‌توان مقدار مقاومت حرارتی رسوب را پیش‌بینی نمود؛ به عنوان مثال با استفاده از این معادله اگر مقدار دما ۵ درجه سلسیوس کاهش یابد، در نتیجه مقاومت به مقدار ۴ درصد کاهش پیدا می‌کند. اطلاعات به دست آمده از این رابطه می‌تواند به طور شایانی به کنترل کیفیت تمیزکاری کمک کند. شکل (۲) مقاومت اندازه‌گیری شده در مکان‌های مختلف را نشان می‌دهد. در شکل (۳) مقاومت حرارتی رسوب و ناحیه‌های مختلف رسوب بلورین به وضوح دیده می‌شود؛ قابل ذکر است که این نمودارها از ام‌وایا و همکاران [۱۵] استخراج شده است.

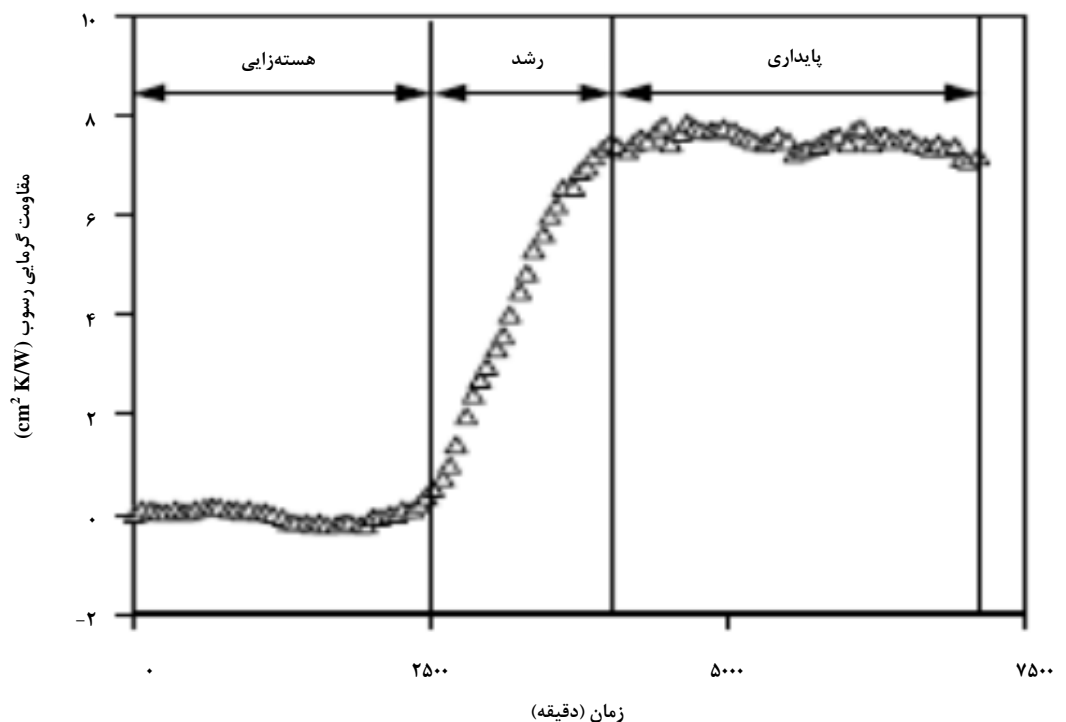
هم‌چنین مدل نیمه تجربی ارائه شده توسط ام‌وایا و همکاران [۱۵] بر اساس سازوکار رسوب بلورین برای سولفات می‌باشد در این مدل ابتدا مقادیر t_0 و R_f از رابطه زیر با توجه به داده‌های تجربی محاسبه می‌شوند.

$$R_f = \frac{R_f^*}{1 + e^{-r(r-r_0)}} \quad (12)$$

R_f^* در رابطه فوق، مقدار مقاومت رسوب مجانبی و r سرعت رسوب‌گذاری هستند که در نهایت مقدار مقاومت رسوب‌گذاری به دست می‌آید.



شکل ۲. داده‌های مقاومت گرمایی رسوب همراه با منحنی‌های محاسبه شده از رابطه ۱۲ [۱۵].



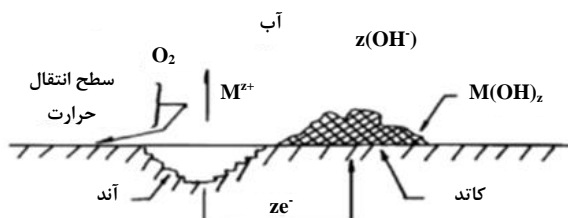
شکل ۳. مقاومت حرارتی رسوب و ناحیه‌های مختلف رسوب بلورین [۱۵].

شامل سایر روش‌های رسوب‌گذاری باشد، رسوب با سرعت بیشتری انجام می‌شود.

عواملی که در رسوب در اثر خوردگی مؤثرند عبارتند از:

۱. دمای سطح
۲. غلظت مواد ناهمگون در سیال
۳. در بعضی از دامنه‌های pH بسته به نوع محصول خوردگی، میزان حلالیت محصولات خوردگی، به اکسیژن اجازه می‌دهد تا به راحتی به سطح رسوب نفوذ نماید و در نتیجه خوردگی افزایش یابد.

شکل (۴)، نمای الگوواره اثر رسوب، بر خوردگی را روی سطح انتقال حرارت مبدل‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۴. نحوه اثر رسوب بر خوردگی مبدل‌ها [۱۷].

