

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



جمهوری اسلامی ایران
وزارت راه و شهرسازی

بررسی تاثیر دستگاه رسوبزدای رادیویی ارائه شده توسط شرکت رادین گستر سینا در سیستم های تاسیساتی

دکتر آسیه عطاردی کاشانی

تیر ۱۴۰۲



چکیده

آب مهمترین چیزی است که ما در زندگی به آن نیاز داریم. از آب آشامیدنی گرفته تا حمام کردن، شستن لباس و ... ، آب در تمام مراحل زندگی ما با ما همراه است. با اینکه معمولاً قبل از اینکه آب به دست ما برسد مراحل زیادی از تصفیه را طی می کند، اما ممکن است وقتی به مخزن ذخیره و لوله ها می رسد، در شرایطی که می خواهیم نباشد.

این جایی است که Water softener/conditioner مطرح می شود. هدف آنها پرداختن به سه مسئله اصلی است که در اکثر منابع آب وجود دارد: رسوب آهک، باکتری ها و جلبک ها. این مشکلات می تواند باعث ایجاد مشکلات زیادی در سیستم های آب شود، از جمله در قسمت داخلی لوله ها، مبدل های حرارتی، تجهیزات و موارد دیگر. بطور مثال، رسوب در مدار آب مبدل حرارتی با عایق کردن سطح انتقال حرارت، باعث افزایش افت فشار و کاهش انتقال حرارت فشار می شود.

اگر هدف اصلی، جلوگیری از آسیب رساندن یا ایجاد مشکل در سیستم لوله کشی یا افزایش کارایی تجهیزات است، تلاش برای کشف بهترین گزینه برای تصفیه آب می تواند بسیار دشوار باشد. راه حل های بی شماری وجود دارد، و درک تفاوت های بین آنها و اینکه کدام راه حل برای خانه یا کسب و کار شما بهترین است، می تواند دشوار باشد.

در این طرح مقرر است تاثیر یک Electronic water conditioner با نام HydroFlow HS38 در میزان جلوگیری از رسوب و یا خوردگی در سیستم های گرمایشی و سرمایشی بررسی شود.

عنوان قرارداد: بررسی تاثیر دستگاه رسوب زدای رادیویی ارائه شده توسط شرکت رادین گستر سینا در سیستم های تاسیساتی

شماره و تاریخ قرارداد: ۰۰۰۸۸۹۴۷ ، ۱۴۰۰/۰۸/۲۴



فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: رسوبگذاری در تبادل کننده‌های حرارتی
۱	۱-۱ رسوب
۱	۱-۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱-۱ مکانیسم تشکیل رسوب
۳	۳-۱-۱ عوامل موثر بر رسوبگذاری
۴	۲-۱ مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای
۶	۱-۲-۱ رسوب در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای
۷	۲-۲-۱ روابط مربوط به مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای جریان مخالف
۷	۱-۲-۲-۱ بررسی اختلاف دما در مبدل
۸	۲-۲-۲-۱ بررسی نرخ انتقال حرارت مبدل
۹	۳-۲-۲-۱ بررسی مقاومت حرارتی رسوب در مبدل
۱۲	۴-۲-۲-۱ بررسی افت فشار مبدل ناشی از رسوب
۱۳	۳-۱ Electronic water conditioner
	فصل دوم: روند پروژه و نتایج تجربی و محاسباتی
۱۶	۱-۲ دستگاه آزمون
۱۷	۲-۲ نتایج پارامترهای اندازه‌گیری شده
۲۲	۳-۲ بررسی اختلاف دما در مبدل
۲۴	۴-۲ بررسی نرخ انتقال حرارت مبدل
۲۶	۵-۲ بررسی مقاومت حرارتی رسوب در مبدل
۲۹	۶-۲ بررسی افت فشار مبدل ناشی از رسوب



ج

۳۱ خلاصه و جمع بندی

۳۵ مراجع

فصل اول

رسوبگذاری در تبادلهای کننده‌های حرارت

۱-۱ رسوب

۱-۱-۱ مقدمه

رسوب لایه جامدی است که از طریق فرایند رسوبگذاری روی سطوح تجهیزات و سیستم‌های لوله‌کشی ایجاد می‌شود. برخی مواد حل شده در سیال، تحت شرایط خاص بر روی دیواره لوله‌ها یا وسایل انتقال حرارت رسوب می‌کنند. رسوبات ایجاد شده تحت شرایط مختلف خصوصیات مکانیکی مختلف دارند. لایه جامد ایجاد شده ممکن است موقتی یا دائمی باشد. اگر رسوب در مراحل بعدی فرایند از بین برود، موقتی و اگر برای مدت طولانی پایدار باشد یا به تدریج مقدار آن افزایش یابد، رسوب دائمی خواهد بود. [1]

یکی از معضلات اصلی ناشی از تشکیل رسوب و خوردگی، تشکیل رسوب در تجهیزات تبادل کننده حرارت می‌باشد. لایه رسوب تشکیل شده بر روی سطوح تبادل کننده حرارت، موجب افزایش مقاومت حرارتی و در نتیجه کاهش نرخ انتقال حرارت، همچنین افت فشار در مدار حرکت سیال می‌شود و در مجموع باعث کاهش کارایی تجهیزات، هزینه بیشتر در طراحی و تعمیر و نگهداری می‌شود.

معمولاً رسوب شامل ترکیبات کربنات کلسیم، سولفات کلسیم، نمک‌های منیزیم و سیلیس می‌باشد. در دمای بالاتر از 50°C ، بی کربنات کلسیم با آزاد کردن دی اکسید کربن، به کربنات کلسیم تبدیل می‌شود که رسوب می‌کند. در دمای بالاتر از 90°C ، یون‌های کربنات به یون‌های هیدروکسیل هیدرولیز می‌شوند که با یون‌های منیزیم ترکیب می‌شوند 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.

کریستال‌های کربنات کلسیم در سه شکل آراگونیت، کلسیت و واتریت وجود دارد. هر سه نوع این نمک‌ها حلالیت معکوس دارند و حلالیت آنها با افزایش دما کاهش می‌یابد. [2]

۱-۱-۲ مکانیسم تشکیل رسوب

تشکیل رسوب به تجمع و رشد ناخواسته ذرات نامحلول در آب بر روی سطح گفته می‌شود که تاثیر منفی قابل توجهی بر روی کارایی تاسیسات مربوط دارد. بطور مثال، تشکیل رسوب در مبدل حرارتی اجتناب‌ناپذیر است. مبدل حرارتی صفحه‌ای به دلیل مجاری باریک عبور سیال دارای حساسیت بالاتری به نسبت مبدل پوسته و لوله است. همچنین به دلیل ضخامت کم مبدل صفحه‌ای، اسید شویی و از بین بردن رسوب‌ها هم در مبدل صفحه‌ای دارای حساسیت بالاتری است.

فرایند رسوبگذاری روی سطوح وابسته به زمان است و طی پنج مرحله اتفاق می‌افتد: [1,3]

- شروع رسوب: در این مرحله هسته‌ها برای تشکیل رسوب شکل می‌گیرند. این دوره به چندین عامل از جمله دما، جنس، زبری، پوشش سطح و همچنین محلول در تماس (غلظت، سرعت جریان، ...) بستگی دارد و می‌تواند به بلندی چند هفته یا کوتاهی چند دقیقه باشد. مدت زمان این فرایند با افزایش غلظت محلول، افزایش زبری سطح یا افزایش دمای سطح، کاهش می‌یابد. دمای بالا انرژی لازم برای غلبه بر انرژی فعال‌سازی واکنش رسوبگذاری و همچنین افزایش سرعت انتقال اجزای رسوب از محلول به سطح را فراهم می‌کند.



- **انتقال املاح به سطح:** در این مرحله املاح معلق در آب به سطح منتقل می‌شوند. این مرحله به ویژگی‌های فیزیکی سیستم و اختلاف غلظت بین محلول و سیال اطراف سطح دارد. انتقال رسوب توسط نفوذ، ته‌نشینی و مهاجرت گرمایی انجام می‌شود.

- **اتصال به سطح:** در این مرحله رسوبات به یکدیگر و سطح می‌چسبند. یون‌های نمکی که به سطح نزدیک می‌شوند جذب آن شده و به سطح می‌چسبند و به تدریج با گذشت زمان رشد می‌کنند تا یک لایه رسوب تشکیل دهند. جنس و شرایط سطح، ویژگی مواد از جمله اندازه و تراکم، در میزان چسبندگی رسوب مهم است.

- **حذف از سطح:** بین حذف و رسوبگذاری رقابت وجود دارد. رسوب می‌تواند با مکانیزم‌های مختلف از سطح حذف شود، مانند انحلال و سایش. سرعت سیال و زبری سطح همچنین می‌توانند نقش مهمی در مکانیزم حذف بازی کنند. اگر PH سیال تغییر کند، ممکن است حل شدن مواد جامد رخ دهد. سایش می‌تواند توسط برخورد ذرات یا مایع به لایه رسوب رخ دهد.

- **پیر شدن رسوب:** 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 کند. پیر شدن رسوب ممکن است رسوب را تقویت یا تضعیف نماید.

۱-۱-۳ عوامل موثر بر رسوبگذاری

عوامل مهم موثر بر رسوبگذاری شامل غلظت، سرعت جریان، دمای سطح و ... می‌باشند. بدین صورت که رسوبگذاری با زمان بصورت مجانبی افزایش، با افزایش غلظت محلول و دما افزایش و با افزایش سرعت سیال کاهش می‌یابد. [4]

- **دمای سطح:** معمولاً با افزایش دمای انتقال حرارت سطح، مقاومت رسوب کریستالی توسط حلالیت معکوس افزایش می‌یابد.



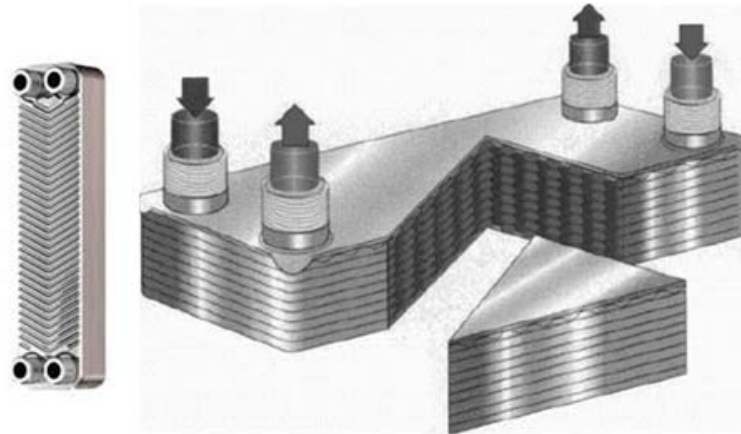
- کیفیت آب: کیفیت آب و وجود یون‌های رسوبگذار نقش مهمی در تمایل به رسوبگذاری دارد.
- تنش برشی: مقاومت رسوب با افزایش تنش برشی کاهش می‌یابد. بر اساس یک نظریه، تنش برشی اعمال شده در مجاورت زیر لایه برای حذف لایه‌های بالای رسوب کافی است. در نظریه دیگر، فوران ناگهانی سیال به دیواره باعث حذف رسوب می‌شود. افزایش سرعت به معنای افزایش تنش برشی و حذف رسوب است.
- سرعت سیال: با کاهش سرعت سیال، رسوب افزایش می‌یابد.
- جنس و زبری سطح: سطوح زبر و خشن، نرخ رسوب را افزایش می‌دهد.

