Отримано 20.08.2026, прийнято 21.10.2026, опубліковано 22.12.2026 ISSN 2786-8974 (Online)

УДК 66.011:004.9
https://doi.org/10.31548/humanhealth.4.2026.37

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ СИРОГО ГЛІЦЕРОЛУ ЗАСОБАМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Михайло Михайлович Муштрук
кандидат технічних наук, доцент, докторант
https://orcid.org/0000-0002-3646-1226
Марія Михайлівна Жеплінська
кандидат технічних наук, доцент,
https://orcid.org/0000-0002-7286-3003
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
03041, Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна.

Анотація. Очищення сирого гліцеролу, отриманого під час виробництва дизельного біопалива, ускладнюється мінливістю компонентного складу сировини, наявністю органічних і неорганічних домішок та необхідністю забезпечення стабільної якості продукту за раціональних витрат ресурсів. Інформаційні технології створюють передумови для комплексного аналізу, прогнозування та оптимізації відповідних технологічних процесів.

Метою роботи є систематизація та порівняльне оцінювання методів математичного й комп'ютерного моделювання процесів очищення сирого гліцеролу, а також визначення їхніх можливостей, обмежень і перспектив інтегрованого застосування. Методологія дослідження охоплює критичний аналіз наукових публікацій, порівняння математичних моделей, узагальнення методів статистичного аналізу, планування експериментів, термодинамічного та імітаційного моделювання, машинного навчання і багатокритеріальної оптимізації.

За результатами огляду систематизовано підходи до кількісного опису процесів очищення. Встановлено, що регресійні моделі дозволяють оцінювати вплив температури, тиску, тривалості оброблення та витрати реагентів у межах досліджених діапазонів. Термодинамічне й імітаційне моделювання застосовують для розрахунку фазових рівноваг, матеріальних і теплових балансів, прогнозування складу потоків та енергетичних характеристик обладнання. Методи машинного навчання придатні для відтворення складних нелінійних залежностей, однак потребують репрезентативних даних, належної валідації та контролю за похибками. Багатокритеріальна оптимізація дозволяє узгоджувати підвищення чистоти й виходу гліцеролу зі зниженням енергоспоживання та витрат реагентів. Обґрунтовано доцільність поєднання фізико-хімічних моделей з аналізом даних для врахування коливань складу вихідної сировини. Окрему увагу приділено критеріям порівняння моделей, зокрема точності прогнозування, інтерпретованості результатів, обчислювальній складності та можливості перенесення моделей між технологічними схемами. Показано важливість узгодження експериментальних даних із результатами розрахунків, оскільки невизначеність вихідних параметрів може істотно впливати на обґрунтованість технологічних рішень і достовірність оцінювання ефективності очищення за різних виробничих умов.

Практична значущість полягає у формуванні методологічної основи вибору програмних засобів, обґрунтуванні технологічних режимів і створенні систем підтримки ухвалення рішень. Розглянуті підходи можуть сприяти одержанню гліцеролу з нормованими показниками якості, зокрема для потенційного використання в харчових технологіях після підтвердження відповідності вимогам безпечності.

Ключові слова: машинне навчання; регресійний аналіз; термодинамічна рівновага; багатокритеріальний аналіз; енергоефективність; цифрові двійники; підтримка ухвалення рішень.

 Creative Commons Attribution 4.0 International Public License

UDC 66.011:004.9
https://doi.org/10.31548/humanhealth.4.2026.37

MODELING AND OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR THE PURIFICATION OF RAW GLYCEROL USING INFORMATION TECHNOLOGY

Mikhailo Mushtruk
PhD in Technical Sciences, Associate Professor, doctoral candidate
https://orcid.org/0000-0002-3646-1226
Marija Zheplinska
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
https://orcid.org/ 0000-0002-7286-3003
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
03041, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, Ukraine.

Abstract. The purification of raw glycerol extracted during diesel fuel production is complicated by the abundance of raw materials, the presence of organic and inorganic compounds, and the need to maintain stable viscosity. Product for rational expenditure of resources. Information technologies generate new approaches to complex analysis, forecasting, and optimization of various technological processes.

