University of Tehran Press

Journal of Environmental Studies
Vol. 49, No. 4, Winter 2024

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir
Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Microbial Corrosion Affected by Environmental Factors in Cooling Tower of Bandar Abbas Power Plant

Majid Ghahraman Afshar[1]✉, Mohsen Esmaeilpour[2], Hossein Ghaseminejad[3]

1. Chemical and Process Engineering Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran. Email: mghahramanafshar@nri.ac.ir
2. Chemical and Process Engineering Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran. Email: mesmaeilpour@nri.ac.ir
3. Chemical and Process Engineering Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran. Email: hghaseminejad@nri.ac.ir

Article Info

Research Article:
Research Paper

Article history:
Received 20 March 2023
Received in revised from 29 October 2023
Accepted 31 October 2023
Publish online 3 November 2023

Keywords:
Bandar Abbas power plant, Corrosion monitoring, Cooling towers, Microbial corrosion, Total bacteria count.

ABSTRACT

The water of Persian Gulf, which is currently used as the water in the cooling tower for Bandar Abbas power plant has high alkalinity, conductivity and salinity. The examination of microbial tests for the cooling tower indicates the high concentrations of all kinds of microbial species which is related to the high level of fluoride, sulfate ions and sediments. The TBC shows 10^4 cfu/ml which is considered a high value. On the other hand, the presence of magnesium and calcium ions in carbonate form is a reason for the huge amount of hardness. The high level of ions concentration especially chloride and magnesium in the cooling water increase the growth of microbial parameters. Furthermore, the reason of such a huge growth of sulfate-reducing bacteria (SRB) is the high concentration of sulfate. Therefore, the solution of reducing the general concentration of ions using methods such as reverse osmosis and ion exchange resins is suggested as the first priority to prevent microbial corrosion. Additionally, chlorination methods are proposed as the second priority due to economic efficiency and high-performance capability. Finally, ozonation method is presented as the third priority due to the higher cost compared to chlorination, high power and the absence of side products. Also, the high concentration of sulfate leads to the activity of SRB bacteria and causes various types of corrosion, and therefore, the use of methods for reducing the concentration and selective removal of sulfate as an effective and priority solution should be considered.

Cite this article: Ghahraman Afshar, M., Esmaeilpour, M., Ghaseminejad, H. (2024). Microbial Corrosion Affected by Environmental Factors in Cooling Tower of Bandar Abbas Power Plant. Journal of Environmental Studies, 49 (4), 389- 400.
DOI: http//doi.org/10.22059/JES.2023.356713.1008395

© The Author(s). **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/JES.2023.356713.1008395

Extended abstract

Introduction

Microbial corrosions are generally wet corrosions that occur due to contact of metal with water. Therefore, the occurrence of microbial corrosion in the water and steam-water cycle and the cooling tower of power plants is probable. However, according to the operating conditions of thermal boilers and high pressure and temperature, the possibility of the existence of microorganisms and microorganisms in these conditions is low. However, there is a possibility of microbial corrosion in the cooling tower of the power plant according to the operating conditions.

The possibility of corrosion caused by the organism is very high due to the pressure and temperature conditions of the cooling tower and where the supply water of the cooling tower is full of microorganisms. Therefore, it is expected that the presence of microbial factors is lower in power plants where the water of the cooling tower is supplied from a well than in the power plants that water is supplied from the river or sea water. On the other hand, in once trough cycles due to the continuous passage of fresh-water rich in microorganisms, the probability of microbial corrosion is much higher than in closed-cycle.

Methodology

In this part of the research, a set of microbial tests is performed on the circulating cooling tower sample of power plants, which includes a test to measure TBC (general test) and specific tests to measure specific bacteria. The conditions for performing each test are in accordance with the technical note provided by Ibresco, which determines the presence and absence of any type of bacterial agent by changing the color of the test kits and comparing it with the color change of the reference sample kit.

In order to evaluate the water quality (in-situ), parameters including pH, electrical conductivity, salinity percentage, hardness and water temperature are determined by using HANNA brand conductivity analyzer and thermometer (HI 2300 EC/NaCl/TDS Meter). Important and analyzable parameters in cooling tower samples, such as ions in the sample, have been performed using standard methods used in the world.

Results and discussion

In the TBC test, the approximate number of bacterial colonies is equal to 10,000 cfu/ml, which is in the moderate range. As it is clear from the APB test and its color change, the invasion power is high and the amount of ABP bacteria is 500,000 cfu/ml. For the results of the FP test, by placing the kit under the UV lamp, the solution inside the falcon is not clouded and no shine is observed, on the basis of which the growth of bacteria is reported as negative. The results of the IRB test show a very high invasive power, and the formation of a black layer around the sphere and the bottom of the vial indicates a diverse population of aerobic and anaerobic IRB bacteria. In this test, the bacterial population is more than 140,000 cfu/ml.

In the NRB test, the color change from green to reddish yellow indicates the presence of NRB bacteria with relatively high functional strength. The results of the Aero test indicate a change in color from green to reddish yellow, indicating a relatively high offensive power. The discoloration of the inside of the falcon from the bottom of the vial to the sphere indicates the presence of aerobic bacteria. In the SRB test, the black color of the solution indicates the positive presence of the invading bacteria. The black layer at the bottom and around the sphere indicates the presence of aerobic and anaerobic bacteria. In the TRB test, the black vial means that the test is positive, as well as the large accumulation of black sludge at the bottom of the vial, indicating anaerobic bacteria.

Conclusion

In Bandar Abbas power plant, due to the providing the supply of water for the cooling tower from the open sea of the Persian Gulf, very high salinity, conductivity and alkalinity are observed as a result of the high concentration of sodium, magnesium, calcium and chloride ions. The results of microbial tests confirm the relatively high concentration of all types of microbial species. The main reason for the invasion of microbial agents might be attributed to the high concentration of precipitants as well as sulfate and fluoride ions. The results of TBC indicate the number 10^4, which is a moderate value. In the first priority, the reverse osmosis method and ion exchange resins are suggested. Secondly, and among the general methods, the use of oxidizing methods such as chlorination and ozonation is suggested. In the third solution, the selective removal of sulfate ion is proposed.

