खण्ड–8, अंक–1, वर्ष–2020
D.O.I.: 10.22445/avsp.v8i1.19

समीक्षा आलेख

जल उपचार के लिए कृत्रिम झिल्लियाँः स्थिति एवं भविष्य

आफरीन अंसारी[1], ए. के. शुक्ला[1] एवं मुहम्मद अयूब अंसारी[2]

[1]रसायन विज्ञान विभाग, एस.एम.एस. विज्ञान महाविद्यालय, ग्वालियर–474 002, म.प्र., भारत
[2]रसायन विज्ञान विभाग, बिपिन बिहारी महाविद्यालय, झाँसी–284 001, उ.प्र., भारत

प्राप्ति तिथि–08.08.2020, स्वीकृति तिथि–12.11.2020

सार– विभिन्न प्रकार की झिल्लियों का उपयोग जल उपचार प्रणाली में किया जाता है। मानव उपभोग और कृषि उद्देश्यों के लिए पानी को साफ एवं नवीनीकृत करने के लिए विभिन्न विधियों का उपयोग किया गया है, लेकिन उनकी हर एक की सीमाएँ हैं। झिल्ली प्रौद्योगिकियों एवं उनके गुणों, विभिन्न पृथक्करण तंत्र, भविष्य के लाभ एवं अनुप्रयोगों पर भी इस लेख में चर्चा की गई है।

बीज शब्द–कृत्रिम झिल्लियाँ, झिल्ली प्रौद्योगिकी, माइक्रोफिल्ट्रेशन, अल्ट्राफिल्ट्रशन, नैनोफिल्टशन, रिवर्स ऑस्मोसिस

Artificial Membranes for Water Treatment: Status and Future

Afren Ansari[1], A.K. Shukla[1] and M.A. Ansari[2]

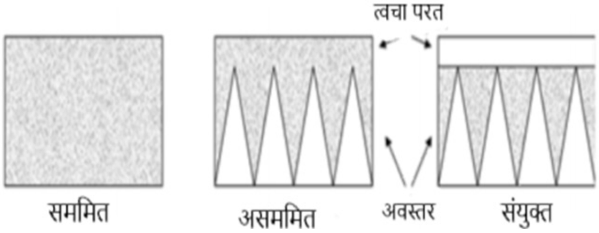
[1]Department of Chemistry, S.M.S. Science College, Gwalior -474002, M.P., India
[2]Department of Chemistry, Bipin Bihari College, Jhansi- 284001, U.P., India

Abstract- Different types of membranes are used in water treatment system. Several methods have been used to clean and renew water for human consumption and agricultural purposes but they each have limitations. Membrane technologies and their properties, different separation mechanisms, future advantage and application have been discussed.

Key words- Artificial Membranes, Membrane Technology, Microfiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration, Reverse osmosis

1. परिचय

झिल्लियों ने हमारे जीवन की गुणवत्ता में व्यापक सुधार किया है।[1] झिल्ली एक ''पतली बाधा या परदा'' है जो एक प्रेरक शक्ति के अधीन होने पर पारगम्यता प्रदर्शित करती है।[2] झिल्लियाँ, प्राकृतिक या कृत्रिम और या तो घने (प्रभावी रूप से असोख) या छिद्रयुक्त हो सकती हैं। झिल्लियों के सामान्य रूप और एक छिद्रपूर्ण अवस्तर परत पर ''त्वचा की तरह'' अलग परत वाले असममित या मिश्रित झिल्ली दिखते हैं; मिश्रित झिल्ली में विभिन्न पदार्थो की अलग–अलग परतें होती हैं जैसा कि **चित्र–1** में दिखाया गया है। लेकिन त्वचा की परत सीधे अवस्तर के प्रभाव को अलग कर सकती है और उसके कार्य को भी प्रभावित कर सकती है।



चित्र–1: कृत्रिम झिल्लियों के सामान्य रूप (क्रॉस–सेक्शन)
[https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25613795/]

Corresponding Author: afreenansari011@gmail.com

जल उपचार के लिए कृत्रिम झिल्लियों के कार्यान्वयन में नये पदार्थों से बनी अधिक विकसित झिल्ली का उपयोग करके उन्नति की है और वह विभिन्न संरचनाओं में कार्यरत हैं। झिल्ली प्रौद्योगिकी कृत्रिम झिल्ली की एक श्रृंखला पर आधारित है जिसमें बहुलक या अकार्बनिक पदार्थ या मिश्रित मैट्रिक्स झिल्ली से बने अनेक कार्य हैं।

