



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2067385.2005



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Evaluation of Ammonia Removal from Industrial Wastewater Using Air Stripping and Wet Air Oxidation Methods

Amir Masoud Vares¹, Bahareh Bidar^{2*}, Vajihe Yousefi³

¹ M.Sc. in Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

² Assistant professor, Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

³ Assistant professor, Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Received: 8 Jun 2025 Accepted: 19 Aug 2025

Abstract

The presence of ammonia in petrochemical wastewater represents a significant environmental challenge. In this study, two methods—stripping with air flow and wet air oxidation (WAO)—for ammonia removal were simulated and analyzed using Aspen Plus software. After simulating the processes based on experimental data and industrial operating conditions, the models were validated with data from previous studies. The thermodynamic model ENRTL-RK was used in the process simulation. Both methods showed acceptable efficiency in terms of nitrogen recovery. The WAO method, with an ammonia removal efficiency of 98.53%, demonstrated superior performance compared to the stripping method, which achieved an ammonia removal efficiency of 92.90%. However, the WAO method requires more complex operating conditions and higher energy consumption. Despite its lower efficiency, the stripping method is considered a suitable option for industrial applications in many cases, especially under technological limitations, due to its operational simplicity, low cost, and ease of implementation.

Keyword: Air Stripping, Wet Air Oxidation, Ammonia Removal, Industrial Wastewater, Aspen Plus.

* b.bidar@eng.usb.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Vares, A.M., Bidar, B., Yousefi, V., "Evaluation of Ammonia Removal from Industrial Wastewater Using Air Stripping and Wet Air Oxidation Methods", Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 90, pp. 35-56, In Persian, (2025).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2067385.2005



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

ارزیابی حذف آمونیاک از پساب صنعتی با بکارگیری روش‌های عریان‌سازی با جریان هوا و اکسیداسیون هوای مرطوب

امیرمسعود وارث¹، بهاره بیدار^{2*}، وجیهه یوسفی³

¹ کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

² استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

³ استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

دریافت: 1404/03/18 پذیرش: 1404/05/28

چکیده

وجود آمونیاک در پساب صنایع پتروشیمی یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی است. در این پژوهش، به شبیه‌سازی و تحلیل دو روش عریان‌سازی با جریان هوا و اکسیداسیون هوای مرطوب (WAO)، جهت حذف آمونیاک، با استفاده از نرم‌افزار Aspen Plus پرداخته شد. پس از شبیه‌سازی فرآیندها با استفاده از داده‌های تجربی و شرایط عملیاتی صنعتی، اعتبارسنجی مدل‌ها با داده‌های مطالعات پیشین صورت گرفت. در شبیه‌سازی فرآیندها از مدل ترمودینامیکی ENRTL-RK استفاده شد. هر دو روش مورد بررسی کارایی قابل قبولی از نظر میزان بازیابی نیتروژن نشان دادند. روش WAO با راندمان حذف آمونیاک 98/53 درصد، عملکرد بالاتری نسبت به روش عریان‌سازی، با درصد حذف آمونیاک 92/9 درصد نشان داد. با این وجود، روش WAO نیازمند شرایط عملیاتی پیچیده‌تر و مصرف انرژی بالاتر است. روش عریان‌سازی، با وجود راندمان کمتر، به دلیل سادگی عملیاتی، هزینه پایین و سهولت اجرا، در بسیاری موارد گزینه مناسبی برای کاربردهای صنعتی به‌ویژه در شرایط محدودیت فناوری محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی: عریان‌سازی با جریان هوا، اکسیداسیون هوای مرطوب، حذف آمونیاک، پساب صنعتی، Aspen Plus

* b.bidar@eng.usb.ac.ir

1- مقدمه

یکی از چالش‌های اساسی در صنایع مختلف، مدیریت و تصفیه پساب‌های تولیدی است که اغلب حاوی ترکیبات مضر برای محیط زیست و سلامت انسان هستند. آمونیاک به عنوان یکی از آلاینده‌های نیتروژنی رایج در پساب‌های صنعتی، به ویژه در صنایعی نظیر پالایشگاه‌های نفت، کارخانه‌های تولید کودهای شیمیایی، صنایع غذایی، صنایع تولید مواد منفجره و صنایع پتروشیمی، به میزان قابل توجهی تولید می‌شود [1, 2]. در پالایشگاه‌های نفت، آمونیاک معمولاً در فرآیندهای کراکینگ و تصفیه نفت به عنوان محصول جانبی ظاهر می‌شود. همچنین در صنایع تولید کود شیمیایی، آمونیاک نقش ماده اولیه را در تولید کودهای نیتروژنی ایفا می‌کند و همین مسئله منجر به تخلیه پساب‌هایی با مقادیر بالای نیتروژن می‌گردد [3, 4].

حضور آمونیاک در منابع آبی، علاوه بر ایجاد بوی نامطبوع و کاهش کیفیت آب، می‌تواند اثرات زیست‌محیطی جدی به همراه داشته باشد. آمونیاک در محیط آبی به فرم‌های مختلفی از جمله آمونیاک غیر یونیزه (NH_3) و یون آمونیوم (NH_4^+) تبدیل می‌شود که بسته به pH محیط، اثرات متفاوتی بر موجودات زنده دارند. آمونیاک غیر یونیزه حتی در غلظت‌های پایین‌تر از 0/02 میلی‌گرم بر لیتر برای آبریان سمی محسوب می‌شود و می‌تواند منجر به مرگ و میر آن‌ها شود [5, 6]. علاوه بر این، آمونیاک و سایر ترکیبات نیتروژنی مانند نیترات و نیتريت، موجب پدیده یوتروفیکاسیون در منابع آبی می‌شوند که نتیجه آن کاهش شدید اکسیژن محلول، رشد بیش‌از حد جلبک‌ها، مرگ آبریان و کاهش تنوع زیستی است [7-9]. پساب‌های نیتروژن دار، علاوه بر اثرات مخرب زیست‌محیطی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان نیز محسوب می‌شوند. به‌طور خاص، نیترات در صورت ورود به منابع آب آشامیدنی می‌تواند باعث بروز مت‌هموگلوبینمی یا سندرم نوزاد آبی در کودکان شود چرا که نیترات با هموگلوبین رقابت کرده و مانع از انتقال مؤثر اکسیژن در بدن می‌شود [10, 11]. همچنین ترکیبات نیتروژنی می‌توانند در زنجیره غذایی تجمع یافته و نهایتاً به بروز سرطان و سایر بیماری‌های مزمن در انسان منجر شوند [12, 13].

با توجه به پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی ناشی از حضور آمونیاک و نیتروژن در پساب‌های صنعتی، توسعه و استفاده از روش‌های کارآمد جهت حذف این ترکیبات امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. روش‌های مختلفی برای حذف و بازیابی پایدار نیتروژن از پساب‌های شهری و صنعتی معرفی شده‌اند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی روش‌های فیزیکی-شیمیایی و روش‌های بیولوژیکی تقسیم‌بندی کرد [14]. روش‌هایی مانند تقطیر (جداسازی بخار) [15, 16]، جذب با کربن فعال² [17, 18]، تبادل یونی³ [19, 20]، و فرآیندهای غشایی مانند اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون [21, 22] از جمله تکنیک‌های فیزیکی-شیمیایی رایج هستند که بسته به نوع و میزان آلودگی، انتخاب و استفاده می‌شوند [19, 23]. روش‌های فیزیکی مانند تقطیر و عریان‌سازی با جریان هوا⁴ برای غلظت‌های مختلف آمونیاک کارایی دارند اما ممکن است انرژی‌بر باشند. جذب با کربن فعال برای غلظت‌های پایین‌تر مؤثر است اما نیاز به بازسازی مکرر دارد [24]. در تبادل یونی، یون‌های آمونیوم با یون‌های موجود در رزین‌ها تعویض می‌شوند. این روش کارایی بالایی دارد اما نیازمند احیا رزین و مدیریت پساب جانبی است. فرآیندهای غشایی مانند اسمز معکوس

¹ Steam separation

² Adsorption with activated carbon

³ Ion exchange

⁴ Air Stripping

و نانوفیلتراسیون نیز در حذف آمونیاک موفق عمل می‌کنند، ولی هزینه نصب بالا و احتمال گرفتگی غشاء از معایب آن‌هاست [17]. روش‌های شیمیایی شامل کلرزنی و استفاده از جاذب‌های مختلف است که عموماً با تحولات شیمیایی آمونیاک را حذف می‌کنند. از سوی دیگر، فرآیندهای بیولوژیکی نظیر نیتریفیکاسیون⁵ و دنیتریفیکاسیون⁶ [25, 26]، با تبدیل آمونیاک به نیتروژن گازی، رویکردی سازگار با محیط زیست، کم هزینه و با راندمان بالا ارائه می‌دهند اما به کنترل دقیق شرایط محیطی نیازمندند.

استراتژی‌های بین رشته‌ای از جمله ادغام تکنیک‌های نوآورانه، نظیر سیستم‌های غشایی با رویکردهای سنتی برای افزایش مدیریت نیتروژن، همراه با بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، مانند pH، دما و نسبت کربن به نیتروژن، برای دستیابی به نرخ‌های حذف بالا و در عین حال به حداقل رساندن مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی آلودگی نیتروژن و ارتقای مدیریت پایدار پساب، مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند [14]. فناوری‌های بازیابی مواد مغذی سازگار با محیط زیست به عنوان روشی پایدار برای بازیافت مواد مغذی مهم و تبدیل زباله به کودهای غنی از مواد مغذی، بهبود سلامت خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شامل کمپوست، هضم بی‌هوازی، سنتز بیوجار، ورمی کمپوست و بازیابی مبتنی بر میکروبی از دیگر راهکارهای مؤثر در مدیریت چالش‌های مرتبط با نیتروژن مطرح هستند [27].