۱-۲ مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

مبدل حرارتی صفحه‌ای توسط دکتر ریچارد سیلیگمن در سال ۱۹۲۳ اختراع و از این طریق انقلاب عظیمی در سیستم‌های انتقال حرارت غیر مستقیم در گرمایش و خنک سازی سیالات ایجاد شد و سپس و در سال ۱۹۵۰ توسط شرکت آلفالاوال توسعه یافت. مبدل حرارتی صفحه‌ای شامل یک دسته از صفحات تبادل گرما مهر و موم شده هستند که یا به هم چسبیده‌اند و یا در یک قاب با واشر به هم پیچ خورده‌اند.

انتقال حرارت بین مایعات در یک سطح وسیع و با راندمان بالا، مهم‌ترین مزیت عملکردی مبدل حرارتی صفحه‌ای است و بنابراین امروزه استفاده از آنها گسترش زیادی در صنعت گرمایش و تهویه مطبوع یافته است.

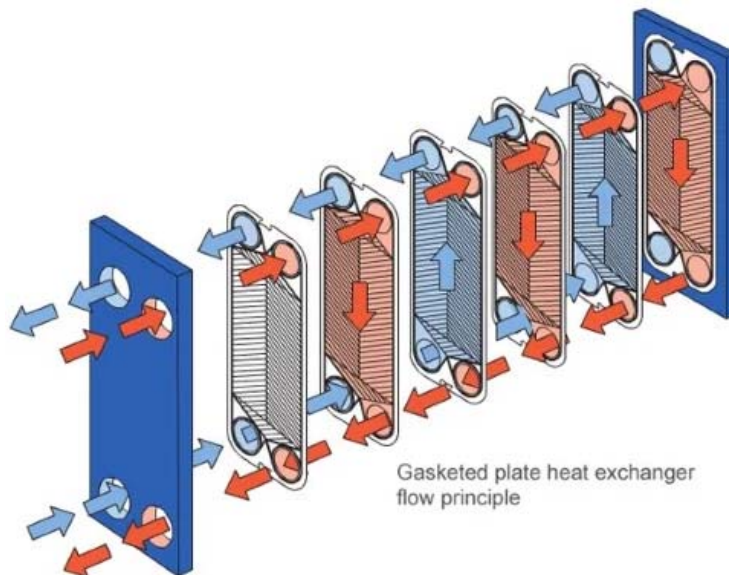
شکل ۱-۱، نمایی از مبدل حرارتی صفحه‌ای و جهت جریان در آن را نشان می‌دهد. این نوع مبدل از یکسری صفحات موجدار کنار هم تشکیل شده، بگونه‌ای که در هر لایه بصورت متفاوت و یکی در میان، سیال گرم و سرد مابین صفحات گذر می‌کنند. [5]



شکل ۱-۱ نمایی از یک نوع مبدل حرارتی صفحه‌ای

اصول کار یک مبدل حرارتی صفحه‌ای شرکت آلفالاول در شکل ۱-۲ نشان داده شده است در آن سیالات بصورت جریان مخالف از مبدل حرارتی عبور می‌کنند. مایع داغ که با رنگ قرمز نشان داده شده است، معمولاً از طریق یکی از اتصالات بالایی وارد می‌شود و از طریق اتصال زیرین خارج می‌شود. مایع سرد که به رنگ آبی نشان داده شده است از یکی از اتصالات پایینی وارد شده و از طریق اتصال بالا خارج می‌شود.

با عبور سیالات از مبدل حرارتی، گرما از محیط داغ به محیط سرد منتقل می‌شود. جریان مخالف حداکثر امکان بازیابی گرما را امکان پذیر می‌کند. تلاقی دما نیز امکان‌پذیر است، به این معنی که خروجی گرم می‌تواند به دمای کمتری نسبت به خروجی سرد برسد.



شکل ۱-۲-۱ نمایی از اصول کار یک مبدل حرارتی صفحه‌ای

۱-۲-۱ رسوب در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

تشکیل رسوب بر روی سطوح تبادل حرارت باعث افزایش مقاومت در مقابل جریان حرارت از سیال گرم به سیال سرد و در نتیجه کاهش راندمان مبدل حرارتی می‌گردد. جهت انتقال حرارت در حد مطلوب، باید اختلاف دما بین دو سیال گرم و سرد در حد زیادی بالا باشد و این در حالی است که اختلاف دما در دو سمت سطح فلز بسیار ناچیز می‌باشد. با توجه به هدایت حرارتی پایین این رسوبات، مقاومت حرارتی آنها زیاد می‌شود و با کاهش عملکرد مبدل حرارتی، بسته به مقدار نشست رسوب، تمیز کردن دوره‌ای آن ضرورت می‌یابد.

برخی از عوامل که پدیده تشکیل رسوب در مبدل را می‌تواند کاهش دهد، توربولانس بودن جریان، وجود صفحات بسیار صاف و بدون زبری، عدم وجود مناطقی در مسیر عبور سیال که حرکت سیال را کند نماید می‌باشند. [6]

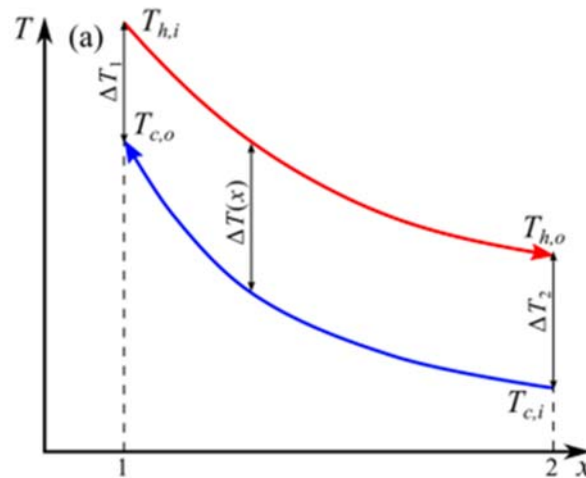


همچنین اگر صفحات مبدل از جنس مقاوم در برابر خوردگی باشند، میزان تمایل به تشکیل رسوب، به دلیل عدم ته نشینی محصولات خوردگی (که می‌تواند به تجمع رسوب کمک نماید) کاهش می‌یابد.

۲-۲-۱ روابط مربوط به مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای جریان مخالف [5]

۱-۲-۲-۱ بررسی اختلاف دما در مبدل

در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای جریان مخالف، جریان‌های سرد و گرم بصورت مخالف از آن عبور می‌کنند. بنابراین آب گرم با عبور از مبدل، مقداری از انرژی حرارتی خود را صرف گرم کردن سیال سرد و مقداری از آن در محیط اتلاف می‌شود. شکل ۱-۳ تغییر دمای دو مدار گرم و سرد مبدل را بطور شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳ تغییر دمای دو مدار گرم و سرد مبدل بصورت شماتیک

بصورت نرمال هرچه اختلاف دمای ورودی و خروجی گرم مبدل، و اختلاف دمای ورودی و خروجی سرد مبدل بیشتر باشد، بدین معناست که تبادل حرارتی بیشتری در



مبدل اتفاق افتاده و اتلاف کمتر بوده است. بنابراین با تشکیل رسوب در مبدل و در نتیجه مقاومت حرارتی که رسوب ایجاد می‌کند، باعث می‌شود تبادل حرارتی و در نتیجه اختلاف دمای ورودی و خروجی مبدل کمتر شود.

از آنجا که تغییر دمایی که در سراسر مبدل حرارتی از ورودی تا خروجی رخ می‌دهد خطی نیست، اغلب از اختلاف دمای میانگین لگاریتمی ($LMTD$) برای تعیین نیروی محرکه دما برای انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی استفاده می‌شود. $LMTD$ که یک میانگین لگاریتمی از اختلاف دمای سرد و گرم در هر انتهای مبدل حرارتی است با رابطه زیر به دست می‌آید. برای یک مبدل حرارتی معین با مساحت و ضریب انتقال حرارت ثابت، هرچه $LMTD$ بزرگتر باشد، گرمای بیشتری منتقل می‌شود.

$$LMTD = \frac{(T_{h_i} - T_{c_0}) - (T_{h_0} - T_{c_i})}{\ln\left(\frac{T_{h_i} - T_{c_0}}{T_{h_0} - T_{c_i}}\right)}$$

در این رابطه؛

T_{h_i} : دمای ورودی سیال گرم به مبدل، و T_{h_0} : دمای خروجی سیال گرم از مبدل

T_{c_i} : دمای ورودی سیال سرد به مبدل، و T_{c_0} : دمای خروجی سیال سرد از مبدل

۱-۲-۲-۲ بررسی نرخ انتقال حرارت مبدل

با توجه به مشخص بودن دماهای ورودی و خروجی و دبی‌های هر دو مدار سرد و گرم، می‌توان میزان حرارت تبادل شده در مبدل را از روابط زیر بدست آورد.

$$Q_h = \dot{m}_h C_h (T_{h_i} - T_{h_0})$$

$$Q_c = \dot{m}_c C_c (T_{c_0} - T_{c_i})$$

در این روابط؛



Q_c و Q_h : به ترتیب نرخ انتقال حرارت از سیال گرم و به سیال سرد در مبدل بر حسب W
 \dot{m}_c و \dot{m}_h : به ترتیب دبی آب در مدار گرم و سرد در مبدل بر حسب g/s
 C_c و C_h : به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه آب در مدار گرم و سرد بر حسب $j/g.K$
 T_{c_o} ، T_{c_i} ، T_{h_o} ، T_{h_i} : دماهای ورودی و خروجی مبدل می باشند.

با توجه به آنکه مقداری از Q_h بصورت افت انرژی (Q_{Loss}) در محیط از دست می‌رود ($Q_h = Q_c + Q_{Loss}$) و بقیه آن صرف گرم کردن آب سرد می شود، مقداری بنابراین نرخ انتقال حرارت مبدل برابر با Q_c در نظر گرفته می شود.

۱-۲-۳ بررسی مقاومت حرارتی رسوب در مبدل

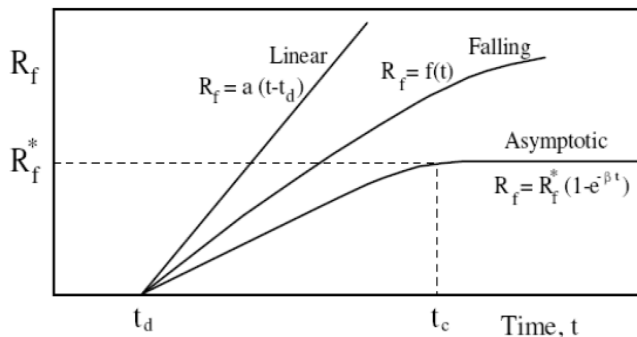
فرآیند تشکیل رسوب با مقاومت حرارتی رسوب (R_f) نشان داده می شود که از کاهش ظرفیت کارایی مبدل حرارتی اندازه‌گیری می‌شود. در یک مبدل حرارتی از نوع صفحه‌ای، میزان مقاومت حرارتی کلی برابر با مجموع مقاومت‌های حرارتی زیر است:

(۱) مقاومت‌های حرارتی از نوع جابجایی حرکت سیال گرم و سرد که وابسته به لایه مرزی این دو سیال است.

