



FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)
Volume 10, Number 4, Winter (2026)

Journal Homepage: www.jess.ir
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

Removal of Natural Organic Matter in Drinking Water Treatment by Coagulation

Mohammad Ghanbari^{*1}

*1. Assistant Professor, Health and Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

*Email Address: ghanbarym@yahoo.com

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:

2023/11/13

Revised Date:

2025/08/22

Accepted Date:

2026/04/16

Published Date:

2026/04/16

Keywords:

Natural organic matter (NOM),
Drinking water,
Coagulation,
Trihalomethanes (THMs),

ABSTRACT

Natural organic matter (NOM) enters water from natural sources such as plant material and synthetic compounds such as detergents, solvents, pesticides and herbicides. Due to their specific characteristics, organic compounds affect the quality of drinking water in different ways, such as producing unpleasant taste and smell, reacting with chlorinated compounds and forming disinfection by-products (DBPs). Most of these compounds, like trihalomethanes, are carcinogenic and it is not possible to completely remove them in conventional water treatment processes. Today, the concentration of natural organic matter in fresh water sources as well as domestic wastewater effluents has increased significantly around the world and is considered one of the main challenges. Therefore, effective measures are needed in order to develop of efficient drinking water treatment processes. Coagulation is one of the most widely used processes in drinking water treatment. In recent years, improving the coagulation process and using advanced coagulation to remove natural organic matter is very important. In this review, recent research studies dealing with the use of coagulation to remove natural organic matter from drinking water supplies have been presented and compared. Furthermore, integration schemes combining coagulation and other water treatment processes such as oxidation, membrane filtration, and adsorption have been presented.

Cite this article:

Mohammad Ghanbari (2026). Removal of Natural Organic Matter in Drinking Water Treatment by Coagulation, Journal of Environmental Sciences Studies, 10(4), Pages 11002-11017.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Natural organic matter (NOM) enters water sources from natural sources such as plant material and synthetic organic compounds such as detergents, solvents, pesticides, and herbicides. Organic compounds affect the quality of drinking water in different ways, such as producing unpleasant taste and smell, reacting with chlorinated compounds and forming disinfection by-products (DBPs). In fact, the presence of NOM in water sources causes changes in their organoleptic properties and by causing things such as color, taste and smell, it reduces the quality of the water resources in question. Removing NOM from drinking water sources is considered an important issue in protecting the health of a society and ignoring it can be associated with challenges. Therefore, the conditions require that by using reliable and highly efficient water purification technologies, it is possible to remove NOM in water environments and prevent them from increasing their concentration in water sources. The aim of this review is to investigate the processes performed using different coagulation mechanisms and to make a comparative evaluation between them for the removal of NOM in drinking water.

Materials and methods

In the present review article, recent research studies dealing with the removal of natural organic matter from drinking water sources through coagulation are reviewed. In order to investigate the removal of NOM in the treatment of drinking water through the coagulation process, using different coagulants, a review of previous researches was carried out in the form of library studies, and the latest achievements about removing NOM were studied and finally its results were compiled in the form of a review article. In this study, recent research articles published in valid journals in the field of coagulation and removal of natural organic matter from drinking water sources through different coagulants. Also, a comparative evaluation of the efficiency of different coagulants and coagulation techniques to remove NOM from water resources has been done.

Results and discussion

NOM have a complex nature in terms of quantity and quality due to the prevailing spatial and temporal changes. This complex nature of NOM is one of the main challenges facing various water treatment techniques and methods that are used to remove NOM from drinking water sources. Based on this, in order to correctly choose the methods and technologies used in water treatment and to make the necessary predictions for the reactivity of these NOM with the chemicals in water, to specify the type of NOM and their different natures. It is very important and significantly effective in achieving high removal efficiency and reducing the potential for forming disinfection by-products (DBPs) due to the disinfection process. Dosage of coagulants and pH are among the main operational conditions affecting the coagulation process and the overall efficiency of this process depends on these factors. The efficiency of coagulation to remove NOM on the one hand mainly depends on the type and dose of coagulant, pH, mixing conditions and temperature and on the other hand the properties of natural organic substances including particle size, charge and hydrophobicity and the presence of divalent cations and destabilizing anions such as carbonate, bicarbonate, chloride and sulfate ions.

Conclusion

One of the most suitable methods of water purification with the aim of removing NOM from drinking water sources is the use of coagulation processes. Optimizing the coagulation process in order to remove as much NOM as possible has been of considerable importance. The variable composition of NOM poses a serious challenge to conventional coagulation. Conventional coagulation process is usually not effective in removing organic materials with lower molecular weight and generally this process is effective in removing organic materials with higher molecular weight. In order to remove NOM, different types of coagulants including metal salts, inorganic and organic polymers of natural or synthetic type and different combination scenarios between them. In previous studies, inorganic polymeric coagulants showed better removal capacities toward NOM and other organic substances from waters, in comparison with coagulants such as ferric sulfate or aluminum sulfate. Electrocoagulation (EC) is a well-established water treatment technology widely used for the removing of drinking water supplies from organic and inorganic pollutants such as pesticides, dyes, heavy metals, etc.



حذف مواد آلی طبیعی در تصفیه آب آشامیدنی از طریق فرایند انعقاد (مطالعه مروری)

محمد قنبری^{*۱}

*۱-استادیار، مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز

*ایمیل نویسنده مسؤل: Ghanbarym@yahoo.com

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>ماده آلی طبیعی (به انگلیسی: Natural organic matter یا NOM) از منابع طبیعی مانند مواد گیاهی و ترکیبات مصنوعی مانند شوینده ها، حلال ها، آفت کش ها و علف کش ها وارد آب می شوند. ترکیبات آلی به دلیل ویژگیهای خاص به روش های مختلف از قبیل تولید طعم و بوی نامطبوع، واکنش با ترکیبات کلردار و تشکیل فرآورده های جانبی گندزایی (به انگلیسی: Disinfection By-products یا DBPs)، روی کیفیت آب آشامیدنی تاثیر می گذراند. اغلب این ترکیبات همانند تری هالومتان ها سرطان زا بوده و امکان حذف کامل آنها در فرایندهای تصفیه متداول آب ممکن نمی باشد. امروزه غلظت مواد آلی طبیعی در منابع آب های شیرین و نیز در پساب های فاضلاب خانگی در سراسر دنیا افزایش قابل توجهی داشته و یکی از چالش های اصلی در این حوزه به شمار می رود و نیاز به اقدامات عاجل و موثر در راستای توسعه فرایندهای کارآمد تصفیه آب های آشامیدنی را توجیه می کند. انعقاد (به انگلیسی: Coagulation) یکی از پرکاربردترین فرایندها برای تصفیه آب آشامیدنی به شمار رفته و در سالهای اخیر بهینه سازی فرایند انعقاد در نتیجه برآورده سازی الزامات انعقاد پیشرفته به منظور حذف هر چه بیشتر مواد آلی طبیعی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. در بررسی مروری حاضر، به مطالعات تحقیقاتی اخیر که با کاربرد انعقاد برای حذف مواد آلی طبیعی از منابع آب آشامیدنی سروکار دارند، اشاره گردیده و مورد مقایسه قرار گرفته شده اند. علاوه بر این، استفاده از روش های تلفیقی و فرایندهای ترکیبی از انعقاد و سایر فرایندهای تصفیه آب، از جمله اکسیداسیون، فیلتراسیون غشایی، فرایند جذب و غیره برای این منظور ارائه شده است.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۷</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۲۷</p> <p>کلید واژه ها: ماده آلی طبیعی، آب آشامیدنی، انعقاد، تری هالومتان ها،</p>

