

ЧАНДРА ХАС \*  
РУШІ ПАТЕЛ  
ХІТЕШ ПАДХІЯР

Кафедра хімічної інженерії, Університет GSFC,  
Вадодара 391750, Гуджарат, Індія

\* Адреса для листування: [chandra.has@gsfcuniversity.ac.in](mailto:chandra.has@gsfcuniversity.ac.in)

## ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ СТІЧНИХ ВОД МІКРОВОДОРОСТЯМИ *CHLORELLA VULGARIS* ТА *SCENEDESMUS QUADRICAUDA*

**Реферат.** Ефективне відновлення стічних вод є важливим для сталого управління водними ресурсами та може допомогти зменшити регіональний або сезонний дефіцит води. Безпосереднє скидання неочищених стічних вод у водойми призводить до значної деградації навколишнього середовища та ризиків для здоров'я, порушуючи водні екосистеми. Впровадження ефективних методів видалення поживних речовин та забруднювачів є важливим для пом'якшення цих негативних наслідків. Таким чином, наші дослідження сприяють захисту навколишнього середовища та збереженню здоров'я населення. Біологічна обробка, зокрема шляхом культивування водних рослин, має переваги порівняно з традиційними методами видалення поживних речовин та зменшення забруднення. Проведено оцінювання ефективності використання *Chlorella vulgaris* Beijer. та *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Gréb. в очищенні промислових стічних вод. З застосуванням вимірювання видалення нітратів, фосфатів, хімічного (ХСК) та біологічного (БПК) споживання кисню здійснено оцінку придатності культивування водоростей як альтернативи традиційним методам очищення рідких стоків.

**Ключові слова:** стічні води, біологічне очищення, культивування мікрководоростей, видалення поживних речовин, екологічна стійкість

Надійшла до редакції 01.12.2024. Після доопрацювання 25.05.2025. Підписана до друку 20.08.2025.

Опублікована 20.09.2025

---

Ц и т у в а н н я . Чандра Хас, Руші Пател, Хітеш Падхіяр. 2025. Порівняльне дослідження очищення промислових стічних вод мікрководоростями *Chlorella vulgaris* та *Scenedesmus quadricauda*. *Альгологія*. 35(3): 236–252. <https://doi.org/10.15407/alg35.03.236>

This is open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## **Вступ**

Промислова діяльність може призвести до викиду шкідливих речовин у навколишнє середовище, що призводить до забруднення (Mojiri, Bashir, 2022). У багатьох країнах, що розвиваються, очищення стічних вод часто досягає лише вторинних рівнів. Навіть після вторинного очищення у стічних водах залишається значна кількість фосфору та азоту, що спричиняє евтрофікацію, підвищення каламутності та утворення токсичних озер (Chen et al., 2020; Wang et al., 2022). За наявності неочищених стічних вод у сусідніх водоймах рівень рН може змінюватися, а концентрація розчиненого кисню знижуватися, що може призвести до загибелі водних організмів. Крім того, висока концентрація нітратів може перешкоджати процесам дезінфекції води. Тому перед скиданням або повторним використанням стічних вод вкрай важливо видалити поживні речовини та токсичні речовини до прийнятного рівня, перш ніж стічні води будуть скинуті або використані повторно (Hena et al., 2021).

Важкі метали, навіть у дуже низьких концентраціях, є одними з найпоширеніших та найнебезпечніших забруднювачів, що становлять серйозну загрозу для здоров'я людей і сприяють погіршенню стану навколишнього середовища. Належне очищення та управління стічними водами є важливими для пом'якшення цих негативних наслідків та забезпечення сталого управління водними ресурсами (Abunada et al., 2020; Chin et al., 2022). Очищення стічних вод має вирішальне значення, що робить вибір оптимальних методів очищення необхідним для відповідності існуючим стандартам. Традиційні методи, що охоплюють різноманітні фізичні та хімічні процеси, були ретельно вивчені та застосовані на практиці (El-Aswar et al., 2022). Високоєфективними визнано хімічні обробки, такі як хлорування, коагуляція/флокуляція, ультрафіолетове випромінювання та озонування (Samer, 2015; Yusuf et al., 2020). Тим не менш, ці технології часто пов'язані з високими витратами, стикаються з проблемами зневоднення та вимагають певного обслуговування (Daud et al., 2022). З іншого боку, біологічні обробки використовують метаболічну активність мікроорганізмів для розкладання та перетворення забруднювачів стічних вод на біомасу та газу, такі як  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  та  $\text{SO}_2$ . Такий біологічний підхід значно знижує рівні БПК та ХСК у стічних водах, тим самим покращуючи їхню якість (Dalvi et al., 2021).

Мікробіодорості довели свою ефективність у видаленні азотних, фосфорних та вуглецевих забруднювачів зі стічних вод. Крім того, водорості можна інтегрувати в передові процеси та процеси подальшої очистки для покращення якості води після біологічного очищення (Quijano

et al., 2017). Оскільки мікроводоростям для росту потрібні фосфор і азот, вони можуть ефективно очищати стічні води, одночасно виробляючи цінну біомасу водоростей. Цю біомасу можна перетворити на високоцінні продукти, що дає додаткову перевагу (Alazaiza et al., 2023). Крім того, зростаюча маса мікроводоростей може служити джерелом енергії, а також сприяти видаленню фосфатів та азоту. Багато видів мікроводоростей, включаючи представників родів *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Botryococcus*, *Phormidium*, *Limnospira* та *Chlamydomonas* продемонстрували ефективність у біоремедіації поживних речовин, нових забруднювачів та патогенів зі стічних вод (Hashmi et al., 2023). Багато з цих видів процвітають у різних середовищах стічних вод, включаючи муніципальні, промислові та агропромислові стічні води, що привертає до них увагу.