The method of work is the systematization and equal evaluation of methods of mathematical and computer modeling of processes for the purification of raw glycerol, the evaluation of their capabilities, limitations, and prospects for integrated stagnation. Research methodology supports critical analysis of scientific publications, updating of mathematical models, refinement of statistical analysis methods, experimental design, thermodynamic and simulation modeling, machine learning, and optimization of criteria. I will review the results systematically and provide a comprehensive description of the purification processes. It has been established that regression models enable evaluation of temperature rise, pressure, and reagent waste within the following ranges. Thermodynamic and simulation modeling are used to develop phase, material, and heat balances, and to forecast flow storage and the process's energy characteristics. Machine learning methods are suitable for creating foldable, non-linear deposits but will require representative data, reliable validation, and theft control. Multi-criteria optimization enables improved purity and yield of glycerol, as well as reduced energy and reagent consumption. The completeness of matching physico-chemical models with data analysis for storage of the output syrup has been demonstrated. Particular attention is given to the criteria of model equalization, forecasting accuracy, interpretation of results, computational complexity, and the possibility of transferring models between technological schemes. The importance of using experimental data from development results has been shown, since the insignificance of the output parameters can seriously affect the validity of technological solutions and the reliability of evaluating the effectiveness of purification for various vibrator minds.

The practical significance lies in the formulated methodological basis for selecting software features, implementing technological modes, and creating decision support systems. The considered approaches can combine the presence of glycerol with standardized viscosity indicators for potential valorization in grub technologies, after confirming the type of viscosity.

Key words: machine learning; regression analysis; thermodynamic balance; rich criteria analysis; energy efficiency; digital twins; encouragement to praise decision.

ВСТУП. Виробництво дизельного біопалива методом переестерифікації рослинних олій і тваринних жирів супроводжується утворенням сирого гліцеролу, який є перспективною вторинною сировиною для отримання продуктів із підвищеною доданою вартістю (Mushtruk *et al*., 2024). Залежно від особливостей технологічного процесу та властивостей вихідних компонентів, утворена гліцеринова фаза може містити залишкові спирти, воду, мила, солі,

каталізатори, вільні жирні кислоти та інші органічні й неорганічні домішки. Мінливість компонентного складу ускладнює вибір раціональних способів очищення, забезпечення стабільних показників якості кінцевого продукту та прогнозування матеріальних і енергетичних витрат (Mushtruk *et al*., 2025).

Технологічні процеси очищення сирого гліцеролу передбачають застосування кислотної нейтралізації, адсорбції, іонного обміну, мембранного розділення, випаровування та вакуумної дистиляції (Ahmad *et al*., 2019; Miyuranga *et al.*, 2022). Ефективність кожного методу визначається фізико-хімічними характеристиками сировини, механізмами видалення домішок і сукупністю технологічних параметрів. Зокрема, підвищення температури або зниження тиску може сприяти інтенсифікації окремих процесів розділення, проте водночас змінюватиме енергоспоживання, втрати цільового компонента та експлуатаційні характеристики обладнання (Dhabhai *et al*., 2023; Harris *et al*., 2023). За використання комбінованих технологічних схем кількість взаємопов'язаних параметрів зростає, що ускладнює експериментальний пошук оптимальних режимів.

Сучасний розвиток інформаційних технологій створює передумови для переходу від переважно емпіричного вибору технологічних параметрів до науково обґрунтованого керування процесами очищення на основі математичних моделей. Застосування методів статистичного аналізу, планування експериментів, термодинамічного та імітаційного моделювання дає змогу кількісно оцінювати вплив технологічних чинників, досліджувати закономірності розділення компонентів, прогнозувати характеристики технологічних потоків і визначати умови раціонального використання ресурсів. Водночас розвиток методів машинного навчання розширює можливості аналізу нелінійних залежностей між складом сировини, режимами очищення та якісними характеристиками отриманого продукту.

Важливий внесок у систематизацію технологій очищення сирого гліцеролу зробили Awogbemi & Desai (2025), які проаналізували сучасні методи видалення домішок і перспективи вдосконалення технологічних схем. Їхня робота формує технологічне підґрунтя для порівняння методів очищення, однак не розв'язує повною мірою питання комплексного вибору математичних моделей та інформаційних інструментів для оптимізації різних технологічних стадій.

У дослідженні, опублікованому в журналі *Separation and Purification Technology* (2024), продемонстровано можливості комп'ютерного моделювання технологічної схеми очищення сирого гліцеролу (Lopes Ferrari *et al.*, 2024). Використання програмного середовища Aspen Plus дозволило виконати розрахунки матеріальних і теплових потоків, оцінити вплив технологічних параметрів та обґрунтувати умови підвищення ефективності очищення. Результати цієї роботи підтверджують доцільність використання імітаційних моделей під час проєктування технологічних процесів. Водночас їхнє практичне застосування залежить від достовірності вихідних фізико-хімічних характеристик і коректності вибору термодинамічних моделей.