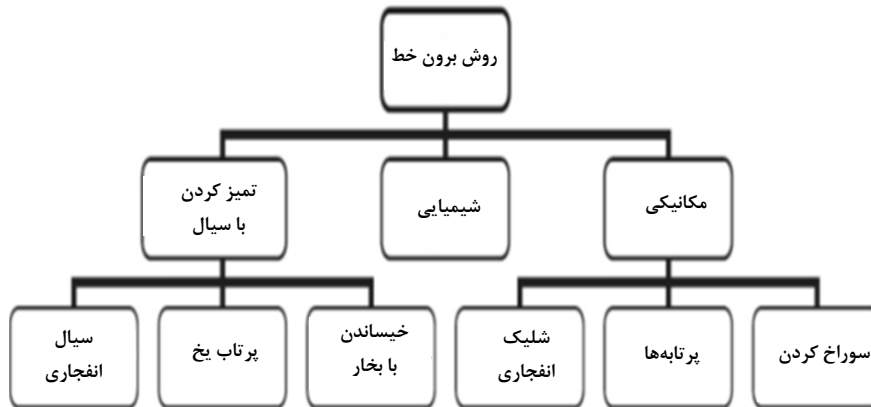
۷. اثر رسوب بر خوردگی مبدل‌ها

رسوب در مبدل‌ها، موجب خوردگی آن‌ها می‌شود که به رسوب‌گذاری خوردگی شناخته می‌شود. در این نوع رسوب‌گذاری، ترکیبات سازنده سطح در فرآیند خوردگی، شرکت و ترکیب شیمیایی جدیدی را تولید می‌نمایند. به عبارت دیگر، سطوح انتقال حرارت، واکنش می‌دهد و محصول خوردگی و چسبنده‌ای را حاصل می‌کند. خوردگی سطح، به روش‌های مختلفی در فرآیند رسوب‌کردن شرکت می‌کند. در یک حالت، محصولات خوردگی، یک پوسته مقاوم حرارتی رسوب را تشکیل می‌دهد و به عنوان فروکاو (کاتالیست) و در واقع، محرک برای سایر پدیده‌های رسوب عمل می‌نماید، از جهت دیگر، این خوردگی سطح، سبب افزایش زبری سطح شده، بدین ترتیب، مکان‌های هسته‌زایی، زیاد و در نتیجه سبب شکل‌گیری رسوب می‌شود. در صورتی که سیال دارای جریان باشد و به عبارتی، ذرات موجود در سیال به‌طور صحیح انتخاب نشده باشد، سبب رسوب خوردگی می‌گردد. رسوب در اثر خوردگی نه تنها برای مبدل‌های حرارتی مشکل ساز است، بلکه به‌طور کلی روی یکپارچگی سیستم اثر می‌گذارد و ممکن است باعث از کار افتادگی مبدل شود. در این نوع رسوب‌گذاری، در صورتی که فرآیند

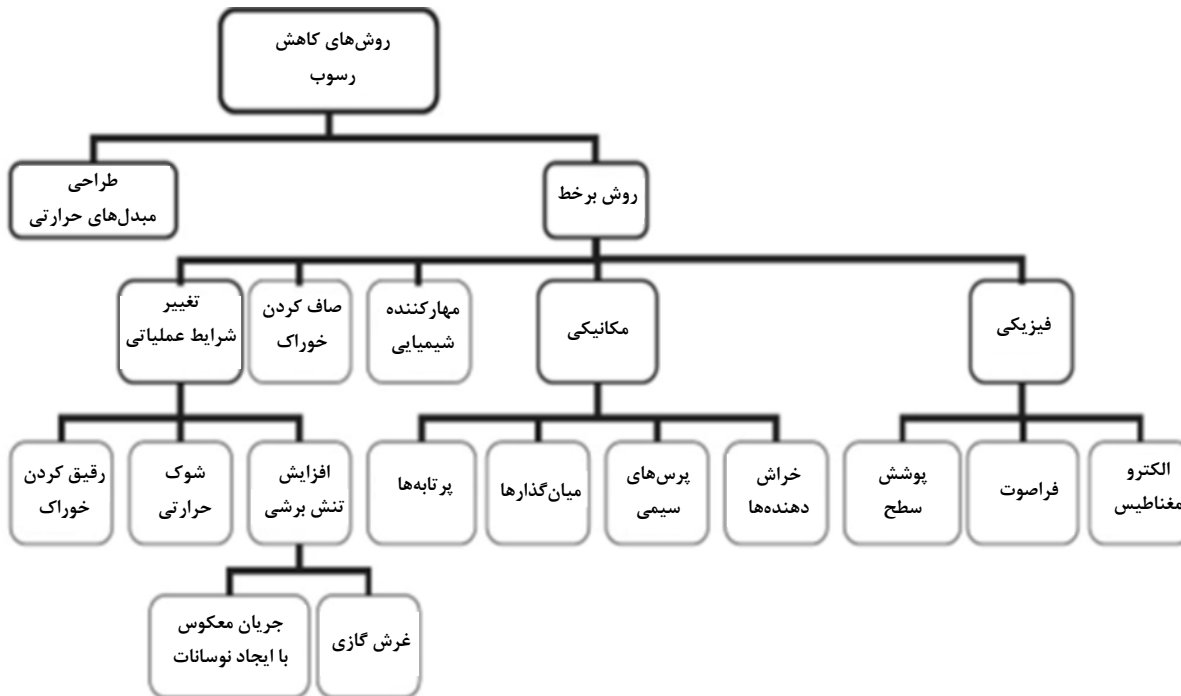
۸. روش‌های رسوب‌زدایی

در شکل‌های (۵) و (۶) دو روش کلی برای رسوب‌زدایی مبدل‌های حرارتی نشان داده شده‌است که هر یک از این روش‌ها به چند قسمت تقسیم می‌شود. در هر دو، شمایی کلی از روش‌های رسوب‌زدایی آنلایین و آفلاین ارائه شده‌است. این دو روش یک اختلاف کلی با یکدیگر دارند؛ در روش آنلایین عملیات رسوب‌زدایی، همراه با فرایند انجام می‌شود؛ اما در روش آفلاین، باید تجهیزات مورد نظر جهت انجام رسوب‌زدایی از سیستم فرایندی خارج شوند [۱۸] در ادامه برخی از این روش‌ها توضیح و شرح داده شده‌است.

