



# Модуль 6: Вибір системи проти глобального потепління в аквакультурі

Доц. проф. Д-р Дімітріс Клаудатос  
Фессалійський університет (UTH)

## 1. Вступ

Глобальне потепління суттєво впливає на водні екосистеми та аквакультуру, що вимагає впровадження стійких систем для вирішення таких проблем, як підвищення температури, виснаження кисню та збільшення поширеності захворювань. Стійкі практики аквакультури мають вирішальне значення для пом'якшення цих впливів, причому вибір системи відіграє ключову роль у забезпеченні адаптивності та довгострокової життєздатності. У цій главі представлено всебічний аналіз впливу зміни клімату на системи аквакультури, досліджуються інноваційні рішення та стратегії, які допоможуть розробникам політики, дослідникам і зацікавленим сторонам галузі сприяти стійкості в цьому секторі. Дослідження підкреслюють важливість впровадження стійких до клімату технологій, таких як рециркуляційні системи аквакультури (RAS) та інтегрована мультитрофічна аквакультура (IMTA), для підвищення продуктивності та зменшення впливу на навколишнє середовище (Boyd та ін., 2022; Handisyde та ін., 2017; Froehlich та ін., 2018).

Аквакультура є одним з найбільш швидкозростаючих секторів виробництва продуктів харчування в усьому світі і відіграє вирішальну роль у задоволенні харчових потреб зростаючого населення. Однак наслідки глобального потепління створили значні проблеми для його стійкості. Підвищення глобальної температури, закислення океану, зміна солоності та розповсюдження хвороботворних мікроорганізмів змінюють форму водних екосистем, створюючи нові виклики для діяльності аквакультури. Ці екологічні зміни загрожують не лише економічній життєздатності галузі аквакультури, але й глобальній продовольчій безпеці та біорізноманіттю.

Зміна клімату посилює тепловий стрес у водному середовищі, впливаючи на швидкість метаболізму, ріст і розмноження видів, що вирощуються. За словами Бойда та Макневіна (2015), коливання температури поза межами оптимального діапазону для видів аквакультури можуть призвести до збільшення потреби в кисні, зниження імунної реакції та підвищення рівня смертності. Крім того, нагрівання води створює сприятливі умови для шкідливого цвітіння водоростей (BBV), яке може знизити рівень кисню та вивільнити токсини, шкідливі для водних організмів (Діаз і Розенберг, 2008). Ці явища вимагають інноваційних підходів до проектування та управління системою аквакультури.

Підкислення океану, прямий наслідок підвищення рівня вуглекислого газу в атмосфері (CO<sub>2</sub>), становить ще одну серйозну проблему. Підкислена вода зменшує доступність карбонатних



іонів, необхідних молюскам та іншим кальцифікуючим організмам для побудови раковин і скелетів. Дослідження Кулі та ін. (2009) висвітлюють економічні та екологічні ризики, пов'язані з підкисленням, особливо для промисловості з виробництва молюсків. Крім того, зміни солоності, спричинені таненням льодових шапок і зміненим режимом опадів, порушують географічний розподіл видів аквакультури, вимагаючи адаптації до цих динамічних умов (Troell et al., 2003).

Розповсюдження хвороб викликає ескалацію занепокоєння в системах аквакультури в умовах зміни клімату. Високі температури прискорюють життєві цикли багатьох патогенів і паразитів, збільшуючи частоту та тяжкість спалахів. Наприклад, *Vibrio* spp., поширений патоген в аквакультурі, процвітає при підвищених температурах, що призводить до значних економічних втрат (Bondad-Reantaso et al., 2005). Ці виклики підкреслюють важливість впровадження кліматостійких систем аквакультури, які можуть пом'якшити несприятливі наслідки глобального потепління.

Вибір системи є вирішальним кроком у адаптації до цих викликів. Закриті рециркуляційні системи аквакультури (RAS), інтегрована багатотрофічна аквакультура (ІМТА) і морські системи аквакультури представляють інноваційні підходи, які можуть підвищити стійкість і сталість. За даними Martins et al. (2010), RAS забезпечує точний контроль навколишнього середовища, зменшуючи зовнішні стресові фактори для водних видів. ІМТА об'єднує види з додатковими екологічними ролями, покращуючи кругообіг поживних речовин і здоров'я екосистеми. Офшорна аквакультура, що працює в більш глибоких водах зі стабільними умовами навколишнього середовища, пропонує життєздатну альтернативу прибережним системам, уразливим до спричиненої кліматом евтрофікації та гіпоксії (Holmer, 2010; Pereira et al., 2024).