در سال‌های اخیر، فناوری‌های پیشرفته‌تری نظیر اکسیداسیون هوای مرطوب⁷ نیز جهت حذف آمونیاک مطرح شده‌اند که با بهره‌گیری از شرایط خاص دما و فشار، آمونیاک را به نیتروژن گازی و آب تبدیل می‌کنند. این روش نه تنها در حذف مؤثر آمونیاک عملکرد موفقی دارد، بلکه به دلیل عدم تولید آلاینده‌های ثانویه، از نظر زیست‌محیطی نیز مطلوب تلقی می‌شود [28-30].

مروری بر پژوهش‌های پیشین در زمینه حذف آمونیاک از پساب‌های صنعتی نشان‌دهنده تلاش‌های گسترده و متنوعی است که طی دهه‌های اخیر توسط پژوهشگران مختلف برای توسعه روش‌های کارآمد با هزینه‌های اقتصادی کمتر انجام شده است. افزایش تولید پساب‌های حاوی آمونیاک ناشی از صنایع پتروشیمی، تولید کودهای شیمیایی و پالایشگاه‌ها، ضرورت بررسی روش‌های عملیاتی مؤثر برای حذف این آلاینده زیست‌محیطی را افزایش داده است. مطالعات متعددی به شبیه‌سازی فرآیندهای حذف آمونیاک با به‌کارگیری نرم‌افزارهای مهندسی پرداخته‌اند.

در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی فرآیندهای حذف آمونیاک از پساب‌های صنعتی با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند اسپن هایسیس⁸ و مدل‌سازی‌های پیشرفته نظیر RSM و شبکه‌های عصبی مصنوعی¹⁰ مورد توجه قرار گرفته است. مطالعاتی مانند پژوهش رضا و چن نشان داده‌اند که فرآیند عریان‌سازی حرارتی تحت خلأ می‌تواند با راندمان بالای 97 درصد آمونیاک را حذف کند و با استفاده از مدل‌های ترکیبی RSM-ANN، شرایط بهینه عملیاتی مانند pH، دما و زمان تماس به‌دقت پیش‌بینی می‌شود [31]. همچنین، فتحی و همکاران با استفاده از مدل‌سازی فرآیند عریان‌سازی با جریان هوا و جاذب کلینوپتیلولیت اصلاح‌شده، موفق به دستیابی به راندمان حذف 96 درصد شدند و تأثیر پارامترهایی

⁵ Nitrification

⁶ Denitrification

⁷ Wet Air Oxidation

⁸ Aspen HYSYS

⁹ Response surface methodology (RSM)

¹ Artificial neural network (ANN)

مانند غلظت اولیه، pH و زمان تماس را بررسی کردند. این مطالعات نشان می‌دهند که شبیه‌سازی دقیق می‌تواند نقش کلیدی در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های حذف آمونیاک ایفا کند [32].

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی¹¹ در طراحی و تحلیل عملکرد غشاهای تماس‌دهنده فیبری توخالی می‌تواند به بهینه‌سازی انتقال جرم آمونیاک کمک کند. پژوهش مرجانی و شیرازیان با توسعه یک مدل دوبعدی غیرپایدار، توانستند غلظت آمونیاک را در بخش‌های مختلف سیستم پیش‌بینی کرده و تأثیر پارامترهایی مانند سرعت جریان و ضخامت غشا را بررسی کنند. این نوع مدل‌سازی امکان تحلیل دقیق‌تری از رفتار سیستم در شرایط عملیاتی مختلف را فراهم می‌کند و می‌تواند در طراحی صنعتی بسیار مؤثر باشد [33].

در پژوهشی دیگر، عملکرد یک تماس‌دهنده غشای فیبری توخالی برای حذف آمونیاک از محلول آبی با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی شده است. یک مدل ریاضی دوبعدی و غیرپایدار توسعه یافت که معادلات جریان و توزیع غلظت را با استفاده از روش CFD حل می‌کند. این مدل از نرم‌افزار کامسول¹² برای شبیه‌سازی تماس‌دهنده و از نرم‌افزار متلب¹³ برای تحلیل تغییرات غلظت در مخزن تغذیه بهره گرفته است. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی انطباق خوبی دارد و فرض انتشار نادسن¹⁴ دقت مدل را افزایش داده است. همچنین، تأثیر عوامل عملیاتی مانند سرعت جریان ورودی، غلظت آمونیاک و pH بر راندمان حذف مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که این مدل ابزار مؤثری برای تحلیل عملکرد تماس‌دهنده‌های غشایی در فرآیند حذف آمونیاک است [20]. از سوی دیگر، چن و همکاران در یک مقاله مروری جامع، فناوری‌های نوین حذف و بازیابی آمونیاک را با تمرکز بر فرآیندهای الکتروسینتیکی و جداسازی غشایی بررسی کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که ترکیب فرآیندهای الکترودیالیز، دیونیزاسیون خازنی و تماس‌دهنده‌های غشایی می‌تواند منجر به حذف بیش از 90 درصد آمونیاک با مصرف انرژی بهینه شود [34].

در پژوهش هوانگ و همکارانش، مدل‌سازی ریاضی فرآیند تصفیه زیستی به عنوان ابزاری مؤثر برای پیش‌بینی کیفیت پساب بررسی شده است. با توجه به محدودیت‌های روش‌های سنتی تنظیم پارامترها که به داده‌های تجربی زیادی نیاز دارند و در پیش‌بینی عملکرد تصفیه پساب‌های جدید محدود هستند، هدف اصلی مطالعه بررسی امکان استفاده از نرم‌افزار بیووین¹⁵ برای شبیه‌سازی عملکرد راکتورهای غشایی زیستی¹⁶ در تصفیه پساب واقعی پتروشیمی بوده است. تنظیم مدل با استفاده از روش تنفس‌سنجی و بررسی ضرایب بازده رشد مشاهده شده و واقعی، برای سه راکتور آزمایشگاهی با زمان نگهداری جامد متفاوت انجام شد و هر سه راکتور کارایی بالایی در حذف مواد آلی و آمونیاک نشان دادند (بیش از 80% و 99/9% به ترتیب). شبیه‌سازی با مدل تنظیم‌شده نیز انطباق خوبی با میزان اکسیژن

¹ Computational Fluid Dynamics (CFD)	1
¹ COMSOL	2
¹ MATLAB	3
¹ Knudsen diffusion	4
¹ BioWin	5
¹ Membrane Bioreactors (MBR)	6

خواهی شیمیایی¹⁷، نیترات خروجی و غلظت مواد جامد معلق¹⁸ در مخزن بیولوژیکی داشت. نتایج نشان داد که استفاده از نرم افزار بیووین همراه با تعیین صحیح پارامترهای حساس می تواند روشی مؤثر برای پایش و شبیه سازی تصفیه پساب پتروشیمی توسط راکتورهای زیستی غشایی باشد و نسبت به تنظیم دستی تمامی پارامترها کارایی بالاتری دارد [35].

در سال های اخیر، ادغام هوش مصنوعی (AI) در مدیریت تصفیه فاضلاب، رویکردی امیدوارکننده برای بهینه سازی پیش بینی های کیفیت پساب و افزایش بهره وری عملیاتی ارائه داده است. در این راستا، جین و همکارانش (2025) در مطالعه ای مروری به بررسی رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی با استفاده از الگوریتم هایی مانند شبکه های عصبی و منطق فازی در فرآیندهای تصفیه فاضلاب، شامل تجزیه و تحلیل/پیش بینی پارامتر، توسعه مدل و بهینه سازی فرآیند پرداختند. این مطالعه شش حوزه امیدوارکننده از دوز مواد شیمیایی مبتنی بر هوش مصنوعی، از جمله معرف های اسید-باز، منعقدکننده ها/لخته سازها، مدیریت مواد ضد عفونی کننده/محصولات جانبی ضد عفونی (DBPs)، منابع کربن خارجی، معرف های حذف فسفر و جذب ها را مورد بررسی قرار داده است. با این وجود، چالش های قابل توجهی در به کارگیری مدل های هوش مصنوعی فراتر از محیط های شبیه سازی شده برای کاربردهای دنیای واقعی باقی مانده است [36]. در مطالعه مرتبط دیگر، دیکمن¹⁹ و همکارانش، عملکرد مدل های یادگیری ماشین را در پیش بینی پارامترهای کلیدی پساب فاضلاب، یعنی میزان اکسیژن خواهی شیمیایی، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی²⁰، کل جامدات معلق²¹، کل نیتروژن پساب و کل فسفر پساب، ارزیابی کردند. سه تکنیک انتخاب ویژگی شامل انتخاب K بهترین²²، اطلاعات متقابل²³ و حذف ویژگی بازگشتی²⁴ برای شناسایی مهم ترین پیش بینی کننده ها با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی²⁵ کار گرفته شد. این مطالعه از مدل های یادگیری گروهی، از جمله تقویت XG²⁶، جنگل تصادفی، تقویت گرادیان²⁷ و LightGBM²⁸، استفاده کرده و آنها را با مدل های درخت تصمیم گیری²⁹ مقایسه کرده است. نتایج نشان می دهد که جامدات معلق فرار پساب به طور مداوم بالاترین اهمیت پیش بینی را در تمام روش های انتخاب ویژگی داشته است. مدل های گروهی به طور قابل توجهی از درخت های تصمیم گیری بهتر عمل کردند، به طوری که روش تقویت گرادیان به بهترین دقت پیش بینی برای جامدات معلق کل و نیتروژن کل دست یافت. الگوریتم تقویت XG بهترین عملکرد را در پیش بینی COD و BOD نشان داد و LightGBM بالاترین دقت را در پیش بینی فسفات کل به دست آورد. مدل های درخت تصمیم گیری به طور مداوم عملکرد ضعیفی داشتند و بالاترین نرخ خطا را نشان دادند. این یافته ها پتانسیل رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی در مدیریت فاضلاب را برای بهبود

¹ Chemical Oxygen Demand (COD)	7
¹ Volatile Suspended Solids (VSS)	8
¹ Dikmen et al. (2025)	9
² Biological Oxygen Demand (BOD)	0
² Total Suspended Solids (TSS)	1
² SelectKBest	2
² Mutual Information	3
² Recursive Feature Elimination (RFE)	4
² Random Forest	5
² Extreme Gradient Boosting (XGBoost)	6
² Gradient Boosting	7
² Light Gradient-Boosting Machine	8
² Decision Tree models	9

تصمیم‌گیری، رعایت مقررات و بهره‌وری منابع برجسته می‌کند. با این حال، محدودیت‌هایی مانند بی‌نظمی‌های عملیاتی و تغییرات فصلی همچنان چالش‌هایی برای اصلاح بیشتر هستند [37].

