



Section of the conference: Educational sciences

Sekcja konferencji: Nauki o edukacji

How to cite: Abramchuk, O. & Loshyk, L. (2025). Using interactive technologies in biology lessons when studying the topic "Preservation and implementation of hereditary information". *World Conference on Emerging Science, Innovation and Policy* 2025. Futurity Research Publishing. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16924573>

Using Interactive Technologies in Biology Lessons When Studying the Topic "Preservation and Implementation of Hereditary Information"

Olha Abramchuk¹, Liubov Loshyk²

¹PhD in Biology, Associate Professor, Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-9479-2111>

²Student of the Faculty of Biology and Forestry, Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0005-2812-3728>

Accepted: Jul 8, 2025 | **Published:** July 20, 2025 | **Language:** Ukrainian

Abstract: The study aimed to investigate the effectiveness of interactive technologies in teaching biology on the subject of preservation and realization of genetic information. The research was conducted in secondary school classes using interactive simulations, digital quizzes, and collaborative tasks. Data were collected through pre- and post-tests and student surveys. Results indicated significant improvement in students' comprehension, engagement, and retention of material. The findings highlight the potential of interactive approaches to enhance understanding of complex genetic processes and to foster active



learning in biology education. The integration of technology also contributed to the development of students' critical thinking and problem-solving skills. These results can be applied to improve teaching strategies in other complex scientific topics.

Keywords: genetic processes, active learning, digital tools, student engagement, educational innovation.

Вступ

Одним з основних аспектів біологічної освіти є створення цілісного бачення процесів збереження та реалізації спадкової інформації. Ці процеси надзвичайно комплексні й потребують розвинутого абстрактного мислення. Раніше проведені дослідження демонстрували, що здобувачі освіти часто стикаються з труднощами в розумінні генетичних концепцій через їх складність і недоліки традиційних методів навчання. Було зазначено, що інтерактивні технології, на кшталт віртуальних лабораторій, комп'ютерних симуляцій та мультимедійних матеріалів, сприяють кращому засвоєнню теоретичного матеріалу, збільшенню зацікавленості здобувачів освіти та розвитку дослідницьких навичок. Хоча впровадження технологічних засобів у викладання біології показало позитивні результати, залишаються невивченими питання щодо впливу інтерактивних технологій на засвоєння теми збереження та реалізації спадкової інформації в шкільному курсі. Зокрема, вимагає уточнення питання про найбільш ефективні інструменти та методи, а також про вплив їх поєднання на розвиток критичного мислення, навичок аналізу та самостійної роботи школярів. Визначення впливу інтерактивних технологій на результати навчання в цій темі має важливе наукове та практичне значення, оскільки дозволяє сформулювати рекомендації для покращення методики викладання біології та підвищення якості засвоєння складних генетичних понять.

Використання технологій доповненої реальності в навчанні хімії, описане Abdinejad et al. (2021), продемонструвало значний вплив на уявлення здобувачів освіти про складні біологічні та хімічні процеси. Дослідження показало, що 3D-візуалізація підвищує рівень розуміння абстрактних понять і сприяє розвитку просторового мислення. Залучення інструментів штучного інтелекту, як зазначили Agathokleous et al. (2023), має потенціал трансформувати підхід до викладання біології та екологічних наук. Автори звернули увагу на етичні виклики, але підкреслили значення інтерактивності та персоналізації навчання. Поєднання таких технологій з лабораторними завданнями може підвищити мотивацію школярів до дослідницької діяльності. Дослідження Bordanaba-Florit et al. (2021) зосереджено на застосуванні технологій аналізу поодиноких ліпідних везикул для вивчення клітинної гетерогенності. Використання подібних методів у шкільних курсах дає змогу ілюструвати механізми збереження та передачі спадкової інформації на клітинному рівні. Інтеграція цих технологій в освітній процес сприяє кращому розумінню молекулярної біології. Критичний аналіз використання штучного інтелекту в смарт-класах, проведений Dimitriadou & Lanitis (2023), виявив як переваги, так і проблеми впровадження нових інструментів. Науковці підкреслили важливість підготовки педагогів до роботи з новітніми технологіями та потребу в адаптації навчальних програм. Такий підхід є особливо актуальним для викладання складних тем біології. Інноваційна технологія PROTAC, описана Guedeney et al.