ماده آلی طبیعی (NOM) از منابع طبیعی مانند مواد گیاهی و ترکیبات آلی سنتزی مانند شوینده ها، حلال ها، آفت کش ها و علف کش ها وارد منابع آب می شوند. ترکیبات آلی به روش های مختلفی همچون تولید طعم و بوی نامطبوع، واکنش با ترکیبات کلردار و تشکیل فرآورده های جانبی گندزدایی^۲ (DBPs)، روی کیفیت آب آشامیدنی تاثیر می گذارند (Amy 2008). در محیط های آبی عوامل و فاکتورهای مختلفی همچون خصوصیات شیمیایی آب، pH، دما و فرآیندهای بیولوژیکی مختلف بر میزان تشکیل مواد آلی طبیعی و سرنوشت نهایی آنها تاثیر می گذارند. بنابراین، تغییرات آب و هوایی و تغییرات فصلی که به نوعی در شکل گیری پدیده های طبیعی همچون بارندگی، سیل و خشکسالی تاثیر گذار می باشند، می توانند مقدار و ترکیب مواد آلی طبیعی را به طور قابل ملاحظه ای تحت تاثیر قرار دهند (Kundzewicz, et al. 2006; Sharp, et al. 2014). در واقع، وجود مواد آلی طبیعی در آبها موجب ایجاد تغییرات در خواص ارگانولپتیک آنها شده و با ایجاد مواردی همچون رنگ، طعم و بو موجب کاهش کیفیت منابع آب مورد نظر می شود. همچنین مواد آلی طبیعی می تواند در نقش حامل آلاینده های سمی آلی و معدنی مانند آفت کش ها و رادیونوکلیدها ظاهر شود (Knauer, et al. 2017; Santschi, et al. 2017). اجزای مختلف مواد آلی طبیعی، عمدتاً اسیدهای هیومیک^۳ (HA) و اسیدهای فولیک^۴ (FA)، تمایل به تشکیل کمپلکس های قوی با فلزات سنگین دارند که منجر به تشکیل کمپلکس های آلی فلزی با افزایش توانایی حمل و نقل، فراهمی زیستی و سمیت می شود (Matilainen, et al. 2011; Sillanpää, et al. 2018). وجود مواد آلی طبیعی در آب های تصفیه شده به روش معمولی و با استفاده از سیستم کلرزنی در شکل گیری محصولات جانبی گندزدایی (DBPs) همچون تری هالومتان های هالوژنه آلیفاتیک^۵ (THMs)، اسیدهای هالواستیک^۶ (HAAs)، هالواستونتریل ها^۷ (HANS)، هالوکتون ها و تری کلرها بسیار موثر و پررنگ بوده و در واقع می توان گفت که نقش مهمی در میزان حضور و تولید فرآورده های جانبی گندزدایی (DBPs) ایفا می کند با این رویکرد که آب های دارای مواد آلی طبیعی بیشتر، پتانسیل بالایی در تشکیل فرآورده های جانبی گندزدایی از جمله هالواستیک اسیدها و تری هالومتان ها دارند. با مدنظر قرار دادن موارد ذکر شده و با لحاظ چنین شرایطی، حذف مواد آلی طبیعی از منابع آب آشامیدنی یک موضوع مهم در محافظت از سلامتی یک جامعه محسوب گردیده و نادیده گرفتن آن می تواند با چالش هایی همراه باشد. بنابراین شرایط ایجاد می کند که با استفاده از فن آوری های تصفیه آب قابل اعتماد و بسیار کارآمد قادر به حذف مواد آلی طبیعی در محیط های آبی شده و با افزایش غلظت آنها در محیط های آبی با تنوع مکانی و زمانی بالای مواد آلی طبیعی مقابله بکنیم (Golea, et al. 2017; Goslan, et al. 2017). در سالهای اخیر بهینه سازی فرآیند انعقاد به منظور حذف هر چه بیشتر مواد آلی طبیعی و در نتیجه برآورده سازی الزامات انعقاد تشدید یافته از اهمیت قابل ملاحظه ای برخوردار بوده است. مواد آلی طبیعی از دو بخش ذره ای و محلول تشکیل شده است. معمولاً حذف بخش محلول مواد آلی طبیعی دشوارتر از بخش ذره ای بوده و سهم عمده ای از تلاش جهت حذف را به خود اختصاص می دهد (Cheng, et al. 2017; Sillanpää, et al. 2018). در حال حاضر نیاز به حذف عمده آلاینده ها از منابع آب های حاوی مواد آلی طبیعی با ارتقای فرآیندهای تصفیه آب بیشتر احساس می شود چرا که با بدتر شدن کیفیت آنها، دستیابی به استانداردهای کیفیت آب دشوارتر می شود. در فرآیندهای حذف مواد آلی طبیعی با استفاده از مواد شیمیایی همانند بکارگیری یک انعقادگر برای انجام عملیات انعقاد به همراه اکسیداسیون و به دنبال آن استفاده از مواد دیگر برای جذب آنها، با افزایش غلظت مواد آلی طبیعی مستلزم استفاده از مواد شیمیایی یا مواد بیشتر است که در نهایت منجر به تولید لجن یا مواد مصرف شده بیشتر می شود که این موضوع می تواند به عنوان یک چالش مطرح باشد. همچنین در فرآیند جذب، مواد آلی طبیعی تمایل به رقابت با ریزآلاینده های هدف بر روی مکان های فعال دارد، که این عمل می تواند راندمان حذف از طریق مکانیسم جذب را برای طیف وسیعی از آلاینده های آلی و معدنی کاهش دهد (Cheng, et al. 2017; Sillanpää, et al. 2018). هدف از این مطالعه مروری این است که به بررسی فرایندها و کارهای انجام شده با استفاده از مکانیسم های مختلف انعقاد جهت حذف مواد آلی طبیعی موجود در آب آشامیدنی بپردازیم و سپس ارزیابی مقایسه ای از کارایی منعقدکننده های مختلف و تکنیک های انعقاد انجام داده و در مورد سایر روش های موثر در حذف مواد آلی طبیعی در طی فرآیند تصفیه آب مروری داشته باشیم.

¹ Natural Organic Matter

² Disinfection By-Products

³ Humic Acid

⁴ Fulvic Acid

⁵ Trihalomethanes

⁶ Haloacetic Acids

⁷ Haloacetonitriles

۲- روش انجام تحقیق

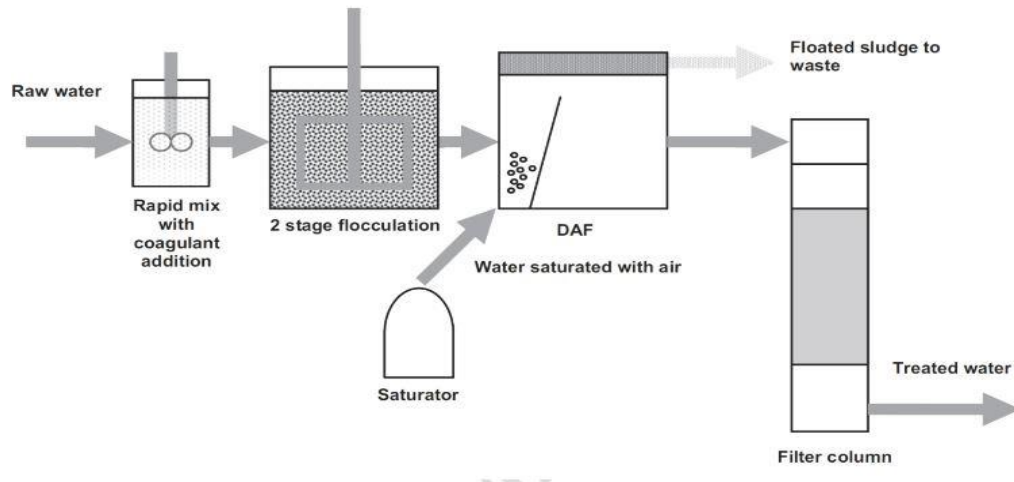
در مقاله مروری حاضر، مطالعات تحقیقاتی اخیر که با حذف مواد آلی طبیعی از منابع آب آشامیدنی از طریق انعقاد سروکار دارند، مرور شده است. با این توضیح که به منظور بررسی حذف مواد آلی طبیعی در تصفیه آب آشامیدنی از طریق فرایند انعقاد با در نظر گرفتن انعقادگرهای مختلف، مروری بر کارهای انجام شده قبلی به صورت مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده و تازه‌ترین دستاوردها در جهت حذف مواد آلی طبیعی برای مقابله با تولید آلاینده‌های تهدیدآمیز بهداشت و سلامتی مورد مطالعه قرار گرفت که نهایتاً نتایج آن در قالب یک مقاله مروری گردآوری گردیده است. بنابراین، یافته‌های تحقیق و توسعه جدید در این زمینه، بر اساس آخرین مقالات علمی مرتبط منتشر شده، ارائه و مورد بحث قرار گرفت. همچنین ارزیابی مقایسه‌ای از کارایی منعقدکننده‌های مختلف و تکنیک‌های انعقاد برای حذف مواد آلی طبیعی از آب‌های آلوده صورت گرفته است. در کنار فرایند انعقاد، عملکرد و کارایی سایر فرایندهای تصفیه آب مانند جداسازی غشایی، تبادل یونی، اکسیداسیون و جذب به عنوان یک مجموعه فرایند مکمل مورد مرور قرار گرفته است.

۳- نتایج

• استفاده از روش انعقاد در حذف مواد آلی طبیعی آب

روش انعقاد به طور معمول در تصفیه آب برای کاهش کدورت، رنگ، حذف ذرات معلق و عوامل بیماری‌زا مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساساً انعقاد یک فرایند فیزیکی-شیمیایی است که با هدف کاهش پتانسیل دافعه در بین دو لایه الکتریکی کلئیدها با استفاده از منعقدکننده‌های مختلف و با رویکرد نزدیک شدن و برخورد ذرات کلئیدی با همدیگر و ایجاد تراکم در بین آنها انجام می‌شود. در این پدیده تراکم، مکانیسم‌های مختلفی مانند خنثی‌سازی بار، به دام افتادن، جذب و کمپلکس شدن با یون‌های فلزی منعقدکننده می‌تواند روی دهد. در نتیجه فرایند انعقاد، ذرات ریز کلئیدی به هم چسبیده و شروع به رشد کرده و به تدریج ذرات و لخته‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌شود (Sillanpää, et al. 2018). معمولاً در تصفیه آب به روش انعقاد با افزودن مقدار معینی از منعقدکننده‌ها (عمدتاً منعقدکننده‌های معدنی مانند نمک‌های آهن و آلومینیوم) انجام می‌شود که در محلول آب به شکل یون‌های سه ظرفیتی آهن و آلومینیوم (Al^{3+} و Fe^{3+}) در آمده و در نهایت کمپلکس‌هایی با بار مثبت تشکیل می‌دهند که بسیار تعاملی با ذرات کلئیدی دارای بار منفی هستند (Chen, et al. 2023; Ma, et al. 2018). با توجه به ماهیت‌های مختلف و متغیر مواد آلی طبیعی و تنوع بالای اجزای آن از نظر خواص مولکولی و الکتریکی، مکانیسم‌های حذف ترکیبی به طور قابل توجهی در یک منبع آبی در مقایسه با منبع دیگر می‌تواند متفاوت باشد و همچنین این مکانیسم‌های حذف در یک منبع آبی ثابت هم به دلیل تغییرات فصلی متفاوت خواهد بود. بنابراین، با این رویکرد می‌توان نتیجه گرفت که در حذف مواد آلی طبیعی از منابع آب به روش انعقاد، با توجه به انواع مکانیسم‌های حذف، نوع منابع آبی، تغییرات فصلی و غیره، تشکیل لخته‌ها با اندازه‌ها و ساختارهای مختلف صورت گرفته و راندمان حذف متغیر خواهد بود و این یک چالش جدی در استفاده از روش انعقاد در تصفیه منابع آب آشامیدنی به شمار می‌رود (Jin, et al. 2020; Sillanpää, et al. 2018). نوع و دوز مصرفی منعقدکننده‌ها، از شرایط عملیاتی اصلی تاثیرگذار در هر فرایند انعقادی به شمار رفته و راندمان کلی این فرایند تابع فاکتورهای مورد اشاره می‌باشد. همراه با این دو پارامتر عملیاتی، ویژگی‌های شیمیایی و مولکولی آلاینده‌های مورد نظر پارامتر اصلی را تشکیل می‌دهند که باید قبل از استفاده از فرایند تصفیه آب مبتنی بر انعقاد در نظر گرفته شود، زیرا آنها اساساً شرایط عملیاتی دیگر را فراهم می‌کنند. به عنوان مثال، زمانی که pH واکنش بالاتر از حداقل حلالیت منعقدکننده برای کلرید آهن (۵/۸) و کلرید آلومینیوم (۶/۳) باشد، فرایند پلیمرهای با جرم مولی بالا (به انگلیسی: High Molar Mass یا HMM) یا گونه‌های کلئیدی/رسوب‌شده تولید می‌شود. در صورتی که pH کمتر از حداقل حلالیت منعقدکننده باشد، پلیمرها یا مونومرهای متوسط تشکیل می‌گردد (Cheng, et al. 2017; Naceradska, et al. 2019). در کاربرد واقعی، کارایی انعقاد برای حذف مواد آلی طبیعی از یک طرف عمدتاً به نوع و دوز منعقدکننده، pH، شرایط اختلاط و دما و از سوی دیگر به خواص مواد آلی طبیعی شامل اندازه ذرات، بار و آبگریزی و وجود کاتیون‌های دو ظرفیتی و آنیون‌های بی‌ثبات کننده مانند یون‌های بی‌کربنات، کلرید و سولفات بستگی دارد (Dayarathne, et al. 2021; Wan, et al. 2019). با توجه به تاثیر دوز منعقدکننده‌ها، محاسبه درست و تعیین مقدار مناسب پیش نیاز یک کارایی بهینه در فرایند انعقاد می‌باشد. بنابراین، مصرف بیش از حد ماده منعقدکننده منجر به افزایش قابل توجهی در مقدار لجن تولیدی شده و با کاهش pH همراه است، در حالی که دوز پایین‌تر به طور کلی ناشی از باقی مانده فلزات در آب تصفیه شده می‌باشد، با این اوصاف نیاز به فرایندهای انعقادی ارتقاء یافته است. در این راستا، آب‌هایی که محتوای مواد آلی طبیعی بالایی دارند معمولاً با فرایند انعقاد تقویت‌شده تصفیه می‌شوند، جایی که دوز بالاتری از ماده منعقدکننده به همراه pH پایین (اسیدی) اعمال می‌شود (Go, et al. 2021; Okoro, et al. 2021). بطور کلی می‌توان گفت که فرایند انعقاد معمولی و متداول بطور معمول در حذف مواد آلی با وزن مولکولی کوچکتر موثر عمل نمی‌کند و عموماً این فرایند در حذف مواد آلی با وزن مولکولی

