



بررسی تأثیر مواد شیمیایی آنتی‌اسکالانت بر جلوگیری از رسوب در سیستم‌های گرمایش و

سرمايش

آسیه عطاردی‌کاشانی^{۱*}، مهدی تیموری^۲

۱. استادیار، شیمی آلی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران
۲. کارشناسی ارشد، شیمی آلی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۳۱۴۵۱۶۹۶، a.otaredi@yahoo.com

چکیده

در این طرح مقرر شد تا تأثیر برخی آنتی‌اسکالانت‌ها در جلوگیری از رسوب و خوردگی در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای بررسی شود. بدین منظور، دستگاه آزمون شامل یک مبدل حرارتی صفحه‌ای فشرده جریان مخالف نصب شده در مدارهای بسته گرمایشی و سرمایشی طراحی گردید. در اینجا، معیار میزان تشکیل رسوب، تغییرات میزان تبادل حرارت مبدل ($LMTD$)، مقاومت حرارتی رسوب (R_f) و میزان افت فشار دو سر مبدل به صورت زمانی در نظر گرفته شد. بنابراین، پارامترهای دما، فشار و دبی سیال عبور داده شده از مبدل در زمان مورد مطالعه اندازه‌گیری شده‌اند. این مطالعه در سه مرحله: ۱- مدار گرمایشی شامل آب سخت و مدار سرمایشی شامل آب مقطر، ۲- مدار گرمایشی شامل آب سخت و مدار آنتی‌اسکالانت شامل آب مقطر انجام شد و R_f و $LMTD$ برای هر سه حالت به دست آمد. در مرحله اول که از مواد ضد رسوب استفاده نشده است، R_f با گذشت زمان ابتدا تا حدود $0.0005 m^2 \cdot K/W$ افزایش می‌یابد و سپس ثابت می‌شود. همچنین، $LMTD$ مبدل به واسطه تشکیل رسوب از حدود $20^\circ C$ تا $15^\circ C$ کاهش می‌یابد. در مرحله دوم و سوم که به ترتیب از مواد آنتی‌اسکالانت در مدار گرمایشی و سرمایشی استفاده شد، مقاومت حرارتی رسوب، پایین و ثابت (حدود $0.0005 m^2 \cdot K/W$) باقی مانده است. همچنین در هر دو حالت، تغییرات میزان تبادل حرارت مبدل ثابت (حدود $17^\circ C$) است و در نهایت، افت فشار در مرحله ۱ افزایش یافته و در مرحله ۲ تقریباً ثابت مانده است.

کلیدواژگان

آنتی‌اسکالانت، مبدل حرارتی صفحه‌ای فشرده در حالت جریان مخالف، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی، مقاومت حرارتی رسوب، افت فشار

An Investigation on the Effect of Antiscalants on the Prevention of Scaling in Heating and Cooling Systems

Asieh Otaredi-Kashani^{1*}, Mahdi Teimuri¹

1. Department of Mechanical Engineering, Road, Housing, and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

* P.O. Box 131451696, Tehran, Iran, a.otaredi@yahoo.com

Abstract

In this paper, it was established investigating the effect of some antiscalants in preventing of scaling and corrosion in plate heat exchangers. For that, the test rig including a plate heat exchanger installed in closed heating and cooling circuits has been designed. Here, the criteria of scaling were considered changes of logarithmic mean temperature difference ($LMTD$), thermal resistance of the scale (R_f) and pressure drop of the two ends of the exchanger temporally. So, the parameters of temperature, pressure and flow rate of the fluid passed through the plate heat exchanger have been measured during the study time. This project has been done in three steps: 1- heating circuit including hard water and cooling circuit including distilled water, 2- heating circuit including hard water and antiscalants and cooling circuit including distilled water, 3- cooling circuit including hard water and antiscalants and heating circuit including distilled water and $LMTD$ and R_f have been obtained for all three steps. In the first step, when no anti-scaling material is used, R_f first increases to about $0.0005 m^2 \cdot K/W$ over time and then becomes constant. Also, $LMTD$ is reduced from about 20 to $15^\circ C$ due to scaling. In the second and third steps, when antiscalants were used in the heating and cooling circuits, respectively, thermal resistance is low and constant (about $0.0005 m^2 \cdot K/W$). Also, in both steps, $LMTD$ is constant (about $17^\circ C$). Finally, the pressure drop increased in step 1 and remained almost constant in step 2.

Keywords

Antiscalants, Plate Heat Exchanger, Logarithmic Mean Temperature Difference, Thermal Resistance of Scale, Pressure Drop

سامانه‌های حرارتی و برودتی، وظیفه انتقال حرارت را بر عهده دارد، آب است، یکی از عواملی که طول عمر تأسیسات را تحت تأثیر قرار می‌دهد، مسأله رسوب و خوردگی به‌شمار می‌رود. از دلایل اصلی رسوب در تأسیسات ساختمانی، وجود یون‌های کم محلول در آب است، چرا که به‌واسطه حلالیت

۱- مقدمه

یکی از مهمترین عوامل مرتبط با عمر ساختمان، تأسیسات مکانیکی آن شامل سیستم‌های لوله‌کشی توزیع آب سرد و گرم بهداشتی و تأسیسات گرمایشی و سرمایشی است. از آنجا که یکی از مهمترین سیالاتی که در

کم آنها، در صورت فراهم بودن شرایط (افزایش دما و یا تغییر شیمیایی محیط مانند تغییر pH، ...)، سریعاً رسوب می‌کنند.

