

بررسی خوردگی در فن‌های هوایی صنعتی و راهکارهای عملی جهت رفع مشکل و افزایش بازدهی آنها

عارف شکری^{۱،۲*}

۱ مرکز پژوهشی جندی شاپور، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران.

۲ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده



واژه‌های کلیدی:

خوردگی و رسوب‌گذاری،
فن‌های هوایی، انواع خوردگی،
بازدارنده‌ها، تجهیزات صنعت نفت.

Keywords:

Corrosion and
sedimentation, Air fans,
Types of corrosion,
Inhibitors,
Oil industry equipment.

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۵

نوع مقاله: مروری

با توجه به کاربرد گسترده مبدل‌های حرارتی هوا خنک‌کن در صنایع نفت و گاز، جلوگیری از بروز هرگونه عیب در این نوع مبدل‌ها حایز اهمیت است. امروزه به منظور افزایش راندمان خنک‌کننده‌های هوایی روش‌های متداولی نظیر کنارگذر کردن بخشی از جریان هوای سرد، قرار دادن دریچه هوا بر سر راه جریان هوا و محدود کردن دبی آن، کنترل دور موتور و استفاده از فن‌های با گام متغیر مطرح می‌باشد. در صنعت کندانسورهای هوایی به طور مداوم دچار خوردگی و نشستی سیال شده و باعث توقف تولید و نیاز به تعمیر و تعویض لوله‌ها و همچنین آلودگی محیط زیست می‌گردد. در این پژوهش ابتدا ساختار و انواع خنک‌کننده‌های هوایی بررسی شده و سپس پدیده خوردگی و رسوب‌گذاری در فن‌ها تشریح می‌گردد، علاوه بر آن ضمن توضیح انواع خوردگی، عوامل تاثیرگذار و راهکارهای کاهش خوردگی و رسوب‌گذاری در فن‌های هوایی پیشنهاد داده می‌شود. تنظیم بهینه دمای فرآیند و افزایش بازدهی خنک‌کننده‌های هوایی، تأثیر پارامترهای مختلف طراحی بر توان مصرفی فن‌ها، مؤثرترین راهکار جهت افزایش راندمان خنک‌کننده‌های هوایی، نحوه تشخیص مشکل خوردگی فن‌های هوایی، تعیین نقطه بهینه عملکرد کولرهای هوایی از دو دیدگاه اقتصاد و عملیات نیز بررسی شد. با انجام آزمایش‌های تجزیه و تحلیل رسوب در موقع تعمیرات اساسی عوامل مؤثر بر تشکیل رسوب در فن‌های یک مجتمع پتروشیمی و همچنین ارتباط بین خوردگی و رسوب‌گذاری در آنها مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد و در پایان راهکارهای لازم ارایه می‌گردد.

مقدمه

حرکت می‌کند و جریان هوای لازم برای خنک کردن سیال داخل لوله‌ها به وسیله یک فن تامین می‌گردد. این مبدل‌ها از نظر شکل جریان، از نوع جریان متقاطع می‌باشند و به جهت افزایش سطح انتقال حرارت،

خنک‌کننده‌های مبدل‌هایی هستند که در آنها سیال فرآیندی توسط جریان هوا خنک می‌شود، در این مبدل‌ها سیال گرم درون مجموعه‌ای از لوله‌ها که به صورت افقی کنار هم قرار گرفته‌اند

+E- mail: aref.shokri3@gmail.com

* عهده‌دار مکاتبات

رجاء: عارف شکری، بررسی خوردگی در فن‌های هوایی صنعتی و راهکارهای عملی جهت رفع مشکل و افزایش بازدهی آنها، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲) ۴۵: ۱۰۵ تا ۱۲۰ (۱۴۰۵).

هدف این مقاله مروری، بررسی شرایط عملیاتی بهینه جهت کاهش خوردگی در مطالعات گذشته و چالش‌ها و کمبودهای فعلی و همچنین خط مشی مطالعات آینده است. شناسایی وضعیت فعلی و محاسبه راندمان واقعی تجهیز و همچنین ارایه راهکارهای عملی در جهت بهبود عملکرد خنک‌کننده هوایی نیز از اهداف تحقیق است. در این پروژه با مطالعه و بررسی عملکرد خنک‌کننده‌های هوایی به وسیله بررسی مطالعات گذشته، بازدید مشکلات فعلی در صنایع، جمع‌آوری اطلاعات و تحلیل آنها به ارایه راهکارها جهت صرفه‌جویی انرژی و عملکرد بهینه این تجهیزات پرداخته می‌شود. علاوه بر آن ابتدا عوامل تاثیرگذار بر خوردگی و رسوب‌گذاری در فن‌ها تشریح می‌گردد، سپس ضمن توضیح انواع خوردگی، راهکارهای کاهش خوردگی و رسوب‌گذاری در فن‌های هوایی پیشنهاد داده می‌شود. در ضمن با انجام آزمایش‌های تجزیه و تحلیل رسوب در موقع تعمیرات اساسی یک مجتمع پتروشیمی، عوامل موثر بر تشکیل رسوب در فن‌های و همچنین ارتباط بین خوردگی و رسوب‌گذاری در آنها مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد و در پایان راهکارهای لازم ارایه می‌گردد.

خنک‌کننده هوایی^۱

خنک‌کننده هوایی برای خنک‌سازی سیال گرم نظیر روغن و یا سایر هیدروکربن‌ها در واحدهای صنعتی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در یک خنک‌کننده هوایی سیال گرم از داخل یک سری لوله پره‌دار عبور کرده و هوای به جریان درآمده توسط فن با برخورد به این لوله‌ها سیال را خنک می‌کند. جریان هوا می‌تواند به صورت آزاد یا اجباری کار خنک‌کاری را انجام دهد که البته اغلب نوع اجباری دارای کاربرد بیشتری است. در نوع اجباری از فن برای دمیدن یا مکیدن هوا استفاده می‌شود، در حالی که در حالت آزاد یا طبیعی هوا به واسطه اختلاف چگالی جابجا می‌شود که در این حالت به یک دودکش برای سرعت بخشیدن به جریان هوا نیاز است. خنک‌کننده هوایی با توجه به محل قرارگیری فن، به خنک‌کننده هوایی نوع دمشی^۳ و خنک‌کننده هوایی نوع مکشی^۴ تقسیم‌بندی می‌شود:

خنک‌کننده هوایی نوع دمشی

در این حالت فن پایین لوله‌ها قرار گرفته و با دمیدن هوای خنک بر روی لوله‌ها باعث خنک شدن سیال داخل آنها می‌شود. عملیات خنک‌کنندگی در این خنک‌کننده‌ها، با نیروی کمتر و جابجایی حجم کمتری از هوا انجام می‌پذیرد. بیشتر خنک‌کننده‌های هوایی در صنعت از این نوع می‌باشند. این نوع خنک‌کننده هوایی

جداره خارجی لوله‌ها با پره مجهز می‌شود. فن‌ها، به عنوان یکی از تجهیزات مصرف‌کننده انرژی، گونه‌ای از توربوماشین‌ها هستند که برای جابجایی حجم‌های زیادی از هوا با فشار نسبی پایین، استفاده می‌شوند. بهبود عملکرد و به طور خاص، افزایش گزردهی و در نتیجه بازده آیرودینامیکی این فن‌ها می‌تواند موجب بهبود عملکرد آنها و کاهش مصرف انرژی شود [۱].

در پالایشگاه‌های گاز سولفید هیدروژن و آمونیاک به عنوان محصول فرعی حاصل می‌شود، علاوه بر واکنش‌های تشکیل سولفید هیدروژن و آمونیاک، محصولات دیگری نیز همزمان تولید می‌شوند؛ نظیر تبدیل کلرایدها به اسید کلریدریک، تشکیل نمک آمونیوم بی‌سولفاید در اثر واکنش سولفید هیدروژن و آمونیاک به هنگام خنک شدن سیال و یا تشکیل نمک آمونیوم کلراید در اثر واکنش آمونیاک با اسید کلریدریک. محصول خروجی راکتورها پس از سرد شدن توسط مبدل‌های حرارتی وارد خنک‌کننده هوایی شده و سرد می‌شود. به طور کلی تشکیل سولفید هیدروژن، آمونیاک و اسید کلریدریک از اهمیت ویژه‌ای در تشکیل لجن و خوردگی در این خنک‌کننده‌های هوایی دارد [۲]. تحلیل داده‌های حاصل از ضایعات هیدروکربن‌ها نشان می‌دهد که خوردگی به لحاظ آماری دومین عامل ایجاد این هدررفتگی می‌باشد. مطابق تحقیقات انجام شده توسط محققین قبلی، به طور کلی سایش توسط جریان گاز، خوردگی در آب با دمای پایین، خوردگی خستگی و خوردگی حفره‌ای ناشی از وجود اکسیژن عمده‌ترین عوامل شکست لوله‌ها بوده است [۳]. تشکیل رسوب در فن‌های هوایی باعث افت راندمان انتقال حرارت و همچنین تشدید خوردگی زیر رسوبی می‌گردد لذا بررسی و مطالعه دلایل خوردگی در این تجهیزات و همچنین پارامترهای رسوب‌گذاری می‌تواند از بروز خوردگی و رسوب‌گذاری جلوگیری کرده و همچنین از کاهش راندمان تجهیزات و در نتیجه توقف تولید جلوگیری نماید [۴].

مطالعات زیادی در زمینه خوردگی و رسوب‌گذاری صورت گرفته است، دین و همکاران اثر خوردگی حفره‌ای بر تخریب صفحات مبدل حرارتی از جنس استیل ۳۱۶ را مورد بررسی قرار داده و در این بررسی از روش‌های الکتروشیمیایی، آنالیز شیمیایی و متالورژیکی استفاده کردند. نتایج نشان دادند که محتوی کلر و آب در سیستم باعث می‌شود که بروز مشکلات خوردگی حفره‌ای در سیستم جدی شود [۵]. وجود آمونیاک و سولفید هیدروژن در دمای پایین باعث تولید کریستال‌های جامد بی‌سولفید آمونیوم گردد که روی سطوح سرد به شدت رسوب می‌کند [۶] و در نهایت باعث انسداد کامل این مبدل‌ها می‌شود. برای جلوگیری از رسوب نمک یاد شده به این خنک‌کننده‌ها آب تزریق می‌شود [۷].

(۱) Cooler

(۳) Force Draft Air Cooler

(۲) Air Cooler

(۴) Induced Draft Air Cooler

در خنک‌کننده هوایی نوع مکشی اگر موتور گرداننده فن در بالای لوله‌ها قرار گیرد، به علت قرار گرفتن در معرض هوای گرم زودتر مستهلک می‌شود. برای رفع این مشکل نیرو را با استفاده از شفت منتقل نموده و موتور را در محل مناسب‌تری (اغلب پایین فن و دسته لوله‌ها) قرار می‌دهند.

