



Mineral Scale Management in Shell & Tube Heat Exchangers of Oil and Gas Industries

Leila Mahmoodi¹, M. Reza Malayeri^{2*}

¹ Postdoctoral Research Assistant, Department of Chemical Engineering, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

² Professor, Department of Chemical Engineering, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 8 May 2023 Accepted: 18 Aug 2023

Abstract

Shell & tube heat exchangers are known as one of the most important devices in oil, gas, and energy industries. Alongside their design, their maintenance would also be of prime importance when they are prone to mineral scale formation. According to the field reports, the mineral scaling can be formed in heat exchangers due to the presence of fluid precursors at different operating conditions as well as heat transfer surface conditions. Thus, in-depth knowledge of the best management methods to control scale formation in heat exchangers is indispensable for engineers. In this paper, various methods of controlling mineral scale formation, including removal and inhibition, i.e., conventional physical and chemical methods, and ultrasonic technology have been examined for an industrial case study. Moreover, several statistics from the field reports have been examined to prove that the utilization of ultrasonic would clean the exchanger under study. The results show that scale management especially the use of ultrasonic technology would lead to an increase in the efficiency of heat exchangers as well as a significant reduction in operating costs.

Keyword: Shell & Tube Heat Exchangers, Mineral Scale Management, Scale Removal Methods, Ultrasonic Technology.

* malayeri@shirazu.ac.ir

مدیریت رسوبات معدنی در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله صنعت نفت و گاز

لیلا محمودی¹، محمدرضا ملایری^{2*}

¹ محقق پسادکتری، بخش مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز
² استاد مهندسی شیمی، بخش مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز

دریافت: 1402/03/18 پذیرش: 1402/05/27

چکیده

یکی از تجهیزات مهم در واحدهای عملیاتی صنایع نفت، گاز و انرژی، مبدل‌های حرارتی هستند. علاوه بر طراحی، عملیات تعمیر و نگهداری آن‌ها در صنعت بر اساس گزارش‌های میدانی در خصوص تشکیل رسوبات معدنی به دلیل وجود انواع سیالات فرآیندی در شرایط عملیاتی متنوع و در معرض سطوح انتقال حرارت، از نظر عملیاتی مهندسی فرآیند و اقتصادی، قابل توجه است. بنابراین آگاهی از روش‌های مختلف مدیریت رسوب در این دسته از تجهیزات و اعمال آن‌ها در واحدهای عملیاتی، برای مهندسين و مدیران حیاتی است. بدین ترتیب، روش‌های کنترل رسوبات معدنی از جمله حذف و جلوگیری از تشکیل رسوب شامل روش‌های فیزیکی و شیمیایی مرسوم، علاوه بر روش‌های بر پایه تکنولوژی فراصوت در این مقاله به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین به منظور اثبات پیشنهاد قوی این مقاله مبنی بر اعمال روش‌های فراصوت در صنعت نفت و گاز، نتایج قابل توجه رسمی از محدود دفعات کاربری این تکنولوژی در صنایع ارائه شده است. نتایج بیان‌گر آن است که به طور کلی مدیریت رسوب و به ویژه استفاده از تکنولوژی فراصوت، منجر به افزایش کارایی مبدل‌ها و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود.

کلمات کلیدی: تکنولوژی فراصوت، روش‌های رسوب‌زدایی، مبدل حرارتی پوسته و لوله، مدیریت رسوب معدنی.

* malayeri@shirazu.ac.ir

1- مقدمه

مبدل حرارتی دستگاهی است که انتقال انرژی گرمایی بین دو یا تعدادی سیال با دماهای مختلف را فراهم می‌آورد. مبدل‌های حرارتی در گستره وسیعی از کاربردها از جمله تولید برق و صنایع الکترونیک، فرآیندهای صنایع شیمیایی، صنایع غذایی، مهندسی محیط‌زیست، بازیافت گرمای هدررفته، تهویه مطبوع، تبرید و کاربردهای فضایی، مورد استفاده قرار می‌گیرد [1, 2]. وجود سیال‌های متفاوت با پتانسیل ترسیب¹ ذرات جامد موجود در سیالات؛ در مواجهه با سطوح انتقال حرارت، مقدمات تشکیل رسوب معدنی به عنوان یک نوع رسوب با مکانیزم تبلوری² را فراهم می‌کند. به دلیل خصوصیت وابستگی به زمان در پدیده تشکیل رسوب، شرایط عملیاتی معمولاً متفاوت از شرایط طراحی خواهد بود و تشکیل رسوب با قطعیت بیش‌تری صورت خواهد پذیرفت. هم‌چنین، به دلیل پیش‌بینی رسوب‌گذاری در طراحی اولیه مبدل‌های حرارتی، راهکار سطح اضافی در مبدل خود یکی از مشکلات عملیاتی است که می‌تواند موجب رسوب بر روی سطح، و رای جایی که در طراحی در نظر گرفته شده است، بشود [3]. بنابراین، راهکارهای مدیریت رسوب شامل حذف و یا جلوگیری از تشکیل رسوب، ضروری خواهد بود چرا که در غیر این صورت هزینه‌های بسیار زیادی به واحدهای صنعتی مرتبط اعمال می‌شود و بازدهی فرآیند در واحدها نیز کاهش می‌یابد [4, 5]. از این رو، ضروری است روش‌های مقابله با پدیده رسوب شناخته و بسته به شرایط واحد عملیاتی، به صورت بهینه اقتصادی و عملیاتی، انتخاب و اعمال گردد.

یکی از روش‌های مقابله، روش حذف رسوب پس از تشکیل آن است که به دو صورت شیمیایی و فیزیکی و در دو حالت آنلاین و آفلاین در صنعت شناخته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد [6]. هم‌چنین، استفاده از مواد شیمیایی تحت عنوان بازدارنده‌های رسوب، یکی دیگر از راهکارهای مورد توجه در صنعت است که می‌تواند جلوگیری از تشکیل رسوب، در مراحل مختلف تشکیل شامل ترسیب، تجمع³ و ته‌نشست⁴ کند [7]. روش‌های فوق‌الذکر بسته به شرایط عملیاتی و مسائل اقتصادی، در صنعت مرسوم شده و به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که کلیات روش‌های مقابله در هر سه دسته مکانیزم‌های رسوب تبلوری، زیستی⁵ و ذره‌ای⁶ [5] پذیرفته شده و کارا است. یکی دیگر از روش‌های تقریباً نوین برای مقابله با رسوب در مبدل‌های حرارتی واحدهای صنعتی، استفاده از امواج فراصوت است. عموماً، مبدل‌های حرارتی و مبدل‌های فراصوت به طور مستقیم به هم متصل می‌شوند و می‌توانند به عنوان یک سیستم لرزشی معمول (سونوتروید⁷) دیده شوند به نحوی که این لرزش منجر به ایجاد تنش میان سطوح مشترک انتقال حرارت و رسوبات می‌شود [8, 9].