یکی از معضلات اصلی ناشی از تشکیل رسوب و خوردگی، تشکیل رسوب در تجهیزات تبادل‌کننده حرارت است. لایه رسوب تشکیل‌شده بر روی سطوح تبادل‌کننده حرارت، موجب افزایش مقاومت حرارتی و در نتیجه، کاهش نرخ انتقال حرارت، همچنین افت فشار در مسیر حرکت سیال می‌شود. در نتیجه، راندمان سیستم گرمایی و سرمایی پایین می‌آید و دستگاه تولیدکننده گرما یا سرما باید با توان بیشتری کار کند که همه این عوامل باعث افزایش مصرف انرژی و کاهش طول عمر این تجهیزات خواهد شد و در مجموع، باعث هزینه بیشتر در طراحی و تعمیر و نگهداری می‌شود. از سال ۱۹۶۰، تحقیقات گسترده‌ای در خصوص شناخت روند رسوب‌گذاری انجام شده است. با آنکه در آن زمان، تخمین دقیقی از ارتباط لایه رسوب با عوامل تشکیل‌دهنده آن و شناخت نحوه رشد این لایه به دست نیامد، اما بعد از آن، گام‌هایی در این رابطه و همچنین شناخت تأثیر رسوب بر ازدیاد مقاومت حرارتی و همچنین تأثیر رسوب بر هزینه‌های سرویس و نگهداری و انرژی سیستم‌های گرمایی و سرمایی برداشته شد [1].

تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی به پارامترهایی چون سرعت و دمای سیال، نوع و میزان ماده رسوب‌گذار، نوع و شکل و زبری سطح مبدل بستگی دارد.

به‌طور معمول، رسوب شامل ترکیبات کربنات کلسیم، سولفات کلسیم، نمک‌های منیزیم و سیلیس است. در دمای بالاتر از 50°C ، بی‌کربنات کلسیم محلول در آب با آزاد کردن دی‌اکسید کربن، به کربنات کلسیم تبدیل می‌شود که رسوب می‌کند. در دمای بالاتر از 90°C ، یون‌های کربنات به یون‌های هیدروکسید هیدرولیز می‌شوند که با یون‌های منیزیم ترکیب شده و رسوب هیدروکسید منیزیم تولید می‌کنند. بنابراین، کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم، رسوب‌های قلیایی هستند. برای مثال هیدروکسید منیزیم در دما و pH بالا تمایل به تشکیل دارد.

نرم کردن آب به معنی حذف یون‌های کلسیم و منیزیم در آب است که با استفاده از روش‌های تهنشینی شیمیایی، سختی‌گیرها، تزریق اسید، استفاده از مواد بازدارنده شیمیایی و ... صورت می‌گیرد. یکی از راه‌های جلوگیری از تشکیل رسوب، استفاده از مواد شیمیایی بازدارنده‌های رسوب است. از جمله مواد شیمیایی که به عنوان ضد رسوب و پخش‌کننده رسوبات استفاده می‌شوند، آنتی‌اسکالانت‌ها هستند [2].

آنتی‌اسکالانت‌ها مواد شیمیایی با سطوح فعال هستند که به سه طریق اصلی در واکنش‌های تشکیل رسوب تداخل ایجاد می‌کنند:

- بازدارنده‌های آستانه (Threshold Inhibition): توانایی یک آنتی‌اسکالانت برای نگه داشتن محلول‌های فوق اشباع نمک‌های محلول است.

- اصلاح کریستال: این خاصیت یک آنتی‌اسکالانت برای به‌هم ریختن شکل کریستال و در نتیجه، ایجاد رسوب نرم و غیرچسبنده است. زمانی که یک کریستال در سطح زیر میکروسکوپی شروع به تشکیل می‌کند، گروه‌های منفی روی مولکول آنتی‌اسکالانت به بارهای مثبت هسته رسوب حمله می‌کنند و تعادل الکترونیکی لازم برای رشد کریستال را بر هم می‌زند. زمانی که از اصلاح‌کننده‌های کریستالی استفاده می‌شود، کریستال‌های رسوب، نامنظم‌تر، بیضی‌شکل‌تر و کمتر متراکم به نظر می‌رسند.

- پراکندگی: برخی از آنتی‌اسکالانت‌ها می‌توانند روی کریستال‌ها یا ذرات کلوئیدی جذب شوند و بار آنیونی بالایی را به آنها انتقال دهند که منجر به جدا نگه داشتن کریستال‌ها از هم می‌شود [3].