## **2. Вплив глобального потепління на системи аквакультури**

Глобальне потепління створило значні проблеми для систем аквакультури, включаючи підвищення температури води, підкислення океану та зміну рівня солоності, що ставить під загрозу здоров'я та продуктивність водних організмів. Підвищений термічний стрес прискорює швидкість метаболізму, тоді як евтрофікація та гіпоксія загрожують водним середовищам існування. Крім того, зміна клімату посилює розповсюдження хвороб і патогенів, особливо серед видів із вузькими екологічними допусками (Boyd & McNevin, 2015; Diaz & Rosenberg, 2008). Розуміння цих впливів має вирішальне значення для розробки адаптивних стратегій, які забезпечують стійкість аквакультури.

### **2.1 Термічний стрес**

Підвищення глобальної температури кидає виклик системам аквакультури, особливо для видів із вузькими температурними допусками. Наприклад, дослідження показують, що підвищення температури води призводить до підвищення метаболізму у риб, збільшення потреби в кисні та стресу (Boyd and McNevin, 2015).

Підвищення глобальної температури створює значні проблеми для діяльності аквакультури, особливо для видів із вузькими температурними допусками. Риби,



молюски та інші водні організми часто мають обмежений діапазон оптимальних температур, необхідних для їх фізіологічних функцій. Підвищені температури прискорюють метаболізм, що призводить до підвищення потреби в кисні та фізіологічного стресу (Boyd and McNevin, 2015). З підвищенням температури води доступність кисню зменшується через зниження розчинності, створюючи умови гіпоксії, викликані температурою. Це явище підвищує рівень смертності таких видів, як лосось і тилapia, особливо в стратифікованих водоймах, де рівень кисню вже коливається.

## **2.2 Евтрофікація та гіпоксія**

Спричинена кліматом евтрофікація прискорює надходження поживних речовин у водні екосистеми за рахунок збільшення стоку поживних речовин від сільськогосподарської діяльності та посилення дощів. Надлишок поживних речовин, зокрема азоту та фосфору, призводить до шкідливого цвітіння водоростей (BBB), яке виділяє токсини та виснажує розчинений кисень під час їх розкладання. Евтрофікація є основною причиною гіпоксичних зон, які часто називають «мертвими зонами», які роблять водні середовища існування непридатними для проживання. Наприклад, гіпоксична зона Мексиканської затоки, яка живиться надходженням поживних речовин з річки Міссісіпі, розширилася як через антропогенні, так і через кліматичні чинники, що впливає на рибні запаси та аквакультуру.

## **2.3 Поширення захворювання**

Тепліші води створюють сприятливі умови для патогенів і паразитів, збільшуючи ризики в системах аквакультури. Наприклад, *Vibrio* spp. процвітає при підвищених температурах, спричиняючи економічні збитки у розведенні креветок і риби (Bondad-Reantaso et al., 2005; Pounds et al., 2006). Крім того, висока температура послаблює імунну систему водних організмів, роблячи їх більш сприйнятливими до інфекцій. Наприклад, інвазія морських вошей на лососевих фермах загострилася в останні роки, що призвело до значних економічних втрат і збільшення залежності від хімічної обробки, що несе екологічні ризики (Abolofia et al., 2017).

## **2.4 Підкислення океану**

Підкислення океану є ще однією критичною проблемою, яка впливає на аквакультуру, зокрема на розведення моллюсків. Коли атмосферний CO<sub>2</sub> розчиняється в океанах, він утворює вугільну кислоту, яка знижує рівень pH і зменшує доступність карбонатних іонів, необхідних для формування раковини та скелета в кальцифікуючих організмах (Cooley et al., 2009). Молюски, такі як устриці та молюски, особливо вразливі, оскільки підкислена вода призводить до тоншої раковини та нижчого рівня виживання. Крім того, підкислення порушує сенсорні функції деяких видів риб, змінюючи їхню поведінку уникання хижаків і динаміку екосистеми (Munday et al., 2009).

## **2.5 Зміни солоності**



Танення крижаних шапок і зміна режиму опадів змінюють рівень солоності в морському та естуарному середовищах, впливаючи на поширення та продуктивність видів аквакультури. Такі види, як креветки та морський окунь, які чутливі до коливань солоності, можуть відчувати зниження росту та розмноження (Troell та ін., 2003). У Бангладеш підвищення рівня солоності в прибережних водах змусило креветкові ферми адаптуватися, вводячи солестійкі види, але ці зміни супроводжуються значними економічними та екологічними витратами.

### 3. Основні критерії вибору системи

Вибір систем аквакультури, здатних протистояти несприятливим наслідкам зміни клімату, є життєво важливим для стійкості та економічної життєздатності. Ключові критерії включають стійкість до температурних коливань, пом'якшення евтрофікації, боротьбу з хвороботворними мікроорганізмами, енергоефективність і адаптивність до змін солоності. Такі системи, як рециркуляційні системи аквакультури (RAS) та інтегрована мультитрофічна аквакультура (IMTA), ефективно вирішують ці проблеми, пропонуючи контроль навколишнього середовища та кругообіг поживних речовин відповідно (Мартінс та ін., 2010; Перейра та ін., 2024). Ці критерії забезпечують адаптивність систем аквакультури до мінливих кліматичних умов.