در سال‌های گذشته، نرم‌افزار اسپن پلاس³⁰ نیز به عنوان ابزاری توانمند در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیندهای مختلف حذف آمونیاک از پساب‌های صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از مطالعات برجسته در این زمینه توسط اریکو و همکارانش انجام شده است که با استفاده از نرم‌افزار اسپن پلاس، فرآیند بازیابی آمونیاک از بیوگاز حاصل از هضم بیولوژیکی را مدل‌سازی کردند. آن‌ها از یک سیستم دافع-جاذب¹ استفاده کردند. این مدل امکان بازیابی آمونیاک به صورت سولفات آمونیوم را با راندمان 95 درصد فراهم کرد و هزینه‌های انرژی و مواد شیمیایی را به کمتر از یک میلیون دلار در سال کاهش داد [38]. در پژوهشی دیگر توسط هوانگ در دانشگاه دلف،³² شبیه‌سازی فرآیند جذب آمونیاک با استفاده از اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک، لاکتیک و مالیک در نرم‌افزار اسپن پلاس انجام شد. این مطالعه نشان داد که اسید سیتریک عملکرد بهتری در حذف آمونیاک و میزان مصرف اسید کمتری در مقایسه با اسید سولفوریک دارد. همچنین، تأثیر متغیرهایی مانند دما، فشار، نسبت گاز به مایع و غلظت آمونیاک ورودی بر راندمان جذب بررسی شد و نتایج نشان دادند که افزایش فشار و غلظت اسید ورودی می‌تواند راندمان جذب را بهبود بخشد [39]. این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که تلفیق روش‌های شبیه‌سازی عددی با فناوری‌های نوین جداسازی، مسیر امیدوارکننده‌ای برای توسعه سیستم‌های پایدار و کم‌مصرف در حذف آمونیاک از پساب‌های صنعتی فراهم کرده‌اند.

با وجود توسعه روش‌های گوناگون برای حذف آمونیاک از پساب‌های صنعتی، انتخاب یک راهکار بهینه که در کنار بازدهی بالا، دارای هزینه عملیاتی معقول، مصرف انرژی پایین، و قابلیت پیاده‌سازی در مقیاس صنعتی باشد، همچنان از چالش‌های اصلی این حوزه به شمار می‌رود. بسیاری از روش‌های مرسوم یا به دلیل پیچیدگی‌های فنی و تجهیزات گران‌قیمت، یا به علت راندمان پایین در شرایط عملیاتی واقعی، نتوانسته‌اند پاسخگوی نیاز صنایع مختلف باشند. همچنین، در بسیاری از پژوهش‌ها به ارزیابی دقیق اقتصادی یا مقایسه جامع بین گزینه‌های موجود توجه کافی نشده است؛ از این‌رو، نیاز به مطالعاتی که بتوانند عملکرد فنی و اقتصادی روش‌های مختلف را به صورت یکپارچه تحلیل کنند، بیش از پیش احساس می‌شود.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف پر کردن خلأ مطالعاتی موجود در زمینه ارزیابی هم‌زمان و جامع روش‌های حذف آمونیاک، به شبیه‌سازی و تحلیل فنی و اقتصادی دو فناوری پرکاربرد، یعنی جریان‌سازی با جریان هوا و اکسیداسیون هوای مرطوب، با استفاده از نرم‌افزار مهندسی اسپن پلاس پرداخته است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً به بررسی جداگانه یا تجربی این روش‌ها پرداخته‌اند، این تحقیق با رویکرد مدل‌سازی فرآیندی، امکان مقایسه مستقیم عملکرد، هزینه، مصرف انرژی و پیچیدگی عملیاتی را فراهم می‌سازد. نوآوری این پژوهش در تلفیق تحلیل‌های فنی و اقتصادی در محیط شبیه‌سازی مهندسی، و ارائه چارچوب تصمیم‌گیری برای انتخاب بهترین روش در شرایط صنعتی واقعی نهفته است. نتایج حاصل می‌تواند مبنایی علمی برای طراحی پایدار و مقرون‌به‌صرفه واحدهای تصفیه آمونیاک در صنایع مختلف فراهم آورد.

³ Aspen Plus 0
³ Stripper-absorber 1
³ Delft 2

2- روش انجام پژوهش

در این پژوهش از دو روش مؤثر یعنی «عریان‌سازی با جریان هوا» و «اکسیداسیون هوای مرطوب» برای حذف آمونیاک از پساب صنعتی استفاده شده و فرآیند آن‌ها با کمک نرم‌افزار اسپن پلاس (نسخه 14) شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی فرآیندها از مدل ترمودینامیکی ENRTL-RK استفاده شده است. معادله ترمودینامیکی³³ ENRTL-RK به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی رفتار غیر ایده‌آل محلول‌های الکترولیتی و ترکیب آن با معادله حالت ردلیش کوانگ برای فاز بخار، انتخاب شده است. مدل ENRTL برهمکنش‌های بین یون‌ها و مولکول‌ها را در فاز مایع محاسبه می‌کند، در حالی که معادله حالت RK تخمین قابل اعتمادی از خواص فاز گاز ارائه می‌دهد. این مدل‌ها پیش‌بینی ثابت‌های تعادل بخار-مایع و شیمیایی را تسهیل می‌کنند، که برای شبیه‌سازی دقیق سیستم مورد مطالعه و شرایط عملیاتی آن بسیار مهم هستند. این مدل به ویژه برای سیستم‌هایی که شامل ترکیبات یونی، مانند آمونیاک، آب و سایر گونه‌های یونی در فرآیندهای تصفیه هستند، مناسب است. در روش‌های مورد بررسی (WAO و عریان‌سازی با جریان هوا)، حضور گونه‌های یونی و رفتار غیر ایده‌آل محلول نقش مهمی در دقت شبیه‌سازی دارد. استفاده از ENRTL-RK امکان پیش‌بینی دقیق‌تر تعادل فازی، خواص ترمودینامیکی و انتقال جرم را فراهم می‌سازد و در مطالعات مشابه نیز توصیه شده است [40]. بنابراین، انتخاب این مدل با هدف افزایش اعتبار نتایج شبیه‌سازی و تطابق بهتر با شرایط واقعی صنعتی صورت گرفته است.

نمونه پساب بررسی شده در این پژوهش براساس آنالیز شیمیایی نمک‌های محلول تعریف شدند که داده‌های آن در جدول 1 آمده است. این آنالیز با استفاده از دستگاه کروماتوگراف یونی Dionex 100 با دکتور هدایت، ستون محافظ Dionex Ionpac AG4SC، ستون جداساز AS4SC و سرکوبگر³⁴ یونی خود باز تولید کننده آنیونی (ASRS-I) انجام شده است [41].

³ Electrolyte Non-Random Two-Liquid (ENRTL), Redlich-Kwong (RK)

³ Suppressor

4

جدول 1- ترکیب پساب صنعتی

یون	غلظت مولار (mol/L)
Cl ⁻	$1/22 \times 10^{-2}$
CH ₃ COO ⁻	$3/00 \times 10^{-2}$
HCO ₃ ⁻	$1/97 \times 10^{-1}$
PO ₄ ³⁻	$9/58 \times 10^{-3}$
SO ₄ ²⁻	$2/71 \times 10^{-3}$
NH ₄ ⁺	$2/36 \times 10^{-1}$
Ca ²⁺	$2/69 \times 10^{-3}$
Mg ²⁺	$3/29 \times 10^{-5}$
H ₃ O ⁺	$1/90 \times 10^{-8}$
Na ⁺	$8/29 \times 10^{-3}$
K ⁺	$5/26 \times 10^{-2}$
H ₂ O	$5/43 \times 10^{+1}$
Total	$5/48 \times 10^{+1}$

2-1- شبیه سازی فرآیند جریان سازی با جریان هوا

روش جریان سازی با جریان هوا یک فرآیند فیزیکی مبتنی بر انتقال جرم بین فاز مایع (پساب) و فاز گاز (هوا) است. نمودار جریان این فرآیند در شکل 1 نشان داده شده است. در این فرآیند، آمونیاک موجود در پساب با استفاده از جریان هوا از فاز مایع به فاز گاز منتقل می شود. در ابتدای فرآیند، خوراک ورودی با نرخ جریان 30000 کیلوگرم بر ساعت، دمای 20 درجه سانتی گراد و فشار 1 بار، وارد مبدل حرارتی HE-01 می شود. در این مرحله، خوراک ورودی تحت تأثیر انتقال حرارت در مبدل حرارتی قرار می گیرد و دمای آن به 90 درجه سانتی گراد افزایش می یابد. این افزایش دما موجب آماده سازی خوراک برای مراحل بعدی فرآیند می شود. پس از افزایش دما، خوراک به مخزن تبخیر ناگهانی منتقل می شود تا گازهای موجود در آن، از جمله CO₂، از محیط مایع جدا شوند. در این شبیه سازی، یک مخزن تبخیر ناگهانی آدیاباتیک با هدف حذف CO₂ استفاده شده است. این کار به منظور کاهش ظرفیت بافر پساب قبل از افزودن NaOH انجام می شود. بازیابی CO₂ و NH₃ در جریان گاز مخزن تبخیر ناگهانی به عنوان تابعی از دمای خوراک بررسی شده است. نتایج نشان دهنده اهمیت دمای خوراک در فرآیند جداسازی CO₂ است. افزایش دما باعث افزایش فشار بخار CO₂ و در نتیجه جداسازی بهتر آن از فاز مایع می شود.