(۲) مقاومت حرارتی دیواره صفحات مبدل

(۳) مقاومت حرارتی ناشی از تشکیل رسوب در دو طرف هر صفحه مبدل (طرف جریان سیال سرد و سیال گرم)

شکل ۱-۴ مهمترین منحنی‌های R_f را بر حسب زمان نشان می‌دهد. زمان تاخیر (t_d) یک زمان اولیه را نشان می‌دهد که در آن هنوز رسوب تشکیل نشده است. [7]



شکل ۱-۴ مهمترین منحنی‌های R_f را بر حسب زمان

منحنی‌های نشان داده شده در شکل ۱-۴ بصورت زیر تعریف می‌شوند.

- **منحنی رسوبگذاری خطی:** در این حالت، جرم نرخ رسوب گذاری (m_d)، بصورت خطی با زمان افزایش می‌یابد و در آن یا حذف رسوب (m_r) وجود ندارد یا $m_d - m_r$ ثابت است.

- **منحنی رسوبگذاری مجانبی^۱:** در این حالت میزان رسوب به تدریج در طول زمان افزایش می‌یابد تا به یک حالت پایدار برسد (R_f^*). در عمل، بسته به شرایط ممکن است مجانب در چند ساعت، هفته یا ماه به دست آید.

- **منحنی رسوبگذاری ریزشی^۲:** در این حالت جرم رسوب با گذشت زمان به و بدون رسیدن به حالت ثابت از مقدار مجانبی بصورت غیر خطی افزایش می‌یابد.

مبدلی که در آن هیچ رسوبی تشکیل نشده است، بیشترین نرخ تبادل حرارتی خود را دارد. زمانی که رسوب در مبدل تشکیل می‌شود، به دلیل مقاومت حرارتی که ایجاد می‌کند، باعث کاهش انتقال حرارت مبدل می‌شود. میزان مقاومت حرارتی رسوب به میزان

^۱ The asymptotic fouling curve

^۲ The falling rate fouling curve



و نوع رسوب بستگی دارد و با گذشت زمان، بواسطه افزایش ضخامت رسوب، افزایش می‌یابد. میزان مقاومت حرارتی رسوب بصورت زمانی مطابق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c}$$

در این رابطه؛

R_f : مقاومت حرارتی رسوب در هر زمان از تشکیل رسوب می‌باشد.

U_f : ضریب کلی انتقال حرارت مبدل در حالتی که رسوب تشکیل شده

U_c : ضریب کلی انتقال حرارت مبدل در حالت بدون رسوب

ضریب کلی انتقال حرارت مبدل در هر زمان مطابق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$U_c = \frac{Q_c}{A \times C_{FT} \times LMTD}$$

$$U_f = \frac{Q_c}{A \times C_{FT} \times LMTD}$$

در این رابطه؛

U_c و U_f : به ترتیب ضریب کلی انتقال حرارت مبدل در حالت بدون رسوب و در

حالتیکه در آن رسوب تشکیل شده، بر حسب $W/m^2 \cdot K$

Q_c : نرخ انتقال حرارت مبدل بر حسب W

A : سطح کلی انتقال حرارت مبدل که با توجه به تعداد صفحات و سطح هر صفحه

مبدل، قابل دستیابی است بر حسب m^2

$LMTD$: اختلاف دمای متوسط لگاریتمی

C_{FT} : ضریب تصحیح برای $LMTD$ می‌باشد که برای مبدل‌های صفحه ای جریان مخالف،

بیشترین مقدار خود یعنی حدود یک فرض می‌شوند.

از طریق روابط ذکر شده، می‌توان میزان مقاومت حرارتی رسوب (R_f) در هر زمان از

تفاضل $\frac{1}{U_f}$ در آن زمان و $\frac{1}{U_c}$ زمان شروع به کار سیستم (با فرض آنکه در آن زمان هنوز



رسوبی در سیستم تشکیل نشده است) بدست می‌آید. بنابراین، نرخ رسوبگذاری و افزایش ضخامت لایه رسوب روی سطوح تبادل‌کننده حرارت را می‌توان بصورت تابعی از زمان نشان داد.

۱-۲-۲-۴ بررسی افت فشار مبدل ناشی از رسوب

بطور کلی عبور سیال از مبدل، بخاطر برخورد با صفحات مبدل با افت فشار همراه می‌باشد. با گذشت زمان و تشکیل رسوب و تنگ شدن مجراهای عبور آب، افت فشار آب بیشتر می‌شود. افت فشار در مبدل‌های صفحه‌ای بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta P = 2f\rho \frac{L}{D_e} V^2$$

در این رابطه:

f : ضریب اصطکاک که برای جریان‌های توربولانس از رابطه $\frac{25}{Re^{0.3}}$ بدست می‌آید.

ρ : چگالی سیال

L : طول مسیر که سیال طی می‌کند بر حسب m

D_e : قطر هیدرولیکی کانال جریان بر حسب m

V : سرعت سیال بر حسب m/s می‌باشد.

۱-۳ Electronic water conditioner

رسوب آهک عمدتاً از رسوبات کربنات کلسیم تشکیل شده است. در مناطقی با سختی بالای آب، وقتی که آب به سرعت گرم می‌شود، به عنوان مثال در سیستم‌های گرمایش خانگی، مواد معدنی موجود در آب حل نمی‌شوند. در نتیجه به سطوح مجاور مانند صفحات مبدل حرارتی و داخل لوله می‌چسبند.



با توجه به آنکه تنها 0.8mm رسوب آهک می‌تواند راندمان گرمایش را تا 10% درصد کاهش دهد، رسوب آهک می‌تواند یک مشکل بزرگ در مناطق با آب سخت باشد و باعث انسداد، کاهش راندمان حرارتی و در طولانی مدت نیاز به تعویض تجهیزات شود. [8]

برای تصفیه آب سخت، هم از Water conditionerها و هم از Water softenerها استفاده می‌شود، اما یک تفاوت اساسی بین آنها وجود دارد. Water conditioner مواد معدنی موجود در آب را خنثی می‌کنند، بنابراین به لوله‌ها نمی‌چسبند و ایجاد رسوب نمی‌کنند، اما بطور کامل مواد معدنی را از آب خارج نمی‌کنند.

Water softenerها مواد معدنی ناخواسته در آب را از بین می‌برند و به طور کامل از شر آب سخت خلاص می‌شوند. بطور مثال در تکنولوژی ion exchange، یون‌های سدیم و پتاسیم را جایگزین یون‌های کلسیم و منیزیم می‌کنند.

Water conditionerها از تکنولوژی‌های مختلف برای خنثی کردن آب سخت استفاده می‌کنند. Electric water conditioners از انرژی الکتریکی برای برای تعلیق یا اعوجاج مواد معدنی سخت استفاده می‌کنند. [9]

دستگاه HydroFLOW hs38 یک Electronic water conditioner است که برای اولین بار در بریتانیا در سال ۱۹۹۲ توسعه یافت می‌تواند برای کاربردهای مسکونی و تجاری مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۱-۵).



شکل ۱-۵ تصویر دستگاه HydroFLOW hs38 نصب شده اطراف لوله

این دستگاه در اطراف لوله قرار می‌گیرد و با انتقال سیگنال الکترونیکی به آب موجود در لوله و گسترش آن به کل سیستم لوله‌کشی، باعث می‌شود رسوبات آهکی موجود در آب به صورت خوشه‌های سست درآیند. هنگامیکه آب گرم می‌شود، خوشه‌های آهک بلورهایی تشکیل می‌دهند که با جریان آب شسته می‌شوند و بنابراین دیگر به داخل لوله‌ها و سایر سطوح نمی‌چسبند. با گذشت زمان، رسوب آهک موجود نیز فرسایش می‌یابد و توسط آب شسته می‌شود.

دستگاه HydroFLOW hs38 مبتنی بر فرآوری فیزیکی آب با امواج رادیویی گسترده امواج رادیویی (باند AM) در کل مدار لوله‌کشی می‌باشد و به هیچ عنوان ساختار مغناطیسی و الکترومغناطیسی ندارد و تکنولوژی آن تحت پتنت Hydropath انگلستان می‌باشد. دستگاه HS-38 در انتهای سال ۲۰۲۳ توقف تولید شده و دستگاه Pearl Plus به همان ساختار تکنولوژیک جایگزین آن می‌باشد.



با توجه به آنکه نصب HydroFLOW نیازی به چیدمان مجدد یا برش لوله‌کشی ندارد و همچنین شامل استفاده از هیچگونه مواد شیمیایی نیست، آسان و سازگار با محیط زیست است. [8]

فصل دوم

روند پروژه و نتایج تجربی و محاسباتی

۱-۲ دستگاه آزمون

در این پروژه تاثیر یک نمونه Electronic water conditioner با نام و مدل HydroFlow HS38 در میزان جلوگیری از رسوب و یا خوردگی در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی بررسی شده است.

همانطور که در قسمت ۱-۳ گفته شد، این دستگاه با تشکیل میدان الکتریکی در طول مسیر لوله (فلزی) و جریان سیال در بالادست و پایین دست جریان، باعث می‌شود تا یون‌های معدنی بگونه‌ای سازمان‌دهی شوند که به فرم کریستال‌های معلق درون آب درآیند بطوریکه تمایلی به رسوب یا چسبیدن به سطح ندارند.

دستگاه آزمون طراحی و نصب شده بصورت شماتیک در شکل ۱-۲ و واقعی در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. این دستگاه آزمون شامل ۳ مبدل حرارتی صفحه‌ای جریان مخالف است که مبدل اصلی (مبدل ۲ در شکل) مسئول تبادل حرارت بین دو مدار گرم و سرم می‌باشد. مدار گرم توسط یک آبگرمکن و از طریق مبدل فرعی (مبدل ۱ در شکل) گرم و مدار سرد توسط یک چیلر و از طریق مبدل فرعی (مبدل ۳ در شکل) سرد می‌شود.

بررسی تاثیر Electronic water conditioner توسط اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی دما، اختلاف فشار و دبی دو سر مبدل حرارتی صفحه‌ای اصلی و همچنین محاسباتی نرخ انتقال حرارت و مقاومت حرارتی رسوب و اتلاف نرخ حرارتی رسوب انجام شده است.