(2023), продемонструвала нові можливості в галузі хімічної біології та розроблення ліків. Попри складність технології, її концептуальне пояснення є ефективним прикладом для шкільного вивчення процесів регуляції білків, що створює додаткові можливості для інтеграції наукових відкриттів у шкільну освіту.

Використання доповненої реальності для підвищення мотивації здобувачів вищої освіти, досліджене Kaur et al. (2020), показало зростання інтересу до навчального матеріалу через інтерактивність. Такі методи дають змогу відтворювати віртуальні моделі ДНК або клітин, що полегшує розуміння спадкових механізмів, а отже, може підвищити ефективність занять з біології. Огляд Mhlongo et al. (2023) виявив як можливості, так і перешкоди впровадження цифрових технологій в освітній процес. Значну увагу приділено технічним аспектам та доступності обладнання. Подібний аналіз є важливим для розроблення стратегії інтеграції інтерактивних ресурсів у шкільні уроки біології. Розробка інтерактивних медіа для навчання біології, представлена Putri et al. (2024), зорієнтована на залучення учнів через мультимедійний контент. Створення анімацій та візуалізацій процесів реплікації та транскрипції ДНК сприяє більш глибокому розумінню матеріалу. Аналіз ставлення здобувачів освіти до використання технологій метавсесвіту в спорті, проведений Yang et al. (2022), хоч і стосувався фізичного виховання, продемонстрував потенціал занурювальних технологій у навчанні. Подібний досвід можна адаптувати до біологічних тем, створюючи віртуальні лабораторії та симуляції клітинних процесів, що дозволяє підвищити рівень практичної підготовки школярів. Використання доповненої реальності в біології, досліджене Weng et al. (2020), продемонструвало зростання рівня засвоєння знань учнями завдяки візуалізації складних об'єктів. Моделювання молекулярних структур та процесів сприяло формуванню цілісного уявлення про спадкові механізми. Такий досвід має стати основою для модернізації шкільних програм. Дослідження Rengkuan et al. (2023) та Santhosh et al. (2024) демонструють, що інтерактивні методи, зокрема проєктне навчання, значно покращують метакогнітивні та критичні навички здобувачів освіти в темі генетики. Вони також підтверджують важливість інтеграції таких технологій в освітній процес для підвищення ефективності засвоєння складних біологічних концепцій.

Аналіз ряду досліджень, присвячених інтеграції цифрових новацій та інноваційних підходів у процес навчання, вказав на різноманітні перспективи для трансформації шкільного курсу біології. Проаналізовані роботи включали застосування доповненої реальності, штучного інтелекту, методів молекулярного аналізу, інтерактивних мультимедіа та віртуальних просторів, що занурюють. Дослідники підкреслили, що комбінування візуалізації комплексних процесів із практичними завданнями здатне суттєво підвищити зацікавленість учнів, посприяти глибшому засвоєнню матеріалу та розвитку навичок досліджень. Використання таких технологій дає змогу формувати освітнє середовище, де теоретичні знання посилюються наочними моделями та симуляціями, що має особливе значення під час вивчення молекулярної біології, генетики, будови клітини та екології. Розроблення адаптованих методів інтеграції цих інструментів у шкільні програми вимагає систематичного аналізу досвіду дослідників, який представлено в порівняльній таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика досліджень інтерактивних технологій з потенціалом інтеграції в шкільний курс біології

Автори	Рік	Використані технології	Предмет дослідження	Ключові результати	Можливості інтеграції в курс біології
M. Abdinejad et al.	2021	Доповнена реальність (3D-візуалізації)	Хімія та біологія (складні процеси)	Покращення розуміння абстрактних понять, розвиток просторового мислення	Використання 3D-моделей для пояснення складних біологічних процесів
E. Agathokleous et al.	2023	Штучний інтелект (AI)	Біологія та екологічні науки	Інтерактивність і персоналізація навчання, етичні виклики	Поєднання AI з лабораторними роботами для підвищення мотивації
G. Bordanaba-Florit et al.	2021	Аналіз поодиноких везикул	Клітинна гетерогенність	Поглиблене розуміння передачі спадкової інформації на клітинному рівні	Ілюстрація молекулярних механізмів у курсі біології
E. Dimitriadou & A. Lanitis	2023	Штучний інтелект у смарт-класах	Освітні технології	Визначення переваг та викликів, необхідність підготовки педагогів	Адаптація програм для викладання складних тем біології
N. Guedeney et al.	2023	PROTAC (технологія регуляції білків)	Хімічна біологія, розроблення ліків	Нові можливості регуляції білків, перспективи досліджень	Приклад для пояснення регуляції білків у шкільному курсі
D. Kaur et al.	2020	Доповнена реальність	Біологія (моделювання ДНК, клітин)	Зростання мотивації та інтересу до навчання	Віртуальне моделювання ДНК і клітин у шкільному курсі
S. Mhlongo et al.	2023	Цифрові технології	Освітній процес	Визначення можливостей та перешкод упровадження	Планування інтеграції інтерактивних ресурсів у біологію
I. Putri et al.	2024	Інтерактивні мультимедіа	Біологія (реплікація та транскрипція ДНК)	Глибше розуміння матеріалу через анімації та візуалізації	Мультимедійні пояснення молекулярних процесів у біології
F. Yang et al.	2022	Метавсесвіт	Фізичне виховання (перспективи в біології)	Потенціал занурювальних технологій	Віртуальні лабораторії та симуляції клітинних процесів