رسوب‌زدایی در مبدل‌های حرارتی یکی از پرهزینه‌ترین مسائل در تعمیر و نگهداری مبدل‌هاست که باعث اتلاف سرمایه و همچنین زمان می‌شود. ایجاد رسوب بر روی سطوح انتقال حرارت باعث کاهش نرخ انتقال حرارت و همچنین افزایش افت فشار می‌شود؛ لذا رسوب‌زدایی امری اجتناب‌ناپذیر است و باعث اتلاف زمان تولید و ایجاد هزینه فراوانی می‌گردد [۱۸]. تشکیل رسوب، مصرف انرژی را شدیداً افزایش و میزان تولید را کاهش می‌دهد. همچنین در مواردی که برای رسوب‌زدایی، به خارج نمودن مبدل از سرویس نیاز باشد موجب زیان‌های مالی هنگفتی می‌شود [۱۹].



شکل ۵. شمایی از روش‌های رسوب‌زدایی خارج از سرویس (برون خط) [۱۸].



شکل ۶. شمایی از روش‌های رسوب‌زدایی داخل از سرویس (برخط) [۱۸].

۸-۱ کاهش رسوب بر اساس طراحی سیستم مبدل حرارتی

رسوبات موجود بر روی مبدل‌های حرارتی می‌توانند تا حد بسیاری در مرحله طراحی مبدل حرارتی کاهش یابند. کاستن رسوب از مبدل‌های حرارتی در مرحله طراحی، طی مراحل زیر انجام می‌گیرد:

- انتخاب نوع و اندازه مناسب مبدل حرارتی.

- اصلاح شرایط عملیاتی که موجب ایجاد رسوب در مبدل می‌گردد.

- اصلاح طراحی سیستم و سرعت جریان در مبدل حرارتی، جهت اجتناب از هر گونه نقاط داغ، جریان گذرگاهی^۱ و نواحی مرده.

- طراحی مناسب جهت پاکسازی ساده رسوبات

مولر- استینگه‌گان و همکاران [۱۸] و فرناندز و همکاران [۲۰] مطالعات فراوانی در راستای بررسی هر یک از موارد گفته شده در مراحل طراحی مبدل‌های حرارتی جهت کاهش رسوب، انجام داده‌اند. طراحی و هندسه مناسب مبدل‌های حرارتی می‌تواند تا حد زیادی از ایجاد رسوبات در این مبدل‌ها جلوگیری کند؛ به‌عنوان مثال در مبدل‌های فشرده با افزایش تلاطم در جریان و یا کاهش دمای سطح، می‌توان امکان تشکیل رسوب را کاهش داد و یا از لحاظ ساختار هندسی؛ مبدل‌های صفحه زودده و یا مبدل‌های بستر سیال، به سبب ساختار هندسی که دارند تا حدودی از میزان و امکان تشکیل رسوب جلوگیری می‌کنند. اما انتخاب هر یک از این مبدل‌ها نیز به عوامل دیگری چون شرایط عملیاتی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های تعمیر و نگهداری بستگی دارد که باید هر یک مورد بررسی قرارگیرد تا بهترین انتخاب انجام شود [۲۱].

مبدل‌های حرارتی صفحه زودده^۲ که نصب چرخان پیوسته در آن‌ها، سطح لوله داخلی را کاملاً عاری از رسوب نموده، سال‌هاست که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و هزینه‌های نگهداری این مبدل‌های حرارتی و هم‌چنین هندسه پیچیده آن‌ها از عوامل محدودکننده در کاربردهای وسیع آن‌ها است [۲۰].

مبدل‌های بستر سیال^۳ فناوری مؤثر دیگری است که کارایی بهتری در کاهش رسوب دارد. ذرات مواد مختلف با شکل‌های متفاوت از داخل لوله‌های عمودی این مبدل همراه با رسوبات در سیال بالا

روش‌های مؤثر رسوب‌زدایی جهت بهبود کارایی مبدل‌ها و هم‌چنین برای افزایش عمر آن‌ها امری ضروری است. هم‌چنین با توجه به هزینه‌های گزاف و سنگین تعمیر و نگهداری مبدل‌های حرارتی، انتخاب و گزینش بهترین روش برای کاهش رسوب بسیار مهم و تأثیرگذار است.

دو رویکرد اصلی در رسوب‌زدایی مبدل‌های حرارتی وجود دارد؛ یکی رویکرد کاهش رسوب که شامل روش‌های آنلاین در تمیزسازی رسوب است و دیگری مهارت تمیزسازی آفلاین می‌باشد. در عمل بسته به شرایط مختلف، ضوابط متعددی تعیین‌کننده برتری‌ها و کاستی‌های هر یک از روش‌ها است؛ که عبارتند از:

- شدت رسوب گذاری

- نوع مبدل حرارتی

- میزان تمیزی مورد نیاز

- هزینه‌های رسوب‌زدایی

- فواصل زمانی میان چرخه‌های رسوب‌زدایی

روش‌های آنلاین در پاک کردن رسوبات، خود شامل روش‌های فیزیکی، مانند روش‌های فراصوت، الکتریکی و مغناطیسی، روش‌های مکانیکی مانند پرتابه‌ها، استفاده از بازدارنده‌های شیمیایی و روش صاف کردن خوراک ورودی است. روش‌های اصلی رسوب‌زدایی آنلاین در مبدل‌های حرارتی صنعتی در شکل (۶) نشان داده شده‌است. به‌خوبی روشن شده‌است که روش‌های رسوب‌زدایی آنلاین تنها به موارد ذکر شده در شکل (۶) محدود نمی‌شود بلکه موارد ارائه شده در شکل، تأکیدی بیشتر بر روی روش‌هایی هستند که به‌طور عمومی‌تر مورد استفاده قرار گرفته و استفاده از آن‌ها موفقیت‌آمیز بوده و کارایی مناسب استفاده از آن‌ها به خوبی اثبات شده‌باشد. مزیت بزرگ پاک کردن رسوب از مبدل‌های حرارتی، به روش‌های گفته شده این است که با طراحی مناسب می‌توان رسوب‌زدایی را به صورت آنلاین انجام داد. البته در عمل ممکن است ترکیب دو یا چند روش یاد شده در شکل (۵) و (۶)، برای پاک کردن کارآمد و مؤثر رسوبات مورد نیاز باشد [۱۸].

