

**MIKROALGALAR ASOSIDA YARATILGAN FOTOBIOREAKTORLAR:  
KONSTRUKTIV TURLARI VA SAMARADORLIK OMILLARI**

*Nosirova Dildora Sharof qizi*

*O'zbekiston Milliy universiteti Jizzax filiali  
Biotexnologiya kafedrasida assistent o'qituvchi*

*Soatov Bahrom Baxtiyorovich*

*O'zbekiston Milliy universiteti Jizzax filiali  
Biotexnologiya kafedrasida katta o'qituvchisi PhD*

**Annotatsiya**

Ushbu maqolada mikroalgalarni nazorat qilinadigan sharoitda yetishtirish uchun qo'llaniladigan fotobioreaktorlarning konstruktiv turlari, ishlash prinsiplari, afzalliklari, cheklovlari va samaradorlikka ta'sir qiluvchi asosiy omillar tahlil qilindi. Fotobioreaktorlar mikroalgalar o'sishi uchun yorug'lik, CO<sub>2</sub>, pH, harorat, ozuqa moddalari, aeratsiya, aralashtirish va gaz-suyuqlik mass transferini boshqaruvchi texnologik tizimlardir. Maqolada ochiq raceway pond, quvurli, yassi panelli, bubble-column, airlift va stirred-tank fotobioreaktorlar qiyosiy o'rganildi. Natijalar yopiq fotobioreaktorlar yuqori nazorat, kontaminatsiya xavfining pastligi va biomasaning barqaror sifati bilan ajralib turishini, ochiq tizimlar esa katta hajmda arzon yetishtirish uchun qulayligini ko'rsatdi.

**Kalit so'zlar:** fotobioreaktor, mikroalga, biomassa, bubble-column, airlift, stirred-tank, raceway pond, CO<sub>2</sub>, bioyoqilg'i.

**Kirish**

Mikroalgalar biomasasini sanoat miqyosida yetishtirishda biologik salohiyat bilan birga texnologik muhitni boshqarish ham hal qiluvchi ahamiyatga ega. Mikroalga hujayralarining fotosintetik o'sishi yorug'lik intensivligi, CO<sub>2</sub> konsentratsiyasi, pH, harorat, azot va fosfor manbalari, aralashtirish va mass transfer jarayonlariga bevosita bog'liq. Shuning uchun mikroalgalar biotexnologiyasida fotobioreaktorlar asosiy muhandislik yechimi sifatida qaraladi.

Fotobioreaktor - bu yorug'lik reaktor devori yoki ichki yoritish tizimi orqali hujayralarga yetkaziladigan, yorug'likka bog'liq biologik jarayonlar nazorat qilinadigan reaktor turidir. 2024-yilgi Green Chemical Engineering sharhida fotobioreaktorlar mikroalgalar yetishtirishni chiqindi suvlarni tozalash, CO<sub>2</sub> bioremediatsiyasi, bioyoqilg'i va yuqori qiymatli mahsulotlar ishlab chiqarish bilan bog'laydigan barqaror platforma sifatida ta'riflanadi [1].

Maqolaning maqsadi mikroalgalar asosidagi fotobioreaktorlarning asosiy turlarini qiyosiy tahlil qilish, ularning dizayn parametrlari va samaradorlikka ta'sir qiluvchi omillarini ilmiy manbalar asosida umumlashtirishdan iborat.

### **Materiallar va metodlar**

Tadqiqot qiyosiy-adabiy tahlil metodi asosida bajarildi. Fotobioreaktorlar bo'yicha xalqaro maqolalar, eksperimental tadqiqotlar va sharhlar o'rganildi. Tahlil birliklari sifatida reaktor konstruksiyasi, yorug'lik taqsimoti, aeratsiya, aralashtirish, CO<sub>2</sub> yetkazilishi, kislorod chiqarilishi, mass transfer, energiya sarfi, kontaminatsiya xavfi va sanoat miqyosiga kengaytirish imkoniyati belgilandi.

Uyar va hammualliflarining 2024-yilgi tadqiqotida stirred-tank, bubble-column va airlift fotobioreaktorlar hydrodynamics, mass transfer, mixing time, gas holdup va *Chlorella sorokiniana* o'sish ko'rsatkichlari bo'yicha taqqoslangan. Mazkur maqoladagi ma'lumotlar turli fotobioreaktor dizaynlarini baholashda eksperimental asos sifatida qo'llanildi [3].