۲- روش کار

به‌طور کلی، تشکیل رسوب بر روی سطح می‌تواند در پنج مرحله رخ دهد: به شرایط اولیه رسیدن سطح برای تشکیل رسوب، انتقال املاح معلق در آب به سطح، اتصال مواد به سطح، حذف برخی رسوبات ایجادشده (که با مکانیزم‌های مختلف مانند انحلال و سایش اتفاق می‌افتد) و پیرشدگی رسوب. پیرشدگی رسوب، ممکن است رسوب را تقویت یا تضعیف نماید. رسوب با گذشت زمان تا رسیدن به مقدار پایدار، رشد می‌کند. اما مقاومت مکانیکی رسوب می‌تواند با تغییر ساختار بلور یا ترکیب شیمیایی رسوب تغییر نماید [4].

عوامل مهم مؤثر بر رسوب‌گذاری شامل غلظت، سرعت جریان، دمای سطح، غلظت املاح و ... است. رسوب‌گذاری با زمان به‌صورت مجانبی افزایش می‌یابد. معمولاً با افزایش دمای انتقال حرارت سطح، مقاومت رسوب کریستالی توسط حلالیت معکوس افزایش می‌یابد. همچنین، مقاومت رسوب با افزایش تنش برشی کاهش می‌یابد. بر اساس یک نظریه، تنش برشی اعمال شده در مجاورت زیر لایه برای حذف لایه‌های بالایی رسوب کافی است. در نظریه دیگر، فوران ناگهانی سیال به دیواره باعث حذف رسوب می‌شود. افزایش سرعت به معنای افزایش تنش برشی و حذف رسوب است [5].

یکی از راه‌های جلوگیری از تشکیل رسوب یا کاهش روند آن، استفاده از مواد شیمیایی آنتی‌اسکالانت‌هاست. این مواد عمده‌تاً شامل دو نوع پایه فسفات و پایه پلیمری می‌باشند.

آنتی‌اسکالانت‌های پایه فسفات دارای گروه‌های عاملی اسید کربوکسیلیک و فسفات‌ها هستند. این مواد از بهترین نوع آنتی‌اسکالانت‌ها در جلوگیری از تشکیل رسوب می‌باشند اما در مقابل، خاصیت پراکندگی کمی دارند. آنتی‌اسکالانت‌های پایه پلیمری دارای وزن مولکولی بالایی هستند و برای آب‌های با سختی بالا استفاده می‌شوند [6].

در این مطالعه، مقرر شد تا تأثیر مواد شیمیایی آنتی‌اسکالانت بر پایه فسفات‌ها، تولید شرکت آبریزان، در جلوگیری از رسوب و یا خوردگی در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی بررسی شود. بدین منظور، دستگاه آزمون مطابق "شکل ۱" طراحی و اجرا شد. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، دستگاه آزمون شامل یک مبدل حرارتی صفحه‌ای اصلی است که جریان‌های سرد و گرم به‌صورت مخالف از آن عبور می‌کنند. از آنجا که یکی از محل‌های دارای بیشترین پتانسیل تشکیل رسوب در سیستم لوله‌کشی، مبدل حرارتی است، در این کار، این مبدل جهت بررسی تأثیر مواد شیمیایی مورد نظر قرار گرفت. در نظر گرفته شد تا پارامتر دما، فشار و دبی سیال عبور داده شده در این مبدل بررسی شود. بدین منظور ۴ عدد سنسور دما جهت بررسی دما در ورودی و خروجی مسیر گرم و سرد مبدل نصب گردید. همچنین، ۲ عدد فشارسنج در ورودی‌های مسیر گرم و سرد مبدل و ۲ عدد اختلاف فشارسنج، یکی برای سمت گرم و دیگری برای سمت سرد تعبیه شد که هر کدام اختلاف فشار ورود و خروج مبدل در مسیرهای گرم و سرد را به‌صورت مجزا اندازه‌گیری کنند. جهت مشخص نمودن دبی، ۲ عدد دبی‌سنج در مسیر گرم و سرد قرار داده شد.

در طول دوره آزمون، دماها در ورودی به مبدل و خروجی از مبدل، فشار ورودی به مبدل و اختلاف فشار دو سمت مبدل، دبی جریان در هر دو مدار گرمایش و سرمایش اندازه‌گیری و ثبت شدند. دمای آب گرم ورودی به مبدل، بین ۵۵ تا ۶۰ °C و دمای آب سرد ورودی به مبدل ۱۵ °C تنظیم شد. به منظور ثابت بودن دمای آب سرد ورودی به مبدل، از یک چیلر هواخنک استفاده شده است. همچنین، به منظور بررسی فرایند رسوب‌گذاری در زمان کمتر از شرایط معمولی، از آب با سختی 204 ppm و TDS حدود 408 ppm استفاده شد.

این پروژه در سه مرحله انجام شد:

- در مرحله اول، در مدار سرمایشی از آب مقطر و در مدار گرمایشی از آب سخت استفاده شد و هیچ مواد آنتی‌اسکالانت به آن اضافه نشد. این مرحله به عنوان شاهد و بررسی تأثیر رسوب در مبدل در غیاب مواد آنتی‌اسکالانت در نظر گرفته شد.
 - در مرحله دوم، مدار گرم شامل آب سخت و مواد آنتی‌اسکالانت و مدار سرد شامل آب مقطر بود.
 - در مرحله سوم که هدف آن بررسی تأثیر مواد آنتی‌اسکالانت در سیستم سرمایشی بوده، شامل آب مقطر در مدار گرم و آب سخت و مواد آنتی‌اسکالانت در مدار سرد بود.
- در هر سه مرحله، دماهای ورودی به مبدل و خروجی از مبدل، فشار ورودی به مبدل، اختلاف فشار دو سر مبدل، دبی در هر دو مسیر گرمایش و سرمایش در طی مدت آزمون، به شرح نتایج زیر ثبت شدند.