जल औद्योगिक और कृषि गतिविधियों से अत्यधिक प्रदूषित होता है और इसका सेवन नहीं किया जा सकता है इसलिए जल की गुणवत्ता और मात्रा से प्रमुख समस्याएँ उत्पन्न होती हैं जिन्हें हल करना आवश्यक है।[3] दूषित जल प्रदूषकों को हटाने से पर्यावरण के साथ–साथ मानव स्वास्थ्य पर भी नकारात्मक प्रभाव पढ़ता है।[4,5] झिल्लियों द्वारा जल शुद्धीकरण पानी की बढ़ती कमी के साथ सामंजस्य बनाए रहने की संभावना होती है, लेकिन ऊर्जा के उपयोग को कम करने की आवश्यकता एक चुनौती है। झिल्ली प्रक्रियाओं में अधिक मात्रा में संगृहीत अतिसूक्ष्म संरचनायें होती हैं और यह नये पदार्थ और नयी झिल्ली अभियांत्रिकी के लिए प्रेरणादायक सुविधा प्रदान करती है।

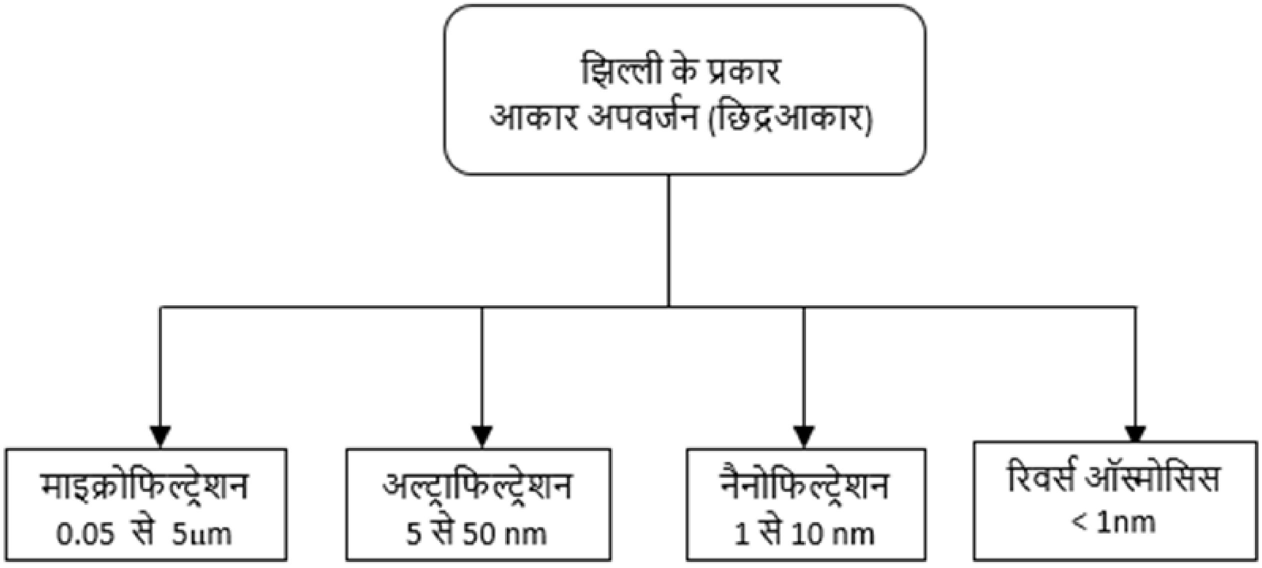
2. झिल्लियों के प्रकार

जल उपचार प्रक्रियाएँ कई प्रकार की झिल्लियों को काम में लेती हैं।[6,7] वे निम्नलिखित हैं– माइक्रोफिल्ट्रेशन (एम.एफ.), अल्ट्राफिल्ट्रेशन (यू. एफ.), नैनोफिल्ट्रेशन (एन.एफ.) एवं रिवर्स ऑस्मोसिस (आर.ओ.) झिल्लियाँ। जैसा कि **चित्र–2** में दिखाया गया है। एम.एफ. झिल्ली में छिद्र का आकार सबसे बड़ा होता है ये सामान्य रूप से बड़े कणों और विभिन्न सूक्ष्मजीवों को आसानी से बाहर निकाल देता है। यू.एफ. झिल्ली में एम.एफ. झिल्ली की तुलना में छोटे छिद्र होते हैं और इसलिए, बड़े कणों और सूक्ष्मजीवों के अलावा, वे बैक्टीरिया और घुलनशील बड़े अणुओं जैसे प्रोटीन को बाहर निकाल सकते हैं। आर.ओ. झिल्ली प्रभावी रूप से गैर–छिद्रपूर्ण होते हैं और इसलिए, कणों और यहाँ तक कि कई कम अणु भार वाली जाति जैसे कि लवण आयन, कार्बनिक आदि को बाहर करते हैं।[8] एन.एफ. झिल्ली अपेक्षाकृत नई हैं और इसे कभी–कभी ''ढीली'' आर.ओ. झिल्ली भी कहते हैं। ये छिद्रयुक्त झिल्ली हैं, लेकिन इसमें छिद्र का आकर 10 ऐंग्स्ट्रॉम या उससे कम होता हैं, वे आर.ओ. और यू.एफ. झिल्ली के बीच निष्पादन को प्रदर्शित करता हैं।[9]