#### 3.1 Стійкість до температурних коливань

Закриті рециркуляційні системи аквакультури (RAS) пропонують точний контроль температури, підвищуючи адаптивність системи до теплового стресу. Системи повинні адаптуватися до коливань температури, щоб зменшити термічний стрес для водних організмів. Закриті рециркуляційні системи аквакультури (RAS) особливо ефективні, пропонуючи точний контроль температури води та інших параметрів середовища. RAS забезпечує значні переваги у підтримці оптимальних умов для росту та виживання видів (Martins та ін., 2010). Прикладом є аквакультура лосося в Норвегії, яка використовує технологію RAS для пом'якшення впливу підвищення температури моря (Badiola та ін., 2012).

#### 3.2 Пом'якшення евтрофікації

Інтегрована мультитрофічна аквакультура (IMTA) включає в себе фільтри та морські водорості для зменшення навантаження поживними речовинами, поглинання надлишку поживних речовин, покращення загальної якості води та пом'якшення евтрофікації (Перейра та ін., 2024). Інтегрована мультитрофічна аквакультура (IMTA) — це стійке рішення для управління поживними речовинами. IMTA об'єднує такі види, як риба, морські водорості та молюски, щоб переробити поживні речовини та зменшити ризики евтрофікації. Ферми з вирощування морських водоростей в Азії



продemonстрували ефективний кругообіг поживних речовин, зменшуючи ВЦВ та покращуючи якість води (Troell та ін., 2003).

### **3.3 Контроль патогенів**

Зміна клімату посилила ризик патогенів і хвороб в аквакультурі, оскільки більш висока температура води прискорює життєві цикли шкідливих організмів, включаючи бактерії, віруси та паразитів. Удосконалені стратегії боротьби з патогенами є важливими для захисту діяльності аквакультури від цих ризиків. Системи біозахисту, такі як рециркуляційні системи аквакультури (RAS), відіграють важливу роль, ізолюючи вирощувані види від зовнішнього середовища, значно зменшуючи вплив патогенів. Такі технології, як ультрафіолетова (УФ) стерилізація, озонування та біофільтри, ефективно мінімізують мікробне навантаження у водних системах, захищаючи водні види (Bondad-Reantaso et al., 2005). Наприклад, креветкові ферми в Південно-Східній Азії успішно використовували RAS у поєднанні з ультрафіолетовою стерилізацією для боротьби зі спалахами *Vibrio*, які часто викликані підвищенням температури моря (Aly and Fathi, 2024). Стійкі до патогенів практики аквакультури, такі як селективне розведення на толерантність до хвороб, ще більше підвищують стійкість вразливих видів.

### **3.4 Енергоефективність і зменшення викидів вуглецю**

Енергоефективні системи відіграють вирішальну роль у зменшенні вуглецевого сліду діяльності аквакультури. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова, і впровадження ефективних технологій, таких як передові системи аерації, є життєво важливими для сталого розвитку в секторі. Рециркуляційні системи аквакультури (RAS), незважаючи на те, що вони енергоємні через перекачування води, аерацію та регулювання температури, є життєздатним шляхом до сталого розвитку, якщо живляться від відновлюваних джерел енергії. Наприклад, було показано, що гібридні установки RAS на сонячних батареях знижують експлуатаційні витрати на енергію на 30%, зберігаючи продуктивність (Manolache & Andrei, 2024).

Інноваційні енергетичні рішення, такі як системи перетворення відходів в енергію, які перетворюють органічні відходи аквакультури на біогаз, ще більше підвищують стійкість шляхом вирішення проблем управління відходами (Martins et al., 2010). Системи аквакультури на сонячних батареях у регіонах з обмеженими ресурсами, наприклад в країнах Африки на південь від Сахари, демонструють, як енергоефективні рішення можуть сприяти екологічній та економічній стійкості. Використовуючи відновлювані джерела енергії та ефективні технології аерації, галузь аквакультури може значно зменшити свій вплив на навколишнє середовище, одночасно сприяючи довгостроковій стійкості та продуктивності (Badiola та ін., 2012).



### 3.5 Пристосованість до коливань солоності

Системи, розташовані в прибережних і естуарних регіонах, повинні враховувати зміни солоності, спричинені глобальним потеплінням. Евригалінні види, здатні переносити широкий діапазон солоності, можуть мати пріоритет. Вибіркові програми розведення часто використовуються для розвитку видів із підвищеною толерантністю до солоності (Rahman et al., 2021). Прикладом є аквакультурні операції в Бангладеш, адаптовані до вторгнень солоності шляхом культивування солестійких видів, таких як тілапія.