Мікроводорості ефективно видаляють фосфор та азот, зменшуючи ризики евтрофікації, одночасно перетворюючи неорганічні та органічні забруднювачі на цінну біомасу (Mastropetros et al., 2022). Біомаса, зібрана зі ставків для очищення стічних вод, може бути використана як їжа та корм, і останніми роками спостерігається значний інтерес до ліпідів мікроводоростей, що використовуються як наночастинки, такі як тверді ліпідні везикули (Has and Pan, 2021; Bhatt et al., 2022) для застосування в різних галузях, включаючи харчову, хімічну, фармацевтичну та косметичну промисловість.

Недавні дослідження показали, що різні види водоростей ефективно видаляють забруднювачі стічних вод, такі як ХСК, БПК, азот та фосфор (An et al., 2003; Kim et al., 2010). Основний механізм включає поглинання поживних речовин клітинами водоростей та видалення аміаку через підвищений рН (Aslan, Kapdan, 2006). Наприклад, Tarlan et al. (2022) виявили, що *Chlorella* sp. може видаляти 84% твердих часточок, 58% ХСК та 80% абсорбованих органічних ксенобіотиків з промислових стічних вод. Крім того, було показано, що консорціум *Chlorella* sp. та *Scenedesmus* sp. досяг 78–98% видалення поживних речовин з побутових стічних вод (Silambarasan et al., 2021). Необхідні подальші дослідження для оптимізації культивування водоростей та виробництва біомаси для очищення промислових стічних вод при різних концентраціях та для визначення найкращого часу збору.

Метою даної роботи було оцінити ефективність культур штамів двох видів мікроводоростей (*Chlorella vulgaris* та *Scenedesmus quadricauda*) у видаленні неорганічних поживних речовин із промислових стічних вод, пов'язаних з виробництвом барвників/пігментів. Ця ініціатива зумовлена необхідністю розробки стійких методів очищення стічних вод, які можуть пом'якшити вплив промислових стоків на водні екосистеми. На відміну від

попередніх досліджень, в яких переважно вивчали ефективність цих мікроводоростей окремо, в даному дослідженні розглянуто їхню ефективність разом з використанням одного й того ж джерела промислових стічних вод. Результати показують, що хоча *C. vulgaris* перевершує *S. quadricauda* у видаленні деяких забруднювачів, той перевершує її стосовно інших. Використовуючи унікальні переваги кожної мікроводорості, цей порівняльний підхід проливає світло на можливість удосконалення методів очищення стічних вод та розвитку методів сталого управління стічними водами.

### Матеріали та методи

У цьому розділі описано експериментальну основу та методологію, що використовуються для оцінки ефективності *C. vulgaris* та *S. quadricauda* для очищення промислових стічних вод. Він включає використані матеріали, підготовку та вирощування мікроводоростей, збір та очищення зразків стічних вод, а також аналітичні методи, що використовуються для оцінки ефективності цього процесу.

#### Культури водоростей

Матеріалом для дослідження були штами одноклітинних мікроводоростей *C. vulgaris* та *S. quadricauda*, відомі своєю здатністю до вловлювання вуглекислого газу та очищення стічних вод. Ці штами були отримані з Колекції культур водоростей (CAC) кафедри ботаніки Мадраського університету, Ченнаї, Індія.

#### Культивування та нарощування біомаси

Обидва штами спочатку культивували шляхом перенесення їх у пробірки, що містили поживне середовище Болда (BBM; Bischoff, Bold, 1963). Перед інокуляцією пробірки з BBM (придбаним у компанії HiMedia, Махараштра, Індія) для стерилізації автоклаували протягом 10 хв при 121 °C. Пробірки з інокулятом поміщали в добре освітлене місце за температури  $28 \pm 1$  °C, доки культуральна рідина не стала зеленою, що свідчить про достатній ріст водоростей.

Для отримання біомаси 5 мл суспензії водоростей з пробірок переносили до фотобіореакторів періодичної дії (PBR). До пляшки Дюран місткістю 2 л вносили 1,5 л культурального середовища, до якого додавали добриво NPK у концентрації 0,1 мас./об.% (рис. 1). Добриво NPK, надане компанією GSFC Ltd (Гуджарат, Індія), було обрано для низьковитратного виробництва мікроводоростей. Водним розчинником слугувала дистильована вода, яку очищали за допомогою фільтрувального паперу

200 нм для видалення великих домішок. Установка містила трубку з полівінілхлориду (ПВХ), що полегшувала доступ повітря, закриту пластиковою кришкою. Потік повітря спрямовувався за допомогою акваріумного повітряного насоса (Hailea HAP 60, Індія). Для полегшення газообміну між культуральним середовищем та повітрям, запобігання осіданню водоростей, гарантування рівномірного впливу світла та поживних речовин на всі клітини популяції, а також сприяння перемішуванню, трубку подачі повітря було спрямовано під кутом до дна контейнера для вирощування та стратегічно занурено в нього.