نشـــریه محیـــط شناســـی
دوره ۴۹، شمـــاره ۴، زمستان ۱۴۰۲
Journal Homepage: http://Jes.ut.ac.ir
شاپای چاپی: ۸۶۲۰- ۱۰۲۵ **شاپای الکترونیکی:** ۶۹۲۲- ۲۳۴۵
University of Tehran Press

خوردگی میکروبی متاثر از عوامل محیط‌زیستی در آب چرخه خنک‌کن نیروگاه حرارتی بندرعباس

مجید قهرمان افشار[۱]✉، محسن اسماعیل‌پور[۲]، حسین قاسمی‌نژاد[۳]

۱. گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، رایانامه: mghahramanafshar@nri.ac.ir
۲. گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، رایانامه: mesmaeilpour@nri.ac.ir
۳. گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، رایانامه: hghaseminejad@nri.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۸/۱۲

کلیدواژه‌ها:
پایش خوردگی، چرخه خنک‌کن نیروگاه، خوردگی میکروبی، شمارش تعداد کل باکتری، نیروگاه بندرعباس

چکیده

آب دریای خلیج فارس به‌دلیل غلظت بالای یون‌های کلرید، کلسیم، منیزیم و سدیم دارای قلیاییت، هدایت و شوری بالایی می‌باشد و در نیروگاه بندرعباس از این آب به منظور تأمین آب چرخه خنک‌کن استفاده می‌شود. بررسی و ارزیابی آزمون‌های میکروبی نشان‌دهنده غلظت‌های بالای انواع گونه‌های میکروبی می‌باشد که دلیل اصلی آن یون‌های فلوراید، سولفات و غلظت بالای رسوب‌گذارها می‌باشد. آزمون شمارش کل باکتری‌ها نشان‌دهنده عدد 10^4 cfu/ml است که مقدار بالایی به حساب می‌آید. عامل اصلی تغذیه عوامل میکروبی غلظت بالای یون‌ها به ویژه یون کلرید در نمونه آب خنک‌کن می‌باشد و با توجه به غلظت بالای منیزیم به عنوان عامل رسوب‌گذار بایستی میزان آن در آب خنک‌کن کنترل شود. همچنین عامل رشد باکتری‌های احیاکننده سولفات، غلظت بالای سولفات در آب سیستم خنک‌کننده در این نیروگاه می‌باشد. از این‌رو راهکار کاهش غلظت عمومی یون‌ها با استفاده از روش‌هایی از قبیل اسمز معکوس و رزین‌های تبادل یونی به عنوان اولویت اول در جهت جلوگیری از خوردگی‌های میکروبی پیشنهاد می‌شود. همچنین روش‌های کلرزنی به‌دلیل اولویت دوم و روش ازن زنی به دلیل هزینه بالاتر نسبت به کلرزنی، به عنوان اولویت سوم پیشنهاد می‌گردد. استفاده از روش‌های کاهش غلظت و حذف گزینش‌پذیر سولفات به عنوان اولویت سوم می‌باشد.

استناد: قهرمان افشار، مجید؛ اسماعیل‌پور، محسن.؛ قاسمی‌نژاد، حسین. (۱۴۰۲). خوردگی میکروبی متاثر از عوامل محیط‌زیستی در آب چرخه خنک‌کن نیروگاه حرارتی بندرعباس. نشریه محیط‌شناسی، ۴۹(۴)، ۳۸۹- ۴۰۰.

DOI: http//doi.org/10.22059/JES.2023.356713.1008395
DOR: 20.1001.1.10258620.1402.49.4.7.3

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.

DOI: http//doi.org/ 10.22059/JES.2023.356713.1008395

۱. مقدمه

براساس مطالعات و تحقیقات صورت گرفته خوردگی‌های میکروبی به طورکلی از نوع خوردگی‌های تر می‌باشند که بر اثر تماس فلز با آب اتفاق می‌افتد. از این‌رو وقوع خوردگی میکروبی در سیکل آب و بخار و چرخه خنک‌کن نیروگاه‌ها محتمل می‌باشد (Liu & Cheng, 2020; Ilhan-Sungur & Çotuk, 2010). با این وجود، با توجه به شرایط عملیاتی بویلرهای حرارتی و فشار و دمای بالا احتمال وجود ماکروارگانیسم‌ها و میکروارگانیسم‌ها در این شرایط پایین است. اما در چرخه خنک‌کن نیروگاه با توجه به شرایط عملیاتی، احتمال وقوع خوردگی میکروبی وجود دارد (Ilhan-Sungur & Çotuk, 2010; García & Barrero, 2008; Miller, 1980).

بنابراین در فاز عملیاتی این پژوهش (بازدید از نیروگاه، نمونه‌برداری، انجام آزمون‌های فیزیکی- شیمیایی و سنجش خوردگی میکروبی) پایش و ارزیابی وجود عوامل میکروبی و احتمال وقوع خوردگی میکروبی در چرخه خنک‌کن نیروگاه بندرعباس انجام گرفت (Klose & Wernecke, 2004; Licina & Cubicciotti, 1989). با توجه به شرایط فشار و دمایی سیستم خنک‌کن و در مواردی که آب تأمینی چرخه خنک‌کننده سرشار از میکروارگانیسم‌ها باشد احتمال پدیده خوردگی و پدیده‌های ناشی از آن بسیار زیاد می‌باشد (Samimi, 2013; Liu & Zhang, 2009). از این‌رو پیش‌بینی می‌شود احتمال حضور عوامل میکروبی در نیروگاه‌هایی که آب سیستم خنک‌کن از چاه تأمین می‌شود به نسبت نیروگاه‌هایی که از رودخانه یا آب دریا تأمین می‌شود پایین‌تر باشد. از طرف دیگر در چرخه‌های یکبارگذر سیستم خنک‌کن با توجه به عبور پیوسته آب تازه و سرشار از میکروارگانیسم‌ها، احتمال وقوع انواع خوردگی میکروبی نسبت به چرخه‌های خنک‌کن با سیکل بسته به مراتب بیشتر می‌باشد (Reynolds, 1980; Morrison, 2015; Little & Lee, 2014).