(NH₃) باقی می ماند. بنابراین، تنظیم pH می تواند به عنوان یک ابزار کنترلی برای بهینه سازی فرآیند حذف آمونیاک استفاده شود. مطابق با تحلیل های انجام شده، مجموعه ای از واکنش های تعادلی، که در معادلات زیر توضیح داده شده اند، برای شرح سیستم مورد نظر تعیین شده است. این مجموعه شامل واکنش های تعادلی بین اسید و باز و همچنین واکنش های تعادل بین فاز بخار و مایع می باشد [42].



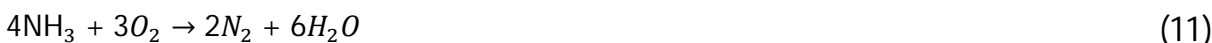
رابطه 2، تفکیک کامل باز قوی سدیم هیدروکسید در آب و تولید یون های هیدروکسید و سدیم، و در نتیجه افزایش pH محلول را نشان می دهد. رابطه 3 نشان دهنده تعادل اسید-باز در سیستم فسفاتی است که یون دی هیدروژن فسفات به عنوان اسید ضعیف پروتون آزاد می کند. رابطه 4، واکنش یون استات با آب را نشان می دهد که سبب تولید یون هیدرونیوم و تنظیم pH در سیستم های بافری استیکی می گردد. رابطه 5، مرحله دوم یونش اسید سولفوریک را نشان می دهد که یون هیدروژن سولفات به سولفات تبدیل می شود و محیط را اسیدی تر می کند. در ادامه، رابطه 6، واکنش آمونیاک با بی کربنات و تشکیل یون های اوره مانند، مرتبط با مسیرهای حذف نیتروژن را نمایش می دهد. همچنین، رابطه 7، نشان دهنده تعادل بازی آمونیاک در آب و تولید یون آمونیوم و هیدروکسید است که در تنظیم تعادل نیتروژنی مؤثر است. رابطه 8، مرحله دوم یونش اسید کربنیک، تبدیل بی کربنات به کربنات و افزایش اسیدیته و رابطه 9، حل شدن دی اکسید کربن در آب و تشکیل بی کربنات و یون هیدرونیوم را نشان می دهد که پایه تعادل کربنات در محلول است. در نهایت، رابطه 10، یونش خودبه خودی آب، تولید هم زمان یون های اسیدی و بازی را نشان می دهد که تعیین کننده pH خنثی در محلول است. این واکنش ها پایه مدل سازی ترمودینامیکی در فرآیندهای تصفیه پساب، به ویژه در حذف آمونیاک و تنظیم pH هستند.

2-2- شبیه سازی فرآیند اکسیداسیون هوای مرطوب

روش WAO یک فرآیند اکسیداسیون پیشرفته است که در آن، آمونیاک موجود در پساب تحت شرایط دمای بالا (در حدود 320 درجه سانتی گراد) و فشار بالا (در حدود 10 بار) در حضور اکسیژن، به ترکیبات بی ضرری مانند نیتروژن و آب اکسید می شود. نمودار جریان شبیه سازی شده این فرآیند در شکل 2 نشان داده شده است. در این روش، خوراک ورودی با نرخ جریان 30000 کیلوگرم بر ساعت، دمای 20 درجه سانتی گراد و فشار 1 بار، وارد گرم کن اولیه می شود. در این مرحله، دمای خوراک تا 90 درجه سانتی گراد افزایش می یابد تا برای مراحل بعدی فرآیند آماده شود. پس از عبور از گرم کن، خوراک به همراه محلول هیدروکسید سدیم وارد یک همزن می شود تا مواد

به طور کامل ترکیب شوند. این مرحله برای افزایش pH و آماده‌سازی برای واکنش‌های اکسیداسیون در مراحل بعدی اهمیت بالایی دارد. سپس خوراک ترکیب شده وارد پمپ می‌شود، تا فشار آن به 10 بار افزایش یابد. این افزایش فشار، برای ایجاد شرایط مناسب جهت واکنش‌های اکسیداسیون در واکنش‌گر، ضروری است. جریان خروجی از پمپ با هوای گرم، که از متراکم کننده هوا و با دمای 400 درجه سانتی‌گراد و فشار 10 بار تأمین شده است، در یک همزن ثانویه مخلوط می‌شود. این مرحله باعث اطمینان از تماس کافی بین جریان خوراک و هوا شده و به بهینه‌سازی واکنش‌های اکسیداسیون کمک می‌کند.

پس از همزن ثانویه، جریان وارد مبدل حرارتی می‌شود. پس از انجام واکنش‌ها در واکنش‌گر، جریان داغ به مبدل حرارتی باز می‌گردد تا با کاهش دما انرژی بازیابی شود و پس از آن وارد سردکننده می‌شود تا دمای آن تا حد مناسب برای ورود به جداساز کاهش یابد. نمونه‌ای از واکنش‌های اصلی شامل اکسیداسیون آمونیاک به نیتروژن و آب است که می‌توان آن‌ها را بصورت کلی به شکل رابطه 11 بیان کرد:

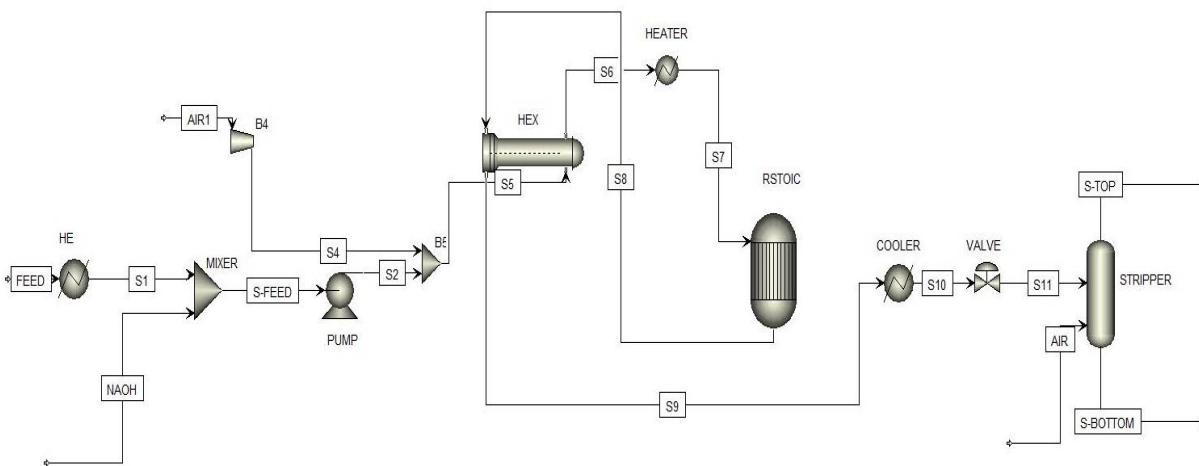


این رابطه، نشان‌دهنده واکنش اصلی و هدف نهایی فرآیند WAO است که آمونیاک سمی را به نیتروژن بی‌اثر و آب تبدیل می‌کند. آمونیاک ممکن است ابتدا به نیتريت (NO_2^-) و سپس نیترات (NO_3^-) اکسید شود، البته در واکنش‌گر WAO و دما/فشار بالا این محصولات معمولاً به سرعت به نیتروژن مولکولی تبدیل می‌شوند و تجمع زیادی ندارند. در مرحله بعد، جریان از شیر فشارشکن عبور کرده و فشار آن تا 3 بار کاهش می‌یابد. خروجی از شیر به همراه هوا وارد جداساز می‌شود که در آن نیتروژن و دیگر گازهای بازیافتی جدا می‌شوند.

یکی از پارامترهای اساسی که برای ارزیابی عملکرد فرآیندهای بکارگرفته شده به منظور حذف آمونیاک از جریان ورودی، محاسبه میزان بازیابی نیتروژن (N_{Recovery}) بر حسب درصد است. برای محاسبه میزان بازیابی نیتروژن از رابطه 12 استفاده شده است:

$$N_{\text{Recovery}} = \frac{\text{Stripped NH}_3}{\text{Total ammoniacal nitrogen}} * 100 \quad (12)$$

که در این رابطه، عبارت صورت کسر، نشان‌دهنده میزان آمونیاک بازیابی شده و مخرج کسر، نشان‌دهنده کل نیتروژن آمونیاکی موجود در پساب ورودی است.