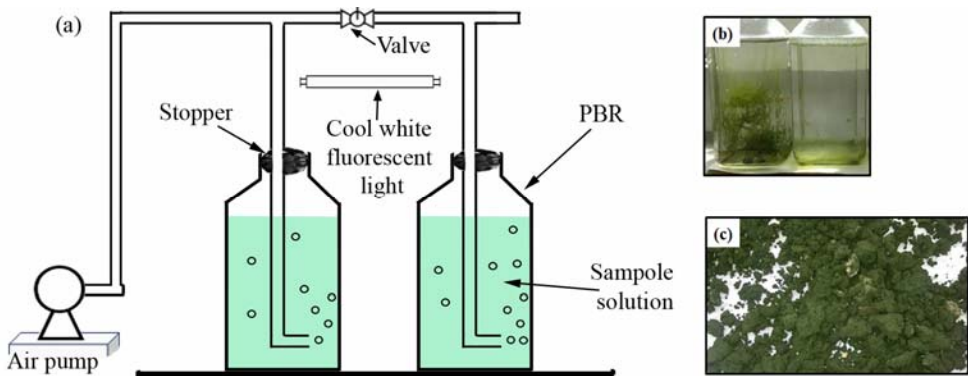


Рис. 1. Культивування мікробіодоростей: *a* — схема пакетних систем PBR, що містить рідке поживне середовище, доповнене добривом NPK. Дві системи PBR призначені для *Clorella vulgaris* та *Scenedesmus quadricauda*; *b* — показано ріст *C. vulgaris* у лівому контейнері, тоді як контейнер з правого боку без добрив; *c* — біомаса водоростей у твердій формі

Для освітлення культури використовували дві холодні білі люмінесцентні лампи, що забезпечували середню інтенсивність світла 1 klx. Мікробіодорості вирощували при безперервному освітленні з системою барботування повітрям, що забезпечувала приблизно 1 л/год за кімнатної температури. Ріст водоростей контролювали щодня. Початкова кількість клітин становила  $7,8 \times 10^4$  кл/мл для *C. vulgaris* та  $3,5 \times 10^4$  кл/мл для *S. quadricauda*. Протягом 10 днів прогрес росту відстежували за допомогою вимірювань оптичної щільності за допомогою спектрофотометра, встановленого на довжину хвилі 750 нм (Chioccioli et al., 2014).

#### Стічні води

##### Зразки стічних вод та їхня характеристика

Зразки стічних вод були надані компанією Navin Chemicals, відомим виробником та експертом нефасованих проміжних продуктів (Гуджарат, Індія). Зразки зберігалися в пластикових пляшках при температурі 4 °C,

щоб мінімізувати біорозклад та хімічні реакції в навколишньому середовищі. Перед проведенням експериментів було проведено попередній аналіз для визначення основних параметрів стічних вод. рН зразків було перевірено за допомогою цифрового рН-метра (HANNA Instrument, модель HI98107). Концентрацію розчиненого кисню (РК) вимірювали за допомогою кисневого лічильника (Lutron, модель: PDO-519, Тайвань). Показники зібраних стічних вод представлені в таблиці.

Таблиця. Характеристика зібраних промислових стічних вод

| Показник                                         | Значення | Одиниця виміру |
|--------------------------------------------------|----------|----------------|
| рН                                               | 7.27     | –              |
| Розчинний кисень (РК)                            | 2.0      | мг/мл          |
| Хімічне споживання кисню (ХСК)                   | 4670     | мг/мл          |
| Біологічне споживання кисню (БПК)                | 1490     | мг/мл          |
| Колір                                            | 106      | ppm            |
| Нітрати                                          | 18       | мг/мл          |
| Фосфати                                          | 27       | мг/мл          |
| Загальний вміст розчинених твердих речовин (РТР) | 3800     | мг/мл          |

#### *Підготовка зразка стічних вод для експерименту*

Для експериментів використовували боросилікатні флакони об'ємом 500 мл. Кожен флакон містив 450 мл зразка стічних вод, туди ж додавали 5 мл 10-денної суспензії мікроводоростей. Маточний розчин мікроводоростей та зібраний зразок стічних вод ретельно змішували та перемішували до однорідності. Експеримент проводили за контрольованих умов при температурі  $28 \pm 1$  °С протягом 20 днів. Використовуючи стандартні аналітичні методи, зразки відбирали кожні 5 днів для аналізу різних фізико-хімічних параметрів, включаючи рН, розчинений кисень, фосфати, нітрати, БПК та ХСК.

#### *Аналітичні методи*

##### *Вимірювання хімічного споживання кисню*

Визначення ХСК проводили методом рефлюксу дихроматом з подальшим титруванням стандартним розчином сульфату заліза та амонію (ФАС). У цьому методі зразок об'ємом 50 мл готували в конічній колбі з 10 мл дихромату калію, невеликою кількістю сульфату срібла та сульфату ртуті, а також 30 мл концентрованої сірчаної кислоти. Після ретельного перемішування колбу підключали до холодильника та кип'ятили зі зворотним холодильником при температурі 60 °С протягом 2 год. Після

охолодження суміш розводили до 100 мл дистильованою водою та додавали 2–3 краплі індикатора фероїну. Потім зразок титрували ФАС до зміни кольору з синьо-зеленого на червонувато-синій, що вказувало на кінцеву точку.

#### *Вимірювання біологічного споживання кисню*

Для проведення тесту на БПК рН зразка нейтралізували за допомогою буферів та вимірювали початковий розчинений кисень (РК). Потім зразок (50 мл) інкубували в темряві при температурі 20 °С протягом 5 днів, щоб запобігти фотосинтезу. Після інкубації проводили остаточне вимірювання РК. Розраховували БПК шляхом віднімання кінцевого РК від початкового РК, що вказує на  $\text{NO}_3^-$  — поширену у воді форму азоту, яка легко розчиняється та легко поглинається водоростями та іншими фотосинтезуючими організмами. Фосфат ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) — основна форма вимірюваного фосфору, який зв'язується з частинками осаду та розчиняється у воді. Надлишок обох поживних речовин може призвести до «цвітіння» водоростей, порушуючи світловий, температурний та кисневий обмін у воді, а також спричиняючи евтрофікацію та гіпоксію, що створює «мертві зони», де біологічна активність припиняється.