Пристосовуваність до коливань солоності є вирішальним фактором для систем аквакультури, особливо в прибережних і естуарних регіонах, де зміна клімату спричиняє значні зміни в структурах солоності. Танення полярних льодових шапок, зміна структури опадів і підвищення рівня моря сприяють непередбачуваним коливанням солоності, впливаючи на види, чутливі до цих змін. Системи повинні віддавати пріоритет відбору видів і технологічним рішенням для підтримки продуктивності за таких умов. Евригалінні види, які переносять широкий діапазон рівнів солоності, зазвичай користуються перевагою в цих середовищах. Наприклад, тилапія та морський окунь виявляють сильну стійкість до коливань солоності, що робить їх ідеальними кандидатами для аквакультури в змінних середовищах (Tine та ін., 2014; Рахман та ін., 2021).

Технологічні втручання, такі як селективні програми розведення, сприяли розвитку штамів з підвищеною толерантністю до солі. Дослідження тілапії показали потенціал для розведення солестійких варіантів, здатних процвітати в середовищах, уражених засоленням (Yue та ін., 2024). Крім того, закриті системи, такі як Рециркуляційні системи аквакультури (RAS), пропонують контрольоване середовище, де рівень солоності можна регулювати відповідно до вимог виду, зменшуючи стрес і підвищуючи швидкість росту. Інновації в технологіях фільтрації та опріснення води також дозволяють операторам ефективно пом'якшувати вплив коливань солоності (Martins et al., 2010).

Приклади адаптивної практики аквакультури включають операції в Бангладеш, які перейшли на види, стійкі до солі, у відповідь на підвищення солоності узбережжя. Ці методи звели до мінімуму економічні втрати та зміцнили продовольчу безпеку в уразливих регіонах (Troell та ін., 2023). Віддаючи пріоритет адаптивності, системи аквакультури можуть краще протистояти динамічним викликам, викликаним глобальним потеплінням, забезпечуючи стаке виробництво та стійкість.

### 3.6 Економічна життєздатність і масштабованість

Економічна життєздатність і масштабованість передових систем аквакультури є життєво важливими для забезпечення широкого впровадження. Хоча такі системи, як RAS і IMTA, пропонують довгострокові переваги, їх висока початкова вартість може відлякувати малих і середніх операторів. Механізми розподілу витрат, такі як державно-приватне партнерство та державні субсидії, можуть усунути фінансові перешкоди. Крім





того, економія на масштабах, досягнута за допомогою більш масштабних операцій або кооперативних моделей, може знизити витрати на одиницю продукції. Дослідження показують, що масштабування систем ІМТА у Канаді підвищило ефективність виробництва на 25%, одночасно значно покращивши екологічні результати (Baltadakis, 2021). Інновації в модульних системах аквакультури, які дозволяють поступове розширення, забезпечують гнучкі та економічно ефективні рішення для нових учасників галузі.

#### **4. Інноваційні системи вирішення кліматичних проблем**

Інноваційні системи аквакультури, такі як офшорна аквакультура, RAS і ІМТА, представляють життєздатні рішення для боротьби з викликами, спричиненими кліматом. Офшорна аквакультура знижує ризики евтрофікації та гіпоксії, працюючи в стабільних глибоководних середовищах, тоді як RAS забезпечує точний контроль навколишнього середовища, мінімізуючи зовнішні впливи. ІМТА підвищує екологічну стійкість шляхом інтеграції додаткових видів, покращення переробки поживних речовин і якості води (Holmer, 2010; Pereira et al., 2024). Ці технології демонструють потенціал сталої практики аквакультури, яка відповідає екологічним та економічним цілям.

##### **4.1 Офшорна аквакультура**

Офшорна аквакультура стала багатообіцяючим рішенням для вирішення кліматичних проблем у прибережних і прибережних системах. Працюючи в більш глибоких водах, ці системи отримують переваги від стабільних температурних профілів, вищих рівнів кисню та зниженого накопичення поживних речовин, пом'якшуючи ризики, пов'язані з евтрофікацією та гіпоксією (Holmer, 2010). Офшорні садки, такі як ті, що використовуються для доради (*Sparus aurata*) і європейського морського окуня (*Dicentrarchus labrax*) у Середземному морі, демонструють потенціал цих систем для розширення виробництва аквакультури при мінімізації впливу на навколишнє середовище (Nielsen et al., 2021). Однак офшорні системи вимагають значних інвестицій у надійну інфраструктуру, щоб витримувати сильні течії та вплив хвиль, а також передові технології моніторингу для забезпечення ефективності роботи.