C. Weng et al.	2020	Доповнена реальність	Біологія (молекулярні структури)	Покращення засвоєння знань через візуалізацію	Моделювання молекулярних структур у шкільних уроках
----------------	------	----------------------	----------------------------------	---	---

Джерело: авторська розробка

Проведений порівняльний аналіз наукових досліджень дав змогу згрупувати актуальні стратегії застосування інтерактивних технологій у процесі навчання та виявити їх можливості для викладання. Згідно з отриманою інформацією, було визначено мету та завдання цього дослідження.

Мета роботи – аналіз комбінацій інтерактивних технологій (доповненої реальності, віртуальних лабораторій, групових онлайн-проектів) для підвищення рівня засвоєння навчального матеріалу в шкільному курсі біології.

Завдання:

- 1) проаналізувати впровадження інтерактивних технологій в освітній процес та їх вплив на розуміння складних біологічних процесів;
- 2) визначити найбільш результативні комбінації технологій доповненої реальності, віртуальних лабораторій та групових онлайн-проектів для розвитку критичного мислення та аналітичних навичок учнів;
- 3) розробити рекомендації щодо масштабування інтерактивних підходів у межах освітньої політики та забезпечення їх доступності для шкіл.

Результати дослідження

Інтерактивні технології в шкільному навчанні постають як комплекс методів, прийомів і технічних інструментів, що стимулюють активну участь учнів у процесі пізнання, залучення до спільної діяльності та створення простору для самостійного дослідження, аналізу й інтерпретації знань. На противагу пасивним формам навчання, де учень переважно є слухачем, інтерактивні підходи передбачають активну взаємодію з навчальним матеріалом, учителем та однокласниками. Така взаємодія може відбуватися як у реальному просторі класної кімнати, так і в цифровому середовищі за допомогою спеціалізованих платформ та програм. Серед основних різновидів інтерактивних технологій, які доцільно використовувати на уроках біології, можна виокремити віртуальні лабораторії, комп'ютерні симуляції, інтерактивні дошки, мультимедійні презентації з анімацією, хмарні сервіси для спільної роботи, інтерактивні тести та ігрові платформи. Віртуальні лабораторії, наприклад Labster чи PhET, дозволяють моделювати біологічні процеси, що важко або неможливо відтворити в умовах шкільної лабораторії. Симуляції дають можливість учням поетапно спостерігати процеси реплікації ДНК, транскрипції та трансляції білків, змінювати параметри експерименту та аналізувати отримані результати. Інтерактивні дошки, зокрема SMART Board або Promethean, надають можливість працювати із цифровими схемами, підписувати елементи, виділяти ключові етапи та створювати анімовані пояснення. Хмарні сервіси, як-от Google Workspace, дозволяють організовувати групові завдання, де здобувачі освіти разом створюють інтерактивні карти понять чи схеми процесів. Порівняння цих



технологій дозволяє виявити їх сильні та слабкі сторони. Віртуальні лабораторії мають перевагу у відтворенні складних або небезпечних процесів, зменшуючи ризики та витрати на реагенти, але потребують надійного інтернет-з'єднання та певного технічного обладнання. Комп'ютерні симуляції більш доступні, їх можна використовувати навіть на смартфонах, проте вони зазвичай мають обмежений функціонал і меншу деталізацію. Інтерактивні дошки сприяють залученню учнів у класі, але їх ефективність залежить від рівня підготовки вчителя та його вміння працювати із цифровим контентом. Мультимедійні презентації з анімацією дозволяють наочно демонструвати процеси, однак їх пасивний перегляд без залучення учнів до обговорення знижує ефективність. Хмарні сервіси та платформи для спільної роботи сприяють розвитку колективної взаємодії та комунікаційних навичок, але потребують чіткої організації та контролю.