براساس مشاوره با کارشناسان در زمینه خوردگی میکروبی و متخصصین نیروگاهی، از بین نیروگاه‌های با سیستم یکبارگذر سیستم خنک‌کن، نیروگاه بندرعباس که آب چرخه خنک‌کن از دریای آزاد خلیج فارس تأمین می‌گردد به عنوان نیروگاه منتخب برگزیده شد (Reynolds, 1980; Raptis & Pfister, 2016; Jolley et al., 1977). از طرف دیگر با توجه به این که در سیستم‌های خنک‌کن یکبارگذر بیشترین خوردگی‌ها در نیروگاه‌هایی مشاهده می‌شود که آب مورد نیاز از طریق دریا و بعد از آن رودخانه و آب‌های سطحی تأمین می‌گردد بنابراین نیروگاه بندرعباس به منظور بررسی خوردگی میکروبی مورد توجه و ارزیابی قرار گرفت (Samimi, 2013; Ghaedi & Abedini, 2022; Ghamati & Roudaki, 2022; Little & Wagner, 1992).

نیروگاه حرارتی بندرعباس واقع در استان هرمزگان، ۱۲ کیلومتری غرب بندرعباس در مجاورت دریا و همسایگی روستای خونسرخ، که در سال ۱۳۵۹ به بهره‌برداری رسیده است، یکی از نیروگاه‌های ایران از نوع حرارتی با ظرفیت تولید ۱۳۳۰ مگاوات است که شامل ۲ مجموعه نیروگاهیِ بخار و گازی جدا از هم است. ظرفیت تولید نیروگاه بخار ۱۲۸۰ مگاوات، شامل ۴ واحد بخار ۳۲۰ مگاواتی و ظرفیت تولید نیروگاه گازی ۵۰ مگاوات، شامل ۲ واحد گازی ۲۵ مگاواتی است. نیروگاه بخار با ظرفیت تولید ۱۲۸۰ مگاوات است که شامل ۴ واحد بخار ۳۲۰ مگاواتی است. نیروگاه بخار ساخت شرکت GIEایتالیا[1] است. سوخت اصلی این نیروگاه مازوت و نفت گاز (گازوئیل) و سوخت پشتیبان آن گاز طبیعی است که گازوئیل در ۲ مخزن مجموعاً به ظرفیت ۱ میلیون لیتر و مازوت در ۶ مخزن مجموعاً به ظرفیت ۱۰۸ میلیون لیتر ذخیره‌سازی می‌شود. این نیروگاه در سال ۱۳۵۹ و فاز دیگر آن در سال ۱۳۶۴ به بهره‌برداری رسید. نیروگاه گازی شامل ۲ واحد گازی ۲۵ مگاواتی مدل جنرال الکتریک ساخت هیتاچی است و قدرت عملی این نیروگاه ۳۳ مگاوات می‌باشد.

آب مورد نیاز نیروگاه از طریق حوضچه محصور در کنار دریا تأمین می‌شود که پس از عبور از فیلترهای مشبک ثابت فلزی و مشبک متحرک فلزی وارد الکترولایزر شده که منجر به حذف کلر از آب ورودی و تولید آب ژاول به منظور تزریق به آب ورودی سیستم خنک‌کن و کندانسور نیروگاه می‌شود. سپس آب پس از الکترولایزر به سمت ۳ واحد نمک‌زدایی[2] (MED) دستگاه تقطیر چند مرحله‌ای و نهایتاً پس از عبور از ۳ فیلتر رزینی مخلوط[3]مهیای به کارگیری به عنوان آب تغذیه بویلر و سیکل آب خواهد بود (شکل ۱).

1. Gas Infrastructure Europe
2. Multiple effect desalination
3. Mixed bed

شکل ۱. نمایی از قسمت‌های مختلف تصفیه‌خانه نیروگاه بندرعباس. a) حوضچه آبگیری، b) فیلتر مشبکی، c) الکترولایزر، d) دستگاه MED و e) فیلترهای میکسبد.

سیستم خنک‌کننده در این نیروگاه ساخت شرکت GIE و از نوع یکبار گذر می‌باشد و آب مورد نیاز سیستم خنک‌کن از حوضچه کنار دریا و پس از تزریق آب ژاول تأمین می‌گردد (شکل ۲). در ادامه به بررسی کیفیت آب در نمونه‌برداری‌های صورت گرفته و نتایج آنالیزهای حاصل از آن خواهیم پرداخت.

شکل ۲. موقعیت نیروگاه نسبت به دریا

هدف اصلی از این تحقیق بررسی آب چرخه خنک‌کن نیروگاه بندرعباس از نقطه نظر حضور عوامل میکروبی می‌باشد. در این راستا آزمون[1] (TBC) سنجش تعداد کل باکتری‌ها (آزمون عمومی) و آزمون‌های اختصاصی سنجش باکتری‌های خاص نظیر باکتری‌های تولیدکننده اسید[2] (APB)، فلورسانس سودوموناس[3] (FP)، باکتری‌های مرتبط با آهن[4] (IRB)، باکتری احیاءکننده نیترات[5] (NRB)، سنجش

1. Total bacteria count
2. Acid producing bacteria
3. Fluorescence pseudomonas
4. Iron related bacteria
5. Nitrate reducing bacteria

باکتری آئروبیک[۱] (Aero)، باکتری احیاءکننده سولفات[۲] (SRB) و باکتری احیاءکننده تیوسولفات[۳] (TRB) بر روی نمونه آب چرخه خنک‌کن انجام می‌پذیرد (Ghahraman Afshar & Esmaeilpour, 2023). از سوی دیگر داشتن اطلاعات جامع و کافی از شرایط آب چرخه خنک‌کن نیازمند جمع‌آوری اطلاعات پیرامون آزمون‌های فیزیکوشیمیایی (هدایت، شوری، pH، کدورت) و میزان آنیون‌ها و کاتیون‌ها در نمونه آب چرخه خنک‌کن می‌باشد. در این تحقیق سنجش پارامترهای فیزیکوشیمیایی و یون‌ها نیز در دستور کار قرار گرفت. در نهایت با داشتن غلظت و نوع هر عامل میکروبی و ارتباط آن با سایر پارامترهای فیزیکوشیمیایی، راهکارهای اصلاحی و پیشگیرانه به منظور مقابله با عوامل میکروبی ارایه و بر اساس توجیهات فنی- اقتصادی اولویت‌بندی می‌گردد (Afshar & Azimi, 2023).

پایش میکروبی نمونه آب چرخه خنک‌کن نیروگاه‌ها با سنجش تعداد کل باکتری‌ها و تعیین مشخصه بیش از ۷ نوع باکتری متفاوت برای اولین بار نه تنها در سطح کشور بلکه در سطح دنیا در این تحقیق به انجام رسیده است. لذا روتین کردن این روش پایش و جا انداختن نقش خوردگی‌های با منشا میکروبی در نیروگاه‌ها نیازمند زمان و تحقیق گسترده می‌باشد. در این راستا پس از پذیرش تاثیرات این نوع خوردگی در نیروگاه‌ها، به دنبال آن ارایه راهکار پیشگیرانه و عملیاتی نمودن آن در فاز بعدی تحقیقات می‌باشد.