شکل 2- نمودار جریان فرآیند اکسیداسیون هوای مرطوب

در این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای عریان‌سازی با جریان هوا و اکسیداسیون هوای مرطوب، از مجموعه‌ای از پارامترهای عملیاتی و ورودی استفاده شده است. این پارامترها شامل دما، فشار، دبی جریان‌های ورودی و مقادیر مصرفی مواد شیمیایی هستند که مبنای شبیه‌سازی در نرم‌افزار Aspen قرار گرفته‌اند. جدول 2 مقادیر عددی پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول 2- پارامترهای عددی مورد استفاده در شبیه‌سازی فرآیندها

پارامتر	عریان‌سازی با جریان هوا	اکسیداسیون هوای مرطوب	واحد	توضیحات
دبی جریان خوراک ورودی	30000	30000	kg/h	پساب صنعتی ورودی
دمای ورودی خوراک	20	20	°C	پیش از ورود به مبدل حرارتی
فشار خوراک ورودی	1	1	bar	فشار اتمسفری
دمای پس از پیش‌گرمایش	90	90	°C	آماده‌سازی خوراک
نرخ جریان هوای ورودی	40000	35000	kg/h	در فرآیند عریان‌سازی و WAO
مقدار NaOH افزوده شده	600	520	kg/h	در فرآیند عریان‌سازی و آماده‌سازی WAO
فشار عملیاتی	1	10	bar	در ستون عریان‌سازی و راکتور WAO
دمای عملیاتی	90	320	°C	در برج عریان‌سازی و راکتور WAO
دمای هوای ورودی	20	20	°C	دمای ورودی برای هر دو فرآیند

در فرآیند عریان‌سازی با جریان هوا معمولاً نیاز به مقدار بیشتری NaOH و نرخ بالاتر هوای ورودی است. علت این است که این فرآیند بیشتر برای حذف ترکیبات فرار و تنظیم pH خوراک استفاده می‌شود و نیاز به برخورد مستقیم هوا به خوراک برای انتقال جرم دارد که منجر به نیاز بیشتر هوای ورودی می‌شود. در مقابل، فرآیند اکسیداسیون هوای مرطوب با استفاده از شرایط فشار و دمای بالاتر و اکسیژن بیشتر به شکل موثری اکسیداسیون مواد آلی را انجام می‌دهد. اگرچه دبی هوا در WAO قابل توجه است، اما معمولاً مقدار NaOH مصرفی در WAO کمتر از عریان‌سازی است. علت این تفاوت، ماهیت عملیات و اهداف فرایندی است؛ عریان‌سازی صرفاً انتقال جرم و پاک‌سازی فیزیکی-شیمیایی است در حالی که WAO واکنشی شدیدتر و کامل‌تر با اکسیژن دارد که مصرف مواد قلیایی و هوا را تحت تاثیر قرار می‌دهد [30].

3- نتایج و بحث

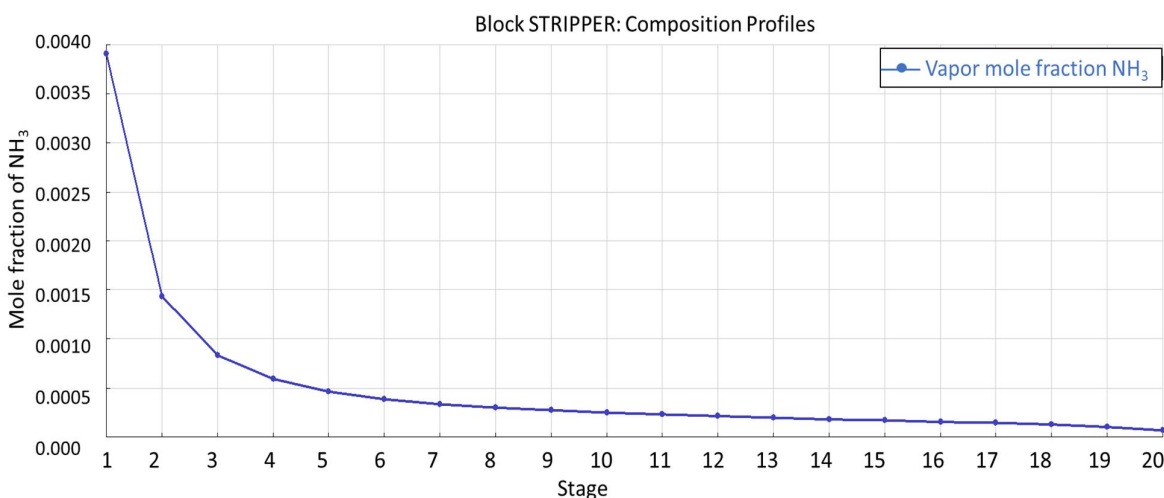
3-1- نتایج شبیه‌سازی روش عریان‌سازی با جریان هوا

فرآیند عریان‌سازی با جریان هوا به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای حذف آمونیاک از پساب صنعتی مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی دقیق این روش در نرم‌افزار اسپن پلاس انجام شد و واحدهای کلیدی مانند مبدل‌های حرارتی، مخزن تبخیر ناگهانی، واحد اختلاط NaOH و برج عریان‌سازی شبیه‌سازی شدند. نمودار ترکیب مولی NH_3 در فاز بخار برج عریان‌سازی (شکل 3) نشان می‌دهد که غلظت آمونیاک در سینی‌های مختلف برج متغیر است.

در سینی‌های بالایی، مقدار NH_3 در بخار به‌طور قابل توجهی بیشتر است. کسر مولی NH_3 در سینی اول حدود 0/0035 بوده و در سینی‌های بعد، به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و در سینی‌های انتهایی تقریباً به صفر نزدیک می‌شود. این روند نزولی بیانگر کارایی بالای فرآیند جریان‌سازی در حذف آمونیاک از جریان ورودی است. بیشترین کاهش در کسر مولی در مراحل ابتدایی رخ داده که نشان‌دهنده انتقال مؤثر آمونیاک از فاز مایع به بخار در نواحی بالایی ستون است. آمونیاک به‌دلیل فشار بخار بالا تمایل دارد از فاز مایع به فاز گازی منتقل شود؛ بنابراین در بخش‌های بالایی برج که هوا به تدریج با NH_3 اشباع شده است، غلظت آمونیاک در فاز بخار افزایش می‌یابد. همچنین، به‌دلیل بهینه بودن تبادل جرم بین دو فاز در این سطوح، راندمان جداسازی بالاتر است.

در مقابل، در مراحل میانی و انتهایی، نرخ کاهش کندتر شده و به حالت پایدار نزدیک می‌شود، که می‌تواند ناشی از کاهش غلظت آمونیاک در فاز مایع و رسیدن به تعادل ترمودینامیکی باشد. به عبارت دیگر، در سینی‌های پایینی برج، غلظت NH_3 در فاز بخار پایین‌تر بوده و همچنان بخش عمده‌ای از NH_3 در فاز مایع باقی مانده است. دلیل این امر آن است که فرآیند جداسازی از سینی‌های پایین آغاز می‌شود و در این مرحله جریان هوای ورودی هنوز اشباع نشده و ظرفیت جذب پایینی دارد. از سوی دیگر، تماس بین فاز گاز و مایع در این نواحی هنوز به حداکثر کارایی نرسیده است. این الگو با اصول طراحی واحدهای برج جریان‌ساز هم‌خوانی دارد و بیانگر رفتار تدریجی و پویای انتقال جرم در سیستم جریان‌ساز است که می‌تواند در طراحی دقیق‌تر برج و تعیین موقعیت بهینه افزودن جریان هوا مورد استفاده قرار گیرد.

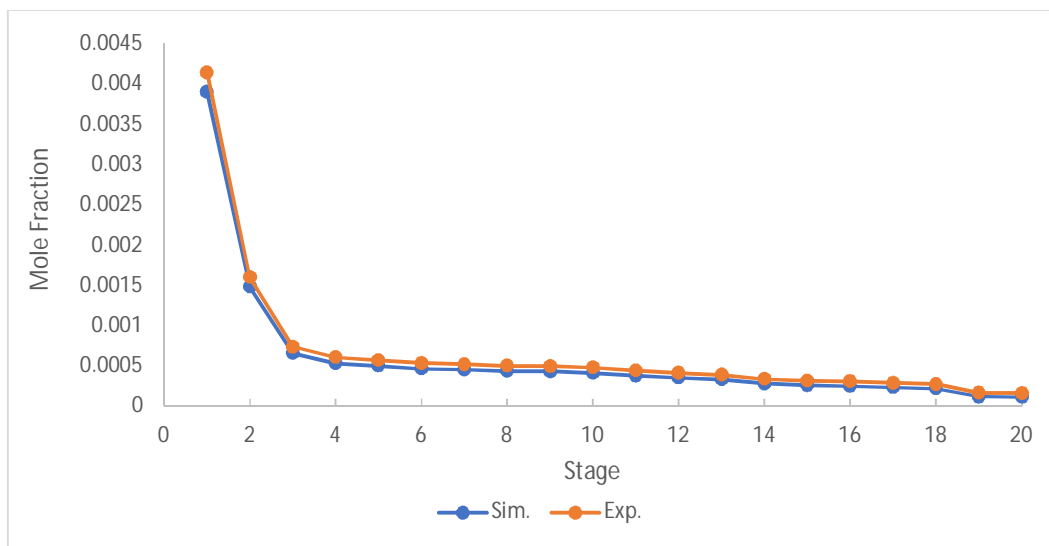
همچنین، نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی با مدل ترمودینامیکی ENRTL-RK توانسته است رفتار غیرایده‌آل محلول را به‌خوبی بازتاب دهد و دقت قابل قبولی در پیش‌بینی تعادل فازی ارائه دهد.