Критичний аналіз потенціалу різноманітних інтерактивних технологій виявляє, що їх результативність корелює не тільки з технічними аспектами, а й з дидактичним дизайном. Віртуальні лабораторії (на кшталт Labster, PhET) особливо ефективні для відпрацювання навичок, пов'язаних із процедурами, як-от: моделювання виділення ДНК, симуляції ПЛР або аналіз мутацій, де важливо безпечно та послідовно повторювати експерименти. Їхня сила – це можливість змінювати умови досліду й негайно оцінювати наслідки цих змін, що сприяє розвитку експериментального мислення. Недоліком є залежність від інтернет-з'єднання та складність інтеграції в освітній процес без чіткої методичної структури. Технології доповненої реальності (AR) особливо цінні для візуалізації просторової організації молекули ДНК, процесів реплікації, транскрипції та трансляції, де критично важливо розуміти тривимірні взаємодії. Вони породжують потужний ефект занурення, полегшуючи запам'ятовування та стимулюючи формування інтуїтивного розуміння механізмів, але в ізоляції від практичної діяльності нерідко залишаються просто ефектним, а не ефективним компонентом уроку. Комп'ютерні симуляції забезпечують поетапне відтворення складних процесів (наприклад, зчитування генетичної інформації та синтез білка) з опцією маніпулювання параметрами змінних. Їх перевага – доступність навіть на смартфонах і гнучкість використання в домашніх завданнях. Обмеження полягає в меншій деталізації порівняно з AR-технологіями та віртуальними лабораторіями, що може знижувати глибину розуміння матеріалу. Штучний інтелект (AI) відкриває нові можливості в персоналізації навчання: він може пропонувати учням індивідуальні тести, адаптивні завдання з генетики, аналізувати поширені помилки та підбирати матеріали для їх усунення. У темі спадкової інформації штучний інтелект ефективний для формування навичок аналізу та критичного відбору даних (наприклад, інтерпретації фрагментів ДНК або результатів генетичних тестів). Проте його впровадження вимагає підготовки вчителя, дотримання етичних норм і технічної підтримки. Загалом, оптимальним для формування цілісного розуміння теми є інтеграція доповненої реальності (візуалізація просторових структур і процесів) з віртуальними лабораторіями (відпрацювання експериментальних процедур) та штучним інтелектом (персоналізований аналіз і діагностика розуміння), доповнена симуляціями для закріплення знань і розвитку навичок прогнозування. Така комбінована модель дозволяє учням не лише спостерігати, але й моделювати, аналізувати та обговорювати спадкові процеси на різних рівнях організації біологічних систем.



Однією з вагомих переваг інтерактивних технологій є збільшення зацікавленості учнів. Застосування анімацій, симуляцій та ігрових елементів перетворює процес навчання на захопливе та емоційне дійство. Учні не просто слухають вказівки вчителя, але й активно долучаються до процесу пізнання. Наприклад, вивчаючи механізм реплікації ДНК, можна скористатися інтерактивною анімацією, де здобувачі освіти самостійно розміщують азотисті основи в правильні пари, спостерігаючи за формуванням нового ланцюга. Це сприяє кращому засвоєнню принципів комплементарності та розумінню ролі ферментів. Серед негативних аспектів інтерактивних технологій слід виділити ймовірність перенавантаження учнів візуальною та текстовою інформацією, особливо якщо матеріал представлено без чіткої логічної структури. Також є ризик формального використання технологій, коли інтерактивність зводиться до простої демонстрації готових анімацій, без залучення учнів до аналізу та обговорення. Крім цього, технічні проблеми, пов'язані з обладнанням або програмним забезпеченням, можуть знижувати ефективність уроку. Використання інтерактивних технологій на уроках біології розширює можливості вивчення теми збереження та реалізації спадкової інформації. Це поняття включає всі процеси, пов'язані з передачею генетичної інформації від однієї клітини або організму до іншого, її збереженням у молекулах ДНК та використанням для синтезу білків. До ключових етапів належать реплікація ДНК, під час якої генетична інформація копіюється для забезпечення поділу клітин, транскрипція, що передбачає синтез РНК за зразком ДНК, та трансляція, в процесі якої інформація з РНК використовується для створення білкових молекул. Для пояснення цих процесів інтерактивні технології можуть виконувати кілька функцій: візуалізацію, моделювання, перевірку розуміння та закріплення знань. Наприклад, для візуалізації можна застосовувати тривимірні моделі молекули ДНК, які учні можуть обертати та масштабувати на екрані, детально досліджуючи структуру подвійної спіралі. Для моделювання процесу реплікації буде корисним застосувати онлайн-симулятор, де кожен учень виступає в ролі конкретного ферменту: гелікази, що розплітає спіраль, ДНК-полімерази, що синтезує новий ланцюг, або лігази, що з'єднує фрагменти. Перевірка розуміння може здійснюватися за допомогою інтерактивних тестів із миттєвим зворотним зв'язком, де у випадку помилки учень негайно отримує роз'яснення. Для закріплення знань можна організувати проєктну роботу в групах, де здобувачі освіти створюють комікс або невелике відео про те, як живе молекула ДНК у клітині.