در ادامه روش‌های مختلف رسوب‌زدایی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته و محدوده‌هایی که در هر یک از روش‌ها به کار گرفته شده‌اند، معرفی می‌شود.

1. Bypass Flow
2. Scraped-Surface Heat Exchangers
3. Fluidized-bed Heat Exchangers

۸-۳ روش‌های آنلاین در پاک کردن رسوب

هدف اصلی در رسوب‌زدایی آنلاین نگهداشتن تبادل گرمایی در یک سطح قابل قبول، به کمک تمیزکننده‌ها^۲ است به گونه‌ای که کارایی و تأثیر بالایی داشته و از طرف دیگر به‌سادگی در دسترس و قابل استفاده باشد. رسوب‌زدایی آنلاین شامل روش‌های بسیار متفاوتی است که می‌تواند با توجه به کاربردهای آن به صورت زیر طبقه‌بندی شود [۲۴]:

- تغییر شرایط کاربری
- رویکردهای شیمیایی در رسوب‌زدایی
- رویکردهای فیزیکی در رسوب‌زدایی
- رویکردهای مکانیکی در رسوب‌زدایی

۸-۳-۱ روش فیلتر کردن و شستشو

حذف ذرات جامد می‌تواند باعث کاهش رسوب گردد؛ به عنوان مثال موادی مانند سدیم، گوگرد و وانادیوم که پیش از احتراق، در سوخت‌ها وجود دارد؛ پس حذف آن‌ها از گازهای حاصل از سوختن از جمله رویکردهای کاهش رسوب است. شستشو با آب از جمله روش‌هایی است که برای حذف برخی رسوبات کمک‌رسان بوده است [۲۴].

۸-۳-۲ رقیق و یا مخلوط کردن خوراک ورودی

با توجه به نیازهای روزافزون در تبدیل نفت خام به مواد مورد نیاز، پالایشگاه‌ها از جمله صنایعی هستند که هر روز پیچیده‌تر می‌شوند. به همین دلیل هرروزه مشکل تشکیل رسوبات در این صنایع بزرگ‌تر می‌شود. از میان روش‌های مختلف پاک کردن رسوب، رقیق‌نمودن خوراک ورودی به کمک مخلوط کردن نفت خام سبک‌تر می‌تواند این مشکل را کاهش دهد. لازم به ذکر است که در این مورد تجزیه شیمیایی دقیق نفت خام، یک امر ضروری و اجتناب‌ناپذیر است؛ چرا که در غیر این صورت این روش ممکن است رسوبات بسیار سخت‌تری ایجاد کند [۲۵].

۸-۳-۳ شوک حرارتی

سرد کردن و یا گرم کردن ناگهانی سطح مبدل‌های حرارتی در بسیاری از موارد می‌تواند موجب پاک کردن و حذف لایه رسوبات

می‌رود، سپس از مایع سیال جدا شده و به مخزن بازگشتی خارجی باز می‌گردند. اضافه می‌شود که با داشتن اثر ساییش بسیار ملایم بر روی سطوح تبادل گرمایی، ذرات مذکور موجب بهبود تبادل گرمایی در اطراف لوله‌ها می‌شوند. از موارد کاربرد این فناوری، استفاده از آن در آب‌شیرین‌کن‌ها^۱، فرآیندهایی که در آن‌ها از حلال‌های آبی استفاده شده و فرآوری هیدروکربن‌ها می‌باشد [۲۲].

۸-۲ روش‌های آفلاین در پاک کردن رسوب از مبدل‌های

حرارتی

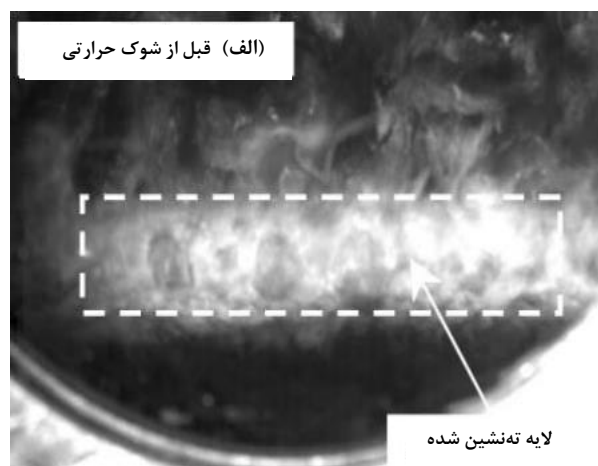
همان‌طور که پیش‌تر گفته شد در حال حاضر دو نوع روش کاهش رسوب وجود دارد؛ ابتدا روش آفلاین، که در آن برای پاک کردن رسوبات نیاز به خارج نمودن کامل مبدل از سرویس می‌باشد، دوم روش برخط که تمیز کردن مبدل در حالی انجام می‌گیرد که تجهیزات مشغول انجام کار است و در این روش نیاز به خاموش کردن و خارج کردن مبدل حرارتی از فرآیند نیست.