Подальший розвиток інформаційного забезпечення технологічних процесів пов'язаний із застосуванням алгоритмів машинного навчання. Jitchaiyapoom *et al.* (2024) запропонували підхід до прогнозування та оптимізації процесу очищення гліцерину з використанням імітаційного моделювання та методів навчання на обмежених наборах даних. Дослідження засвідчило можливості поєднання математичних моделей із методами інтелектуального аналізу даних для прогнозування технологічних характеристик. Разом із тим, ефективність таких підходів визначається репрезентативністю навчальних вибірок, якістю вхідних даних і можливістю перевірки точності прогнозування за умов зміни складу сировини.

Незважаючи на розвиток комп'ютерного моделювання та інтелектуальних методів аналізу даних, наявні дослідження переважно зосереджені на окремих методах очищення, конкретних технологічних схемах або визначених наборах параметрів. Це ускладнює безпосереднє порівняння математичних моделей за точністю, обчислювальною складністю, потребою в експериментальних даних і можливістю їх застосування для багатокритеріальної

оптимізації. Додатковою проблемою є недостатня універсальність моделей за умов мінливого компонентного складу сирого гліцеролу та обмеженість експериментальної перевірки результатів комп'ютерного прогнозування (Berkati *et al*., 2026).

Особливого значення зазначені питання набувають під час розгляду можливостей виробництва очищеного гліцерину для потенційного застосування в харчовій промисловості. У цьому випадку оптимізація процесу повинна враховувати не лише вихід цільового продукту й енергетичну ефективність, а й залишковий вміст домішок, відтворюваність характеристик очищеного продукту та необхідність підтвердження його відповідності встановленим вимогам якості й безпеки. Отже, використання інформаційних технологій доцільно розглядати як інструмент комплексного аналізу технологічних режимів, прогнозування показників якості та підтримки ухвалення рішень.

Таким чином, актуальним науковим завданням є систематизація та критичне порівняння сучасних методів математичного моделювання, комп'ютерного прогнозування й оптимізації процесів очищення сирого гліцеролу з урахуванням їхньої технологічної придатності, а також обмежень і можливостей комплексного застосування.

Мета роботи – аналіз і систематизація сучасних методів моделювання та оптимізації технологічних процесів очищення сирого гліцеролу засобами інформаційних технологій, визначення їхніх переваг, обмежень і критеріїв вибору, а також обґрунтування перспектив їх комплексного застосування для підвищення технологічної ефективності та забезпечення прогнозованих показників якості очищеного продукту.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. Сучасні дослідження технологічних процесів очищення сирого гліцеролу характеризуються поступовим переходом від експериментального підбору режимів оброблення до застосування математичного моделювання, комп'ютерного прогнозування та багатокритеріальної оптимізації. Основними напрямами наукових пошуків є вдосконалення технологій видалення домішок, моделювання процесів розділення, зменшення енергетичних витрат і забезпечення прогнозованих показників якості очищеного продукту.

Oliveira *et al*. (2022) дослідили можливості комп'ютерного моделювання технологічної схеми очищення сирого гліцеролу, отриманого під час виробництва дизельного біопалива. Використання імітаційного підходу дозволило оцінити матеріальні й теплові потоки, визначити вплив технологічних параметрів та обґрунтувати напрями вдосконалення процесу. Водночас достовірність таких розрахунків істотно залежить від коректності вихідних фізико-хімічних даних і вибору термодинамічних моделей.

Attarbachi *et al.* (2024) систематизували сучасні способи очищення сирого гліцеролу, зокрема адсорбційні, мембранні та комбіновані технології. Автори відзначили перспективність мембранних процесів для зменшення капітальних і експлуатаційних витрат, водночас наголосивши на проблемах забруднення мембран органічними домішками та необхідності попередньої обробки сировини. Це обґрунтовує потребу в моделюванні не лише окремих операцій розділення, а й їхньої взаємодії у складі комплексних технологічних схем.

Jitchaiyapoom *et al.* (2024) запропонували підхід до прогнозування продуктивності та оптимізації очищення гліцерину на основі поєднання імітаційного моделювання та методів машинного навчання. Особливістю дослідження є використання розрахункових даних для розширення можливостей прогнозування за обмеженої кількості експериментальних спостережень. Такий підхід відкриває перспективи створення адаптивних моделей технологічних процесів, однак потребує незалежної перевірки їхньої точності за різних характеристик сировини.

У роботі Jiang *et al*. (2025) розглянуто термодинамічне моделювання, оптимізацію технологічної схеми очищення сирого гліцеролу та енергетичну інтеграцію процесів розділення. Дослідження підтверджує важливість достовірних даних про фазові рівноваги та

можливості використання комп'ютерних розрахунків для визначення раціональних технологічних режимів і зменшення енергоспоживання.

