

OQOVA SUVLARNI TOZALASHNING INTELLEKTUAL QUYOSH-ELEKTROBIOMEMBRANA TIZIMLARINI TAKOMILLASHTIRISH USULLARI TAHLILI

t.f.f.d., Mirzayorova Sevara Ubaydullayevna
Qarshi davlat texnika universiteti

Annotatsiya Oqova suvlarni qayta ishlash va ulardan takroriy foydalanish masalasi suv resurslarining tanqisligi, antropogen yuklamaning ortishi hamda sanoat korxonalarida hosil bo'ladigan murakkab tarkibli oqova suvlar hajmining ko'payishi sharoitida dolzarb ilmiy-texnik muammolardan biri hisoblanadi. An'anaviy biologik, membranali va elektrokimyoviy tozalash texnologiyalarining alohida qo'llanilishi yuqori energiya sarfi, membrana yuzasining ifloslanishi, texnologik parametrlarning o'zgaruvchanligi va jarayonni uzluksiz boshqarish zarurati bilan chegaralanadi. Shu sababli quyosh energetikasi, bioelektrokimyoviy jarayonlar, membranali ajratish va sun'iy intellektga asoslangan boshqaruvni yagona texnologik tizimga integratsiyalash istiqbolli yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Ushbu maqolada oqova suvlarni tozalashda membranali bioreaktorlar, elektrobiokimyoviy tizimlar, elektro-membranal bioreaktorlar, quyosh energiyasida ishlaydigan membranali qurilmalar hamda intellektual boshqaruv algoritmlarining qo'llanish imkoniyatlari tahlil qilinadi.

Kalit so'zlar: oqova suv, quyosh energiyasi, membranali bioreaktor, elektrobiologik tozalash, bioelektrokimyoviy tizim, membrana ifloslanishi, elektro-membranal bioreaktor, sun'iy intellekt, mashinali o'qitish, intellektual boshqaruv.

Oqova suvlarni tozalash tizimlarida biologik jarayonlar bilan membranali ajratish texnologiyalarining integratsiyalashuvi yuqori sifatli tozalangan suv olish imkonini beradi. Membranali bioreaktorlar (MBR) biologik parchalanish va membranali filtratsiyani birlashtirishi sababli an'anaviy faol loyqa tizimlariga nisbatan yuqori sifatli permeat olish, qurilmaning ixchamligini oshirish va biomassa konsentratsiyasini yuqori darajada ushlab turish imkoniyatiga ega. Biroq membrananing ifloslanishi (fouling) va aeratsiya bilan bog'liq energiya sarfi MBR texnologiyasining asosiy cheklovlari hisoblanadi.

Membranali bioreaktorlarning samaradorligini oshirish maqsadida elektrokimyoviy jarayonlarni MBR bilan birlashtirish yo'nalishi rivojlanmoqda. Bunday tizimlarda elektr maydonining qo'llanilishi membrana yuzasida ifloslantiruvchi moddalarning to'planishini kamaytirish, organik moddalar va oziqa elementlarini chiqarib tashlash jarayonini jadallashtirish imkonini beradi. Tadqiqotlarda elektro-membranal bioreaktorlar fosforni chiqarib tashlashni **40 % gacha**, ayrim mikropolutantlarni esa **5–60 %** oralig'ida

yaxshilashi, membrana ifloslanishini esa ayrim sharoitlarda **10–95 %** gacha kamaytirishi mumkinligi ko'rsatilgan.

Elektrobiologik jarayonlarni membranali bioreaktor bilan birlashtirishda mikroorganizmlarning metabolik faoliyati muhim ahamiyatga ega. Mikrobal yoqilg'i elementlari (MFC), mikrobal elektroliz elementlari (MEC) va boshqa bioelektrokimyoviy tizimlarda mikroorganizmlar organik moddalarni parchalash jarayonida elektronlar hosil qiladi. Ushbu elektronlarning boshqariladigan harakati bir vaqtning o'zida oqova suvni tozalash va energiya olish imkoniyatini yaratadi. MBR va mikrobal elektrokimyoviy tizimlarning integratsiyasi membrana ifloslanishini kamaytirish hamda energiya sarfini kompensatsiya qilish imkoniyatiga ega ekanligi ko'rsatilgan.

