खण्ड-12, अंक-1, वर्ष-2024, मु0प्र0 51-56
D.O.I.: https://doi.org/10.22445/avsp.v12i1.10
SJIF (2024) : 8.287

Application of Artificial Intelligence in Membrane Science and Technology: A Comprehensive Review

Haider Iqbal, Mohd Ayub Ansari
Department of Chemistry, Bipin Bihari College, Jhansi-284 001, U.P., India
drayub67@gmail.com

Received: 21-08-2024, Accepted: 20-11-2024

Abstract- In this paper, the Artificial Intelligence (AI)applications in the membrane science and technology are presented and discussed. Desalination of water, organic and inorganic chemical separations, elimination of bacteria and virus and dialysis are some of the applications of the membrane technologies using reverse osmosis, nanofiltration, ultrafiltration and microfiltration. Although, these systems are confined with challenges such as fouling of the membrane, energy utilization, and selectivity. Advanced intelligent paradigms such as machine learning, deep learning neural networks, fuzzy logic and genetic algorithms have been proved to dispel such hardships. This review presents a logical flow from AI applications in membrane characterization, modeling and simulation, design and optimization, monitoring and control, to defect detection. The prospect, issues, and potential of AI in furthering membrane performance, efficiency, stability, and sustainability are also considered here.

Key words- Artificial intelligence, Membrane Science, Machine learning, Deep learning, Neural Network

कृत्रिम बुद्धिमत्ता का झिल्ली विज्ञान और प्रौद्योगिकी में उपयोग: एक विस्तृत समीक्षा

हैदर इकबाल, मुहम्मद अयूब अंसारी
रसायन विज्ञान विभाग, बिपिन बिहारी कॉलेज, झांसी–284 001, उ0 प्र0, भारत
drayub67@gmail.com

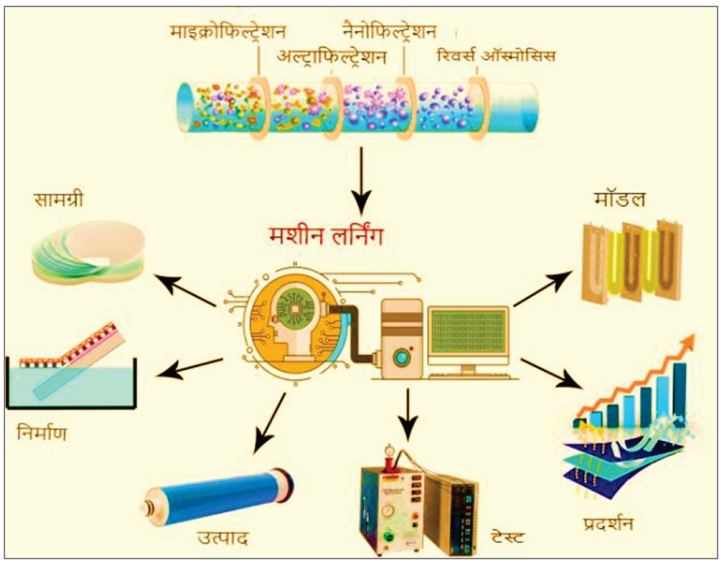
सार– इस पत्र में झिल्ली विज्ञान और प्रौद्योगिकी में कृत्रिम बुद्धिमत्ता (ए.आई.) अनुप्रयोगों को प्रस्तुत किया गया है और उनकी चर्चा की गई है। पानी के लवण हटाने, जैविक और अकार्बनिक रासायनिक पृथक्करण, बैक्टीरिया और वायरस का उन्मूलन, और डायलिसिस जैसी प्रक्रियाएं झिल्ली प्रौद्योगिकियों जैसे रिवर्स ऑस्मोसिस, नैनोफिल्ट्रेशन, अल्ट्राफिल्ट्रेशन और माइक्रोफिल्ट्रेशन के कुछ अनुप्रयोग हैं। यद्यपि, इन प्रणालियों को झिल्ली की फाउलिंग, ऊर्जा उपयोग और चयनात्मकता जैसी चुनौतियों का सामना करना पड़ता है। मशीन लर्निंग, डीप लर्निंग न्यूरल नेटवर्क, फजी लॉजिक और जेनेटिक एल्गोरिदम जैसी उन्नत बुद्धिमान प्रणालियों ने इन कठिनाइयों को दूर करने में प्रभावी प्रमाणित किया है। यह समीक्षा एआई अनुप्रयोगों का एक तार्किक प्रवाह प्रस्तुत करती है, जिसमें झिल्ली की विशेषताओं, मॉडलिंग और सिमुलेशन, डिजाइन और अनुकूलन, निगरानी और नियंत्रण से लेकर दोष पहचान तक सम्मिलित है। इस समीक्षा में झिल्ली के प्रदर्शन, दक्षता, स्थिरता और टिकाऊपन को बढ़ाने में एआई की संभावनाओं, मुद्दों और संभावनाओं पर भी विचार किया गया है।

