بنام خدا

واحد نیروگاه شرکت مبین انرژی خلیج فارس

کنترل کیفیت آب و بخار بویلر

تهیه کننده:

عبدالحمید زارع

بهار ۱۴۰۴

مقدمه

بویلرها یکی از تجهیزات اساسی در صنایع مختلف مانند نیروگاه‌ها، پتروشیمی‌ها، پالایشگاه‌ها، صنایع غذایی و دارویی هستند که وظیفه تأمین بخار برای فرآیندهای تولیدی را بر عهده دارند.

در صنایع پتروشیمی، بویلرها نقش اساسی در تأمین بخار مورد نیاز برای فرآیندهای تولید، انتقال حرارت، و تولید انرژی دارند. کیفیت آب و بخار تولیدی این بویلرها تأثیر مستقیمی بر بهره‌وری، ایمنی، و دوام تجهیزات صنعتی دارد. آب نامناسب می‌تواند منجر به خوردگی، رسوب‌گذاری، کاهش راندمان انتقال حرارت، و مشکلات عملیاتی در سیستم‌های بخار شود که در نهایت هزینه‌های تعمیر و نگهداری را افزایش داده و حتی باعث اختلال در فرآیندهای حیاتی تولید می‌شود.

برای اطمینان از عملکرد بهینه بویلرها و حفظ کیفیت بخار، کنترل دقیق پارامترهایی مانند pH، سختی، رسانایی، اکسیژن محلول، و میزان ناخالصی‌های موجود در بخار ضروری است. استفاده از روش‌های تصفیه آب، کنترل بلودان، و تزریق مواد شیمیایی مناسب نقش مهمی در کاهش خطرات خوردگی و رسوب‌گذاری، افزایش عمر مفید تجهیزات، و بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا می‌کند.

بنابراین، پایش و کنترل کیفیت آب و بخار در بویلرهای صنایع پتروشیمی نه‌تنها موجب افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود، بلکه نقش کلیدی در حفظ ایمنی تجهیزات و پایداری فرآیندهای تولیدی دارد. از جمله دلایل اهمیت استفاده از آب و بخار با کیفیت در صنایع پتروشیمی می توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف) جلوگیری از خوردگی در تجهیزات و خطوط بخار با اکسیژن زدایی و تنظیم pH، که آب با اکسیژن محلول بالا یا pH نامناسب می‌تواند باعث خوردگی لوله‌های بویلر، توربین‌ها و مبدل‌های حرارتی شود.

ب) جلوگیری از رسوب‌گذاری در بویلر و مبدل‌های حرارتی با حذف و کنترل یون‌های سختی (Ca^{2+} و Mg^{2+})، که در صورت کنترل نشدن، روی لوله‌های بویلر و مبدل‌ها رسوب کرده و راندمان انتقال حرارت را کاهش می‌دهند.

ج) بهبود کیفیت بخار و جلوگیری از حمل قطرات آب با بخار (Carryover)، که بخار آلوده به ذرات آب و ناخالصی‌ها می‌تواند باعث خرابی توربین‌ها و تجهیزات حساس شود.

د) افزایش راندمان حرارتی و کاهش مصرف سوخت با جلوگیری کردن از رسوب ذرات و خوردگی لوله ها و تجهیزات، که رسوبات و خوردگی، انتقال حرارت را کاهش داده و مصرف سوخت را افزایش می‌دهند.

ه) افزایش ایمنی در بویلر و جلوگیری از ترکیدن لوله‌ها با جلوگیری از تجمع رسوبات و خوردگی، که وجود این موارد فشار روی لوله‌های بویلر را افزایش داده و خطر ترکیدن آنها را بیشتر می‌کند.

جهت تولید آب و بخار با کیفیت در بویلر، راهکارهایی همچون استفاده از سیستم‌های تصفیه آب پیشرفته برای آب تغذیه بویلر، کنترل دقیق بلودان برای تنظیم رسانایی و حذف ناخالصی‌ها، افزودن مواد شیمیایی برای اکسیژن‌زدایی و کنترل سختی، پایش آنلاین pH، رسانایی، اکسیژن محلول و کیفیت بخار و استفاده از تجهیزات جداسازی بخار و ضد کف برای جلوگیری از Carryover ، استفاده می‌شوند.

بنابر این، اکسیژن‌زدایی، کاهش سختی آب، تنظیم pH و کنترل رسانایی از جمله مهم‌ترین اقدامات برای تولید بخار و آب با کیفیت در بویلر هستند که در این متن، اهمیت هر یک از این عوامل و تأثیر آن‌ها بر عملکرد بویلر بررسی می‌شود.

اکسیژن زدایی

اکسیژن محلول (O_2) یکی از عوامل اصلی خوردگی در بویلرها و سیستم‌های بخار است. اگر اکسیژن در آب بویلر کنترل نشود، با واکنش اکسیداسیون و تشکیل زنگ‌زدگی (اکسید آهن Fe_2O_3)، باعث نازک شدن و یا حذف لایه محافظ اکسیدی (مثل مگنتیت) و در نتیجه خوردگی موضعی (Pitting Corrosion) می شود. این نوع خوردگی، که به شکل حفره‌های کوچک اما عمیق روی سطح فلز ظاهر می‌شود، می‌تواند به سرعت لوله‌های بویلر را سوراخ و تخریب کند.

مشکلات ناشی از وجود اکسیژن محلول در بویلر:

۱) خوردگی لوله‌ها و تجهیزات و در نتیجه کاهش عمر مفید بویلر و افزایش هزینه‌های تعمیر

۲) افزایش خطر نشتی و ترکیدگی لوله‌ها و در نتیجه کاهش ایمنی و عملکرد سیستم

۳) کاهش راندمان بویلر و نیاز به سوخت بیشتر برای جبران کاهش تبادل حرارتی

۴) افزایش هزینه‌های نگهداری و توقف تولید به دلیل نیاز به تعویض قطعات آسیب‌دیده

بنابراین، اکسیژن‌زدایی (Deaeration) یکی از مهم‌ترین اقدامات برای حفظ عملکرد و ایمنی بویلرها است.

تصویر۱: تصاویری از خوردگی موضعی روی لاین ها و تیوب های درون بویلر

استانداردهای جهانی در رابطه با اکسیژن زدایی در بویلر

در بعضی از استانداردهای جهانی در رابطه با کنترل شیمیایی و اکسیژن زدایی بویلر و دیگ های بخار، در مورد مقدار اکسیژن، شرایط نمونه گیری، نحوه اکسیژن زدایی و ... بررسی دقیق صورت گرفته که در ادامه به این استانداردها پرداخته شده است.

مرجع‌های اصلی و کلی که به اکسیژن‌زدایی می‌پردازند

۱. ASME (Consensus / Boiler Water Chemistry guidance)

در این استاندارد و سندی که بعنوان راهنمای جامع پارامترهای آب تغذیه و بویلر و حد هدف اکسیژن می باشد، محدوده‌های اکسیژن محلول (DO: Dissolved Oxygen) براساس فشار مشخص شده است.

۲. API RP 538 (Recommended Practice for Industrial Fired Boilers)

شامل جداول عملیاتی، الزامات طراحی و بهره‌برداری و بخش‌هایی درباره سیستم‌های دی‌ایریتور و کنترل گازهای محلول است.

۳. VGB (VGB-S-010 / VGB Guidelines)

استاندارد اروپایی-صنعتی برای کیفیت آب تغذیه، آب بویلر و بخار که توصیه‌های دقیق برای عملکرد دی‌ایریتور و اکسیژن‌زدایی دارد.

۴. EPRI (راهنماها و گزارش‌های فنی)

گزارش‌ها و مطالعات تخصصی روی عملکرد دی‌ایریتورها، انتخاب اکسیژن‌زداها و ارزیابی اثرات جانبی ارائه می‌دهند.