اجزاء اصلی یک خنک‌کننده هوایی^۲

یک خنک‌کننده هوایی از سه قسمت اصلی دسته لوله^۳، سازه و تجهیزات محرک مکانیکی تشکیل می‌شود. از اجزای اصلی یک خنک‌کننده هوایی شامل فن^۴، حلقه دور فن^۵، و پلنیوم^۶ که محفظه‌ای است که سبب هدایت و ملایم کردن و گرفتن نوسانات جریان هوا می‌شود، دسته لوله که شامل لوله‌های پره‌دار^۷، نگه دارنده لوله‌ها^۸، قاب کناری^۹، خط ورودی و خروجی سیال^{۱۰} و نازل^{۱۱} و توزیع کننده می‌شود. علاوه بر این دارای سیستم گرداننده فن و انتقال قدرت^{۱۲} و نیز ستون و سازه نگه دارنده خنک‌کننده هوایی است. به دلیل کمتر بودن ضریب انتقال حرارت هوا در مقایسه با سیال درون لوله، از لوله‌های پره‌دار به منظور کاهش مقاومت حرارتی سمت هوا استفاده می‌شود. همانند سایر مبدل‌های هوایی، آلومینیوم به دلیل وزن کمتر، قابلیت انعطاف بیشتر، و ضریب هدایت حرارتی بالاتر جهت ساخت پره در خنک‌کننده‌های هوایی کاربرد دارد. بجز موارد ذکر شده در بالا، اجزای دیگری نیز وجود دارند که به صورت اختیاری و با توجه به نیاز طراحی و شرایط بهره برداری و طبق دستور کارفرما نصب و مورد استفاده قرار می‌گیرند که از آن جمله می‌توان به: کوئل بخار، کرکره، سیستم تنظیم تیغه فن، سیستم کنترل موتور دور متغیر، محفظه مخصوص چرخش مجدد هوای گرم، سویچ ارتعاش، سکوها‌ی اضافی جهت تعمیر و نگهداری و ... اشاره کرد.

دسته لوله اصلی‌ترین قسمت یک خنک‌کننده هوایی است که تبادل حرارت در این عضو انجام می‌گیرد. طراحی سایر قسمت‌های خنک‌کننده هوایی وابسته به طراحی باندل می‌باشد. هدر محفظه‌ای است که لوله‌ها به آن متصل هستند و سیال گرم توسط نازل و از طریق آن به لوله‌ها ورود و خروج می‌کند. هدرها دارای انواع متفاوتی می‌باشند که با توجه به شرایط کاری مختلف انتخاب می‌گردند [۸]. دسته لوله در خنک‌کننده هوایی اغلب به صورت افقی نصب و مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما سیستم‌های عمودی و زاویه‌دار آنها نیز وجود دارد و در مواقعی که ماکزیمم راندمان مورد نیاز است

جهت کارکرد به توان کمتری نیاز دارند. تعمیر و نگهداری آسان به دلیل دسترسی بهتر به فن و سایر قطعات مکانیکی، دسترسی بهتر به دسته لوله‌ها برای سرویس و تعویض لوله‌ها، قابلیت کارکرد جهت دماهای ورودی بالاتر سیال فرآیندی از مزایای آنها می‌باشد. معایب این نوع خنک‌کننده هوایی به شرح زیر است: توزیع هوا بر روی کل دسته لوله‌ها پایین است، کنترل و پایداری فرآیند در اثر قرارگیری لوله‌های پره‌دار در معرض عوامل جوی نظیر آفتاب، باران، برف و تگرگ پایین است، احتمال گردش هوای گرم به دلیل سرعت پایین هوای خروجی باندل‌ها پایین است، سرعت مکش حلقه فن بالا است و در اثر بروز نقص یا خرابی فن، اثر مکش طبیعی دودکش^۱ کمتری دارد. این نوع خنک‌کننده‌ها همیشه مستعد برگشت هوای گرم خروجی به سیستم هستند و باید با ارتفاع از سطح زمین نصب شوند.

خنک‌کننده هوایی نوع مکشی

در نوع مکشی، فن در بالای لوله‌ها قرار می‌گیرد و با مکش هوا به سمت بالا از روی لوله‌ها باعث خنک شدن سیال داخل لوله می‌شود. این نوع خنک‌کننده هوایی به علت ایجاد توزیع یکنواخت جریان هوا، بازدهی بیشتری دارد. از مزیت‌های این نوع خنک‌کننده هوایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

دسته لوله‌ها در سمت مکش فن (پایین فن) قرار دارند و پلنیوم ۶۰٪ سطح لوله باندل را پوشانده است که باعث محافظت در برابر عوامل جوی می‌شود و کنترل و پایداری بهتر فرآیند را به همراه دارد. توزیع هوا بر روی کل دسته لوله‌ها بهتر است. احتمال گردش مجدد هوای گرم کمتر است. در اثر بروز نقص و یا خرابی فن، اثر مکش طبیعی دودکش بیشتر است. در این نوع خنک‌کننده میزان صدای کمتری بر روی زمین شنیده می‌شود.

از معایب این نوع خنک‌کننده هوایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: برای کارکرد خنک‌کننده هوایی به توان بیشتری نیاز است. دمای هوای خروجی نباید بیشتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس شود زیرا باعث آسیب رسیدن به تجهیزات مکانیکی نظیر یاتاقان‌ها می‌شود. به دلیل قرارگیری لوله‌ها در زیر فن تعمیرات سخت است، در این شرایط باید پلنیوم باز و برداشته شود.

در صورتی که دمای سیال در خنک‌کننده هوایی بیش از ۱۸۰ درجه سلسیوس گردد از خنک‌کننده هوایی نوع دمشی استفاده می‌شود زیرا دمای بالای هوا در زمان خاموش بودن فن و یا گردش کم هوا باعث آسیب به اجزای مکانیکی می‌گردد.

(۱) Natural Draft Stack
(۳) Tube Bundle
(۵) Fan Ring
(۷) Fin Tube
(۹) Side Framer
(۱۱) Nozzle

(۲) Air Cooler
(۴) Fan
(۶) Plenum
(۸) Tube Support
(۱۰) Header
(۱۲) Drive Assembly

هدایت گرمایی کم هوا نسبت به آب (هدایت گرمایی^۶ آب در دمای ۳۵ درجه سلسیوس، ۲۳ برابر بیشتر از هوا است).

کنترل عملکرد یک خنک کننده هوایی با تغییرات دما

تغییرات دما در فصل‌های مختلف سال می‌تواند باعث تغییر در خنک کنندگی خنک کننده هوایی شود که ممکن است مطلوب نباشد. بدین منظور برای کنترل شرایط دمایی مورد نیاز، از اجزاء و سیستم‌های کنترلی مختلفی استفاده می‌شود که در ادامه به معرفی آنها می‌پردازیم. جهت کارکرد صحیح و مورد نیاز تجهیز، عواملی به شرح زیر در نظر گرفته می‌شود:

استفاده از کرکره^۷ به عنوان محافظ پوششی یا سقف در قسمت بالای لوله‌ها، استفاده از فن‌هایی با زاویه^۸ متغیر (پره‌های فن قابلیت تغییر شیب دارند)، کم کردن میزان انتقال حرارت سیال داخل لوله توسط کم کردن میزان جریان هوا، هدایت جریان سیال گرم درون لوله‌ها در دو جهت، استفاده از گردش جریان هوای گرم در فصل سرما به جهت جلوگیری از انجماد سیال [۱۰].

کرکره‌ها قابلیت کنترل زیادی دارند و این کنترل می‌تواند به صورت دستی یا اتوماتیک توسط موتورهای الکتریکی با سیستم‌های بادی برقرار شود. کرکره‌ها اغلب برای فن‌های با سرعت ثابت استفاده می‌شوند. در فن‌های با شیب متغیر، شیب پره‌های فن برای تامین جریان هوای مورد نیاز با توجه به دما و فشار سیستم تغییر می‌کند. زاویه پره وقتی دما افت پیدا می‌کند کاهش می‌یابد و این باعث می‌شود فن پایین‌تر قرار بگیرد. موتورهای هیدرولیکی نیز می‌توانند سرعت فن را کاهش دهند. وقتی جریان هوای کمی مورد نیاز است، توان مصرفی فن نیز کاهش می‌یابد.

طراحی و بهینه سازی خنک کننده هوایی

در خنک کننده هوایی عواملی نظیر تعداد لوله‌ها، طول لوله‌ها، قطر لوله‌ها، تعداد ردیف‌های لوله، نوع پره و تعداد پره در هر اینچ طول لوله بسیار مهم می‌باشند و در طراحی مفید و بهینه مبدل نقش اساسی را ایفا می‌کنند. افزایش هر کدام از عوامل فوق باعث افزایش هزینه ساخت مبدل می‌شود [۱۱]. ساختار و قسمت‌های مختلف فن هوایی در شکل ۱ نشان داده شده است.

افزایش طول و یا تعداد لوله‌ها باعث افزایش سطح خارجی لوله‌ها و افزایش میزان انتقال حرارت می‌شود، اما افزایش افت فشار در لوله‌ها را نیز به همراه دارد. همچنین کاهش یا افزایش قطر لوله‌ها بر سرعت سیال درون لوله‌ها و متعاقب آن بر میزان انتقال حرارت و افت فشار تأثیر گذار است. بنابراین واضح است که در طراحی

به‌طور مثال در سیستم‌های مایع سازی به عنوان کندانسور در خنک کننده هوایی استفاده می‌شوند. سیستم‌های زاویه‌دار، دارای زاویه ۳۰ درجه با افق می‌باشند. انتخاب نوع پره‌ها به مواردی نظیر شرایط محیطی و دمای کار کرد و هزینه بستگی دارد.

سیال گرم با حرکت در خط اصلی و عبور از نازل ورودی توسط هدر وارد لوله‌های پره‌دار خنک کننده هوایی، که در مجاورت هوای به گردش در آمده توسط فن هستند می‌شود. اغلب دو یا چندین دسته لوله به طور موازی با یکدیگر از روی یک فن عبور می‌کنند که به کل این مجموعه، یک بای^۱ می‌گویند. اغلب در خنک کننده هوایی از چند بای که به صورت موازی قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود که به مجموعه این بای‌ها، یونیت^۲ گفته می‌شود. به مجموعه یونیت‌ها که به‌طور متوالی در یک سازه قرار گرفته‌اند بانک^۳ می‌گویند.

یکی از مسائلی که در مورد خنک کننده هوایی اهمیت دارد، نسبت مساحت فن به مساحت بای می‌باشد. این نسبت را نسبت تقارب یا همگرایی فن^۴ می‌گویند و مقدار آن در خنک کننده هوایی نباید از ۰/۴ کوچکتر باشد.