شکل 3- نمودار تغییرات کسر مولی آمونیاک در برج جریان‌ساز (STRIPPER)

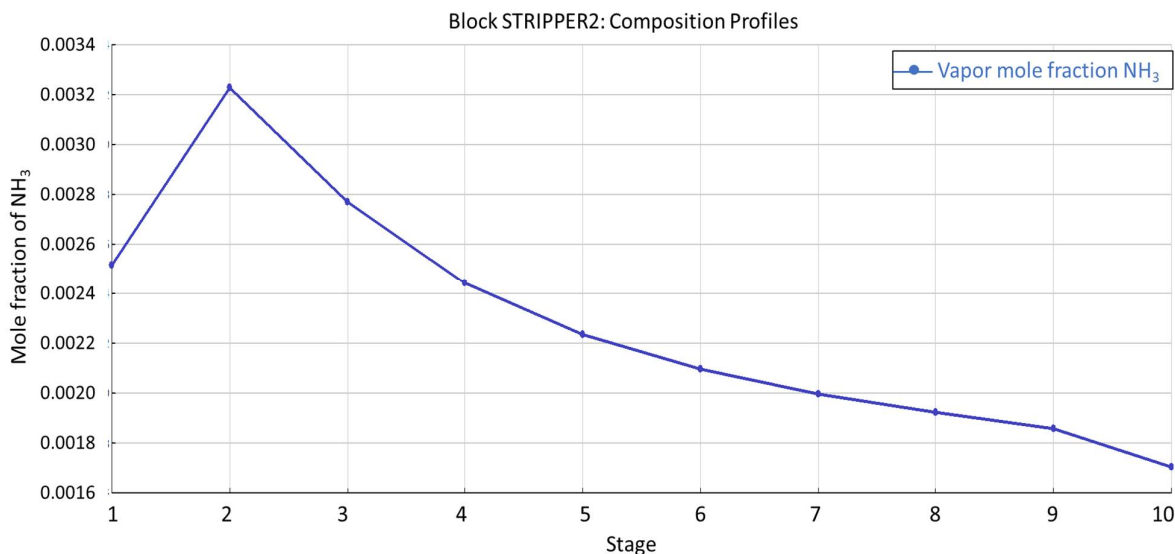
همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است، بخشی از NH_3 در جریان خروجی فوقانی مخزن تبخیر ناگهانی باقی مانده است. به‌منظور حذف کامل‌تر آمونیاک، این جریان ابتدا وارد مبدل حرارتی HE-02 شده (شکل 1) تا از طریق کاهش دما، به فاز مایع تبدیل گردد. این تغییر فاز امکان تماس مؤثرتر بین NH_3 و جریان گاز در مراحل بعدی را فراهم می‌سازد. سپس جریان حاصل، پس از اختلاط مجدد با جریان هوا، وارد برج جریان‌ساز دوم می‌شود. نتایج

شبیه‌سازی با داده‌های تجربی گزارش شده توسط کیم و همکاران [43]، مورد اعتبارسنجی قرار گرفت و همان‌گونه که در شکل 4 نشان داده شده است، اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی کمتر از 5 درصد بوده که حاکی از دقت و صحت مدل‌سازی انجام‌شده است.



شکل 4- نمودار مربوط به اعتبارسنجی کسر مولی آمونیاک در برج عریان ساز با نتایج کیم و همکاران [43]

نمودار شکل 5 روند حذف NH_3 را در طول برج عریان‌ساز دوم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار کسر مولی NH_3 در سینی دوم به بیشینه خود (حدود 0/0032) می‌رسد و سپس به تدریج کاهش یافته و در مرحله دهم به حدود 0/0016 می‌رسد. افزایش ناگهانی کسر مولی NH_3 در سینی دوم ناشی از ورود جریان خوراک حاوی آمونیاک به این سینی از برج دفع است. پس از ورود خوراک، کاهش تدریجی و پیوسته در مقدار آمونیاک مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده عملکرد مؤثر برج دوم در حذف آمونیاک باقی‌مانده از جریان ورودی است. این روند کاهش بی‌انگیز آن است که فرآیند انتقال جرم بین فازهای مایع و گاز به خوبی انجام شده و شرایط عملیاتی مناسب برای دفع آمونیاک فراهم بوده است. به‌ویژه، افزودن جریان هوای کمکی موجب افزایش سطح تماس بین فازها شده و در نتیجه، کارایی فرآیند دفع به‌طور محسوسی بهبود یافته است.



شکل 5- نمودار تغییرات کسر مولی آمونیاک در برج عریان ساز دوم (STRIPPE 2)

در مرحله نهایی، به منظور بهینه‌سازی عملکرد برج و دستیابی به حداکثر بازیابی NH₃، پارامترهای عملیاتی شامل دما، فشار، و نرخ جریان‌های ورودی و خروجی توسط گزینه فلوشیت³⁵ و محاسبه‌گر³⁶ نرم‌افزار اسپن پلاس تنظیم گردیدند و بازیابی آمونیاک به میزان 92/9 درصد افزایش یافت. این مقدار بازیابی با استفاده از رابطه 12 محاسبه شد که درصد آمونیاک جدا شده نسبت به کل آمونیاک ورودی به سیستم را بیان می‌کند.

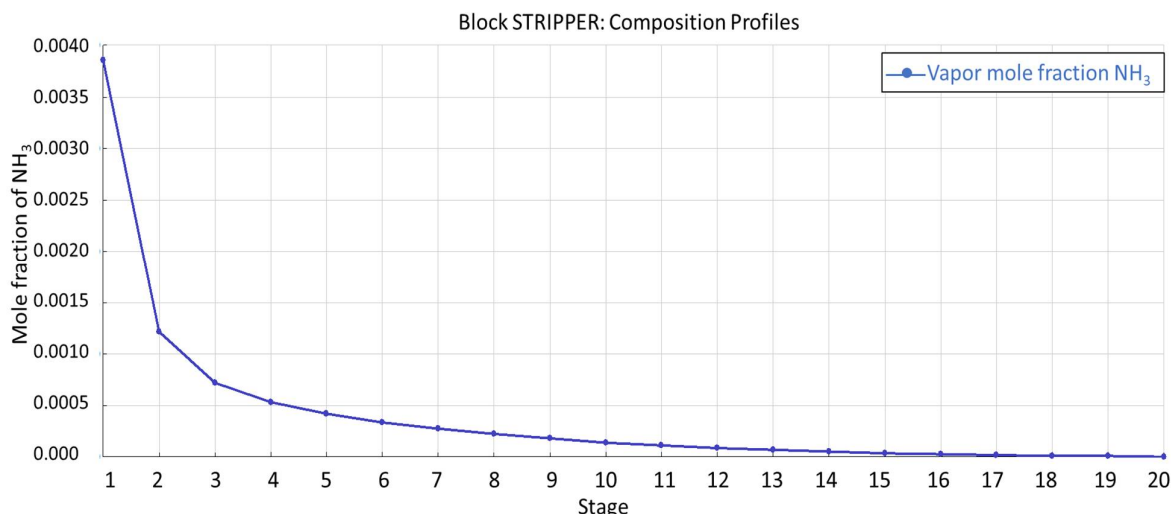
در مجموع، نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که راهکار استفاده از دو برج عریان ساز به همراه مبدل حرارتی، افزودن NaOH جهت افزایش pH، و بهره‌گیری از جریان هوای مناسب، منجر به افزایش کارایی فرآیند جداسازی آمونیاک، کاهش آلودگی زیست‌محیطی، و کاهش مصرف مواد شیمیایی گردیده است. این رویکرد می‌تواند به عنوان یک گزینه کارآمد و پایدار در فرآیندهای صنعتی تصفیه پساب‌های حاوی آمونیاک مورد استفاده قرار گیرد.

3-2- نتایج شبیه‌سازی روش اکسیداسیون هوای مرطوب

در فرآیند اکسیداسیون هوای مرطوب، میزان تبدیل آمونیاک به محصولات نهایی در واکنش‌گر و شرایط مختلفی که بر واکنش‌ها تأثیر می‌گذارند، بسیار اهمیت دارد. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میزان ترکیب مولی آمونیاک در بخش‌های مختلف واکنش‌گر و همچنین میزان تبدیل آن متفاوت است. در بخش‌های بالایی واکنش‌گر که واکنش‌های اکسیداسیون در دمای بالا و فشار بالا انجام می‌شوند، نرخ تبدیل آمونیاک بیشتر است (شکل 6). این به دلیل تماس مؤثرتر آمونیاک با اکسیژن و حضور غلظت بالای هوا در فاز گازی است، که موجب افزایش راندمان واکنش‌ها و تبدیل آمونیاک به نیتروژن و آب می‌شود.

³⁵ Flowsheeting option

³⁶ Calculator



شکل 6- پروفایل غلظت آمونیاک در برج جداساز

در بخش‌های بالایی واکنش‌گر، غلظت آمونیاک در فاز بخار به دلیل نرخ بالای واکنش اکسیداسیون کاهش می‌یابد. واکنش‌های سریع در این بخش‌ها منجر به تجزیه کامل‌تر آمونیاک و کاهش قابل توجه غلظت آن در جریان خروجی می‌شود. در بخش‌های پایینی واکنش‌گر، که دمای واکنش کاهش می‌یابد و واکنش‌ها به سمت تعادل حرکت می‌کنند، مقدار آمونیاک باقی مانده در فاز مایع بیشتر است. این امر به دلیل کاهش راندمان واکنش‌های اکسیداسیون و کاهش سرعت انتقال جرم بین فازهای مایع و گاز است.

در نتیجه، جداسازی آمونیاک و دیگر محصولات در بخش‌های مختلف واکنش‌گر به خوبی انجام می‌شود. راندمان بالای جداسازی و تبدیل آمونیاک در بخش‌های بالایی واکنش‌گر باعث می‌شود که میزان آمونیاک باقی مانده در بخش‌های پایینی کاهش یابد.

با استفاده از بهینه‌سازی توسط گزینه فلوشیت و محاسبه‌گر در نرم‌افزار اسپن پلاس پارامترهای مختلف عملیاتی از جمله دما، فشار، و نرخ جریان‌های ورودی و خروجی میزان بازیابی 98/53 درصد نیتروژن برای این فرآیند حاصل گردید.