بالا مؤثر است (Sapingi, et al. 2017). در خصوص مواد آلی طبیعی، ترکیب متغیر آن چالش‌های جدی را برای انعقاد معمولی ایجاد می‌کند. از آنجایی که قسمت آبگریز مواد آلی طبیعی دارای چگالی بار بالاتری نسبت به قسمت آبدوست است، در بخش آبگریز مواد آلی راحت‌تر از قسمت آبدوست انعقاد صورت می‌گیرد و این موضوع در بهینه‌سازی فرآیند انعقاد در راستای بهبود راندمان حذف مواد آلی طبیعی اهمیت پیدا می‌کند (Saxena, et al. 2018).



شکل ۱. نمای شماتیک یک فرآیند مبتنی بر انعقاد مورد استفاده برای تصفیه آب (در مقیاس آزمایشی) (Sillanpää, et al. 2018).

• منعقد کننده های فلزی

پرکاربردترین منعقد کننده‌های نمک فلزی در تصفیه آب آشامیدنی نمک‌های آلومینیوم و آهن می‌باشند. عواملی همچون عامل اقتصادی (کم هزینه بودن) و عامل دسترسی آسان و کارایی بالا در حذف کدورت و رنگ از دلایل اصلی استفاده گسترده و طولانی مدت از نمک‌های فلزی بر پایه آلومینیوم و تا حدی نمک‌های بر پایه آهن به عنوان منعقد کننده‌ها در تصفیه خانه‌های آب آشامیدنی به شمار می‌روند. پرمصرف‌ترین نمک‌های آلومینیوم شامل سولفات آلومینیوم، کلرید آلومینیوم و آلومینات سدیم و معروف‌ترین نمک‌های آهن شامل سولفات آهن ۲ ظرفیتی، سولفات آهن ۳ ظرفیتی و کلرید آهن می‌باشند (Adusei-Gyamfi, et al. 2019; Dayarathne, et al. 2021; Wan, et al. 2019). اخیراً به دلیل خطرات مشکوک مرتبط با سلامتی در رابطه با باقیمانده آلومینیوم در بدن، از طرفی کارایی بالا و ظرفیت حذف بهتر مواد آلی طبیعی به کمک انعقادگرهای آهنی، منعقد کننده‌های آهن در مقایسه با انعقادگرهای آلومینیومی کاربرد بیشتری داشته است. در واقع بسیاری از مطالعات گزارش کردند که تحت شرایط بهینه یکسان، نمک‌های آهن به عنوان منعقد کننده‌های آهنی قادر به حذف مواد آلی طبیعی بیشتری در مقایسه با نمک‌های آلومینیوم هستند. نتایج حاصل از چندین مطالعه تطبیقی نشان می‌دهد که در طی فرآیند انعقاد، کلرید آهن (کلرید فریک) در حذف مواد آلی طبیعی در مقایسه با سولفات آلومینیوم به ویژه برای ترکیبات با جرم مولکولی بالا (بالاتر از ۳۰۰۰ گرم در مول) موثرتر عمل می‌کند (Chen, et al. 2015; Umar, et al. 2016). نتایج سایر مطالعات مشابه نشان داد که منعقد کننده‌های بر پایه آهن در حذف بخش مواد آلی طبیعی با وزن مولکولی متوسط (۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ گرم در مول)، به دلیل چگالی بار بیشتر منعقد کننده‌های آهنی در مقایسه با انعقادگرهای بر پایه آلومینیوم، مؤثرتر هستند (Sillanpää, et al. 2018). دلیل اصلی چنین تفاوتی تشکیل لخته‌های با حجم بیشتر و اندازه بزرگ‌تر در طول فرآیندهای انعقادی توسط منعقد کننده‌های آهن در مقایسه با لخته‌های تشکیل شده به کمک منعقد کننده‌های آلومینیوم در طی یک فرآیند انعقاد می‌باشد (Gobena, et al. 2020; Jiang 2015; Särkkä, et al. 2015). گروه‌های متعددی در ارتباط با منعقد کننده‌های فلزی متصور است که از جمله آنها می‌توان به گروه منعقد کننده‌های مبتنی بر آلومینیوم، منعقد کننده‌های مبتنی بر آهن و منعقد کننده‌های تیتانیوم و زیرکونیوم اشاره کرد. در گروه منعقد کننده‌های مبتنی بر آلومینیوم، سولفات آلومینیوم (مشهور به آلوم) و کلرید آلومینیوم از رایج‌ترین منعقد کننده‌های مورد استفاده در تصفیه آب به شمار می‌روند (Sillanpää, et al. 2018). مهم‌ترین عامل مؤثر بر اثر منعقد کننده‌های مبتنی بر فلز، pH است (Naceradska, et al. 2019). هنگامی که آلوم به آب اضافه می‌شود، واکنش‌های هیدرولیز، به اشکال آلومینیوم مونومر محلول و هیدروکسید آلومینیوم