अल्ट्राफिल्ट्रेशन और माइक्रोफिल्ट्रेशन झिल्ली दोनों को ही छिद्रयुक्त झिल्ली के रूप में माना जा सकता है, जहाँ झिल्ली के छिद्र आकार से विलेय के आकार और आकृति के निकलने को नियंत्रित करता है, जैसे कि तेल–जल का पृथक्करण,[10] ग्लिसरॉल–पानी के मिश्रण को विशुद्धीकरण प्रक्रिया के दौरान अशुद्धियों को दूर करना।[11,12]

3. जल उपचार के लिए झिल्ली प्रौद्योगिकी

झिल्ली को सामान्यतः आइसोट्रोपिक या एनआइसोट्रोपिक के रूप में वर्गीकृत किया जाता है। आइसोट्रोपिक झिल्ली, झिल्ली के अनुप्रस्थ काट के एक समान रचना और भौतिक प्रकृति में समान हैं। जबकि एनआइसोट्रोपिक झिल्ली, झिल्ली के अनुप्रस्थ काट पर असमान हैं, और वे सामान्य परतों से मिलकर बने होते हैं जो संरचना और/या रासायनिक संरचना में भिन्न होते हैं। इन झिल्लियों में एक पतली चयनात्मक परत होती है जो एक मोटी और अत्यधिक पारगम्य परत द्वारा समर्थित होती है। वे विशेष रूप से आर.ओ. प्रक्रियाओं में लागू होती हैं।[13–15]

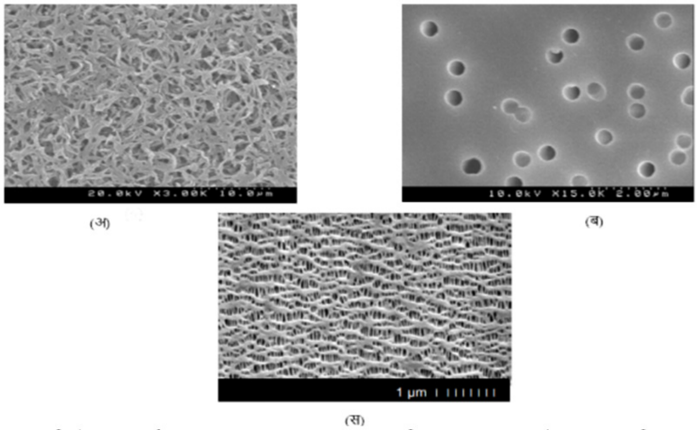


चित्र–2: छिद्र आकार के आधार पर झिल्ली प्रक्रिया का वर्गीकरण

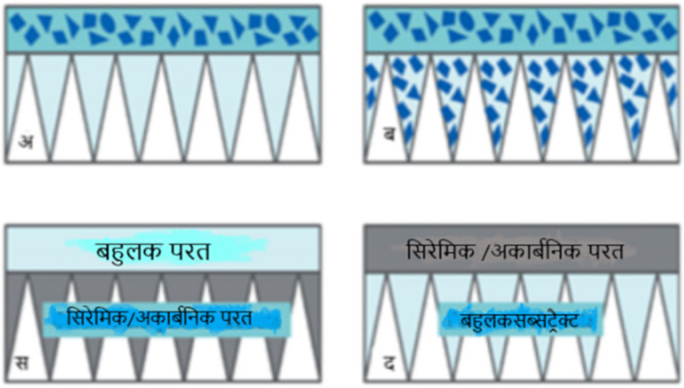
आइसोट्रोपिक झिल्ली को विभिन्न उपश्रेणियों में अलग किया जा सकता है। उदाहरण के लिए, आइसोट्रोपिक झिल्ली सूक्ष्मछिद्रयुक्त हो सकती है। सूक्ष्मछिद्रयुक्त झिल्ली अधिकतर बड़े पैमाने पर कठोर बहुलकी पदार्थों से तैयार की जाती है जो परस्पर छिद्र बनाते हैं।[16] जैसा कि **चित्र–3(अ)** में दिखाया गया है कि सामान्य सूक्ष्मछिद्रयुक्त झिल्ली चरण व्युत्क्रम झिल्ली है। ये बहुलक और विलायक के घोल से परत का निर्माण करके और बहुलक परत को बहुलक के लिए निरर्थक में डुबो कर निर्मित करते हैं। एक अन्य प्रकार का सूक्ष्मछिद्रयुक्त झिल्ली ट्रैक–एच्ड झिल्ली है जैसा कि **चित्र–3(ब)** में दिखाया गया है। इस प्रकार के कृत्रिम झिल्ली को आवेशित कणों के साथ एक बहुलक परत को प्रकाशित करके तैयार किया जाता है जो बहुलक श्रृंखलाओं पर आक्षेप करते हैं, क्षतिग्रस्त अणुओं को पीछे छोड़ते हैं। एक कम सामान्य सूक्ष्मछिद्रयुक्त झिल्ली एक विस्तारित–परत झिल्ली है। जिसे **चित्र–3(स)** में दिखाया गया है।