محدوده مجاز مقدار اکسیژن محلول در استانداردها

هدف اصلی در این استانداردها کاهش اکسیژن محلول تا حدی که خوردگی اکتیو و pitting در لوله‌ها و مبدل‌ها رخ ندهد می باشد و در این استاندردها مقدار مجاز اکیژن محلول (DO) بر اساس فشار بویلر تعیین شده که در جدول زیر این مقدارها آمده است:

جدول ۱: محدوده مجاز مقدار اکسیژن محلول در استانداردها

Boiler pressure	ASME/ABMA	EPRI	VGB (AVT)	VGB (OT)	IS:10392
< 20 bar	< 0.1 ppm	-	-	-	< 0.1 ppm
20–60 bar	< 0.05 ppm	-	-	-	< 0.05 ppm
> 60 bar	< 0.007 ppm (7 ppb)	< 10 ppb	< 10 ppb	30–150 ppb	< 0.02 ppm (20 ppb)

الزامات تاکید شده در استانداردها در رابطه با اکسیژن زدایی:

- پایش و ثبت مستمر غلظت اکسیژن محلول و باقیمانده اکسیژن‌زدا.
- کالیبراسیون و نگهداری سنسورها برای نمونه‌برداری صحیح از بخار و آب.
- تعیین استراتژی شیمیایی مطابق با ترکیب سیستم.
- ملاحظات زیست‌محیطی و ایمنی (محدودیت ایمنی/محیطی هیدرازین).

روش‌های اکسیژن‌زدایی آب بویلر

روش‌های حذف اکسیژن محلول در آب به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: روش‌های مکانیکی (فیزیکی) و روش‌های شیمیایی

روش‌های مکانیکی (فیزیکی) حذف اکسیژن

الف) دی‌ایریتور حرارتی (Deaerator)

در این روش، آب تغذیه بویلر تا نزدیکی نقطه جوش (۱۰۵-۱۱۰ °C) گرم شده و در یک برج دی‌ایریتور از بالا به پایین جریان می‌یابد. بخار داغ از پایین وارد شده و اکسیژن و سایر گازهای محلول را از آب جدا می‌کند.

مزایا:

حذف ۹۹٪ اکسیژن محلول (کاهش اکسیژن به کمتر از ۷ ppb)

کاهش مصرف مواد شیمیایی اکسیژن‌زدا و در نتیجه کاهش هزینه‌های عملیاتی در طولانی‌مدت

معایب:

نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا و همچنین نیاز به بخار کمکی (Steam) برای عملکرد

ب) تانک‌های ذخیره آب تغذیه بویلر با هوادهی بخار

در این روش، بخار به داخل تانک آب تغذیه تزریق شده و اکسیژن را از آب خارج می‌کند. این روش راندمان حذف اکسیژن کمتر از دی‌ایریتورهای استاندارد دارد اما هزینه نصب پایین‌تر می‌باشد.

روش‌های شیمیایی حذف اکسیژن

اگر دی‌ایریتور حرارتی به تنهایی نتواند اکسیژن را به مقدار کافی حذف کند، از مواد شیمیایی اکسیژن‌زدا (Oxygen Scavengers) استفاده می‌شود. این مواد با اکسیژن محلول واکنش داده و آن را از بین می‌برند.

مهم‌ترین مواد شیمیایی اکسیژن‌زدا:

دی‌اتیل هیدروکسیل‌آمین (DEHA)، هیدرازین (N_2H_4) (در برخی کشورها به دلیل سمیت محدود شده است) و سولفیت سدیم (Na_2SO_3) که برای فشارهای پایین و متوسط مناسب است.

DEHA (دی‌اتیل هیدروکسیل‌آمین)

تا به امروز رایج ترین ماده شیمیایی در امر اکسیژن زدایی هیدرازین بوده که بدلیل اثرات نامطلوب بر بدن انسان و محیط زیست، در سال های اخیر، سعی شده که از مواد شیمیایی دیگر بعنوان جایگزین هیدرازین استفاده شود که دی‌اتیل هیدروکسیل آمین (DEHA) بدلیل داشتن ویژگی های زیر یکی از بهترین مواد شیمیایی در اکسیژن زدایی محسوب می شود.

۱) حذف مؤثر اکسیژن که محلول DEHA با اکسیژن واکنش داده و آن را از بین می‌برد.

۲) ایجاد فیلم محافظ روی سطوح فلزی که از خوردگی بیشتر جلوگیری می‌کند.

۳) فاقد اثرات سمی که برخلاف هیدرازین که سرطان‌زا است، DEHA ایمن‌تر است.

۴) مؤثر در طیف وسیعی از دما و فشار که برای بویلرهای فشار بالا نیز قابل استفاده است.

واکنش شیمیایی DEHA با اکسیژن:

DEHA با فرمول شیمیایی $C_4H_{11}NO$ یک احیاکننده قوی است که برای حذف اکسیژن محلول در سیستم‌های آبی (مانند بویلرها) استفاده می‌شود. واکنش کلی آن با اکسیژن به صورت زیر است:

$$4C_4H_{11}NO + O_2 \rightarrow 4C_4H_9NO + 2H_2O$$

در این واکنش، DEHA ($C_4H_{11}NO$) اکسیژن (O_2) را کاهش داده و به دی‌اتیل نیتروکسید (C_4H_9NO) و آب تبدیل می‌شود.

مقدار مورد نیاز DEHA برای حذف اکسیژن:

برای تعیین مقدار استوکیومتری DEHA مورد نیاز برای حذف هر گرم اکسیژن (O_2) ، مراحل زیر را دنبال می‌کنیم:

جرم مولی اکسیژن: $M(O_2) = ۳۲ \text{ gr}$

جرم مولی DEHA: $M(C_4H_{11}NO) = ۸۹ \text{ gr}$

نسبت مولی از واکنش: طبق واکنش بالا، ۴ مول DEHA با ۱ مول O_2 واکنش می‌دهد.

محاسبه مقدار DEHA مورد نیاز برای ۱ گرم O_2 :

$$(٤\times ۸۹) \div ۳۲ = ۱۱/۱۲ \text{ gr}$$

بنابراین، برای حذف ۱ گرم اکسیژن محلول در آب، به حدود ۱۱/۲ گرم DEHA نیاز داریم.

البته قابل ذکر است که طبق استانداردهای مرتبط با اکسیژن زدایی بویلر نیاز مقدار اضاف از ماده اکسیژن زدا می باشد، و می توان تا ۱۱/۵ گرم دها برای ۱ گرم اکسیژن محلول استفاده کرد.

مشکلات رایج در فرایند اکسیژن‌زدایی

اکسیژن محلول در آب بویلر یکی از خطرناک‌ترین عوامل خوردگی در سیستم‌های بخار است. اگر فرایند اکسیژن‌زدایی به‌درستی انجام نشود، خوردگی جدی در خطوط بخار، مخازن، دیگ بخار و تجهیزات جانبی به‌وجود می‌آید که منجر به نشت، ترک، سوراخ شدن تجهیزات و کاهش راندمان سیستم خواهد شد.

در ادامه به بررسی مهم‌ترین مشکلات رایج در اکسیژن‌زدایی و راه‌حل‌های آن‌ها می‌پردازیم:

۱) عملکرد ضعیف دی‌ایریتور (Deaerator)

دی‌ایریتور که برای حذف گازهای محلول مانند اکسیژن و دی‌اکسیدکربن به روش مکانیکی طراحی شده، اگر به درستی عمل نکند، مقدار زیادی اکسیژن در آب باقی می‌ماند که دلایل آن می تواند دمای بخار ورودی کمتر از حد نیاز (زیر ۱۰۴ °C-۱۰۵)، فشار بخار پایین یا نوسانات شدید فشار، خرابی یا گرفتگی نازل‌ها یا پاشنده‌های داخلی دی‌ریتور، تجمع رسوب در دی‌ایریتور و تنظیم نادرست سطح آب یا شناورها باشد.

راه‌حل‌ها:

- اطمینان از دمای بخار ورودی بالاتر از ۱۰۵ °C
- بررسی فشار و تثبیت آن در سطح مناسب (معمولاً ۰/۲–۰/۳ MPa)
- سرویس و پاک‌سازی نازل‌ها و شست‌وشوی داخلی دی‌ریتور
- بررسی دوره‌ای سطح آب و عملکرد سیستم کنترلی

۲) تزریق ناکافی یا بیش از حد مواد شیمیایی اکسیژن‌زدا

دوز پایین شیمیایی اکسیژن‌زدا باعث باقی‌ماندن اکسیژن محلول می‌شود و دوز بیش‌ازحد باعث افزایش رسانایی و آلوده‌کردن بخار می شود. از جمله دلایل باعث این اتفاق، می تواند محاسبه اشتباه مقدار ماده شیمیایی مورد نیاز، نوسان دبی آب جبرانی بدون تنظیم دوز تزریق وتزریق دستی و غیردقیق باشد.