बीज शब्द– कृत्रिम बुद्धिमत्ता, झिल्ली विज्ञान, मशीन लर्निंग, डीप लर्निंग, न्यूरल नेटवर्क

1. **झिल्ली विज्ञान और प्रौद्योगिकी का परिचय**– झिल्ली विज्ञान उस क्षेत्र से जुड़ा है जो विभिन्न प्रकार के झिल्ली परतों का उपयोग कर विशिष्ट अवयवों को अलग करने, शुद्ध करने और छानने की प्रक्रिया पर आधारित होता है। झिल्ली निस्पंदन का उपयोग जल शोधन, रसायन शोधन, और औद्योगिक अपशिष्ट के उपचार में किया जाता है। इसके अलावा, यह कई औद्योगिक प्रक्रियाओं जैसे कि औषधि निर्माण, खाद्य एवं पेय उद्योग, और ऊर्जा उत्पादन में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है।झिल्ली प्रौद्योगिकी में प्रायः विभिन्न प्रकार के विभाजन, यांत्रिक, रासायनिक और थर्मल प्रक्रियाओं की आवश्यकता होती है। इन प्रक्रियाओं को अनुकूलित करना और उनका कुशल प्रबंधन करना एक चुनौतीपूर्ण कार्य हो सकता है। यहीं पर कृत्रिम बुद्धिमत्ता एक क्रांतिकारी समाधान प्रदान करती है।

2. **कृत्रिम बुद्धिमत्ता का परिचय और भूमिका**– कृत्रिम बुद्धिमत्ता एक कंप्यूटर प्रणाली है जो मानव मस्तिष्क की तरह सोचने, निर्णय लेने और कार्य करने की क्षमता रखती है। कृत्रिम बुद्धिमत्ता विभिन्न क्षेत्रों में उपयोगी है, विशेषकर जहाँ जटिल डेटा विश्लेषण और प्रक्रिया अनुकूलन की आवश्यकता होती है। कृत्रिम बुद्धिमत्ता (ए.आई.) के मुख्य तत्वों में मशीन लर्निंग, डीप लर्निंग, न्यूरल नेटवर्क्स, और फजी लॉजिक समाहित हैं, जो डाटा से सीखने, पैटर्न पहचानने और जटिल समस्याओं को हल करने में सक्षम हैं, जैसा कि **चित्र–1** में दिखाया गया है।[1]झिल्ली विज्ञान और प्रौद्योगिकी में, कृत्रिम बुद्धिमत्ता निम्नलिखित प्रमुख क्षेत्रों में महत्वपूर्ण भूमिका निभा रही है।[2]

1. झिल्ली डिजाइन और विकास में मदद करना
2. प्रक्रिया अनुकूलन और प्रदर्शन पूर्वानुमान
3. डेटा–संचालित नियंत्रण और निगरानी
4. भविष्यवाणियों और त्रुटि निदान में सुधार



चित्र–1 : ए.आई. की भूमिका
(https://media.springernature.com/lw1200/springerstatic/image/art%3A10.1007%2Fs10311-023-01695-y/MediaObjects/10311_2023_1695_Fig2_HTML.png)