झिल्ली पदार्थ के संदर्भ में, झिल्ली को कार्बनिक एवं अकार्बनिक रूप में वर्गीकृत किया जाता है। कार्बनिक झिल्ली, कृत्रिम कार्बनिक बहुलक से बनी होती है। अधिकतर, दबाव संचालित पृथक्करण प्रक्रियाओं (माइक्रोफिल्ट्रेशन, अल्ट्राफिल्ट्रेशन, नैनोफिल्ट्रेशन और रिवर्स ऑस्मोसिस) के लिए झिल्लियाँ कृत्रिम कार्बनिक बहुलक से बनाई जाती हैं। इनमें पॉलीइथिलीन (पी.ई.), पॉलीटेराफ्लोरोस्थिलीन (पी.टी.एफ.ई.), पॉलीप्रोपाइलीन और सेलूलोज एसीटेट शामिल हैं।[17] अकार्बनिक झिल्लियाँ, सिरेमिक्स, धातु, जिओलाइट या सिलिका जैसे पदार्थों से बनाई जाती हैं। वे रासायनिक और तापीय रूप से स्थिर होते हैं और हाइड्रोजन पृथक्करण, अल्ट्राफिल्ट्रेशन और माइक्रोफिल्ट्रेशन जैसे औद्योगिक अनुप्रयोगों में व्यापक रूप से उपयोग किए जाते हैं।[18]

मिश्रित कृत्रिम झिल्ली कार्बनिक और अकार्बनिक पदार्थो से मिलकर बनी होती हैं। इन दोनों प्रकार के पदार्थो के लाभ अधिक होते हैं। संक्षेप में, चार प्रकार के मिश्रित मैट्रिक्स झिल्लियाँ होती हैं, जिसमें कार्बनिक या बहुलक पदार्थ और अकार्बनिक पदार्थ दोनों समाहित होते हैं जैसा कि **चित्र–4** में दिखाया गया है।



चित्र–3: SEM छवियों की शीर्ष सतह अ) एक चरण व्युत्क्रम झिल्ली, ब) एक ट्रैक–एच्ड झिल्ली एवं स) एक विस्तारित–परत झिल्ली
[https://www.researchgate.net/publication/251435747]



चित्र–4: विभिन्न प्रकार के मिश्रित–मैट्रिक्स झिल्ली, जिसमें कार्बनिक या बहुलक सामग्री और अकार्बनिक पदार्थ दोनों शामिल हैं। अ) शीर्ष अस्वीकृति परत में नैनोस्केल भराव सहित अकार्बनिक भराव, ब) दोनों अस्वीकृति परत और सब्सट्रेट में भराव, स) छिद्रयुक्त सिरेमिक सब्सट्रेट पर बहुलक परत, एवं द) कम तापमान पर छिद्रयुक्त बहुलक सब्सट्रेट पर सिरेमिक/अकार्बनिक परत
[https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25613795/]

जैव प्रेरित झिल्लियाँ,[19] जल शुद्धिकरण के उद्देश्य से निम्नलिखित दो प्रकार की होती हैं: 1) पारगमन और प्रतिधारण के संदर्भ में निस्पंदन कार्य में वृद्धि के लिए बायोमिमेटिक झिल्ली, एवं 2) झिल्ली अशुद्ध/आर्द्रक न्यूनीकरण के लिए जैव प्रेरित झिल्ली। **चित्र–5** में इन दोनों प्रकार की झिल्लियों को दर्शाया गया है।