راه‌حل‌ها:

- استفاده از فرمول دقیق محاسبه دوز DEHA که برای حذف ۱ میلی‌گرم اکسیژن، حدود ۱/۳ میلی‌گرم DEHA نیاز است.
- نصب سیستم دوزینگ اتوماتیک متصل به دبی‌سنج و سنسور اکسیژن.
- نمونه‌برداری منظم و تنظیم دوز با توجه به شرایط واقعی سیستم.

۳) نشت هوا به سیستم (ورود اکسیژن از بیرون)

حتی اگر آب به‌خوبی اکسیژن‌زدایی شده باشد، نشت هوا از طریق اتصالات، فلنج‌ها یا پمپ‌ها باعث ورود مجدد اکسیژن به سیستم می‌شود. از جمله دلایل این مورد می تواند نشتی در خط مکش پمپ یا اتصالات، درب مخازن نیمه‌باز یا سیستم‌های بسته‌بندی نشده یا خلأ در لوله‌کشی که باعث مکش هوا می‌شود، باشد.

راه‌حل‌ها:

- تست فشار منفی یا تست نشتی با فشار هوا
- آب‌بندی و تعویض واشرها و فلنج‌های آسیب‌دیده
- استفاده از دریچه‌های ضدخلأ و تنظیم فشار داخلی

۴) محل نامناسب تزریق مواد شیمیایی اکسیژن‌زدا

تزریق ماده در نقطه‌ای که فرصت کافی برای واکنش با اکسیژن وجود ندارد باعث ناکارآمدی در حذف اکسیژن می‌شود.

راه‌حل‌ها:

- بهترین محل برای تزریق DEHA یا سولفیت: خروجی دی‌ایریتور یا ابتدای خط تغذیه به بویلر
- استفاده از میکسر استاتیک یا همزن برای اختلاط بهتر
- بررسی زمان ماند مواد شیمیایی در مسیر پیش از ورود به بویلر

۵) عدم مانیتورینگ دقیق اکسیژن محلول

بدون پایش لحظه‌ای، افزایش ناگهانی اکسیژن قابل‌تشخیص نیست و خوردگی بدون هشدار قبلی رخ می‌دهد.

راه‌حل‌ها:

- استفاده از سنسورهای اکسیژن آنلاین
- کالیبراسیون دوره‌ای سنسورها
- ثبت مداوم داده‌ها و هشدار خودکار در صورت افزایش سطح اکسیژن

جمع‌بندی

وجود اکسیژن محلول در بویلر می تواند باعث مشکلات بسیاری ازجمله خوردگی لوله‌ها و تجهیزات، افزایش خطر نشتی و ترکیدگی لوله‌ها، کاهش راندمان بویلر و افزایش هزینه‌های نگهداری و توقف تولید شود. بنابراین، اکسیژن‌زدایی (Deaeration) یک فرایند بسیار مهم برای حفظ کیفیت آب و جلوگیری از خوردگی تجهیزات بویلر می باشد. استانداردسازی های بسیاری در رابطه با اکسیژن زدایی صورت گرفته که می توان با در نظر گرفتن آنها، ریسک و خطرات احتمالی را کاهش داد و سبب افزایش بهره بری شد.

در کل یک سیستم اکسیژن‌زدایی مؤثر باید ترکیبی از موارد زیر را داشته باشد:

عملکرد مناسب دی‌ایریتور ، محاسبه دقیق دوز مواد شیمیایی، تزریق در محل مناسب، پایش دقیق و مستمر و پیشگیری از نشت هوا

سختی آب بویلر

سختی آب یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد بویلرها است و به میزان یون‌های کلسیم (Ca^{2+}) و منیزیم (Mg^{2+}) در آب بستگی دارد. وجود این یون‌ها در آب بویلر می‌تواند منجر به تشکیل رسوبات سخت روی سطوح انتقال حرارت، کاهش راندمان بویلر، افزایش مصرف سوخت، و حتی آسیب‌های جدی به تجهیزات شود.

رسوبات ناشی از سختی آب، مانند کربنات کلسیم و سیلیکات‌ها، باعث ایجاد یک لایه عایق حرارتی روی لوله‌های بویلر شده که انتقال حرارت را مختل کرده و باعث افزایش دمای فلزات و در نتیجه ترک‌خوردگی و خرابی آنها می‌شود. همچنین، رسوبات می‌توانند جریان آب را محدود کرده و منجر به انسداد لوله‌ها و کاهش ظرفیت تولید بخار گردند.

مشکلات ناشی از سختی آب در بویلر:

۱) تشکیل رسوب در لوله‌ها و سطوح حرارتی:

یون‌های سختی در دمای بالا با سایر مواد واکنش داده و ترکیبات نامحلول (کربنات و سولفات کلسیم) ایجاد می‌کنند که روی سطوح فلزی رسوب می‌کنند.

۲) کاهش راندمان انتقال حرارت:

رسوبات مانند یک عایق حرارتی عمل کرده و باعث می‌شوند انرژی بیشتری برای گرم کردن آب نیاز باشد.

۳) افزایش مصرف سوخت:

برای جبران کاهش انتقال حرارت، بویلر باید سوخت بیشتری مصرف کند که باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود.

۴) خطر ترکیدن لوله‌ها:

تجمع رسوبات روی لوله‌ها باعث افزایش دمای فلز و ایجاد تنش حرارتی شده که می‌تواند به ترکیدگی لوله‌ها منجر شود.

۵) مسدود شدن مسیرهای عبور آب و بخار:

رسوبات می‌توانند باعث کاهش جریان آب و بخار شوند و عملکرد بویلر را مختل کنند.

۶) افزایش نیاز به بلودان:

برای کاهش سختی و یون‌های اضافی، نیاز به بلودان (Blowdown) بیشتری است که باعث هدررفت آب و انرژی می‌شود.

بنابراین، کنترل سختی آب برای افزایش عمر بویلر، کاهش هزینه‌های انرژی و جلوگیری از خرابی ضروری است.

استانداردهای مرتبط با سختی آب بویلر

در بحث سختی آب و حذف کاتیون‌های سنگین (کلسیم، منیزیم، آهن، مس و ...) برای آب تغذیه و آب بویلر، استانداردهای معتبر جهانی مثل ASME، IAPWS، EN، IS، VGB، ASTM مقادیر مشخصی ارائه کرده‌اند. این مقادیر به فشار کاری بویلر و نوع آن بستگی دارد.

۱. ASME (American Society of Mechanical Engineers)

در این استاندارد برای آب تغذیه بویلر (Boiler Feedwater) مقدار سختی کل ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) باید برابر با صفر باشد و کلسیم و منیزیم به طور کامل حذف شوند. همچنین، طبق این استاندارد مقدار سختی کل برای آب و بخار درون درام های بویلر در فشارهای بیش از ۴۰ bar باید برابر با صفر و در فشارهای کمتر از ۲۰ bar مقدار $CaCO_3$ می تواند در محدوده ۰/۰۵ ppm – ۰/۰۲ باشد.

۲. IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam)

طبق این استاندارد مقدار سختی کل در آب تغذیه بویلر باید کمتر از ۰/۰۰۵ ppm باشد و وجود کلسیم و منیزیم مجاز نمی باشد و مقدار آهن (Fe)و مس (Cu) مجموعاً باید کمتر از ۲۰µg/L باشد.

۳. VGB (European Boiler Standard)

در این استاندارد برای آب تغذیه HRSG و نیروگاه‌های بخار، مقدار کلسیم و منیزیم باید برابر با صفر، مقدار سدیم کمتر از ۲۰ µg/L و مقدار سیلیکا در فشارهای بالا کمتر از ۲۰ µg/L باشد.

۴. ASTM (American Society for Testing and Materials, D1192, D5127)

طبق این استاندارد مقدار سختی کل در آب بویلر در فشار ۰ تا ۲۰ bar باید کمتر از ۰/۱ ppm، در فشار ۲۰ تا ۴۰ bar کمتر از ۰/۰۲ ppm و در فشارهای بالاتر از ۶۰ bar باید صفر باشد

۵. IS (Indian Standard IS 10496)

طبق این استاندارد مقدار کلسیم و منیزیم باید صفر، مقدار آهن کمتر از ۰/۱ ppm و مقدار مس کمتر از ۰/۰۵ ppm باشد.