غیر محلول و رسوب درمی آید، و توزیع حالت‌های محلول و رسوبی به pH حداقل حلالیت و غلظت کل آلومینیوم بستگی دارد. بطور معمول محدوده pH هیدرولیز برای آلوم بین ۵/۵ تا ۷/۷ است. در این رابطه، گزارش شده است که توزیع اشکال یاده شده در آلومینیوم پس از افزودن ۹۰ میلی‌گرم در لیتر آلوم نشان داد که رسوب‌های هیدروکسید آلومینیوم غالباً در pH حوالی ۴/۶ بوجود آمده است (Saxena, et al. 2019; Wan, et al. 2019; Sillanpää, et al. 2018; al. 2018). در pH بهینه، حلالیت حداقل است و بخش اصلی منعقد کننده به ذرات لخته جامد تبدیل می شود. اگر pH کمتر از مقدار بهینه کاهش یابد، گونه‌های Al محلول با بار مثبت تولید می‌شوند و در صورت افزایش pH بالاتر از حد مطلوب، گونه‌های Al با بار منفی بیشتری تشکیل می‌شوند. فرآیند حذف مبتنی بر انعقاد زمانی کارآمدتر است که گونه‌های Al با بار مثبت بیشتری تولید شوند زیرا مواد آلی طبیعی عمدتاً از ترکیبات آلی با گروه‌های عاملی با بار منفی تشکیل شده است و این رسوبات مبتنی بر Al با بار مثبت می‌توانند ترکیبات آلی محلول را خنثی نموده و با کاهش حلالیت آنها موجب افزایش ایجاد رسوب می‌گردد (Matilainen, et al. 2010; Sillanpää, et al. 2018). با توجه به کاهش شدید پتانسیل بی‌ثباتی در محدوده به دور از محدوده بهینه، به ویژه در pH حوالی ۳ و ۱۱، ذرات کوچک قادر به تجمع در لخته‌های بزرگ نگردیده و در نتیجه در سیستم آبی باقی مانده و امکان حذف آنها ممکن می‌گردد (Wang, et al. 2016). منعقد کننده‌های بر پایه آهن بیشتر به اشکال کلرید آهن (FeCl₃) و سولفات آهن [Fe₂(SO₄)₃] کاربرد دارند. دوزهای گزارش شده به عنوان انعقادگر مورد استفاده در فرایند تصفیه آب برای کلرید آهن و سولفات آهن به ترتیب از ۵ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر و از ۲۰ تا ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر متغیر است (Sillanpää, et al. 2018). این تغییرات از یک سو به دلیل ویژگی‌های آب خام از جمله ویژگی کلیدی pH و از سوی دیگر به خاطر تغییرات مکانی و زمانی غلظت مواد آلی طبیعی است. محدوده pH بهینه مورد نظر در استفاده از منعقد کننده‌های بر پایه آهن کمی کمتر از محدوده بهینه برای منعقد کننده‌های مبتنی بر آلومینیوم بوده و بین ۴/۵ تا ۷ می‌باشد (CIOBANU, et al. 2022; Kulishenko, et al. 2020). همانطور که اشاره شد، متغیر بودن محتوای مواد آلی طبیعی از یک منبع آبی نسبت به منبع آبی دیگر و همچنین متغیر بودن محتوای آن در یک منبع آبی در طول فصول مختلف سال با توجه رویداد تغییرات فصلی ایجاب می‌کند که در عمل تعیین pH بهینه و دوز منعقد کننده آهن می‌بایست به صورت مستمر و دوره‌ای انجام شود. چنین کاری به منطقی کردن استفاده از منعقد کننده‌ها و مواد شیمیایی، کنترل مقدار لجن تولید شده و در نتیجه بهینه‌سازی فرآیند کلی انعقاد/لخته‌سازی کمک می‌کند (Jiang, et al. 2016). با مرور و مقایسه نتایج مطالعات متعدد انجام یافته در مورد حذف مواد آلی طبیعی از منابع مختلف آب نشان داده شده است که استفاده از منعقد کننده‌های مبتنی بر آهن در حذف مواد آلی طبیعی از آب کارآمدتر از منعقد کننده‌های مبتنی بر آلومینیوم بوده است (Ntwampe, et al. 2016). با این وجود، منعقد کننده‌های مبتنی بر آلومینیوم در مقایسه با منعقد کننده‌های آهنی، دارای راندمان حذف رنگ و کدورت بالاتری هستند (Gonzalez-Torres, et al. 2014). در گروه منعقد کننده‌های فلزی علاوه بر نمک‌های آهن و آلومینیوم پرکاربرد، دو فلز دیگر تیتانیوم (Ti) و زیرکونیوم (Zr) به عنوان منعقد کننده در تصفیه آب در اشکال کلرید تیتانیوم (TiCl₄) یا سولفات تیتانیوم [Ti(SO₄)₂]، کلرید زیرکونیوم (ZrCl₄) یا سولفات زیرکونیوم [Zr(SO₄)₂] به کار گرفته شده و عملکرد آنها در حذف مواد آلی طبیعی و سایر مواد آلی از منابع آبی مختلف مورد تایید قرار گرفته است (Gheraout 2020; Hussain, et al. 2019; Hussain, et al. 2014; Zhao, et al. 2013; Zhao, et al. 2014; Park, et al. 2016; Sillanpää, et al. 2018). در این راستا، یک مطالعه تحقیقاتی کارایی انعقاد کلرید تیتانیوم و کلرید زیرکونیوم را در حذف مواد آلی طبیعی از منبع آب آشامیدنی در جنوب استرالیا در مقایسه با آلوم معمولی بررسی قرار داده است. در این مطالعه نشان داده شد که کلرید زیرکونیوم در حذف رنگ و کربن آلی محلول (DOC) کارآمدترین منعقد کننده بوده است (Sillanpää, et al. 2018). در مطالعه‌ای منعقد کننده زیرکونیوم با منعقد کننده‌های آلومینیوم و آهن سنتی مقایسه شد. منعقد کننده زیرکونیوم توانست بین ۴۶ تا ۱۵۰ درصد کربن آلی محلول (DOC) کمتر در مقایسه با منعقد کننده آهن سنتی ایجاد کند. همچنین استفاده از منعقد کننده زیرکونیوم با تولید کمتر تری‌هالومتان‌ها (THMs) و در نتیجه با تولید کمتر ترکیبات جانبی گندزدایی (DBPs) همراه بود. علاوه بر این خواص، لخته تشکیل یافته توسط زیرکونیوم در مقایسه با لخته‌های تشکیل شده با آهن بزرگتر و قوی‌تر بوده و متوسط اندازه لخته‌های آنها ۹۳۰ میکرومتر بود. نتایج این مطالعه نشان داد که منعقد کننده زیرکونیوم نسبت به سایر منعقد کننده‌های آزمایش شده (آهن و آلومینیوم) عملکرد بهتری داشته است (Jarvis, et al. 2012; Zhang, et al. 2014). در یک مطالعه مقایسه‌ای دیگر، عملکرد انعقاد کلرید تیتانیوم، کلرید آهن و آلوم در آب مورد مقایسه قرار گرفته و تحت

¹ Dissolved Organic Carbon

شرایط عملیاتی متغیر ارزیابی شد. در بین انعقادگرهای مورد مطالعه، از نظر عملکردی کلرید تیتانیوم بهترین منعقد کننده مورد ارزیابی قرار گرفت (Chekli, et al. 2017). در یک تحقیق دیگر، کاربرد سولفات تیتانیوم در فرآیند انعقاد برای حذف مواد آلی طبیعی در مقایسه با سولفات آلومینیوم و سولفات آهن مورد ارزیابی قرار گرفت. لخته های تشکیل شده توسط سولفات تیتانیوم ساختار فشرده ای داشتند و قوی تر و بزرگتر از آنهایی بودند که توسط سایر سولفات های فلزی تولید می شدند (Huang, et al. 2016).

• منعقد کننده های پلیمری

به طور کلی، منعقد کننده های پلیمری ترکیبات طبیعی یا مصنوعی درشت مولکولی هستند که از تکپارها (مونومر) ساخته شده اند و قادرند اجزای تشکیل دهنده یک محیط آبی را بی ثبات کرده و در نتیجه فرایند لخته سازی این عملیات بی ثبات سازی افزایش داده می شود. منعقد کننده هایی همچون پلی آلومینیوم کلرید^۱ (PAC)، پلی فریک کلرید^۲ (PFC)، پلی فریک سولفات^۳ (PFS)، و همچنین منعقد کننده های معدنی کامپوزیت مختلف مانند سولفات آلومینیوم آهن پلیمری^۴ (PFAS)، سولفات آهن روی پلیمری^۵ (PFZS) و کلرید فسفات آلومینیوم پلیمری^۶ (PACP) از جمله منعقد کننده های پلیمری مصنوعی به شمار می روند (Hu, et al. 2015; Kim 2015; Wang, et al. 2015; Zhao, et al. 2017; Wei, et al. 2016; al. 2017). در برخی مطالعات نشان داده شده است که این منعقد کننده های پلیمری معدنی در مقایسه با منعقد کننده هایی مانند سولفات آلومینیوم یا سولفات آهن، در حذف مواد آلی طبیعی و سایر مواد آلی موجود در آب ظرفیت بهتری دارند (Jiang 2015). علاوه بر این، مطالعات دیگر نشان داد که پلیمرهای معدنی عملکرد انعقادی بهتری در آب های سرد یا در آب های کم قلیائیت برای حذف کدورت نسبت به منعقد کننده های متداولی همچون آلوم یا کلرید آهن دارند. با این وجود، مطالعات دیگر گزارش کردند که عملکردهای حذف بهتری با استفاده از منعقد کننده های نمک فلزی مانند کلرید تیتانیوم و کلرید آهن در مقایسه با پلی آلومینیوم کلرید پلیمری به دست آمد (Sillanpää, et al. 2018). با توجه به استفاده از پلیمرهای مصنوعی، منعقد کننده های مصنوعی تولیدی می توانند حاوی آلاینده های حاصل از فرآیند تولید از جمله مونومرهای باقیمانده و محصولات جانبی واکنش باشند که می تواند برای موجودات زنده مضر باشد. به همین علت چندین مطالعه و تحقیق بر روی تولید منعقد کننده های مشتق شده از زیست توده به منظور جایگزین سازی آنها با پلیمرهای مصنوعی متمرکز شده است. برای این منظور، مواد بیوشیمیایی منعقد کننده متعدد با محوریت پلی ساکاریدها و پروتئین ها از منابع زیستی مختلف همچون گیاهان خشکی، گونه های دریایی یا موجودات میکروبی مورد جداسازی و بررسی قرار گرفتند. منعقد کننده های طبیعی تجاری شده امروزی عمدتاً شامل کیتوزان و منعقد کننده های مبتنی بر تانن هستند. مزیت اصلی این بیوانعقادها تجدید پذیری، تجزیه پذیری زیستی، غیرسمی بودن و مقرون به صرفه بودن نسبی آنهاست (Ibrahim, et al. 2021; Ng, et al. 2013; Oladoja 2015; Oladoja 2016).