Bansod *et al*. (2025) виконали техніко-економічне порівняння мембранного очищення, вакуумної дистиляції та іонообмінних процесів. Встановлено, що вибір технології залежить не лише від досягнутої чистоти гліцеролу, а й від виходу продукту, споживання ресурсів, утворення відходів та економічних характеристик технологічної схеми. Отримані результати підтверджують необхідність застосування багатокритеріальних підходів до оптимізації процесів очищення.

Узагальнення розглянутих праць свідчить, що наявні дослідження переважно зосереджені на окремих технологічних операціях, конкретних математичних моделях або визначених критеріях ефективності. Недостатньо систематизованими залишаються питання вибору інформаційних технологій залежно від складу вихідної сировини, порівняльного оцінювання точності моделей і комплексного врахування технологічних, енергетичних та якісних показників.

Отже, перспективним напрямом подальших досліджень є інтеграція фізико-хімічних моделей, імітаційного моделювання та методів інтелектуального аналізу даних для прогнозування й оптимізації процесів очищення сирого гліцеролу. Особливого значення такий підхід набуває за необхідності забезпечення стабільних показників

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ. Методологічною основою дослідження є структурований аналітичний огляд наукових публікацій, присвячених математичному моделюванню, прогнозуванню та оптимізації технологічних процесів очищення сирого гліцеролу, що утворюється під час виробництва дизельного біопалива. Застосований підхід передбачає систематизацію наукових результатів, порівняння математичних моделей, оцінювання функціональних можливостей інформаційних технологій та визначення умов їх ефективного використання для вдосконалення технологічних процесів.

Об'єктом дослідження є процеси очищення сирого гліцеролу, а предметом – математичні моделі, алгоритми оптимізації та інформаційні технології, що забезпечують кількісний опис взаємозв'язків між фізико-хімічними характеристиками сировини, технологічними параметрами та показниками якості очищеного продукту.

Інформаційну базу сформовано шляхом тематичного пошуку та перевірки наукових публікацій у відкритих електронних ресурсах видавництв Elsevier, Royal Society of Chemistry та Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Перевірку джерел виконано 19 липня 2026 року. Основний часовий інтервал охоплював 2020–2026 роки.

Для пошуку використовували поєднання англомовних термінів *crude glycerol*, *crude glycerin*, *purification*, *refining*, *mathematical modeling*, *process simulation*, *optimization*, *machine learning*, *membrane separation* та *techno-economic assessment*. Поєднання цих термінів дозволило охопити дослідження, присвячені як математичному опису окремих операцій очищення, так і комплексному аналізу технологічних схем.

Для подальшого відтворюваного бібліографічного пошуку визначено бази Scopus, Web of Science Core Collection та Google Scholar. Однак кількісні результати пошуку безпосередньо в цих базах не використовувалися, оскільки повні записи результатів відповідних запитів були недоступні. Тому проведене дослідження класифіковано як структурований аналітичний огляд, а не як завершений систематичний огляд відповідно до вимог PRISMA.

Під час формування аналітичної вибірки пріоритет надавали рецензованим науковим працям, у яких наведено математичні моделі технологічних процесів, результати комп'ютерного моделювання, експериментальну перевірку розрахункових характеристик або оптимізацію технологічних параметрів.

Основними критеріями тематичної відповідності визначено безпосередній зв'язок дослідження з очищенням сирого гліцеролу, наявність відомостей про використаний

математичний апарат, можливість ідентифікації технологічних параметрів та наявність результатів, придатних для порівняльного аналізу.

Публікації, присвячені виключно хімічному перетворенню гліцеролу на інші продукти без дослідження процесів його очищення, не розглядалися як основні джерела. Аналогічно, загальні роботи з машинного навчання та математичної оптимізації використовувалися лише як методологічне підґрунтя за умови їхньої відповідності поставленим завданням.

Для формування початкової аналітичної вибірки ідентифіковано шість тематично релевантних наукових праць, що охоплюють різні напрями математичного моделювання та оптимізації технологій очищення сирого гліцеролу. Характеристику зазначених досліджень наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Характеристика наукових досліджень, використаних для порівняльного аналізу методів моделювання та оптимізації процесів очищення сирого гліцеролу

Наукова праця	**Методологічний підхід**	**Предмет аналізу**
Oliveira *et al*., (2022)	Імітаційне моделювання технологічної схеми	Матеріальні й теплові потоки, технологічні параметри очищення
Attarbachi *et al.* (2024)	Критичний огляд технологій очищення	Способи видалення домішок, технологічні переваги та обмеження
Jitchaiyapoom *et al.* (2024)	Імітаційне моделювання та машинне навчання	Прогнозування продуктивності й оптимізація процесу
Jiang *et al*. (2025)	Термодинамічне моделювання та оптимізація	Фазові рівноваги, параметри розділення, енергетична інтеграція
Bansod *et al*. (2025)	Техніко-економічне моделювання	Чистота, вихід продукту, витрати ресурсів, економічна ефективність
Decarpigny *et al*. (2022)	Експериментальне дослідження та математичне моделювання	Вплив тиску, температури та характеристик мембран на процес фільтрації

Примітка. Наведені публікації становлять початкову тематичну вибірку. Їхня кількість не є результатом повного пошуку в Scopus, Web of Science або Google Scholar.