جدول ۲: سختی و کاتیون‌های سنگین در استانداردهای مختلف

استاندارد	$Ca^{2+} + Mg^{2+}$ (سختی کل)	Fe (آهن)	Cu (مس)	فشار بالا(>40 bar)
ASME	0 ppm	<0.05 ppm	<0.05 ppm	صفر
IAPWS	<0.005 ppm	<0.02 ppm	<0.02 ppm	صفر
VGB	ND	<0.02 ppm	<0.02 ppm	صفر
ASTM	0.1 → 0.02 → ND	<0.05 ppm	<0.05 ppm	صفر
IS	ND	<0.1 ppm	<0.05 ppm	صفر

در تمام استانداردهای جهانی، سختی (کلسیم و منیزیم) باید عملاً صفر باشد، مخصوصاً در بویلرهای فشار بالا و .HRSG وجود حتی مقادیر جزئی سختی باعث تشکیل رسوب در لوله‌ها، کاهش انتقال حرارت، و بروز مشکلات جدی می‌شود. همچنین کنترل فلزات سنگین (Fe, Cu) اهمیت زیادی دارد چون در خوردگی و انتقال رسوب به بویلر نقش دارند.

روش‌های کاهش سختی آب بویلر

روش‌های حذف سختی آب به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۱) روش‌های پیش‌تصفیه (قبل از ورود آب به بویلر)

۲) روش‌های شیمیایی (داخل بویلر)

روش‌های پیش‌تصفیه برای کاهش سختی آب

این روش‌ها قبل از ورود آب به بویلر استفاده می‌شوند تا از تشکیل رسوب جلوگیری شود.

الف) سختی‌گیر رزینی (تبادل یونی Ion Exchange):

در این روش از رزین‌های تبادل یونی استفاده می‌کند که یون‌های سختی (Ca^{2+} و Mg^{2+}) را با یون‌های سدیم (Na^{+}) جایگزین می‌کنند و مناسب برای بویلرهای فشار پایین و متوسط هستند.

واکنش شیمیای:

$2RNa + Ca^{2+} \rightarrow R_2Ca + 2Na^{+}$

مزایا: حذف کامل سختی موقت و دائم، هزینه عملیاتی پایین و عدم تولید رسوب در بویلر.

معایب: نیاز به احیا با محلول نمک (NaCl) و نیاز به تصفیه بیشتر در بویلرهای فشار بالا.

ب) اسمز معکوس (RO - Reverse Osmosis)

در این روش، آب تحت فشار از یک غشای نیمه‌تراوا عبور داده می‌شود که یون‌های سختی، نمک‌ها و ناخالصی‌ها را حذف می‌کند و مناسب برای بویلرهای فشار بالا می‌باشد.

مزایا: حذف ۹۵-۹۹٪ یون‌های محلول، کاهش TDS و رسانایی آب و جلوگیری از خوردگی و رسوب‌گذاری.

معایب: هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا و نیاز به شستشوی دوره‌ای غشاها (Fouling).

ج) دی‌یونایزر (Demineralization - DM Water)

در این روش از دو نوع رزین استفاده می‌شود: کاتیونی (حذف Ca^{2+} وMg^{2+}) و آنیونی (حذف SO_4^{2-} وCl^{-}) استفاده شده و مناسب برای بویلرهای فوق فشار بالا (Supercritical Boilers) می‌باشد.

مزایا: حذف کامل تمام یون‌ها و مناسب برای بویلرهای حساس.

معایب: هزینه بالا و نیاز به نگهداری دقیق.

روش‌های شیمیایی برای کنترل سختی در داخل بویلر

این روش‌ها زمانی استفاده می‌شوند که سختی باقی‌مانده در آب تغذیه هنوز قابل توجه باشد.

الف) تزریق فسفات برای کنترل سختی در بویلر:

فسفات‌ها (Na_3PO_4، $NaHPO_4$، Na_2HPO_4) به آب بویلر اضافه می‌شوند تا یون‌های کلسیم (Ca^{2+}) را به شکل لجن نامحلول تبدیل کنند که در بلودان تخلیه می‌شود.

مزایا: جلوگیری از تشکیل رسوب سخت در بویلر و آسان و ارزان بودن روش

معایب: اگر فسفات بیش از حد باشد، باعث ایجاد رسوب چسبنده می‌شود.

واکنش فسفات با کلسیم و منیزیم:

فسفات‌ها با یون‌های کلسیم و منیزیم واکنش داده و رسوبات نامحلول تشکیل می‌دهند که برای کنترل سختی آب استفاده می‌شود.

۱) واکنش فسفات با کلسیم:

$3Ca^{2+} + 2PO_4^{3-} \rightarrow Ca_3(PO_4)_2$

۲) واکنش فسفات با منیزیم:

$Mg^{2+} + 2PO_4^{3-} \rightarrow Mg_3(PO_4)_2$

محاسبه مقدار فسفات مورد نیاز برای حذف کلسیم و منیزیم:

۱) برای کلسیم:

جرم مولی کلسیم: ۴۰ $\frac{gr}{mol}$

جرم مولی تری‌کلسیم فسفات: ۳۱۰$\frac{gr}{mol}$

نسبت مولی از واکنش: ۳ مول کلسیم به ۲ مول فسفات

جرم فسفات مورد نیاز برای حذف ۱ گرم کلسیم:

$(۲\times۹۵)\div(۳\times۴۰)$=۱/۵۸ gr

۲) برای منیزیم:

جرم مولی منیزیم: $\frac{gr}{mol}$ ۲۴/۳

جرم مولی منیزیم فسفات: $\frac{gr}{mol}$ ۲۶۲

نسبت مولی از واکنش: ۳ مول منیزیم به ۲ مول فسفات

جرم فسفات مورد نیاز برای حذف ۱ گرم منیزیم:

$(۲\times۹۵)\div(۳\times۲۴/۳)$=۲/۱۷ gr

بنابر این برای حذف ۱ گرم کلسیم به ۱,۶ گرم فسفات و برای حذف ۱ گرم منیزیم به ۲/۲ گرم فسفات نیاز است.

ب) تزریق پلی‌فسفات و عامل کیلیت (Chelating Agents)

EDTA یا NTA با یون‌های سختی تشکیل کمپلکس محلول می‌دهند که از رسوب‌گذاری جلوگیری می‌کند .

مزایا: کنترل سختی بدون تولید رسوب و مؤثر در بویلرهای فشار بالا

معایب: گران‌تر از فسفات و در دوزهای بالا می‌تواند باعث خوردگی مس و آلیاژهای آن شود.

کنترل سختی آب با بلودان (Blowdown)

اگر سختی در بویلر بیش از حد بالا برود، بخشی از آب بویلر تخلیه شده و با آب تازه جایگزین می‌شود.

فرمول محاسبه درصد بلودان :

درصد بلودان = (رسانایی آب بویلر ÷ رسانایی آب تغذیه) × ۱۰۰

اجزای فرمول:

رسانایی آب بویلر(Boiler Water Conductivity) : رسانایی آب در داخل بویلر بر حسب (µS/cm)

رسانایی آب تغذیه(Feed Water Conductivity) : رسانایی آب ورودی به بویلر بر حسب (µS/cm)

نتیجه: درصد آب تخلیه شده به کل حجم آب بویلر.

مثال:

اگر رسانایی آب بویلر ۲۰۰۰ µS/cm و رسانایی آب تغذیه ۵۰۰ µS/cm باشد:

درصد بلودان = (۵۰۰)÷(۲۰۰۰× ۱۰۰) =۲۵ ٪

مشکلات رایج در فرایند کنترل سختی آب بویلر و راه‌حل‌های آنها

کنترل سختی آب بویلر یکی از اصول حیاتی در بهره‌برداری ایمن و مؤثر از سیستم‌های بخار است. سختی بالا باعث تشکیل رسوب، کاهش راندمان انتقال حرارت، افزایش مصرف انرژی و حتی خرابی بویلرها می‌شود. در ادامه، مشکلات رایج در کنترل سختی و راه‌حل‌های مؤثر برای آن‌ها به‌صورت کامل ارائه شده است:

۱) عملکرد نامناسب سیستم‌های پیش‌تصفیه (Softener یا RO)

عبور سختی باقی‌مانده به بویلر به دلیل نقص در سیستم سختی‌گیر یا اسمز معکوس که دلیل آن می تواند اشباع رزین تبادل یونی، زمان‌بندی نادرست احیا (Regeneration)، خستگی یا آسیب دیدگی غشاهایRO و تزریق نکردن مواد ضد رسوب (Antiscalant) باشد.