3. झिल्ली डिजाइन और विकास में ए.आई. का उपयोग

3.1. **झिल्ली सामग्री की पहचान और चयन**– झिल्ली विज्ञान में कृत्रिम बुद्धिमत्ता का पहला और सबसे महत्वपूर्ण उपयोग झिल्ली सामग्री के डिजाइन और चयन में होता है। कृत्रिम बुद्धिमत्ता मॉडल, विशेष रूप से मशीन लर्निंग एल्गोरिदम, बड़े पैमाने पर डाटा सेट का उपयोग कर सकते हैं और उन्हें विश्लेषण कर सकते हैं ताकि झिल्ली की सामग्री और उनकी विशेषताओं के बीच संबंधों को समझा जा सके।

3.2 **नैनोमटेरियल्स के डिजाइन में कृत्रिम बुद्धिमत्ता**– झिल्ली विज्ञान में नैनोमटेरियल्स का उपयोग तेजी से बढ़ रहा है। नैनोमटेरियल्स का चयन और अनुकूलन एक जटिल प्रक्रिया हो सकती है क्योंकि इनकी संरचना, आकार, और सतह गुण झिल्ली की क्षमता को सीधे प्रभावित करते हैं। कृत्रिम बुद्धिमत्ता का उपयोग नैनोमटेरियल्स के गुणों का पूर्वानुमान लगाने और उनके प्रदर्शन को अनुकूलित करने के लिए किया जा सकता है।[3]ली एच. और उनके सहकर्मी[3] ने बताया कि कैसे मशीन लर्निंग मॉडल का उपयोग नैनोमटेरियल्स की संरचना और झिल्ली निष्पाद के बीच संबंध की भविष्यवाणी करने में किया जा सकता है। आधारित मॉडल इनपुट डाटा से नए प्रारूपों का सुझाव दे सकते हैं, जिससे अनुसंधान और विकास के लिए समय और लागत दोनों की बचत होती है।

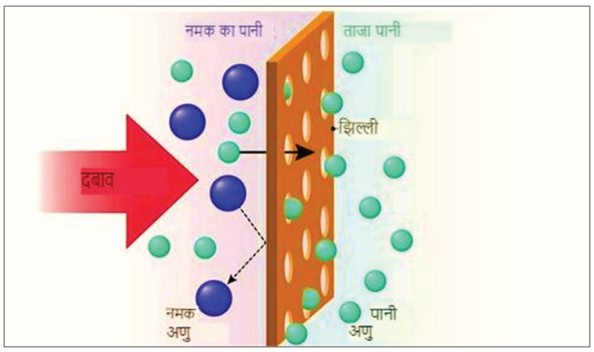
3.3. **कम्प्यूटेशनल मॉडलिंग और मशीन लर्निंग**– मशीन लर्निंग मॉडल जैसे कि डीप लर्निंग और न्यूरल नेटवर्क झिल्ली डिजाइन में नए दृष्टिकोण प्रदान कर रहे हैं। ये मॉडल बड़ी मात्रा में डेटा का विश्लेषण करके झिल्ली की संरचना और गुणों के बीच संबंध स्थापित करते हैं। उदाहरण के लिए, ए. आई.आधारित सिमुलेशन तकनीकों का उपयोग करके झिल्ली के माइक्रोस्ट्रक्चर को अनुकूलित किया जा सकता है, जो फिल्ट्रेशन दक्षता को बढ़ाता है।[4]

4 प्रक्रिया अनुकूलन और प्रदर्शन पूर्वानुमान में ए. आई. का योगदान

4.1 **झिल्ली प्रदर्शन की भविष्यवाणी**– झिल्ली की दीर्घकालिक कार्यक्षमता और स्थिरता को बनाए रखने के लिए उनके प्रदर्शन का सटीक पूर्वानुमान महत्वपूर्ण है। पारंपरिक तरीकों से यह प्रक्रिया बहुत समय लेने वाली और महंगी हो सकती है। ए. आई.आधारित मॉडल, विशेष रूप से डीप लर्निंग तकनीकें, बड़ी मात्रा में डेटा का विश्लेषण कर सकते हैं और झिल्ली के प्रदर्शन के बारे में सटीक भविष्यवाणियां कर सकते हैं।