بررسی خوردگی میکروبی و تعیین مشخصه خوردگی میکروبی در این تحقیق به معنای ریخت‌شناسی خوردگی و تعیین مشخصه سطح تجهیز نمی‌باشد. در این مقاله، تمامی سعی بر آن است که عوامل موثر و به طور ویژه انواع باکتری‌های موثر در ایجاد خوردگی میکروبی بررسی گردد. از سوی دیگر لازم به ذکر است که خوردگی میکروبی از نقطه نظر ساز و کار از انواع خوردگی‌های الکتروشیمیایی محسوب می‌گردد. همچنین در سیستم‌های مستعد خوردگی میکروبی این نوع خوردگی از نقطه نظر ریخت‌شناسی به شکل موضعی نمایان می‌گردد که خود منجر به ایجاد خوردگی حفره‌ای و شیاری می‌شود.

۲. بخش تجربی

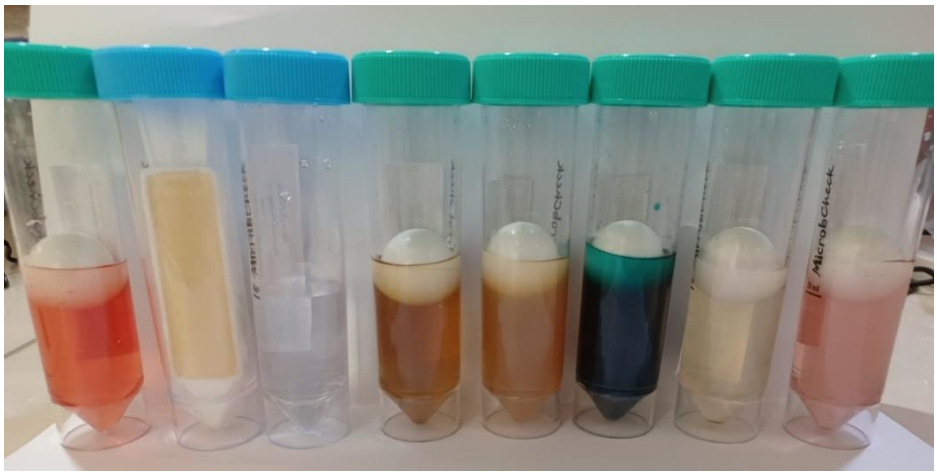
در این بخش نمونه‌برداری و انجام آزمون‌های میکروبی، فیزیکوشیمیایی و سنجش یون‌ها در دستور کار قرار دارد. در این راستا پس از بازدید از نیروگاه، دسته آزمون‌های فیزیکی و شیمیایی و میکروبی در محل و آزمون‌های سنجش یون‌ها پس از نمونه‌برداری در آزمایشگاه صورت می‌پذیرد. نمونه‌گیری در این تحقیق از نمونه آب چرخه خنک‌کن در محل خروجی کندانسور (دارای بالاترین دما) گرفته شده است که بر اساس تحقیقات و مطالعات پیشین، این نقطه مناسب‌ترین نقطه دارای بیشنه رشد عوامل میکروبی و حادترین شرایط نمونه‌ای می‌باشد. در این راستا پیچیده‌ترین نمونه آب به عنوان نماینده برای بررسی عوامل میکروبی برگزیده شد.

۲-۱. آزمون‌های میکروبی

در این بخش مجموعه آزمون‌های میکروبی بر روی نمونه آب خنک‌کن در گردش نیروگاه‌های منتخب انجام می‌پذیرد که این مجموعه شامل آزمون TBC سنجش تعداد کل باکتری‌ها (آزمون عمومی) و آزمون‌های اختصاصی سنجش باکتری‌های خاص نظیر APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB می‌باشد. که در ادامه هر آزمون با جزئیات شرح داده شده است. شرایط انجام هر آزمون مطابق با دستور کار ارایه شده از طرف شرکت ایبرسکو می‌باشد که مطابق با دستورالعمل آزمون‌ها انجام می‌گردد و در نهایت با استفاده از تغییر رنگ تست کیت‌ها و مقایسه آن با تغییر رنگ نمونه مرجع حضور و عدم حضور و میزان هر نوع عامل باکتریایی معین می‌گردد.

کیت میکروبی شاهد: نتایج برهم‌کنش میکروبی یک نمونه در لحظه افزودن نمونه به کیت‌های میکروبی شامل TBC، APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۳ واضح است، به عنوان نمونه شاهد (بدون تغییر رنگ) برای استفاده‌های بعدی و تشخیص تغییر رنگ‌ها در نمونه‌های نیروگاهی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

6. Aerobic bacteria detection
7. Sulfate reducing bacteria
8. Thiosulfate reducing bacteria



شکل ۳. کیت میکروبی شاهد از سمت چپ شامل SRB, Aero, NRB, IRB, FP, APB, TBC و TRB

۲-۲. آزمون‌های در محل هدایت، شوری، pH و کدورت آب خنک‌کن

به منظور بررسی کیفیت آب در محل، استفاده از دستگاهی که اطمینان از کالیبره بودن آن قبل از انجام آزمون حاصل شده باشد اهمیت بالایی دارد. از این‌رو، پارامترهای pH، هدایت الکتریکی، درصد شوری، سختی و دمای آب با دستگاه آنالیز هدایت‌سنجی و دماسنج برند HANNA مدل (HI 2300 EC/NaCl/TDS Meter) بهره گرفته شده است.