3-3- مقایسه با واحدهای صنعتی و مطالعات پیشین مشابه

با توجه به اینکه ترکیب دقیق پساب‌های مورد مطالعه در فرآیندهای صنعتی مختلف مانند پتروشیمی خراسان و سایر مطالعات مشابه دقیقاً یکسان نیستند، در این پژوهش تلاش شده است تا مدل شبیه‌سازی براساس مشخصات ترکیبات آمونیاکی مشابه طراحی شود. اگرچه تفاوت‌هایی در جزئیات ترکیب و ویژگی‌های پساب‌ها وجود دارد، اما ترکیب کلیدی آمونیاک در تمامی این مدل‌ها به عنوان عامل اصلی آلودگی مشابه است. این شباهت‌ها در ترکیبات آمونیاکی امکان مقایسه‌ی منطقی عملکرد روش‌های مختلف حذف آمونیاک، از جمله عریان‌سازی با جریان هوا و روش اکسیداسیون هوای مرطوب را فراهم می‌کند. بنابراین، با وجود تفاوت‌های جزئی در مشخصات خوراک، این دو فرآیند قابل مقایسه بوده و تحلیل اقتصادی و کارایی آن‌ها می‌تواند نتایج روشنی ارائه دهد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش نشان می‌دهد که روش‌های مختلف حذف آمونیاک از پساب صنعتی دارای ویژگی‌های متفاوتی از منظر کارایی، پیچیدگی عملیاتی و هزینه هستند. در میان روش‌های بررسی شده، فرآیند اکسیداسیون هوای مرطوب بالاترین عملکرد را با درصد بازیابی 98/53 درصد ارائه می‌دهد. این روش با بهره‌گیری از شرایط دمایی و فشاری بالا و با استفاده از اکسیژن یا هوا، توانسته است در شبیه‌سازی پایا به حذف تقریباً کامل آمونیاک از جریان پساب دست یابد.

روش عریان‌سازی با جریان هوا نیز با درصد بازیابی 92/9 درصد عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داده است، در حالی که از منظر سادگی عملیاتی، مصرف انرژی پایین‌تر، و هزینه اجرای کمتر نسبت به WAO، دارای مزایای قابل توجهی است. این روش به‌ویژه در صنایع فاقد تجهیزات فشار بالا یا شرایط واکنش شدید، می‌تواند به‌عنوان یک گزینه اقتصادی و مؤثر معرفی شود.

در مقایسه با مطالعه آلیس لیمولی و همکاران [44] که از فرآیند اختلاط آشفته بهره بردند، با راندمان حذف 88/7 درصدی، روش‌های بررسی شده در این پژوهش، به‌ویژه WAO و عریان‌سازی، عملکرد بهتری داشته‌اند. همچنین، در حالی که فرآیند اختلاط آشفته نیازمند تجهیزات پیچیده و هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالاست، روش‌های حاضر در این مطالعه ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر هستند.

در مجتمع پتروشیمی خراسان نیز از ترکیب حوضچه ژئوممبران و برج عریان‌ساز استفاده می‌شود که عملکرد آن در بازه‌های بین 65 تا 75 درصد قرار دارد [41]. این میزان بازیابی نسبت به هر دو روش بررسی شده در این مطالعه پایین‌تر است، که دلیل آن می‌تواند نبود بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی و عدم استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی و مدل‌سازی پیشرفته باشد.

از سوی دیگر، مقایسه نتایج حاصله در این تحقیق با سایر تحقیقات مانند مطالعه مناکشی و همکاران [45] با راندمان 83/4 درصد در روش الکترواکسیداسیون، و مطالعه اولو و همکاران [46] با راندمان نزدیک به 98 درصد در حذف آمونیاک با روش هوادهی و رسوب استروویت، نشان می‌دهد که روش‌های شبیه‌سازی شده در این پژوهش در میان فناوری‌های موجود از عملکرد رقابتی خوبی برخوردارند. البته، روش‌هایی نظیر الکترواکسیداسیون و رسوب شیمیایی، نیازمند مصرف انرژی بالا یا افزودنی‌های خاص هستند که ممکن است هزینه و پیچیدگی عملیاتی بیشتری ایجاد کنند.

همچنین، در مطالعه ماشال و همکاران [47]، حذف آمونیاک با استفاده از جذب توسط زئولیت طبیعی صورت گرفت که راندمان آن پایین‌تر از روش‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر بود و به‌علت ظرفیت محدود جذب، برای کاربردهای پیوسته و حجیم صنعتی مناسب نیست. مقایسه بین راندمان و درصد بازیابی آمونیاک حاصله در روش‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر، با نتایج تحقیق آلیس لیمولی و همکاران و همچنین، مجتمع پتروشیمی خراسان در جدول 3 ارائه شده است.

جدول 3- مقایسه روش های تصفیه پساب صنعتی از نظر بازیابی و حذف آمونیاک با شبیه سازی های این پژوهش

ویژگی ها	پژوهش حاضر		آلیس لیمولی و همکاران [44]	مجتمع پتروشیمی خراسان [41]
درصد بازیابی آمونیاک	92/9	98/53	88/7	65-75
روش تصفیه پساب	عریان سازی با جریان هوا	اکسیداسیون هوای مرطوب	فرآیند اختلاط آشفته	حوضچه ژئوممبران و برج عریان ساز

4- نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف پر کردن خلأ مطالعاتی در زمینه مقایسه جامع و شبیه سازی شده ی روش های حذف آمونیاک از پساب صنعتی، به تحلیل فنی و اقتصادی دو فناوری پرکاربرد یعنی عریان سازی با جریان هوا و اکسیداسیون هوای مرطوب پرداخته است. نوآوری و اهمیت این تحقیق در استفاده از مدل سازی فرآیندی با نرم افزار اسپن پلاس برای ارزیابی هم زمان عملکرد، مصرف انرژی، هزینه عملیاتی و پیچیدگی تجهیزات این دو روش نهفته است. روش عریان سازی با جریان هوا به دلیل هزینه های عملیاتی پایین تر، سادگی تجهیزات و انعطاف پذیری بالا در تنظیم شرایط عملیاتی، به عنوان یکی از روش های موثر در حذف آمونیاک از پساب های صنعتی شناخته می شود. این روش با مصرف انرژی کمتر نسبت به روش های پیچیده تر مانند اکسیداسیون هوای مرطوب، قابل نصب و نگهداری در واحدهای صنعتی مختلف است و قابلیت تنظیم برای طیف وسیعی از پساب ها را دارد. هر چند کارایی عریان سازی با جریان هوا به تنظیم دقیق پارامترهایی مانند pH و استفاده از جریان هوای مناسب وابسته است، این روش همچنان کارایی بالایی در شرایط مختلف عملیاتی نشان می دهد. با این حال، میزان بازیابی آمونیاک در این روش حدود 92/9 درصد است که در مقایسه با WAO کمی کمتر است.

در مقابل، روش اکسیداسیون هوای مرطوب به دلیل کارایی بالاتر در حذف آمونیاک (تا 98/53 درصد) و توانایی در اکسیداسیون کامل آلاینده های آلی، یک گزینه مناسب برای پساب های پیچیده تر است. این روش با استفاده از دما و فشار بالا قادر به تجزیه ترکیبات آلی و آمونیاک به نیتروژن و آب است. با این حال، پیچیدگی تجهیزات و نیاز به مصرف انرژی بیشتر به دلیل شرایط عملیاتی سخت (دماهای بالای 320 درجه سانتی گراد و فشار 10 بار) از معایب اصلی آن محسوب می شود. نگهداری و راه اندازی این تجهیزات نیز به دانش فنی و هزینه های بیشتری نیاز دارد، که باعث می شود این روش در مقایسه با عریان سازی با جریان هوا برای شرایط خاص و صنایع بزرگ، مناسب تر باشد. در مجموع، نتایج مقایسه ای نشان می دهد که اگر حداکثر راندمان حذف آمونیاک هدف باشد، روش WAO بهترین گزینه است. اما اگر سادگی، هزینه پایین، و عدم نیاز به فشار بالا اولویت داشته باشد، روش عریان سازی با جریان هوا انتخاب مناسبی است. سایر روش ها مانند اختلاط آشفته، الکترواکسیداسیون و جذب در شرایط خاص و بسته به نوع پساب و امکانات صنعتی قابل بررسی هستند. یافته های این پژوهش می تواند به عنوان مبنایی علمی برای طراحی پایدار و تصمیم گیری مهندسی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرند.

5- تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی و معنوی دانشگاه سیستان و بلوچستان انجام شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های دانشگاه سیستان و بلوچستان قدردانی نمایند.

6- منابع

- [1] P. L. Kiew, C. Y. Ng, L. S. Tan, Y. T. Chung, and M. M. Nasef, "21 - Advanced membrane technology for removal of ammonia from industrial wastewater," in *Resource Recovery in Industrial Waste Waters*, M. Sillanpää, A. Khadir, and K. Gurung Eds.: Elsevier, 2023, pp. 421–440.
- [2] M. Abu-Orf, G. Tchobanoglous, H. D. Stensel, and B. Pfrang, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 2013.
- [3] D. Bravo, F. J. Álvarez-Hornos, J. M. Peña-roja, P. San-Valero, and C. Gabaldón, "Aspen Plus process-simulation model: Producing biogas from VOC emissions in an anaerobic bioscrubber," *Journal of Environmental Management*, vol. 213, pp. 530–540, 2018.
- [4] W. Chen, T. Guo, and L. Wen, "Simulation and optimization with Aspen- Plus of ammonia removal from azodicarbonamide foaming agent(ADC) wastewater by a stripping process," vol. 43, pp. 20–26, 2016.
- [5] D. Saygin, H. Blanco, F. Boshell, J. Cordonnier, K. Rouwenhorst, P. Lathwal, and D. Gielen, "Ammonia Production from Clean Hydrogen and the Implications for Global Natural Gas Demand," *Sustainability* [Online], vol. 15, no. 2, pp. 1623, 2023.
- [6] T. M. Edwards, H. J. Puglis, D. B. Kent, J. L. Durán, L. M. Bradshaw, and A. M. Farag, "Ammonia and aquatic ecosystems – A review of global sources, biogeochemical cycling, and effects on fish," *Science of The Total Environment*, vol. 907, pp. 167911, 2024.
- [7] A.-F. Djire, A. Bazzi, H. El Hafdaoui, A. Khallaayoun, and R. Lghoul, "Techno-Economic Analysis of Power to Ammonia Production," *E3S Web of Conferences* [Online], vol. 601, pp. 00065, 2025.
- [8] J. Liang, R. Zhang, J. Chang, L. Chen, M. Nabi, H. Zhang, G. Zhang, P. Zhang, "Rumen microbes, enzymes, metabolisms, and application in lignocellulosic waste conversion - A comprehensive review," *Biotechnology Advances*, vol. 71, pp. 108308, 2024.
- [9] S. O. Akinawo, "Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies," *Environmental Challenges*, vol. 12, pp. 100733, 2023.
- [10] M. Anstrom, J. A. Dumesic, and N.-Y. Topsøe, "Theoretical Insight into the Nature of Ammonia Adsorption on Vanadia-Based Catalysts for SCR Reaction," *Catalysis Letters*, vol. 78, no. 1, pp. 281–289, 2002.
- [11] Y. M. Kim and S. Bae, *Wastewater Treatment and Resource Recovery*. 2020.
- [12] K. E. Wyer, D. B. Kelleghan, V. Blanes-Vidal, G. Schaubberger, and T. P. Curran, "Ammonia emissions from agriculture and their contribution to fine particulate matter: A review of implications for human health," *Journal of Environmental Management*, vol. 323, pp. 116285, 2022.
- [13] Y.-H. Ahn, "Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review," *Process Biochemistry*, vol. 41, no. 8, pp. 1709–1721, 2006.
- [14] S. Kasiński, P. Kowal, and K. Czerwionka, "Advanced Technologies for Nitrogen Removal and Recovery from Municipal and Industrial Wastewater," *Materials*, vol. 18, no. 7, pp. 1422, 2025.
- [15] S. S. Ahluwalia and D. Goyal, "Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater," *Bioresource Technology*, vol. 98, no. 12, pp. 2243–2257, 2007.
- [16] J. E. Flanagan, Jr., "Water Supply and Pollution Control," *Science*, vol. 145, no. 3634, pp. 840–2, 1964.
- [17] V. K. Gupta and I. Ali, "Chapter 4 - Water Treatment by Reverse Osmosis Method," in *Environmental Water*, pp. 117–13, 2013.