راه‌حل‌ها:

- سرویس و شستشوی دوره‌ای رزین‌ها
- بررسی و اصلاح برنامه احیا و استفاده از آب نمک با کیفیت
- شستشوی شیمیایی (CIP) برای ممبران‌ها
- نصب سختی‌سنج آنلاین بعد از سیستم پیش‌تصفیه برای هشدار سریع

۲) تزریق ناکافی یا نامناسب مواد شیمیایی تنظیم سختی در بویلر

تزریق نادرست فسفات‌ها یا مواد سختی‌گیر در بویلر باعث کنترل نشدن سختی باقیمانده می‌شود که دلیل آن می تواند محاسبه اشتباه مقدار تزریق، عدم انحلال کامل ماده شیمیایی و تزریق در نقطه نامناسب سیستم باشد.

راه‌حل‌ها:

- استفاده از فرمول دقیق برای تزریق فسفات بر اساس سختی باقیمانده
- تزریق فسفات در خط ورودی به بویلر یا در درام بخار
- تهیه محلول کاملاً حل شده و استفاده از دوزینگ پمپ با دقت بالا

۳) پایش نامنظم و آزمون‌های اشتباه در اندازه‌گیری سختی

پایش نامنظم و آزمون‌های اشتباه در اندازه‌گیری سختی سبب نتایج غیرواقعی و در نتیجه باعث تصمیم‌گیری اشتباه در کنترل مواد شیمیایی می‌شود. از جمله دلایل این مورد می تواند کیت آزمایش قدیمی یا خراب و نمونه‌گیری نادرست (از نقاط نامناسب یا آلوده) باشد.

راه‌حل‌ها:

- استفاده از تجهیزات تست کالیبره‌شده یا سنسورهای سختی آنلاین
- نمونه‌گیری از نقاط استاندارد و بلافاصله بعد از تخلیه
- آموزش اپراتورها برای انجام صحیح آزمون‌ها

۴) سختی ناشی از آب جبرانی یا نشت در بای‌پس‌ها

ورود آب سخت به بویلر از مسیرهای غیرکنترل‌شده که دلایل آن می تواند نشت از ولوها یا خط کنارگذر (Bypass) و استفاده مستقیم از آب خام بدون عبور از سیستم سختی‌گیر باشد.

راه‌حل‌ها:

- بررسی و مسدودسازی بای‌پس‌های ناخواسته
- استفاده از فلو کنترلر و لاک ولو برای خطوط مهم
- آنالیز آب جبرانی و ممنوعیت استفاده از آب سخت در شرایط اضطراری

۵) تشکیل رسوب در بویلر و عدم تخلیه مناسب (بلودان ناکافی)

تجمع سختی و ذرات بدون تخلیه منجر به رسوب می‌شود که از جمله دلایل آن می تواند نبود برنامه منظم بلودان، تنظیم نادرست مقدار یا زمان تخلیه و عدم استفاده از کنترل اتومات بلودان باشد.

راه‌حل‌ها:

- تنظیم بلودان براساس رسانایی و غلظت سختی (TDS/Conductivity)
- استفاده از بلودان اتوماتیک با سنسور هدایت الکتریکی
- ثبت و تحلیل منظم داده‌های بلودان و تطبیق با شرایط بهره‌برداری

۶) مشکلات ناشی از شوک بار (Load Variation) در بویلر

افزایش ناگهانی یا کاهش بار باعث تغییرات سختی در آب درام می‌شود.

راه‌حل‌ها:

- برنامه‌ریزی تزریق فسفات بر اساس نرخ بار بویلر
- استفاده از کنترلر PID برای دوزینگ فسفات در بارهای متغیر
- آماده‌سازی مخازن ذخیره آب با کیفیت در زمان افزایش بار ناگهانی

جمع‌بندی:

سختی آب باید قبل از ورود به بویلر و در داخل بویلر کنترل شود. روش‌های مکانیکی مانند سختی‌گیر رزینی و RO برای حذف سختی قبل از بویلر انجام می شوند و تزریق فسفات و مواد شیمیایی داخل بویلر صورت می گیرد و از تشکیل رسوب جلوگیری می‌کند. علاوه بر این موارد بلودان هم یک راهکار مهم برای کنترل سختی و رسانایی آب بویلر می باشد.

بنابر این کنترل صحیح سختی آب بویلر مستلزم پیش‌تصفیه مؤثر و مداوم، تزریق دقیق مواد شیمیایی، پایش پیوسته سختی با ابزارهای دقیق، مدیریت صحیح بلودان و جلوگیری از ورود آب با سختی خارج از کنترل می باشد.

رسانایی (Conductivity)

رسانایی آب بویلر یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترل کیفیت آب است که نشان‌دهنده میزان یون‌های محلول و ناخالصی‌های موجود در آب می‌باشد. افزایش بیش از حد رسانایی می‌تواند منجر به تشکیل رسوب، خوردگی، کاهش راندمان حرارتی، و بروز مشکلاتی مانند Carryover (حمل آب همراه با بخار) شود که عملکرد تجهیزات را مختل می‌کند.

برای کنترل رسانایی آب بویلر، روش‌های مختلفی به‌کار گرفته می‌شود که مهم‌ترین آنها بلودان (Blowdown) یا تخلیه آب بویلر است. بلودان به کاهش غلظت املاح و یون‌های محلول در آب کمک کرده و از تجمع رسوبات و افزایش هدایت الکتریکی جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، استفاده از سیستم‌های تصفیه آب ورودی (مانند اسمز معکوس (RO) و دی‌یونایزر (DM)) و تزریق مواد شیمیایی مناسب می‌تواند نقش مؤثری در تنظیم رسانایی داشته باشد.

تنظیم صحیح رسانایی آب بویلر، بهره‌وری حرارتی را افزایش داده، مصرف سوخت را کاهش می‌دهد و از آسیب‌های احتمالی به تجهیزات بخار جلوگیری می‌کند. بنابراین، پایش و کنترل مداوم این پارامتر، به‌ویژه در صنایع حساس مانند پتروشیمی، نیروگاه‌ها، و صنایع تولیدی، امری ضروری برای حفظ عملکرد پایدار و ایمن بویلرها است.

بنابراین اهمیت تنظیم رسانایی آب بویلر در جلوگیری از خوردگی و رسوب‌گذاری، جلوگیری از تشکیل کف (Foaming) و حمل آب توسط بخار (Carryover) و افزایش راندمان حرارتی و کاهش مصرف سوخت، می باشد.

استاندارد های مرتبط با رسانایی آب بویلر

استانداردهای جهانی مثل **ASME، IAPWS، VGB، ASTM و IS** محدوده‌های مجاز رسانایی را بر اساس فشار بویلر و محل نمونه‌برداری (آب تغذیه، درام، بویلر بلودان) مشخص کرده‌اند.

جدول ۳: مقایسه رسانایی آب بویلر در استانداردهای جهانی

Boiler pressure	ASME (µS/cm)	IAPWS (µS/cm)	VGB (µS/cm)	ASTM (µS/cm)	IS (µS/cm)
Feedwater	0.3 – 0.5 (CACE)	≤0.2 (CACE)	≤0.2 (CACE)	0.1–0.2	≤0.2
0–20 bar	≤7000	≤1500	≤3000	≤7000	≤3500
20–40 bar	≤2500	≤1200	≤2000	≤3000	≤2000
40–60 bar	≤2000	≤1000	≤1500	≤2000	≤1500
>60 bar	≤1000	≤800	≤1000	≤1000	≤1000
Steam	—	≤0.2	≤0.2	≤0.2	≤0.2

با توجه به این اطلاعات هرچه فشار بویلر بیشتر باشد، باید رسانایی آب پایین‌تر باشد. رسانایی کاتیونی (CACE) شاخص اصلی برای پایش کیفیت آب تغذیه و تشخیص ورود یون‌های آلاینده (مثل سدیم و سیلیکا) است. در بویلرهای HRSG فشار بالا، رسانایی باید **زیر** ۱۰۰۰ µS/cm و رسانایی کاتیونی زیر ۰/۲ µS/cm کنترل شود.