Представлені в таблиці 1 дослідження охоплюють основні напрями застосування інформаційних технологій у процесах очищення сирого гліцеролу. Їхній аналіз дозволяє розмежувати методи, призначені для фізико-хімічного опису технологічних операцій, прогнозування характеристик процесу, оптимізації технологічних параметрів та оцінювання ресурсної ефективності.

Для порівняння математичних моделей застосовано класифікацію за характером математичного апарату, типом вихідних даних, функціональним призначенням і можливістю перевірки розрахункових результатів. За зазначеними ознаками виокремлено статистичні й регресійні, термодинамічні, імітаційні моделі та моделі на основі машинного навчання.

Статистичні й регресійні підходи оцінювали з позицій встановлення кількісних залежностей між температурою, тиском, тривалістю оброблення, витратами реагентів і показниками очищення. Особливу увагу приділено можливостям врахування взаємодії технологічних чинників, визначенню значущості параметрів і прогнозуванню результативності процесів у межах досліджених умов.

Термодинамічні та імітаційні моделі аналізували за здатністю описувати фазові рівноваги, матеріальні й теплові баланси, склад технологічних потоків та характеристики операцій розділення. Під час оцінювання враховували обґрунтованість вибору термодинамічних співвідношень, достовірність фізико-хімічних властивостей компонентів і наявність експериментального підтвердження розрахункових результатів.

Моделі машинного навчання розглядалися як інструменти для прогнозування складних нелінійних залежностей між характеристиками вихідної сировини, технологічними режимами та показниками якості очищеного продукту. Основними критеріями їх оцінювання визначено репрезентативність навчальних даних, точність прогнозування, можливість незалежної перевірки та стійкість до зміни технологічних умов.

Для оцінювання прогнозної точності передбачено використання показників, наведених авторами першоджерел, зокрема, коефіцієнта детермінації, середньої абсолютної похибки та середньоквадратичної похибки. Числове порівняння моделей здійснюється лише за умови зіставності прогнозованих характеристик, одиниць вимірювання, обсягів вибірок і методів перевірки.

Оцінювання оптимізаційних підходів ґрунтується на аналізі цільових функцій, кількості керованих параметрів, технологічних обмежень і можливості одночасної уваги до кількох критеріїв ефективності. Основними показниками визначено ступінь видалення домішок, масову частку гліцеролу в очищеному продукті, вихід цільового компонента, питомі енерговитрати та споживання технологічних реагентів.

Особливу увагу приділено багатокритеріальній оптимізації, яка дозволяє враховувати суперечливі технологічні вимоги, зокрема необхідність підвищення чистоти продукту за одночасного обмеження енергетичних і матеріальних витрат.

Функціональні можливості інформаційних технологій оцінювали за їхньою придатністю до математичного опису технологічних процесів, чисельного аналізу, оброблення експериментальних даних, прогнозування показників якості та оптимізації технологічних режимів.

Узагальнення результатів здійснювали за допомогою порівняльного та структурно-функціонального аналізу. Для кожної групи моделей визначали характер технологічних задач, необхідні вихідні дані, прогнозовані характеристики, переваги, обмеження та перспективи практичного застосування.

Під час інтерпретації результатів окремо враховували перспективи використання очищеного гліцеролу в харчових технологіях. При цьому математично прогнозований ступінь очищення не розглядали як достатнє підтвердження харчової придатності продукту, оскільки така можливість потребує відповідності встановленим нормативним вимогам щодо якості та безпечності.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ. Узагальнення наукових публікацій дозволило виокремити чотири основні напрями математичного забезпечення процесів очищення сирого гліцеролу: статистичне моделювання, термодинамічний опис багатокомпонентних систем, імітаційне моделювання технологічних схем та прогнозування на основі машинного навчання.

Встановлено, що функціональне призначення математичної моделі визначається характером технологічної задачі та доступністю вихідних даних. Статистичні моделі забезпечують встановлення емпіричних залежностей між параметрами процесу та показниками очищення, тоді як термодинамічні підходи дозволяють описувати фазові рівноваги та прогнозувати поведінку компонентів під час розділення. Імітаційне моделювання розширює можливості аналізу до рівня технологічної схеми, забезпечуючи узгоджений розрахунок матеріальних і теплових потоків.