- [18] A.W. Fentiman, *Radioactive Waste Management: Storage, Transport, Disposal*, Book Chapter: Nuclear Energy, pp. 269–28, 2013.
- [19] L. Wang, Y.-T. Hung, and N. Shammas, *Advanced Physicochemical Treatment Technologies*, Volume 5, Handbook of Environmental Engineering, Humana Press, pp. 710, 2007.
- [20] M. Rezakazemi, S. Shirazian, and S. N. Ashrafizadeh, "Simulation of ammonia removal from industrial wastewater streams by means of a hollow-fiber membrane contactor," *Desalination*, vol. 285, pp. 383–392, 2012.
- [21] C. Raptis, J. Boucher, and S. Pfister, "Assessing the environmental impacts of freshwater thermal pollution from global power generation in LCA," *Science of The Total Environment*, vol. 580, pp. 1014-1026, 2017.
- [22] R. Bhattacharya and D. Mazumder, "Mathematical modelling of simultaneous nitrification and denitrification in biological reactor systems – a review," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 20, pp. 8105–8126, 2023.
- [23] T. Zhou, M. Wang, H. Zeng, R. Min, J. Wang, and G. Zhang, "Application of physicochemical techniques to the removal of ammonia nitrogen from water: A systematic review," *Environmental geochemistry and health*, vol. 46, pp.344, 2024.
- [24] X.-L. Long, H. Cheng, Z. L. Xin, W. D. Xiao, W. Li, and W. K. Yuan, "Adsorption of Ammonia on Activated Carbon from Aqueous Solutions," *Environmental Progress*, vol. 27, pp. 225–233, 2008.
- [25] S. Kulprathipanja, J. Rekoske, D. Wei, R. Slone, T. Pham, and C. Liu, *Modern Petrochemical Technology: Methods, Manufacturing and Applications*, Wiley, pp. 1–1, 2021.
- [26] M. Amosa and T. Majozi, "GAMS supported optimization and predictability study of a multi-objective adsorption process with conflicting regions of optimal operating conditions," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 94, pp. 354–361, 2016.
- [27] R. C. Sawant, R. B. Kamble, P. S. Deharkar, S.-Y. Luo, and S. R. Somkuwar, "Nutrient Recovery Techniques Using Eco-Safe Technologies for Agricultural Waste," in *Food Waste Valorization : Green Techniques in Sustainable Management*, T. Sarkar Ed. New York, NY: Springer US, pp. 151–168, 2025.
- [28] A. A, H. S, B. B, S. S, and A. Chinnathambi, "Simulation and optimization of ammonia separation using PDMS: A study on effect of ammonia inflow concentration and partition coefficient," *Fuel*, vol. 385, pp. 134052, 2025.
- [29] S. Jerez, M. Ventura, F. Martínez, J. A. Melero, and M. I. Pariente, "New strategies for the management of a primary refinery oily sludge: A techno-economical assessment of thermal hydrolysis, Fenton, and wet air oxidation treatments," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 1 ,no. 5, pp. 110730, 2023.
- [30] X. Liu, Y. Gao, X. Li, W. Meng, F. Zhang, Z. Zhang, and Z. Zhou, "Performance evaluation of a wet air oxidation reactor with external circulation for high-chemical oxygen demand wastewater treatment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 460, pp. 142602, 2024.
- [31] A. Reza and L. Chen, "Optimization and Modeling of Ammonia Nitrogen Removal from High Strength Synthetic Wastewater Using Vacuum Thermal Stripping," *Processes* [Online], vol. 9, no. 11, pp. 2059, 2021.
- [32] R. Fathi, P. Mohammadi, S. A. Hosseini, F. Yosefvand, and H. Norouzi, "Modeling of ammonia removal from wastewater using air stripping/modified clinoptilolite: reusability, optimization, isotherm, kinetic, and equilibrium studies," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 19, no. 4, pp. 2493–2514, 2022.
- [33] A. Marjani and S. Shirazian, "Computational Fluid Dynamics Simulation of Ammonia Removal from Wastewaters by Membrane," *Asian Journal of Chemistry* [Online], vol. 23, no. 7, pp. 3299–3300, 2011.

- [34] T.-L. Chen, L.-H. Chen, Y. J. Lin, C.-P. Yu, H.-w. Ma, and P.-C. Chiang, "Advanced ammonia nitrogen removal and recovery technology using electrokinetic and stripping process towards a sustainable nitrogen cycle: A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 309, pp. 127369, 2021.
- [35] S. Huang, C. K. Pooi, X. Shi, S. Varjani, and H. Y. Ng, "Performance and process simulation of membrane bioreactor (MBR) treating petrochemical wastewater", *Science of The Total Environment*, vol. 747, pp. 141311, 2020.
- [36] J. Jin, M. Liu, B. Chen, X. Wu, L. Yao, Y. Wang, X. Xiong, L. Wei, J. Li, Q. Tan, D. Fan, Y. Du, Y. Lei, and N. Yang, "Artificial Intelligence in Chemical Dosing for Wastewater Purification and Treatment: Current Trends and Future Perspectives", *Separations [Online]*, vol. 12, no. 9, pp. 237, 2025.
- [37] F. Dikmen, A. Demir, B. Özkaya, M. O. Raza, J. Rasheed, T. Asuroglu, and S. Alsubai, "AI-driven wastewater management through comparative analysis of feature selection techniques and predictive models", *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, pp. 25347, 2025.
- [38] M. Errico, L. Fjerbaek Sotoft, A. Kjærhuus Nielsen, and B. Norddahl, "Treatment costs of ammonia recovery from biogas digestate by air stripping analyzed by process simulation," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 20, no. 7, pp. 1479–1489, 2018.
- [39] W. Huang, "Evaluation of organic acids as scrubbing agents for ammonia recovery from wastewater through Aspen Plus® simulations", *TU Delft - Civil Engineering & Geosciences*, 2023.
- [40] A. Jado, T. Morosuk, and J. Pan, "Optimizing Ammonia Recovery from Biogas Digestate Using Air Stripping: Experimental and Simulation Insights for Sustainable Waste Management", *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 31–38, 2025.
- [41] م. م. محمدی، "مطالعه فنی- اقتصادی حذف آمونیاک از پساب پتروشیمی خراسان توسط تماس دهنده غشایی و مقایسه آن با روش موجود"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، 1393.
- [42] S. Ghaffari, M. F. Gutierrez, A. Seidel-Morgenstern, H. Lorenz, and P. Schulze, "Sodium Hydroxide-Based CO₂ Direct Air Capture for Soda Ash Production—Fundamentals for Process Engineering," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 62, no. 19, pp. 7566–7579, 2023.
- [43] E. J. Kim, H. Kim, and E. Lee, "Influence of Ammonia Stripping Parameters on the Efficiency and Mass Transfer Rate of Ammonia Removal," *Applied Sciences [Online]*, vol. 11, no. 1, pp. 441, 2021.
- [44] A. Limoli, M. Langone, and G. Andreottola, "Ammonia removal from raw manure digestate by means of a turbulent mixing stripping process," *Journal of Environmental Management*, vol. 176, pp. 1–10, 2016.
- [45] Meenakshi, K. Gorre, D. Bhagawan, and H. Vurimindi, "Ammonia Removal From Probiotic Industrial Wastewater Using Electro Oxidation," *International Journal of Operational Research (IJRAT) Special Issue "ICADMMES 2018"*, pp.12-16, 2019.
- [46] F. Ulu and M. Kobya, "Ammonia removal from wastewater by air stripping and recovery struvite and calcium sulphate precipitations from anesthetic gases manufacturing wastewater," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 38, pp. 101641, 2020.
- [47] A. Mashal, N. Haimour, and A. M. Al-Haj-Ali Abuyaghi, "Removal of Ammonia from Industrial Wastewater Using Jordanian Zeolite", *Conference Proceedings, Jordan International Chemical Engineering Conference (IV) at: Amman-Jordan*, vol. 1, 2002.