У цьому дослідженні було відібрано 50 мл розчину очищених водоростями стічних вод, а потім проаналізовано на вміст нітратів та фосфатів. Для визначення залишкових нітратів та фосфатів мікрководорості відокремлювали центрифугуванням при 5000 об/хв протягом 15 хв, а отриманий супернатант фільтрували через мембрану 0,45 мкм діаметром 1 дюйм (Shabani, 2016). Концентрації нітратів та фосфатів вимірювали за допомогою спектрофотометра (Shimadzu, Японія) з довжиною хвиль 690 нм для фосфатів та 220–225 нм для нітратів, згідно зі стандартними методами (APHA, 2017).

## **Результати**

#### *Вплив росту водоростей на рН стічних вод*

Рівень рН зразків контролювали через регулярні проміжки часу. На рис. 2 показано зміну рН для обох варіантів із додаванням культури водоростей. Початковий рН стічних вод становив  $7,27 \pm 0,58$ , після додавання до суміші *C. vulgaris* та *S. quadricauda* він піднявся вище контрольного рівня. Протягом 5-денного періоду спостереження рН клітин *C. vulgaris* підвищився на 6,2%, тоді як *S. quadricauda* до 7,8%. Зазвичай рН стічних вод коливався від 7 до 9, з оптимальним діапазоном 8,2–8,7 (Huang et al., 2017).

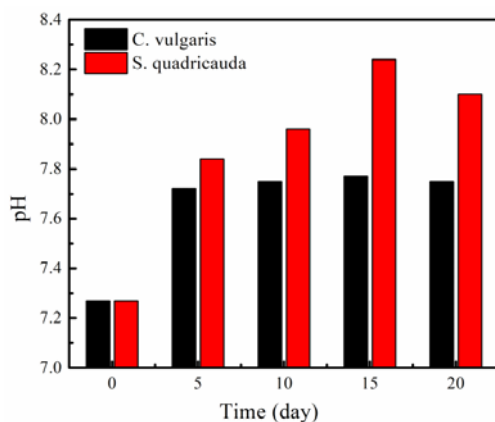


Рис. 2. Рівень pH стічних вод в експерименті зі штамми *Chlorella vulgaris* та *Scenedesmus quadricauda*

#### Вплив росту водоростей на розчинений кисень (РК) стічних вод

РК — це кисень, присутній у воді, необхідний для життя гідробіонтів та для очищення стічних вод. У цій роботі початкова концентрація РК у стічних водах перед обробкою водоростями становила 2 мг/л. Після додавання культур *C. vulgaris* та *S. quadricauda* рівні РК постійно зростали протягом 20 днів (рис. 3). До 5-го дня експерименту *C. vulgaris* підвищила РК на 2,32 мг/л, а *S. quadricauda* — на 2,28 мг/л. До 20-го дня *C. vulgaris* довів показник РК до 4,36 мг/л, тоді як у розчині із *S. quadricauda* він становив 4,28 мг/л, що показує окиснювальний ефект цих водоростей через фотосинтез. Хлорела та сценедесмус сприяли сталому збільшенню РК, проте суттєвої різниці в їхньому впливі на досліджувані стічні води не було виявлено. Ріст концентрації РК сприяє аеробній мікробній активності, покращуючи розщеплення органічних забруднювачів та підвищуючи ефективність очищення стічних вод.

#### Вплив росту водоростей на показники біологічного (БПК) та хімічного (ХСК) споживання кисню

БПК — це міра того, скільки кисню потрібно мікроорганізмам для окислення органічних сполук. Низький БПК вказує на високу доступність кисню та прийнятну якість води, тоді як високий БПК свідчить про серйозне органічне забруднення. Процес біологічного окислення відбувається повільно, оскільки мікроорганізми перетворюють органічні забруднювачі на вуглекислий газ та воду, використовуючи розчинений кисень. Рівні БПК можуть відрізнятися залежно від регіону. У цьому дослідженні за 20 днів БПК знизився до 95% для розчину з додаванням *C. vulgaris* та до 90% для суміші із *S. quadricauda*, що свідчить про покращення якості води (рис. 4, а).

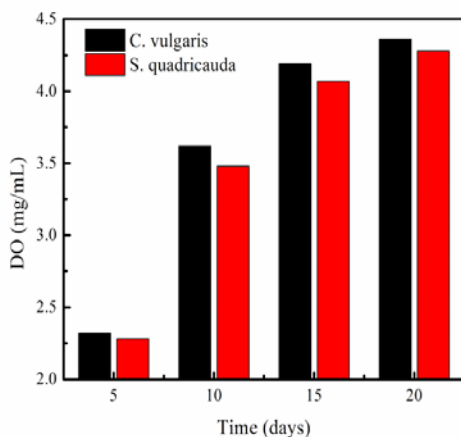


Рис. 3. Збільшення рівня розчиненого кисню у стічних водах протягом 20-денного періоду після обробки *Chlorella vulgaris* та *Scenedesmus quadricauda*

Хімічне споживання кисню показує якість води та рідких стоків, кількісно визначаючи загальну кількість кисню, необхідну для хімічного окислення як органічних, так і неорганічних сполук, присутніх у зразку. Він показує, наскільки добре вода може поглинати кисень, коли органічна речовина розкладається, а неорганічні речовини, такі як нітрати та аміак, окислюються. Високий ХСК свідчить про значну присутність органічних відходів. У цьому дослідженні рівні ХСК обробленого зразка знизилися приблизно на 80% для *C. vulgaris* та приблизно на 90% для *S. quadricauda* за 20 днів (рис. 4, b).