روش‌های آفلاین، مبدل‌های حرارتی را به وسیله دستگاه‌های مکانیکی و یا شیمیایی و در حالی که مبدل از سرویس خارج شده است تمیز می‌نماید، که در نتیجه این فرآیند زمانی که عمل پاکسازی انجام می‌گیرد، تولیدی در مبدل انجام نخواهد پذیرفت. به همین دلیل، استفاده از روش‌های آفلاین معمولاً با کار فشرده و در کوتاه‌ترین زمان ممکن انجام شده و گران‌قیمت هستند. به‌طور کلی تخمین زده می‌شود که حدود ۸ درصد از هزینه‌های تعمیر و نگهداری در یک کارخانه معمولی صنعتی، به دلیل رسوب‌زدایی در مبدل‌های حرارتی است. با توجه به این‌که روش رسوب‌زدایی آفلاین نیاز به استفاده از مواد شیمیایی اضافه بر سیال عبوری دارد، استفاده از آن با هزینه‌های عملیاتی اضافی همراه است و مشکلات جدیدی در رابطه با افزایش خطرات برای کارکنان دارد، هم‌چنین منجر به دفع زباله‌های سمی و زیان‌آور برای محیط زیست می‌شود. علاوه بر این، مسأله دیگر در این زمینه این است که روند رسوب‌گذاری بلافاصله پس از تمیز کردن، دوباره آغاز می‌شود و انباشت تدریجی رسوبات دوباره عملکرد سیستم را تا زمانی که تمیز کردن بعدی آغاز شود، کاهش می‌دهد. این اشکالات، عمل پاکسازی آفلاین مبدل حرارتی را به فرآیندی گران‌قیمت تبدیل کرده است. هم‌چنین فرآیندی زمان‌بر و در برخی موارد ناکارآمد برای کل فرآیندهای صنعتی محسوب می‌شود [۲۳].

شود. دلیل این امر، تفاوت ضریب انبساط حرارتی لوله و رسوب‌ها است. شکل (۷)، تأثیر کاهش ناگهانی شار گرمایی در خلال مخزن جوش سولفات کلسیم با ضخامت لایه رسوب ۲ میلی متری را نشان می‌دهد. در این مورد دیده می‌شود که تمامی لایه رسوب بلافاصله پوسته شده و از روی سطح کنده می‌شود [۲۶].

۳-۳-۸ روش‌های شیمیایی در پاک‌کردن رسوبات معمول‌ترین و پر استفاده‌ترین روش در پاک‌کردن رسوبات مبدل‌های حرارتی به صورت آنلاین استفاده از بازدارنده‌ها و یا عوامل شیمیایی است. این روش به‌طور خاص در مورد مبدل‌هایی که هندسه و ساخت پیچیده آن‌ها اجازه استفاده از روش‌های دیگر را نمی‌دهد بسیار مفید است. ضد رسوب‌های تجاری، به‌طور معمول ترکیب مواد شیمیایی هستند و بنابراین بسیار مؤثر عمل می‌کنند؛ زیرا به گونه‌ای طراحی می‌شوند که انواع مختلفی از مواد را که احتمال تشکیل رسوب دارند حذف کنند. به‌عنوان مثال؛ رسوبات نفت خام دارای انواع مواد مانند اکسیژن، فلزات و نمک‌ها است که انواع مختلفی از رسوبات را می‌تواند ایجاد کند. ضد رسوب‌هایی که برای این منظور استفاده می‌شوند به گونه‌ای طراحی می‌شوند که مانع تشکیل رسوب بر روی سطوح گردند. اما این ترکیبات معمولاً قدرت حذف رسوباتی را که از قبل تشکیل شده‌است، ندارند؛ بنابراین افزودن ضد رسوب باید بلافاصله پس از آغاز به کار تجهیزات انجام شود. این که

۳-۳-۸ پاک‌کردن رسوبات به روش‌های مکانیکی در مقایسه با روش‌های شیمیایی، روش مکانیکی این مزیت را دارد که قابلیت کنترل و کار کردن با آن‌ها ساده‌تر است. کارایی این روش بسته به نوع رسوب و مبدل گرمایی، شدت رسوب‌گیری مبدل و سرعت تشکیل آن تعیین می‌شود. استفاده از روش مکانیکی آنلاین در پاک‌کردن رسوبات می‌تواند به‌طور کاملاً مؤثر رسوبات را کاهش دهد. مطالعات فراوان و بسیار مفیدی در استفاده از روش‌های مکانیکی برای پاک‌کردن رسوب‌ها ارائه شده‌است [۲۴].



شکل ۷. حذف لایه رسوب تشکیل‌شده در مخزن جوش سولفات کلسیم (الف) در حین گرمایش ثابت، (ب) بلافاصله پس از شوک گرمایی [۲۶].

۸-۳-۶ استفاده از پرتابه‌ها در پاک کردن رسوب

استفاده از پرتابه‌ها یکی از روش‌های بسیار مفید و مؤثر در پاک کردن رسوبات از مبدل‌های حرارتی است. پرتابه‌ها انواع مختلفی دارند؛ به‌عنوان مثال توپ‌های اسفنجی می‌توانند با حرکت در داخل لوله‌های مبدل‌های حرارتی، رسوبات را حتی در اولین مراحل تشکیل کاهش دهند. زمان‌بندی استفاده از پرتابه‌ها به شدت رسوب‌گیری و هم‌چنین قدرت برهم‌کنش بین پرتابه‌های تمیزکننده و رسوبات بستگی دارد. استفاده از پرتابه‌ها را می‌توان یکی از مهارت‌های روش آنلاین در پاک کردن رسوبات بر شمرده که استفاده از آن‌ها در محیط‌های آبی با دماهای کمتر از ۱۲۰ درجه سلسیوس محدود می‌شود. هم‌چنین ممکن است برخی از محدودیت‌های ناشی از ناسازگاری شیمیایی در حین کار مشکلاتی ایجاد نماید. اگر استفاده از پرتابه، جهت تمیز کردن لوله‌ها در مبدل به صورت تصادفی (به‌عنوان مثال، در سیستم‌های توپ اسفنجی) رخ دهد، ممکن است بسته به موقعیت لوله، به تمیز کردن کمتر و یا بیشتر از حد مورد نیاز لوله منجر شود [۲۹].