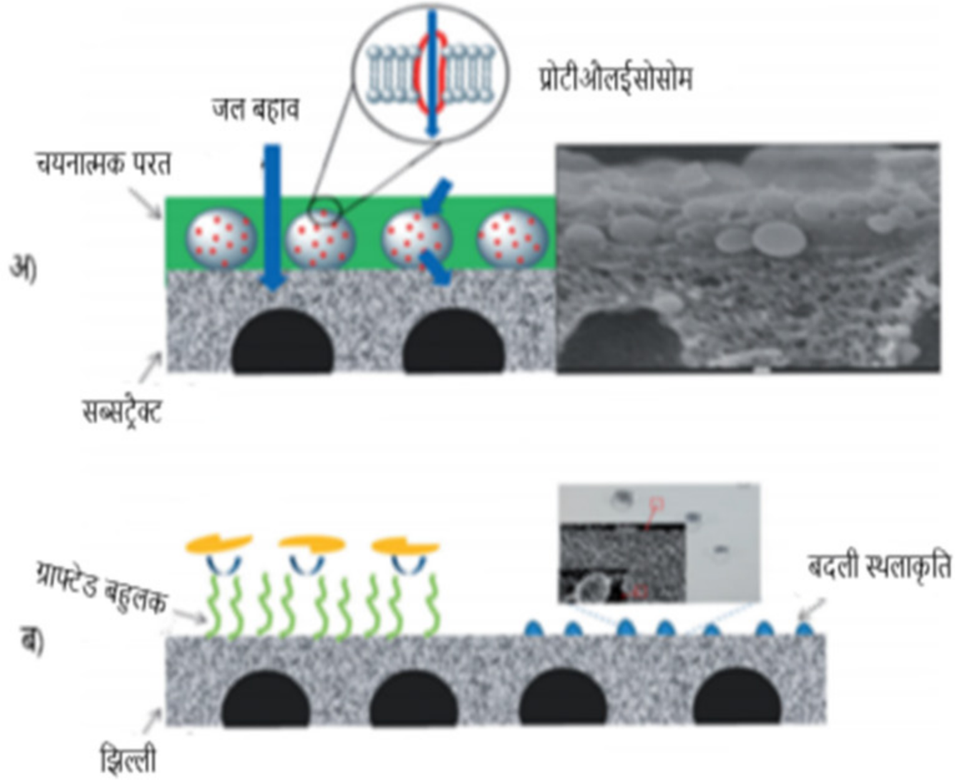
प्रकृति से प्रेरित, एक विधि जो जैविक प्रोटीन चैनल[20] या कृत्रिम चैनल या नैनोपोर्स को सम्मिलित करना है, जो कृत्रिम झिल्ली में प्राकृतिक प्रोटीन चैनल[21] का कार्य करते हैं। ये झिल्ली पारंपरिक आर.ओ. झिल्ली की तुलना में बहुत अधिक योग्य होनी चाहिए। सुपर–सुपरहाइड्रोफिलिक या हाइड्रोफोबिक झिल्ली सतहों को प्राप्त करने के लिए सतह स्थलाकृति को बदलने का एक और तरीका है, जो विशिष्ट आवश्यकताओं को पूरा कर सकता है।[22]

4. जल उपचार में झिल्लियों के अनुप्रयोग

भूत और वर्तमान रुझानों को ध्यान में रखते हुए, झिल्ली का अधिकाधिक उपयोग जल उपचार में किया जा रहा है। जल उपचार को कई श्रेणियों में वर्गीकृत किया जा सकता है:

4.1 खारे या समुद्री जल का विलवणीकरण

वर्तमान में स्थापित किए गए आर.ओ. सिस्टम से लगभग आधा हिस्सा खारे या समुद्री जल को विलवणीकरण करते हैं।[23] खारे जल में ताजे जल की तुलना में लवण की मात्रा अधिक होती है लेकिन समुद्र के जल की तुलना में कम होती है। तकनीकी रूप से खारे जल में लवण की मात्रा 0.5 और 30 ग्राम प्रति लीटर या 0.5 से 30 भाग प्रति हजार के मध्य होता है, प्रमुख अलवणीकरण प्रौद्योगिकियों की तुलनात्मक लागत लवण सान्द्रता के एक कार्य के रूप में होती है। एक सेलूलोज एसीटेट झिल्ली आसानी से इस आवश्यकता को प्राप्त करती है एवं रिवर्स ऑस्मोसिस अनुप्रयोगों में सबसे पहले है। समुद्री जल में लवण की सांद्रता 3.2–4.0% होती है एवं झिल्लियों से उच्च लवण आसानी से निकल जाते हैं। सेलूलोज एसीटेट झिल्ली 97–99% लवण निकालते हैं जो वांछित स्तर से थोड़ा कम हैं।