مزایا و معایب استفاده از خنک کننده هوایی

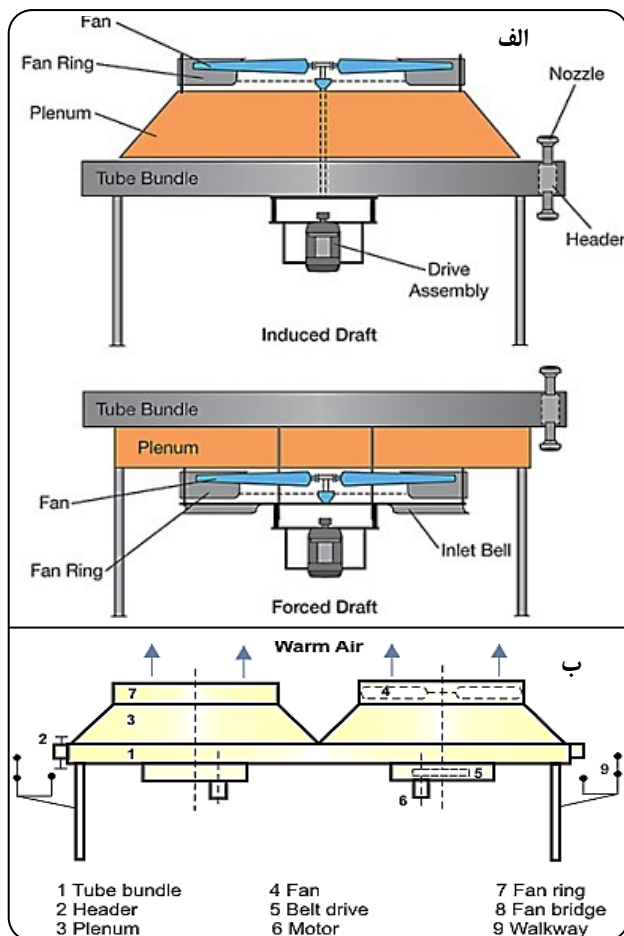
خنک کننده هوایی به دلیل استفاده از هوا به عنوان سیال عامل خنک کننده دارای مزایا و معایبی نسبت به مبدل‌هایی که از آب برای خنک کنندگی استفاده می‌کنند، می‌باشند. از جمله مزایای استفاده از خنک کننده هوایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

عدم نیاز به منبع آب، کاهش هزینه به دلیل عدم استفاده از تجهیزات سیستم‌های انتقال آب [۹]، خورنده نبودن هوا نسبت به آب و کاهش تأثیرات مربوطه، رسوب گذاری بسیار ناچیز هوا نسبت به آب، خطر ایجاد آلودگی در منابع آبی در صورت نشستی سیال خنک شونده وجود ندارد، عدم ایجاد آلودگی در محیط زیست، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و دریاها، دسترسی آسان و نامحدود به هوا، نصب آسان و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری پایین، دارای قابلیت طراحی برای انواع سیستم‌ها. از جمله معایب استفاده از خنک کننده هوایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

در محل نصب جای زیادی را اشغال می‌کنند، دارای سر و صدای زیادی هستند، به دلیل تغییر دمای هوا در شرایط جوی مختلف نیاز به سیستم‌های کنترلی بیشتری دارند، هوای بیشتری نسبت به آب برای یک بار گرمایی مشخص نیاز می‌باشد (حدود ۴ برابر در جرم و ۳۲۰۰ برابر در حجم)، دانسیته کم هوا نسبت به آب (در دما و فشار اتمسفر دانسیته آب ۸۰۰ برابر بیشتر از هوا است)، حرارت ویژه کم هوا نسبت به آب (حرارت ویژه^۵ آب ۴ برابر بیشتر از هوا است)،

(۱) Bay
(۳) Bank
(۵) Specific Heat
(۷) Louver

(۲) Unit
(۴) Converge Fan
(۶) Thermal Conductivity
(۸) Pitch



شکل ۱- (الف) وضعیت قرار گیری فن دمشی و مکشی در خنک‌کننده هوایی، (ب) اسامی قطعات مختلف فن هوایی.

که علت آن پلاریزاسیون می‌باشد و اغلب خوردگی‌های فولاد از این نوع می‌باشد. اهمیت و قدرت این نوع خوردگی از دیگر انواع خوردگی‌ها کمتر است. در این نوع خوردگی لایه‌های سطحی فلز مورد حمله قرار گرفته و اثرات خوردگی در تمام سطح مشاهده می‌شود و کاهش ضخامت در این نقاط به تقریب یکسان است. این نوع خوردگی از نظر مقدار فلز خورده شده بالاترین رقم را دارد [۱۳].

خوردگی موضعی

برخلاف خوردگی یکنواخت، خوردگی موضعی به‌طور خاص یک منطقه از سازه فلزی را هدف قرار می‌دهد. خوردگی موضعی به سه نوع طبقه بندی می‌شود:

خوردگی حفره‌ای^۱

در خوردگی حفره‌ای به دنبال آن حفره‌هایی در سطح فلز ظاهر شده و با ادامه فعل انفعال خوردگی، حفره عمیق‌تر شده و باعث سوراخ شدن لوله‌ها می‌گردد. حفره‌ها اغلب کوچک‌اند ولی اندازه و توزیع آنها

مبدل خنک‌کننده هوایی با در نظر گرفتن این اثرات باید تعداد بهینه لوله‌ها تعیین گردد. همچنین نسبت طول به عرض یک مبدل هوایی باید منطقی باشد. برخلاف مایعات، گازها تراکم پذیر هستند که اغلب سبب افت فشار کمی در بخش هوایی این مبدل‌ها می‌شوند. از طرفی پایین بودن ضریب هدایت حرارتی گازها حتی در افت فشارهای کم موجب پایین آمدن ضریب انتقال حرارت کلی مبدل خواهد شد. به دلیل اجتناب ناپذیر بودن این کاهش در ضریب انتقال حرارت کلی، سازندگان و طراحان این نوع مبدل‌ها تلاش کرده‌اند تا با استفاده از لوله‌های با سطوح پره‌دار و گسترده این محدودیت را جبران کنند و به همین خاطر است که از پره‌ها برای لوله‌ها استفاده می‌شود تا سطح بیشتری را در برابر هوا ایجاد کنند و ضریب انتقال گرمای نسبتاً پایین هوا را جبران کنند [۱۲].

اغلب در طراحی مبدل‌های حرارتی، محدوده‌ای از ابعاد و اندازه‌های مبدل مورد قبول خواهد بود که بار حرارتی مورد نیاز مبادله شود، افت فشار محاسباتی برای طرف لوله کمتر از حداکثر افت فشار مجاز باشد، افت فشار محاسباتی برای طرف هوا کمتر از حداکثر افت فشار مجاز باشد. از طرفی دیگر در طراحی یک مبدل بهینه، میزان توان و انرژی مصرفی مورد نیاز فن‌ها به عنوان یک عامل مهم همواره مورد توجه قرار می‌گیرد. بنابراین بهترین طرح در یک مبدل باید علاوه بر انجام انتقال حرارت مورد نیاز و داشتن کمترین افت فشار، هزینه‌های ثابت طراحی مبدل و هزینه‌های بهره برداری سیستم را به حداقل برساند. به‌طور کلی در بهینه سازی یک خنک‌کننده هوایی و کاهش دادن توان مصرفی فن باید بر روی افزایش تعداد لوله‌ها، افزایش طول لوله‌ها، افزایش تعداد ردیف‌های لوله، انتخاب نوع پره و تعداد پره در واحد طول لوله تحقیق و بررسی کرد.

لازم به ذکر است که با مطالعات انجام شده در این زمینه و با در نظر گرفتن هزینه مصرفی و بازگشت آن در مدت زمان سپری شده و مقایسه میزان کاهش انرژی توسط هر کدام از عوامل ذکر شده در بالا، این نتیجه بدست آمده است که افزایش تعداد ردیف‌های لوله و انتخاب نوع پره مناسب، به عنوان بهترین عوامل جهت کاهش توان مصرفی فن مورد انتخاب قرار گیرند.

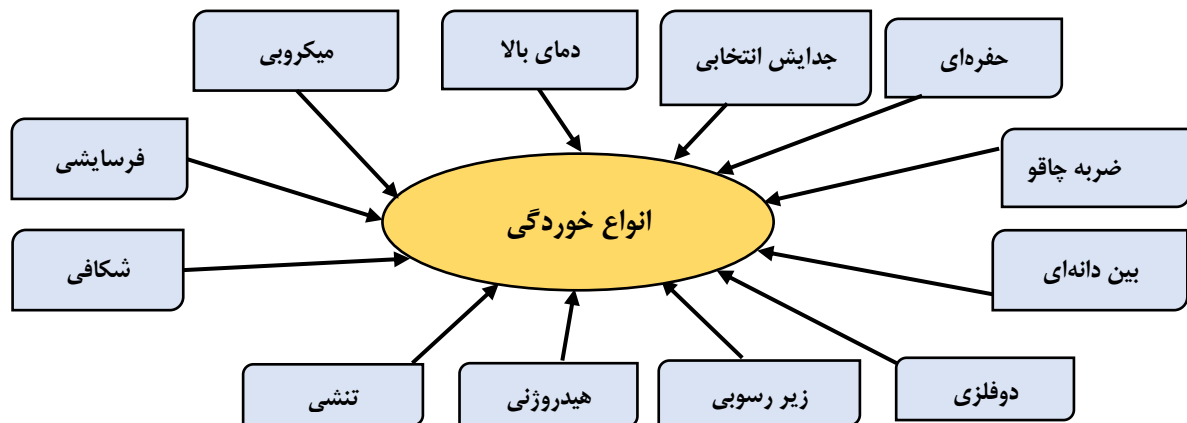
انواع خوردگی و مکانیسم ایجاد آنها

در کل خوردگی به دوازده نوع متفاوت طبقه بندی شده است. آنها به شرح زیر است. طرح‌واره انواع خوردگی‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

خوردگی یکنواخت

در این نوع خوردگی واکنش‌های شیمیایی به‌طور یکنواخت در سطح فلزات با جابجایی پیوسته آند و کاتد صورت می‌گیرد

(۱) Pitting



شکل ۲ - طرح‌واره انواع مختلف خوردگی‌ها در صنعت.

شکل ۴ - خوردگی CO_2 در خط لوله جریان تولید نفت و گاز از جنس فولاد کربنی در دو بزرگنمایی مختلف.

خوردگی شیاری یا شکافی^۲

خوردگی شکافی، نوعی از خوردگی الکتروشیمیایی موضعی است که در شکاف‌ها و در زیر سطوح فلزی پوشش داده شده (به عنوان لایه محافظت‌کننده)، و در جایی که محلول‌های راکد وجود دارد، اتفاق می‌افتد. مکانیزم خوردگی شکافی تا حدود زیادی مشابه با مکانیزم خوردگی حفره‌ای است. این نوع خوردگی بیشتر می‌تواند در زیر واشرها، میخ پرچ‌ها، پین‌ها، دریچه شیرها، محل تکیه‌گاه‌ها و یاتاقان‌ها و زیر رسوبات متخلخل و دیگر موقعیت‌های مشابه به وجود آید [۱۵].



شکل ۳ - سوراخ شدن لوله در اثر خوردگی حفره‌ای.

در سطح فلز بسیار متفاوت است. در نتیجه خسارت‌های ناشی از حفره‌دار شدن و انهدام زودرس بسیار شدید است. به علاوه برای پیش بینی مقاومت یک فلز نسبت به خوردگی حفره‌ای و تعیین عمر آن، روش‌های کاهش وزن و الکتروشیمیایی کاربرد چندانی ندارند. ناخالصی‌های غیر فلزی، ناهمگنی‌های ساختاری و شیمیایی در سطح فلز نقاط متداول مناسبی برای آغاز این نوع خوردگی و شروع ایجاد حفره می‌باشند [۱۶].