استفاده از فراصوت، فرصتی برای بسط دادن زمان عملیاتی مبدل‌های حرارتی ریزساختار⁸ یا حذف رسوب ناخواسته در داخل ریزساختارها است. هدف از این کار، استفاده از فراصوت برای کاهش و تمیز کردن رسوبات تبلوری در داخل مبدل حرارتی ریزساختار در یک ساختار چند لایه‌ی معمولی است. اولین تلاش‌ها برای استفاده از تمیز کردن فراصوت

¹ Precipitation

² Crystallization

³ Agglomeration

⁴ Deposition

⁵ Biofouling

⁶ Particulate

⁷ Sonotrode

⁸ Microstructure heat exchanger

در مبدل حرارتی ریزساختار بدون سیالات تمیزکننده توسط گروه تحقیقاتی بنزینگر⁹ و همکاران انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که تمیز کردن در محل با استفاده از فراصوت در مبدل حرارتی ریزساختار برای رسوبات تبلوری امکان پذیر است به نحوی که رسوبات توسط امواج فراصوت، حذف شده و سیال در حال جریان؛ رسوب را از ریزساختار تخلیه می‌کند که متعاقباً منجر به ترمیم و بهبود خواص حرارتی و هیدرودینامیکی مبدل حرارتی، تقریباً شبیه به حالت اولیه بدون رسوب، شد [10].

چنانچه تلاش‌های اولیه بر روی مشکل خاص رسوب‌گذاری در فرایندهای تبلوری متمرکز شده بود، مطالعات آزمایشگاهی بر کنترل اندازه بلورها با تنظیم توان فراصوت ورودی در طول فرایند تبلور متمرکز شد و نشان داد که حساسیت دستگاه‌های ریزساختار مربوط به رسوبات و آلودگی در ریزساختارها، یک اشکال عمده برای کاربرد صنعتی این تجهیزات است. به عبارتی دیگر، رسوب در طول عملیات واحدها، منجر به کاهش قابل توجهی از کارایی مبدل حرارتی شامل رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی ریزساختار می‌شد [11]. بنابراین، به منظور بهبود رفتار دستگاه‌های ریزساختار در صنعت، باید راه‌حلی برای به حداقل رساندن رفتار رسوب یا روش‌هایی که تمیز کردن ریزساختارها را ممکن می‌ساخت، توسعه داد چرا که پارامتر مهم و تاثیرگذار برای صنعت است.

از طرف دیگر، تمیز کردن فراصوتی بر اساس اثرات پدیده کاویتاسیون نیز توسط کیسر¹⁰ و همکاران (2013) تحت عنوان سونیفیکیشن فاز مایع ارائه شد [12]. تولید و القای کاویتاسیون¹¹ فراصوتی (اولتراسونیک¹²) منجر به انقباض و انبساط حفره‌ها و هسته‌های حباب می‌شود و پیش‌گیری یا تمیزکاری عمدتاً توسط امواج شوک و انفجار جت‌های مایع به دست می‌آیند. این نوع تمیز کردن منجر به ایجاد تنش بین سیال و رسوبات، به هم‌زدگی و پراکندگی ذرات توسط سیال و نهایتاً تمیزکاری می‌شود. به طور کلی، مشاهدات عمومی در مطالعات فراصوت و فرآیندهای تبلور [14]، [13] بیانگر آن بود که نرخ هسته‌زایی و رشد بلورها در میدان فراصوت کاویتاسیونی، به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. با این حال، به کارگیری این اثر، در صنایع بیوشیمیایی و داروسازی مورد توجه قرار گرفت [15]. و در آخر، اثربخشی تمیز کردن فراصوت اغلب در حضور یک سیال تمیزکننده، افزایش می‌یابد.

از این رو، کنترل و مدیریت رسوبات معدنی شامل روش‌های تمیزکاری و جلوگیری با تمرکز اساسی بر روش‌های مبنی بر فراصوت، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. به نحوی که علاوه بر معرفی جامع روش‌ها و بیان مزایا و معایب روش‌های حذف مکانیکی و شیمیایی آنلاین و آفلاین (قسمت 2)، نکات فنی و اقتصادی روش‌های حذف و جلوگیری از تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی با بهره‌گیری از تکنولوژی فراصوت (قسمت 3)، که شاهد صنعتی آن نیز گزارش شده است (قسمت 4)، در این مقاله ارائه شده است. در پایان یک جمع‌بندی اساسی (قسمت 5) صورت گرفته است که می‌تواند بیش از پیش، جامعه محققین و مهندسين را به سمت این تکنولوژی پیش ببرد.

2- تمیزکاری معمول رسوبات معدنی تشکیل شده در مبدل‌های حرارتی

به طور کلی، تکنیک‌های استفاده شده برای مقابله با رسوب در مبدل حرارتی، هم در سمت پوسته و هم در سمت لوله را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: مکانیکی و شیمیایی. از طرفی، فرآیند تمیز کردن ممکن است در حالی که

⁹ Benzing

¹⁰ Keiser

¹¹ Cavitation

¹² Ultrasonic

واحد هنوز کار می کند (آنلاین^{۱۳})، انجام شود؛ اما در اغلب موارد لازم است برای تمیز کردن مبدل های حرارتی واحد از کار انداخته شده^{۱۴} که در اینصورت تحت عنوان تمیز کردن آفلاین^{۱۵} شناخته می شود. در برخی موارد ممکن است ترکیب این روش ها ضروری باشد [16]. هر روش تمیز کردن، با توجه به انواع تجهیزات خاص و مواد ساختمانی، دارای مزایا و معایبی است که در بخش های 1-2 و 2-2 مفصلاً به آن پرداخته می شود. به طور کلی، جدول 1 خلاصه ای از روش های متفاوت مورد استفاده برای کنترل رسوب را ارائه می دهد [3، 17].