चित्र–5: बायोमिमेटिक/जैव प्रेरित झिल्लियों की आकार संरचनाएँ अ) कृत्रिम झिल्लियों में प्रोटीन चैनल को शामिल करना, एवं ब) जैव–प्रेरित अणुओं के साथ सतह को संशोधित करना या सतह स्थलाकृति को बदलना
[https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25613795/]

4.2 अतिशुद्ध जल

अर्धचालक और इलेक्ट्रॉनिक्स उद्योगों में संघटित सर्किट चिप्स और अन्य उपकरणों को धोने के लिए उच्च गुणवत्ता वाले जल की आवश्यकता होती है। उत्तक संवर्धन मीडिया, बैक्टीरियोलॉजिकल मीडिया, बफर विलयन, विश्लेषणात्मक विलायक, फार्मूलेशन एड्स, औषधि और अंतःशिरा विलयन, मानकों और अभिकर्मकों और उपकरणों को धोने के लिए फार्मास्यूटिकल्स और जैव प्रौद्योगिकी में शुद्ध पानी की आवश्यकता होती है।

4.3 अपशिष्ट जल का उपचार

अपशिष्ट जल उपचार, झिल्लियों के सबसे महत्वपूर्ण अनुप्रयोग क्षेत्रों में से एक है। औद्योगिक अल्ट्राफिल्ट्रेशन शुरू में अपशिष्ट जल और मल के उपचार के लिए विकसित किया गया था ताकि छोटे कण और मैक्रोमोलेक्युलर पदार्थों को हटाया जा सके। जल उपचार की रसायन प्रौद्योगिकी, खाद्य प्रौद्योगिकी एवं जैव प्रौद्योगिकी जैसे विविध क्षेत्रों को शामिल करने के लिए इसकी उपयोगिता अब बहुत बढ़ गई है। रूढ़ अपशिष्ट जल उपचार में रासायनिक योग (बहुलक, एल्यूमीनियम सल्फेट और चूना), स्कंदन, अवसादन, निस्पंदन और कीटाणुशोधन सम्मिलित हो सकते हैं, प्रायः पर क्लोरीन के साथ भी। दुर्भाग्य से, यदि क्लोरीन–संवेदनशील रिवर्स ऑस्मोसिस या नैनोफिल्ट्रेशन बाद में किया जाता है, तो क्लोरीन को हटा दिया जाना चाहिए। अतिरिक्त नियमों में ट्राइहलोमेथेनेस (टी.एच.एम.) और कृत्रिम कार्बनिक रसायनों को हटाने की आवश्यकता हो सकती है। एम.एफ. और यूपी विशेष रूप से सूक्ष्मजीवों को हटाने में फायदेमंद होते हैं जो स्वास्थ्य के लिए खतरा बन सकते हैं।

5. झिल्लियों का भविष्य में लाभ

विभिन्न प्रकार की झिल्लियों का उपयोग जल उपचार क्षेत्र में किया जा रहा है। इसलिए झिल्ली तकनीक जल उपचार क्षेत्र में अत्यन्त सफल रही है। अपशिष्ट जल उपचार और विलवणीकरण के अलावा, जल शोधन के लिए कृत्रिम झिल्ली के नए अनुप्रयोगों को सफल बनाना भी एक लक्ष्य है। एक उदाहरण उत्पादित जल की शुद्धि है, जो गैस और तेल उत्पादन[24] के दौरान उत्पन्न पानी है। यह पानी तेल और लवण से दूषित है, इसे कई मामलों में लाभकारी उपयोग के लिए अनुपयुक्त माना जाता है। हाइड्रोकार्बन और लवण को हटाने में सक्षम झिल्ली अक्सर जल के एक उत्कृष्ट स्रोत में जल का उत्पादन कर सकते हैं जो अक्सर शुष्क क्षेत्रों में होते हैं जहाँ तेल और गैस का उत्पादन सबसे अधिक प्रचलित होता है।[25]

समस्त, झिल्ली क्षेत्र बहुत आगे बढ़ गया है। लाभप्रद, पर्यावरण के अनुकूल, अस्थिर और उपयोग में आसान होने के कारण, झिल्लियाँ जल शोधन अनुप्रयोगों के लिए एक प्रमुख विकल्प हैं और आने वाले कई वर्षों तक यह बना रहेगा।