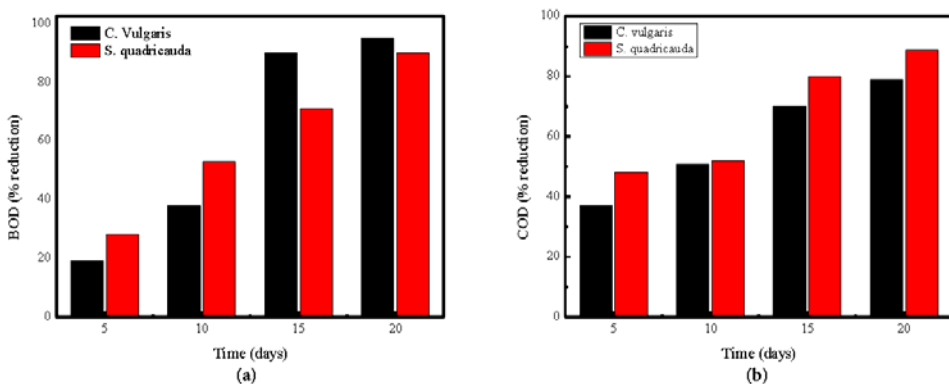


Рис. 4. Відсоткове зменшення значень БПК та ХСК протягом 20 днів для розчинів стічних вод з додаванням культур *Chlorella* та *Scenedesmus*. Обидві мікроводорості сприяють поступовому зниженню рівнів БПК (a) та ХСК (b) відповідно, причому *Chlorella* досягає вищої ефективності видалення БПК на 20-й день, а *Scenedesmus* загалом досягає вищої ефективності видалення ХСК

### Аналіз нітратів та фосфатів

Видалення поживних речовин мікроводоростями безпосередньо пов'язане зі щільністю клітин у розчині та метаболічною активністю. У цьому дослідженні вивчали здатність мікроводоростей рости та видаляти нітрати при різних концентраціях  $\text{NO}_3^-$  та  $\text{PO}_4^{3-}$  протягом 20-денного періоду, при цьому вимірювання проводили з інтервалами 5, 10, 15 та 20 днів. Протягом 20 днів як *Chlorella*, так і *Scenedesmus* продемонстрували значне видалення нітратів та фосфатів зі стічних вод, причому *Scenedesmus* показав вищу ефективність видалення нітратів (рис. 5, а), а *Chlorella* досягла успіху стосовно фосфатів (рис. 5, б). До 20-го дня *Scenedesmus* видалив 90% нітратів порівняно з 80% *Chlorella*. Натомість *Chlorella* сприяла видаленню фосфатів на 88%, перевершуючи *Scenedesmus*, який видалив 80%. Ця тенденція підкреслює унікальну здатність кожної водорості поглинати поживні речовини, причому *Scenedesmus* ефективніше видаляє нітрати, а *Chlorella* — фосфати.

### Обговорення

Усі фізико-хімічні параметри були кількісно визначені на 5-й, 10-й, 15-й та 20-й дні відповідно. Початковий рН стічних вод становив 7,27. Після обробки *C. vulgaris* та *S. quadricauda* рН збільшився порівняно з контролем. Підвищення рН часто відбувається через споживання  $\text{CO}_2$  біомасою водоростей.

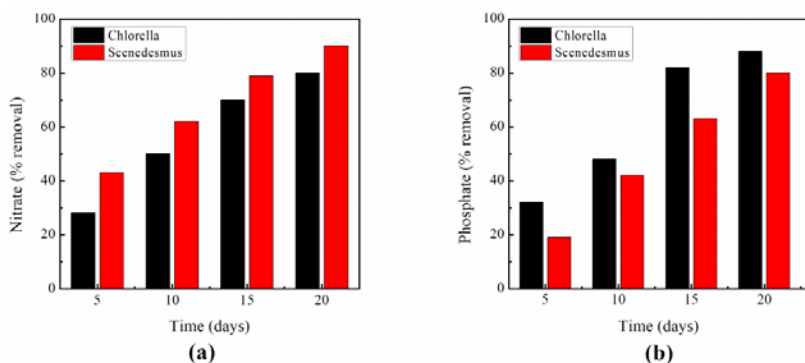


Рис. 5. Процентне зменшення вмісту нітратів (а) та фосфатів (б) у суміші стічних вод з мікроводоростями *Chlorella* та *Scenedesmus* протягом 20 днів

У дослідженні Zamani et al. (2010) різні види мікроводоростей були протестовані на видалення нітратів, азоту та ортофосфатів зі стічних вод протягом 12-денного періоду. Результати показали поступове підвищення рН, що пояснюється поглинанням  $\text{CO}_2$  під час фотосинтезу. Недостатня кількість  $\text{CO}_2$  може призвести до високих значень рН, часто досягаючи 10

або навіть вище (Oswald, 1988), особливо коли бікарбонат використовується як джерело вуглецю. Це підвищення рН може призвести до осадження фосфатів, зменшуючи розчинений фосфат у середовищі. З іншого боку, надмірне надходження  $\text{CO}_2$  може знизити рН до кислого рівня, що призводить до лізису клітин водоростей (Oguganti et al., 2022). Поглинання азоту також впливає на рН: поглинання нітратів підвищує рН, тоді як використання аміаку знижує його до 3, що сприяє росту (Caswell, Zilberman, 2002). Однак надмірний рН може знизити ефективність видалення поживних речовин, обмежуючи ріст водоростей. Тому контроль рН в оптимальному діапазоні є важливим для сприяння здоровому росту водоростей. Турбулентність можна використовувати для збільшення газообміну між водою та повітрям, що допомагає підтримувати рівень рН у воді, тим самим запобігаючи екстремальним значенням рН. По мірі росту водоростей вони засвоюють поживні речовини, що є основним засобом їхнього видалення із середовища. Цьому сприяють також інші явища, зумовлені високим рН, спричиненим водоростями, наприклад, випаровування аміаку та осадження фосфору.