روش‌های تنظیم رسانایی آب بویلر

الف) کنترل بلودان (Blowdown)

بلودان، مهم‌ترین روش تنظیم رسانایی آب بویلر است.

با تخلیه بخشی از آب بویلر که دارای املاح زیاد است و جایگزینی آن با آب تصفیه‌شده، رسانایی کاهش می‌یابد .

فرمول ساده محاسبه درصد بلودان :

درصد بلودان = (رسانایی آب بویلر ÷ رسانایی آب تغذیه) × ۱۰۰

ب) استفاده از آب با کیفیت مناسب (پیش‌تصفیه آب تغذیه بویلر)

هرچه آب ورودی به بویلر (DM Water) کیفیت بهتری داشته باشد، رسانایی داخل بویلر نیز کمتر خواهد بود .

روش‌های تصفیه آب برای کاهش رسانایی آب تغذیه:

اسمز معکوس (RO)

دی‌یونایزر (Demineralization)

رزین‌های تبادل یونی

ج) استفاده از مواد شیمیایی مناسب برای کنترل یون‌های محلول

برخی مواد شیمیایی می‌توانند یون‌های اضافی را حذف کرده یا از رسوب‌گذاری آنها جلوگیری کنند، مانند:

فسفات‌ها برای حذف سختی آب

آمین‌های فرّار برای کنترل pH و جلوگیری از خوردگی

مواد ضد کف برای جلوگیری از Carryover

د) پایش و کنترل خودکار رسانایی

نصب سنسورهای آنلاین رسانایی به بویلر این امکان را می‌دهد که بلودان و تزریق مواد شیمیایی را به‌صورت اتوماتیک تنظیم کند.

اندازه‌گیری دستی و آزمایشات دوره‌ای نیز برای اطمینان از عملکرد صحیح سیستم ضروری است.

مشکلات رایج در فرایند کنترل رسانایی آب بویلر و راه‌حل‌های آنها

کنترل رسانایی (Conductivity) آب بویلر یکی از عوامل بسیار مهم در حفظ عملکرد صحیح سیستم بخار و جلوگیری از مشکلاتی مانند تشکیل رسوب، خوردگی، Carryover (کشیده شدن آب به بخار) و افزایش TDS است. در ادامه به بررسی مشکلات رایج در کنترل رسانایی آب بویلر و راه‌حل‌های کاربردی آن‌ها می‌پردازیم:

۱) بلودان ناکافی یا نامنظم

رسانایی بالا معمولاً نتیجه تجمع نمک‌ها و مواد محلول در آب بویلر است که اگر بلودان به‌اندازه انجام نشود، منجر به افزایش رسانایی خواهد شد. عدم وجود بلودان به‌اندازه می‌تواند به دلیل تنظیم دستی اشتباه بلودان ، قطع یا خرابی پمپ بلودان یا ولو تخلیه و یا عدم تطبیق نرخ بلودان با بار بویلر، باشد.

راه‌حل‌ها:

- استفاده از بلودان خودکار کنترل‌شده با سنسور رسانایی
- برنامه‌ریزی زمان‌بندی تخلیه دستی براساس آنالیز روزانه
- تنظیم بلودان براساس مقدار TDS مجاز یا نسبت غلظت مجاز بین آب تغذیه و بویلر

۲) ورود آب تغذیه با رسانایی بالا

در صورت عدم کنترل کیفیت آب تغذیه، آب دارای نمک‌ها یا آلاینده‌ها وارد بویلر شده و رسانایی را افزایش می‌دهد. این مورد می‌تواند بدلیل عملکرد ناقص سیستم اسمز معکوس (RO) یا دمینرالایزر، نشت از خطوط بای‌پس (Bypass) و یا استفاده اضطراری از آب خام بدون تصفیه باشد.

راه‌حل‌ها:

- بررسی دوره‌ای غشاهای RO و رزین‌های یون‌زدا
- نظارت دقیق بر کیفیت آب ورودی (TDS پایین‌تر از ۲۰–۳۰ µS/cm)
- نصب رسانایی‌سنج در خروجی واحدهای پیش‌تصفیه

۳) تزریق بیش‌ازحد مواد شیمیایی (مانند فسفات، DEHA، سولفیت و ضدخوردگی‌ها)

اگر مواد شیمیایی بیش از مقدار مورد نیاز تزریق شوند، علاوه بر هدر رفت هزینه، رسانایی آب بویلر افزایش می‌یابد. این مورد می‌تواند بدلیل عدم محاسبه دقیق دوز تزریق، خرابی دوزینگ پمپ و یا اختلال در برنامه دوزدهی اتوماتیک باشد.

راه‌حل‌ها:

- استفاده از فرمول‌های دقیق محاسبه دوز شیمیایی
- پایش مرتب پارامترهای کنترلی مانند فسفات باقی‌مانده، سولفیت، اکسیژن وpH
- کالیبراسیون و بازبینی دوزینگ پمپ‌ها

۴ .خرابی یا کالیبر نبودن سنسور رسانایی

خطا در قرائت رسانایی، ممکن است منجر به تصمیم‌گیری اشتباه در مورد بلودان شود. این مورد می‌تواند بدلیل رسوب یا آلودگی الکترود سنسور، آسیب یا خرابی کابل و ترنسمیتر و یا عدم کالیبراسیون دوره‌ای، باشد.

راه‌حل‌ها:

- شست‌وشوی منظم سنسور با محلول‌های مناسب (مثل اسید رقیق یا محلول پاک‌کننده)
- تعویض سنسورهای معیوب
- کالیبراسیون با محلول‌های استاندارد رسانایی

۵) تغییرات بار بویلر و تولید بخار ناپایدار

نوسانات در نرخ تولید بخار و ورود ناگهانی حجم زیاد آب جبرانی با رسانایی متفاوت باعث تغییرات سریع در رسانایی می‌شود.

راه‌حل‌ها:

- استفاده از سیستم کنترل PID برای بلودان بر اساس فیدبک رسانایی

- جلوگیری از شوک‌های حرارتی و بارهای ناگهانی
- پایش پیوسته نرخ جریان و تنظیم تزریق مواد شیمیایی براساس آن

۶. Carryover (حمل شدن ذرات آب توسط بخار)

این امر رسانایی بخار تولید شده به‌طور غیرعادی افزایش می‌یابد و باعث خوردگی در خطوط بخار و تجهیزات می‌شود. دلیل ایجاد شدن Carryover می‌تواند کیفیت پایین آب بویلر، افزایش بیش از حد TDS و رسانایی و یا تشکیل فوم (Foaming) ناشی از مواد آلی یا املاح باشد.

راه‌حل‌ها:

- کاهش رسانایی آب بویلر به محدوده استاندارد (مثلاً زیر ۲۰۰۰ µS/cm)
- استفاده از ضد فوم و مواد کنترل فوم
- بلودان بیشتر برای کاهش مواد محلول و جلوگیری از کشیده شدن آب

جمع‌بندی:

رسانایی آب بویلر باید در محدوده مجاز باشد تا از خوردگی، رسوب، اتلاف انرژی و مشکلات بخار جلوگیری شود. برای رسیدن به این امر باید به سه مورد زیر توجه ویژه داشت:

- بلودان، مهم‌ترین روش تنظیم رسانایی است که باید به‌صورت بهینه انجام شود.
- استفاده از آب با کیفیت و مواد شیمیایی مناسب نیز تأثیر بسزایی در کنترل رسانایی دارد.
- پایش و کنترل خودکار رسانایی باعث افزایش راندمان و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود.

بنابر این کنترل رسانایی آب بویلر نیازمند پایش دقیق و منظم با سنسورهای دقیق، تنظیم صحیح بلودان، کنترل دقیق تزریق مواد شیمیایی و مدیریت آب جبرانی و بار حرارتی بویلر می باشد.