۲-۳.آزمون‌های شیمیایی سنجش آنیون‌ها و کاتیون‌ها آب خنک کن

پارامترهای مهم و قابل آنالیز در نمونه‌های آب چرخه خنک‌کن مانند یون‌های موجود در نمونه نیازمند سنجش دقیق در آزمایشگاه می‌باشد. بنابراین، آنالیزهای مربوط به هر یون با روش‌های استاندارد مرسوم در دنیا انجام شده است. به منظور سنجش یون‌های سدیم و پتاسیم از روش فلیم‌فتومتری طبق استاندارد 3500-Na و 3500-K استفاده شده است. همچنین جهت آنالیز کلسیم و منیزیم از استاندارد 3500 Ca-B و 3500 Mg-B و با روش جذب اتمی استفاده شده است. آنالیز نیترات، نیتریت، فلوراید و فسفات موجود در نمونه مطابق روش استاندارد 4110 SMWW و با روش طیف‌سنجی (UV-VIS) انجام شده است. آنالیز یون کلرید، سولفات و قلیاییت نمونه نیز به ترتیب با روش تیتراسیون موهر، تیترایسیون باریم و تیراسیون با HCl انجام شده است. استاندارد انجام این آزمون‌ها نیز روش 4500 Cl، 4110 SMWW و 2320 B SMWW می‌باشد.

۳. بحث‌ها و نتایج

در این بخش در ابتدا نتایج آزمون‌های میکروبی و به دنبال آن سنجش پارامترهای فیزیکوشیمیایی و آنالیز کمی و کیفی یون‌ها بررسی می‌گردد. در نهایت به دنبال آن بر اساس نتایج آزمون‌های میکروبی و بررسی خوراک عوامل، راهکارهای اصلاحی و پیشگیرانه ارایه می‌گردد.

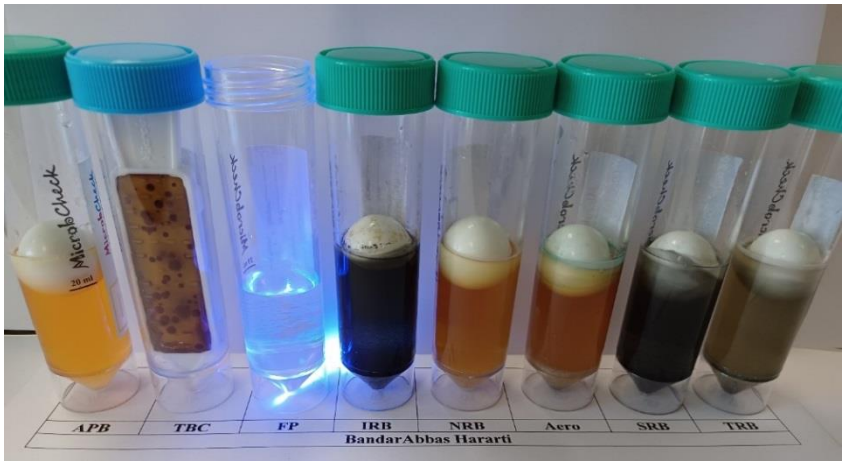
۳-۱. آزمون‌های میکروبی آب خنک‌کن نیروگاه حرارتی بندرعباس

در آزمون TBC تعداد تقریبی کلونی باکتری در ۱ میلی‌لیتر برابر با ۱۰۰۰۰ cfu/ml بوده که در بازه متوسط[1] قرار دارد. همان‌طور که از آزمون APB و تغییر رنگ آن مشخص است قدرت تهاجم بالا و مقدار باکتری ABP میزان ۵۰۰۰۰۰ cfu/ml می‌باشد. برای نتایج آزمون

1. Moderate

FP با قرار دادن کیت زیر لامپ UV، محلول درون فالکون کدر نشده و درخششی مشاهده نمی‌گردد که بر این اساس رشد باکتری‌ها منفی گزارش می‌شود. نتایج آزمون IRB قدرت تهاجمی بسیار بالا را بروز می‌دهد و همچنین تشکیل لایه سیاه رنگ در اطراف گوی و کف ویال نشان‌دهنده جمعیت متنوع از باکتری‌های IRB هوازی و بی‌هوازی می‌باشد. در این آزمون میزان جمعیت باکتری بیش از ۱۴۰۰۰۰ cfu/ml گزارش می‌گردد.

در آزمون NRB تغییر رنگ از سبز به زرد مایل به قرمز نشان‌دهنده حضور باکتری NRB با قدرت عملکردی نسبتاً بالا می‌باشد. نتایج آزمون Aero حاکی از تغییر رنگ از سبز به زرد مایل به قرمز نشان‌دهنده قدرت تهاجمی نسبتاً بالا می‌باشد. بی‌رنگ شدن محیط داخل فالکون از سمت کف ویال به سمت گوی نشان‌دهنده حضور باکتری‌های هوازی می‌باشد. در آزمون SRB رنگ سیاه محلول نشان‌دهنده مثبت بودن حضور مهاجم باکتری می‌باشد. لایه سیاه در پایین و دور گوی گویای وجود باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی می‌باشد. در آزمون TRB ویال سیاه رنگ به معنای مثبت بودن آزمون و همچنین تجمع عمده حجم لجن سیاه رنگ در کف ویال نشان‌دهنده باکتری‌های بی‌هوازی می‌باشد.



شکل ۴. کیت میکروبی نیروگاه بندرعباس شامل SRB, Aero, NRB, IRB, FP, APB, TBC و TRB

۳-۲. آزمون‌های در محل هدایت، شوری، pH و کدورت آب خنک‌کن نیروگاه حرارتی بندرعباس

به منظور بررسی کیفیت آب در محل، استفاده از دستگاهی که اطمینان از کالیبره بودن آن قبل از انجام آزمون حاصل شده باشد اهمیت بالایی دارد. از این‌رو، پارامترهای pH، هدایت الکتریکی، درصد شوری، سختی و دمای آب با دستگاه آنالیز هدایت‌سنجی و دماسنج برند HANNA مدل (HI 2300 EC/NaCl/TDS Meter) اندازه‌گیری شد. با توجه به آنالیزهای انجام شده در آزمایشگاه شیمی نیروگاه بندرعباس به صورت تست در محل، pH نمونه قلیایی گزارش شده است. دلیل اصلی این موضوع، کنترل خوردگی در چرخه خنک‌کن ضمن کنترل pH آب می‌باشد. از طرفی هدایت الکتریکی بسیار بالای نمونه به دلیل تأمین آب خنک‌کن این نیروگاه از منبع آب دریای آزاد (خلیج فارس) بوده که درصد شوری بسیار بالایی نیز دارد (طبق جدول ۱). از سوی دیگر سختی بالای نمونه نیز به دلیل وجود یون‌های کلسیم و منیزیم در فرم رسوب‌گذار کربناتی می‌باشد.