##### **4.2 Рециркуляційні системи аквакультури (RAS)**

RAS мінімізує використання води та забезпечує точний контроль навколишнього середовища, зменшуючи вплив зовнішніх кліматичних коливань (Martins et al., 2010). Рециркуляційні системи аквакультури (RAS) представляють собою передовий підхід до вирішення екологічних і ресурсних обмежень. Ці закриті системи переробляють воду в контрольованому середовищі, значно скорочуючи використання води та обмежуючи вплив зовнішніх коливань навколишнього середовища (Badiola та ін., 2012). RAS



дозволяє точно контролювати температуру, рівень кисню та управління відходами, що робить їх придатними для видів, чутливих до змін навколишнього середовища. Наприклад, вирощування лосося в Норвегії все більше покладається на RAS для пом'якшення наслідків потепління прибережних вод. Однак високі потреби в енергії та експлуатаційні витрати RAS вимагають продовження інновацій для підвищення енергоефективності та економічної життєздатності (Martins et al., 2010).

#### 4.3 Комплексна мультитрофічна аквакультура (ІМТА)

ІМТА підвищує екологічну стійкість шляхом інтеграції видів із додатковими функціями, таких як риба, молюски та морські водорості (Перейра та ін., 2024). Інтегрована мультитрофічна аквакультура (ІМТА) — це інноваційна система, яка об'єднує кілька видів з різних трофічних рівнів в одній сільськогосподарській операції. Ця система використовує природні екологічні зв'язки між видами, щоб покращити кругообіг поживних речовин і зменшити вплив на навколишнє середовище. Наприклад, морські водорості та двостулкові молюски можуть поглинати надлишок поживних речовин, що утворюються в результаті вирощування риби, пом'якшуючи евтрофікацію та покращуючи якість води (Перейра та ін., 2024). У Канаді системи ІМТА, що включають атлантичного лосося (*Salmo salar*), мідії (*Mytilus edulis*) і ламінарію (*Saccharina latissima*), продемонстрували екологічні та економічні переваги, включаючи збільшення виробництва біомаси та зменшення вмісту поживних речовин у навколишніх водах (Troell та ін., 2003).

#### 4.4 Аквакультура морських водоростей

Вирощування морських водоростей отримує визнання як стійка до клімату система аквакультури зі значними екологічними перевагами. Морські водорості поглинають вуглекислий газ і поживні речовини з води, протистоячи закисленню океану та евтрофікації. Крім того, вирощування морських водоростей було запропоновано як стратегію поглинання вуглецю для пом'якшення впливу зміни клімату (Froehlich та ін., 2019). В Азії великі ферми з виробництва морських водоростей роблять значний внесок у місцеву економіку, одночасно покращуючи стан морської екосистеми. Нові технології, такі як морські платформи для вирощування морських водоростей, ще більше розширюють потенціал сталого виробництва морських водоростей у регіонах з обмеженим прибережним простором (Visch та ін., 2023).

#### 4.5 Розумні технології аквакультури

Інтеграція цифрових технологій, таких як штучний інтелект (AI), Інтернет речей (IoT) і дистанційне зондування, зробила революцію в аквакультурі. Розумні системи дозволяють у режимі реального часу відстежувати параметри навколишнього середовища, такі як температура, солоність і розчинений кисень, що дозволяє фермерам





Funded by  
the European Union



## The Digital Blue Carrier for a Post-Carbon Future - Curriculum Innovations in Aquaculture [DiBluCa]”

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

завчасно реагувати на зміни умов (Føre et al., 2018). Наприклад, автоматизовані системи годування та діагностика здоров'я на основі штучного інтелекту підвищують ефективність роботи, одночасно зменшуючи відходи. Ці інновації підтримують стійкість і масштабованість систем аквакультури під тиском зміни клімату.

### 5. Політика та економічні міркування

Запровадження стійких до зміни клімату систем аквакультури вимагає комплексної політичної підтримки та економічних рамок. Регуляторні стимули, такі як субсидії та гранти, можуть компенсувати високі початкові витрати, тоді як міжнародне співробітництво та ринковий попит на екологічно чисті продукти стимулюють трансформацію галузі. Схеми сертифікації та екомаркування забезпечують економічні стимули для екологічно відповідальної практики. Крім того, механізми страхування, адаптовані до кліматичних ризиків, забезпечують безперервність роботи для вразливих зацікавлених сторін (ФАО, 2020; Буш та ін., 2013). Ці міркування є важливими для узгодження практики аквакультури з глобальними цілями сталого розвитку.

#### 5.1 Регуляторна підтримка

Уряди відіграють ключову роль у сприянні стійким до клімату системам аквакультури. Політика повинна визначати пріоритетність стимулів для впровадження стійких технологій, таких як рециркуляційні системи аквакультури (RAS) та інтегрована мультитрофічна аквакультура (IMTA). Наприклад, Загальна рибальська політика (CFP) Європейського Союзу сприяє розвитку сталої аквакультури шляхом інтеграції стратегій адаптації до клімату (FAO, 2020). Субсидії, податкові пільги та гранти можуть додатково стимулювати інвестиції в інноваційні системи. Крім того, нормативно-правова база повинна вирішувати такі питання, як ефективність використання води, управління відходами та контроль хвороб, щоб узгодити практику аквакультури з цілями екологічної стійкості (OECD, 2021).