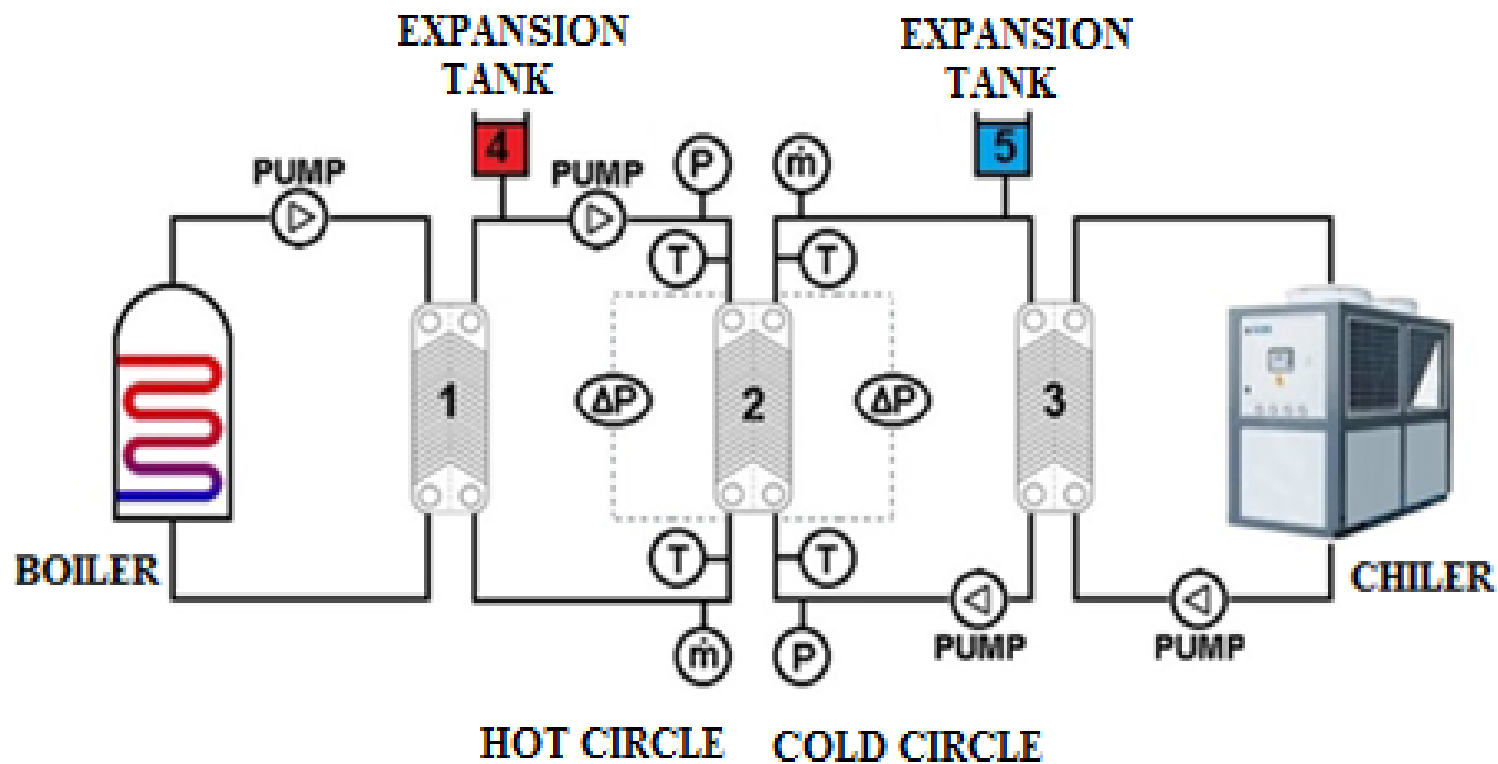


مبدل حرارتی صفحه‌ای مورد استفاده از شرکت آلفالاول و شامل ۱۲ صفحه و سطح مقطع 12600mm^2 بوده است.

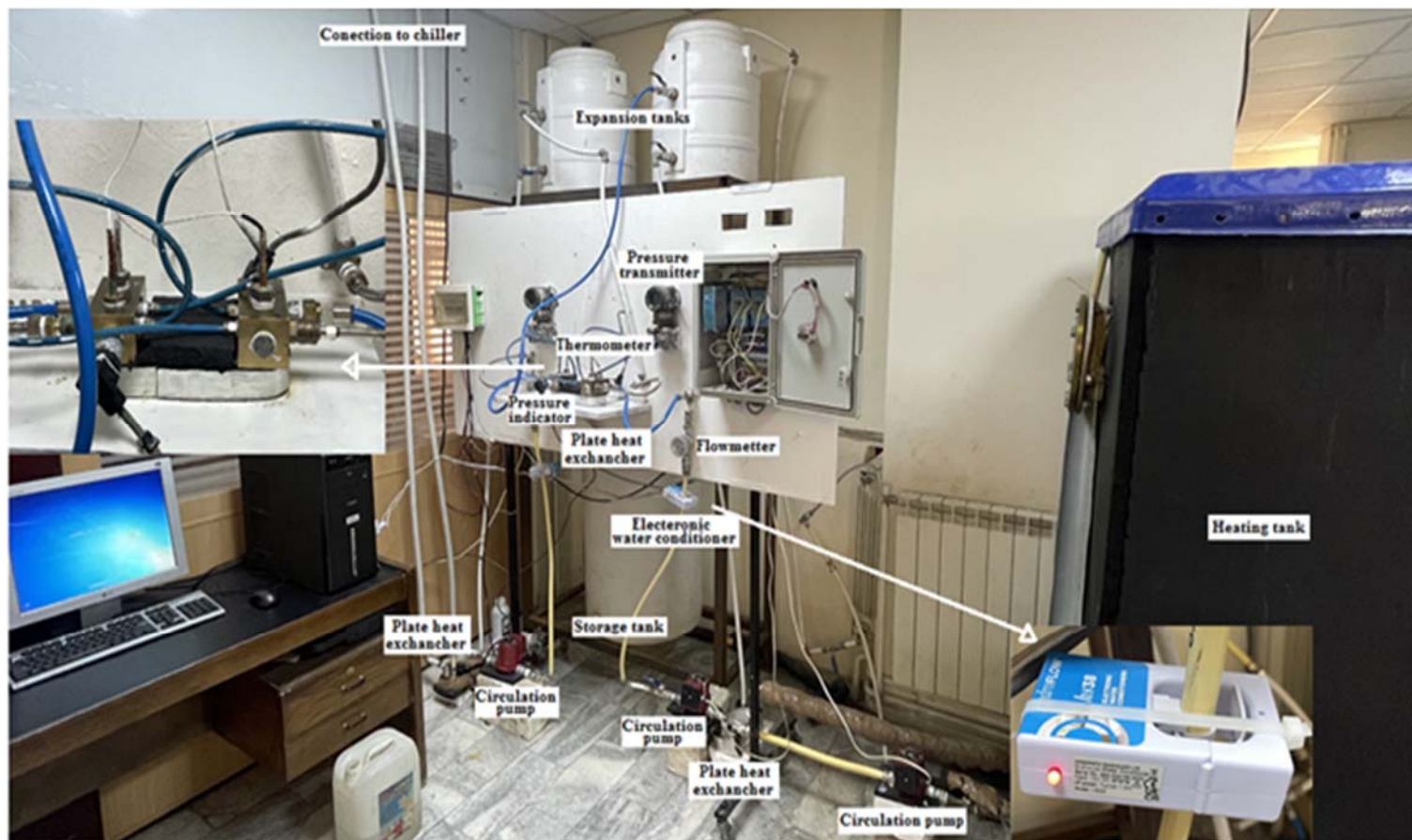
جهت پایش پارامترهای دما، فشار و دبی در این مبدل از ۴ عدد ترمومتر در ورودی و خروجی‌های مدار گرم (سرد شونده) و سرد (گرم شونده) مبدل، ۲ عدد فشارسنج در ورودی‌های گرم و سرد مبدل و ۲ عدد ترنس‌میتور فشار در دو سر گرم و سرد مبدل قرارداد شده. همچنین ۲ عدد دبی‌سنج در خروجی‌های گرم و سرد مبدل جهت مشخص نمودن دبی در دو مدار گذاشته شد.

۲-۲ نتایج پارامترهای اندازه‌گیری شده

پروژه در دو مرحله، با استفاده از Electronic water conditioner و بدون استفاده از آن هر کدام به مدت ۶۰ روز انجام شد و آب ورودی در دو مدار، دارای $TDS = 1185\text{ppm}$ و $pH = 8.9$ و سختی 561ppm بوده است. در هر دو مرحله، پارامترهای دمای ورودی به مبدل و خروجی از مبدل، فشار ورودی به مبدل، اختلاف فشار دو سر مبدل و دبی در هر دو مدار گرم و سرد طی ۶۰ روز اندازه‌گیری شدند. نتایج اندازه‌گیری برای زمانیکه از Electronic water conditioner در هر دو مدار گرم و سرد استفاده شده است مطابق جدول ۱-۲ و برای زمانیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است مطابق جدول ۲-۲ می‌باشد. در هر روز بیش از یک اندازه‌گیری انجام شده است که نتایج آنها بر روی نمودارها که جلوتر به آنها می‌رسیم آورده شده، اما در جدول‌های ۱-۲ و ۲-۲ تنها یکی از اندازه‌گیری‌ها در روز ذکر شده است.



شکل ۱-۲: طرحواره دستگاه آزمون



شکل ۲-۲: عکس های دستگاه آزمون؛ جهت دوری از شلوغ شدن تصویر، نوشتن اسامی تجهیزات اندازه گیری و conditioner تکرار نشده است

جدول ۱-۲ پارامترهای اندازه‌گیری و محاسبه شده آب در دو سر مبدل در مدارهای گرمایش و سرمایش بصورت زمانی و در حالتی که از water conditionere استفاده شده است