4.2. **प्रक्रिया नियंत्रण में फजी लॉजिक और न्यूरल नेटवर्क्स का उपयोग**– ए. आई. आधारित फजी लॉजिक और न्यूरल नेटवर्क्स का उपयोग झिल्ली प्रक्रिया नियंत्रण में किया जा रहा है। ये सिस्टम वास्तविक समय में प्रक्रिया डेटा का विश्लेषण करते हैं और सटीक नियंत्रण निर्णय लेते हैं। असघरी और उनके सहकर्मी ने अपने शोध में दिखाया कि कैसे न्यूरल नेटवर्क आधारित नियंत्रण प्रणाली झिल्ली प्रक्रियाओं को अधिक कुशल बना सकती हैं, ऊर्जा खपत को कम कर सकती हैं और जल शोधन प्रक्रिया को तेज कर सकती हैं।[6,7]

4.3 **सर्वोत्तम प्रक्रिया परिस्थितियों की पहचान**– ए.आई. मॉडल, विशेषकर मशीन लर्निंग एल्गोरिदम, बड़ी संख्या में प्रक्रिया पैरामीटर जैसे कि दबाव, तापमान, और प्रवाह दर का विश्लेषण कर सकते हैं। कमाली ने अपने अध्ययन में दिखाया कि कैसे ए.आई. आधारित अनुकूलन मॉडल का उपयोग रिवर्स ऑस्मोसिस प्रक्रिया में ऊर्जा की खपत को कम करने और शुद्धिकरण दक्षता बढ़ाने के लिए किया जा सकता है।[8,9]



चित्र–2: रिवर्स ऑस्मोसिस प्रक्रिया
(https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTAcJTjgm9LWkR7k5p7F8rJE14Lk2CO637Emw&s)

4.4 **प्रक्रिया नियंत्रण और निगरानी**– ए.आई. आधारित नियंत्रण प्रणाली, जैसे कि फजी लॉजिक और जेनेटिक एल्गोरिदम, झिल्ली प्रक्रियाओं को अनुकूलित करने में सहायक होते हैं। ये सिस्टम वास्तविक समय में प्रक्रिया डेटा का विश्लेषण करते हैं और उचित नियंत्रण निर्णय लेते हैं। इससे ऊर्जा का उपभोग कम होती है और उत्पाद की गुणवत्ता में सुधार होता है।[13]

4.5 **डेटा–संचालित अनुकूलन**– डाटा एनालिटिक्स और मशीन लर्निंग का उपयोग प्रक्रिया पैरामीटर जैसे कि प्रवाह दर, दबाव और तापमान को अनुकूलित करने में किया जाता है। ये मॉडल बड़े पैमाने पर डेटा सेट का विश्लेषण कर सकते हैं और ऑप्टिमल कंडीशन की पहचान कर सकते हैं। उदाहरण के लिए, रिवर्स ऑस्मोसिस प्रक्रिया के लिए ए. आई. मॉडल का उपयोग ऊर्जा की खपत को कम करने और शुद्धिकरण दक्षता को बढ़ाने में किया गया है।

5. डेटा–संचालित नियंत्रण और निगरानी

5.1 **प्रक्रिया निगरानी में (ए. आई.) का उपयोग**– झिल्ली प्रक्रियाओं के दौरान उत्पन्न होने वाले डेटा की निगरानी और विश्लेषण एक महत्वपूर्ण चुनौती है।(ए. आई.) आधारित डेटा–संचालित मॉडल झिल्ली प्रणाली में प्रक्रिया की प्रत्येक गतिविधि को मापने, निगरानी करने और उन्हें नियंत्रित करने में सक्षम हैं। यह नियंत्रण पारंपरिक प्रक्रियाओं की तुलना में तेज और अधिक कुशल है।[10]

5.2 **अनुमानित रखरखाव**– ए.आई. का एक महत्वपूर्ण उपयोग झिल्ली प्रणालियों के अनुमानित रखरखाव में हो रहा है। निउ, सी. और उनके सहकर्मी के अनुसार, ए. आई. आधारित निगरानी प्रणालियाँ सेंसर डेटा का उपयोग करके झिल्ली की वास्तविक समय की स्थिति का विश्लेषण करती हैं और संभावित विफलताओं की भविष्यवाणी करती हैं। इससे समय पर रखरखाव संभव होता है और झिल्ली प्रक्रियाओं में आने वाली रुकावटें कम होती हैं।[10]