• انعقاد الکتریکی

انعقاد الکتریکی^۷ (EC) یک فناوری تصفیه آب شناخته شده است که به طور گسترده برای رفع آلودگی منابع آب آشامیدنی و فاضلاب های شهری و صنعتی از آلاینده های آلی، معدنی و بیولوژیکی مانند آفت کش ها، رنگ ها، فلزات سنگین، پاتوژن های بیولوژیکی و غیره مورد استفاده قرار می گیرد. انعقاد الکتریکی در مقایسه با انعقاد شیمیایی این برتری بارز را دارد که بدون نیاز به افزودن مواد شیمیایی در محل عمل انعقاد و حذف مواد آلی طبیعی از آب را امکان پذیر می کند (Das, et al. 2022; Dermouchi, et al. 2015; Hakizimana, et al. 2017; Moussa, et al. 2017). از نظر واکنش، ترکیبات فلزی که عمدتاً شامل فلزات آهن یا آلومینیوم می باشند از آند قربانی در محیط آب حل می شوند. یون های فلزی تولید شده بلافاصله هیدرولیز می شوند تا به طور مداوم هیدروکسیدهای پلیمری آهن یا آلومینیوم در نزدیکی آند منعقد شوند. یک فرآیند انعقاد الکتریکی اصولاً از سه مرحله متوالی پیروی می کند. در مرحله اول منعقد کننده ها در محل از طریق اکسیداسیون الکترولیتی الکترود قربانی تشکیل شده و سپس در مرحله دوم آلاینده ها و ذرات در سوسپانسیون

¹ Poly Aluminium Chloride

² Poly Ferric Chloride

³ Poly Ferric Sulfate

⁴ Polymerized Ferric Aluminum Sulfate

⁵ Polymeric Ferrous-Zinc Sulfate

⁶ Poly Aluminium Chloride Phosphate

⁷ Electrocoagulation

کلوئیدی بی ثباتی می گردد و در مرحله آخر مواد و ترکیبات بی ثبات شده تجمع یافته و موجب تشکیل لخته ها می شوند. علاوه بر این، و با توجه به مرحله حیاتی بی ثباتی، مکانیسم های مختلفی همچون فشرده سازی لایه دوگانه پراکنده در اطراف گونه های باردار در طول تعامل آنها با یون های تولید شده توسط اکسیداسیون الکتروکود مصرفی، خنثی سازی بار گونه های یونی موجود در آب توسط یون های مخالف تولید شده توسط انحلال الکتروشیمیایی آند قربانی و گیر افتادن مواد کلوئیدی باقیمانده در آب توسط یک پوشش لجنی تشکیل یافته توسط لخته های پل شده گزارش شده است (Sillanpää, et al. 2018). کارایی فرآیندهای انعقاد الکتریکی در تصفیه آب به صورت موثر و قویا به ماهیت شیمیایی محیط های آبی، عمدتاً رسانایی و pH، و همچنین غلظت و خواص شیمیایی آلاینده های مورد نظر در آب بستگی دارد. از فرآیند انعقاد الکتریکی می توان در تاسیسات تصفیه فشرده همراه با واکنش های جانبی اضافی همانند تشکیل حباب هیدروژن و تغییر pH که می توانند در بی ثبات کردن آلاینده ها نقش داشته باشند، استفاده نمود. گزارش شده است که چنین ویژگی هایی در بهبود راندمان حذف، کاهش هزینه های عملیاتی و تولید لجن کمتر مفید هستند (Jing, et al. 2021; Särkkä, et al. 2015; Tahreen, et al. 2020; Ulu, et al. 2015).

• فرایندهای یکپارچه مبتنی بر انعقاد: فرآیندهای تصفیه آب مقاوم و کارآمد

انواع مختلفی از منعقد کننده های تجاری موجود عمدتاً از نوع فلزی و پلیمری، برای تصفیه و رفع آلودگی منابع آب آشامیدنی مورد استفاده قرار می گیرند. با این وجود، علیرغم راندمان بالای آنها برای حذف مواد آلی طبیعی و سایر آلاینده های آلی و معدنی، چندین مشکل برای کاربردهای در مقیاس بزرگ گزارش شده است. این موارد عمدتاً شامل فلزات و پلیمرهای جدا شده و باقیمانده در پساب های تصفیه شده، ایجاد تغییر در pH، هزینه های عملیاتی نسبتاً بالا، و تولید مقدار زیادی از لجن (به ویژه در فرآیند انعقاد پیشرفته که نیاز به استفاده از منعقد کننده های بیشتری دارد) می شود (Jung, et al. 2015; Li, et al. 2022; Sillanpää, et al. 2018; Yusuf, et al. 2020). به طور کلی در راستای تصفیه آب آشامیدنی، علاوه بر فرآیند انعقاد، فناوری های کاربردی مختلفی در سرتاسر جهان به کار گرفته می شود، از جمله این فناوری ها می توان به فیلتراسیون غشایی (میکرو، اولترا و نانو فیلتراسیون)، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، تبادل یونی، اسمز معکوس یا اسمز رو به جلو و جذب اشاره نمود (Bhatnagar and Sillanpää 2017; Chun, et al. 2015; Malkoske, et al. 2020; Metsämuuronen, et al. 2014). فرآیند انعقاد یکپارچه - فیلتراسیون غشایی یکی از فرایندهای کارآمد در حذف مواد آلی طبیعی از آب به شمار می رود. استفاده از فرآیندهای جداسازی و تصفیه مبتنی بر غشاء برای تصفیه منابع آب غنی از مواد آلی طبیعی به طور کلی با یک مرحله پیش تصفیه انجام می شود. چنین رویکردی به منظور کاهش پدیده رسوب غشایی، کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری و افزایش قابلیت حذف کلی ضروری است. بسیاری از مطالعات مرتبط ثابت کرده اند که مواد هیومیک می توانند به طور قابل توجهی کارایی اولترافیلتراسیون (UF) را برای حذف مواد آلی طبیعی از محیط های آبی کاهش دهند (Keucken, et al. 2013; Shen, et al. 2017; Yu, et al. 2017). در مطالعه ای بر روی رودخانه پیراپو در برزیل از دو منعقد کننده کیتوزان و سولفات آلومینیوم در مرحله انعقاد/لخته سازی استفاده گردید و مشخص شد که استفاده از کیتوزان به عنوان منعقد کننده و به دنبال آن بکارگیری اولترافیلتراسیون (فشار غشایی ۱ بار) بیشترین کاهش بار آلی (۹۱ درصد) را در مقایسه با انعقاد به تنهایی (۶۰ درصد) و اولترافیلتراسیون به تنهایی (۸۶/۷ درصد) را ممکن می سازد. به خاطر همین کارآلایی بالای فرآیند یکپارچه ذکر شده، نویسندگان استفاده از کیتوزان را به عنوان یک منعقد کننده طبیعی قبل از فرآیند اولترافیلتراسیون برای یک تصفیه آب سطحی سازگار با محیط زیست و کارآمد پیشنهاد کردند (Sillanpää, et al. 2018). در مطالعات دیگر از انواع مختلفی از غشاها در فرآیند انعقاد-فیلتراسیون استفاده شد. در این راستا، یک مطالعه تحقیقاتی از غشای سرامیکی در ترکیب با پلی آلومینیوم کلرید برای تصفیه آب خام رودخانه استفاده گردید. نتایج اصلی نشان داد که فرآیند یکپارچه در حذف مواد آلی نسبت به انعقاد یا فیلتراسیون غشایی به تنهایی موثرتر بود (Ang, et al. 2016). همراه با اولترافیلتراسیون، بسیاری از مطالعات سناریوهای یکپارچه سازی شامل انعقاد و نانوفیلتراسیون را بررسی کردند. به عنوان مثال، یک تیم تحقیقاتی کارایی یک سیستم یکپارچه شامل دو نوع نانوغشا و دو نوع منعقد کننده (آلوم و سولفات آهن) را برای حذف هیومیک اسید، آنیون های برمید و برومات و کاهش شار نفوذی بررسی کردند. نتایج حاصل از این مطالعه تایید کرد که کارایی فرآیند انعقاد-نانوفیلتراسیون یکپارچه برای حذف هیومیک اسید و کاهش برومات، در هنگام استفاده از سولفات آهن، در عین حال حفظ و حتی بهبود شار نفوذی اتفاق