جدول 1- روش های متفاوت برای کنترل رسوب

روش های آفلاین	روش های آنلاین	ردیف
تمیزکاری شیمیایی	استفاده از مواد افزودنی مناسب مانند ضد رسوب ^{۱۶} ، بازدارنده رسوب ^{۱۷} ، پراکنده کننده ^{۱۸} ، و اسید ^{۱۹}	1
تمیز کردن دستی توسط لانس یا نیزه به صورت جت مایع، بخار و یا هوا به کار گیری تجهیزات مانند مته ^{۲۶} و لیسه ^{۲۷} (خراشنده)	به کار گیری تجهیزات مانند توپ اسفنجی ^{۲۰} ، برس ^{۲۱} ، دمنده دوده ^{۲۲} ، زنجیر و سوهان ^{۲۳} ، شوک حرارتی ^{۲۴} ، ضربات هوا ^{۲۵}	2

قابل توجه آن که قبل از اقدام به تمیز کردن مبدل حرارتی، نیاز است که عوامل زیر برای انتخاب یک روش تمیز کردن در نظر گرفته شود [16]:

- درجه رسوب گذاری،
- طبیعت رسوب گذار که از تجزیه و تحلیل رسوب شناخته می شود،
- دسترسی به سطوح برای تمیز کردن،
- مقررات در برابر تخلیه زیست محیطی،
- اقتصاد فرآیند و هزینه.

1-2- تمیزکاری فیزیکی

1-1-2- روش های تمیز کردن آفلاین و آنلاین

13 Online
14 Shut down
15 Offline
16 Antiscalant
17 Inhibitor
18 Dispersant
19 Acid
20 Sponge ball
21 Brush
22 Soot blower
23 Chain and scraper
24 Thermal shocking
25 Air bumping
26 Drill
27 Scraper

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، عموماً، تمیزکاری سطوح مبدل‌های حرارتی به دو روش شیمیایی و مکانیکی انجام می‌پذیرد که بسته به شرایط فرآیندی و اقتصادی می‌تواند به صورت آنلاین و آفلاین و یا حتی ترکیبی از هر دو صورت پذیرد. پیش از پرداختن به انواع تکنیک‌های آنلاین و آفلاین حذف مکانیکی رسوب، لازم است دو نکته ایمنی بر اساس مقررات انجمن سازندگان مبدل‌های لوله‌ای²⁸ [18]، در علیات تمیزکاری فیزیکی مبدل‌ها، مورد توجه قرار گیرد:

(1) لوله‌ها نباید با دمیدن بخار در تک تک لوله‌ها تمیز شوند چرا که باعث گرم شدن لوله شده و ممکن است موجب تنش حرارتی شدید، تغییر شکل لوله، و یا شل شدن محل اتصال لوله به لوله شود.

(2) در تمیز کردن مکانیکی یک باندل لوله²⁹، باید مراقبت‌های لازم صورت گیرد تا از آسیب دیدن لوله‌ها جلوگیری شود.

(3) ترکیب مواد شیمیایی تمیزکننده باید متالورژی مبدل سازگار باشد.

حال، به روش‌های مختلف تمیزکاری مکانیکی آفلاین [16] برای حذف رسوبات که در ادامه آورده شده است، پرداخته می‌شود.

(الف) تمیز کردن دستی: جایی که دسترسی خوبی وجود دارد، همانند یک مبدل حرارتی صفحه‌ای یا حلزونی، یا یک باندل لوله‌ای قابل جداسازی، وقتی که رسوب نرم باشد، ممکن است تمیز کردن و شستشوی دستی انجام شود، گرچه هزینه‌های نیروی کار بالا است.

(ب) تمیز کردن جت³⁰: یا تمیز کردن هیدرولیک با جت‌های آب با فشار بالا می‌تواند به طور عمده بر روی سطوح خارجی که دسترسی آسان برای عبور جت‌های فشار بالا وجود دارد، استفاده شود. شستشوی جت را می‌توان برای تمیز کردن رسوب دهنده‌هایی مانند: (1) آلاینده‌های هوا در مبدل‌های هوای سرد با فشار 2 تا 4 بار، (2) رسوب‌های نرم، گل، زنگ‌زدگی و رشد بیولوژیکی در مبدل‌های پوسته و لوله تحت فشار 40 تا 120 بار، (3) رسوبات سنگین آلی، پلیمرها، قیرها در کندانسورها و دیگر مبدل‌های حرارتی با فشار 300 تا 400 بار، (4) رسوبات در لوله‌ها و قسمت آتش دیگ‌های بخار، پیش‌گرم‌کن‌ها و اکونومایزرها³¹ با فشار 300 تا 700 بار، به کار برد.

(پ) حفاری و میله زدن لوله‌ها: حفاری برای لوله‌هایی که گرفتگی زیادی دارند و میله زدن برای لوله‌هایی که کمی گرفته شده به کار گرفته می‌شود که البته برای از بین بردن رسوبات به این روش، دسترسی خوب و مراقبت زیاد برای جلوگیری از آسیب به تجهیزات لازم است. حفاری لوله‌هایی که به شدت گرفته شده به عنوان گلوله‌زنی³² شناخته می‌شوند.

(ت) توربینینگ³³: به منظور حذف رسوبات در لوله‌ها با بهره‌گیری از این روش، از سیالی مانند هوا، بخار و یا آب در ارسال به یک دستگاه کاتر یا برس و یا ضربه‌گیر با موتور برقی استفاده می‌کنند.

²⁸ Tubular Exchangers Manufactures Association (TEMA)

²⁹ Tube bundle

³⁰ Jet cleaning

³¹ Economizer

³² Bulleting

³³ Turbining

ث) حفاری هیدرولیک: از طریق یک عمل آبرسانی و حفاری دوار، سریع‌ترین و موثرترین راه برای حذف رسوبات سخت از داخل لوله مبدل حرارتی، راکتورهای شیمیایی، کندانسورها، ریویولرها و برج‌های جذب است. عمل حفاری گشتاور بالا، گرفتگی و انسداد هر نوع لوله‌ای با قطر در محدوده 3/8 تا 6 اینچ و طول تا 40 اینچ را برطرف می‌کند. این روش می‌تواند به طور مؤثری رسوبات سخت شامل کک، کلسیم‌کربنات، بوکسیت و پلیمرهای سخت پخته شده را تمیز کند.

ج) گذراندن برس‌ها از لوله‌های مبدل: به طور کلی، برس یک میله پلاستیکی است که با موهای ضخیم نایلونی پیچیده شده است و توسط یک شفت انعطاف‌پذیر در لوله‌ها به جلو حرکت داده می‌شوند. رسوبات جدا شده توسط برس توسط تزریق هوا/ آب مستقیماً از لوله خارج می‌شود.