خوردگی‌های موضعی از خطرناک‌ترین شکل خوردگی می‌باشند چرا که با تخریب فلز در یک منطقه کوچک سبب تخریب تجهیز می‌شود. نمونه این نوع خوردگی را می‌توان در کف مخازن ذخیره و زیر رسوبات مشاهده نمود. تجمع رسوبات در کف لوله‌ها و تجهیزات فرایندی باعث ایجاد خوردگی زیر رسوبی^۱ که شکلی از خوردگی حفره‌ای نیز می‌باشد، می‌گردد. در شکل ۳ خوردگی حفره‌ای باعث سوراخ شدن لوله شده است. خوردگی حفره‌ای در سیال با سرعت جریان کم رخ می‌دهد. با افزایش فشار جزیی CO_2 و دما، حساسیت به خوردگی حفره‌ای بالا رفته و زمان وقوع آن کاهش می‌یابد. نمونه‌هایی از نازک شدگی موضعی یا خوردگی حفره‌ای ناشی از CO_2 در شکل‌های ۴، الف و ب ارائه شده است.

(۱) Under Deposit Corrosion

(۲) Crevice corrosion



شکل ۶- جوشکاری خط لوله کربن استیل خورده شده در اثر اسید فلوریدریک [۱۷]



شکل ۵- تصویری از خوردگی زیر رسوبی در خطوط حاوی اسید فلوریدریک [۱۷]

شده است، در شکل ۶ نشان داده است. با جوشکاری صحیح و کامل می‌توان تا حد قابل توجهی از خوردگی شیاری در سطح خارجی لوله نیز جلوگیری کرد.

خوردگی رشته‌ای^۲

این خوردگی در زیر سطح رنگی یا آبکاری شده رخ می‌دهد. زمانی که آب روی پوشش شکاف ایجاد می‌کند، خوردگی رشته‌ای با خراش کوچک در پوشش شروع می‌شود. این شکاف گسترش می‌یابد تا باعث سستی سازه شود. این نوع خوردگی برخلاف عدم تشابه ظاهری با خوردگی شیاری یکی از اقسام آن به حساب می‌آید. خوردگی رشته‌ای در سطوح فلزاتی به وجود می‌آید که توسط مواد آلی، لعاب‌ها، لاک‌ها و لایه‌های محافظ پوشانده شده باشد. به همین دلیل گاهی آن را خوردگی زیر پوشش نیز می‌نامند [۱۸]. مهم‌ترین عامل محیطی در این نوع خوردگی، بالا بودن رطوبت نسبی در اتمسفر است، به طوری که در صورت وجود رطوبت ۶۵-۹۰ درصد، این نوع خوردگی ایجاد شده و در کم‌تر از این مقدار اتفاق نمی‌افتد. در صورت بیش‌تر بودن درصد رطوبت روی سطح تاول ایجاد می‌شود. مکانیزم دقیق این نوع خوردگی به طور کامل مشخص نیست. بررسی‌های متعدد روی پوشش‌های فولاد نشان می‌دهد که مکانیزم و مراحل وقوع خوردگی رشته‌ای در فولاد به شرح زیر است:

در مرحله‌ی شروع خوردگی، جذب رطوبت و آب از اطراف به راس رشته به واسطه‌ی غلظت بالای یون‌های آهن اتفاق می‌افتد و رطوبت به طور مداوم از دنباله‌ی غیر فعال به سر فعال رشته نفوذ می‌کند. اکسیژن از طریق عیوب سطحی به داخل پوشش نفوذ کرده و غلظت اکسیژن در فصل مشترک بین دنباله و سر رشته افزایش می‌یابد. با پیدایش و هیدرولیز محصولات خوردگی، pH کاهش یافته، تجمع یون Fe^{2+} و OH^- (ناشی از تشکیل پیل الکتروشیمیایی) باعث شروع و ایجاد خوردگی در سر رشته شده و در نهایت FeO و سپس Fe_2O_3 آب‌دار تشکیل می‌گردد [۱۹].

بیشتر درگوشه‌ها و شیارها و نواحی دیگری روی سطح فلز که حالت مرده دارند^۱ اتفاق می‌افتد یا به عبارتی در جایی که محیط خورنده سکون بیشتری دارد اتفاق می‌افتد. فولادهای زنگ نزن مستعد به خوردگی شیاری هستند.

اساس این نوع خوردگی محبوس شدن الکترولیت در یک شکاف و ایجاد یک پیل اختلاف دمشی است. محلی که فشار اکسیژن کمتری دارد آند می‌باشد که واکنش آندی در آن رخ می‌دهد و واکنش کاتدی احیاء اکسیژن است. این خوردگی دو مرحله دارد. مرحله اول زمانی که درون شیار اکسیژن وجود دارد و واکنش‌های اکسید شدن و احیاء درون شیار اتفاق می‌افتد. هنگامی که اکسیژن درون شیار تمام شد فشار اکسیژن خارج از شیار از فشار اکسیژن داخل شیار بیشتر است که تولید یک پیل اختلاف دمشی می‌کند.

در مرحله دوم بر اثر تمام شدن اکسیژن درون شیار، یون‌های M^{n+} تولید شده در شیار یون‌های منفی که در خارج از شیار است را به سمت خود می‌کشاند، در اینجا یون‌هایی مانند کلر، تولید کلرید فلز می‌دهند و چون کلرید در این محیط ناپایدار است هیدرولیز می‌شود و تولید آب کرده همچنین pH محیط را کم می‌کند و در نتیجه محیطی اسیدی خواهیم داشت. این عامل باعث می‌شود سرعت خوردگی به شدت بالا برود [۱۶].

رسوبات از دیگر عواملی هستند که می‌توانند محیط مناسبی را برای بروز خوردگی شیاری ایجاد نمایند. به عنوان مثال از این رسوبات می‌توان شن، لایه‌های آلودگی، محصولات خوردگی و دیگر جامدات را نام برد. رسوبات می‌توانند در زیر خود محیط مناسب را برای وقوع خوردگی شیاری ایجاد نمایند، لذا در بعضی از مراجع به خوردگی شیاری، خوردگی زیر رسوبی نیز می‌گویند که تصویری از آن در شکل ۵ دیده می‌شود. حضور عوامل خورنده از جمله آب، محیط اسیدی و محیط قلیایی این نوع خوردگی را تشدید می‌کند. تصویری از جوشکاری خط لوله کربن استیل که در صنعت در اثر نفوذ اسید فلوریدریک خط لوله از ناحیه داخلی دچار خوردگی

(۱) Shielded areas

(۲) Filiform corrosion



شکل ۷ - تصویری از خوردگی تنشی ترمیم شده در اطراف پلاگهای کندانسور هوایی.

تنش پسماند در حد بالا می‌تواند از تنش‌های حرارتی در نتیجه سرد کردن غیر یکنواخت (سریع)، طراحی مکانیکی ضعیف برای تنش‌ها، تبدیل فاز هنگام عملیات حرارتی، تغییر شکل سرد و جوشکاری باشد. مکانیزم تخریب در خوردگی تنشی از آنجایی که سیستم‌های بسیار مختلفی از آلیاژها و محیط‌های خورنده وجود دارد بسیار پیچیده است. در موارد بسیاری تخریب از یک حفره یا ناپیوستگی دیگر موجود بر روی سطح فلز شروع و گسترش می‌یابد [۲۶].

در شرایطی که قطعه‌ای تحت تاثیر تنش کششی ثابتی بوده و نیز در محیط خورنده قرار گرفته باشد به علت اثرات همزمان و متقابل این عوامل سرعت و میزان خوردگی شدید می‌گردد که آن را خوردگی تنشی می‌نامند. تنش‌های باقیمانده که به علت‌های مختلف از جمله سوراخ کردن، نورد، اتصالات پرچی، جوشکاری و غیره به وجود می‌آید نیز در این امر دخیل می‌باشد. مهمترین عوامل مؤثر در ترک خوردگی تنشی زمان، درجه حرارت، خوردگی محیط، ترکیب شیمیایی فلز، نوع و مقدار تنش و ساختمان بلوری فلز می‌باشد [۲۷]. ترک‌ها و شکل ترک‌ها نقش اساسی را در این نوع خوردگی دارند. تصویری از خوردگی تنشی که در اثر شوک دمایی در لوله‌های یک کندانسور هوایی در یکی از شرکت‌های پتروشیمی اتفاق افتاده و ترمیم شده است در شکل ۷ نشان داده شده است.

اغلب در صنعت پس از پایان جوشکاری، جهت جلوگیری از خوردگی تنشی عملیات حرارتی، روی نقاط جوشکاری شده صورت می‌گیرد.

خوردگی سایشی^۵

در مواردی که سطح جسمی در نتیجه حرکت سیال حاوی ذرات معلق و حباب‌های گاز سائیده شود به اصطلاح آن را سائیدگی گویند و در حالتی که در اثر خوردگی محیط این انهدام تشدید شود اصطلاح خوردگی سائیدگی بدان اطلاق می‌گردد.

خوردگی گالوانیکی^۱

خوردگی گالوانی نوعی خوردگی الکتروشیمیایی است و هر گاه دو فلز غیر هم جنس در یک الکترولیت تشکیل یک پیل خوردگی دهند، خوردگی گالوانیکی حاصل می‌شود. علت ایجاد این نوع خوردگی در بین فلزات را می‌توان به اختلاف پتانسیل الکتروشیمیایی آنها نسبت داد. سرعت خوردگی به نسبت سطح کاتد و آند بستگی داشته و هر چه سطح کاتد بزرگ‌تر از آند باشد، سرعت خوردگی و از بین رفتن آند بیشتر است. مثال پوشش دادن فولاد با لایه‌ای از قلع یک نمونه از این خوردگی می‌باشد. اگر خراش یا شکافی در سطح خارجی قطعه فولادی قلع اندود شده ایجاد شود، به‌طوری که فولاد به هوای محیط ارتباط پیدا کند، خوردگی در فولاد به وجود آمده و قلع سالم باقی می‌ماند، اما در صورت عدم حضور اکسیژن هوا، قلع نسبت به فولاد آند را تشکیل می‌دهد و در این حالت قلع ماده پوششی مناسبی برای فلزات از جمله ظروف غذایی و آشامیدنی فولادی (استیل) خواهد بود. پس در نتیجه اکسیژن نقش مهمی در خوردگی گالوانیکی دارد [۲۲، ۲۳].