۳-۳. آزمون‌های شیمیایی سنجش آنیون‌ها و کاتیون‌ها آب خنک‌کن نیروگاه حرارتی بندرعباس

پارامترهای مهم و قابل آنالیز در نمونه‌های آب چرخه خنک‌کن مانند یون‌های موجود در نمونه نیازمند سنجش دقیق در آزمایشگاه می‌باشد. بنابراین، آنالیزهای مربوط به هر یون با روش‌های استاندارد مرسوم در دنیا انجام شده است. به منظور سنجش یون‌های سدیم و پتاسیم از روش نورسنج شعله‌ای طبق استاندارد 3500-Na و 3500-K انجام شده است. همچنین جهت آنالیز کلسیم و منیزیم از استاندارد 3500 Ca-B و 3500 Mg-B و با روش جذب اتمی استفاده شده است. آنالیز نیترات، نیتریت، فلوراید و فسفات موجود در نمونه مطابق روش استاندارد 4110 SMWW با روش طیف‌سنجی (UV-VIS) انجام شده است.

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز نمونه آب خنک‌کن نیروگاه بندرعباس و نظر به این که آب خنک‌کن این نیروگاه از آب دریای آزاد تأمین می‌شود، غلظت نمک (شوری) نمونه بسیار بالا بوده و از این رو غلظت بالای سدیم و کلسیم در نتایج قابل مشاهده است. همچنین غلظت بسیار بالای پتاسیم و منیزیم نیز در این نمونه قابل پیش‌بینی بوده و در نتایج نیز آشکار است. از سوی دیگر، غلظت فلوراید بالا در نمونه آب دریا همانند سایر آنیون‌ها قابل پیش‌بینی بوده و وجود این نوع یون‌ها به ویژه کلرید در نمونه آب خنک‌کن به عنوان منبع اصلی تغذیه عوامل میکروبی می‌باشد. همچنین وجود منیزیم بالا به عنوان عامل رسوب‌گذار در نمونه قابل توجه بوده و می‌بایست کنترل گردد. لازم به ذکر است که غلظت بالای سولفات در نمونه، عامل ایجاد رشد باکتری‌های احیاکننده سولفات در چرخه خنک‌کن نیروگاه می‌باشد.

عوامل میکروبی منشأ ایجاد و تسریع انواع خوردگی‌های الکتروشیمیایی بوده و لذا هدف از پژوهش حاضر بررسی و شناسایی عوامل میکروبی در سیکل خنک‌کننده نیروگاه می‌باشد. با توجه به این که خوردگی میکروبی در چرخه خنک‌کننده نیروگاه به صورت خوردگی الکتروشیمیایی خود را نشان می‌دهد. از این‌رو از طریق بررسی‌های ریخت‌شناسی نمی‌توان به عوامل میکروبی موجود در محیط پی برد و دلیل آن این است که ریخت‌شناسی خوردگی ناشی از عوامل میکروبی دارای الگویی مشابه با خوردگی الکتروشیمیایی دارد. لذا، به منظور شناسایی خوردگی میکروبی، بررسی و ارزیابی عوامل میکروبی TRB، NRB، APB، SRB، IRB، Aero و FP و سنجش تعداد کل باکتری‌ها (TBC) حائز اهمیت است. بنابراین می‌توان خوردگی الکتروشیمیایی ناشی از عوامل میکروبی را با داشتن اطلاعات از غلظت عوامل میکروبی و تعداد کل باکتری‌ها شناسایی کرد و با ارایه راهکارهای شیمیایی مؤثر در جهت اصلاح فرآیند و حذف عوامل میکروبی و خوردگی‌های ناشی از آن عمل کرد.

از طرفی، اطلاعات جامع و کامل از عوامل میکروبی از قبیل APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB و تعداد کل باکتری‌ها (TBC) در چرخه خنک‌کننده این نیروگاه جمع‌آوری شد و اثرات عوامل فیزیکوشیمیایی نظیر غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های خورنده، کدورت، شوری، pH، هدایت و محصول خوردگی نیز مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. جمع‌بندی نتایج آزمون‌های سنجش یون‌ها (فلوراید، فسفات، نیتریت، قلیاییت، سولفات، کلرید، نیترات، منیزیم، کلسیم، پتاسیم و سدیم)، آزمون‌های میکروبی (تست کیت‌های TRB، SRB، NRB، IRB، Aero، FP، APB و TBC) و آزمون‌های عمومی (کدورت، شوری، هدایت و pH) در نیروگاه بندرعباس به صورت مجزا در جدول شماره ۱ ارایه شده است.

بنابراین سنجش و پایش عوامل میکروبی و سپس ارایه راهکارهای مؤثر مقابله با آن با توجه به پیش‌بینی احتمال رشد سریع عوامل میکروبی از اهمیت به سزایی برخوردار است. لذا با ارایه روش‌های جدید سنجش پارامترهای میکروبی و به کارگیری از کیت تست‌های میکروبی در چرخه خنک‌کن نیروگاه و پایش اطلاعات فیزیکوشیمیایی آب و ارزیابی ارتباط آن با عوامل میکروبی می‌توان روش‌های بازدارندگی و ممانعت از خوردگی میکروبی را با اطمینان و قطعیت بیشتری مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. سپس با دارا بودن اطلاعات جامع از عوامل میکروبی و نتایج حاصل از سنجش عملیاتی پارامترهای میکروبی در چرخه خنک کن، راهکارهای شیمیایی اصلاحی و پیشگیرانه پیشنهاد می‌شود و هر راهکار از جنبه فنی– اقتصادی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. نهایتا با توجه به شرایط نیروگاه راهکارهای اصلاحی با اولویت بالا با توجیه فنی– اقتصادی ارایه خواهد شد که راه‌گشای ممانعت از خوردگی میکروبی و تمیز دادن خوردگی میکروبی از انواع غیرمیکروبی خواهد بود.

به دلیل تأمین آب چرخه خنک‌کن از آب دریای آزاد خلیج‌فارس در نیروگاه بندرعباس، شوری، هدایت و قلیاییت بسیار بالا مشاهده می‌گردد که این امر ناشی از غلظت بالای یون‌های سدیم، منیزیم، کلسیم و کلرید می‌باشد. نتایج حاصل از آزمون‌های میکروبی نشان‌دهنده غلظت نسبتاً بالای انواع گونه‌های میکروبی می‌باشد. دلیل اصلی تهاجم عوامل میکروبی را می‌توان به غلظت بالای رسوب‌گذارها و همچنین یون‌های سولفات و فلوراید نیز نسبت داد. نتایج آزمون شمارش تعداد کل باکتری، عدد ۱۰۴ cfu/ml را نشان می‌دهد که مقدار به نسبت بالایی محسوب می‌گردد.