6. निष्कर्ष

जल उपचार में झिल्ली प्रौद्योगिकी अनुप्रयोगों की एक असमान सूची है। इस लेख में जल उपचार प्रणाली में विभिन्न प्रकार की झिल्लियों को संक्षेप में प्रस्तुत करने का प्रयास किया गया है। आशा है कि जल उपचार में झिल्ली प्रौद्योगिकी अनुप्रयोगों में आगे अनुसंधान के लिए अच्छी जानकारी प्रदान करने में यह लेख मूल्यवान सिद्ध होगा। समस्त, झिल्ली क्षेत्र बहुत आगे बढ़ गया है। लाभप्रद पर्यावरण के अनुकूल, अस्थिर और उपयोग में आसान होने के कारण, झिल्लियाँ जल शोधन अनुप्रयोगों के लिए एक प्रमुख विकल्प हैं।

संदर्भ

1. ली, एन0 एन0; फेन, ए0 जी0; हो, डब्लू0 एस0 एवं मट्टसुरा, टी0 (2008) विकसित झिल्ली प्रौद्योगिकी और अनुप्रयोगः विले, होबोकेन।
2. लोंसडाले, एच0 के0 (1981) दबाव मति–मंद असमस द्वारा बिजली उत्पादन के लिए झिल्ली, ज0 ऑफ मेम्ब्रेन साइंस, खण्ड–8, अंक–2, मु0पृ0 141–171।
3. बेटी, बी0; सोनावने एस0 एच0; भानवसे, बी0 ए0 एवं गुम्फेकर एस0 पी0 (2016) अपशिष्ट जल उपचार के लिए नैनोमैटेरियल्स–आधारित उन्नत ऑक्सीकरण प्रक्रियाः एक समीक्षा, केमिकल इंजीनियरिंग और प्रौद्योगिकीः प्रक्रिया तीव्रता, खण्ड–109, मु0पृ0 178–189।
4. मौसा, डी0 टी0; अल–नाश, एम0 एच0; नासिर एम0 एवं अल–मैरि, एम0 जे0(2017) जल उपचार के लिए इलेक्ट्रोकोएग्यूलेशन की एक व्यापक समीक्षाः क्षमता और चुनौतियां, ज0 ऑफ एनवायर्नमेंटल मैनेजमेंट, खण्ड–186, मु0पृ0 24–41।
5. यिंगहाओ, वेन; जेइंगम, युआन; जिंगमाओ मा; शिरेन वांग एवं युचेन, लियू (2019) जल उपचार के लिए पॉलीमेरिक नैनोकम्पोजिट झिल्लीः एक समीक्षा, एनवायर्नमेंटल केमिस्ट्री लैटर्स, खण्ड–17, मु0पृ0 1539–1551।
6. अमजद, जेड0 (1993) रिवर्स ऑस्मोसिसः मेम्ब्रेन टेक्नोलॉजी, जल रसायन विज्ञान, और औद्योगिक अनुप्रयोग, वान नॉस्ट्रैंड रेनहोल्डः न्यूयॉर्क।