Рівні БПК та ХСК очищених стічних вод були значно нижчими. БПК — показник, що вказує на кількість кисню, необхідну для біологічного окислення органічних речовин мікроорганізмами. До 20-го дня експерименту рівень БПК у досліджуваних стічних водах знизився на 70,91% при обробці культурою *C. vulgaris* та на 89,21% — у варіанті з *S. quadricauda*. До 20-го дня дослідження ці дві водорості сприяли зниженню рівня ХСК на 80,64% та 70,97% відповідно. Завдяки швидкому темпу росту та високому рівню фотосинтетичної активності *C. vulgaris* продемонструвала кращу здатність видаляти ХСК зі стічних вод, що призвело до поступового зниження рівнів БПК та ХСК у стічних водах. Крім того, було встановлено, що *Scenedesmus* має хорошу ефективність видалення неорганічних поживних речовин з побутових стічних вод.

У тому ж експерименті оцінювали видалення нітратів за допомогою *C. vulgaris* та *S. quadricauda*. Видалення нітратів зі стічних вод до 15-го дня становило 78,08% та 70,32% при обробці *C. vulgaris* та *S. quadricauda* відповідно. Штам *C. vulgaris* перевершив штам *S. quadricauda* за здатністю до відновлення нітратів, ефективно видаляючи велику кількість азотистих хімічних речовин зі стічних вод. Щодо фосфатів, дослідження показало, що на 15-й день у варіанті з *C. vulgaris* зі стічних вод було видалено 62,73% фосфатів, а на 20-й день — 79,66%. Ці результати можна порівняти з результатами варіанту з *S. quadricauda*, коли на 15-й день було видалено 81,34% фосфатів, що свідчить про те, що представники *Scenedesmus* та *Chlorella* є найефективнішими мікрободоростями для видалення фосфатів з

міських відходів. Як було показано вище, штам *S. quadricauda* продемонстрував ефективне очищення стічних вод від фосфатів, протягом 15 днів досягнувши помітно високих показників видалення. Під час експерименту культура *C. vulgaris*, зростаючи на середовищі зі стічними водами, використовувала фосфор для росту, що призвело до видалення з них 58,7% фосфатів. Найвища ефективність видалення, яка досягла 91,9%, спостерігалася на 20-й день експерименту. Високі відсотки видалення (80,0%) були також виявлені для *S. quadricauda* на 15-й день.

Попередні дослідження показали різну ефективність видалення сполук азоту та фосфору різними мікробіодоростями. Sayadi et al. (2016) повідомили про видалення штамом *C. vulgaris* за 8 днів близько 80–90% нітратів/фосфатів з міських стічних вод. Rasolamini et al. (2011) повідомили про видалення 84% азоту *Chlorella* та 100% фосфору *Chlamydomonas* за 14 днів, що перевищує результати поточного дослідження. Штам *Scenedesmus* продемонстрував оптимальне видалення азоту та фосфору (100% та 98% відповідно) за умов інтенсивного перемішування при 25 °C. Dickinson et al. (2013) виявили співвідношення видалення азоту до фосфору від 5:1 до 12:1, при цьому швидкість видалення азоту та фосфору коливалася від 83 до 99%. Tang et al. (2011) підкреслили здатність спіруліни значно знижувати рівень нітратів у стічних водах. У цьому дослідженні *Spirulina platensis* сприяла максимальному видаленню нітратів та фосфатів на рівні 65,78% та 49,81% відповідно за 8 днів культивування, що підтверджує її потенціал як вторинного засобу очищення стічних вод.

Вміст розчинного азоту у стічних водах збільшився з 2 до 4,17 мг/л у варіанті з *C. vulgaris* та до 4,20 мг/л з *S. quadricauda*, оскільки водорості виділяли кисень під час фотосинтезу. У системах очищення на основі водоростей ці організми використовують сонячне світло та поживні речовини (такі, як нітрати та фосфати) для росту, вивільняючи кисень через фотосинтез (Seymour et al., 2017). Цей кисень підтримує аеробні бактерії, які розщеплюють органічні забруднювачі. Однак надмірна кількість водоростей через високий рівень поживних речовин може призвести до евтрофікації — надмірного росту, який знижує рівень розчиненого кисню вночі, оскільки його споживають водорості. Цей дисбаланс може зашкодити ефективності очищення та існуванню гідробіонтів. Таким чином, ключем до ефективного очищення є регуляція концентрації розчинного кисню та поживних речовин у стічних водах.

Ми порівняли результати очищення стічних вод за допомогою водоростей з результатами їхнього очищення традиційними методами (Devi, Dahiya, 2008). Як показано на рис. 6, очищення водоростями показало вищу ефективність, при цьому рівні БПК, ХСК, нітратів та

фосфатів знижувалися ефективніше, ніж за допомогою лише хімічного очищення. Це свідчить про те, що очищення на основі водоростей може бути ефективнішим підходом до видалення ключових забруднювачів порівняно з традиційними методами.