¹ Ultra-Filtration

افتاد. با این وجود، هیچ یک از فرآیندهای اعمال شده (تکنیک های یکپارچه یا منفرد) در حذف برمید کارآمد نبود (Listiarini, et al. 2010). در مطالعه دیگری، کیتوزان به عنوان منعقد کننده طبیعی در فرآیند غشای نانوفیلتراسیون انعقادی هیبریدی برای تصفیه آب مورد آزمایش قرار گرفت. یافته اصلی ناسازگاری کیتوزان با غشاهای نانو بود. از این رو، اگرچه منعقد کننده طبیعی در از بین بردن کدورت محلول مصنوعی هیومیک اسید مؤثر بود، مکانیسم اصلی انعقاد خنثی سازی بار بود که ذرات بار خنثی را در محلول های رویی تولید می کرد و در نتیجه با افزایش رسوب غشاء و به دلیل کاهش دافعه الکترواستاتیکی تأثیر مخربی بر عملکرد غشاء ایجاد می کرد (Ang, et al. 2016; Ma, et al. 2022). همچنین در سایر مطالعات تحقیقاتی، سیستم یکپارچه انعقاد الکتریکی و فیلتراسیون غشایی برای حذف مواد آلی طبیعی از محیط های آبی با فرآیندهای منفرد مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد سیستم های هیبریدی در مقایسه با فرآیندهای منفرد بهبود یافته بود (Chellam and Sari 2016; Han, et al. 2015; Sun, et al. 2016). یکی دیگر از سناریوهای یکپارچه، ترکیب انعقاد با تکنیک جذب سطحی است که به فرآیند یکپارچه انعقاد - جذب مشهور است. پرکاربردترین جاذب در تصفیه آب، کربن فعال است. در بسیاری از مطالعات بر روی سیستم های یکپارچه ترکیبی از منعقد کننده ها و کربن های فعال مختلف متمرکز شده اند. به عنوان مثال، پودر کربن فعال را با انعقاد بهبود یافته جفت می کنند و فرآیند یکپارچه بوجود آمده را برای حذف مواد آلی طبیعی در یک تصفیه خانه آب بکار برده و با این مکانیسم فرایند تشکیل محصولات جانبی ضد عفونی (DBPs) را نیز کنترل می نمایند. در مطالعه یک تیم تحقیقاتی در استرالیا نتایج امیدوارکننده ای در این راستا یافت شد. در این مطالعه با افزودن کربن های فعال به بهبود حذف کلی مواد آلی طبیعی تا ۷۰ درصد کمک کرد و به دنبال آن منجر به کاهش قابل توجه (به میزان ۸۰ تا ۹۵ درصد) در تشکیل محصولات جانبی ضد عفونی (DBPs) شد. با این وجود، یک مسئله جدی توسط نویسندگان در ارتباط با تشکیل محصولات جانبی ضد عفونی بروم مطرح شد که سمی تر از آنالوگ های کلردار خود هستند و کربن های فعال استفاده شده در حذف یون های برمید مؤثر نبودند (Kristiana, et al. 2018). در یک مطالعه سیستم یکپارچه متشکل از ترکیب فرآیند انعقاد با تکنیک جذب سطحی، از کاه گندم اصلاح شده به روش شیمیایی به عنوان جاذب و از دو پلیمر معدنی پلی آلومینیوم کلرید و پلی فریک کلرید به عنوان منعقد کننده برای حذف مواد آلی طبیعی از آب رودخانه استفاده گردید. یافته های مطالعه نشان داد که کارایی فرآیند انعقاد-جذب یکپارچه، در حذف مواد آلی و کاهش کدورت در مقایسه با هر یک از فرآیندهای انعقاد و جذب به طور جداگانه به میزان قابل ملاحظه ای بالاتر بوده است (Sillanpää, et al. 2018; Zhan, et al. 2010). یکی دیگر از سیستم های یکپارچه، ترکیب فرآیند اکسیداسیون با فرآیند انعقاد است که به سیستم یکپارچه اکسیداسیون - انعقاد مشهور است. فرآیندهای اکسیداسیون عموماً قبل از مرحله انعقاد اعمال می شوند. بنابراین، راندمان کلی چنین سیستم یکپارچه ای به شدت به نتیجه کمی و کیفی تخریب اکسیداتیو مواد آلی طبیعی بستگی دارد. از این نظر و بر اساس ترکیب اولیه مواد آلی طبیعی و فرآیند اکسیداسیون اعمال شده (فرآیندهای مبتنی بر اشعه ماورای بنفش، فتون و اوزن)، انواع مختلفی از ترکیبات واسطه در محیط آبی وجود خواهند داشت تا تحت انعقاد قرار گیرند. در این مرحله، خواص ساختاری، مولکولی و شیمیایی این ترکیبات بر چندین شرایط عملیاتی از جمله نوع ماده منعقد کننده مورد استفاده، دوزهای مورد استفاده و شرایط عملیاتی بهینه که باید تنظیم شود، عمدتاً pH، تأثیر خواهد گذاشت. در این سیستم حتی اگر استفاده از انعقاد پس از اکسیداسیون به مواد آلی طبیعی و ترکیبات بستگی زیادی داشته باشد و همیشه مؤثر نباشد، اگر ما کارایی مرحله اکسیداسیون (به عنوان تصفیه اصلی) را از طریق اکسیداسیون پیشرفته مختلف به طور کامل بهینه کنیم، این فرآیند یکپارچه همچنان یک گزینه جالب باقی می ماند. چرا که از طریق روش های مختلف اکسیداسیون پیشرفته و سپس اعمال انعقاد (به عنوان یک پس تصفیه) برای حذف محصولات جانبی ضد عفونی تشکیل شده در طول فرآیند اکسیداسیون مؤثر عمل خواهد کرد (Sudoh, et al. 2015; Uyguner, et al. 2007; Wang, et al. 2014). در یک مطالعه مرتبط، یک فرآیند ترکیبی اکسیداسیون/انعقاد فوتوکاتالیستی برای حذف اسید هیومیک در طی تصفیه آب آشامیدنی معمولی با استفاده از دی اکسید تیتانیوم P25 به عنوان کاتالیزور و آلوم به عنوان منعقد کننده آزمایش شد. ابتدا، فرآیند انعقاد به تنهایی بهینه شد (pH=5 و دوز منعقدکننده ۱۱۰ میلی گرم در لیتر) و به دنبال آن امکان حذف ۷۰ درصدی مواد هیومیک را فراهم گردید. استفاده از سیستم هیبریدی پیشنهادی به افزایش میزان حذف مواد هیومیک به ۹۰ درصد کمک کرد (Ayekoe, et al. 2017; Sillanpää, et al. 2018). فرآیند یکپارچه انعقاد-تبادل یونی یکی دیگر از سیستم های یکپارچه به شمار می رود. تبادل یونی یک تکنیک پرکاربرد در زمینه تصفیه آب بوده و برای حذف آلاینده های آلی و معدنی باردار بکار می رود. این فرآیند عملکرد بهتری در مقایسه با فرآیند جذبی همچون بسترهای جذب کربن های فعال معمولی و رزین های غیریونی دارد (Hu, et al. 2014; Humbert, et al. 2008). در طی ۱ تا ۲ دهه گذشته، در سراسر جهان

کاربرد رزین های تبادل آنیونی برای حذف مواد آلی طبیعی و مواد هیومیک از منابع آب آشامیدنی بطور قابل توجهی از سوی محققان مورد توجه واقع شده است (Boyer 2015; Mergen, et al. 2008; Nguyen, et al. 2011). اخیراً، مطالعات تحقیقاتی متعددی بر روی ادغام احتمالی تبادل یونی، قبل یا بعد از انعقاد به منظور افزایش کارایی کلی برای حذف مواد آلی طبیعی از طریق سیستم هیبریدی متمرکز شده است، که با کاهش میزان استفاده از منعقدکننده ها، کاهش میزان لجن تولیدی و همچنین با کاهش پتانسیل تشکیل محصولات جانبی ضد عفونی همراه بوده است (Bergamasco, et al. 2011; Humbert, et al. 2007). در یک مطالعه مقایسه ای دیگر، انعقاد تقویت شده با کربن فعال پودری همراه شد و هر فرآیند یکپارچه برای حذف پیش سازهای محصولات جانبی ضد عفونی از مواد آلی طبیعی ارزیابی گردید. یافته اصلی این بود که جفت شدن انعقاد را با رزین ¹MIEX گزینه بهتری برای منابع آبی حاوی برمید بالا می دانستند. زیرا این فرایند در کاهش تشکیل محصولات جانبی ضد عفونی برم دار موثر بود. نویسندگان همچنین بیان کردند که برای آب هایی با محتوای یدید بالا، توانایی MIEX برای جذب این ترکیب یونی می تواند تشکیل محصولات جانبی ضد عفونی یددار را پس از ضد عفونی آب کاهش دهد (Drikas, et al. 2011; Karpinska, et al. 2013; Watson, et al. 2015). مطالعات متعدد دیگری، ترکیب سودمند MIEX با فرآیندهای انعقادی متداول یا پیشرفته برای حذف مواد آلی طبیعی از محیط های آبی را تایید کردند (Gibert, et al. 2017; Xu, et al. 2016; Xu, et al. 2013).

۴- نتیجه گیری

یکی از اجزای اصلی و جدایی ناپذیر در محیط های آبی پیدایش مواد آلی طبیعی در آن می باشد. این مواد از نظر کمیت و کیفیت با توجه به تغییرات مکانی و زمانی حاکم دارای ماهیت پیچیده می باشد. این ماهیت پیچیده مواد آلی طبیعی یکی از چالش اصلی پیش روی تکنیک ها و روش های مختلف تصفیه آب است که برای حذف مواد آلی طبیعی از منابع آب آشامیدنی مورد استفاده قرار می گیرد. بر این اساس، به منظور انتخاب صحیح روش ها و فناوری های مورد استفاده در تصفیه آب و انجام پیش بینی های لازم در جهت واکنش پذیری این مواد آلی طبیعی با مواد شیمیایی موجود در آب، مشخص کردن نوع مواد آلی طبیعی و ماهیت های مختلف آن از اهمیت زیاد برخوردار بوده و تسلط بر این موارد می تواند در رسیدن به راندمان حذف بالا و کاهش تشکیل بالقوه محصولات جانبی مضر ناشی از فرایند گندزدایی بطور چشمگیری موثر واقع شود. یکی از مناسب ترین روش های تصفیه آب با هدف حذف مواد آلی طبیعی از منابع آب آشامیدنی استفاده از فرآیندهای انعقاد پرکاربرد می باشد. برای این منظور انواع مختلفی از منعقد کننده ها از جمله نمک های فلزی، پلیمرهای معدنی و آلی از نوع طبیعی یا مصنوعی و سناریوهای ترکیبی مختلف بین آن منعقد کننده ها توسعه یافته شده است. برای اطلاع از مناسب ترین فرایند و انتخاب بهترین ماده منعقد کننده در جهت حذف بهتر مواد آلی طبیعی نیاز به ارزیابی دقیق ترکیب مواد آلی طبیعی و شناسایی خواص و ماهیت منابع آب مورد نظر برای تصفیه می باشد. چنین اطلاعات کلیدی در راستای انتخاب مناسب ترین منعقد کننده ها و پیش بینی مکانیسم های انعقاد ترکیبی با تعامل بالقوه همچون خنثی سازی بار/رسوب، جذب، هم رسوبی و انعقاد ناهمگن کمک می کند (Davis and Edwards 2014; Sillanpää, et al. 2018). با توجه به نتایج مطالعات گردآوری شده با هدف مقایسه ای در بین دسته های مختلف منعقد کننده ها، ملاحظه گردید که بیشترین راندمان حذف مواد آلی طبیعی از منابع آب مربوط به آلوم، آهن، پلیمرها، منعقد کننده های زیستی و انعقاد الکتریکی هستند. از سوی دیگر، تعداد زیادی از مطالعات تحقیقاتی بر بهبود نرخ حذف مواد آلی طبیعی با استفاده از فرآیندهای یکپارچه، مستعد کاربرد صنعتی، جفت کردن انعقاد با سایر فناوری های پیشرفته تصفیه آب متمرکز بودند. با توجه به نتایج مطالعات گردآوری شده و روش های ذکر شده در آنها، چالش اصلی این است که اکثر مطالعات با استفاده از راه حل های مصنوعی و در مقیاس آزمایشگاهی انجام می شوند که باعث می شود نتایج مربوط به سناریوهای واقعی ناکافی باشد، ارائه کار با آب های طبیعی همراه با آزمایشات در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت می تواند نتایج کاربردی بهتری به همراه داشته باشد. بنابراین، انجام آزمایش های انعقاد با استفاده از منعقد کننده های تازه توسعه یافته (عمدتاً ترکیبی یا بیولوژیکی) بر روی آب های طبیعی، بلافاصله یا پس از آزمایش های اولیه بر روی آب های مصنوعی در مطالعات آتی مورد انتظار می باشد. در آینده قابل پیش بینی، کاربرد انعقاد در تصفیه آب باید ارتقا یابد تا در دو مفهوم پایدار نوظهور اقتصاد چرخشی و اقتصاد زیستی قرار گیرد. در اقتصاد چرخشی، تمرکز اصلی برای مطالعات تحقیق و توسعه آینده باید بر مبنای تقویت فرآیند انعقاد بدون افزایش دوز منعقد کننده و استفاده بیشتر از منعقد کننده های کارآمدتر هیبریدی بوده و همچنین بر مبنای توسعه طرح های کارآمد و مقرون به صرفه برای بازیابی و استفاده مجدد از منعقد کننده ها باشد. در مورد اقتصاد زیستی، تولید و کاربرد منعقد کننده های پلیمری مبتنی بر زیست از