جدول ۱. مجموع نتایج آزمون‌های میکروبی، پارامترهای فیزیکوشیمیایی و سنجش یون‌ها در نیروگاه حرارتی بندرعباس

Ions Concertation	
Na^+/ ppm	11875.0
K^+/ ppm	475.0
Ca^{2+}/ ppm	464.9
Mg^{2+}/ ppm	1782.2
NO_3^-/ ppm	<0.3
Cl^-/ ppm	21624.5
SO_4^{2-}/ppm	3228.0
NO_2^-/ ppm	0.02
PO_4^{3-}/ ppm	<0.02
F^-/ ppm	45.0

Physicochemical Properties	
pH at 25 °C	8.5
T/ °C	28.0
Cond/ ms	56.4
Salt/ %NaCl	94.4
Hardness/ g/L	28.3
T-Alka/ ppm	141.4

Microbial Test	
TRB/ cfu/ml	>6800000
SRB/ cfu/ml	>6800000
Aero/ cfu/ml	61000-575000
NRB/ cfu/ml	متوسط رو به بالا
IRB/ cfu/ml	>140000
FP/ cfu/ml	Ne
TBC/ cfu/ml	10^4
APB/ cfu/ml	500000

۳-۴. راهکار اصلاحی شیمیایی پیشگیرانه خوردگی میکروبی در نیروگاه بندرعباس

تأمین آب چرخه خنک از آب دریای آزاد و وجود شوری و هدایت بسیار بالا از عوامل زمینه‌ساز انواع خوردگی‌های میکروبی می‌باشد. نتایج حاصل از آزمون‌های میکروبی، تمام انواع گونه‌های میکروبی با غلظت نسبتاً بالا را نشان می‌دهد. دلیل اصلی تهاجم عوامل میکروبی را می‌توان به غلظت بالای آنیون‌ها و کاتیون‌ها و به طور ویژه سولفات نسبت داد. نتایج آزمون شمارش تعداد کل باکتری عدد ۱۰۴ را نشان می‌دهد که مقدار به نسبت بالایی محسوب می‌گردد.

در این نیروگاه غلظت سدیم، پتاسیم و منیزیم بسیار بالا و به ترتیب ۱۱۸۷۵ ppm، ۴۷۵ ppm و ۱۷۸۲ ppm می‌باشد. همچنین غلظت یون کلرید، سولفات و فلورید نیز بسیار بالا به ترتیب ۲۱۶۲۴ ppm، ۳۲۲۸ ppm و ۴۵ ppm می‌باشد. غلظت‌های بالای کاتیون‌های فلزی و همچنین آنیون‌ها محیط مناسبی برای رشد انواع عوامل باکتریای ایجاد می‌کند و در نتیجه به عنوان راهکار بهینه برای مبارزه با انواع خوردگی‌های میکروبی در اولویت اول راهکار کاهش غلظت عمومی یون‌ها پیشنهاد می‌گردد که روش‌هایی نظیر رزین‌های تبادل یونی و اسمز معکوس کارایی بالایی خواهد داشت.

بر اساس مطالعات انجام شده و توجیهات فنی- اقتصادی روش اسمز معکوس و رزین‌های تبادل یونی، روش اسمز معکوس از نقطه نظر طول عمر و کارایی و همچنین هزینه‌های نگهداری بر روش رزین‌های تبادل یونی برتری دارد. تنها ایراد روش هزینه سنگین اولیه تجهیزات می‌باشد که با در نظر گرفتن طول عمر تجهیزات و عملکرد بالای آن نسبت به رزین‌ها در اولویت قرار می‌گیرد.

در درجه دوم و با یک نگاه کلی به میزان و انواع باکتری‌های موجود یک روش مقابله عمومی با عوامل میکروبی پیشنهاد می‌گردد. از آنجایی که سطح تمامی عوامل ایجادکننده خوردگی میکروبی بالا است، روش‌های عمومی کارایی بالاتری خواهند داشت و از بین روش‌های عمومی، کاربرد روش‌های اکسیدکننده (به دلیل قدرت تهاجمی بالاتر) پیشنهاد می‌شود. که از بین روش‌های ارایه شده در اولویت دوم روش کلرزنی به دلیل قدرت بالای مقابله و قیمت پایین و همچنین پس از آن روش ازن‌زنی به دلیل نداشتن محصولات جانبی و قدرت بالا (هزینه بالاتر نسبت به کلرزنی) پیشنهاد می‌شود.

انتخاب بین روش کلرزنی و ازن‌زنی در شرایط کنونی کشور مبحث پیچیده‌ای است. در سطح دنیا ازن زنی با کلرزنی جایگزین شده است و اولویت اول در بحث گندزدایی ازن‌زنی است. اما با توجه به شرایط اقتصادی ایران در حال حاضر عمده صنایع توانایی انجام این امر را ندارند. لذا برای تمامی نیروگاه‌ها در جدول پایین همواره ازن‌زنی و کلرزنی با هم آورده شده است. این در حالیست که ازن‌زنی به دلیل کارایی بالا، نداشتن محصولات جانبی و ایمنی بالا در اولویت قرار دارد.

در ادامه با بررسی تک تک پارامترهای موثر بر خوردگی میکروبی، غلظت بالای سولفات نیز در انواع خوردگی‌های ناشی از فعالیت SRBها موثر می‌باشد و لذا روش‌های انتخاب گزین حذف و یا کاهش غلظت سولفات نیز در اولویت سوم و می‌بایست در دستور کار نیروگاه حراراتی بندرعباس قرار گیرد. در بین روش‌های حذف سولفات، روش احیاء بیولوژیکی سولفات و ترسیب مس در اولویت اول قرار دارد. این روش در قیاس با سایر روش‌های ارایه شده (روش الکتروشیمیایی و الکتروکواگولاسیون) روش مقرون به صرفه‌ای می‌باشد. در این روش

میزان مصرف معرف‌ها نسبت به روش الکتروشیمیایی و الکتروکواگولاسیون بسیار کمتر و در نتیجه هزینه‌ها پایین‌تر می‌باشد.