5.3 **दृश्य डेटा विश्लेषण**– कंप्यूटर विजन और इमेज प्रोसेसिंग का उपयोग झिल्ली सतह पर दोषों और क्षति की पहचान के लिए किया जा रहा है। ए.आई. आधारित इमेज एनालिसिस सिस्टम झिल्ली की सतह की इमेज का विश्लेषण करके दोषों की पहचान और वर्गीकरण कर सकते हैं। शेट्टी ने अपने अध्ययन में दिखाया कि ए. आई. आधारित इमेज प्रोसेसिंग सिस्टम मैन्युअल निरीक्षण की तुलना में अधिक तेज और सटीक है।[11]

6. भविष्यवाणी और त्रुटि निदान में ए.आई. का उपयोग

6.1. **डीप लर्निंग आधारित त्रुटि पूर्वानुमान**– ए.आई. आधारित डीप लर्निंग मॉडल जैसे कि कन्वोल्यूशनल न्यूरल नेटवर्क्स और रिकरंट न्यूरल नेटवर्क्स का उपयोग झिल्ली प्रक्रियाओं में त्रुटियों और विफलताओं की भविष्यवाणी के लिए किया जा रहा है। ये मॉडल पिछले डेटा सेट का विश्लेषण करके संभावित समस्याओं की पहचान कर सकते हैं और उनसे बचने के उपाय सुझा सकते हैं।[7]

6.2. **सिस्टम विफलता निदान**– ए.आई. मॉडल झिल्ली प्रणालियों में विफलताओं का निदान करने में सहायक हैं। मशीन लर्निंग मॉडल सिस्टम में त्रुटियों और विफलताओं के पैटर्न की पहचान कर सकते हैं और वास्तविक समय में समाधान प्रदान कर सकते हैं। इस प्रकार, झिल्ली प्रणालियों की विश्वसनीयता और दीर्घकालिक स्थिरता बढ़ती है।

7. ए.आई. के लाभ

7.1 **उच्च दक्षता**– ए.आई. आधारित सिस्टम पारंपरिक विधियों की तुलना में अधिक कुशल होते हैं। वे झिल्ली प्रक्रियाओं में ऊर्जा की खपत को कम करते हैं, जिससे उत्पादन की लागत में भी कमी आती है।

7.2 **सटीकता और विश्वसनीयता**– ए.आई. मॉडल बड़े पैमाने पर डेटा का विश्लेषण करते हैं, जो निर्णय लेने की प्रक्रिया को तेज और अधिक सटीक बनाता है। इससे झिल्ली प्रक्रियाओं की गुणवत्ता और विश्वसनीयता में सुधार होता है।[12]

7.3. **समय और निवेश की बचत**– ए.आई. का उपयोग अनुसंधान और विकास के समय और लागत को कम करता है। यह झिल्ली डिजाइन और प्रक्रिया अनुकूलन में तेजी लाता है, जिससे उद्योगों को तेजी से नए समाधान और उत्पादों का विकास करने में मदद मिलती है।[14] **चित्र–3** में दर्शाया गया है।

चित्र–3: झिल्ली के लिए ए.आई. प्रवाह चित्र
(https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2468025722001790-gr6.jpg)

8. **निष्कर्ष एवं भविष्य की संभावनाएं**– झिल्ली विज्ञान में ए.आई. का उपयोग अभी प्रारंभिक चरण में है, और इसके व्यापक उपयोग की संभावनाएं उज्ज्वल हैं। भविष्य में, ए.आई. आधारित स्वचालित प्रणाली और भी उन्नत होंगी, जो झिल्ली डिजाइन, प्रक्रिया नियंत्रण और रखरखाव को और अधिक कुशल बनाएंगी। ए. आई. के साथ इंटरनेट ऑफ थिंग्स (IoT) और औद्योगिक स्वचालन के संयोजन से झिल्ली प्रणालियों की सटीकता, विश्वसनीयता और स्थिरता में और सुधार होगा।[15]