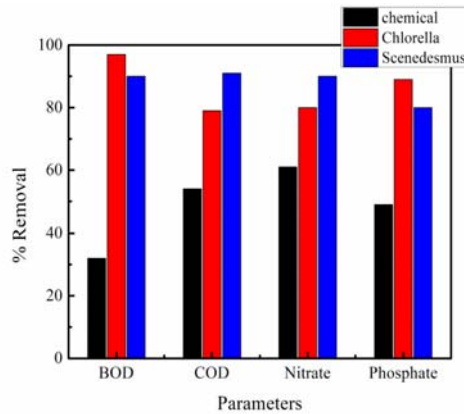


Рис. 6. Порівняння результатів очищення стічних вод за допомогою водоростей з результатами їхнього очищення традиційними методами

## Заключення

Експеримент із вирощуванням штамів *C. vulgaris* та *S. quadricauda* на промислових стічних водах показав, що темпи їх росту у стічних водах збільшуються, водночас ефективно зменшуючи кількість різних забруднюючих речовин. *Chlorella vulgaris* була найбільш ефективною у видаленні нітратів та ХСК, тоді як *S. quadricauda* краще видаляє БПК та фосфати. Ці одноклітинні зелені водорості відомі своїм швидким ростом та ефективним видаленням поживних речовин, що робить їх придатними для очищення стічних вод. Очищення стічних вод за допомогою цих водоростей не тільки покращує якість води, але й сприяє переробці поживних речовин, особливо в дрібномасштабних застосуваннях у сільській місцевості. Видобуті поживні речовини можна повторно використовувати для виробництва корму для худоби, добрив та біодизелю, що ще більше сприяє сталому розвитку. Крім того, мікрowodорості, що культивуються на стічних водах, пропонують цінні ресурси для виробництва біодизелю та кормів для тварин, знижуючи виробничі витрати та викиди парникових газів. Це дослідження показує, що вивчення різних штамів водоростей може оптимізувати видалення забруднюючих речовин під час очищення стічних вод, що потенційно може призвести до більш ефективних та сталих рішень.

## Подяки

Автори висловлюють щиру подяку компанії Navin Chemicals за надання зразків стічних вод та доступ до необхідного обладнання. Щира подяка також висловлюється кафедрі ботаніки Мадраського університету за надання штамів водоростей, використаних у цьому дослідженні. Автори також висловлюють подяку Університету GSFC за їхню підтримку, забезпечену лабораторною інфраструктурою та різними дослідницькими ресурсами.

## Дотримання етичних норм

Автори повідомляють про відсутність будь-якого конфлікту інтересів.

## Список літератури

- Abunada Z., Alazaiza M.Y., Bashir M.J. 2020. An overview of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the environment: Source, fate, risk, and regulations. *Water*. 12(12): 3590.
- Alazaiza M.Y., Albahnasawi A., Al Maskari T., Abujazar M.S.S., Bashir M.J., Nassani D.E., Abu Amr S.S. 2023. Biofuel production using cultivated algae: technologies, economics, and its environmental impacts. *Energies*. 16(3): 1316.
- An J.Y., Sim S.J., Lee J.S., Kim B.W. 2003. Hydrocarbon production from secondarily treated piggyery wastewater by the green alga *Botryococcus braunii*. *J. Appl. Phycol.* 15: 185–191.
- APHA. 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). Washington, DC: Am. Publ. Health Ass.
- Aslan S., Kapdan I.K. 2006. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. *Ecol. Eng.* 28(1): 64–70.
- Bhatt P., Bhandari G., Turco R.F., Aminikhoei Z., Bhatt K., Simsek H. 2022. Algae in wastewater treatment, mechanism, and application of biomass for production of value-added product. *Environ. Pollut.* 309: 119688.
- Bischoff H.W., Bold H.C. 1963. Some soil algae from Enchanted Rock and related algal species. *Phycol. Stud.* IV. Univ. Texas Publ. No. 6318: 1–95.
- Caswell M., Zilberman D. 2002. Algal – culture. Berkeley: Univ. California. 6: 1–12.
- Chen M., Chang L., Zhang J., Guo F., Vymazal J., He Q., Chen Y. 2020. Global nitrogen input on wetland ecosystem: The driving mechanism of soil labile carbon and nitrogen on greenhouse gas emissions. *Environ. Sci. Ecotech.* 4: 100063.
- Chin Y.T., Bashir M.J., Amr S.S.A., Alazaiza M.Y. 2022. Factorial design and optimization of thermal activation of persulfate for stabilized leachate treatment. *Desal. Water Treat.* 250(1): 211–220.
- Chioccioli M., Hankamer B., Ross I.L. 2014. Flow cytometry pulse width data enables rapid and sensitive estimation of biomass dry weight in the microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* and *Chlorella vulgaris*. *PLoS One*. 9(5): e97269.
- Dalvi V., Naaz F., Nigam H., Jain R., Samuchiwal S., Kalia S., Kumar R., Mathur M., Bano F., Malik A., Singh A. 2021. Removal of pollutants from wastewater via biological methods and