پرتابه‌ها با توجه به مزایای فراوانی که در پاک کردن رسوب از مبدل‌ها دارند، در مطالعات پیشین بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در یکی از پژوهش‌های پیشین، گزارش شده که از پرتابه‌های توپی شکل، جهت پاک کردن رسوبات استفاده شده است [۲۹]. هم‌چنین در پژوهش دیگری که توسط ال‌باکری و همکارانش ارائه شده، از توپ‌های اسفنجی به‌عنوان پرتابه برای پاک کردن رسوبات از مبدل‌های حرارتی استفاده شده است [۳۰].

در یک پژوهش دیگر که توسط ملایری و جلالی‌راد [۳۱] ارائه شده، رسوب‌زدایی در مبدل‌هایی انجام گرفته که از آب دریا به‌عنوان سیال استفاده کرده‌است. آب دریا به دلیل داشتن مقادیر بالای نمک‌های معدنی، در مبدل‌ها تشکیل رسوب می‌دهد که لازم است مبدل در فواصل منظم تمیز شود. در پژوهش مذکور از هفت‌نوع پرتابه مختلف استفاده شده و مشاهده گردیده‌است که توپ‌های اسفنجی منعطف، در مقایسه با توپ‌های لاستیکی، کارایی بیشتری از خود نشان می‌دهند. هم‌چنین در مورد پرتابه‌های مورد استفاده، مشاهده شده‌است که پرتابه‌های اسفنجی منعطف با اندازه بزرگ‌تر، کارایی بهتری از خود نشان می‌دهند. در این گزارش مشاهده شده که بزرگ‌تر شدن اندازه پرتابه‌های مورد استفاده تا زمانی کارآمد است

که قطر پرتابه‌ها از قطر داخلی لوله‌های مبدل بیشتر باشد. در مواردی که از پرتابه‌هایی استفاده شده که قطر خارجی‌شان دقیقاً برابر قطر داخلی لوله مبدل است، کارایی شدیداً افت کرده و حتی دیواره داخلی مبدل آسیب دیده است.

ملایری و جلالی‌راد [۳۲] در تحقیق دیگری از دو نوع پرتابه مختلف با اندازه و سختی متفاوت، برای پاک کردن رسوبات سولفات کلسیم در مبدل‌ها استفاده نمودند و مشاهده کردند که بدون در نظر گرفتن سختی و نرمی پرتابه‌های مورد استفاده، این پرتابه‌ها موجب تسهیل حرکت سیال از مبدل می‌شود. هم‌چنین مشاهده شد پاک کردن رسوبات در صورتی انجام می‌شود که نیروی برشی وارد شود، در این صورت سرعت پاک کردن رسوبات بیشتر از سرعت تشکیل آن‌ها در مبدل خواهد بود. نتیجه دیگری که در این پژوهش به دست آمده، این است که پرتابه‌های سخت‌تر با سطح تماس بزرگ‌تر در مقایسه با پرتابه‌های کوچک‌تر و نرم‌تر، تأثیر بیشتری در رسوب‌زدایی از مبدل‌ها دارند.

پرتابه به صورت گسترده در تجهیزات نیروگاه‌ها و سایر تجهیزات به‌عنوان یک روش با بهره‌وری بالاتر استفاده شده‌است. تمیز کردن به کمک پرتابه می‌تواند برای کاهش گرفتگی به‌طور مداوم در فواصل منظم مورد استفاده قرار گیرد، بنابراین بازده مبدل حرارتی را می‌توان کنترل نمود. یکی دیگر از مزایای پرتابه این است که آن‌ها می‌توانند عملکرد پایداری ایجاد کنند که به دلیل امکان تمیز کردن مداوم فراهم می‌شود [۳۳].

از مزیت‌های دیگر پرتابه این است که آن‌ها می‌توانند در کنار امکان تمیز کردن مداوم، بهره‌برداری پایداری را فراهم می‌کند. با این وجود، کاربرد پرتابه‌ها با توجه به ثبات مواد پرتابه در فرآیندهای آبی تنها به دماهای زیر ۱۲۰ درجه سلسیوس محدود می‌شود [۳۴]. عیب دیگر استفاده از پرتابه‌ها این است که پاکسازی آن‌ها تنها به تمیز کردن داخلی لوله محدود می‌شود و امکان پاکسازی سطح خارجی لوله‌ها میسر نمی‌باشد؛ به‌همین دلیل پیشنهاد شده‌است [۳۵].

۹. نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، به بررسی مشکلات رسوب محلول‌های نمک، مدل‌های بررسی تشکیل رسوب در آن‌ها و روش‌های رسوب‌زدایی

تحلیل آن، زمان مناسب برای تمیزکاری و هم چنین روش مناسب برای آن انتخاب شود. ولی در استفاده از روش برخط برای رسوب‌زدایی مبدل‌ها، خطرات زیست‌محیطی به حداقل رسیده و هزینه رسوب‌زدایی مبدل‌ها به دلیل کاهش انرژی لازم جهت افزایش جریان سیال گرم، کاهش می‌یابد. لذا، برتری بزرگ پاک‌کردن رسوب از مبدل‌های حرارتی به روش برخط، این است که با طراحی مناسب مبدل‌ها، می‌توان رسوب‌زدایی را به صورت آنلاین و با هزینه کمتری انجام داد.