روز	$T_{in,H}$ (°C)	$T_{out,H}$ (°C)	$T_{in,C}$ (°C)	$T_{out,C}$ (°C)	$P_{in,H}$ (mbar)	ΔP_H (%)	$P_{in,C}$ (mbar)	ΔP_C (%)	\dot{m}_H (li/s)	\dot{m}_C (li/s)	LMTD (°C)	Q_H (kW)	Q_C (kW)	R_f ($m^2 \cdot K/W$)	$D(Q_c)$ (%)
1	71.8	49	18.6	60.80	0.06	2.6	0.04	0.5	0.0821	0.0352	19.0842	7.8309	6.2132	0	0
2	72.9	53	20.4	61.40	0.05	2.6	0.04	0.5	0.0823	0.0344	20.2502	6.8511	5.9006	0.0045	5.0314
3	72.6	52.6	19.7	60.70	0.06	2.6	0.04	0.5	0.0815	0.0343	20.6503	6.8254	5.8817	0.0055	5.3345
4	74.4	53.8	19.6	62.20	0.05	2.6	0.04	0.5	0.0816	0.0346	21.3429	7.0315	6.1743	0.0049	0.6253
8	68.8	50.9	20.1	58.30	0.06	2.7	0.04	0.5	0.0830	0.0348	18.8637	6.2199	5.5698	0.0040	10.3550
9	70.2	51.7	18.3	58.90	0.06	2.8	0.04	0.5	0.0839	0.0344	20.3921	6.4929	5.8541	0.0052	5.7794
10	70.1	52.4	19.1	59.60	0.06	2.7	0.04	0.7	0.0831	0.0340	19.7542	6.1560	5.7619	0.0045	7.2640
11	69.2	51.9	19.1	58.60	0.06	2.8	0.04	0.6	0.0833	0.0328	19.6534	6.0302	5.4275	0.0069	12.6453
12	70	52.3	18	59.40	0.06	2.7	0.04	0.6	0.0820	0.0319	20.1824	6.0725	5.5217	0.0074	11.1295
15	71.8	53.9	18.5	61.30	0.06	2.7	0.04	0.7	0.0814	0.0299	20.4882	6.0950	5.3497	0.0096	13.8977
16	72.6	54.1	17.9	61.70	0.06	2.7	0.04	0.7	0.0810	0.0299	21.0781	6.2748	5.4906	0.0097	11.6298
17	71.1	53.3	17.7	60.40	0.06	2.7	0.04	0.6	0.0807	0.0299	20.7137	6.0101	5.3509	0.0101	13.8785
18	71.8	53.7	16.6	60.90	0.06	2.6	0.04	0.6	0.0802	0.0292	21.3903	6.0776	5.4104	0.0111	12.9214
19	71.4	53.9	18.4	60.60	0.06	2.7	0.04	0.6	0.0812	0.0300	20.7565	5.9452	5.3018	0.0106	14.6689
22	70.7	53.9	18.8	59.40	0.06	2.8	0.04	0.7	0.0802	0.0288	20.9988	5.6366	4.8920	0.0154	21.2642
23	70.6	53.9	18	59.1	0.06	2.8	0.04	0.7	0.0803	0.0288	21.4338	5.6132	4.9607	0.0157	20.1588
24	69.6	53.3	17.4	58.1	0.06	2.9	0.04	0.6	0.0817	0.0289	21.4338	5.5744	4.9215	0.0162	20.7891
25	71	54.3	16.8	59.1	0.06	2.9	0.04	0.7	0.0822	0.0285	22.3035	5.7433	5.0426	0.0170	18.8403
26	70.5	54.9	17.7	59.6	0.06	2.9	0.04	0.7	0.0818	0.0276	21.4249	5.3375	4.8490	0.0170	21.9564
29	69.8	55	18.2	58.8	0.06	2.9	0.04	0.7	0.0810	0.0270	21.3646	5.0151	4.5895	0.0200	26.1329
30	69.9	55.1	18.2	58.3	0.06	2.8	0.04	0.6	0.0827	0.0277	21.8630	5.1234	4.6557	0.0205	25.0675
31	72.7	57.1	18.2	59.9	0.06	3	0.04	0.7	0.0827	0.0275	23.4807	5.4009	4.7977	0.0230	22.7827
32	72.6	58.1	20.3	60	0.06	3	0.04	0.7	0.0826	0.0272	22.9380	5.0116	4.5276	0.0251	27.1289
33	72.5	57.7	18	59.3	0.06	3	0.04	0.7	0.0821	0.0269	24.0661	5.0859	4.6575	0.0264	25.0391
36	72.1	57.9	18.3	59.2	0.06	2.9	0.04	0.6	0.0815	0.0276	23.8052	4.8427	4.7201	0.0248	24.0309
37	72	57.8	18.5	59	0.06	2.9	0.04	0.6	0.0821	0.0249	23.7735	4.8817	4.2196	0.0241	28.2300
38	71.9	56.8	18.3	58.3	0.06	2.9	0.04	0.7	0.0853	0.0278	23.9288	5.3890	4.6507	0.0261	25.1478
39	71.7	57.4	21	58.4	0.05	2.9	0.04	0.8	0.0843	0.0272	22.9439	5.0444	4.2589	0.0292	31.4544
42	72.1	58.2	21	59.6	0.05	2.9	0.04	0.7	0.0840	0.0259	22.6485	4.8889	4.1827	0.0295	32.6796
44	72.1	58.2	18.3	59.6	0.05	2.9	0.04	0.6	0.0895	0.0257	23.6075	5.2091	4.4417	0.0283	28.5116
45	72.4	58.8	18.3	60.3	0.05	2.8	0.04	0.6	0.0905	0.0250	23.5081	5.1518	4.3901	0.0288	29.3427
48	72.4	58.5	18.3	59.7	0.05	2.8	0.04	0.7	0.0905	0.0250	23.8660	5.2655	4.3273	0.0308	30.3521
50	71.8	58.2	19.9	58.8	0.05	2.9	0.04	0.7	0.0934	0.0254	23.4151	5.3167	4.1281	0.0328	33.5592
52	72.1	57.9	18	58.2	0.05	2.9	0.04	0.8	0.0934	0.0254	24.6565	5.5513	4.2660	0.0341	31.3388
54	72	58.1	18.3	58.6	0.05	2.9	0.04	0.7	0.0934	0.0254	24.2511	5.4340	4.2767	0.0327	31.1680
56	72.2	58.3	18.3	57.8	0.05	2.9	0.04	0.8	0.0934	0.0254	25.0575	5.4340	4.1918	0.0366	32.5344
57	72.4	58.7	18.6	58.2	0.05	2.8	0.04	0.8	0.0934	0.0254	24.9486	5.3558	4.2024	0.0361	32.3636
59	72.6	59.5	19.9	59	0.05	2.9	0.04	0.8	0.0934	0.0254	24.3273	5.1212	4.1493	0.0352	33.2176
60	72.9	59.6	19.7	59.1	0.05	2.8	0.04	0.8	0.0934	0.0254	24.5830	5.1994	4.1811	0.0354	32.7052

جدول ۲-۲ پارامترهای اندازه‌گیری و محاسبه شده آب در دو سر مبدل در مدارهای گرمایش و سرمایش بصورت زمانی و در حالتی که از water conditioner استفاده نشده است

روز	$T_{in,H}$ (°C)	$T_{out,H}$ (°C)	$T_{in,C}$ (°C)	$T_{out,C}$ (°C)	$P_{in,H}$ (mbar)	ΔP_H (%)	$P_{in,C}$ (mbar)	ΔP_C (%)	\dot{m}_H (li/s)	\dot{m}_C (li/s)	LMTD (°C)	Q_H (kW)	Q_C (kW)	R_f ($m^2 \cdot K/kW$)	$D(Q_c)$ (%)
1	71.4	50.3	18.4	60.20	0.20	2.7	0.17	0.6	0.0749	0.0347	19.7766	6.6108	6.0740	0	0
2	70.9	51.5	21.0	60.20	0.20	2.6	0.17	0.5	0.0774	0.0347	18.9025	6.2814	5.6887	0.0008	6.3429
3	71.6	51.9	19.8	60.30	0.20	2.6	0.16	0.5	0.0779	0.0345	19.9224	6.4265	5.8568	0.0018	3.5752
4	71.2	52.6	21.7	59.70	0.20	2.7	0.17	0.6	0.0778	0.0349	19.6275	6.0556	5.5480	0.0036	8.6599
5	70.6	51.2	22.0	58.20	0.20	2.7	0.17	0.6	0.0779	0.0352	19.6153	6.3252	5.3364	0.0053	12.1434
8	71.7	52.9	21.5	58.50	0.20	2.8	0.17	0.7	0.0766	0.0337	21.0018	6.0300	5.2199	0.0097	14.0619
9	72.2	54.3	23.9	60.00	0.20	2.8	0.17	0.7	0.0736	0.0332	19.9341	5.5141	5.0156	0.0091	17.4253
10	72.0	54.4	23.9	59.10	0.21	2.7	0.17	0.7	0.0759	0.0340	20.4532	5.5891	5.0056	0.0105	17.5895
14	71.5	55.3	25.6	58.20	0.21	2.8	0.17	0.7	0.0754	0.0337	20.4137	5.1135	4.5944	0.0150	24.3592
15	72.4	55.9	24.6	58.90	0.21	2.8	0.16	0.7	0.0748	0.0328	21.1671	5.1675	4.7078	0.0156	22.4928
16	71.8	55.1	23.5	57.60	0.21	2.8	0.17	0.7	0.0745	0.0328	21.7523	5.2083	4.6803	0.0175	22.9448
17	72.2	55.5	23.6	57.60	0.21	2.9	0.17	0.8	0.0746	0.0328	22.1345	5.2167	4.6635	0.0188	23.2217
21	71.9	55.0	22.6	55.50	0.20	2.8	0.17	0.8	0.0729	0.0325	23.4991	5.1585	4.4692	0.0252	26.4214
22	69.4	54.4	23.5	55.10	0.20	2.7	0.17	0.8	0.0729	0.0320	21.5445	4.5775	4.2306	0.0231	30.3497
23	70.8	55.5	22.8	55.70	0.22	3	0.17	0.9	0.0724	0.0312	22.7779	4.6334	4.2933	0.0258	29.3166
25	71.2	56.2	22.9	56.30	0.19	2.9	0.17	0.9	0.0734	0.0309	22.8800	4.6048	4.3215	0.0257	28.8516
26	71.0	56.2	23.6	56.20	0.19	2.9	0.17	0.9	0.0743	0.0301	22.5406	4.5994	4.1089	0.0281	32.3524
29	70.9	56.3	23.4	56.1	0.20	2.9	0.17	1	0.0746	0.0301	22.6577	4.5610	4.1268	0.0282	32.0579
30	71	55.3	19.1	54.4	0.19	2.8	0.16	0.9	0.0741	0.0295	25.1393	4.8704	4.3575	0.0317	28.2593
36	70.4	55.3	20.5	54.7	0.20	2.9	0.17	1	0.0740	0.0275	23.9963	4.6791	3.9376	0.0358	35.1730
37	71	55.9	20.3	54.8	0.20	2.9	0.17	1	0.0736	0.0275	24.6401	4.6513	3.9646	0.0373	34.7277
38	70.4	55.8	21	54.6	0.20	2.9	0.17	1	0.0737	0.0275	24.0626	4.5025	3.8737	0.0372	36.2241
41	70.2	55.8	20.3	53.9	0.21	2.9	0.17	1	0.0712	0.0275	24.6670	4.2933	3.8610	0.0395	36.4344
43	70.6	55.2	19.8	53.4	0.19	2.9	0.17	1	0.0732	0.0272	25.2147	4.7170	3.8294	0.0419	36.9542
46	69.9	55.3	19.5	53	0.19	2.9	0.17	1	0.0726	0.0269	25.1787	4.4363	3.7718	0.0431	37.9023
48	70.5	56.2	20.7	53.4	0.19	3	0.17	1.1	0.0730	0.0276	25.1898	4.3717	3.7837	0.0429	37.7068
49	70.5	56.8	19.6	52.6	0.20	3.1	0.17	1.1	0.0727	0.0272	26.3839	4.1710	3.7597	0.0474	38.1023
53	68.7	55.1	19.5	51.2	0.20	3	0.16	1.2	0.0726	0.0268	25.4878	4.1305	3.5569	0.0493	41.4397
54	69.4	56.6	22.8	52.8	0.20	3.1	0.17	1.2	0.0728	0.0272	24.1893	3.9000	3.4128	0.0483	43.8123
55	69.1	56.3	22.4	52.6	0.19	3.2	0.17	1.2	0.0731	0.0269	24.1648	3.9162	3.3970	0.0486	44.0737
56	69.3	56.1	21.8	52.5	0.19	3.1	0.16	1.2	0.0723	0.0270	24.5178	3.9965	3.4722	0.0479	42.8345
57	69.2	56.5	21.5	52.3	0.19	3.1	0.16	1.2	0.0727	0.0270	24.8615	3.8649	3.4814	0.0490	42.6839
58	71.8	58.6	21.3	53.5	0.20	3.1	0.16	1	0.0726	0.0269	26.6819	4.0099	3.6221	0.0518	40.3671
59	72.4	58.8	21.4	53.3	0.19	3.2	0.16	1.1	0.0725	0.0268	27.2329	4.1269	3.5777	0.0549	41.0986
60	72.1	58.5	21.5	53	0.19	3.1	0.16	1.1	0.0724	0.0267	27.0708	4.1217	3.5209	0.0559	42.0325



۳-۲ بررسی اختلاف دما در مبدل

با داشتن دماهای ورودی و خروجی مبدل، تغییرات اختلاف دمای مدار سرد (گرم شونده) (ΔT_c)، اختلاف دمای مدار گرم (سرد شونده) (ΔT_h) و اختلاف دمای لگاریمی ($LMTD$) برحسب زمان بدست می‌آید. اختلاف بصورت نرمال و با فرض ثابت ماندن دمای ورودی به مبدل و همچنین دبی، می‌بایست اختلاف دمای ورودی و خروجی با تشکیل رسوب در مبدل کاهش یابد، چرا که لایه‌های رسوب به دلیل مقاومت حرارتی بالا، میزان تبادل حرارتی مبدل حرارتی صفحه‌ای را کاهش می‌دهند.

با این حال با توجه به تجربی بودن پروژه، ثابت ماندن دماهای ورودی و دبی و گریز از برخی عوامل دیگر امکانپذیر نیست. بطور مثال، زمانیکه از Electronic water conditioner استفاده شده بود، در روز ۲۹ ام مبدل فرعی در قسمت بویلر دچار گرفتگی شد، همچنین در روز ۳۷ ام دبی سنج مدار گرم دچار مشکل شد، بنابراین در این دو روز مدار گرم دوباره با آب سخت پر شد که در نمودارها که در ادامه می‌آیند این تغییرات مشهود است.