Quyosh energiyasi bilan integratsiyalashgan tizimlar

Oqova suvlarni tozalash jarayonlarida energiya sarfini kamaytirish uchun qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish muhim yo'nalish hisoblanadi. Ayniqsa, quyosh fotoelektrik modullari yordamida membranali bioreaktorning nasoslari, aeratsiya tizimi, sensorlari, boshqaruv qurilmalari va elektrokimyoviy modullarini elektr energiyasi bilan ta'minlash mumkin.

Amaliy tadqiqotlarda quyosh energiyasida ishlaydigan MBR tizimlari ishlab chiqilgan. Masalan, Kampala shahridagi pilot tizimda umumiy quvvati **7 kWp bo'lgan 20 ta fotoelektrik panel, 3,55 kWh** sig'imli superkondensator va **25 m² ultrafiltratsiya membranasi** qo'llangan. Tizimda quyosh energiyasining ulushi 43 % gacha yetgan, membrana oqimi esa 10–15 L·m⁻²·h⁻¹ oralig'ida bo'lgan. Bu natijalar quyosh energiyasi va membranali bioreaktorni integratsiyalash orqali nafaqat oqova suvni tozalash, balki tizimning tashqi elektr tarmog'iga bog'liqligini kamaytirish mumkinligini ko'rsatadi.

Elektro-membranali bioreaktorlarning rivojlanishi Elektrokimyoviy jarayonni membranali bioreaktor bilan birlashtirish natijasida **elektro-membranali bioreaktor (eMBR)** konsepsiyasi shakllangan. Ushbu tizimda biologik parchalanish, membranali ajratish va elektroximik oksidlanish yoki elektrokoagulyatsiya mexanizmlari birgalikda ishlaydi.

Elektro-membranali tizimlarda elektr maydoni mikroorganizmlarning faolligi, loyqa zarrachalarining xususiyatlari va membrana yuzasidagi zarralarning harakatiga ta'sir ko'rsatadi. Elektr maydoni ta'sirida elektroforez, elektroosmos, elektrokoagulyatsiya va anodli oksidlanish kabi mexanizmlar ishga tushishi mumkin. Shu sababli bunday tizimlar oddiy MBRga nisbatan membrana ifloslanishini kamaytirish va murakkab organik ifloslantiruvchilarni parchalash imkoniyatiga ega. 2025-yilda e'lon qilingan sharh tadqiqotlarida elektro-membranali bioreaktorlar uchun COD chiqarilishi **88–99 %**, ammoniy azoti **80–99%**, umumiy azot **60–93 %** gacha va fosfor **80–98 %** gacha bo'lishi mumkinligi qayd etilgan. Shu bilan birga, elektrodning barqarorligi, energiya sarfi va

elektrod materiallaridan ajraladigan komponentlarning ekologik xavfi tizimni sanoat miqyosida joriy qilishdagi asosiy muammolar sifatida ko'rsatilgan.

Intellectual boshqaruv tizimlaridan foydalanish

Oqova suv tarkibining vaqt bo'yicha o'zgarishi, harorat, pH, elektr o'tkazuvchanlik, COD, ammoniy, loyqa konsentratsiyasi, membrana bosimi va oqim tezligining o'zgarishi tizimni an'anaviy boshqaruv algoritmlari orqali optimal holatda ushlab turishni qiyinlashtiradi.

Shu sababli zamonaviy tadqiqotlarda **sun'iy intellekt (AI), mashinali o'qitish (ML), sun'iy neyron tarmoqlar (ANN), Random Forest, Support Vector Machine (SVM), LSTM va mustahkamlovchi o'qitish (RL)** algoritmlaridan foydalanish kengaymoqda. MBR tizimlarida mashinali o'qitish membrana ifloslanishini bashorat qilish, tozalash rejimini belgilash, energiya sarfini optimallashtirish va texnologik parametrlarni real vaqt rejimida boshqarish uchun qo'llanmoqda.