¹ Magnetic Ion Exchange Systems

گیاهان، جلبک‌ها یا میکروارگانیسم‌ها به نظر می‌رسد مناسب‌ترین جایگزین برای یک رویکرد تصفیه پایدار آب باشد. هدف اصلی برای مطالعات تحقیق و توسعه مرتبط باید توسعه منعقد کننده های زیستی باشد که بتوانند با همتایان معمولی رقابت کنند اما با افزایش هزینه و سازگاری با محیط زیست همراه می باشند (Davis and Edwards 2014; Keeley, et al. 2012; Keeley, et al. 2016;) (Sillanpää, et al. 2018).

منابع

- Adusei-Gyamfi, Junias, et al. 2019. Natural organic matter-cations complexation and its impact on water treatment: A critical review. *Water research* 160:130-147.
- Amy, Gary. 2008. Fundamental understanding of organic matter fouling of membranes. *Desalination* 231(1-3):44-51.
- Ang, WL, et al. 2016. Chitosan as natural coagulant in hybrid coagulation-nanofiltration membrane process for water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 4(4):4857-4862.
- Ayekoe, Chia Yvette Prisca, Didier Robert, and Droh Gone Lanciné. 2017. Combination of coagulation-flocculation and heterogeneous photocatalysis for improving the removal of humic substances in real treated water from Agbô River (Ivory-Coast). *Catalysis Today* 281:2-13.
- Bergamasco, Rosângela, et al. 2011. Performance of a coagulation-ultrafiltration hybrid process for water supply treatment. *Chemical Engineering Journal* 166(2):483-489.
- Bhatnagar, Amit, and Mika Sillanpää. 2017. Removal of natural organic matter (NOM) and its constituents from water by adsorption—a review. *Chemosphere* 166:497-510.
- Boyer, Treavor H. 2015. Removal of dissolved organic matter by magnetic ion exchange resin. *Current Pollution Reports* 1(3):142-154.
- Chekli, L, et al. 2017. Coagulation performance and floc characteristics of polytitanium tetrachloride (PTC) compared with titanium tetrachloride (TiCl₄) and ferric chloride (FeCl₃) in algal turbid water. *Separation and Purification Technology* 175:99-106.
- Chellam, Shankararaman, and Mutiara Ayu Sari. 2016. Aluminum electrocoagulation as pretreatment during microfiltration of surface water containing NOM: A review of fouling, NOM, DBP, and virus control. *Journal of hazardous materials* 304:490-501.
- Chen, Kai-Yue, et al. 2023. MSynergism of Fe and Al salts for the coagulation of dissolved organic matter: Structural developments of Fe/Al-organic matter associations. *Chemosphere* 316:137737.
- Chen, Wei, et al. 2015. Characterization and coagulation-flocculation performance of a composite coagulant: poly-ferric-aluminum-silicate-sulfate. *Desalination and Water Treatment* 56(7):1776-1786.
- Cheng, Xiaoxiang, et al. 2017. Ferrous iron/peroxymonosulfate oxidation as a pretreatment for ceramic ultrafiltration membrane: Control of natural organic matter fouling and degradation of atrazine. *Water research* 113:32-41.
- Chun, Youngpil, et al. 2015. A case study of fouling development and flux reversibility of treating actual lake water by forward osmosis process. *Desalination* 357:55-64.
- CIOBANU, RAMONA, MARCELA MIHAI, and CARMEN TEODOSIU. 2022. An overview of natural organic matter removal by coagulation in drinking water treatment. *Gheorghe Asachi Technical University of Iași* 68:69-92.
- Das, Pranjali P, Mukesh Sharma, and Mihir K Purkait. 2022. Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: A review. *Separation and Purification Technology* 292:121058.
- Davis, Christina C, and Marc Edwards. 2014. Coagulation with hydrolyzing metal salts: mechanisms and water quality impacts. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 44(4):30.347-3.
- Dayarathne, HNP, et al. 2021. Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms. *Journal of Water Process Engineering* 40:101820.
- Dermouchi, Aida, et al. 2015. Aspects regarding the electrocoagulation applications in the water and wastewater treatment. *Journal of Engineering Studies and Research* 21(2):26.
- Drikas, Mary, Mike Dixon, and Jim Morran. 2011. Long term case study of MIEX pre-treatment in drinking water; understanding NOM removal. *Water research* 45(4):1539-1548.
- Ghernaout, Djamel. 2020. *Water Treatment Coagulation: Dares and Trends*. Open Access Library Journal 7(8):1-18.

- Gibert, Oriol, et al. 2017. Removal of dissolved organic carbon and bromide by a hybrid MIEX-ultrafiltration system: insight into the behaviour of organic fractions. *Chemical Engineering Journal* 312:59-67.
- Go, Raymond John C, et al. 2021. Natural organic matter removal from raw surface water: Benchmarking performance of chemical coagulants through excitation-emission fluorescence matrix spectroscopy analysis. *Water* 13(2):146.
- Gobena, B, et al. 2020. Evaluation of Residual Al³⁺ and Fe³⁺ Concentration in Blended Alum-Ferric Chloride Coagulant Use. *Int J Water Wastewater Treat* 6(3).
- Golea, DM, et al. 2017. THM and HAA formation from NOM in raw and treated surface waters. *Water research* 112:226-235.
- Gonzalez-Torres, A, et al. 2014. Examination of the physical properties of *Microcystis aeruginosa* flocs produced on coagulation with metal salts. *Water research* 60:197-209.
- Goslan, Emma H, et al. 2017. Carbonaceous and nitrogenous disinfection by-product formation from algal organic matter. *Chemosphere* 170:1-9.
- Hakizimana, Jean Nepo, et al. 2017. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination* 404:1-21.
- Han, Nana, et al. 2015. Removal of sulfonated humic acid through a hybrid electrocoagulation-ultrafiltration process. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 54(21):5793-5801.
- Hu, Jingyi, et al. 2014. Anionic exchange for NOM removal and the effects on micropollutant adsorption competition on activated carbon. *Separation and Purification Technology* 129:25-31.
- Hu, WC, et al. 2015. Enhanced coagulation for treating slightly polluted algae-containing raw water of the Pearl River combining ozone pre-oxidation with polyaluminum chloride (PAC). *Desalination and Water Treatment* 56(6):1698-1703.
- Huang, Xin, et al. 2016. Application of titanium sulfate in a coagulation-ultrafiltration process: a comparison with aluminum sulfate and ferric sulfate. *RSC advances* 6(55):49469-49477.
- Humbert, Hugues, et al. 2007. Combination of coagulation and ion exchange for the reduction of UF fouling properties of a high DOC content surface water. *Water research* 41:3811-3803: (17).
- Humbert, Hugues, et al. 2008. Natural organic matter (NOM) and pesticides removal using a combination of ion exchange resin and powdered activated carbon (PAC). *Water research* 42(6-7):1635-1643.
- Hussain, Sabir, et al. 2019. Coagulation of dissolved organic matter in surface water by novel titanium (III) chloride: mechanistic surface chemical and spectroscopic characterisation. *Separation and Purification Technology* 213:213-223.
- Hussain, Sabir, et al. 2014. Comparison of the coagulation performance of tetravalent titanium and zirconium salts with alum. *Chemical Engineering Journal* 254:635-646.
- Ibrahim, Azreen, Abu Zahrim Yaser, and Junidah Lamaming. 2021. Synthesising tannin-based coagulants for water and wastewater application: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9(1):105007.
- Jarvis, Peter, et al. 2012. Comparison of coagulation performance and floc properties using a novel zirconium coagulant against traditional ferric and alum coagulants. *Water research* 46(13):4179-4187.
- Jiang, Jia-Qian. 2015. The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering* 8:36-44.
- Jiang, Yanjun, et al. 2016. Impacts of ferrate oxidation on natural organic matter and disinfection byproduct precursors. *Water research*. 125-96:114.
- Jin, Xin, et al. 2020. Towards a comparison between the hybrid ozonation-coagulation (HOC) process using Al- and Fe-based coagulants: Performance and mechanism. *Chemosphere* 253:126625.
- Jing, Gaogui, et al. 2021. Electrocoagulation for industrial wastewater treatment: an updated review. *Environmental Science: Water Research & Technology* 7(7):1177-1196.
- Jung, Chanil, et al. 2015. Removal of humic and tannic acids by adsorption-coagulation combined systems with activated biochar. *Journal of hazardous materials* 300:808-814.
- Karpinska, Anna M, et al. 2013. Applicability of MIEX® DOC process for organics removal from NOM laden water. *Environmental Science and Pollution Research* 20:3890-3899.
- Keeley, J, P Jarvis, and SJ Judd. 2012. An economic assessment of coagulant recovery from water treatment residuals. *Desalination* 287:132-137.
- Keeley, James, et al. 2016. Coagulant recovery and reuse for drinking water treatment. *Water research* 88:502-509.
- Keucken, Alexander, et al. 2017. Combined coagulation and ultrafiltration process to counteract increasing NOM in brown surface water. *Water* 9(9):697.