چ) اسکرپر^{۳۴}: یک تمیزکننده لوله (0/5 تا 1/25 اینچ قطر) برای تمام کندانسورها و مبدل‌های حرارتی است. این تمیزکننده فلزی برای حذف انواع رسوبات، از جمله رسوبات ناشی از محصولات جانبی خوردگی و چسبندگی، رسوبات آلی موثر و کارا است.

ح) انفجار^{۳۵}: تمیز کردن انفجاری شامل حرکت مواد ساینده مناسب با سرعت بالا توسط یک انفجار از هوا یا آب (انفجار آبی^{۳۶}) برای ضربه زدن به سطح رسوب گرفته می‌شود. از آن جا که لوله‌ها بسیار نازک هستند، انفجار آبی به ندرت برای تمیز کردن باندها استفاده می‌شود. با این حال، این تکنیک برای تمیز کردن سطوح لوله، پوسته، پوشش‌های کانال، کلاهک‌ها و یا سرپوش‌ها مناسب است.

خ) دمیدن دوده^{۳۷}: از این تکنیک برای حذف رسوبات در واحدهای دیگ بخار، مبدل‌های حرارتی احتراقی، و یا گاز دودکش در تجهیزات احتراقی استفاده می‌شود به طوری که حذف ذرات از طریق انفجارهای هوا یا بخار در سمت قسمت پره‌ها^{۳۸} به دست می‌آید.

د) تمیز کردن حرارتی^{۳۹}: شامل تمیز کردن با بخار و بدون مواد شیمیایی است که برای پاک کردن موم‌ها و گریس‌ها در کندانسورها و سایر مبدل‌های حرارتی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

از طرف دیگر، روش‌های مختلف تمیزکاری مکانیکی آنلاین برای کنترل رسوب در عمل عبارتند از [16]:

الف) فیلتراسیون بالادستی: در برخی موارد، رسوب‌گذاری آب خنک‌کننده می‌تواند از طریق تصفیه آب ورودی کنترل شود. یک راه‌حل برای جلوگیری از انسداد لوله‌های کندانسور، نصب یک سیستم فیلتراسیون بالادستی است به طوری که یک فیلتر دبریس اتوماتیک^{۴۰}، به طور موثر از رسوب مکرر باقی مانده‌های فیبری، جریانی و زیست دریایی در آب خنک‌کننده‌ها، به صورت مطلوب جلوگیری کند.

ب) گردش جریان^{۴۱}: این روش که در آن، جریان فوری برای حذف رسوبات افزایش می‌یابد، به طور ویژه برای یک مبدل حرارتی که به علت اثرات سرعت کم سیال در لوله و یا پوسته، رسوب تشکیل شده، کاربردی است.

³⁴ Scraper-type tube cleaner

³⁵ Blasting

³⁶ Hydroblasting

³⁷ Soot blowing

³⁸ Fin

³⁹ Hydro-steaming

⁴⁰ Automatic Debris Filter System (ADFS)

⁴¹ Flow excursion

پ) دمیدن هوا به مبدل‌های حرارتی: این روش در سیستم مایع در قسمت پوسته مبدل‌های حرارتی اعمال می‌شود. این تکنیک شامل ایجاد لخته‌های هوا و در نتیجه باعث ایجاد آشفته‌گی‌های محلی، به دلیل عبور لخته‌ها از تجهیزات، می‌شود. لازم به ذکر است که مراقبت‌های ضروری لازم است انجام شود تا از تولید مخلوط گازهای انفجاری در صورتی که مایع فرآیندی فرار و قابل اشتعال باشد، اجتناب شود.

ت) برعکس کردن جریان در مبدل‌های حرارتی: این روش به عنوان یک روش آسان و کارآمد برای جلوگیری از مسدود شدن و رسوب‌گذاری مبدل‌های حرارتی، عموماً در قسمت آبی سیستم خنک‌کننده با تغییر متناوب جریان انجام می‌شود. در این روش، تمیزکاری با تغییر جهت جریان در مبدل حرارتی به دست می‌آید چنانچه رسوبات انباشته شده در قسمت‌های ورودی و کانال‌های مبدل حرارتی با فشار زدوده می‌شوند. از طرفی، برخلاف فیلترها، تغییر جریان منظم می‌تواند از بروز رسوب زیستی یا بیولوژیکی جلوگیری کند. قلب این سیستم شامل یک شیر و یک کنترل‌کننده است که برای جلوگیری از ایجاد ضربه قوچ، آب شیر باید در یک ترتیب خاص باز و بسته شود. از این رو، وجود یک سیستم کنترل کاملاً ضروری است.

ث) سیستم‌های تمیز کردن اتوماتیک لوله: کاربردهای ایده‌آلی در مورد سطوح بخار و کندانسورهای بالاسری، سیستم‌های چیلر بزرگ و مبدل‌های حرارتی کمکی دارند که شامل دو نوع سیستم تمیز کردن توپ اسفنجی^{۴۲} و سیستم قفس و برس^{۴۳}، می‌باشد.

ج) تکنولوژی اینزرت^{۴۴}: اینزرت‌ها دستگاه‌هایی هستند که در مبدل‌های حرارتی لوله‌ای به عنوان دستگاه تقویت انتقال حرارت استفاده می‌شوند به طوری که باعث کاهش رسوب‌گذاری و بهبود انتقال حرارت از طریق اثرات مکانیکی می‌شود.

چ) تمیز کردن با شن و ماسه: در این روش، مواد ساینده، مانند شن و ماسه، شیشه یا فلزات کره‌ای شکل، از طریق لوله‌ها عبور داده می‌شوند که رسوب را از درون لوله‌ها حذف می‌کنند. این روش در سیستم‌های خنک‌کننده با آب استفاده می‌شود، اما می‌توان آن را در رابطه با هر گونه سیال رسوب‌گذار مورد استفاده قرار داد.

ح) مبدل‌های بستر سیال خود تمیزکننده: سیال رسوب‌گذار در یک مبدل پوسته و لوله عمودی که شامل کانال‌های ورودی و خروجی با طراحی مخصوص است، در جریان است به نحوی که یک سری ذره جامد نیز در ورودی به مبدل وارد می‌شود. یک سیستم توزیع جریان یکنواخت، مایع و ذرات معلق را در سراسر سطح داخلی باندل پخش می‌کند. ذرات از طریق جریان مایع به سمت بالا در لوله‌ها منتقل می‌شوند به نحوی که یک اثر تراشیدن ملایم را بر روی دیواره‌ی لوله‌های مبدل حرارتی ایجاد می‌کنند و در نتیجه هر نوع رسوب را در مراحل اولیه تشکیل از بین می‌برد.