Masalan, to'rt yillik yuqori aniqlikdagi ekspluatatsion ma'lumotlardan foydalanilgan tadqiqotda Random Forest, ANN va LSTM algoritmlari orqali membrananing transmembran bosimi (TMP) bashorat qilingan. Ushbu modellar membrana ifloslanishini oldindan aniqlash va operator qarorlarini qo'llab-quvvatlash vositasi sifatida foydalanilishi mumkinligi ko'rsatilgan.

Yirik pilot qurilmada olib borilgan boshqa tadqiqotda esa MLP va LSTM neyron tarmoqlari yordamida membrana ifloslanishini bashorat qilishda $R^2 > 0,91$ aniqlik qayd etilgan. Modelga organik yuklama, muallaq moddalar konsentratsiyasi, EPS tarkibi, reaktor harorati va membrana oqimi kabi parametrlar kiritilgan.

Quyosh-elektrobiomembrana tizimining taklif etilayotgan konsepsiyasi

Yuqoridagi tadqiqotlar tahlili asosida oqova suvlarni tozalash uchun quyidagi funksional bloklardan tashkil topgan **intellektual quyosh-elektrobiomembrana tizimini** ishlab chiqish maqsadga muvofiq:

Oqova suv → dastlabki mexanik tozalash → biologik reaktor → elektrobiokimyoviy modul → membranali ajratish → tozalangan suv

Tizimning energetik qismi:

Quyosh radiatsiyasi → fotoelektrik modul → akkumulyator → nasos/aerator/elektrodlar/sensorlar/boshqaruv bloki.

Boshqaruv qismi esa:

Sensorlar → ma'lumotlarni yig'ish → AI/ML algoritmi → texnologik holatni baholash → boshqaruv signali → nasos, aerator, elektrod va membrana moduli.

Bunday konfiguratsiyaning asosiy afzalligi shundaki, quyosh energiyasi tizimning elektr ehtiyojini qoplaydi, biologik modul organik ifloslantiruvchilarni parchalaydi, elektrobiokimyoviy modul jarayonni intensivlashtiradi, membrana esa yuqori sifatli yakuniy ajratishni ta'minlaydi. Intellectual boshqaruv esa tizimning o'zgaruvchan ish sharoitlariga moslashishini ta'minlaydi.

Membrana ifloslanishini kamaytirish

Taklif etilayotgan tizimda membrana ifloslanishini kamaytirish tadqiqotining muhim ilmiy yo'nalishlaridan biri bo'lishi mumkin. Chunki MBR texnologiyasining eng muhim cheklovlaridan biri aynan fouling jarayonidir. Elektro-membranalı tizimlarda elektr maydoni orqali elektrostatik qaytarilish, elektroforez va boshqa mexanizmlar membrana yuzasida ifloslantiruvchi qatlam hosil bo'lishini kamaytirishi mumkin.

Bundan tashqari, intellektual boshqaruv tizimi TMP, permeat oqimi, pH, harorat, loyqa konsentratsiyasi va elektr o'tkazuvchanlik kabi parametrlarni uzluksiz monitoring qilib, membranani yuvish yoki ish rejimini o'zgartirish zaruriyatini oldindan aniqlashi mumkin. 2026-yildagi tadqiqotlarda MBR uchun AI asosidagi fouling bashorati monitoring, diagnostika va qaror qabul qilish bosqichlari bilan bog'lanishi, shuningdek, izohlanadigan AI va "human-in-the-loop" boshqaruv konsepsiyalari amaliy ekspluatatsiya uchun muhim ekanligi ta'kidlangan.

Tahlil natijalari

O'rganilgan ilmiy ishlar asosida oqova suvlarni tozalash texnologiyalarining istiqbolli kombinatsiyalarini quyidagicha umumlashtirish mumkin:

1- Jadval

Texnologik yechim	Asosiy afzalligi	Asosiy muammo
MBR	Yuqori sifatli permeat	Membrana foulingi va energiya sarfi
MFC/MEC	Biologik tozalash + bioelektrik energiya	Past quvvat zichligi
Elektro-MBR	Foulingni kamaytirish va ifloslantiruvchilarni oksidlash	Elektrod va energiya sarfi
Quyosh-MBR	Qayta tiklanuvchi energiya	Quyosh radiatsiyasining o'zgaruvchanligi
AI-MBR	Bashoratli boshqaruv	Katta va sifatli ma'lumotlar zarurati