خوردگی بین دانه‌ای^۲

این نوع خوردگی که در مرز دانه‌ها اتفاق می‌افتد از انواع خوردگی موضعی می‌باشد. طی فرایند تشکیل فلز، مرز دانه‌ها آخرین نقاطی هستند که منجمد می‌شوند، لذا غلظت عناصر آلیاژی و ناخالصی در مرز دانه فلزات بیشتر است. اختلاف غلظت آلیاژی بین سطح و مرز دانه‌ها باعث اختلاف انرژی و در نتیجه تمایل به خورده شدن سطح و مرز دانه‌ها می‌شوند و در نهایت مرز دانه‌ها آند و سطح دانه‌ها کاتد می‌شود. برای مثال آلیاژهای آلومینیم با استحکام بسیار بالا و تعدادی از آلیاژهای مس که شامل فازهای رسوبی در مرز دانه‌ها برای افزایش استحکام است می‌توانند تحت شرایط معینی برای خوردگی بین دانه‌ای مستعد باشند. طبیعت فعال تر مرز دانه‌ها نسبت به دانه‌ها باعث می‌شود که اگر یک فلز منجمد یا سرد شده یا در یک شرایط خاص ناپایدار باشد مرز دانه‌ها دچار خوردگی موضعی و متمرکز گردند. نواحی اطراف (دانه‌ها) یا خورده نشده‌اند یا کم خورده شده‌اند، این نوع خوردگی را که اغلب در مرز دانه‌ها اتفاق می‌افتد خوردگی بین دانه‌ای می‌نامند. این نوع خوردگی به وسیله ناخالصی‌ها در مرز دانه‌ها و غنی یا فقیر شدن^۳ نسبت به یک عنصر آلیاژی در این نواحی، واقع می‌شود [۲۴، ۲۵].

خوردگی تنشی^۴

خوردگی تنشی نتیجه تأثیر هم‌زمان تنش‌های مکانیکی و محیط خورنده مناسب بر روی فلز است. این تنش‌های مکانیکی می‌تواند ناشی از تنش‌های خارجی یا داخلی (پسماند) باشد.

(۱) Galvanic Corrosion
(۳) Depletion
(۵) Erosion Corrosion

(۲) Intergranular Corrosion
(۴) Stress corrosion cracking (SCC)

در فلز به‌وجود می‌آید. بنابراین تنها راه جلوگیری این است که از فلزاتی استفاده کرد که عمر طولانی دارند و یا ضخامت را افزایش داده و از جنس مقاوم انتخاب کرد. خوردگی خستگی تقلیل مقاومت خستگی در اثر وجود محیط خورنده می‌باشد.

خوردگی الکتروشیمیایی

پیل‌های الکتروشیمیایی به دو دسته تقسیم می‌شوند: گروه اول پیل‌های با الکتروکود غیرمشابه هستند این نوع پیل‌ها در زمانی به‌وجود می‌آیند که از دو فلز غیر همنام استفاده شود و مطابق جدول اکسایش و کاهش هر چه فاصله بین دو الکتروکود در جدول مذکور بیشتر باشد میزان اختلاف پتانسیل بالاتر در نتیجه خوردگی افزایش می‌یابد که به این حالت اتصال گالوانیک نیز می‌گویند.

گروه دوم پیل‌های با الکتروکود مشابه هستند که در این نوع پیل‌ها الکتروکودها از یک جنس بوده ولی با تغییر در محیط اختلاف لازم به‌وجود آمده است. این پیل‌ها به سه دسته پیل‌های اختلاف دمشی، پیل‌های اختلاف غلظتی و پیل‌های اختلاف دما تقسیم بندی می‌شوند [۳۰]. فرآیند خوردگی اغلب الکتروشیمیایی بوده حاصل انجام هم‌زمان واکنش‌های آندی (اکسایش) و احیای کاتدی (کاهش) روی سطح فلز است. این واکنش‌های الکتروشیمیایی در محل آندها و کاتدهای میکروسکوپی که تمام سطح آهن را پوشش داده‌اند رخ می‌دهند [۳۱]. این نوع پیل‌های الکتروشیمیایی در سیستم‌های تصفیه آب و پساب نیز اتفاق می‌افتد [۳۲-۳۴]

خوردگی قلیایی

به واکنش متقابل هیدروکسید سدیم به نسبت غلیظ با یک فلز خوردگی قلیایی گفته می‌شود که در نتیجه آن گودی‌هایی به شکل نیم‌کره یا بیضوی ایجاد می‌شود. این گودی‌ها ممکن است با محصولات فشرده خوردگی که در بعضی موارد شامل بلورهای مگنتیت درخشان می‌باشد پوشیده شده باشد [۳۵].

برخلاف خوردگی توسط اکسیژن که در هوازداء، مخازن کندانس و اکونومايزر بیشتر اتفاق می‌افتد، خوردگی قلیایی مختص به بویلر است، زیرا این نوع خوردگی زمانی اتفاق می‌افتد که غلظت هیدروکسید قلیایی در آب بالا رود و تنها در بویلر و به علت بالا رفتن pH آب این اتفاق می‌افتد

خسارات هیدروژنی^۳

اتم هیدروژن با داشتن شعاع اتمی در حدود ۰/۳۲ آنگستروم، کوچکترین اتم بوده و به راحتی می‌تواند به داخل شبکه کریستالی فلزات نفوذ کند. نفوذ اتم هیدروژن به داخل فلزات و آلیاژهای مختلف سبب اثر سوء بر خواص مکانیکی آلیاژها می‌شود و مسائل و مشکلات

این صدمات که همواره با سائیدگی مکانیکی قطعات همراه می‌باشد اغلب شدید و سریع صورت می‌گیرد که بیشتر در زانوبی‌ها اتفاق می‌افتد. خوردگی در اثر سایش ناشی از حرکت سیال تشدید می‌شود. با افزایش مواد جامد در سیال این نوع خوردگی تشدید می‌شود. سایش باعث از بین رفتن محصولات خوردگی ایجاد شده در سطح فلز می‌شود و به الکتروولیت اجازه تماس با سطح فلز برای ادامه خوردگی را می‌دهد. خوردگی سایشی دارای ظاهری شیاردار، موجی شکل، سوراخ‌های کروی شکل و ناهموار می‌باشد که در جهت خاصی قرار گرفته‌اند [۲۶].

در حالت کلی سایش به سرعت سیال یک فاز یا دو فازي بودن جریان، خواص سیال، خواص ماده و استحکام بستگی دارد. یک شیوه متداول برای جلوگیری از ایجاد سایش، حذف ذرات ساینده از سیال منتقل کننده حرارت به کمک فیلتر کردن می‌باشد [۲۹].

خوردگی غلظتی

خوردگی زیر رسوبات نام دیگر این نوع خوردگی می‌باشد. خوردگی اکسیژنی نیز از انواع خوردگی غلظتی است. به‌طور مثال پوشیده شدن قسمتی از سطح لوله‌های حفاری توسط گل، محصولات خوردگی و لاستیک حلقوی محافظ لوله‌ها باعث ایجاد این نوع خوردگی می‌شود، اختلاف غلظت اکسیژنی ناحیه پوشیده شده توسط رسوبات و ناحیه آزاد، باعث شده که سطح زیر این رسوبات آند و بقیه لوله کاتد شود.

جدایش انتخابی

جدایش انتخابی جداشدن یکی از عناصر آلیاژی از آلیاژ جامد در فرآیند خوردگی می‌باشد. مشهورترین مثال جدایش روی از آلیاژهای برنج می‌باشد که به‌زدایش روی^۱ معروف است. معمولی‌ترین عناصر که بدین طریق از آلیاژ جدا می‌شوند عبارتند از روی، آلومینیوم، کبالت، نیکل و کرم.

خوردگی خستگی^۲

خستگی مکانیکی عبارت است از پدیده‌ای که به علت وارد شدن تنش‌های مکرر متناوب (کمتر از مقاومت کششی فلز) منجر به شکست فلزات می‌گردد. این تخریب با ظهور ترک‌های بسیار ریز آغاز می‌شود و در صورتی که قطعه‌ای با داشتن شرایط خستگی در محیط خورنده نیز واقع شود دچار ترک خوردگی شدیدتر و سریع‌تر می‌گردد که این حالت خوردگی خستگی می‌نامند. اغلب شکست‌های خستگی در تنش‌های زیر نقطه تسلیم و بعد از تعداد زیادی نوسانات تنشی اتفاق می‌افتد و در اثر کارکرد زیاد

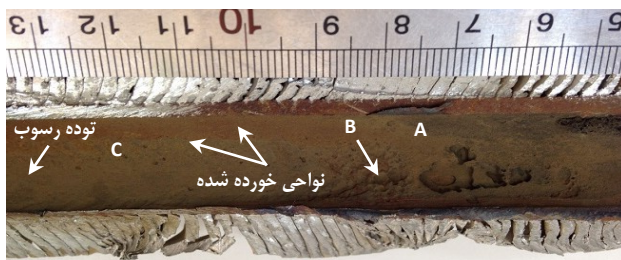
(۱) Dezincification

(۳) Hydrogen Damage

(۲) Fatigue Corrosion



شکل ۸ - تصویری از خوردگی فن‌های هوایی [۳۸].



شکل ۹ - تصویر نمونه لوله خنک‌کننده هوایی پالایشگاه گاز

و در نهایت با آزمایش XRF^۴ می‌توان درصد ترکیبات مختلف در رسوب را گزارش کرد، لازم به ذکر است که با افزایش دما تاثیر خوردگی میکروبی روی سیستم کاهش می‌یابد. تصویری از وقوع خوردگی در فن‌های هوایی در شکل ۸ نشان داده شده است. در یک تجهیز فرایندی خوردگی و رسوب‌گذاری به طور کامل وابسته به همدیگر هستند، در صورتی می‌توان از خوردگی جلوگیری کرد که از رسوب‌گذاری جلوگیری شود و در صورتی می‌توان از رسوب‌گذاری جلوگیری کرد که رسوب را شناخت، بنابراین تجزیه و تحلیل رسوب بسیار مهم خواهد بود. تجزیه و تحلیل رسوب در صنایع بسیار ضروری و مهم است و متأسفانه در شرکت‌های مختلف دستورالعمل مکتوب و مدونی در این زمینه وجود ندارد به طور مثال حضور سولفید آهن در تجزیه و تحلیل رسوب سرخی برای خوردگی میکروبی است. بارها در صنعت نفت دیده شده است که در موقع تعمیرات اساسی^۵ و بیرون کشیدن دسته لوله^۶ یک میدل آبی آتش سوزی ایجاد شده است، زیرا سولفید آهن ناشی از خوردگی میکروبی بسیار آتش‌گیر است.

بررسی خوردگی لوله‌های خنک‌کننده هوایی پالایشگاه گاز

خوردگی لوله‌های خنک‌کننده هوایی از جمله مهمترین مشکلات خوردگی در پالایشگاه گاز محسوب می‌شود. گاز پس از برج‌های جذب وارد این خنک‌کننده‌ها شده و باعث بروز مشکلات خوردگی می‌گردد. با توجه به اطلاعات فنی دریافت شده از بازرسی فنی پالایشگاه گاز پارس جنوبی که در شکل ۹ نشان داده شده است یک نمونه از لوله‌هایی فن هوایی که در سطح داخلی دچار خوردگی شده، نشان داده شده است.