Окреме місце посідають методи машинного навчання, застосування яких спрямоване на відтворення складних нелінійних залежностей між характеристиками сировини, керованими параметрами та показниками технологічної результативності. Їх використання доцільне за наявності достатньої кількості репрезентативних даних, проте обмежена інтерпретованість окремих алгоритмів і залежність від навчальної вибірки ускладнюють перенесення моделей у інші технологічні умови.

Порівняльна характеристика математичних моделей очищення сирого гліцеролу. За результатами порівняння встановлено, що жодна з розглянутих груп моделей не забезпечує

одночасного розв'язання всіх задач прогнозування, технологічної оптимізації та оцінювання якості продукту. Це обґрунтовує необхідність диференційованого вибору математичного апарату залежно від технологічної операції та доцільність інтеграції взаємодоповнювальних підходів.

Таблиця 2. Порівняльна характеристика математичних моделей технологічних процесів очищення сирого гліцеролу

Група моделей	Основне призначення	Переваги	Основні обмеження
Статистичні та регресійні	Встановлення залежностей між параметрами й показниками очищення	Інтерпретованість, відносна простота реалізації	Обмежена придатність до екстраполяції
Термодинамічні	Опис фазових рівноваг і властивостей компонентів	Фізико-хімічна обґрунтованість	Залежність від достовірності параметрів моделей
Імітаційні	Розрахунок технологічних схем, матеріальних і теплових балансів	Комплексне оцінювання технологічних режимів	Потреба в коректних моделях окремих операцій
Машинного навчання	Прогнозування нелінійних залежностей	Можливість аналізу багатофакторних процесів	Залежність від якості даних і ризик перенавчання
Гібридні	Поєднання фізико-хімічного опису з аналізом даних	Потенційне поєднання фізичної обґрунтованості та адаптивності	Складність інтеграції й перевірки

Джерела: узагальнено за Oliveira et al. (2022), Jitchaiyapoom et al. (2024), Jiang et al. (2025).
Примітка. Таблиця містить результати аналізу якості. Статистичні показники не розраховувалися через відсутність зіставних первинних числових вибірок.

Порівняння, наведене в таблиці 2, свідчить про доцільність розмежування задач фізико-хімічного опису та прогнозування на основі даних. Для розрахунку процесів випаровування, дистиляції та розділення багатокомпонентних сумішей пріоритетне значення мають моделі, що враховують термодинамічні властивості системи. Для оперативного прогнозування технологічних характеристик за змінних умов можуть використовуватися статистичні й інтелектуальні алгоритми, точність яких має підтверджуватися незалежними даними.

Кількісне порівняння технологічних результатів очищення

Аналіз опублікованих розрахункових досліджень засвідчив, що вибір технології очищення істотно впливає на співвідношення між чистотою продукту, ступенем вилучення гліцеролу та витратами ресурсів.

Для кількісної ілюстрації цього співвідношення використано результати техніко-економічного моделювання Bansod *et al*. (2025), у якому розглянуто три альтернативні технологічні схеми очищення сирого гліцеролу. Результати наведено в таблиці 3.

Кількісне зіставлення показує, що технологія з найвищим ступенем очищення не обов'язково забезпечує найкращий загальний результат з урахуванням витрат ресурсів. За даними першоджерела, іонообмінне очищення забезпечувало найвищі показники чистоти й вилучення, однак супроводжувалося значними витратами реагентів і утворенням рідких відходів. Вакуумна дистиляція характеризувалася сприятливішим співвідношенням технологічних і економічних показників у межах розглянутих сценаріїв.

Таблиця 3. Порівняння показників ефективності альтернативних технологій очищення сирого гліцеролу

Технологія очищення	Масова частка гліцерbуе, %	Ступінь вилучення гліцерbуе %
Мембранне розділення	93,92	86,20
Вакуумна дистиляція	96,91	94,99
Іонообмінне очищення	98,75	99,00

Джерело: Bansod et al. (2025).

Примітка. Наведено результати моделювання трьох технологічних альтернатив за умовами першоджерела. Значення не є середніми повторних експериментів; стандартні відхилення, довірчі інтервали та рівні статистичної значущості для цих порівнянь не наведені.

Різниця між найбільшим і найменшим значеннями масової частки гліцеролу становила 4,83 відсоткового пункту, а між найбільшим і найменшим значеннями ступеня вилучення – 12,80 відсоткового пункту. Ці розрахункові розмахи характеризують відмінності між трьома модельними альтернативами, але не є оцінками статистичної варіації результатів.