<b>Fotobioreaktor turi</b>	<b>Konstruktiv xususiyati</b>	<b>Afzalligi</b>	<b>Cheklovi</b>
Ochiq raceway pond	Kanalsimon ochiq hovuz, paddle wheel orqali aylanish.	Qurilishi arzon, katta maydonlarda qo'llash mumkin.	Kontaminatsiya, bug'lanish va iqlimga bog'liqlik yuqori.
Quvurli PBR	Shaffof quvurlar tizimi, yuqori yorug'lik yuzasi.	Yorug'lik yuzasi katta, yopiq muhit.	Biofouling, qizib ketish va tozalash murakkabligi.
Yassi panelli PBR	Keng shaffof panel va qisqa optik yo'l.	Yorug'lik taqsimoti yaxshi, biomassani zich yetishtirish mumkin.	Kapital xarajat yuqori.
Bubble-column	Pastdan havo pufakchalari beriladi.	Mass transfer yuqori, mexanik qismlar kam.	Gaz oqimi va pufakcha o'lchamini boshqarish zarur.
Airlift	Ichki yoki tashqi aylanish oqimi mavjud.	Hujayraga mexanik stress kamroq.	Dizayn va gidrodinamika murakkab.

Stirred-tank	Mexanik aralashtirgich mavjud.	Aralashtirish kuchli, laboratoriya nazorati qulay.	Energiya sarfi va shear stress yuqori.
--------------	--------------------------------	--	--

### Natijalar

Tahlillar fotobioreaktor samaradorligi birinchi navbatda yorug'lik rejimiga bog'liq ekanini ko'rsatdi. Mikroalga hujayralari yetarli yorug'lik olmasa fotosintez tezligi pasayadi; ortiqcha yorug'lik esa fotoinhibitsiya keltirib chiqarishi mumkin. Shu sababli optik yo'l uzunligi, hujayra zichligi, shaffof yuzaning maydoni va yorug'lik-qorong'ilik sikllari dizaynda muhim parametrlar hisoblanadi [1].

Ikkinchi muhim omil CO<sub>2</sub> yetkazilishi va kislorod chiqarilishidir. Fotosintez jarayonida CO<sub>2</sub> biomassaga aylantiriladi, lekin reaktorda ortiqcha erigan kislorod to'planishi mikroalga o'sishini cheklashi mumkin. Aeratsiya va mass transfer samaradorligi aynan shu muvozanatni ta'minlaydi. Uyar va hammualliflari tajribasida bubble-column reaktori sparger dizayni sababli eng yuqori volumetrik mass transfer ko'rsatkichini bergan, C. sorokiniana biomass produktivligi esa stirred-tank, bubble-column va airlift uchun mos ravishda 0.064, 0.097 va 0.072 g quruq massa/L.kun deb qayd etilgan [3].

Uchinchi omil aralashtirishdir. Aralashtirish mikroalga hujayralarini yorug'lik zonalariga navbatma-navbat olib chiqadi, oziqa moddalari va gazlarning bir xil taqsimlanishini ta'minlaydi hamda cho'kindi hosil bo'lishini kamaytiradi. Biroq ortiqcha mexanik aralashtirish hujayra membranasiga zarar yetkazishi, ayniqsa nozik eukariot mikroalga turlarida shear stressni kuchaytirishi mumkin.

To'rtinchi omil tizimning ochiq yoki yopiq bo'lishidir. Ochiq raceway pond tizimlari arzonligi bilan qulay, biroq biologik ifloslanish va iqlim omillariga sezgir. Yopiq tizimlar yuqori sifatli, toza va nazorat qilinadigan biomassa olish uchun mosroq. Narala va hammualliflari ikki bosqichli gibril tizimda yopiq PBRda o'sish va ochiq raceway pond tizimida lipid induksiyasini ajratish orqali o'sish sikllari sonini oshirish mumkinligini ko'rsatgan [4].

Samaradorlik omili	Reaktorga ta'siri	Optimallashtirish yo'li
Yorug'lik	Fotosintez tezligi va biomassa hosil bo'lishini belgilaydi.	Optik yo'lni qisqartirish, LED spektrini moslash, L/D siklni boshqarish.
CO <sub>2</sub> mass transferi	Karbon manbai yetarliligi va pH barqarorligiga ta'sir qiladi.	Sparger dizayni, aeratsiya tezligi, membranali CO <sub>2</sub> berish.