- shifts in microbial community profile during treatment process. *Wastewater Treatment Reactors*: 19–38.
- Daud N.M., Abdullah S.R.S., Hasan H.A., Dhokhikah Y. 2022. Integrated physical-biological treatment system for batik industry wastewater: A review on process selection. *Sci. Total Environ.* 819: 152931.
- Devi R., Dahiya R.P. 2008. COD and BOD removal from domestic wastewater generated in decentralised sectors. *Biores. Technol.* 99(2): 344–349.
- Dickinson K.E., Whitney C.G., McGinn P.J. 2013. Nutrient remediation rates in municipal wastewater and their effect on biochemical composition of the microalga *Scenedesmus* sp. AMDD. *Algal Res.* 2(2): 127–134.
- El-Aswar E.I., Ramadan H., Elkik H., Taha A.G. 2022. A comprehensive review on preparation, functionalization, and recent applications of nanofiber membranes in wastewater treatment. *J. Environ. Manag.* 301: 113908.
- Has C., Pan S. 2021. Vesicle formation mechanisms: an overview. *J. Liposome Res.* 31(1): 90–111.
- Hashmi Z., Bilad M.R., Fahrurrozi Zaini J., Lim J.W., Wibisono Y. 2023. Recent progress in microalgae-based technologies for industrial wastewater treatment. *Fermentation.* 9(3): 311.
- Hena S., Gutierrez L., Croué J.P. 2021. Removal of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) from wastewater using microalgae: A review. *J. Hazard. Mater.* 403: 124041.
- Huang Q., Jiang F., Wang L., Yang C. 2017. Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms. *Engineering.* 3(3): 318–329.
- Kim J., Lingaraju B.P., Rheume R., Lee J.Y., Siddiqui K.F. 2010. Removal of ammonia from wastewater effluent by *Chlorella vulgaris*. *Tsinghua Sci. Technol.* 15(4): 391–396.
- Mastropetros S.G., Pispas K., Zagklis D., Ali S.S., Kornaros M. 2022. Biopolymers production from microalgae and cyanobacteria cultivated in wastewater: Recent advances. *Biotechnol. Adv.* 60: 107999.
- Mojiri A., Bashir M.J. 2022. Wastewater treatment: Current and future techniques. *Water.* 14(3): 448.
- Oruganti R.K., Katam K., Show P.L., Gadhamshetty V., Upadhyayula V.K.K., Bhattacharyya D. 2022. A comprehensive review on the use of algal-bacterial systems for wastewater treatment with emphasis on nutrient and micropollutant removal. *Bioengineered.* 13(4): 10412–10453.
- Oswald W.J. 1988. Micro-algae and wastewater treatment. In: *Micro-algal Biotech.* Cambridge: Cambridge Univ. Press. Pp. 305–328.
- Quijano G., Arcila J.S., Buitrón G. 2017. Microalgal-bacterial aggregates: applications and perspectives for wastewater treatment. *Biotechnol. Adv.* 35(6): 772–781.
- Rasoulamini S., Montazeri-Najafabady N., Mobasher M.A., Hoseini-Alhashemi S., Ghasemi Y. 2011. *Chlorella* sp: A new strain with highly saturated fatty acids for biodiesel production in bubble-column photobioreactor. *Appl. Energy.* 88(10): 3354–3356.
- Samer M. 2015. Biological and chemical wastewater treatment processes. *Wast. Treat. Eng.* 150: 61250.
- Sayadi M.H., Ahmadpour N., Fallahi C.M., Rezaei M.R. 2016. Removal of nitrate and phosphate from aqueous solutions by microalgae: An experimental study. *Glob. J. Environ. Sci. Manag.* 2(4): 357–364.

- Seymour J.R., Amin S.A., Raina J.B., Stocker R. 2017. Zooming in on the phycosphere: the ecological interface for phytoplankton-bacteria relationships. *Nat. Microbiol.* 2(7): 1–12.
- Shabani M. 2016. CO<sub>2</sub> bio-sequestration by *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis* in response to different levels of salinity and CO<sub>2</sub>. *Proc. Int. Acad. Ecol. Environ. Sci.* 6(2): 53.
- Silambarasan S., Logeswari P., Sivaramakrishnan R., Incharoensakdi A., Cornejo P., Kamaraj B., Chi N.T.L. 2021. Removal of nutrients from domestic wastewater by microalgae coupled to lipid augmentation for biodiesel production and influence of deoiled algal biomass as biofertilizer for *Solanum lycopersicum* cultivation. *Chemosphere.* 268: 129323.
- Tang D., Han W., Li P., Miao X., Zhong J. 2011. CO<sub>2</sub> biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO<sub>2</sub> levels. *Biores. Technol.* 102(3): 3071–3076.
- Tarlan E., Dilek F.B., Yetis U. 2002. Effectiveness of algae in the treatment of a wood-based pulp and paper industry wastewater. *Biores. Technol.* 84(1): 1–5.
- Wang C., Luo D., Zhang X., Huang R., Cao Y., Liu G., Zhang Y., Wang H. 2022. Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A mini review. *Environ. Sci. Ecotech.* 10: 100167.
- Yusuf A., Sodiq A., Giwa A., Eke J., Pikuda O., De Luca G., Di Salvo J.L., Chakraborty S. 2020. A review of emerging trends in membrane science and technology for sustainable water treatment. *J. Clean. Prod.* 266: 121867.
- Zamani N., Nowshadi M., Amin S., Ghasemi Y., Niyazi A. 2010. Removal of nitrogen-nitrate and ortho phosphate from wastewater using microalgae biotechnology. In: *The Second International Symposium on Environmental Engineering* (Tehran, 18–20 February, 2010).

**Chandra Has**

**Rushi Patell**

**Hitesh Padhiyar**

Department of Chemical Engineering, GSFC University,  
Vadodara 391750, Gujarat, India

**Comparative study of industrial wastewater treatments by *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus quadricauda* microalgae**

Efficient wastewater recovery is essential for sustainable water resource management and can help alleviate regional or seasonal water shortages. Directly discharging untreated wastewater into water bodies leads to significant environmental degradation and health risks, disrupting aquatic ecosystems. Implementing efficient nutrient and pollutant removal techniques is essential to mitigate these adverse effects. Thus, we safeguard the environment and ensure public health by managing water resources sustainably. Biological treatment, particularly by cultivating aquatic plants, offers advantages over conventional methods for nutrient removal and pollution mitigation.

This study evaluates the effectiveness of *Chlorella vulgaris* Beijer. and *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Bréb. in treating industrial wastewater. Using measurements of the removal of nitrates, phosphates, chemical oxygen demand, and biological oxygen demand, this study assesses algae suitability as an alternative to conventional farming.

**Key words:** wastewater treatment, biological treatment, microalgae cultivation, nutrient removal, environmental sustainability

---

**Citation.** Chandra Has, Rushi Patell, Hitesh Padhiyar. 2025. Comparative study of industrial wastewater treatments by *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus quadricauda* microalgae. *Algologia*. 35(3): 236–252.  
<https://doi.org/10.15407/alg35.03.236>