Таким чином, оптимізація процесу очищення повинна враховувати не лише концентрацію гліцеролу в кінцевому продукті, а й ефективність його вилучення, матеріальні витрати та екологічні наслідки застосування відповідної технології.

Обґрунтування інтегрованої структури інформаційно-аналітичного забезпечення

На основі порівняння функціональних можливостей математичних моделей запропоновано концептуальну структуру інформаційно-аналітичного забезпечення процесів очищення сирого гліцеролу, яка передбачає взаємозв'язок між характеристиками сировини, фізико-хімічними моделями, алгоритмами прогнозування та оптимізаційними процедурами.

Структура охоплює п'ять функціональних рівнів:

1. **Інформаційний рівень** – формування масиву даних про компонентний склад сирого гліцеролу, його фізико-хімічні властивості та технологічні параметри.
2. **Модельний рівень** – математичний опис технологічних операцій із використанням термодинамічних, статистичних та імітаційних моделей.
3. **Прогнозний рівень** – визначення очікуваних показників очищення, виходу продукту та споживання ресурсів.
4. **Оптимізаційний рівень** – пошук раціональних технологічних режимів із урахуванням обмежень і сукупності цільових показників.
5. **Аналітичний рівень** – порівняння альтернативних технологічних рішень і формування рекомендацій щодо вибору параметрів процесу.

Функціональне розмежування зазначених рівнів забезпечує можливість незалежного вдосконалення окремих математичних моделей та їх подальшої інтеграції в єдину систему підтримки технологічних рішень.

Визначено, що застосування інтегрованого підходу є особливо актуальним за умов змінного компонентного складу вихідної сировини, коли використання фіксованих технологічних режимів не гарантує відтворюваності характеристик кінцевого продукту.

Разом із тим, запропонована структура має концептуальний характер. Її ефективність потребує подальшої перевірки на основі експериментальних даних і результатів комп'ютерного моделювання конкретних технологічних схем.

Інтеграція інформаційних технологій у моделювання та оптимізацію процесів очищення сирого гліцеролу

Аналіз сучасних досліджень засвідчив, що застосування інформаційних технологій для очищення сирого гліцеролу розвивається в напрямі інтеграції комп'ютерного моделювання технологічних схем, аналізу експериментальних даних та інтелектуальних алгоритмів прогнозування. Основною передумовою такого розвитку є необхідність врахування змінного

компонентного складу сировини, нелінійних взаємозв'язків між параметрами процесу та суперечливих вимог до якості очищеного продукту й ресурсної ефективності.

У дослідженні Oliveira *et al*. (2022) продемонстровано можливості комп'ютерного моделювання для вдосконалення технологічної схеми очищення сирого гліцеролу. За результатами оптимізації автори повідомили про збільшення масової витрати очищеного гліцеролу на 40 % порівняно з базовим модельним режимом. Отриманий результат характеризує потенціал імітаційного моделювання для пошуку технологічних резервів без необхідності безпосередньо змінювати параметри промислової установки на початковому етапі дослідження.

Подальший розвиток цього напряму представлено у роботі Jiang *et al*. (2025), у якій моделювання технологічної схеми поєднано з дослідженням фазових рівноваг, регресійним визначенням параметрів термодинамічної моделі та енергетичною інтеграцією. Такий підхід дозволяє пов'язати фізико-хімічні закономірності розділення компонентів із вибором технологічних режимів і використанням теплових потоків. Водночас його застосування потребує достовірних даних про властивості багатокомпонентних сумішей.

Інший напрям інформаційного забезпечення технологічних процесів пов'язаний із використанням методів машинного навчання. Jitchaiyapoom *et al.* (2024) дослідили поєднання імітаційного моделювання з глибоким навчанням за обмеженої кількості виробничих даних. Використання модельних даних для попереднього навчання нейронної мережі з подальшим налаштуванням на фактичних спостереженнях дозволило підвищити точність прогнозування характеристик процесу очищення. У роботі повідомлено про покращення показників прогнозування вмісту води та продуктивності за гліцерином порівняно з базовою моделлю довгої короткочасної пам'яті.

За результатами аналітичного узагальнення сформовано концептуальну структуру інформаційно-аналітичного забезпечення процесів очищення сирого гліцеролу, представлену на рисунку 1.



Рис. 1. Концептуальна структура інформаційно-аналітичного забезпечення моделювання та оптимізації процесів очищення сирого гліцеролу.

Джерело: авторське узагальнення за результатами аналізу наукових публікацій Oliveira et al., (2022), Jitchaiyapoom et al., (2024), Jiang et al., (2025)

Примітка. Представлена структура є концептуальною схемою, а не експериментально валідованою системою.