۳- نتایج

جهت بررسی تشکیل رسوب در مبدل حرارتی صفحه‌ای، از پارامترهای مؤثر از رسوب به صورت زیر استفاده شد [7]:

- افزایش مقاومت حرارتی ناشی از افزایش رسوب
- افزایش اختلاف دمای تبادل به روش $LMTD$ ناشی از افزایش رسوب
- افزایش اختلاف فشار ورودی و خروجی مبدل.

با توجه به مشخص بودن دماهای ورودی به مبدل و خروجی از مبدل، همچنین، دبی‌های آب در حال چرخش در هر دو مدار گرمایش و سرمایش به صورت روزانه، می‌توان میزان حرارت تبادل شده در هر سمت مبدل را با استفاده از روابط زیر به دست آورد:

$$\begin{aligned} Q_h &= \dot{m}_h C_h (T_{h_i} - T_{h_o}) \\ Q_c &= \dot{m}_c C_c (T_{c_o} - T_{c_i}) \end{aligned} \quad (1)$$

در اینجا، ظرفیت گرمایی ویژه آب، 4187 J/g.K در نظر گرفته شده است. از آنجا که مقداری از Q_h صرف گرم کردن آب سرد در مبدل و بقیه به صورت افت انرژی (Q_{Loss}) در محیط از دست می‌رود، میزان تبادل حرارت صورت گرفته برابر با Q_c است.

$$Q_h = Q_c + Q_{Loss} \quad (2)$$

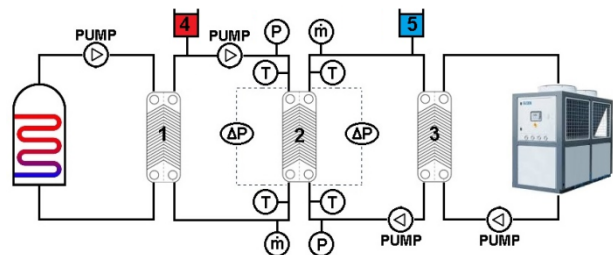
با مشخص بودن میزان تبادل حرارت، ضریب کلی انتقال حرارت مبدل، مطابق با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$U_c = \frac{Q_c}{A \times C_{FT} \times LMTD} \quad (3)$$

همچنین، جهت تنظیم فشار اضافی سیستم و جریان کمبود آب در مدار گرم و مدار سرد، از منبع انبساط باز در هر دو مدار گرم و سرد استفاده شد. سیال در مسیر لوله‌کشی سرد توسط یک چیلر هوا خنک و در مسیر لوله‌کشی گرم توسط المنت‌های الکتریکی که یک مخزن آب را در دمای ثابت نگه می‌دارد، به دمای مورد نظر می‌رسد. در هر مدار جهت گردش آب، از پمپ سیرکولاسیون استفاده گردید.

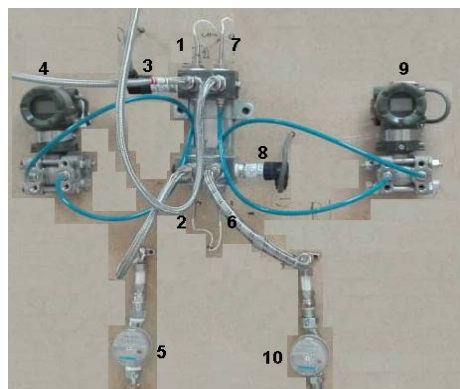
مشخصات تجهیزات مورد استفاده در این پروژه به صورت زیر است:

- سیستم گرمایش شامل مخزن فلزی با ظرفیت 1 m^3 و المنت‌های الکتریکی به ظرفیت 6 KW
- چیلر هواخنک با ظرفیت ۱۰ تن تبرید
- منبع‌های انبساط باز با ظرفیت 60 l
- مبدل حرارتی صفحه‌ای ۱۲ صفحه‌ای با مساحت 0.126 m^2
- سنسور $PT100$ با دقت 0.1°C با نام تجاری لوترون
- فشارسنج ساخت شرکت ویکا با ظرفیت $0-4 \text{ bar}$ (خروجی به صورت $4-20 \text{ mA}$ و با دقت 0.1 mA است.)
- اختلاف فشارسنج با دقت 0.1 درصد ساخت شرکت یوگواوا
- دبی‌سنج پره‌ای تا محدوده‌ی دمایی 130°C ساخت شرکت زرن
- لوله‌کشی با لوله‌های PE-X/Al/PE-X با قطر 16 mm