2-1-2- مزایا و معایب انواع روش‌های تمیز کردن مکانیکی

چنانچه پیش‌تر گفته شد، روش‌های تمیز کردن مکانیکی در صنعت به دلیل سهولت در اجرا و کارا بودن در تمیزکاری لوله‌هایی که کاملاً مسدود شده‌اند، بسیار مورد استقبال قرار گرفته‌اند.

⁴² Sponge rubber balls cleaning system

⁴³ Brush and cage system

⁴⁴ Insert technology

با این وجود، در تمیزکاری آفلاین، احتمال آن که تجهیزات، به ویژه لوله‌ها آسیب ببینند زیاد است. از طرفی، در مقایسه به تمیزکاری شیمیایی، سطح حاصل شده از تمیزکاری مکانیکی کاملاً تمیز نخواهند بود. از طرفی، استفاده از جت آب یا هوا با فشار بالا در روش‌های مکانیکی آفلاین، می‌تواند موجب آسیب‌های فیزیکی پرسنل در عملیات تمیز کردن شود که ضروری است پرسنل در برابر صدمات به خوبی محافظت شوند.

بعلاوه؛ تمیزکاری مکانیکی آنلاین نیز مزایایی دارد از جمله: (1) افزایش سرعت انتقال حرارت به علت آشفتگی جریان بیشتر در لوله‌ها، (2) کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری به علت کاهش رسوبگذاری در لوله‌ها، (3) طولانی‌تر شدن زمان اجرای عملیات بین فواصل تمیز کردن، (4) راحتی نصب، (5) عدم نیاز به شات دان یا خاموش کردن واحد که منجر به صرفه جویی در زمان و نیروی کار می‌گردد. با این حال، هزینه‌های اولیه ممکن است در موارد خاص بسیار زیاد باشد.

2-2- تمیز کاری شیمیایی

به طور معمول، تنها زمانی که دیگر روش‌ها برای تمیزکاری مبدل‌های حرارتی رضایت بخش نباشد، تمیزکاری شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عبارتی، برخی اوقات تمیزکاری شیمیایی تنها راه ممکن است که اساساً از مراحل زیر پیروی می‌کند:

- 1) استفاده از جریان آب با فشار بالا برای حذف رسوبات سست
 - 2) گرمایش و چرخاندن آب
 - 3) تزریق تمیزکننده شیمیایی و در صورت لزوم بازدارنده رسوبات به آب در حال گردش
 - 4) پس از گذشتن زمان مناسب، تخلیه محلول تمیزکننده و پس از آن اعمال آب با فشار به سیستم
 - 5) غیر فعال کردن سطوح فلزات
 - 6) استفاده از آب با فشار بالا برای جدا کردن تمام باقیمانده‌های مواد شیمیایی.
- لازم به ذکر است که قبل از شروع تمیزکاری شیمیایی، لازم است که فاکتورهایی در به کار بردن این دسته از روش‌های تمیز کردن در نظر گرفته شود:
- خصوصیات رسوب مشخص شود.
 - حلال‌های تمیزکننده شیمیایی پیش از عملیات تمیزکاری بایستی نسبت به خوردگی مورد آزمایش قرار گیرند.
 - قابلیت اجزای سیستم برای به کارگیری محلول‌های تمیزکننده شیمیایی بررسی و تعیین شود. در صورت لزوم، بازدارنده‌های رسوب به محلول‌های تمیزکننده افزوده می‌شوند.
 - نحوه جداسازی محلول مصرفی مشخص باشد.
 - حفاظت شخصی لازم برای افرادی که با این سیستم‌ها کار می‌کنند، تامین شود.

2-2-1- روش‌های تمیز کردن آفلاین و آنلاین

اغلب روش‌های تمیزکاری شیمیایی به صورت آفلاین انجام می‌پذیرد که به عنوان سیستم‌های تمیز کننده در محل نیز شناخته می‌شوند. این سیستم‌ها از مواد شیمیایی نظیر عوامل شوینده و سترون‌ساز استفاده می‌کنند که داری

مزایای زیادی هستند، از جمله: صرفه‌جویی در زمان، صرفه‌جویی در هزینه با استفاده از محلول‌های شیمیایی با مقدار کمتر و حفظ واحد از رویارویی با عوامل خطرناک.

روش‌های تمیزکاری شیمیایی آفلاین به قرار زیر هستند:

الف) چرخش: این روش شامل پر کردن تجهیز با محلول تمیزکننده و چرخش آن با استفاده از پمپ می‌باشد. در طول زمان تمیزکاری، غلظت و دمای محلول ردیابی می‌شود.

ب) تمیزکاری با اسید: با استفاده از چرخاندن محلول هیدروکلریک اسید رقیق، رسوبات در آب خنک‌کننده جدا می‌شوند.

پ) تمیزکاری با پر کردن و غوطه‌ور کردن: در این روش، تجهیز از محلول تمیزکننده پر شده و پس از مدتی تخلیه می‌گردد. این کار تا زمانی که نتایج رضای‌کننده‌ای حاصل شود تکرار می‌گردد. با این وجود، این روش تنها به واحدهای با مقیاس کوچک محدود شده است.

ت) تمیزکاری آلی فاز گاز: این روش برای جداسازی رسوباتی که در طبیعت نیز وجود دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ث) تمیزکاری با تزریق بخار: این روش شامل تزریق مخلوطی از محلول‌های تمیزکننده غلیظ و بخار و ایجاد یک جریان سریع می‌باشد. بخار باعث تمیز کردن مواد شیمیایی و افزایش اثرگذاری آن‌ها و تضمین تماس مناسب با سطوح فلزات می‌شود.

از طرفی، پر واضح است که در صنعت به روش‌های تمیزکاری آنلاین نیاز است که بتواند رسوبات را بدون ایجاد اختلال در عملیات واحدها، جدا کند. روش‌های تمیزکاری شیمیایی آنلاین به طور معمول با بهره‌جویی از افزودنی‌های شیمیایی قابل دستیابی است. برای انواع متفاوت رسوب کریستالی، ذره‌ای، بیولوژیکی و خوردگی، استرایوس⁴⁵ و پوکوریوس⁴⁶، مشاهدات خود را ارائه دادند.

نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که در رسوبات کریستالی که مواد معدنی آب به واسطه فرآیند سختی زدایی (نرم کردن) جدا می‌شوند، حلالیت ترکیبات سازنده رسوب با استفاده از مواد شیمیایی نظیر اسیدها و پلی فسفات‌ها، افزایش می‌یابد. همچنین، اصلاح کریستالی توسط افزودنی‌های شیمیایی برای تسهیل جداسازی رسوبات، صورت می‌پذیرد. در رسوبات ذره‌ای، هرچند ذرات عمدتاً به واسطه روش مکانیکی فیلتراسیون جدا می‌شوند، اما مواد شیمیایی تحت عنوان لخته‌ساز⁴⁷ به منظور تسهیل فیلتراسیون نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [19]. در رابطه با رسوبات بیولوژیکی، اظهار کردند که جداکننده‌های شیمیایی در تزریق‌های پیوسته و یا دوره‌ای مواد شیمیایی متداول مانند کلرین و دیگر زیست‌کش‌ها، می‌توانند موثر باشند [2]. و نهایتاً در رابطه با رسوبات ناشی از پدیده خوردگی در مبدل‌های حرارتی، دو فاکتور دمای بخار خروجی و مقدار پی‌اچ⁴⁸ نقش اساسی دارند. از آن جایی که واکنش‌های الکترو شیمیایی بر روی سطح فلز فعال روی می‌دهد، افزایش سرعت بخار تا مقدار بیشینه آن، موجب افزایش نرخ خوردگی می‌گردد. همچنین، بر روی سطوح استیل با پی‌اچ در بازه 11 تا 12، خوردگی می‌تواند رخ دهد. بنابراین، بر

⁴⁵ Strauss

⁴⁶ Puckorius

⁴⁷ Flocculant

⁴⁸ pH

اساس خصوصیات افزودنی‌ها براساس نوع سیال خورنده، از روش شیمیایی آنلاین حذف رسوب بدین ترتیب بهره برده می‌شود تا رسوبات ناشی از خوردگی به حداقل مقدار خود برسند [2, 7, 19].

2-2-2- مزایا و معایب انواع روش‌های تمیز کردن شیمیایی

تمیزکاری شیمیایی در مقایسه با روش‌های مکانیکی، از مزایای زیر برخوردار است:

- قابلیت تمیزکاری مناطق غیر قابل دسترس
- تمیزکاری یکنواخت و بعضاً تمیزکاری کامل
- هزینه تمیزکاری مناسب و بازه‌های زمانی طولانی‌تر میان تمیزکاری
- نیازی به پیاده کردن واحد نمی‌باشد اما بایستی مواد شیمیایی از سیستم جدا شود و از طرف دیگر، معایب روش‌های تمیزکاری شیمیایی را می‌توان به صورت زیر برشمرد:
- مواد شیمیایی مورد استفاده اغلب خطرناک هستند و نیاز به روش‌های جداسازی دارند.
- گازهای مضر می‌توانند از محلول‌های تمیزکننده به واسطه واکنش‌های ناخواسته ساطع شوند.
- ممکن است مواد شیمیایی تمیزکننده باعث خوردگی فلز پایه شوند.
- شستشوی کامل تجهیزات بایستی اعمال شده تا از خوردگی توسط باقیمانده‌های مواد شیمیایی ممانعت شود.

3- تکنولوژی فراصوت

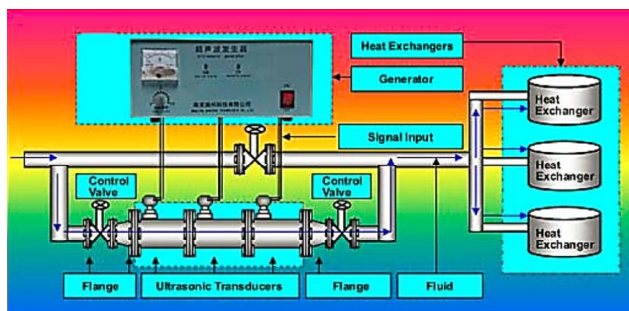
چنانچه پیش‌تر گفته شد، اثرات تابش فراصوت بر روی فرآیندهای تبلوری به مدت بیش از 20 سال مطالعه شده است. بنابراین، تکنولوژی فراصوت در حال حاضر به اندازه کافی برای مقابله مطمئن با مشکلات ناشی از تشکیل رسوب پیشرفته شده است. تکنولوژی فراصوت می‌تواند:

- از تشکیل رسوب در سطوح انتقال حرارت در سیستم‌های آبی و آلی جلوگیری کند.
- نرخ هسته‌زایی و رشد کریستال را به میزان قابل توجهی افزایش دهد.
- محدوده یا بازه توزیع اندازه ذرات را کاهش دهد و در نتیجه، منظم بودن شکل بلور را بهبود بخشد.
- متوسط اندازه ذرات را کاهش می‌دهد.

بطور کلی، اولین مورد از موارد بالا، قابل توجه‌ترین اثر از لحاظ تجاری را داراست.

3-1- روش ضدترسیب فراصوت

مبدل ضدترسیب فراصوت معمولاً در لوله ورودی مبدل‌های حرارتی، با اتصال فلنج و همراه با شیر کنترل نصب می‌شود (شکل 1). مزیت کلیدی این روش آن است که نیازی به توقف تولید، حتی زمانی که دستگاه‌های ضدترسیب فراصوت نیاز به تعمیر و سرویس دارند، نیست. هرچند مزایای عملیاتی آن در رابطه با مقابله با رسوب کاملاً واضح است. در این مقاله، به چند مورد میدانی از کاربرد روش مبدل ضدترسیب فراصوت در صنایع پتروشیمی و نیروگاهی اشاره می‌شود (بخش 4).