عدیده‌ای را در صنایع به وجود می‌آورد. بر اثر نفوذ هیدروژن اتمی به داخل ساختمان بلوری فولادها، برحسب شرایط مختلفی چون درجه حرارت و استحکام فولاد، پدیده‌های مختلفی به وجود می‌آید که همگی آنها سبب تضعیف خواص مکانیکی فولاد می‌شوند [۳۶]. خسارات هیدروژنی در محیط‌هایی اتفاق می‌افتد که هیدروژن در دما و فشار بالا باشد. اتم‌های هیدروژن به داخل فولادها نفوذ کرده و با کاربیدهای فلزی واکنش داده و به صورت گاز متان در می‌آیند، اما این گاز نمی‌تواند از فولاد خارج شود. بر اثر فشار حاصله از تولید گاز متان حفرات، حباب‌های ریز، میکروتُرک و ترک در زیر ساختار فولاد به وجود می‌آید. هنگامی که ترک‌های به وجود آمده بتوانند روی استحکام کششی فولاد تاثیر گذار باشند، آنگاه شکست و تخریب فولاد صورت خواهد گرفت. گاهی به خسارات هیدروژنی دمای بالا، دکرپوره شدن داخلی^۱ نیز گفته می‌شود.

خوردگی بیولوژیکی

خوردگی میکروبیولوژیکی^۲ به نوعی از خوردگی اطلاق می‌شود که به واسطه میکروارگانیسم‌هایی به وجود آمده باشد، که با چشم غیر مسلح قابل مشاهده نباشند. میکرو جلبک‌ها، قارچ‌ها و باکتری‌ها می‌توانند باعث سرعت بخشیدن به فرایند خوردگی یا تغییر مکانیسم فرایند خوردگی شوند. این موجودات شامل انواع میکروسکوپی مثل باکتری‌ها و انواع ماکروسکوپی مثل جلبک‌ها و جانوران دریایی دیگر هستند. موجودات میکروسکوپی و ماکروسکوپی در محیط‌های دارای pH ۰ تا ۱۱، و درجه حرارت‌های ۳۰ تا ۱۸۰ درجه فارنهایت و تا فشارهای ۱۵۰۰۰ PSI زندگی می‌کنند و تکثیر می‌یابند [۳۵، ۳۶]. در فن‌های هوایی که دمای آنها پایین‌تر از ۱۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد امکان خوردگی میکروبی ناشی از باکتری‌های احیاکننده سولفات وجود دارد که با استفاده از تزریق بازدارنده‌ها این مشکل برطرف می‌گردد.

مطالعات موردی کاربرد تجزیه و تحلیل رسوب در رفع

مشکلات خوردگی فن‌های هوایی

در مطالعات موردی که بر روی رسوبات صورت می‌گیرد باید ابتدا نوع رسوب از نظر آلی و معدنی بودن تشخیص داده شود که با قرار دادن رسوب در کوره مشخص می‌شود به طوری که اگر رسوب آلی باشد در اثر حرارت دادن در کوره آزمایشگاهی به خاکستر تبدیل شده و کاهش وزن زیادی دارد اما رسوب معدنی در این شرایط، کاهش وزن کمتری دارد. اگر رسوبات معدنی بودند با استفاده از تجزیه و تحلیل XRD^۳ که یک روشی نیمه کیفی است می‌توان نوع رسوب را تا حدودی تشخیص داد [۳۷]، به‌طور مثال در رسوبات آهن مگنتیت و هماتیت را می‌توان از هم تشخیص داد

(۱) Internal Decarburization
(۳) X-ray Diffraction
(۵) Overhaul

(۲) Microbial Influenced Corrosion (MIC)
(۴) X-ray Fluorescence
(۶) Tube Bundle

جدول ۱ - نتایج آنالیز شیمیایی لوله کولرهای هوایی با روش کوانتومتری و مقایسه آن با استاندارد.

درصد وزنی عناصر آلیاژ	C	Mn	P	S
لوله	۰,۱۰	۰,۴۲	۰,۰۱۱	۰,۰۰۳
ASTM A179	۰,۰۶ - ۰,۱۸	۰,۲۷ - ۰,۶۳	۰,۰۳۵	۰,۰۳۵

جریان هوا به صورت دستی یا خودکار نیز می‌تواند برای کنترل شرایط عملیاتی به کار رود، اما باز هم کاهش در توان مصرفی توان فن‌ها اتفاق نمی‌افتد. خاموش یا روشن کردن تعدادی از فن‌ها در واحدهای بزرگ که چندین فن دارند، به کنترل دما کمک می‌کند. هر چند که این روش هزینه بر نمی‌باشد اما کنترل دما در این شرایط مشکل است. برای حل این مشکل از موتورهای دو یا چند سرعتی یا فن‌های با دور متغیر استفاده می‌شود. به طور مثال در واحد تبدیل آلکان به آلکن در تولید آلکیل بنزن خطی، با به کارگیری فن‌هایی با دور متغیر، کنترلی پیوسته و دقیق به صورت اتوماتیک روی دمای هیدروژن گردش‌ی فراهم می‌شود.

تأثیر پارامترهای مختلف طراحی بر توان مصرفی فن‌ها

با تغییر پارامترهای مهم طراحی مؤثر بر شرایط عملیاتی و اقتصادی شامل طول لوله، تعداد لوله‌ها، انواع پره‌ها، تعداد پره‌ها در واحد طول، و تعداد ردیف‌های لوله، نحوه تأثیر این تغییرات بر میزان توان مصرفی فن‌های هوایی و هزینه سرمایه‌گذاری عوامل مؤثر روی تعیین نقطه بهینه عملیاتی در خنک‌کننده‌های هوایی می‌باشند. توان مصرفی هر فن، با افزایش تعداد لوله‌ها و در نتیجه افزایش هزینه سرمایه‌گذاری مورد نیاز، کاهش می‌یابد. افزایش طول لوله‌های خنک‌کننده هوایی نیز تأثیر بسزایی در کاهش مصرف توان فن‌ها دارد. اما اگر بیشینه تعداد لوله‌ها در هر پاس و ردیف لوله ثابت بماند، به دلیل عدم امکان قرار گرفتن لوله‌هایی با طول بیشتر در فضای خنک‌کننده هوایی، طراحی فقط در صورت تعویض کامل خنک‌کننده هوایی امکان‌پذیر است. هر چه تعداد ردیف‌ها افزایش یابد، میزان صرفه‌جویی انرژی نیز افزایش خواهد یافت. در این شرایط هزینه سرمایه‌گذاری و فضای محدود عملیاتی موجود در سایت، به عنوان عوامل محدودکننده می‌باشند که با توجه به آنها نقطه بهینه تعیین می‌گردد. یکی دیگر از راهکارهای بهبود عملکرد و افزایش راندمان خنک‌کننده‌های هوایی در حال کار، جایگزینی و به کارگیری پره‌هایی با راندمان بالاتر است که با تعویض لوله‌ها و نصب لوله‌هایی با پره‌های جدید، علاوه بر کنترل دمای فرآیند، توان مصرفی فن‌ها را نیز کاهش می‌دهد.

مؤثرترین راهکار جهت افزایش راندمان خنک‌کننده‌های هوایی

افزایش تعداد پره‌ها در واحد طول لوله، افزایش تعداد لوله‌ها و طول لوله‌ها هر یک به تنهایی و با فرض ثابت ماندن سایر مشخصات هندسی، به دلیل ایجاد تغییرات عمده در ابعاد مبدل، تنها با تعویض کامل آن و جایگزینی یک مبدل با طراحی جدید امکان‌پذیر است. بنابراین مؤثرترین راهکار جهت کاهش توان مصرفی، افزایش تعداد ردیف‌های لوله به همراه تعویض نوع پره‌ها و جایگزینی پره‌های موجود با نوع بهینه می‌باشد.

لوله در سطح خارجی دارای فن‌های آلومینیومی است که فلسفه وجود آن افزایش سطوح انتقال حرارت و سهولت انتقال حرارت است. این فن‌ها از سطح خارجی لوله‌ها جدا شده و سطح لوله به طور کامل صیقل کاری گردید؛ به نحوی که آثاری از این فن‌ها بر جای نمانده باشد. در ادامه، آلیاژ لوله با آزمون کوانتومتری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت تا ترکیب شیمیایی آن تعیین گردد. در جدول ۱ نتایج این آنالیز ارائه شده است. مقایسه نتایج آنالیز با ترکیب شیمیایی ذکر شده در استاندارد ASTM A179 برای فولاد کربنی انطباق دارد. به عبارت دیگر آلیاژ لوله به لحاظ ترکیب شیمیایی منطبق با استاندارد ASTM A179 است.

در سطح داخلی لوله سه ریخت‌شناسی متفاوت رسوب مشاهده می‌شود. بخشی از سطوح داخلی با لایه‌ای به رنگ خاکستری متمایل به سبز (ناحیه A) پوشیده شده است. حفره‌های خوردگی در این بخش لوله تشکیل شده است. سایر سطوح داخلی از وقوع خوردگی موضعی مصون بوده است. بخش دیگری از سطوح داخلی با همان لایه خاکستری متمایل به سبز پوشیده شده ولی وجود مواد رسوبی قرمز-قهوه‌ای (ناحیه ۲) سبب شده بین این دو لایه تمایز رنگ ایجاد شود. روی این لایه (ناحیه B) بر خلاف لایه رسوبی قبلی (ناحیه A) خوردگی حفره‌ای مشاهده نشده است. مرز این دو ناحیه در واقع مرز بین نواحی خورده شده و خورده نشده لوله است. بخش دیگری از سطح داخلی لوله با لایه‌ای به رنگ سبز تیره (ناحیه C) پوشیده شده است. در این نواحی تجمع توده‌های رسوبی مشاهده شده و خوردگی رخ نداده است.