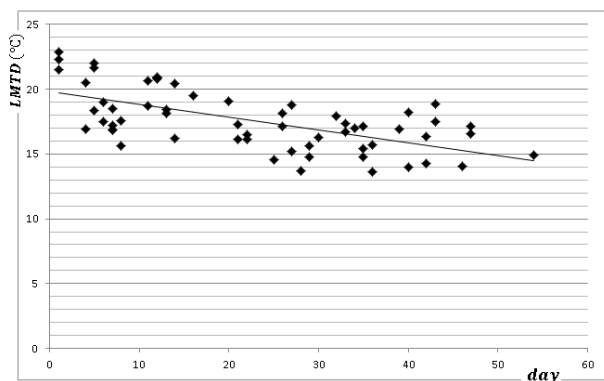
۱: مبدل گرم‌کننده مدار گرمایش، ۲: مبدل تبادل‌کننده حرارت مدار گرمایش و سرمایش، ۳: مبدل خنک‌کننده مدار سرمایش، ۴: منبع انبساط باز مدار گرمایش، ۵: منبع انبساط مدار سرمایش
شکل ۱ طرح‌واره دستگاه آزمون

همچنین، "شکل ۲" مبدل حرارتی صفحه‌ای اصلی را به همراه تجهیزات اندازه‌گیری در دستگاه آزمون نشان می‌دهد.



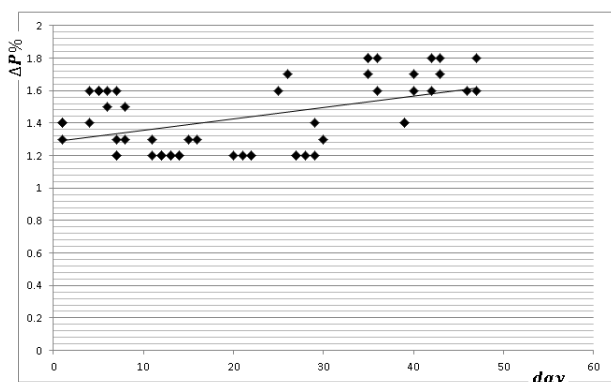
شکل ۲ مبدل حرارتی صفحه‌ای به همراه تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای T_{h_i} ، T_{h_o} ، T_{c_i} ، T_{c_o} ، P_{h_i} ، P_{h_o} ، ΔP_{hot} ، ΔP_{cold} ، \dot{m}_h در مدار گرمایشی و پارامترهای T_{c_i} ، T_{c_o} ، P_{c_i} ، P_{c_o} ، ΔP_{cold} در مدار سرمایشی

می‌افتد. در "شکل ۴"، که متوسط $LMTD$ مبدل نشان داده شده است، کاهش اختلاف دما از حدود ۲۰ تا حدود ۱۵ را نشان می‌دهد.



شکل ۴ تغییرات $LMTD$ مبدل بر حسب زمان سیستم گرمایشی شامل آب سخت و بدون مواد آنتی‌اسکالانت

به طور کلی، عبور سیال از مبدل، به‌خاطر برخورد با صفحات مبدل با افت فشار همراه است. در این پروژه، میزان افت فشار توسط دستگاه اختلاف فشارسنج که به دو سمت مبدل در هر دو مدار گرمایش و سرمایش متصل است و افت فشار را به‌صورت درصد نشان می‌دهد، خوانده شد. با گذشت زمان و تشکیل رسوب و تنگ شدن مجراهای عبور آب، افت فشار آب بیشتر می‌شود. "شکل ۵" افزایش افت فشار در مسیر گرم مبدل (که آب سخت در آن جریان داشته) را از حدود ۱/۳ تا ۱/۶ درصد نشان می‌دهد.



شکل ۵ تغییرات اختلاف فشار ورودی و خروجی دو طرف مبدل در مدار گرمایشی بر حسب زمان شامل آب سخت و بدون مواد آنتی‌اسکالانت

در مرحله دوم پروژه و به سبب مقایسه این مرحله با مرحله اول، در مدار گرمایش، آب سخت و در مدار سرمایش، آب مقطر استفاده شد، با این اختلاف که در مدار گرمایش از مواد آنتی‌اسکالانت بر پایه فسفات‌ها استفاده شد. مدت این مرحله از مطالعه دو ماه در نظر گرفته شد.

همانند مرحله قبل، به صورت روزانه پارامترهای دما، فشار، دبی و اختلاف فشار دو سر مبدل در هر دو مدار گرمایش و سرمایش اندازه‌گیری شدند. با داشتن دماها و دبی در هر روز، مقاومت حرارتی رسوب بر حسب زمان مطابق با روابط محاسبه گردید که نتیجه در "شکل ۶" نشان داده شده است. مقاومت حرارتی رسوب با گذشت زمان ثابت است و افزایش نیافته است، همچنین، میزان آن پایین و حدود $0.0005 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ است که این امر نشان‌دهنده آن است که به‌خاطر افزایش مواد آنتی‌اسکالانت،

در این رابطه، U_c ضریب کلی انتقال حرارت مبدل در حالتی است که هنوز رسوبی در آن تشکیل نشده است. از آنجا که مبدل مورد استفاده در این پروژه، مبدل حرارتی صفحه‌ای فشرده در حالت جریان مخالف بوده است، C_{FT} بیشترین مقدار خود یعنی برابر با یک فرض شده است. همچنین، $LMTD$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