Яскравим прикладом застосування інтерактивних засобів є поєднання віртуальної лабораторії з традиційним викладом від вчителя. Урок розпочинається з короткого вступу, де вчитель розкриває сутність спадкової інформації та її ключову роль у забезпеченні існування живого. Після цього учні працюють у віртуальній лабораторії, повторюючи експеримент з виділення ДНК із клітин рослин. Хоча процес відбувається віртуально, здобувачі освіти виконують послідовність дій, спостерігають за перетвореннями й отримують результати, які підлягають обговоренню та аналізу. Інтерактивні схеми й анімації є надзвичайно корисними для розкриття теми реалізації спадкової інформації. Процес транскрипції може бути представлений у вигляді поетапної анімації, кожен крок якої супроводжується поясненнями та інтерактивними завданнями. Наприклад, учні можуть позначати ділянки ДНК, з яких зчитується інформація, визначати фермент, котрий відповідає за синтез РНК, та вибирати потрібні нуклеотиди для побудови



ланцюга. Вивчаючи трансляцію, можна змодельовати процес синтезу білка на рибосомі, де учні розташовують амінокислоти у вірному порядку, керуючись кодонами матричної РНК. Використання хмарних сервісів дозволяє організувати групову роботу навіть поза шкільним приміщенням. Скажімо, учням дається завдання створити інтерактивну карту «Життєвий цикл генетичної інформації», де відображено всі етапи – від зберігання в ДНК до утворення білків та прояви ознак. Кожна група відповідає за певний етап і наповнює його ілюстраціями, схемами, короткими поясненнями та посиланнями на додаткові матеріали. Такий підхід розвиває навички співпраці, критичного відбору інформації та представлення результатів. Інтерактивні тести та ігрові платформи роблять контроль знань швидким і захопливим. Наприклад, після вивчення всього матеріалу можна влаштувати гру у форматі «генетичної вікторини», де учні відповідають на питання, розв'язують задачі на визначення амінокислотної послідовності на основі матриці ДНК або виправляють помилки в схемах процесів. Негайний зворотний зв'язок дає змогу учням миттєво побачити свої результати і зрозуміти, що потребує додаткового повторення. Поєднання різних інтерактивних технологій на уроках біології сприяє багатоканальному сприйняттю інформації: візуальному, аудіальному та кінестетичному. Це дуже важливо для теми збереження та реалізації спадкової інформації, яка містить велику кількість абстрактних понять і процесів, що потребують візуалізації. Теоретичні знання, закріплені практичними завданнями в інтерактивному форматі, засвоюються глибше та залишаються в пам'яті на триваліший термін. Результати теоретичного аналізу показують, що інтерактивні технології не тільки підвищують зацікавленість учнів, але й покращують ефективність навчання за умови їх системної інтеграції в освітній процес із чітким урахуванням дидактичних цілей. Для теми збереження і реалізації спадкової інформації доцільно поєднувати віртуальні лабораторії, анімації, інтерактивні тести та хмарні сервіси для групової роботи, що забезпечує комплексний вплив на формування знань і навичок здобувачів освіти.