شکل 1- مبدل حرارتی ضد ترسیب فراصوت

3-2- پیشگیری از رسوب گذاری به روش سونیفیکیشن فاز مایع

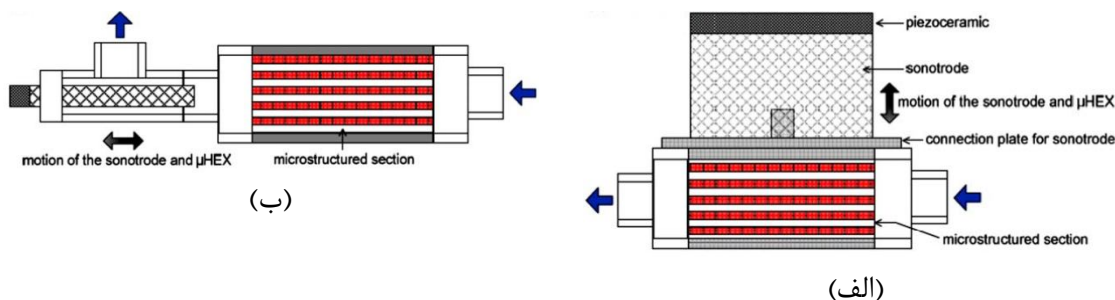
اولین روش بر پایه سونیفیکیشن فاز مایع، برای جلوگیری از رسوب بر سطوح فلزی توسط هرمان لوسلی⁴⁹ ارائه شد. اختراع او مبنی بر قرار دادن مستقیم پروب⁵⁰ فراصوت در مخازن آب برای جلوگیری یا حذف رسوبات سنگین از سنگ آهک که دیواره‌ها را می‌پوشاند، بود [20]. این رویکرد نیاز به توان زیاد فراصوت در ورودی، به دلیل تلفات بالای انرژی در پروب و سطح مشترک مایع، و نیز تضعیف امواج فراصوت برای گذشتن از میان توده مایع تحت شرایط کایتاسیون، داشت. بدیت ترتیب، توسعه تجاری این روش بر پایه تجهیزات فراصوت کراستکس⁵¹ برای پیشگیری از رسوب در بویلرها که از طریق تبلور نمک‌های منیزیم و کلسیم ایجاد می‌شد، پیش رفت که البته موفقیت زیادی به دست نیاورد.

در توضیح فنی این روش باید تاکید کرد که اثر اصلی تمیز کردن و حذف رسوب، توسط ارتعاشات سطوح انتقال حرارت، حاصل می‌شود. در تمیزکاری بر اساس روش سونیفیکیشن و ایجاد تنش بین رسوب، سیال و سطوح انتقال حرارت، اثرات کایتاسیون را نمی‌توان حذف کرد. سونیفیکیشن بر دو نوع مستقیم و غیرمستقیم است. هرچند که سونیفیکیشن مستقیم سطح، به طور قابل ملاحظه‌ای، کارآمدتر است، در روش غیرمستقیم که تنش بین سطح مشترک مایع/جامد رخ می‌دهد، سونوترود در جلوی ریزساختار قرار می‌گیرد و امواج فراصوت به سیال در حال جریان در بخش ریزساختار مبدل حرارتی، جایی که در آن ترسیب رخ می‌دهد، کوپل یا متصل می‌شود. به علت انتشار امواج فراصوت در سیال، سطوحی ایجاد می‌شوند که در آن سیال انبساط یافته و منقبض می‌شود و همین تنش‌ها منجر به جلوگیری یا حذف رسوبات از سطح می‌شود. هم‌چنین، تمیز شدن از طریق شکل‌گیری و فروپاشی حباب‌های کایتاسیون در میکروکانال‌ها نمی‌تواند نادیده گرفته شود. یک نمونه از مبدل‌های حرارتی ریزساختار با سونوترود فراصوت برای روش مستقیم و غیرمستقیم در شکل 2 نشان داده شده است.

⁴⁹ Hermann Loosli

⁵⁰ Probe

⁵¹ Crustex



شکل 2- مبدل حرارتی ریزساختار با جایگاه متفاوت سونوترود فراصوت: (الف) روش مستقیم، (ب) روش غیرمستقیم

4- بحث در نتایج

پس از استفاده از تجهیزات ضد ترسیب فراصوت در 6 مبدل حرارتی در واحدهای تقطیر یک واحد پتروشیمیایی؛ که نمونه‌ای از آن در شکل 3 دیده می‌شود، مبدل‌های حرارتی نفت و گاز قادر بودند سالانه مقدار بسیار زیادی از گرما، معادل حدود 244 تن نفت، را بهبود دهند. بعلاوه، موجب کاهش مصرف آب تا 117/5 تن در ساعت شد. هم‌چنین، در کولرهای هوایی، کارآمدی با مصرف برق کمتر نسبت به قبل، با صرفه‌جویی سالانه 480000 کیلووات، نتیجه داد که نهایتاً منجر به سودآوری اقتصادی سالانه گردید. از طرفی از نقطه نظر عملیاتی نیز به دلیل استفاده از این تجهیزات، دمای جریان رفلکس بنزین در این واحدها، تا زیر 40 درجه سانتی‌گراد و نیز دما و فشار در پیش‌تقسیم-کننده⁵² توانست پایدار بماند.



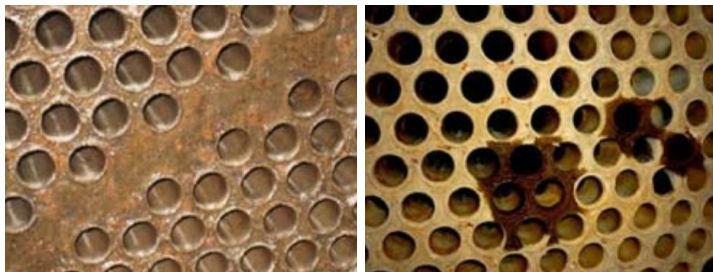
شکل 3- مبدل حرارتی ضدترسیب در صنعت پتروشیمی: (الف) قبل از نصب، (ب) پس از نصب در واحد

در صنعت نیروگاهی، یک نیروگاه از آب در گردش با مقدار زیادی از یون‌های کلسیم و منیزیم استفاده می‌کند. پس از تصفیه آب، پدیده آزادسازی و ترسیب یون‌ها در فرایند تبادل حرارتی هنوز پابرجاست که ترسیب موجب خسارت زیادی بر عملکرد مبدل‌های حرارتی از جمله کاهش ضرایب انتقال حرارت، افزایش دمای آب در گردش و نیز فشار خروجی بیش‌تر که منجر به نرخ مصرف گرمای بیش‌تر و نهایتاً راندمان حرارتی پایین‌تر می‌شود. به منظور حل مشکل مصرف انرژی، تجهیزات تبادل حرارتی توسط تکنولوژی ضد رسوب فراصوت در یک واحد نیروگاهی تعبیه شدند. مشاهدات سه ماه بعد حاکی از آن بود که لوله مسی در مبدل حرارتی فاقد رسوب بوده و نیازی به تمیز کردن نداشت (شکل 4). بنابراین اثرات صرفه‌جویی در انرژی به شرح زیر گزارش شد:

- افزایش دمای متوسط به مقدار 0/76 درجه سانتی‌گراد در ورودی و خروجی آب
- افزایش کارایی حرارتی 0/54 درصدی

⁵² Pre-fractionator

- کاهش 1% نرخ مصرف گرما
- کاهش مصرف زغال سنگ به میزان 3 گرم بر کیلووات ساعت و مقدار صرفه‌جویی زغال سنگ 0/65 تن در ساعت



شکل 4- مبدل حرارتی ضد ترسیب در صنعت برق

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با مدیریت و کنترل رسوبات معدنی، که عملاً منجر به کنترل مجموعه مقاومت‌های حرارتی موجود در سیستم مبدل - سیال - رسوب می‌شود، می‌توان اختلاف دمای سطح و سیال را کنترل کرد. چنانچه گزارش‌های عملیاتی نشان دادند، این امر موجب افزایش کارایی مبدل و کاهش نرخ مصرف انرژی می‌شود.