تنظیم بهینه دمای فرآیند و افزایش بازدهی خنک‌کننده هوایی

روش‌های مختلفی جهت دست‌یابی به راندمان بهینه خنک‌کننده‌های هوایی و کنترل شرایط فرآیندی موجود در شرایط آب و هوایی گوناگون به کار می‌رود. در این زمینه تجربیات مختلف نشان داده که این روش‌ها فقط به کنترل شرایط دمایی موجود اکتفا کرده و اثری بر کاهش توان مصرفی فن‌ها ندارد. از مهمترین این روش‌ها می‌توان به قرار دادن دریچه بر سر راه جریان هوا، کنارگذر کردن بخشی از جریان هوای سرد، محدود کردن میزان جریان هوا، استفاده از فن‌های با گام متغیر و کنترل سرعت موتور فن اشاره نمود. از مزایای کنار گذر کردن کنترل دقیق و پیوسته و قیمت اولیه پایین است، اما توان مصرفی را کاهش نمی‌دهد. قرار دادن کرکره‌هایی در مقابل

نحوه تشخیص مشکل خوردگی فن‌های هوایی

در صورتی که یک خنک‌کننده هوایی در صنایع پتروشیمی یا پالایشگاهی به طور مداوم خورده شود و این کار باعث آلودگی محیط زیست، توقف تولید، افزایش ارسال گازهای اضافی به فلر و کاهش سودآوری کارخانه گردد، باید ابتدا فلز را از نظر ترکیب درصد بررسی کرد که با استاندارد مورد نظر مطابقت داشته باشد و تمامی عناصر موجود در بافت فلز در محدوده مورد نظر باشد، سپس آزمایش‌های مکانیکی و آزمایش سختی روی فلز مورد نظر انجام داد که فلز از نظر مکانیکی نیز مشکلی نداشته باشد. یکی از مشکلات خوردگی که در فن‌های هوایی پیش می‌آید به علت ایرادات به وجود آمده در بافت فلز در مرحله ساخت و جوشکاری است که باعث خوردگی مرز دانه‌ای می‌گردد با تصاویر نوری می‌توان به این مشکل و بی‌نظمی‌های ساختاری نیز در بافت فلز پی برد. پس از اطمینان یافتن از بافت فلز وارد مرحله آزمایش‌های رسوب شد و با آنالیز رسوب می‌توان تا حد زیادی مشکل را تشخیص داد. در مطالعه انجام شده قبلی که روی خوردگی فن‌های هوایی یکی از شرکت‌های پتروشیمی صورت گرفت حضور سولفید آهن در نتایج فلویورسانس اشعه ایکس سرنخی برای خوردگی میکروبی و همچنین حضور اکسید آهن به مقدار زیاد نیز شاخصی برای نقش و اثر اکسیژن روی میزان خوردگی بود. مشاهدات ظاهری و کنترل شرایط عملیاتی نیز بسیار تاثیرگذار است با تشکیل رسوب بر سطح داخلی لوله‌ها سطح مقطع عبور جریان کاهش یافته و با توجه به ثابت بودن جریان، سرعت سیال افزایش می‌یابد و این اضافه شدن سرعت می‌تواند منجر به سایش گردد. کیفیت خوراک نیز روی میزان رسوب و به دنبال آن خوردگی در فن‌های هوایی بسیار موثر است طوری که استفاده از صافی‌های مناسب جهت تمیز نمودن خوراک‌های فرایندی بسیار موثر می‌باشد.

تعیین نقطه بهینه عملکرد خنک‌کننده‌های هوایی از دو دیدگاه اقتصاد و عملیات

این نکته به معنای یافتن بهترین نقطه عملکردی است که هم از نظر عملیاتی کارآمدی بالایی داشته باشد و هم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد. این نقطه بهینه با در نظر گرفتن عواملی مانند مصرف انرژی، راندمان خنک‌کنندگی، هزینه‌های نگهداری و نیازهای کاربر تعیین می‌شود. از دیدگاه اقتصادی، هزینه‌های اولیه شامل قیمت خرید و نصب خنک‌کننده و هزینه‌های عملیاتی شامل مصرف برق، آب (در صورت استفاده از خنک‌کننده‌های آبی) و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، و قیمت انرژی است. دمای محیط، رطوبت و سایر عوامل محیطی که بر عملکرد خنک‌کننده تاثیر می‌گذارند. برای یافتن نقطه بهینه، باید هر دو دیدگاه اقتصادی و عملیاتی را در نظر گرفت. به عنوان مثال، ممکن است یک خنک‌کننده با راندمان خنک‌کنندگی بسیار بالا انتخاب شود، اما هزینه‌های اولیه و عملیاتی بالایی داشته باشد. در مقابل، یک خنک‌کننده ارزان قیمت

ممکن است هزینه‌های اولیه کمتری داشته باشد، اما راندمان پایین و هزینه‌های عملیاتی بالایی داشته باشد.

روش‌های بهینه سازی شامل انتخاب خنک‌کننده مناسب، استفاده بهینه از خنک‌کننده، نگهداری و تعمیرات منظم، استفاده از روش‌های کمکی مانند فن‌های سقفی، پرده‌های عایق و ... می‌تواند به بهبود راندمان خنک‌کننده و کاهش مصرف انرژی کمک کند. در نهایت، نقطه بهینه عملکرد خنک‌کننده با توجه به شرایط خاص هر مکان و نیازهای کاربران تعیین می‌شود.

راهکارهای عملی جهت رفع مشکل و افزایش بازدهی فن‌های هوایی

با توجه به تاثیر و ارتباط مهمی که خوردگی و رسوب‌گذاری روی هم دارند، جهت جلوگیری از خوردگی باید از رسوب‌گذاری جلوگیری کرد و جهت جلوگیری از تشکیل رسوب باید ابتدا رسوب را شناخت، لذا تجزیه و شناسایی رسوب‌های صنعتی از اهمیت بالایی برخوردار است.

از جمله عوامل تاثیرگذار روی خوردگی در فن‌های هوایی توزیع نامتقارن خوراک در لوله‌های فن می‌باشد، این توزیع نامتقارن ناشی از نقص طراحی و یا گرفتگی تعدادی از لوله‌های فن به علت تشکیل رسوب در آنهاست. وقتی که حجم زیادی از بخار از تعدادی از لوله‌ها عبور کند، سرعت سیال در آنها زیاد شده و این منجر به خوردگی سایشی ناشی از افزایش سرعت سیال می‌گردد. عامل دیگری که باعث افزایش سرعت سیال در لوله می‌گردد بالا بردن ظرفیت واحد بیشتر از مقدار طراحی است که در این صورت مقدار فلوی گردشی در لوله‌ها افزایش یافته و خوردگی سایشی افزایش می‌یابد.

کیفیت خوراک و میزان ناخالصی‌های آن [۳۹] به طور مستقیم روی خوردگی فن موثر است به طوری که با افزایش ناخالصی در خوراک، تمایل به رسوب‌گذاری آن در لوله‌ها افزایش یافته و با تشکیل رسوب در لوله‌های کندانسور، خوردگی زیر رسوبی تشکیل می‌گردد [۴۰]، طوری که زیر رسوب‌ها غلظت اکسیژن کم شده و خارج رسوب‌ها غلظت اکسیژن زیاد می‌گردد و این اختلاف غلظت منجر به تشکیل پیل غلظتی می‌گردد. در این شرایط در زیر رسوب آند و خارج از رسوب، کاتد تشکیل می‌شود و خوردگی از سمت آند شروع می‌شود. در موقعیت ساعت ششی یک خط لوله، خوردگی زیر رسوبی و از موقعیت ساعت دوازدهی آن نیز خوردگی سایشی اتفاق می‌افتد. در اکثر پژوهش‌های انجام شده محصولات خوردگی در سطح داخلی لوله از نوع اکسید آهن می‌باشد که نشان دهنده نفوذ اکسیژن به درون سیستم فن‌های هوایی است. در ضمن روی سطح داخلی لوله‌ها، خوردگی حفره‌ای ناشی از حضور اکسیژن در اکثر مطالعات مشاهده شده است [۴۱، ۴۲]. حضور اکسیژن نیز عامل مهمی است به طوری که اگر قبل از راه‌اندازی واحدهای صنعتی، اگر فرایند حذف اکسیژن به درستی انجام شود تجهیزات خوردگی کمتری خواهند داشت.

امروزه به منظور افزایش راندمان خنک کننده‌های هوایی روش‌های متداولی نظیر کنارگذر کردن بخشی از جریان هوای سرد، قرار دادن دریچه هوا^۱ بر سر راه جریان هوا و محدود کردن دبی آن، کنترل دور موتور و استفاده از فن‌های با گام متغیر مطرح می‌باشد. با تغییر پارامترهای مهم طراحی مؤثر بر شرایط عملیاتی و اقتصادی شامل طول لوله، تعداد لوله‌ها، انواع پره‌ها، تعداد پره‌ها در واحد طول و تعداد ردیف‌های لوله، نحوه تأثیر این تغییرات بر میزان توان مصرفی فن‌های هوایی و هزینه سرمایه‌گذاری عوامل مؤثر روی تعیین نقطه بهینه عملیاتی در خنک کننده‌های هوایی بررسی شد. کیفیت خوراک نیز روی میزان رسوب و به دنبال آن خوردگی در فن‌های هوایی بسیار مؤثر است طوری که استفاده از صافی‌های مناسب جهت تمیز نمودن خوراک‌های فرایندی بسیار مؤثر می‌باشد. برای یافتن نقطه بهینه، باید هر دو دیدگاه اقتصادی و عملیاتی را در نظر گرفت. روش‌های بهینه سازی شامل انتخاب خنک کننده مناسب، استفاده بهینه از خنک کننده، نگهداری و تعمیرات منظم، استفاده از روش‌های کمکی مانند فن‌های سقفی، پرده‌های عایق و ... می‌تواند به بهبود راندمان خنک کننده و کاهش مصرف انرژی کمک کند. از جمله عوامل تأثیرگذار روی خوردگی در فن‌های هوایی توزیع نامتقارن خوراک در لوله‌های فن می‌باشد. کیفیت خوراک و میزان ناخالصی‌های آن به طور مستقیم روی خوردگی فن مؤثر است. با انجام آزمایش‌های تجزیه و تحلیل رسوب در موقع تعمیرات اساسی عوامل مؤثر بر تشکیل رسوب در فن‌های یک مجتمع پتروشیمی و همچنین ارتباط بین خوردگی و رسوب‌گذاری در آنها مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد و در پایان راهکارهای لازم ارایه می‌گردد.

قردانی

از مرکز پژوهشی جندی شاپور وابسته به دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول بابت حمایت از این پژوهش، تقدیر و تشکر می‌گردد.

در فن‌های هوایی که در بالاسری برج‌ها قرار دارند، لوله‌های فن ابتدا رسوب می‌گیرند بعد خوردگی اتفاق می‌افتد و در حین رسوب گرفتنی سطح مقطع لوله کاهش یافته و سرعت سیال افزایش می‌یابد که باعث تشدید سایش می‌گردد، علاوه بر این در حالت گرفتنی مسیر بالاسری برج حجم تبخیر کاهش یافته که این منجر به بالا رفتن دمای پایین برج می‌گردد و اپراتور مجبور است گرمایش پایین برج را کاهش دهد، بنابراین از این نکته می‌توان فهمید که گرفتنی در مسیر بالاسری برج در حال پیشرفت است. جهت حذف رسوب سطح داخلی لوله‌های فن هوایی، سیستم بهتر است تحت عملیات اسیدشویی قرار گیرد و مواد شیمیایی اکسیژن‌زدا همواره به مقدار کافی و در مکان مناسب به سیستم فن هوایی تزریق گردد. در ضمن مواد شیمیایی مورد استفاده که در انبار نگهداری می‌شود، همواره باید جهت میزان توانایی اکسیژن‌زدایی مورد آزمایش قرار گیرند چون با گذشت زمان خاصیت اکسیژن‌زدایی خود را از دست می‌دهند.

نتیجه‌گیری

به علت کاربرد گسترده فن‌های هوایی در صنعت، جلوگیری از بروز رسوب‌گذاری و به دنبال آن خوردگی در این نوع مبدل‌ها حایز اهمیت است. در صنعت خنک کننده‌های هوایی به طور مداوم دچار خوردگی و نشستی سیال شده و باعث توقف تولید و نیاز به تعمیر و تعویض لوله‌ها و همچنین آلودگی محیط زیست می‌گردند. در مقیاس صنعتی یک نوع خوردگی خاص اتفاق نخواهد افتاد بلکه بیشتر خوردگی‌ها در صنعت، ترکیبی از انواع خوردگی مختلف می‌باشند. در این پژوهش ابتدا ساختار و انواع خنک کننده‌های هوایی بررسی شده و سپس پدیده خوردگی و رسوب‌گذاری در فن‌ها تشریح می‌گردد، علاوه بر آن ضمن توضیح انواع خوردگی، عوامل تأثیرگذار و راهکارهای کاهش خوردگی و رسوب‌گذاری در فن‌های هوایی پیشنهاد داده می‌شود.