۴. جمع بندی

در این مقاله به طور خاص آب چرخه خنک نیروگاه حرارتی بندرعباس از نقطه نظر حضور عوامل میکروبی مورد پایش و بررسی قرار گرفت. دلیل اصلی توجه خاص به این نیروگاه تامین آب چرخه خنک‌کن از آب‌های آزاد خلیج فارس می‌باشد که شوری، هدایت و رشد عوامل میکروبی در آن بسیار متغیر و بالا می‌تواند باشد. بنابراین این نیروگاه به عنوان یک مطالعه مورد از نقطه نظر خواص فیزیکوشیمیایی، غلظت مجموع یون‌ها و پایش عوامل میکروبی به طور عمومی (آزمون TBC) و تک تک عوامل میکروبی مورد پایش قرار گرفت. هدایت و قلیاییت بسیار بالا ناشی از غلظت بالای یون‌های سدیم، منیزیم، کلسیم و کلرید می‌باشد. نتایج حاصل از آزمون‌های میکروبی مؤید غلظت نسبتاً بالای تمام انواع گونه‌های میکروبی می‌باشد. دلیل اصلی تهاجم عوامل میکروبی را می‌توان به غلظت بالای رسوب‌گذارها و همچنین یون‌های سولفات و فلوراید نیز نسبت داد. نتایج آزمون شمارش تعداد کل باکتری عدد 10^4 را نشان می‌دهد که مقدار به نسبت بالایی محسوب می‌شود. به دلیل هدایت و غلظت بسیار بالای یون‌های نمکی نظیر یون سدیم و کلرید، آب ورودی چرخه خنک‌کن، اسمز معکوس به عنوان راهکار اصلاحی اصلی مقابله با عوامل میکروبی در سرفصل اولویت‌ها قرار گرفت. در ادامه با بررسی مقدار بالای TBC، کلرزنی (تزریق آب ژاول) و ازن‌زنی (تولید ازن با به کارگیری دستگاه ازن جنریتور[۱] و تزریق آن به چرخه آب خنک‌کن) به عنوان روش عمومی مبارزه با عوامل میکروبی در دستور کار قرار گرفت. در نهایت با توجه به منشا آب چرخه خنک‌کن و غلظت بالای یون سولفات، حذف انتخاب گزین سولفات نیز از طریق روش بیولوژیکی احیاء یون سولفات به عنوان روش سوم توصیه می‌گردد.

جدول ۲. اولویت‌بندی راهکارهای مبارزه با عوامل میکروبی در نیروگاه حرارتی بندرعباس

اولویت	روش
اولویت اول	اسمز معکوس – هدایت الکتریکی بالا به دلیل غلظت نمکی (یون سدیم و کلرید) بالا
اولویت دوم	کلرزنی و ازن زنی – ازن زنی با استفاده از دستگاه ازن جنریتور
اولویت سوم	حذف انتخاب گزین سولفات- روش احیاء بیولوژیکی و ترسیب مس

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های مالی شرکت مادر تخصصی برق حراراتی و پژوهشگاه نیرو مراتب قدردانی را به عمل آورده و ضمنا از همکاری و مساعدت مسئولین نیروگاه حرارتی بندرعباس در راستای نمونه‌برداری و مشاوره‌های فنی کمال تشکر را دارند.

۶. مراجع

Afshar, M.G., et al. (2023). Batch and continuous bleaching regimen in the cooling tower of Montazer Ghaem power plant. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 11, 100339.

García, K., et al. (2008). Lost iron and iron converted into rust in steels submitted to dry–wet corrosion process. *Corrosion Science*, 50(3), 763-772.

Ghaedi, H., Abedini, E., & Ansari, A.N. (2022). Thermoeconomic analysis of seawater desalination methods in Bandar Abbas power plant. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(11), 559.

Ghamati, E. & Roudaki, J.M. (2022). A Novel Integrated Design for Heat and Water Recovery from Exhaust Flue Gas of Bandar Abbas Power Plant. *Energy and Environment Research*, 12(1), 1-26.

Ghahraman Afshar, M., Esmaeilpour, M. & Ghaseminejad, H. (2023). Investigation of water consumption in Shahid Montazer Ghaem steam power plant and technical-economic evaluation of the boilers' blowdown recycling solutions. *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*.

Ilhan-Sungur, E. & Çotuk, A. (2010). Microbial corrosion of galvanized steel in a simulated recirculating cooling tower system. *Corrosion Science*, 52(1), 161-171.

[۱] Ozone Generator

Jolley, J. R., Robert, L., Pitt, W. W., Taylor, J. R., Fred, G., Hartmann, S. J., ... & Thompson, J. E. (1977). Experimental Assessment of Halogenated Organics in Waters from Cooling Towers and Once-Through Systems (No. CONF-771070-2). NETL (National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA, and Morgantown, WV (United States)).

Klose, S., Wernecke, K.D. & Makeschin, F. (2004). Microbial activities in forest soils exposed to chronic depositions from a lignite power plant. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(12), 1913-1923.

Liu, H. & Cheng, Y.F. (2020). Microbial corrosion of initial perforation on abandoned pipelines in wet soil containing sulfate-reducing bacteria. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 190, 110899.

Licina, G.J. & Cubicciotti, D. (1989). Microbial-induced corrosion in nuclear power plant materials. *JOM*, 41, 23-27.

Samimi, A. (2013). Micro-organisms of cooling tower problems and how to manage them. *International Journal of Basic and Applied science, Indonesia*, 705-715.

Liu, Y., et al. (2009). Role of bacterial adhesion in the microbial ecology of biofilms in cooling tower systems. *Biofouling*, 25(3), 241-253.

Little, B.J. & Lee, J.S. (2014). Microbiologically influenced corrosion: an update. *International Materials Reviews*, 393- 384, (7) 59.

Little, B., Wagner, P. & Mansfeld, F. (1992). An overview of microbiologically influenced corrosion. *Electrochimica acta*, 37(12), 2185-2194.

Miller, J. (1980). Principles of microbial corrosion. *British Corrosion Journal*, 15(2), 92-94.

Morrison, F. (2015). Saving water with cooling towers. *ASHRAE Journal*, 57(8), 20.

Raptis, C.E. & Pfister, S. (2016). Global freshwater thermal emissions from steam-electric power plants with once-through cooling systems. *Energy*, 97, 46-57.

Reynolds, J.Z. (1980). Power plant cooling systems: policy alternatives. *Science*, 207(4429), 367-372.