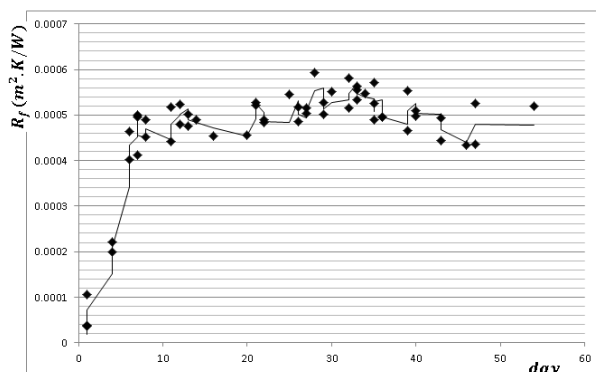
$$LMTD = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln\left(\frac{T_{hi} - T_{co}}{T_{ho} - T_{ci}}\right)} \quad (4)$$

زمانی که رسوب در مبدل تشکیل می‌شود، مقاومت حرارتی رسوب باعث می‌شود تا انتقال حرارت مبدل کمتر صورت گیرد. مقاومت حرارتی رسوب را می‌توان به‌صورت زمانی و مطابق با رابطه زیر اندازه‌گیری نمود:

$$\frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} = R_f \quad (5)$$

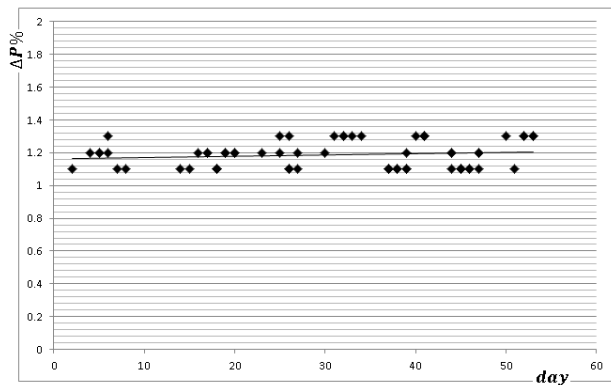
در اینجا، با محاسبه ضریب کلی انتقال حرارت مبدل در حالتی که در آن رسوب تشکیل شده (U_f)، می‌توان مقاومت حرارتی رسوب را در هر زمان از تشکیل رسوب (R_f) به‌دست آورد.

همان‌طور که گفته شد، در مرحله اول پروژه که زمان آن دو ماه در نظر گرفته شد، در مدار گرمایش، آب سخت و در مدار سرمایش، آب مقطر استفاده شد و در آن به‌صورت روزانه پارامترهای دمای ورودی به مبدل و خروجی از مبدل، فشار ورودی به مبدل، اختلاف فشار دو سر مبدل و دبی در هر دو مدار گرمایش و سرمایش اندازه‌گیری شدند و مقاومت حرارتی رسوب بر حسب زمان محاسبه گردید. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، R_f با گذشت زمان، به‌واسطه افزایش میزان و ضخامت رسوب، ابتدا افزایش می‌یابد و سپس، با توجه به اینکه مواد سخت جدیدی به سیستم اضافه نشده است و بنابراین، لایه جدیدی از رسوب به‌وجود نمی‌آید، ثابت می‌شود. "شکل ۳" R_f مرحله اول پروژه را بر حسب زمان نشان می‌دهد که تا حدود روز دهم تا حدود $0.0005 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ افزایش می‌یابد و سپس، به این دلیل که آب تازه زیادی وارد سیستم نمی‌شود، ثابت می‌ماند.



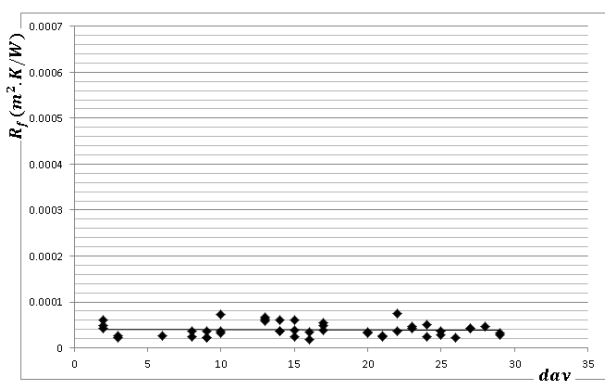
شکل ۳ تغییرات مقاومت حرارتی رسوب بر حسب زمان سیستم گرمایشی شامل آب سخت و بدون مواد آنتی‌اسکالانت

همچنین، با تشکیل رسوب و افزایش مقاومت حرارتی، اختلاف دمای ورودی و خروجی مبدل کاهش می‌یابد، بدین معنا که تبادل کمتر اتفاق



شکل ۸ تغییرات اختلاف فشار ورودی و خروجی دو طرف مبدل در مدار گرمایشی بر حسب زمان شامل آب سخت و مواد آنتی‌اسکالانت