Texnologik yechim	Asosiy afzalligi	Asosiy muammo
Quyosh- elektrobiomembrana	Energiya + biologik + elektroximik + membranali tozalash	Kompleks tizimni optimallashtirish zarurati

Shunday qilib, mavjud tadqiqotlarda quyosh energetikasi, elektrobiokimyoviy tozalash, membranali ajratish va sun'iy intellekt texnologiyalari alohida yo'nalishlarda yetarlicha o'rganilgan bo'lsa-da, ularni yagona adaptiv va energiya samarador intellektual tizim sifatida birlashtirish alohida ilmiy masala sifatida qaralishi mumkin. Ayniqsa, quyosh energiyasining real vaqt rejimidagi mavjudligi, oqova suv tarkibining o'zgarishi va membrana foulingining birgalikdagi ta'sirini hisobga oluvchi boshqaruv algoritmini ishlab chiqish muhim.

Xulosa

Oqova suvlarni tozalash bo'yicha amalga oshirilgan tadqiqotlar tahlili quyidagi xulosalarni shakllantirish imkonini beradi:

1. Membranali bioreaktorlar yuqori sifatli tozalangan suv olish imkonini bersa-da, membrana ifloslanishi va energiya sarfi ularning asosiy cheklovlari hisoblanadi.
2. Elektroximik jarayonlarni MBR bilan integratsiyalash membrana foulingini kamaytirish va organik hamda mineral ifloslantiruvchilarni chiqarish samaradorligini oshirish imkonini beradi.
3. Quyosh fotoelektrik tizimlari MBR va elektrobiokimyoviy modullarning elektr energiyasiga bo'lgan ehtiyojini qayta tiklanuvchi energiya hisobidan ta'minlash imkoniyatiga ega.
4. Mashinali o'qitish va sun'iy intellekt algoritmlari membrana foulingini bashorat qilish, texnologik parametrlarni optimallashtirish va tizimni real vaqt rejimida boshqarishda istiqbolli vosita hisoblanadi.
5. Shu sababli quyosh energetikasi + elektrobiologik tozalash + membranali ajratish + intellektual boshqaruv tamoyillariga asoslangan yagona tizimni ishlab chiqish oqova suvlarni energiya samarador va adaptiv tozalashning istiqbolli yo'nalishi hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Asif M.B., Maqbool T., Zhang Z. Electrochemical membrane bioreactors: State-of-the-art and future prospects. Science of the Total Environment, 741, 2020, 140233.

2. Daud S.M., Noor Z.Z., Mutamim N.S.A., Baharuddin N.H., Aris A. In-depth insight on microbial electrochemical systems coupled with membrane bioreactors for performance enhancement: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 2023, 91636–91648.
3. Wang J., Zhao S., Kakade A., Kulshrestha S., Liu P., Li X. A Review on Microbial Electrocatalysis Systems Coupled with Membrane Bioreactor to Improve Wastewater Treatment. *Microorganisms*, 7(10), 2019, 372.
4. Chen M., Li Y., Sun X. et al. Recent advances in electrochemical processes integrated with anaerobic membrane bioreactor in wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 468, 2023, 143822.
5. Zhu M., Gao S., Chen Y. et al. AI for membrane bioreactors: Fouling prediction and decision support. *Journal of Water Process Engineering*, 2026, 110533.
6. Membrane fouling prediction and uncertainty analysis using machine learning: A wastewater treatment plant case study. *Journal of Membrane Science*, 660, 2022, 120817.
7. Predictive modeling based on artificial neural networks for membrane fouling in a large pilot-scale anaerobic membrane bioreactor for treating real municipal wastewater. *Science of the Total Environment*, 912, 2024, 169164.
8. Machine learning algorithms for predicting membrane bioreactors performance: A review. *Journal of Environmental Management*, 2025, 124978.
9. AI-Enabled Membrane Bioreactors: A Review of Control Architectures and Operating-Parameter Optimization for Nitrogen and Phosphorus Removal. *Water*, 17, 2025, 2899.
10. Solar powered membrane bioreactor (MBR) treating wastewater for reuse at a hospital in Kampala, Uganda – Results of pilot-scale trials. *ScienceDirect*, 2024