5- نتیجه‌گیری

این مقاله گزارشی از روش‌های مرسوم در کنترل رسوبات در مبدل‌های حرارتی را ارائه می‌دهد که شامل تمیزکاری فیزیکی و شیمیایی آنلاین و آفلاین در صنایع نفت و گاز است. بعلاوه، تکنولوژی فراصوت به عنوان یکی از روش‌های جدید در مقابله با تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی، در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است. روش فراصوت می‌تواند در جلوگیری از تشکیل رسوب در سطوح انتقال حرارت موفق باشد و همچنین این امکان وجود دارد که این تکنیک را به واحدهای بزرگتر اعمال کرد چرا که:

- 1) نرخ انتقال حرارت ثابت بدون کاهش در عملکرد با زمان ممکن است. این امر می‌تواند کنترل فرآیند را آسان کند و همچنین کارایی واحد را افزایش دهد.
- 2) دمای تفاضلی بین سیال فرآیندی و مبرد بدون ایجاد رسوب بر سطح انتقال حرارت می‌تواند افزایش یابد. این امر می‌تواند منجر به بازده بالا یا استفاده از مبدل‌های کوچکتر شود.
- 3) نیاز به پاکسازی مداوم می‌تواند حذف شود.
- 4) عملیات خاموش شدن واحد برای تمیز کردن می‌تواند به طور قابل توجهی کاهش یابد و صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های تعمیر و نگهداری در پی خواهد داشت.
- 5) در اغلب فرآیندهای طراحی مبدل، مبدل‌های حرارتی کوچک‌تر به عنوان عوامل رسوب‌دهنده بزرگ طراحی می‌شوند. با استفاده از تکنولوژی فراصوت این مورد از طراحی می‌تواند حذف شود؛ که خود به معنای اقتصادی کردن فرآیند و واحد است.

6- منابع

- [1] G. F. Hewitt, G. L. Shires, T. R. Bott, *Process Heat Transfer*. CRC Press, 1994.
- [2] R. K. Shah, *Classification of heat exchangers.*, no. (eds.), Washington, U.S.A.: Hemisphere Publishing Corp., pp. 9-14, 1983.
- [3] A. M. M., "Fouling of heat-transfer surfaces", *Heat Transfer-Theoretical Analysis, Experimental Investigation and Industrial System*, Intech Open, 2011.
- [4] H. Müller-Steinhagen, M. R. Malayeri, A. P. Watkinson, "Fouling of heat exchangers-new approaches to solve an old problem", *Heat Transf. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 1-4, 2005.
- [5] A. H. Nikoo, M. R. Malayeri, A. Al-Janabi, "Fouling Propensity of Modified Heat Transfer Surfaces", *Heat Transf. Eng.*, vol. 41, no. 11, pp. 919-933, 2020.
- [6] T. Lestina, "Heat Exchangers Fouling, Cleaning and Maintenance", *Handbook of Thermal Science and Engineering*, Springer, Cham, 2017, pp. 1-33.
- [7] H. Müller-Steinhagen, M. R. Malayeri, A. P. Watkinson, "Heat exchanger fouling: Mitigation and cleaning strategies", *Heat Transf. Eng.*, vol. 32, no. 3-4, pp. 189-196, 2011.
- [8] N. Kamar, M. Le Page Mostefa, H. Muhr, P. O. Jost, "Influence of ultrasonic treatment on heat transfer in the heat exchanger", *J. Phys. Commun.*, vol. 6, no. 9, 2022.
- [9] M. Legay, N. Gondrexon, S. Le Person, P. Boldo, A. Bontemps, "Enhancement of heat transfer by ultrasound: Review and recent advances", *Int. J. Chem. Eng.*, vol. 2011.
- [10] J. Bucko, W. Benzinger, "Mitigation of Crystallization Fouling in Microstructured Heat Exchangers Using Ultrasound", vol. 2013, pp. 362-368, 2013.
- [11] X. Zhang, J. Kang, S. Wang, J. Ma, T. Huang, "The effect of ultrasonic processing on solidification microstructure and heat transfer in stainless steel melt," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 27, no. 1, pp. 307-315, 2015.
- [12] B. Kieser, R. Phillion, S. Smith, and T. McCartney, "The Application of Industrial Scale Ultrasonic Cleaning To Heat exchangers", *Heat Exch. Fouling Clean. - 2011*, vol. 2011, no. 1961, pp. 336-338, 2011.
- [13] J. A. Dodds et al., The effect of ultrasound on crystallisation-precipitation processes: Some examples and a new segregation model To cite this version: *HAL Id : hal-01649522*, 2018.
- [14] N. M. Musyoka, L. F. Petrik, E. Hums, H. Baser, W. Schwieger, "In situ ultrasonic monitoring of zeolite A crystallization from coal fly ash", *Catal. Today*, vol. 190, no. 1, pp. 38-46, 2012.
- [15] Y. Hu, Y. Shen, J. Wang, "Pretreatment of antibiotic fermentation residues by combined ultrasound and alkali for enhancing biohydrogen production", *J. Clean. Prod.*, vol. 268, p. 122190, 2020.
- [16] K. Thulukkanam, *Heat Exchanger Design Handbook, 2nd edition*, 2nd ed. New York: Taylor & Francis Group, 2013.
- [17] J. Taborek, T. Akoi, R. B. Ritter, J. W. Palen, "Fouling: the major unresolved problem in heat transfer", *Chem. Eng. Prog.*, vol. 68, no. 59, 1972.
- [18] R. C. Byrne, *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association*, 2019.
- [19] H. Müller-Steinhagen, "Cooling-Water Fouling in Heat Exchangers", *Adv. Heat Transf.*, vol. 33, no. C, pp. 415-496, 1999.
- [20] M. J. Ashley, "Preventing deposition on heat exchange surfaces with ultrasound", *Ultrasonics*, vol. 12, no. 5, pp. 215-221, 1974.