#### 5.2 Економічна доцільність

Високі початкові витрати на передові системи, такі як RAS і IMTA, повинні бути компенсовані довгостроковими вигодами, включаючи зменшення втрат від кліматичних впливів (Tett et al., 2011). Перехід до передових систем аквакультури часто тягне за собою високі початкові витрати, які можуть перешкоджати широкому застосуванню, особливо в регіонах з низьким і середнім рівнем доходу. Аналіз витрат і вигод має важливе значення для демонстрації довгострокових економічних переваг систем, стійких до зміни клімату, включаючи зменшення втрат від екологічних збоїв і збоїв. Наприклад, RAS зменшує залежність від зовнішніх джерел води та мінімізує екологічні ризики, що призводить до зниження операційних витрат з часом (Badiola та ін., 2012). Державно-приватне партнерство та програми фінансової допомоги можуть



Funded by  
the European Union



## The Digital Blue Carrier for a Post-Carbon Future - Curriculum Innovations in Aquaculture [DiBluCa]”

2023-1-LT01-KA220-HED-000154247

подолати дефіцит фінансування, забезпечуючи ширший доступ до цих технологій (Світовий банк, 2013).

### 5.3 Міжнародна співпраця

Вплив зміни клімату виходить за межі національних кордонів, що вимагає міжнародної співпраці. Спільні дослідницькі ініціативи, такі як ініціативи Horizon Europe, зосереджені на розробці стійких до зміни клімату технологій аквакультури та обміні передовим досвідом серед зацікавлених сторін (Європейська служба зовнішніх дій (2021). Крім того, міжнародні організації, як-от Продовольча та сільськогосподарська організація (FAO), надають технічну підтримку та політичні рекомендації для посилення глобальної стійкості аквакультури (FAO, 2024). Регіональні альянси, такі як Азіатсько-Тихоокеанське рибальство Комісія (APFIC), також сприяють передачі знань і об'єднанню ресурсів, що дозволяє країнам приймати індивідуальні рішення для своїх унікальних проблем (APFIC, 2019).

### 5.4 Динаміка ринку та обізнаність споживачів

Ринкові сили відіграють вирішальну роль у запровадженні сталої практики аквакультури. Зростаючий споживчий попит на екологічно чисті морепродукти створив економічні стимули для виробників запроваджувати стійкі системи. Схеми сертифікації, такі як запропоновані Наглядовою радою з аквакультури (ASC), забезпечують ринкові переваги шляхом підвищення конкурентоспроможності та прозорості для споживачів, сприяючи переходу всієї галузі до сталого розвитку (Bush et al., 2013). Ці сертифікати в поєднанні з освітніми кампаніями, що висвітлюють екологічні переваги практик адаптації до клімату, таких як рециркуляційні системи аквакультури (RAS) та інтегрована мультитрофічна аквакультура (IMTA), суттєво впливають на купівельну поведінку, заохочуючи зрушення ринку в бік екологічно чистих морепродуктів (Potts та ін., 2021). Крім того, цифрові технології, включно з блокчейном, трансформують ланцюжок постачання морепродуктів, забезпечуючи відстеження, зміцнюючи довіру та забезпечуючи підзвітність споживачів і виробників (Probst, 2020). Завдяки інтеграції схем сертифікації, освітніх заходів і технологічних досягнень галузь аквакультури поступово узгоджується з цілями сталого розвитку, забезпечуючи як екологічні, так і економічні вигоди.

### 5.5 Зменшення ризиків і механізми страхування

Оскільки ризики, пов'язані з кліматом, такі як екстремальні погодні явища та спалахи хвороб, зростають частотою та інтенсивністю, надійні стратегії пом'якшення ризиків і спеціальні механізми страхування є критично важливими для захисту діяльності аквакультури. Страхові продукти, спеціально розроблені для аквакультури, такі як страхування врожаю видів аквакультури або параметричне страхування пошкоджень,



пов'язаних із погодними умовами, можуть запропонувати операторам фінансову безпеку. Співпраця між урядами, фінансовими установами та страховими компаніями необхідна для розробки недорогих і доступних схем страхування. Наприклад, програми параметричного страхування на Філіппінах успішно надали виплати рибоводам, які постраждали від тайфунів, забезпечивши швидке відновлення та безперервність діяльності (Van Anrooy et al., 2022). Інструменти оцінки ризиків, такі як кліматичне моделювання та системи раннього попередження, ще більше підвищують стійкість, допомагаючи операторам передбачати та пом'якшувати потенційні збої (Allison et al., 2009).