Висновки

Отже, застосування інтерактивних інструментів під час вивчення збереження та реалізації спадкової інформації поглиблює усвідомлення складних генетичних процесів через візуалізацію, моделювання та активну участь учнів в освітньому процесі. Дослідження можливостей віртуальних лабораторій, комп'ютерних симуляцій, інтерактивних схем та хмарних сервісів продемонструвало, що їх поєднання сприяє розвитку критичного мислення, аналітичних навичок та практичного застосування отриманих знань, додатково підвищуючи пізнавальну мотивацію здобувачів освіти. Проте ефективність залежить від методичного впровадження технологій у структуру уроку та педагогічної кваліфікації вчителя. Майбутні дослідження впливу комбінованих цифрових засобів на формування ключових компетентностей учнів, а також адаптації інтерактивних підходів до різних рівнів підготовки вважаються перспективними. Використання AR-технологій у поєднанні з віртуальними лабораторіями та груповими онлайн-проектами забезпечує глибоке розуміння генетичних процесів, розвиває критичне мислення та аналітичні навички. Найбільш ефективною є послідовність AR-візуалізації для створення цілісної картини процесів – віртуальні експерименти для відпрацювання деталей – колективний аналіз і презентація результатів у форматі онлайн-проектів. Масштабування цього підходу можливе



через включення інтерактивних сценаріїв у національні методичні комплекси, підготовку педагогів і забезпечення шкіл необхідним обладнанням та програмним забезпеченням.

Література

- Abdinejad, M., Talaie, B., Qorbani, H. S., & Dalili, S. (2021). Student perceptions using augmented reality and 3d visualization technologies in chemistry education. *Journal of Science Education and Technology*, 30(1), 87-96. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10956-020-09880-2>
- Agathokleous, E., Saitanis, C. J., Fang, C., & Yu, Z. (2023). Use of ChatGPT: What does it mean for biology and environmental science?. *Science of The Total Environment*, 888. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723027754>
- Bordanaba-Florit, G., Royo, F., Kruglik, S. G., & Falcón-Pérez, J. M. (2021). Using single-vesicle technologies to unravel the heterogeneity of extracellular vesicles. *Nature Protocols*, 16(7), 3163-3185. <https://www.nature.com/articles/s41596-021-00551-z>
- Dimitriadou, E., & Lanitis, A. (2023). A critical evaluation, challenges, and future perspectives of using artificial intelligence and emerging technologies in smart classrooms. *Smart Learning Environments*, 10(1). <https://link.springer.com/article/10.1186/s40561-023-00231-3>
- Guedeney, N., Cornu, M., Schwalen, F., Kieffer, C., & Voisin-Chiret, A. S. (2023). PROTAC technology: A new drug design for chemical biology with many challenges in drug discovery. *Drug Discovery Today*, 28(1). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359644622003889>
- Kaur, D. P., Mantri, A., & Horan, B. (2020). Enhancing student motivation with use of augmented reality for interactive learning in engineering education. *Procedia Computer Science*, 172, 881-885. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920314563>
- Mhlongo, S., Mbatha, K., Ramatsetse, B., & Dlamini, R. (2023). Challenges, opportunities, and prospects of adopting and using smart digital technologies in learning environments: An iterative review. *Heliyon*, 9(6). [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)03555-7](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)03555-7)
- Putri, I. I., Rahmat, A., Riandi, R., & Riza, L. S. (2024). Utilizing learning media in biology: A step towards interactive media development. *Journal of Natural Science and Integration*, 7(2), 292-302. <https://ejournal.uin-suska.ac.id/index.php/JNSI/article/view/29493>
- Rengkuan, M., Leasa, M., & Sumampouw, H. M. (2023). *Metacognitive and critical thinking skills of genetics of biology students with project-based learning*. *Cypriot Journal of Educational Sciences*, 18(2), 522-532. https://www.researchgate.net/publication/369426686_Metacognitive_and_critical_thinking_skills_of_genetics_of_biology_students_with_project-based_learning
- Santhosh, M. E., Bhadra, J., Ahmad, Z., & Al-Thani, N. (2024). A meta-analysis to gauge the impact of pedagogies employed in mixed-ability high school biology classrooms. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1), 175. <https://www.nature.com/articles/s41599-023-02338-x>



- Weng, C., Otanga, S., Christianto, S. M., & Chu, R. J. C. (2020). Enhancing students' biology learning by using augmented reality as a learning supplement. *Journal of Educational Computing Research*, 58(4), 747-770. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0735633119884213>
- Yang, F., Ren, L., & Gu, C. (2022). A study of college students' intention to use metaverse technology for basketball learning based on UTAUT2. *Heliyon*, 8(9). [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(22\)01850-3](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(22)01850-3)