مراجع

- [1] Ardy H., Nurimam A., Hamdani M., Abednego T.H., Helmy R.K., Bangun D.A., Setiawan A.R., Wibowo A., Sumboja A., [Failure Analysis of Admiralty Brass Tubes in a Surface Condenser: A Case Study at the Petrochemical Industry](#). *Materials at High Temperatures*, **38(3)**: 177-185 (2021).
- [2] Li Y., Su G., Zhang J., Sandy A., Zhao H., Wang Q., [Failure Analysis of the Collection Pipeline at the Outlet of Air Cooler in the Distillation Column](#). *Eng Fail Anal*, **152**: 107509 (2023).
- [3] Haozhe J., Chenyang Y., Youjie G., Guangwei Q., Xiaofei L., Guofu O., Yongna J., [Experimental and Numerical Investigation on Erosion Corrosion of the Air Cooler Tube Bundle in a Residue Hydrotreating Unit](#). *China Pet Process Petrochemical Technol*, **24(4)**: 151 (2022).

(۱) Louver

- [4] Shokri A., Karimi S., [A Review in Linear Alkylbenzene \(LAB\) Production Processes in the Petrochemical Industry](#). *Russ J Appl Chem*, **94(11)**: 1546-59 (2021).
- [5] Deen K.M., Virk M.A., Haque C.I., Ahmad R., Khan I.H., [Failure Investigation of Heat Exchanger Plates Due to Pitting Corrosion](#). *Eng Fail Anal*, **17(4)**: 886-93 (2010).
- [6] Shokri A., [Synthesize and Characterization of Polysulfone Membrane for the Separation of Hydrogen Sulfide from Natural Gas](#). *Surfaces and Interfaces*, **25**: 101233 (2021).
- [7] Zhu H., Jin H., Zhang S., Liu X., Wang C., [Numerical Simulation and Experimental Studies on the Ammonia Absorption Process by Water Injection in Reaction Effluent Air Cooler System](#). *Chem Eng Sci*, **269**: 118455 (2023).
- [8] Jenbali Jahromi S.A., Janghorban A., [Assessment of Corrosion in Low Carbon Steel Tubes of Shiraz Refinery Air Coolers](#). *Eng Fail Anal*, **12(4)**: 569-77 (2005).
- [9] Shokri A., Sanavi Fard M., [Techno-Economic Assessment of Water Desalination: Future Outlooks and Challenges](#). *Process Saf Environ Prot*, **169**: 564-78 (2023).
- [10] Pandelidis D., Cichoń A., Pacak A., Drąg P., Drąg M., Sierpowski K., Worek W., Cetin S., [Performance Analysis of Rotary Indirect Evaporative Air Coolers](#). *Energy Convers Manag*, **244**: 114514 (2021).
- [11] Klykov M.V., Alushkina T.V., Khasanov R.G., [Optimization of Air Coolers Based on Minimum Reduced Cost Criterion](#). *Chem Pet Eng*, **59(3-4)**: 267-80 (2023).
- [12] Miao D., Zhang Y., Sui X., [Optimization Study on Air Cooler Arrangement and Cooling Parameters of Coal Mining Working Face](#). *Energy*, **291**: 130175 (2024).
- [13] Zhang X., Zhao S., Wang Z., Li J., Qiao L., [The Pitting to Uniform Corrosion Evolution Process Promoted by Large Inclusions in Mooring Chain Steels](#). *Mater Charact*, **181**: 111456 (2021).
- [14] Songbo R., Ying G., Chao K., Song G., Shanhua X., Liqiong Y., [Effects of the Corrosion Pitting Parameters on the Mechanical Properties of Corroded Steel](#). *Constr Build Mater*, **272**: 121941 (2021).
- [15] Yan L., Song G.L., Wang Z., Zheng D., [Crevice Corrosion of Steel Rebar in Chloride-Contaminated Concrete](#). *Constr Build Mater*, **296**: 123587 (2021).
- [16] Costa E.M., Dedavid B.A., Santos C.A., Lopes N.F., Fraccaro C., Pagartanidis T., Lovatto L.P., [Crevice Corrosion on Stainless Steels in Oil and Gas Industry: A Review of Techniques for Evaluation, Critical Environmental Factors and Dissolved Oxygen](#). *Eng Fail Anal*, **144**: 106955 (2023).
- [17] Shokri A., [An Exploration of Corrosion in the HF Neutralization Section at Linear Alkyl Benzene Production Plant](#). *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **39(4)**: 127-135 (2020).
- [18] Cristoforetti A., Rossi S., Deflorian F., Fedel M., [An Electrochemical Study on the Mechanism of Filiform Corrosion on Acrylic-Coated Carbon Steel](#). *Prog Org Coatings*, **179**: 107525 (2023).
- [19] Mengying Z., Bing Y., Huangao X., [Study on the Influence Mechanism of Filiform Corrosion for Aluminum Alloy Decoration in Vehicle Interior Trim](#). *Lect Notes Electr Eng*, **818**: 75-83 (2023).
- [20] Ruiz-Garcia A., Esquivel-Peña V., Genesca J., Montoya R., [Advances in Galvanic Corrosion of Aluminum Alloys](#). *Electrochim Acta*, **449**: 142227 (2023).

- [21] Zheng Z., Xiao L., Huang P., Wang F., Polydopamine Improved Anticorrosion of Graphene on Copper: Inhibiting Galvanic Corrosion and Healing Structure Defects. *Appl Mater Today*, **24**: 101069 (2021).
- [22] Zhang Y., Cheng S., Wu S., Cheng F., The Evolution of Microstructure and Intergranular Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel Joint in Multi-Pass Welding, *J Mater Process Technol*, **277**: 116471 (2020).
- [23] Wang X., Li G., He Q., Jiang J., Li D., Shao W., Zhen L., Intergranular Corrosion of an Al-Cu-Li Alloy: The Influence from Grain Structure. *Corros Sci*, **211**: 110845 (2023).
- [24] Dai H., Shi S., Guo C., Chen X., Pits Formation and Stress Corrosion Cracking Behavior of Q345R in Hydrofluoric Acid. *Corros Sci*, **166**: 108443 (2020).
- [25] Tian H., Cui Z., Ma H., Zhao P., Yan M., Wang X., Cui H., Corrosion Evolution and Stress Corrosion Cracking Behavior of a Low Carbon Bainite Steel in the Marine Environments: Effect of the Marine Zones. *Corros Sci*, **206**: 110490 (2022).
- [26] Chung R.J., Jiang J., Pang C., Yu B., Eadie R., Li D.Y., Erosion-Corrosion Behaviour of Steels Used in Slurry Pipelines. *Wear*, **477**: 203771 (2021).
- [27] Singh J., Singh S., Pal Singh J., Investigation on Wall Thickness Reduction of Hydropower Pipeline Underwent to Erosion-Corrosion Process. *Eng Fail Anal*, **127**: 105504 (2021).
- [28] Noorbakhsh Nezhad A.H., Davoodi A., Mohammadi Zahrani E., Arefinia R., The Effects of an Inorganic Corrosion Inhibitor on the Electrochemical Behavior of Superhydrophobic Micro-Nano Structured Ni Films in 3.5% NaCl Solution. *Surf Coatings Technol*, **395**: 125946 (2020).
- [29] Shi J., Ming J., Wu M., Electrochemical Behavior and Corrosion Products of Cr-Modified Reinforcing Steels in Saturated Ca(OH)₂ Solution with Chlorides. *Cem Concr Compos*, **110**: 103587 (2020).
- [30] Shokri A., Application of Electrocoagulation Process for the Removal of Acid Orange 5 in Synthetic Wastewater. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **38(2)**: 113-119 (2019).
- [31] Bouhezila F., Hariti M., Lounici H., Mameri N., Treatment of the OUED SMAR town Landfill Leachate by an Electrochemical Reactor. *Desalination*, **280(1-3)**: 347-53 (2011).
- [32] Shokri A., Sanavi Fard M., Water-Energy Nexus: Cutting Edge Water Desalination Technologies and Hybridized Renewable-Assisted Systems; Challenges and Future Roadmaps. *Sustain Energy Technol Assessments*, **57**: 103173 (2023).
- [33] Permeh S., Lau K., Duncan M., Simmons R., Identification of Steel Corrosion in Alkaline Sulfate Solution by Electrochemical Noise, *Materials and Corrosion*, **72(9)**: 1456-1467 (2021).
- [34] Pital A., Campbell K., Richards A., Kelly D., Effects of Uranium Metal Carbon Content on Hydriding Kinetics and Corrosion Blister Number/Area at Sub-Ambient Pressures. *J Radioanal Nucl Chem*, 1-10 (2024).
- [35] Shokri A., Sanavi Fard M., Corrosion in Seawater Desalination Industry: A Critical Analysis of Impacts and Mitigation Strategies. *Chemosphere*, 307 (2022).
- [36] Ji P.F., Li B., Chen B.H., Wang F., Ma W., Zhang X.Y., Ma M.Z., Liu R.P., Effect of Nb Addition on the Stability and Biological Corrosion Resistance of Ti-Zr Alloy Passivation Films. *Corros Sci*, **170**: 108696 (2020).

- [37] Abdouss M., Shokri A., Yaghoubi S.H.S., [Cross-Linking in the Molecular Structure of Poly\(vinyl butyral\) and Properties Investigation](#). *Russ J Appl Chem*, **94(12)**: 1614-23 (2021).
- [38] Shokri A., [An Investigation of Corrosion and Sedimentation in the Air Cooler Tubes of Benzene Drying Column in Linear Alkyl Benzene Production Plant](#). *Chem Pap*, **73(9)**: 2265-74 (2019).
- [39] Shokri A., Sanavi Fard M., [A Comprehensive Overview of Environmental Footprints of water Desalination and Alleviation Strategies](#). *Int J Environ Sci Technol*, **20(2)**: 2347-74 (2022).
- [40] Shokri A., Sanavi Fard M., [Under Deposit Corrosion Failure: Mitigation Strategies and Future Roadmap](#). *Chem Pap*, **77(4)**: 1773-1790 (2023).
- [۴۱] جاسم سواری، رضا دهمالی، محمدرضا توکلی شوشتری، ارزیابی مقاومت به خوردگی فلز جوش در اتصالات فولاد میکرو آلیاژ X L5 API ۹۰ با فرآیند GTAW، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، **۳۴(۲)**: ۴۱ تا ۵۱ (۱۴۰۱).
- [۴۲] روزبه اشعری، عبدالمجید اسالمی، مرتضی شمعیان، بررسی خوردگی در فولاد خط لوله جوشکاری شده زیر پوشش جدا شده تحت حفاظت کاتدی، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، **۱۷(۱)**: ۲۱ تا ۳۳ (۱۳۹۷).