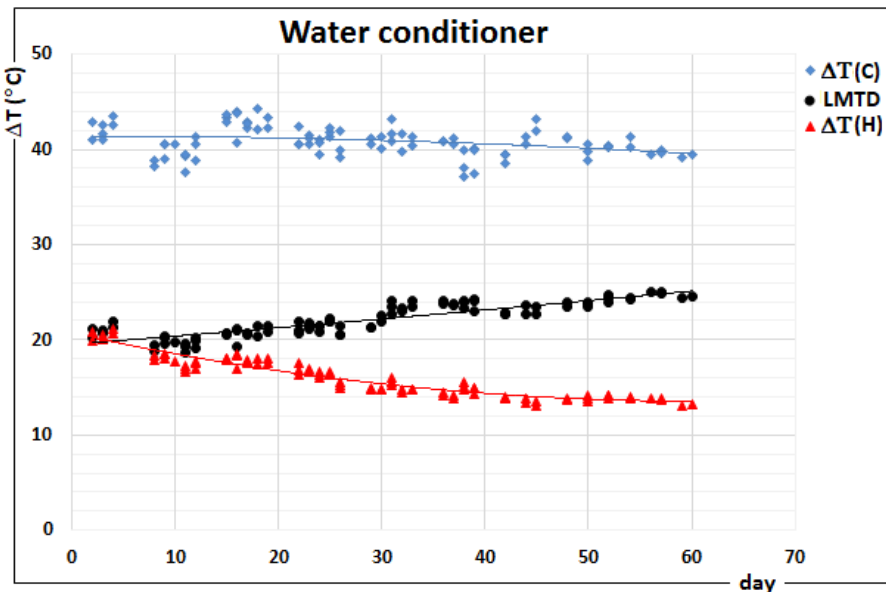
شکل ۳-۲ اختلاف دمای مدار سرد، اختلاف دمای مدار گرم و اختلاف دمای لگاریمی را در حالتی که از Electronic water conditioner استفاده شده است را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، متوسط ΔT_c از حدود ۴۲.۵ تا ۳۹.۵°C و متوسط ΔT_h از حدود ۲۰ تا ۱۳°C در مدت زمان آزمون کاهش نشان می‌دهند. با توجه به کاهش تنها ۳°C در اختلاف دمای مدار سرد، رسوب زیادی در مدار سرد تشکیل نشده است. تغییرات اختلاف دمای لگاریمی که متوسط اختلاف دمای کل مبدل را در دو مدار سرد و گرم نشان می‌دهد، از ۲۱ تا ۲۵°C (۴°C) بوده است.

بطور مشابه، شکل ۴-۲ اختلاف دمای مدار سرد، اختلاف دمای مدار گرم و اختلاف دمای لگاریمی را در حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، متوسط ΔT_c از حدود ۴۱.۵ تا ۳۱°C و متوسط ΔT_h از حدود ۲۱ تا ۱۳°C در مدت زمان آزمون کاهش نشان می‌دهند. همچنین

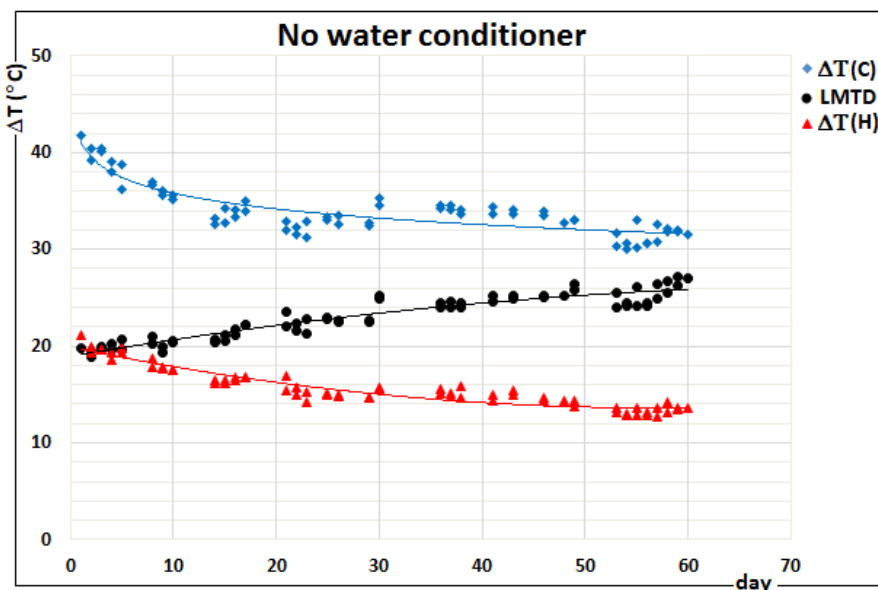


تغییرات اختلاف دمای لگاریتمی از 19 تا 27°C (8°C) بوده است. میزان 10.5°C کاهش در اختلاف دمای مدار سرد نشان می‌دهد زمانیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است، رسوب بسیار بیشتری نسبت به حالت قبل تشکیل شده است.

با توجه به این نتایج، زمانیکه از Electronic water conditioner استفاده شده است، رسوبگذاری کمتری اتفاق افتاده و در این حالت تغییرات اختلاف دما کمتر می‌باشد. همچنین متوسط ΔT_c در ابتدای دوره و کمی پس از شروع آزمون، در حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده شده است میزان بیشتری از حالت دوم دارد که خود گویای نشست اولیه رسوب در شروع آزمون می‌باشد.



شکل ۲-۳ تغییرات اختلاف دمای مدار سرد (ΔT_c)، اختلاف دمای مدار گرم (ΔT_h) و اختلاف دمای لگاریتمی ($LMTD$) در مبدل بر حسب زمان در حالتیکه از water conditioner استفاده شده است.



شکل ۲-۴ تغییرت اختلاف دمای مدار سرد (ΔT_c)، اختلاف دمای مدار گرم (ΔT_h) و اختلاف دمای لگاریمی ($LMTD$) در مبدل بر حسب زمان در حالتیکه از **water conditioner** استفاده نشده است.

۲-۴ بررسی نرخ انتقال حرارت مبدل

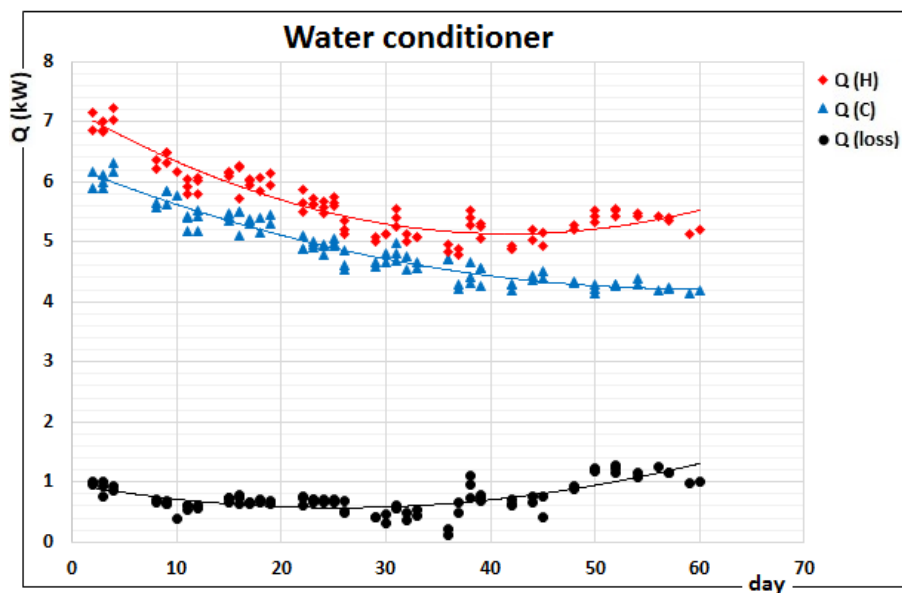
با اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی و دبی در هر دو مدار گرم و سرد، نرخ انتقال حرارت در دو مدار گرم (Q_h) و سرد (Q_c) بصورت روزانه محاسبه گردید که نتایج آن برای حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده شده است، در شکل ۲-۵ و برای حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است، در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. با توجه به آنکه مقداری از گرمای Q_h صرف گرم کردن آب در قسمت سرد مبدل و مقداری هم در محیط از دست می‌رود (Q_{Loss})، بنابراین میزان تبادل حرارت مبدل برابر با Q_c در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به گراف‌های ذکر شده، متوسط نرخ انتقال حرارت مبدل (Q_c) زمانیکه از Electronic water conditioner استفاده شده است با گذشت زمان و طی دو ماه بصورت کاهشی حدوداً از 6.2 به 4.2kW کاهش می‌یابد (شکل ۲-۵). همچنین همانطور که انتظار

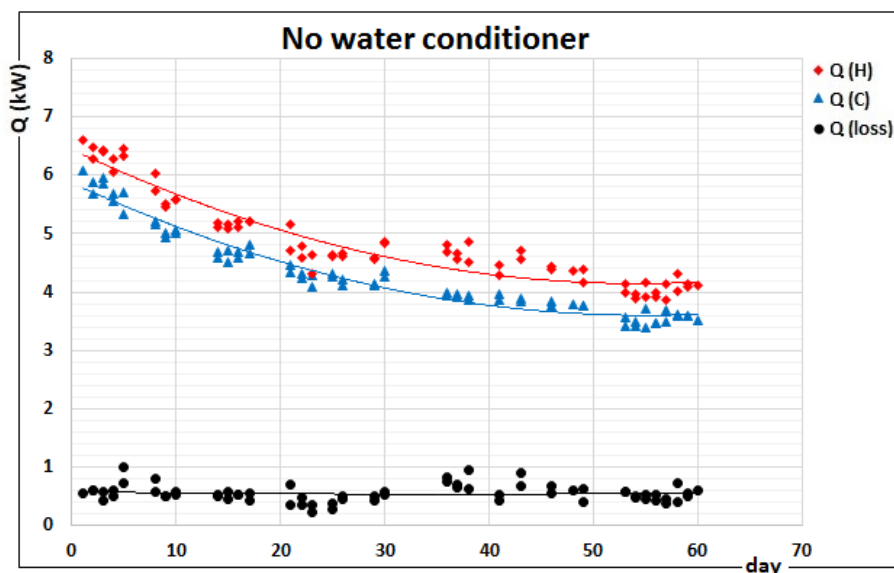


می‌رود، زمانیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است و در نتیجه رسوب بیشتری در مبدل تشکیل می‌شود، نرخ انتقال حرارت مبدل (Q_c) در این مدت زمان حدوداً از 6.1 تا 3.5kW کاهش می‌یابد (شکل ۲-۶).

با مقایسه شکل‌های ۲-۵ و ۲-۶، نرخ انتقال حرارت در ابتدای دوره و کمی پس از شروع آزمون، در حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده شده است میزان بیشتری از حالت دوم دارد که خود گویای نشست اولیه رسوب در شروع آزمون می‌باشد.