## 6. Висновок

Вплив глобального потепління на аквакультуру підкреслює необхідність стратегічного вибору системи та стійких практик для забезпечення довгострокової стійкості та продуктивності галузі. Оскільки кліматичні виклики, такі як підвищення температури, закислення океану та поширення хвороб, продовжують посилюватися, впровадження інноваційних та адаптивних систем аквакультури стає обов'язковим. У цій главі висвітлено критичні підходи, включаючи рециркуляційні системи аквакультури (RAS), інтегровану багатотрофічну аквакультуру (IMTA) і морську аквакультуру, як життєздатні рішення для пом'якшення цих проблем.

Системи рециркуляційної аквакультури (RAS) забезпечують точний контроль навколишнього середовища, дозволяючи діяльності протистояти зовнішнім кліматичним коливанням, одночасно зменшуючи залежність від зовнішніх джерел води. Комплексна мультитрофічна аквакультура (IMTA) сприяє переробці поживних речовин і стабільності екосистеми, пропонуючи цілісний підхід до сталого розвитку. Офшорна аквакультура, яка працює в більш глибоких і стабільних водах, мінімізує вплив евтрофікації та гіпоксії прибережної зони, забезпечуючи ефективну альтернативу для розширення виробництва.

Перехід до цих систем потребує комплексної політики та фінансових стимулів для подолання бар'єрів, пов'язаних із високими початковими витратами. Уряди, приватні зацікавлені сторони та міжнародні організації повинні співпрацювати через такі механізми, як міжнародні угоди, програми фінансування та платформи для обміну знаннями. Конкретні заходи, включаючи субсидії, податкові пільги та гранти, будуть мати важливе значення для заохочення інвестицій у стійкі до клімату технології, особливо для дрібних фермерів, які найбільш вразливі до кліматичних потрясінь.

Обізнаність споживачів і ринковий попит на екологічно чисті морепродукти створюють додаткові можливості для трансформації галузі. Схеми сертифікації та екомаркування можуть стимулювати виробників застосовувати стійкі до клімату практики, зміцнюючи довіру та прозорість серед споживачів. Освітні кампанії та глобальне масштабування цих ініціатив можуть ще більше посилити їхній вплив, особливо в регіонах з високим потенціалом



аквакультури. Використання таких технологій, як блокчейн, для відстеження ланцюга поставок також відіграватиме важливу роль у зміцненні довіри споживачів.

Заглядаючи вперед, інвестиції в дослідження та розробки є критично важливими для інновацій та вдосконалення систем аквакультури. Пріоритетні сфери включають підвищення енергоефективності в RAS, розробку недорогих систем ІМТА та вдосконалення стратегій контролю патогенів. Довгостроковий моніторинг навколишнього середовища та проактивні стратегії управління забезпечать адаптивність до мінливих кліматичних реалій.

Інтегруючи технологічні досягнення та екологічні принципи, сектор аквакультури може підвищити стійкість і сталість. Політики, дослідники та зацікавлені сторони галузі повинні діяти рішуче, щоб запровадити системи, які забезпечать довгострокову життєздатність галузі в умовах зміни клімату. Завдяки спільним зусиллям аквакультура може продовжувати процвітати, сприяючи глобальній продовольчій безпеці та економічному розвитку в епоху зміни клімату.

## 7. Література

- Abolofia, J., Asche, F., & Wilen, J. E. (2017). The cost of lice: quantifying the impacts of parasitic sea lice on farmed salmon. *Marine Resource Economics*, 32(3), 329-349.
- Allison, E. H., Perry, A. L., Badjeck, M. C., Neil Adger, W., Brown, K., Conway, D., ... & Dulvy, N. K. (2009). Vulnerability of national economies to the impacts of climate change on fisheries. *Fish and fisheries*, 10(2), 173-196.
- Aly, S. M., & Fathi, M. (2024). Advancing aquaculture biosecurity: a scientometric analysis and future outlook for disease prevention and environmental sustainability. *Aquaculture International*, 32(7), 8763-8789.
- Asia-Pacific Fishery Commission. (2014). Regional Overview of Aquaculture Trends in the Asia-Pacific Region. Food and Agriculture Organization of the United Nations regional office for Asia and the Pacific, Bangkok,ailand.
- Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2012). Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering*, 51, 26-35.
- Baltadakis, A. (2021). Investigating Integrated Multi-Trophic Aquaculture at different spatial sales.
- Bank, W. (2013). Fish to 2030 Prospects for Fisheries and Aquaculture World Bank Report Number 83177-GLB. Washington, DC.
- Bondad-Reantaso, M. G., et al. (2005). Disease and health management in Asian aquaculture. *Veterinary Parasitology*, 132(3-4), 249-272.
- Boyd, C. E., & McNevin, A. A. (2015). Aquaculture, resource use, and the environment. *John Wiley & Sons*.
- Boyd, C. E., D'Abramo, L. R., Glencross, B. D., Huyben, D. C., Juarez, L. M., Lockwood, G. S., ... & Valenti, W. C. (2020). Achieving sustainable aquaculture: Historical and current