7. रॉबर्टो, कास्त्रो–मुनोज (2020) जल उपचार के लिए बहुलक झिल्ली में नैनोमीटर की कार्यनीतिः नैनोकोम्पोसाइट झिल्लियाँ, टेक्नोलॉजी, ए सेंशस डेल अगुआ, खण्ड–11, अंक–1, मु0पृ0 410–436।
8. पेरी, आर0 एच0 एवं ग्रीन, डी0 डब्ल्यू0(1997) एडि0 पेरी के केमिकल इंजीनियर्स की हैंडबुक; सातवां एडि0, मैकग्रॉ हिलः न्यूयॉर्क।
9. बेकर, आर0 डब्ल्यू0 (2004) झिल्ली प्रौद्योगिकी और अनुप्रयोग, दूसरा एडि0; जॉन विले एंड संस, लिमिटेडः चिस्टर।
10. डिग्ज, एन0; सोयदेमीर, जी0; करागुंडुज, ए0 एवं केस्किनर, बी0 (2011) जैविक निलंबन के क्रॉस फ्लो माइक्रोफिल्टशन पर झिल्ली के प्रकार और छिद्र आकार का प्रभाव, ज0 ऑफ मेम्ब्रेन साइंस, खण्ड–366, मु0पृ0 278–285।
11. इग्नैचेंको, ए0; नीलॉन, डी0जी0; दुषाने, आर0 एवं हेविफ्रीस, के0 (2006) टिटानिया और जिरकोनिया सतहों के साथ जल की परस्पर क्रिया, ज0 मोल0 कैटल0 एकः रसायन, खण्ड–56, मु0पृ0 57–74।
12. हर्बिग, आर0; अर्की पी0; टोमंडल, जी0, ब्राउनिग, आर0 ई0 (2003) सिरेमिक्स पाउडर और झिल्ली के इलेक्ट्रोकेनेटिक गुणों की तुलना, सेप0 प्यूरीफि0 टेक्नोल0, खण्ड–32, मु0पृ0 363–369।
13. सागले, ए0 एवं फ्रीमैन, बी0 (2004) जल उपचार के लिए झिल्ली के मूल तत्व, फ्यूचर डिसेलिनेशन टेक्स, खण्ड–2, मु0पृ0 137।
14. बेकर, आर0 डब्ल्यू0 (2012) झिल्ली प्रौद्योगिकी और अनुप्रयोग, विले ऑनलाइन लाइब्रेरीः होबोकेन, एन0जे0, यू0एस0ए0।
15. एजुगबे, एलॉर्म ओबोटे एवं सुदेश राथिला (2020) अपशिष्ट जल उपचार में झिल्ली प्रौद्योगिकीः एक समीक्षा, मेमब्रेन्स, खण्ड–10, मु0पृ0 89।
16. रिचर्ड, ए0 बी0 एवं डगलस, वे0 (1996) तरल झिल्ली के साथ रासायनिक पृथक्करणः एक अवलोकन, ए0सी0एस0 संगोष्ठी श्रृंखला, खण्ड–642, मु0पृ0 1–10।
17. अलियु, यू0 एम0; रतिलाल, एस0 एवं ईसा, वाई0 एम0 (2018) जल उपचार में झिल्ली विलवणीकरण तकनीकः एक समीक्षा, जल प्रक्ट0 टेक्नॉल0, खण्ड–13, मु0पृ0 738–752।
18. मल्लदा, आर0 एवं मेंडेज, एम0 (2008) अकार्बनिक झिल्लीः संश्लेशण, विशेषता और अनुप्रयोग, एल्जेवियरः एम्स्टर्डम, नीदरलैंड।
19. शेन, वाई0 एक्स0; सबो, पी0 ओ0; साइंस, आई0 टी0; एर्बाकन एम0 एवं कुमार एम0 (2014) बायोमिमेटिक झिल्लीः एक समीक्षा, ज0 ऑफ मेम्ब्रेन साइंस, खण्ड–454, मु0पृ0 359–381।
20. कुमार, एम0; ग्रैजाकोव्स्की, एम0; जिल्स जे0; क्लार्क, एम0 एवं मीयर डब्ल्यू0 (2007) कार्यात्मक पानी चैनल प्रोटीन एक्वापोरीं जेड के निगमन के आधार पर अत्यधिक पारगम्य बहुलक झिल्ली, प्रोक0 नटल0 अकड0 साइ0, खण्ड–104, अंक–52, मु0पृ0 20719–20724।
21. फैलेस, टी0 एम0 (2007) दोहरी परत झिल्ली में कृत्रिम आयन चैनल, केमि0 सो0 रेव0, खण्ड–36, अंक–2, मु0पृ0 335–347।
22. युआन, एल0; वांग आर0 एवं फेन, ए0 जी0 (2014) प्रत्यक्ष संपर्क झिल्ली विकृति के लिए मजबूत सुपरहाइड्रोफोबैसिस के साथ बायोइनस्पायर्ड कम्पोजिट नैनोफाइबर मेम्ब्रेन का निर्माण, एनवायर्नमेंटल साइंस टेक्नोलॉजी, खण्ड–48, अंक–11, मु0पृ0 6335–6341।
23. अजॉर्फ, एल0 वी0; कपलो, आर0; काटो, एन0; वीस, आर0 जे0; विल्सन, ए0 जे0 सी0 एवं यंग, आर0 ए0 (1974) एक्स–रे विवर्तन, मैकग्रॉ हिल।
24. अजमानी, एस0 जी0; गुडविन, डी0, के0; मार्श, डी0 एवं हॉवर्ड, फेयर भाई (2012) फ्यूलिंग कंट्रोल के लिए कार्बन नैनोट्यूब परतों के साथ कम दबाव वाली झिल्लियों का संशोधन, जल रिसर्च, खण्ड–46, मु0पृ0 5645–5654।
25. कोनगाया, एस0; कुजुमोटो, एच0 एवं वतनबे, ओ0 (2000) क्लोरीन के उच्च प्रतिरोध के साथ नई रिवर्स ऑस्मोसिस झिल्ली पदार्थ, ज0 ऑफ एप्लाइड पॉलीमर साइंस, खण्ड–75, अंक–11, मु0पृ0 1357–1364।