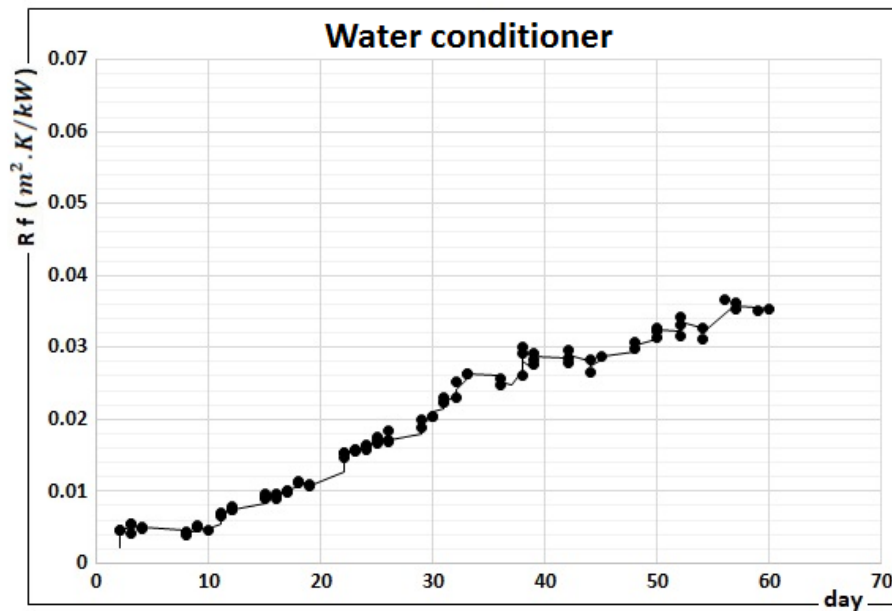
شکل ۲-۵ نرخ انتقال حرارت در مدار گرم (Q_h) و سرد (Q_c) و هدر رفت (Q_{Loss}) در مبدل حرارتی صفحه‌ای بر حسب زمان در حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده شده است.



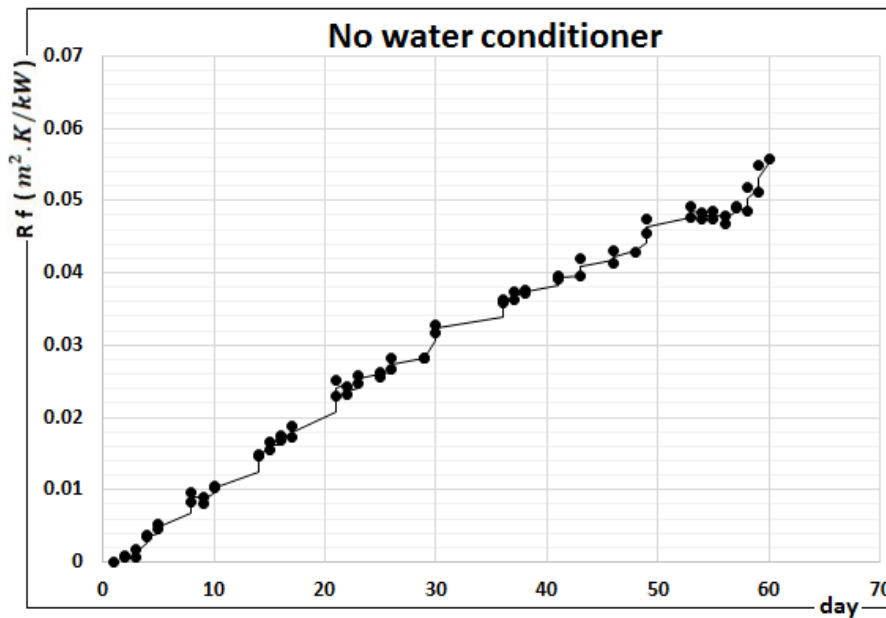
شکل ۲-۶ نرخ انتقال حرارت در مدار گرم (Q_h) و سرد (Q_c) و هدر رفت (Q_{Loss}) در مبدل حرارتی صفحه‌ای بر حسب زمان در حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است.

۲-۵ بررسی مقاومت حرارتی رسوب در مبدل

از طریق روابط ذکر شده در بند ۱-۲-۲، می‌توان میزان مقاومت حرارتی رسوب (R_f) در هر زمان از تفاضل $\frac{1}{U_f}$ در آن زمان و $\frac{1}{U_c}$ زمان شروع به کار سیستم (با فرض آنکه در آن زمان هنوز رسوبی در سیستم تشکیل نشده است) بدست می‌آید. نتیجه محاسبات مقاومت حرارتی رسوب بر حسب زمان برای حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده شده است، در شکل ۲-۷ نشان داده شده است. در این حالت، تغییرات R_f در مدت زمان آزمون حدود $0.036 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{kW}$ می‌باشد. همچنین تغییرات R_f در مدت زمان آزمون برای حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است، حدود $0.056 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{kW}$ می‌باشد (شکل ۲-۸). با مقایسه دو نمودار، درصد نسبت تغییرات مقاومت رسوب در حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده شده است، ۳۶٪ کاهش یافته است بدین معنا که در مدت زمان آزمون در این حالت رسوب کمتری اتفاق افتاده و تبادل حرارتی مبدل بیشتر است.



شکل ۲-۷ نرخ مقاومت حرارتی رسوب در مبدل حرارتی صفحه‌ای بر حسب زمان در حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده شده است.



شکل ۲-۸ نرخ مقاومت حرارتی رسوب در مبدل حرارتی صفحه‌ای بر حسب زمان در حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است.



همچنین بعد از انجام هر دوره آزمون، مبدل حرارتی صفحه‌ای و connector بین مبدل و تجهیزات اندازه‌گیری جهت مقایسه میزان رسوب از هم باز شدند که تصاویر آن به ترتیب برای حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده شده بود در شکل ۹-۲ و برای حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده بود در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است. با مقایسه شکل های ۹-۲ و ۱۰-۲ دیده می شود که در حالت اول مقداری رسوب در سوراخ های connector وجود دارد که نسبت به حالت دوم بسیار کمتر است.



شکل ۹-۲ تصویر ورودی های مبدل حرارتی صفحه‌ای پس از اتمام آزمون در حالیکه از Electronic water conditioner استفاده شده بود



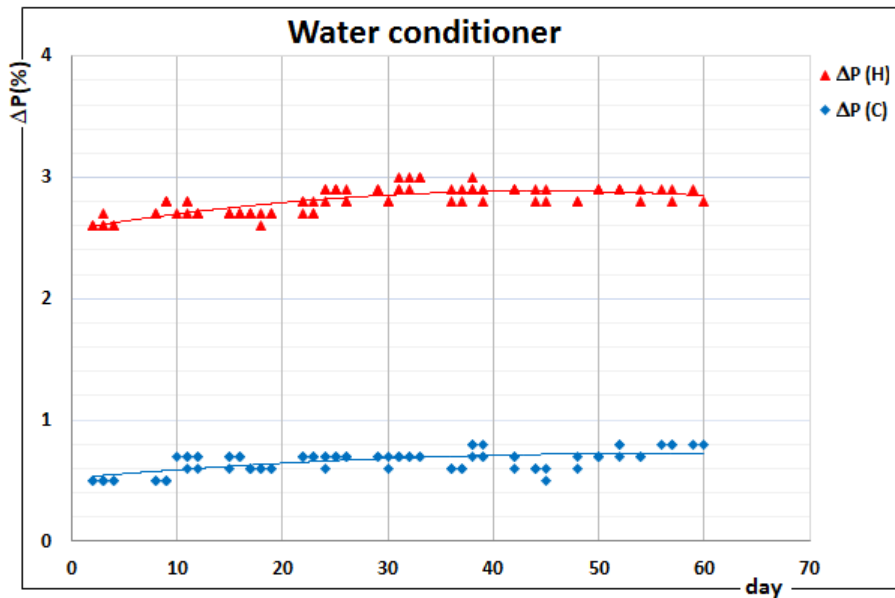
شکل ۱۰-۲ تصویر ورودی های مبدل حرارتی صفحه‌ای پس از اتمام آزمون در حالیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده بود



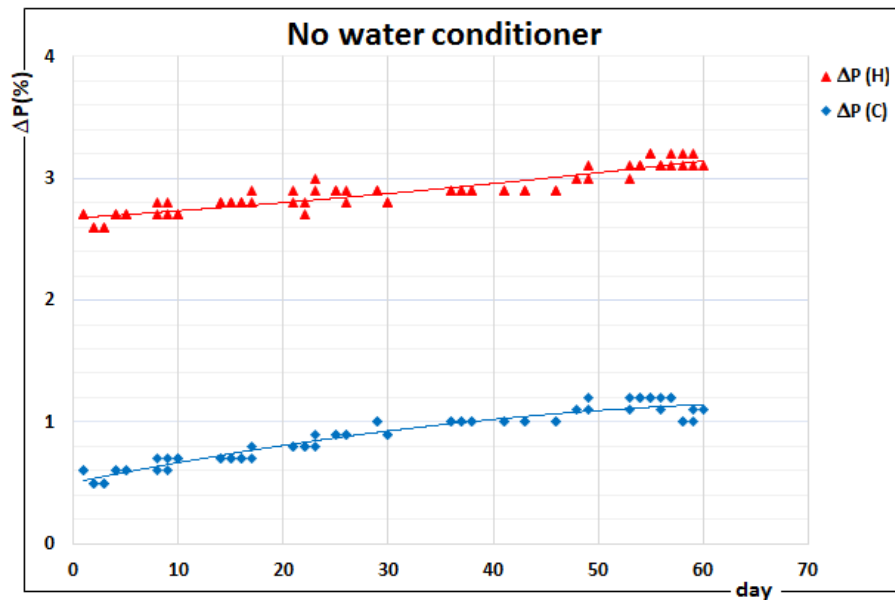
۶-۲ بررسی افت فشار مبدل ناشی از رسوب

در اینجا، بطور ساده و با داشتن ترنسمیتر فشار در دو سر مبدل حرارتی، تغییرات میزان افت فشار مبدل بواسطه تشکیل رسوب بصورت زمانی بدست آمده است. تغییرات اختلاف فشار ورودی و خروجی دو طرف مبدل حرارتی صفحه‌ای در دو مدار گرم ($\Delta P(H)$) و سرد ($\Delta P(C)$) بر حسب زمان در حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده شده است، در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است. در اینجا $\Delta P(H)$ از ۲.۶ تا ۲.۹٪ و $\Delta P(C)$ از ۰.۵ تا ۰.۸٪ افزایش یافته است. بدین معنا که در هر مدار افت فشار ۰.۳٪ افزایش یافته است.

همچنین، تغییرات اختلاف فشار ورودی و خروجی دو طرف مبدل حرارتی صفحه‌ای در دو مدار گرم و سرد بر حسب زمان در حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است، در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. در اینجا $\Delta P(H)$ از ۲.۶ تا ۳.۳٪ و $\Delta P(C)$ از ۰.۵ تا ۱.۲٪ افزایش یافته است. بدین معنا که در هر مدار افت فشار ۰.۷٪ افزایش یافته است.



شکل ۲-۱۱ تغییرات اختلاف فشار ورودی و خروجی دو طرف مبدل در دو مدار گرم ($\Delta P(H)$) و سرد ($\Delta P(C)$) بر حسب زمان در حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده شده است.



شکل ۲-۱۲ تغییرات اختلاف فشار ورودی و خروجی دو طرف مبدل در دو مدار گرم ($\Delta P(H)$) و سرد ($\Delta P(C)$) بر حسب زمان در حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است.



خلاصه و جمع بندی

در راستای بررسی تاثیر یک نمونه Electronic water conditioner با نام و مدل HydroFlow HS38 در میزان جلوگیری از رسوب و یا خوردگی در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی، پروژه فوق انجام شد.