باتوجه به مطالب گفته‌شده می‌توان بیان نمود که استفاده از محلول‌های نمک و تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی در صنایع مختلف، مشکلات زیادی به همراه دارد و رسیدن به روشی که بتوان رسوب تشکیل شده را به میزان مطلوبی کاهش داد، دغدغه بسیاری از پژوهشگران در سال‌های متمادی بوده است. با توجه به تعدد روش‌های رسوب‌زدایی، گزینش یکی از این روش‌ها، متناسب با شرایط عملیاتی فرایند و هم چنین لزوم بالابودن بازده و کارایی، نیاز به تحقیق و بررسی‌های زیادی دارد. بر این اساس پیشنهاد می‌شود در راستای تهیه راهبردها و دستورالعمل‌های این روش‌ها اقدام و نحوه اندازه‌گیری و محاسبات نظری مربوط به هر یک از روش‌ها به طور جداگانه بررسی شود و در اختیار محققین مربوطه قرارگیرد.

مراجع

- [1] Bott, T. R., "Fouling of Heat Exchangers", Elsevier Science Publications, 546 p, (1995).
- [2] McCoy, J. W., "The chemical treatment of cooling water", Chemical Publishing Company, 312 p, (1983).
- [3] Ramesh, K., Sekulic, D. P., "Fundamental of Heat Exchanger Design", John Wiley and Sons Inc, 570 p, (1995).
- [4] Cowan, J. C., Weintritt, D. J., "Water-Formed Scale Deposits", Gulf Publications, 596 p, (2013).
- [5] Misura, S. Y., Morozov, V. S., Volkov, R. S., Vysokomornaya, O. V., "Temperature and velocity fields inside a hanging droplet of a salt solution at its streamlining by a high-temperature air flow", Int J Heat Mass Transf, 129: 367-379, (2019).
- [6] Shahidzadeh, N., Desarnaud, J., "Damage in porous media: role of the kinetics of salt (re)crystallization", Eur Phys J Appl Phys, 60: 242- 245, (2012).
- [7] Schmid, J., Zarkos, I., Terzis, A., Roth, N., Weigand, B., "Crystallization of urea from an evaporative aqueous solution sessile droplet at sub-boiling temperatures and surfaces with different wettability", Exp Therm Fluid Sci, 91: 80-88, (2018).

این ترکیب از مبدل‌ها پرداخته شد. روش‌های متفاوت و مختلفی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند که موجب توجه هرچه بیشتر محققین و معطوف شدن آن‌ها به کاربرد این مهارت‌ها در رسوب‌زدایی محلول‌های آبی نمک گردیده است. از آن‌جا که محلول‌های نمک به‌طور گسترده‌ای در بسیاری از فناوری‌های صنعتی استفاده می‌شود، مانند محلول‌هایی که در ارتباط با شار حرارت‌بالا هستند، لذا محدودیت اصلی معرفی بسیاری از فناوری‌های بخار- مایع با دمای بالا با استفاده از محلول‌های نمکی، در مشکلات ناشی از رسوب آن‌ها در مبدل‌های حرارتی است.

روش‌های رسوب‌زدایی این سیال‌ها شامل رسوب‌زدایی برون خط و برخط می‌باشد که در این بین هر یک دارای معایب و مزایای مخصوص به خود می‌باشند. دو رویکرد اصلی در رسوب‌زدایی مبدل‌های حرارتی وجود دارد؛ یکی رویکرد کاهش رسوب که شامل روش‌های آنلاین در تمیزسازی رسوب است و دیگری مهارت‌های تمیزسازی آفلاین. در عمل بسته به شرایط مختلف، ضوابط متعددی تعیین‌کننده مزایا و معایب هر یک از روش‌ها است. هم‌چنین کاهش رسوب بر اساس طراحی سیستم مبدل حرارتی برای این سیال‌ها می‌تواند، مشکلات ناشی از رسوب‌ها تا حدی برطرف نماید. از روش‌های نوین در رسوب‌زدایی می‌توان به شوک حرارتی، استفاده از پرتابه‌ها، جت آب و رسوب‌زدایی هیدرومکانیکی اشاره نمود.

از طرفی، از آنجا که مبدل‌ها از جمله بخش‌های اساسی یک فرآیند محسوب می‌شوند و شرایط عملکرد آن‌ها تأثیر قابل توجهی در وضعیت اقتصادی یک مجتمع دارد، برای انتخاب یک روش مناسب جهت تمیزکاری و در نتیجه افزایش کارایی و بازده مبدل‌ها، باید تمهیدات ویژه‌ای در نظر گرفت. روش انتخاب شده از بین روش‌های برون خط مانند روش‌های مکانیکی و شیمیایی، علاوه بر کارایی مناسب بایستی کمترین صدمه را به مبدل وارد آورد تا هزینه‌های تعمیر و نگهداری مبدل کاهش یابد. اگرچه با شستشوی شیمیایی می‌توان اقدام به رسوب‌زدایی مبدل‌ها نمود، ولی همواره سعی بر این است که از حداقل مواد شیمیایی و خطرناک استفاده شود. مشکل اصلی در روش شیمیایی، هزینه بالا و اثرات زیست‌محیطی مواد دورریز است. هم‌چنین در این روش، جداسازی رسوب‌ها به طور کامل صورت نمی‌گیرد و به روش‌های مکمل مکانیکی جهت تکمیل تمیزسازی نیاز است. علاوه بر این، جهت افزایش کارایی مبدل‌ها در مواجهه با مشکل تشکیل رسوب، داده‌های تجربی بایستی در یک دوره از عملکرد مبدل جمع‌آوری شود تا با تجزیه و