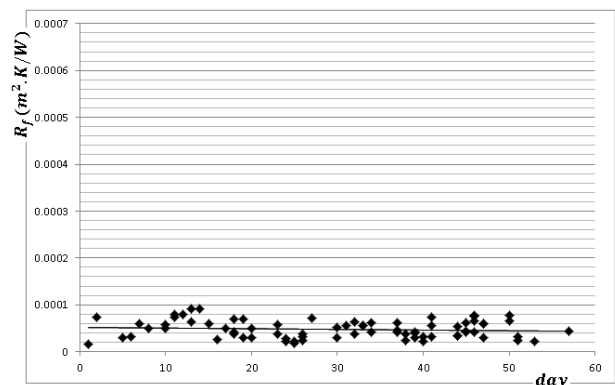
در مرحله سوم پروژه، مقرر شد تا تأثیر مواد آنتی‌اسکالانت در سیستم سرمایش مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور، در مدار سرمایش، آب سخت و مواد شیمیایی آنتی‌اسکالانت بر پایه فسفات‌ها و در مدار گرمایش، آب مقطر استفاده شد. مدت زمان این مرحله یک ماه در نظر گرفته شد. در اینجا، مقاومت حرارتی رسوب بر حسب زمان (شکل ۹)، با گذشت زمان ثابت است و افزایش نیافته است. همچنین میزان آن پایین و حدود $0.0005 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ است که این امر نشان‌دهنده آن است که به‌خاطر افزایش مواد آنتی‌اسکالانت به آب سخت، یون‌های کم محلول در آب که تمایل به رسوب دارند، در آب معلق مانده و در مبدل رسوب نکرده‌اند.



شکل ۹ تغییرات مقاومت حرارتی رسوب بر حسب زمان سیستم سرمایشی شامل آب سخت و مواد آنتی‌اسکالانت

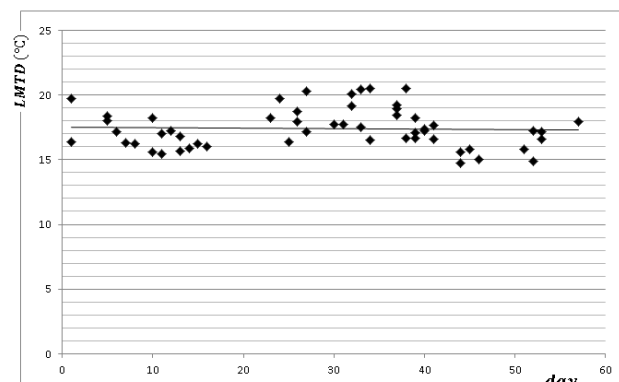
همچنین، "شکل ۱۰" $LMTD$ مبدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، اختلاف دمایی ورودی و خروجی مبدل تقریباً ثابت است و کاهش اتفاق نیفتاده است. بدین معنا که به‌خاطر عدم تشکیل رسوب و عدم افزایش مقاومت حرارتی، اختلاف دما در ورودی و خروجی مبدل در مدار سرد ثابت و حدود ۱۷ است.

یون‌های کم محلولی که تمایل به رسوب دارند، در آب معلق مانده و رسوب نکرده‌اند.



شکل ۱۰ تغییرات مقاومت حرارتی رسوب بر حسب زمان سیستم گرمایشی شامل آب سخت و مواد آنتی‌اسکالانت

همچنین، "شکل ۷" $LMTD$ مبدل را بر حسب زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، اختلاف دمایی لگاریتمی مبدل به‌خاطر عدم تشکیل رسوب و عدم افزایش مقاومت حرارتی، تقریباً ثابت است و کاهش اتفاق نیفتاده است.



شکل ۱۱ تغییرات $LMTD$ مبدل بر حسب زمان سیستم گرمایشی شامل آب سخت و مواد آنتی‌اسکالانت

اختلاف فشار ورودی و خروجی مبدل در مدار گرمایش بر حسب زمان و به‌صورت درصد در "شکل ۸" نشان داده شده است. در اینجا برخلاف "شکل ۳" که درصد اختلاف فشار با یک شیب ملایم افزایش یافته است، تقریباً ثابت و حدود ۱/۲ درصد است.

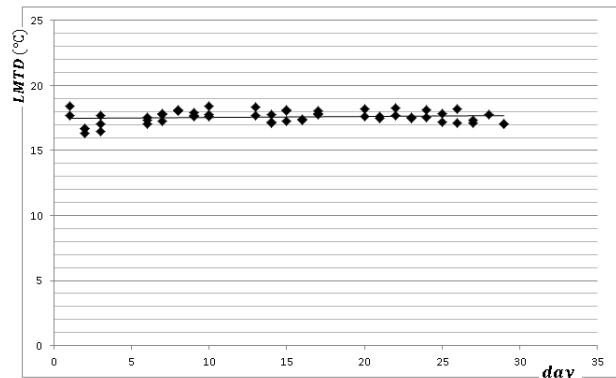
اختلاف فشار ورودی و خروجی مبدل در مسیر سرد (%)	ΔP_{cold}
دبی مسیر گرم (g/s)	\dot{m}_h
دبی مسیر سرد (g/s)	\dot{m}_c
نرخ انتقال حرارت که آب گرم مبدل آزاد می‌کند (W)	Q_h
ظرفیت گرمایی ویژه آب گرم ($j/g.K$)	C_h
نرخ انتقال حرارت که آب سرد مبدل دریافت می‌کند (W)	Q_c
ظرفیت گرمایی ویژه آب سرد ($j/g.K$)	C_c
نرخ حرارت اتلافی (W)	Q_{Loss}
ضریب کلی انتقال حرارت مبدل ($W/m^2.K$)	U_c
ضریب کلی انتقال حرارت مبدل در حالی که در آن رسوب تشکیل شده است.	U_f
مقاومت حرارتی رسوب ($m^2.K/w$)	R_f
اختلاف دمای متوسط لگاریتمی ($^{\circ}C$)	$LMTD$
ضریب تصحیح $LMTD$	C_{FT}
سطح کلی انتقال حرارت مبدل (m^2)	A