دستگاه آزمون شامل یک مدار بسته گرم و یک مدار بسته سرد می‌باشد که با عبور این دو مدار از مبدل حرارتی صفحه‌ای جریان مخالف، تبادل حرارتی اتفاق می‌افتد.

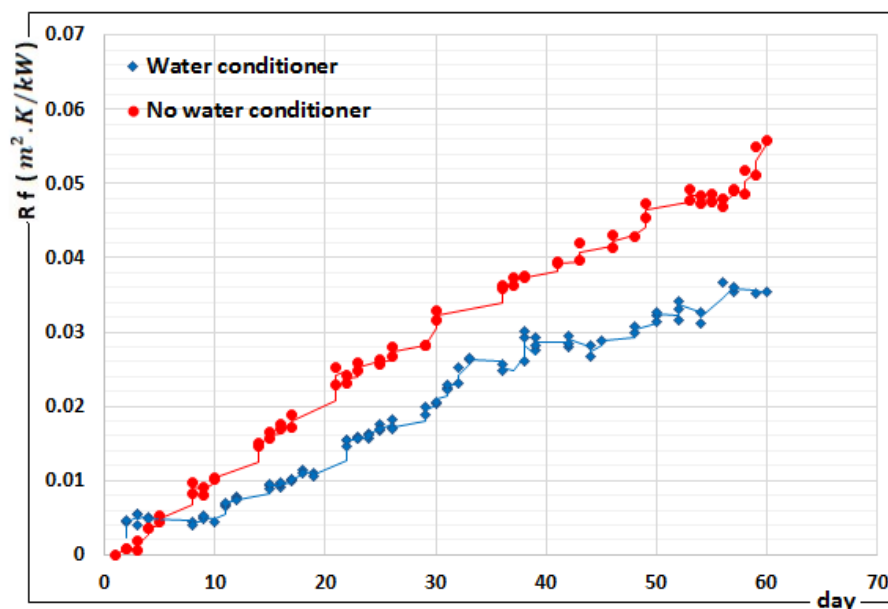
مراحل آزمون شامل ۲ مرحله است؛ در مرحله اول از Electronic water conditioner در مدارهای گرم و سرد استفاده شد و پارامترهای دما، دبی، فشار و اختلاف فشار دو سر مبدل بر حسب زمان طی ۲ ماه اندازه‌گیری شد. در مرحله دوم این پارامترها بدون استفاده از Electronic water conditioner اندازه‌گیری شدند.

- در مبدل حرارتی صفحه‌ای با گذشت زمان و افزایش ترسیب، مقاومت حرارتی مبدل ناشی از رسوب (R_f) افزایش می‌یابد. میزان R_f زمانیکه از Electronic water conditioner استفاده شده است نسبت به زمانیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است، 36% کاهش یافته است بدین معنا که در مدت زمان آزمون در این حالت رسوب کمتری اتفاق افتاده و تبادل حرارتی مبدل بیشتر است.

پارامتر متاثر از ترسیب طی مدت آزمون	با Electronic water conditioner	بدون Electronic water conditioner
تغییرات R_f	$0.036 m^2 \cdot K/kW$	$0.056 m^2 \cdot K/kW$



در شکل ۳-۱، نمودار مقاومت حرارتی رسوب در مبدل حرارتی صفحه‌ای بر حسب زمان برای حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده شده و حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است، بصورت مقایسه نشان داده شده است.



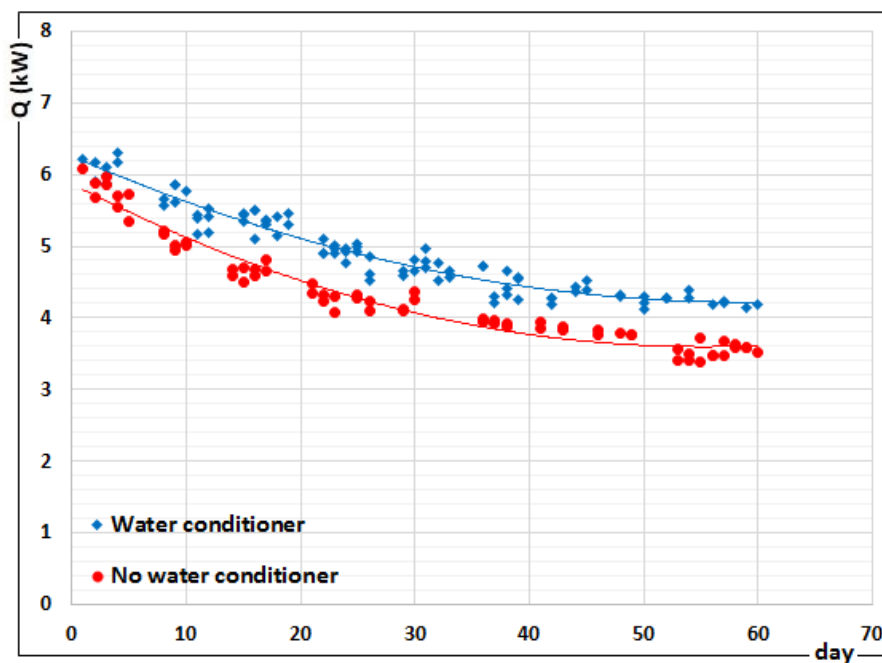
شکل ۳-۱: مقایسه نرخ مقاومت حرارتی رسوب در مبدل حرارتی صفحه‌ای بر حسب زمان با و بدون استفاده از Electronic water conditioner

– همچنین با افزایش ترسیب در مبدل حرارتی صفحه‌ای با گذشت زمان، نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد، بدین معنا که اتلاف نرخ انتقال حرارت (D%) و بنابراین میزان انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. با مقایسه میزان اتلاف نرخ انتقال حرارت زمانیکه از Electronic water conditioner استفاده شده، نسبت به زمانیکه از water conditioner استفاده نشده است، 25.8% کاهش یافته است.

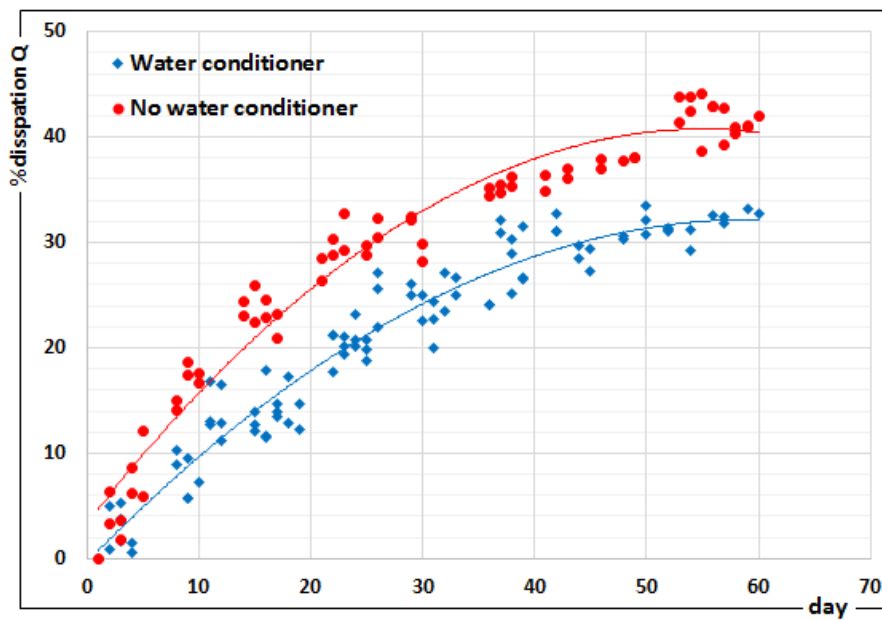


بدون Electronic water conditioner	با Electronic water conditioner	پارامتر متاثر از ترسیب طی مدت آزمون
2.6 kW	2 kW	میزان کاهش نرخ انتقال حرارت (Q_c)
		سطح زیر منحنی اتلاف نرخ انتقال حرارت (انرژی مورد نیاز جهت تبادل):
$9060766054 w.s(j) = 2165613.694 kcal$	$6723505658 w.s(j) = 1606985.087 kcal$	$\int_1^{60} D(t) * Q_c^0 * dt$

در شکل‌های ۲-۳ و ۳-۳، به ترتیب نمودارهای نرخ انتقال حرارت و اتلاف نرخ انتقال حرارت در مبدل حرارتی صفحه‌ای بر حسب زمان برای حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده شده و حالتیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است، بصورت مقایسه نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: مقایسه نرخ انتقال حرارت در مبدل حرارتی صفحه‌ای بر حسب زمان
با و بدون استفاده از Electronic water conditioner



شکل ۳-۳: مقایسه درصد اتلاف نرخ انتقال حرارت در مبدل حرارتی صفحه‌ای بر حسب زمان
با و بدون استفاده از Electronic water conditioner



- در صورتیکه ارزش حرارتی هر m^3 گاز طبیعی به طور متوسط، 8600 kcal در نظر گرفته شود؛ میزان مصرف گاز طبیعی جهت انتقال حرارت مبدل در طول دو ماه بصورت زیر می‌باشد. میزان گاز مصرفی طی ۲ ماه زمانیکه از Electronic water conditioner استفاده شده، نسبت به زمانیکه از Electronic water conditioner استفاده نشده است، 25.8% کاهش یافته است.

پارامتر متاثر از ترسیب طی مدت آزمون	با Electronic water conditioner	بدون Electronic water conditioner
میزان مصرف گاز طبیعی طی یک ماه	$56.9787 m^3$	$87.0832 m^3$
میزان مصرف گاز طبیعی طی دو ماه	$186.8587 m^3$	$251.8155 m^3$

- یادآوری: نسبت کاهش مصرف گاز زمانیکه از Electronic water conditioner استفاده شده به زمانیکه استفاده نشده، در ماه اول، 34.5% و در دو ماه اول 25.8% بوده است که این کاهش میزان به دلیل بسته بودن سیکل و عدم ورود آب تازه به آن می‌باشد.

مراجع

- ۱) مکانیسم تشکیل رسوب و بازداري (۱۲ مرداد ۱۳۹۹)،
<https://www.tymar.ir/blog/maghaleh>
- 2) Taborek, D Aoki, T and Palen, J (1972) Fouling The major unresolved problem in heat transfer Chem Eng Prog Vol 68 p59-67
- 3) Alahmad M. and Abdul Aleem F. , "Scale Formation and Fouling Problems Effect on The Performance of MSF and RO Desalination Plants in Saudi Arabia ", Desalination, 93, 287-310, (1993).
- 4) Knudsen, J. G. "Fouling in Heat Exchangers", in "Hemisphere Handbook of heat Exchangers Design", G. F. Hewitt (ed.), Hemisphere, (1990).
- 5) Compact Heat Exchanger for Energy Transfer Intencification, Low Grade Heat and Foling Mitigation, 2016 by Talor & Francis group.
- 6) Bird, M & Fryer, P (1991) An experimental study of the cleaning of surfaces fouled by whey proteins Trans IChemE, Vol 69, p i3-21
- 7) M. M. Awad, I. F. Abd El-Wahab and H. E. Gad, "Effect of surface temperature on the fouling of heat transfer surfaces", in: Eleventh International Water Technology Conference, Sharm El-Sheikh, Egypt, 2007.
- 8) What HydroFLOW HS38 Is (September 17, 2020 | MCowper), <https://mjc-gas.co.uk/what-hydroflow-hs38-is/>
- 9) Water conditioner vs softener (Last updated on: June 1, 2023), <https://waterpursuit.com/water-softeners/water-conditioner-vs-softener/>