- Kim, Hyun-Chul. 2015. Microfiltration of humic-rich water coagulated with cationic polymer: The effects of particle characteristics on the membrane performance. *Journal of Membrane Science* 475:349-356.
- Knauer, Katja, et al. 2017. The influence of particles on bioavailability and toxicity of pesticides in surface water. *Integrated environmental assessment and management* 13(4):585-600.
- Kristiana, Ina, Cynthia Joll, and Anna Heitz. 2011. Powdered activated carbon coupled with enhanced coagulation for natural organic matter removal and disinfection by-product control: Application in a Western Australian water treatment plant. *Chemosphere* 83(5):661-667.
- Kulishenko, AE, et al. 2020. Features of Application of Aluminum–Iron Composite Coagulants in Purification of Water with High Content of Natural Organic Substances. *Journal of Water Chemistry and Technology* 42:60-69.
- Kundzewicz, Zbigniew W, et al. 2014. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal* 59(1):1-28.
- Li, Shi, et al. 2022. Recent advances on cellulose-based nanofiltration membranes and their applications in drinking water purification: A review. *Journal of Cleaner Production* 333:130171.
- Listiarini, Karina, et al. 2010. Hybrid coagulation–nanofiltration membrane for removal of bromate and humic acid in water. *Journal of Membrane Science* 365(1-2):154-159.
- Ma, Jiangya, et al. 2022. Coagulation performance of Al/Fe based covalently bonded composite coagulants for algae removal. *Separation and Purification Technology* 285:120401.
- Malkoske, Tyler A, Pierre R Bérubé, and Robert C Andrews. 2020. Coagulation/flocculation prior to low pressure membranes in drinking water treatment: a review. *Environmental Science: Water Research & Technology* 6(11):2993-3023.
- Matilainen, Anu, et al. 2011. An overview of the methods used in the characterisation of natural organic matter (NOM) in relation to drinking water treatment. *Chemosphere*. 1442-1431 :(11)83.
- Matilainen, Anu, Mikko Vepsäläinen, and Mika Sillanpää. 2010. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in colloid and interface science* 159(2):189-197.
- Mergen, Max RD, et al. 2008. Magnetic ion-exchange resin treatment: Impact of water type and resin use. *Water research* 42(8-9):1977-1988.
- Metsämuuronen, Sari, et al. 2014. Natural organic matter removal from drinking water by membrane technology. *Separation & Purification Reviews* 43.16-1 :(1).
- Moussa, Dina T, et al. 2017. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of environmental management* 186:24-41.
- Naceradska, Jana, Lenka Pivokonska, and Martin Pivokonsky. 2019. On the importance of pH value in coagulation. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA* 68(3):222-230.
- Ng, Mega, et al. 2013. Understanding effects of water characteristics on natural organic matter treatability by PACl and a novel PACl-chitosan coagulants. *Journal of hazardous materials* 263:718-725.
- Nguyen, Tien Vinh, et al. 2011. Removal of organic matter from effluents by Magnetic Ion Exchange (MIEX®). *Desalination* 276(1-3):96-102.
- Ntwampe, IO, FB Waanders, and JR Bunt. 2016. Reactivity of Fe salts in the destabilization of acid mine drainage employing mixing and shaking techniques without pH adjustment. *International Journal of Mineral Processing* 146:65-73.
- Okoro, Benjamin U, et al. 2021. Natural organic matter (NOM) and turbidity removal by plant-based coagulants: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9(6):106588.
- Oladoja, Nurudeen Abiola. 2015. Headway on natural polymeric coagulants in water and wastewater treatment operations. *Journal of Water Process Engineering* 6:174-192.
- Oladoja, Nurudeen Abiola. 2016. Advances in the quest for substitute for synthetic organic polyelectrolytes as coagulant aid in water and wastewater treatment operations. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 3:47-58.
- Park, Hanbai, et al. 2016. Water blending effects on coagulation-flocculation using aluminum sulfate (alum), polyaluminum chloride (PAC), and ferric chloride (FeCl₃) using multiple water sources. *Desalination and Water Treatment* 57(16):7511-7521.
- Santschi, PH, et al. 2017. Recent advances in the detection of specific natural organic compounds as carriers for radionuclides in soil and water environments, with examples of radioiodine and plutonium. *Journal of Environmental Radioactivity* 171:226-233.

- Sapingi, Mohd Sharizal Mohd, Munirah Pishal, and Mohamad Fared Murshed. 2017. Natural organic matters removal efficiency by coagulation. AIP Conference Proceedings, 2017. Vol. 1892. AIP Publishing.
- Särkkä, Heikki, Mikko Vepsäläinen, and Mika Sillanpää. 2015. Natural organic matter (NOM) removal by electrochemical methods—A review. *Journal of electroanalytical chemistry* 755:100-108.
- Saxena, Kanika, Urmila Brighu, and Aditya Choudhary. 2018. Parameters affecting enhanced coagulation: a review. *Environmental Technology Reviews* 7(1):156-176.
- Sharp, Emma L, Simon A Parsons, and Bruce Jefferson. 2006. Seasonal variations in natural organic matter and its impact on coagulation in water treatment. *Science of the Total Environment* 363(1-3):183-194.
- Shen, Xue, et al. 2017. Effect of the dosage ratio and the viscosity of PAC/PDMDAAC on coagulation performance and membrane fouling in a hybrid coagulation-ultrafiltration process. *Chemosphere* 173:288-298.
- Sillanpää, Mika, et al. 2018. Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review. *Chemosphere* 190:54-71.
- Sudoh, Ryou, et al. 2015. Removal of dissolved humic acid from water by coagulation method using polyaluminum chloride (PAC) with calcium carbonate as neutralizer and coagulant aid. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 3(2):770-774.
- Sun, Weiguang, et al. 2016. Effect of aluminum speciation on fouling mechanisms by pre-coagulation/ultrafiltration process with different NOM fractions. *Environmental Science and Pollution Research* 23:17459-17473.
- Tahreen, Amina, Mohammed Saedi Jami, and Fathilah Ali. 2020. Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. *Journal of Water Process Engineering* 37:101440.
- Ulu, Feride, et al. 2015. An evaluation on different origins of natural organic matters using various anodes by electrocoagulation. *Chemosphere* 125:108-114.
- Umar, Muhammad, Felicity Roddick, and Linhua Fan. 2016. Comparison of coagulation efficiency of aluminium and ferric-based coagulants as pre-treatment for UVC/H₂O₂ treatment of wastewater RO concentrate. *Chemical Engineering Journal* 284:841-849.
- Uyguner, Ceyda Senem, et al. 2007. Evaluation of adsorption and coagulation characteristics of humic acids preceded by alternative advanced oxidation techniques. *Desalination* 210(1-3):183-193.
- Wan, Yang ,et al. 2019. Reduction of organic matter and disinfection byproducts formation potential by titanium, aluminum and ferric salts coagulation for micro-polluted source water treatment. *Chemosphere* 219:28-35.
- Wang, Jiangting, et al. 2016. Effect of aluminum speciation and pH on in-line coagulation/diatomite microfiltration process: correlations between aggregate characteristics and membrane fouling. *Journal of Molecular Liquids* 224:492-501.
- Wang, Wendong, et al. 2014. Effects of UV radiation on humic acid coagulation characteristics in drinking water treatment processes. *Chemical Engineering Journal* 256:137-143.
- Wang, Zhenbei, et al. 2017. Insight into the combined coagulation-ultrafiltration process: The role of Al species of polyaluminum chlorides. *Journal of Membrane Science* 529:80-86.
- Watson, Kalinda, Maria José Farré, and Nicole Knight. 2015. Enhanced coagulation with powdered activated carbon or MIEX® secondary treatment: A comparison of disinfection by-product formation and precursor removal. *Water research* 68:454-466.
- Wei, Yanxin, et al. 2016. Characterization and coagulation–flocculation behavior of an inorganic polymer coagulant–poly-ferric-zinc-sulfate. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 58:351-356.
- Xu, Jie, et al. 2016. Evaluation of enhanced coagulation coupled with magnetic ion exchange (MIEX) in natural organic matter and sulfamethoxazole removals: the role of Al-based coagulant characteristic. *Separation and Purification Technology* 167:70-78.
- Xu, Zhizhen, et al. 2013. Hybrid treatment process of using MIEX and high performance composite coagulant for DOM and bromide removal. *Journal of Environmental Engineering* 139(1):79-85.
- Yu, Wen-zheng, et al. 2013. Comparison of FeCl₃ and alum pre-treatment on UF membrane fouling. *Chemical Engineering Journal* 234:158-165.
- Yusuf, Ahmed, et al. 2020. A review of emerging trends in membrane science and technology for sustainable water treatment. *Journal of Cleaner Production* 266:121867.
- Zhan, Xiao, et al. 2010. Removal natural organic matter by coagulation–adsorption and evaluating the serial effect through a chlorine decay model. *Journal of hazardous materials* 183(1-3):279-286.

- Zhang, Zhilin, et al. 2014. Comparison of coagulation performance and floc properties of a novel zirconium-glycine complex coagulant with traditional coagulants. *Environmental Science and Pollution Research* 21:6632-6639.
- Zhao, Yanxia, et al. 2017. Polytitanium sulfate (PTS): Coagulation application and Ti species detection. *Journal of Environmental Sciences* 258:52:250.
- Zhao, YX, et al. 2013. Characterization of coagulation behavior of titanium tetrachloride coagulant for high and low molecule weight natural organic matter removal: The effect of second dosing. *Chemical Engineering Journal* 228:516-525.
- Zhao, YX, et al. 2014. Coagulation by titanium tetrachloride for fulvic acid removal: Factors influencing coagulation efficiency and floc characteristics. *Desalination* 335(1):70-77.
- Zhao, YX, et al. 2015. Comparison of a novel polytitanium chloride coagulant with polyaluminium chloride: coagulation performance and floc characteristics. *Journal of environmental management* 147:194-202.