PH آب بویلر

pH آب بویلر یکی از پارامترهای کلیدی در حفظ عملکرد صحیح سیستم‌های بخار است. pH نامناسب می‌تواند باعث خوردگی شدید در لوله‌ها، توربین‌ها و مبدل‌های حرارتی یا تشکیل رسوبات مضر در بویلر شود. اگر pH آب بیش از حد اسیدی (پایین) باشد، خوردگی اسیدی رخ می‌دهد که باعث کاهش عمر تجهیزات و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. در مقابل، pH بیش از حد قلیایی (بالا) می‌تواند باعث ایجاد رسوب و مشکلاتی مانند حمل آب همراه با بخار (Carryover) شود که عملکرد سیستم را مختل می‌کند. رسوبات کربناتی و سیلیکاتی ایجاد شده به‌عنوان یک لایه عایق بین آب و سطح انتقال حرارت عمل کرده و راندمان بویلر را کاهش می‌دهند. همچنین، رسوبات می‌توانند جریان آب را محدود کرده و خطر انسداد لوله‌ها را افزایش دهند.

برای کنترلpH ، روش‌هایی مانند تزریق مواد قلیایی (مانند هیدروکسید سدیم یا فسفات‌ها) و حذف گازهای اسیدی (مانند دی‌اکسید کربن) از طریق دی‌ایریتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، پایش مداوم pH و تنظیم دقیق آن با کنترل بلودان و استفاده از مواد شیمیایی مناسب به جلوگیری از مشکلات احتمالی کمک می‌کند.

حفظ pH در محدوده بهینه (معمولاً بین ۹ تا ۱۱ برای آب بویلر) نقش مهمی در افزایش راندمان، کاهش مصرف انرژی، جلوگیری از خرابی تجهیزات، و افزایش طول عمر سیستم بخار دارد. از این رو، تنظیم صحیح pH یکی از اصول اساسی مدیریت کیفیت آب در بویلرهای صنعتی، به‌ویژه در صنایع حساس مانند پتروشیمی، نیروگاه‌ها و صنایع فرآیندی است.

استانداردهای مرتبط با pH آب بویلر

استانداردهای جهانی مثل ASME، IAPWS، VGB، ASTM و IS محدوده‌های مجاز pH را برای فشارهای مختلف تعیین کرده‌اند که داده های این استانداردها در جدول زیر آمده است.

جدول ۴: مقایسه محدوده pH آب بویلر بر اساس استانداردها

Boiler Pressure	ASME	IAPWS	VGB	ASTM	IS
Feedwater	8.5 – 9.2	9.2 – 9.8	9.0 – 9.6	8.5 – 9.2	8.5 – 9.0
0–20 bar	10.5 – 11.0	9.6 – 10.2	10.5 – 11.0	10.0 – 11.0	10.5 – 11.0
20–40 bar	10.0 – 10.8	9.4 – 10.0	10.0 – 10.5	9.5 – 10.5	10.0 – 10.5
40–60 bar	9.5 – 10.2	9.2 – 9.8	9.6 – 10.2	9.2 – 10.0	9.5 – 10.0
>60 bar	9.0 – 9.6	9.2 – 9.6	9.2 – 9.6	9.0 – 9.6	9.0 – 9.5

چکیده اطلاعات جدول بالا بصورت زیر می باشد:

آب تغذیه: کمی قلیایی نگه داشته می‌شود (pH حدود ۸٫۵ تا ۹٫۶) برای جلوگیری از خوردگی.

آب بویلر: هرچه فشار بالاتر باشد، محدوده pH پایین‌تر در نظر گرفته می‌شود (برای جلوگیری از حمل سیلیکا و قلیا به بخار).

فشار پایین: pH بالاتر (۱۰٫۵–۱۱٫۰) برای جلوگیری از رسوب و خوردگی.

فشار بالا: pH نزدیک به خنثی ولی قلیایی ملایم (۹٫۰–۹٫۶) برای حفاظت از سیستم و جلوگیری از حمل قلیا.

روش‌های تنظیم pH آب بویلر

تنظیم pH آب بویلر معمولاً از طریق ترکیبی از روش‌های زیر انجام می‌شود:

الف) افزودن مواد قلیایی (برای افزایشpH)

سدیم هیدروکسید(NaOH) و آمین‌ها (مانند مورفولین یا سایر آمین‌های قلیایی) رایج‌ترین موادی هستند که برای افزایش pH آب بویلر استفاده می شوند. در این بین اضافه کردن NaOH رایج تر بوده و باعث افزایش بلافاصله pH می‌شود اما باید با دقت کنترل شود تا از افزایش بیش از حد جلوگیری شود.

آمین‌ها هم علاوه بر تنظیمpH ، یک لایه محافظ روی سطوح فلزی ایجاد کرده و از خوردگی جلوگیری می‌کنند. آمین‌ها به تدریج و به صورت یکنواخت pH را افزایش می‌دهند.

ب) بلودان (Blowdown)

بلودان یکی از روش‌های غیرشیمیایی تنظیم pH و رسانایی آب بویلر است. با تخلیه بخشی از آب بویلر که حاوی مواد محلول و املاح بیش از حد است، می‌توان pH را به مقدار مطلوب نزدیک‌تر کرد. مقدار درصد مورد نیاز آب بویلر که باید از طریق بلودان تخلیه شود با رابطه زیر محاسبه می شود:

درصد بلودان = (رسانایی آب بویلر ÷ رسانایی آب تغذیه) × ۱۰۰

تنظیم مناسب بلودان به حفظ تعادل شیمیایی و کاهش تجمع مواد محلول کمک می‌کند.

ج) استفاده از مواد تنظیم کننده ترکیبی

یکی از رایج ترین موادی که برای تنظیم pH در بویلرها استفاده می شود فسفات ها هستند. زیرا علاوه بر تنظیم مقدارسختی آب را هم تنظیم کرده و از تشکیل رسوب جلوگیری می کند. واکنش‌های فسفات با یون‌های سختی و جلوگیری از تشکیل رسوب، محیطی مناسب برای انتقال حرارت را فراهم می‌کنند.

د) پایش و کنترل مداوم pH

سنسورهای آنلاین pH و آزمایش‌های دوره‌ای:

نصب سنسورهای دقیق در بویلر امکان پایش لحظه‌ای pH را فراهم می‌کند. این اطلاعات به سیستم کنترل خودکار اجازه می‌دهد تا به صورت بلادرنگ دوز مواد شیمیایی را تنظیم کرده و از نوسانات شدید جلوگیری نماید. علاوه بر این، بررسی دستی و دوره‌ای آب بویلر توسط آزمایشگاه‌های تخصصی نیز کمک می‌کند تا از صحت عملکرد سیستم اطمینان حاصل شود.

مشکلات رایج در کنترل pH آب بویلر و راه‌حل‌ها

کنترل pH آب بویلر از مهم‌ترین اصول بهره‌برداری ایمن و بهینه از بویلرهاست pH .نامناسب می‌تواند باعث خوردگی شدید، کاهش عمر تجهیزات، تشکیل رسوب یا فوم و حتی انفجار لوله‌ها شود. در ادامه به مشکلات رایج در کنترل pH بویلر و راه‌حل‌های مؤثر آن‌ها می‌پردازیم:

۱) pH پایین (اسیدی شدن محیط بویلر)

pH پایین باعث خوردگی شدید در لوله‌ها، درام بویلر و خطوط بخار می‌شود که دلایل آن می‌تواند ورود آب تغذیه با pH پایین، تزریق ناکافی مواد قلیایی (مثل تری‌سدیم‌فسفات یا هیدروکسید سدیم)، دی‌اکسید کربن باقی‌مانده در آب تغذیه (CO_2) و یا حضور اکسیژن محلول و نبود دها، باشد.

راه‌حل‌ها:

- تزریق دقیق مواد قلیایی جهت افزایش pH (به‌ویژه در فشار پایین‌تر)

- کنترل اکسیژن محلول با مواد اکسیژن‌زدا
- دی‌گازینگ کامل آب تغذیه
- تنظیم تزریق فسفات یا کائوستیک طبق فرمول سختی

۲) pH بالا (قلیاییت بیش از حد)

pH بالا ممکن است باعث شکست ساختار محافظ فلزی، افزایش رسوب فسفات و پدیده Caustic Embrittlement (ترک ناشی از قلیا) شود. دلیل ایجاد pH بالا می‌تواند تزریق بیش از حد NaOH یا فسفات‌ها، کنترل نادرست دوزینگ مواد شیمیایی و یا عدم رقیق‌سازی صحیح مواد قبل از تزریق باشد.