- [8] Kuznetsov, G. V., Piskunov, M. V., Volkov, R. S., Strizhak, P. A., "Unsteady temperature fields of evaporating water droplets exposed to conductive, convective and radiative heating", *Appl Therm Eng*, 131: 340–355, (2018).
- [9] Awad, M. M., "Fouling of heat transfer surfaces", In: *Heat transfer- theoretical analysis, experimental investigations and industrial systems*, Ed: Belmiloudi, A, pp: 505-542, (2011).
- [10] Muller-Steinhagen, H., Malayeri, M. R., Watkinson, A. P., "Heat transfer fouling: mitigation and cleaning strategies", *Heat Transfer Eng*, 26(1):1–4, (2006).
- [11] Wang, Y., "Composite fouling of calcium sulfate and calcium carbonate in a dynamic seawater reverse osmosis unit", thesis of Chemical Engineering and Industrial Chemistry of University of New South Wales, Sydney, Australia, (2005).
- [12] Hasson, D., Zahavi, J., "Mechanism of calcium sulphate scale deposition on heat transfer surfaces", *Ind Eng Chem Fundamen*, 9 (1): 1–10, (1970).
- [13] Middis, J., Paul, S. T., Müller-Steinhagen, H., M., Duffy, G. G., "Reduction of heat transfer fouling by the addition of wood pulp fibers", *Heat Transfer Eng*, 19(2): 36-44, (2007).
- [14] Karabelas, A. J., Yiantsios, S. G., Thonon, B., Grillot, J. M., "Liquid-side fouling of heat exchangers, An integrated R and D approach for conventional and novel designs", *Appl, Therm, Eng*, 17(8-10): 727-737, (2007).
- [15] Mwaba, M. G., Rindt, C. C., Van-Steenhoven, A. A., Vorstman, M. A. G., "A semi-empirical correlation for crystallization fouling on heat exchange surfaces", *Appl, Therm, Eng*, 26: 440-447, (2006).
- [16] Kern, D. Q., Seaton, R. A., "A theoretical analysis of thermal surface fouling", *Br, Chem, Eng*, 4(5): 258–262, (1959).
- [17] Somerscales, E. F. C., "Fundamentals of corrosion fouling", *Exp Therm and Fluid Sci*, 14(4): 335-355, (1997).
- [18] Muller-Steinhagen, H., Malayeri, M. R., Watkinson, A. P., "Heat exchanger fouling: mitigation and cleaning strategies", *Heat Transfer Eng*, 32(3–4):189–196, (2011).
- [19] Pogiatis, T. A., Ishiyama, E. M., Paterson, W. R., Vassiliadis, V. S., Wilson, D. I., "Identifying optimal cleaning cycles for heat exchangers subject to fouling and ageing", *Appl Energy*, 9: 60–66, (2012).
- [20] Fernandez, S., Pedro, J., Pinar, G., Vicente Quiles, A., GinesnViedma, P. A., "Performance evaluation of a zero-fouling reciprocating scraped-surface heat exchanger", *Heat Transfer Eng*, 32(3): 331-338, (2011).
- [21] Esawy, M., Malayeri, M. R., Muller-Steinhagen, H., "Crystallization fouling of finned tubes during pool boiling: effect of fin density", *J Heat and Mass Transfer*, 46: 1167–1176, (2010).
- [22] Klaren, D. G., de Boer, E. F., "Achievements and potential of self- cleaning heat exchangers using untreated natural seawater as a coolant", *Proceedings of the ECI Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning–VII*, eds, H, Müller-Steinhagen, M, R, Malayeri, and A, P, Watkinson, ECI Symposium Series, vol, RP5, Tomar, Portugal, 262–274, (2007).
- [23] Garrett-Price, B. A., "Fouling of heat exchangers: characteristics, costs, prevention, control and removal", Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, (1985).
- [24] Muller-Steinhagen, H., Malayeri, M. R., Watkinson, A. P., "Recent advances in heat exchanger fouling research, mitigation, and cleaning techniques", *Heat Transfer Eng*, 28(3): 173-176, (2007).
- [25] Wiehe, I. A., "The oil compatibility model and crude oil compatibility", *Energ Fuel*, 14: 56–59, (2000).
- [26] Evangelidou, M., "Crystallization fouling of structured tubes during pool boiling heat transfer", Diploma thesis, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, (2010).
- [27] Waite, T. D., Fagan, J. R., "Summary of biofouling control alternatives", in *Condenser Biofouling Control*, ed, J, Garey, Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI, (1980).
- [28] Ferreira, C. M., Simoes, M. C., Pereira, M. S., Bastos, O. C., Nunes, M., Coelho, L. F. M., "Control of biofouling of industrial surfaces using microparticles carrying a biocide", *Proceedings of EURO THERM International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning VIII– 2009*, eds, H, Müller-Steinhagen, M, R, Malayeri, and A, P, Watkinson, Schladming, Austria, June 14–19, 378–383, (2009).
- [29] Hamed, O. A., Mardouf, K. B., Al-Omran, A., "Impact of interruption of antiscalant dosing or cleaning balls circulation during MSF plant operation", *Desalination*, 208: 192–203, (2007).
- [30] Al-Bakeri, F., El Hares, H., "Optimization of sponge ball cleaning system operation and design in MSF plants", *Desalination*, 92: 353–375, (2013).
- [31] Malayeri, M. R., Jalalirad, M. R., "Abatement of deposit formation in aqueous systems using various projectiles", *Desalin Water Treat*, 55(11): 2931-2938, (2014).
- [32] Malayeri, M. R., Jalalirad, M. R., "Mitigation of crystallization fouling in a single heated tube using projectiles of different sizes and hardness", *Heat Transfer Eng*, 35 (16-17): 1418-1426, (2014).
- [33] Jalalirad, M. R., Malayeri, M. R., "A criterion for the selection of projectiles for cleaning tubular heat exchangers", in: M,R, Malayeri, H, Muller-Steinhagen, A,P, atkinson (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*, 332–338, (2013).
- [34] Jalalirad, M. R., Malayeri, M. R., "Preimesser, on-line cleaning of tubular heat exchangers in water service systems using projectiles", *Desalin Water Treat*, 51: 780–785, (2013).
- [35] Abd-Elhady, M. S., Jalalirad, M. R., Malayeri, M. R., "Optimum rate of injection of spherical projectiles in tubular heat exchangers", in: M,R, Malayeri, H, Müller-Steinhagen, A,P, Watkinson (Eds.), *Proceedings of the Eurotherm International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*, Budapest, Hungary, 339–345, June 9–14, (2013).