Aralashtirish	Hujayralarning yorug'lik va oziqa bilan ta'minlanishini yaxshilaydi.	Energiya sarfi va shear stress o'rtasida muvozanat.
Harorat va pH	Fermentativ jarayonlar va o'sish tezligini belgilaydi.	Avtomatik sensorlar, sovitish/isitish va buferlash.
Kontaminatsiya nazorati	Biomassa sifati va xavfsizligini belgilaydi.	Yopiq tizim, sanitariya, steril yoki selektiv muhit.

### Muhokama

Fotobioreaktor tanlashda universal yechim mavjud emas. Agar maqsad arzon biomassa yoki bioyoqilg'i xomashyosi bo'lsa, ochiq raceway pond tizimlari iqtisodiy jihatdan foydali bo'lishi mumkin. Agar maqsad farmatsevtika, oziq-ovqat qo'shimchalari, pigmentlar yoki yuqori tozalikka ega bioaktiv moddalar olish bo'lsa, yopiq fotobioreaktorlar ustunlik qiladi, chunki ularda kontaminatsiya xavfi past va texnologik parametrlar barqaror nazorat qilinadi.

Fotobioreaktorlarning asosiy muammolari kapital xarajat, energiya sarfi, biofouling, qizib ketish, tozalash va sanoat miqyosiga kengaytirish bilan bog'liq. Quvurli PBRlarda yorug'lik yuzasi katta bo'lsa-da, quvurlar ichki yuzasida biofilm hosil bo'lishi yorug'lik o'tishini kamaytiradi. Yassi panelli tizimlarda yorug'lik samaradorligi yuqori bo'lishi mumkin, ammo katta konstruktiv panellarni sanoat miqyosida saqlash va tozalash murakkab. Bubble-column va airlift tizimlari mexanik qismlar kamligi sababli nisbatan sodda, lekin mass transfer va gidrodinamika aniq hisoblanishi kerak.

Kelajakdagi fotobioreaktorlar raqamli sensorlar, real vaqt monitoringi, sun'iy intellekt asosidagi boshqaruv, CO<sub>2</sub> berishning membranali usullari, energiya tejankor LED yoritish va chiqindi suv bilan integratsiyalashgan tizimlar asosida rivojlanishi mumkin. Bunda biologik samaradorlik, iqtisodiy xarajat va ekologik barqarorlik birgalikda baholanishi zarur.

### Xulosa

Mikroalgalar asosida yaratilgan fotobioreaktorlar barqaror biotexnologiyalarni rivojlantirishning asosiy texnik poydevoridir. Ular mikroalga o'sishi uchun zarur bo'lgan yorug'lik, CO<sub>2</sub>, pH, harorat, aralashtirish va mass transfer jarayonlarini boshqarish imkonini beradi. Ochiq tizimlar iqtisodiy jihatdan arzon, yopiq fotobioreaktorlar esa yuqori nazorat va sifat barqarorligini ta'minlaydi.

Eng maqbul texnologik tanlov mikroalga turi, maqsadli mahsulot, iqlim sharoiti, energiya qiymati, suv manbai va sanitariya talablari asosida amalga oshirilishi kerak.

Gibrid tizimlar esa o‘shish va mahsulot to‘plash bosqichlarini ajratib, samaradorlikni oshirishda istiqbolli yo‘nalish hisoblanadi.

### Adabiyotlar

1. Razzak, S. A., Bahar, K., Islam, K. M. O., Haniffa, A. K., Faruque, M. O., Hossain, S. M. Z., et al. (2024). Microalgae cultivation in photobioreactors: sustainable solutions for a greener future. *Green Chemical Engineering*, 5, 418-439. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.10.004>
2. Saritaş, S., et al. (2025). Biological and Nutritional Applications of Microalgae. *Nutrients*, 17(1), 93. <https://doi.org/10.3390/nu17010093>
3. Uyar, B., Ali, M. D., & Uyar, G. E. O. (2024). Design parameters comparison of bubble column, airlift and stirred tank photobioreactors for microalgae production. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 47, 195-209. <https://doi.org/10.1007/s00449-023-02952-8>
4. Narala, R. R., Garg, S., Sharma, K. K., Thomas-Hall, S. R., Deme, M., Li, Y., & Schenk, P. M. (2016). Comparison of microalgae cultivation in photobioreactor, open raceway pond, and a two-stage hybrid system. *Frontiers in Energy Research*, 4, 29. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2016.00029>
5. Ashour, M., et al. (2024). Usage of Chlorella and diverse microalgae for CO2 capture and conversion into valuable bioenergy products. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1387519. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1387519>