- perspectives and future needs and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(3), 578-633.
- Bush, S. R., Belton, B., Hall, D., Vandergeest, P., Murray, F. J., Ponte, S., ... & Kusumawati, R. (2013). Certify sustainable aquaculture?. *Science*, 341(6150), 1067-1068.
- Cooley, S. R., et al. (2009). Ocean acidification's potential to alter global seafood supply. *Oceanography*, 22(4), 172-181.
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891), 926-929.
- European External Action Service (2021). Horizon Europe strategic plan 2021–2024. European Union. [https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/horizon\\_europe\\_strategic\\_plan\\_2021-2024.pdf](https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/horizon_europe_strategic_plan_2021-2024.pdf)
- FAO. 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- FAO. 2024. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Blue Transformation in action. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J. A., Dempster, T., ... & Berckmans, D. (2018). Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *biosystems engineering*, 173, 176-193.
- Froehlich, H. E., Gentry, R. R., & Halpern, B. S. (2018). Global change in marine aquaculture production potential under climate change. *Nature ecology & evolution*, 2(11), 1745-1750.
- Froehlich, H. E., Afflerbach, J. C., Frazier, M., & Halpern, B. S. (2019). Blue growth potential to mitigate climate change through seaweed offsetting. *Current Biology*, 29(18), 3087-3093.
- Handisyde, N. T., Ross, L. G., Badjeck, M. C., & Allison, E. H. (2006). The effects of climate change on world aquaculture: a global perspective. Aquaculture and Fish Genetics Research Programme, Stirling Institute of Aquaculture. Final Technical Report, DFID, Stirling. 151pp.
- Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: Perspectives, concerns, and research needs. *Aquaculture Environment Interactions*, 1(1), 57-70.
- Manolache, A. I., & Andrei, G. (2024). A Comprehensive Review of Multi-Use Platforms for Renewable Energy and Aquaculture Integration. *Energies*, 17(19), 4816.
- Martins, C. I., et al. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 83-93.
- Munday, P. L., Dixon, D. L., Donelson, J. M., Jones, G. P., Pratchett, M. S., Devitsina, G. V., & Døving, K. B. (2009). Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), 1848-1852.
- Nielsen, R., Ankamah-Yeboah, I., & Llorente, I. (2021). Technical efficiency and environmental impact of seabream and seabass farms. *Aquaculture Economics & Management*, 25(1), 106-125.

- OECD (2021), Strengthening Climate Resilience: Guidance for Governments and Development Co-operation, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/4b08b7be-en>.
- Pereira, R., Yarish, C., & Critchley, A. T. (2024). Seaweed aquaculture for human foods in land based and IMTA systems. In *Applications of Seaweeds in Food and Nutrition* (pp. 77-99). Elsevier.
- Potts, J., Wilkings, A., Lynch, M., & McFatridge, S. (2021). State of Sustainability Initiatives Review: Standards and the Blue Economy. International Institute for Sustainable Development.
- Pounds, J. A., et al. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 439(7073), 161-167.
- Probst, W. N. (2020). How emerging data technologies can increase trust and transparency in fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, 77(4), 1286-1294.
- Rahman, M. L., Shahjahan, M., & Ahmed, N. (2021). Tilapia farming in Bangladesh: Adaptation to climate change. *Sustainability*, 13(14), 7657.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. *FAO Fisheries and aquaculture technical paper*, (589), I.
- Tett, P., et al. (2011). Defining and detecting undesirable disturbance in the context of marine eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*, 62(2), 1147-1155.
- Tine, M., Kuhl, H., Gagnaire, P. A., Louro, B., Desmarais, E., Martins, R. S., ... & Reinhardt, R. (2014). European sea bass genome and its variation provide insights into adaptation to euryhalinity and speciation. *Nature communications*, 5(1), 5770.
- Troell, M., et al. (2003). Integrated mariculture: Asking the right questions. *Aquaculture*, 226(1-4), 69-90.
- Yue, G. H., Ma, K. Y., & Xia, J. H. (2024). Status of conventional and molecular breeding of salinity-tolerant tilapia. *Reviews in Aquaculture*, 16(1), 271-286.
- Van Anrooy, R., Espinoza Córdova, F., Japp, D., Valderrama, D., Gopal Karmakar, K., Lengyel, P., ... & Zhang, Z. (2022). World review of capture fisheries and aquaculture insurance 2022 (Vol. 682). Food & Agriculture Org..
- Visch, W., Layton, C., Hurd, C. L., Macleod, C., & Wright, J. T. (2023). A strategic review and research roadmap for offshore seaweed aquaculture—A case study from southern Australia. *Reviews in Aquaculture*, 15(4), 1467-1479.