۶- تقدیر و تشکر

از شرکت پژوهشی، صنعتی آبریزان بابت همکاری در این طرح تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷- مراجع

- [1] A. Cooper, Recover more heat with plate heat exchangers, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 285, pp. 280-284, May 1974.
- [2] <https://mitreh.com/product/>
- [3] <https://www.lenntech.com/antiscalants.htm>
- [4] M. Al-Ahmad, F. Abdul Aleem, Scale Formation and Fouling Problems Effect on the Performance of MSF and RO Desalination Plants in Saudi Arabia, *Desalination*, 93, pp. 287-310, 1993.
- [5] J. G. Knudsen, "Fouling in Heat Exchangers", in "Hemisphere Handbook of heat Exchangers Design", G. F. Hewitt (Ed.), Hemisphere, 1990.
- [6] <https://buali-chem.com/>
- [7] Compact Heat Exchanger for Energy Transfer Intensification, Low Grade Heat and Fouling Mitigation, by Taylor & Francis Group, 2016.



شکل ۱۰ تغییرات $LMTD$ مبدل بر حسب زمان سیستم سرمایشی شامل آب سخت و مواد آنتی‌اسکالانت

۴- نتیجه‌گیری

در این پروژه مقرر شد تا تأثیر برخی از مواد آنتی‌اسکالانت با نام تجاری میتره، تولید شرکت آبریزان در جلوگیری از رسوب در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی بررسی شود. بدین منظور، دستگاه آزمون مطابق "شکل ۱" و شامل یک مدار بسته گرمایشی و یک مدار بسته سرمایشی که توسط یک مبدل حرارتی صفحه‌ای فشرده جریان مخالف تبادل حرارت می‌کنند، طراحی شده است. با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده دما و فشار دو سر مبدل، همچنین دبی به‌صورت زمانی و با استفاده از روابط انتقال حرارت، اثر رسوب‌گذاری بر ضریب کلی انتقال حرارت مبدل و همچنین میزان تغییرات افت فشار در مبدل به دست می‌آید. آزمون در سه مرحله انجام گرفت؛ مرحله اول که به عنوان مرحله شاهد در نظر گرفته شد، از مواد آنتی‌اسکالانت استفاده نگردید تا تأثیر رسوب ایجاد شده در صفحات مبدل، بر کاهش انتقال حرارت مبدل و افزایش افت فشار مشخص گردد. در مرحله دوم و سوم، به ترتیب از مواد آنتی‌اسکالانت در مدار گرمایشی و سرمایشی استفاده شد و نتایج با مرحله اول مقایسه گردید. آب مورد استفاده در هر سه مرحله یکسان بوده است. در مبدل در مسیر مدار گرمایشی، در حالی که از مواد آنتی‌اسکالانت استفاده نشده بود، مقاومت حرارتی رسوب با گذشت زمان ابتدا افزایش (حدود $0.0005 m^2.K/W$) و سپس ثابت شد. همچنین $LMTD$ مبدل (از حدود $20^{\circ}C$ تا $15^{\circ}C$) کاهش می‌یابد، بدین معنا که تبادل کمتر اتفاق می‌افتد. در مرحله دوم از مواد آنتی‌اسکالانت در مدار گرمایشی و در مرحله سوم از مواد آنتی‌اسکالانت در مدار سرمایشی استفاده شد. در هر دو مرحله مقاومت حرارتی رسوب با گذشت زمان پایین و ثابت (حدود $0.0005 m^2.K/W$) بود. همچنین $LMTD$ مبدل ثابت (حدود $17^{\circ}C$) باقی ماند.

۵- فهرست علائم

T_{hi}	دمای ورودی گرم به مبدل ($^{\circ}C$)
T_{ho}	دمای خروجی گرم از مبدل ($^{\circ}C$)
T_{ci}	دمای ورودی سرد به مبدل ($^{\circ}C$)
T_{co}	دمای خروجی سرد از مبدل ($^{\circ}C$)
P_{hi}	فشار ورودی مسیر گرم به مبدل ($mbar$)
ΔP_{hot}	اختلاف فشار ورودی و خروجی مبدل در مسیر گرم (%)
P_{ci}	فشار ورودی مسیر سرد به مبدل ($mbar$)