راه‌حل‌ها:

- پایش روزانه و تنظیم دوز تزریق طبق آزمونpH
- استفاده از دوزینگ پمپ با کنترل خودکار
- کاهش دوز تزریق مواد قلیایی به صورت تدریجی
- در صورت نیاز، افزایش بلودان برای کاهش تجمع یون‌های قلیایی

۳) نوسان pH به دلیل ناپایداری شرایط بهره‌برداری

نوسانات سریع در pH ممکن است باعث Shock خوردگی یا تغییر ناگهانی رفتار شیمیایی شود. این نوسانات pH می‌تواند بدلیل نوسانات بار بویلر، عدم هماهنگی بین تزریق مواد و نرخ تبخیر آب و یا تأخیر در پایش یا پاسخ‌دهی به تغییرات pH باشد.

راه‌حل‌ها:

- استفاده از کنترلر pH آنلاین
- تزریق تدریجی مواد با استفاده ازPID Controller
- تنظیم جریان مواد شیمیایی بر اساس نرخ تبخیر و فشار بویلر

۴) خرابی یا کالیبر نبودن سنسورهایpH

سنسور خراب یا ناپایدار ممکن است اطلاعات اشتباه به اپراتور یا سیستم کنترل بدهد. این خرابی می‌تواند بدلیل رسوب‌گرفتگی سنسور، شست‌وشوی نامناسب الکترود و یا استفاده طولانی‌مدت بدون کالیبراسیون باشد.

راه‌حل‌ها:

- شست‌وشوی منظم الکترود با محلول‌های مناسب
- تعویض سنسورهای قدیمی و استفاده از سنسور با رنج مناسب
- کالیبراسیون با بافرهای استاندارد (pHهای ۴، ۷ و ۱۰)

۵) ورود مواد مزاحم از آب جبرانی یا سیستم کندانس

ورود مواد آلی، آمین‌ها یا گازهای خورنده از کندانس برگشتی یا آب جبرانی باعث تغییرات ناگهانی در pH می‌شود.

راه‌حل‌ها:

- آنالیز و حذف کندانس آلوده از چرخه
- نصب تله بخار مناسب برای جلوگیری از نشت مواد
- حذف CO_2 با استفاده از دگازور حرارتی یا شیمیایی

جمع بندی

تنظیم دقیق pH آب بویلر نقش اساسی در جلوگیری از خوردگی و رسوب‌گذاری، افزایش بهره‌وری انتقال حرارت و کاهش هزینه‌های نگهداری سیستم دارد. استفاده از مواد قلیایی مانند NaOH و آمین‌های قلیایی، کنترل مناسب بلودان، و بهره‌گیری از فسفات‌ها در کنار پایش مداوم pH ، از جمله راهکارهایی هستند که با همکاری یکدیگر می‌توانند شرایط بهینه آب بویلر را ایجاد کنند. این اقدامات نه تنها عمر تجهیزات را افزایش می‌دهد، بلکه کارایی سیستم را نیز بهبود می‌بخشد.

جمع‌بندی راهکارهای مؤثر کنترل pH بویلر:

۱) آنالیز و ثبت منظم pH در نقاط کلیدی (Feed, Drum, Condensate)

۲) تزریق مواد قلیایی طبق فرمول‌بندی و دوز استاندارد

۳) استفاده از سیستم کنترل خودکار و سنسورهای کالیبره‌شده

۴) مدیریت کیفیت آب تغذیه و جلوگیری از ورود آلودگی

۵) بلودان منظم برای تنظیم یون‌ها و جلوگیری از افزایش بیش از حد قلیاییت

نتیجه‌گیری

کنترل کیفیت آب و بخار در سیستم‌های بویلر یکی از مهم‌ترین عوامل در حفظ عملکرد ایمن، بهینه و اقتصادی تجهیزات در صنایع مختلف، به‌ویژه پتروشیمی، نیروگاهی، غذایی و دارویی است. هرگونه سهل‌انگاری در مدیریت کیفیت آب بویلر می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی مانند خوردگی، رسوب، ترک‌های حرارتی، کاهش راندمان انتقال حرارت، آسیب به تجهیزات و حتی توقف تولید شود.

برای دستیابی به کیفیت مطلوب آب و بخار، باید مجموعه‌ای از پارامترهای کلیدی به‌صورت پیوسته، دقیق و اصولی کنترل شوند که عبارتند از:

۱) حذف اکسیژن محلول (اکسیژن‌زدایی)
جلوگیری از خوردگی داخلی خطوط بخار و دیواره‌های بویلر
استفاده از روش‌های حرارتی و شیمیایی (مانند DEHA و سولفیت)

۲) کاهش سختی آب
جلوگیری از رسوب‌گذاری روی لوله‌ها و مبدل‌ها
استفاده از سیستم‌های تبادل یونی، اسمز معکوس، رزین‌های سختی‌گیر و تزریق فسفات

۳) تنظیم و پایش pH
پیشگیری از خوردگی در pH پایین و شکنندگی قلیایی در pH بالا
استفاده از مواد قلیایی مانند NaOH، TSP با دوز کنترل‌شده

۴) کنترل رسانایی (Conductivity)
سنجش میزان املاح محلول و نمک‌ها برای جلوگیری از Carryover
تنظیم بلودان به صورت دستی یا خودکار برای حفظ رسانایی در محدوده مجاز

۵) بلودان هدفمند
تخلیه حجم مشخصی از آب بویلر جهت کنترل TDS، pH و رسانایی
کمک به پایدارسازی ترکیب شیمیایی و جلوگیری از تجمع ناخالصی‌ها

۶) پایش کیفیت بخار و کندانس برگشتی
جلوگیری از ورود آلاینده‌ها از خطوط برگشتی
حفظ خلوص بخار و جلوگیری از خوردگی در تجهیزات ثانویه

۷) مستندسازی و پایش مداوم
ثبت روزانه نتایج آنالیز
استفاده از سیستم‌های آنلاین و کنترل خودکار برای افزایش دقت و سرعت واکنش به تغییرات

همچنین، بر اساس استانداردهای معتبر جهانی نظیر ASME, ABMA, VGB و IAPWS، محدوده‌های دقیق برای اکسیژن محلول، سختی کل، کاتیون‌های سنگین، رسانایی، فسفات، سیلیکا و pH تعیین شده‌اند که رعایت آن‌ها تضمین‌کننده ابزایش طول عمر تجهیزات،بالا رفتن بازده حرارتی بویلر و توربین، کاهش هزینه‌های نگهداری و توقفات اضطراری و در نهایت تامین ایمنی فرایند و پایداری تولید در صنایع حساس می باشد.

جدول۵: حدود شیمیایی آب بویلر بر اساس فشار کاری در استاندارد ASME

پارامتر	**0–300 psig (<20 bar)**	**301–450 psig (20–31 bar)**	**451–600 psig (31–41 bar)**	**601–750 psig (41–52 bar)**	**751–900 psig (52–62 bar)**	**901–1000 psig (62–69 bar)**	**1001–1500 psig (69–103 bar)**	**1501–2000 psig (103–138 bar)**
pH (درام)	11.5–10.5	11.5–10.5	11.2–10.5	11.0–10.5	10.8–10.2	10.6–10.0	10.5–9.5	10.0–9.0
هدایت ویژه (µS/cm)	≤5400	≤4600	≤3800	≤1500	≤1200	≤1000	≤150	≤80
TDS (ppm)	700–3500	600–3000	500–2500	200–1000	150–750	125–625	≤100	≤50
قلیاییت کل (as $CaCO_3$, ppm)	≤350	≤300	≤250	≤200	≤150	≤100	—	—
سیلیکا، SiO_2 (ppm)	≤150	≤90	≤40	≤30	≤20	≤8	≤2	≤1
سولفیت باقیمانده (ppm as SO_3)*	60–30	40–20	30–15	20–10	10–5	8–3	—	—
فسفات باقیمانده (ppm as PO_4^{3-})	40–20	30–15	20–10	15–8	12–6	10–4	8–3	5–2