Reference

1. Altowayti, W.A.H.; Shahir, S.; Othman, N.; Eisa, T.A.E.; Yafooz, W.M.S.; Al-Dhaqm, A.; Soon, C.Y.; Yahya, I.B.; Che Rahim, N.A.N.b.; Abaker, M.; et al. The Role of Conventional Methods and Artificial Intelligence in the Wastewater Treatment: A Comprehensive Review. *Processes* 2022, *10*, 1832. https://doi.org/10.3390/pr10091832
2. Viet, N. D., Jang, D., Yoon, Y., & Jang, A. (2022). Enhancement of membrane system performance using artificial intelligence technologies for sustainable water and wastewater treatment: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *52*(20), 3689-3719.
3. Li, H., Zeng, B., Qiu, T., Huang, W., Wang, Y., Sheng, G. P., & Wang, Y. (2023). Deep learning models for assisted decision-making in performance optimization of thin film nanocomposite membranes. *Journal of Membrane Science*, *687*, 122093.
4. Ignacz, G., Bader, L., Beke, A. K., Ghunaim, Y., Shastry, T., Vovusha, H., ... & Szekely, G. (2024). Machine learning for the advancement of membrane science and technology: A critical review. *Journal of Membrane Science*, 123256.
5. Li, L., Rong, S., Wang, R., & Yu, S. (2021). Recent advances in artificial intelligence and machine learning for nonlinear relationship analysis and process control in drinking water treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, *405*, 126673.
6. Asghari, M., Dashti, A., Rezakazemi, M., Jokar, E., & Halakoei, H. (2020). Application of neural networks in membrane separation. *Reviews in Chemical Engineering*, *36*(2), 265-310
7. Zhao, Z., Lou, Y., Chen, Y., Lin, H., Li, R., & Yu, G. (2019). Prediction of interfacial interactions related with

membrane fouling in a membrane bioreactor based on radial basis function artificial neural network (ANN). *Bioresource technology*, *282*, 262-268.
8. Kamali, M., Appels, L., Yu, X., Aminabhavi, T. M., & Dewil, R. (2021). Artificial intelligence as a sustainable tool in wastewater treatment using membrane bioreactors. *Chemical Engineering Journal*, *417*, 128070.
9. Habieeb, A. R., Kabeel, A. E., Sultan, G. I., & Abdelsalam, M. M. (2023). Advancements in Water Desalination Through Artificial Intelligence: A Comprehensive Review of AI -Based Methods for Reverse Osmosis Membrane Processes. *Water Conservation Science and Engineering*, *8*(1), 53.
10. Niu, C., Li, X., Dai, R., & Wang, Z. (2022). Artificial intelligence-incorporated membrane fouling prediction for membrane-based processes in the past 20 years: A critical review. *Water Research*, *216*, 118299
11. Shetty, G. R., & Chellam, S. (2003). Predicting membrane fouling during municipal drinking water nanofiltration using artificial neural networks. *Journal of Membrane Science*, *217*(1-2), 69-86.
12. Gaudio, M. T., Coppola, G., Zangari, L., Curcio, S., Greco, S., & Chakraborty, S. (2021). Artificial intelligence-based optimization of industrial membrane processes. *Earth systems and environment*, *5*(2), 385-398.
13. Hu, J., Kim, C., Halasz, P., Kim, J. F., Kim, J., & Szekely, G. (2021). Artificial intelligence for performance prediction of organic solvent nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, *619*, 118513.
14. Gao, H., Zhong, S., Dangayach, R., & Chen, Y. (2023). Understanding and designing a high-performance ultrafiltration membrane using machine learning. *Environmental Science & Technology*, *57*(46), 17831-17840.
15. संदीप (2021) कृत्रिम बुद्धिमत्ता, अनुसंधान विज्ञान शोध पत्रिका, खंड–7, अंक–1,वर्ष–2019, मु0पृ0 136 से 141।
(https://bsnvpgcollege.co.in/vp/pdf/Anushandhan-2019.pdf)
(https://www.anushandhan.com/index.php/ANSDHN/article/view/1300/962)