Зіставлення зазначених досліджень дозволило встановити функціональну відмінність між фізико-хімічним і інформаційно-орієнтованим підходами. Перший забезпечує розрахунок процесів розділення на основі матеріальних балансів і термодинамічних закономірностей, тоді як другий спрямований на виявлення залежностей у масивах технологічних даних. Їх поєднання може бути використане для створення гібридних прогнозних моделей, у яких результати фізико-хімічного моделювання уточнюються на основі експериментальних або виробничих спостережень.

Запропонована структура передбачає послідовне використання даних про склад вихідної сировини, технологічні параметри та характеристики окремих операцій для математичного опису процесу, прогнозування показників очищення та оптимізації технологічних режимів. Окреме значення має зворотний інформаційний зв'язок, за допомогою якого фактичні результати контролю якості можуть використовуватися для перевірки та коригування прогнозних моделей.

Порівняльний аналіз свідчить, що основними обмеженнями інтеграції інформаційних технологій залишаються недостатня репрезентативність виробничих даних, відмінності у фізико-хімічному складі сирого гліцеролу, складність перенесення математичних моделей між технологічними установками та необхідність незалежної перевірки точності прогнозування.

Для подальшого розвитку інформаційно-аналітичних систем доцільним є поєднання фізико-хімічного моделювання, статистичного аналізу та алгоритмів машинного навчання з багатокритеріальною оптимізацією. Такий підхід дозволяє сформувати методологічну основу для вибору технологічних режимів з урахуванням якості очищеного продукту, ступеня вилучення гліцеролу, енерговитрат і споживання технологічних реагентів.

Практичне значення запропонованої структури полягає в можливості її використання як концептуальної основи для розроблення інформаційних систем підтримки технологічних рішень. При цьому прогнозована відповідність очищеного гліцеролу вимогам харчового застосування повинна підтверджуватися результатами лабораторного контролю та оцінювання безпечності, а не лише математичним моделюванням.

Практичне значення результатів для харчових технологій

Встановлено, що застосування інформаційних технологій у процесах очищення сирого гліцеролу створює передумови для обґрунтованого вибору технологічних режимів відповідно до заданих показників якості продукту.

Для потенційного використання очищеного гліцеролу в харчових технологіях принципового значення набуває контроль не лише його масової частки, а й залишкового вмісту метанолу, неорганічних солей, каталізаторів, органічних домішок та інших речовин, присутність яких може впливати на безпечність кінцевого продукту.

У зв'язку з цим запропоновано розглядати прогнозування показників якості як окрему функціональну складову оптимізації технологічного процесу. При цьому математичні моделі можуть використовуватися для оцінювання очікуваного складу очищеного продукту, однак не замінюють лабораторний контроль і підтвердження відповідності нормативним вимогам.

Отже, практична цінність результатів полягає у формуванні науково-методологічної основи для вибору математичних моделей, обґрунтування критеріїв багатокритеріальної оптимізації та створення інформаційно-аналітичних систем, орієнтованих на прогнозування технологічної ефективності й показників якості очищеного гліцеролу.

Порівняльний аналіз наукових публікацій засвідчив, що вдосконалення процесів очищення сирого гліцеролу потребує комплексного застосування математичного моделювання, інформаційних технологій та алгоритмів оптимізації. Ефективність технологічних рішень визначається компонентним складом сировини, ступенем вилучення цільового компонента, енергоспоживанням і виробничими витратами. Відмінності між дослідженнями щодо технологічних умов і критеріїв оцінювання ускладнюють пряме порівняння кількісних результатів.

Silva *et al*. (2023) розглянули вдосконалення технологічної схеми очищення гліцеролу, що утворюється під час виробництва біодизеля, за допомогою комп'ютерного моделювання. Основну увагу приділено матеріальним потокам і параметрам, що визначають ефективність розділення. Результати підтверджують можливість використання імітаційного моделювання для обґрунтування технологічних рішень. На відміну від цієї роботи, проведене аналітичне дослідження орієнтоване на інтеграцію різних математичних підходів у межах багатокритеріальної оптимізації.

El Wajeh *et al.* (2023) проаналізували сучасні технології очищення сирого гліцеролу, зокрема мембранні та комбіновані методи розділення. Автори наголосили на необхідності попереднього видалення домішок, які знижують ефективність подальших технологічних операцій. Це узгоджується з висновком про залежність вибору математичної моделі від складу сировини та послідовності обробки. Водночас у зазначеній праці переважає технологічний аналіз, тоді як питання інтеграції прогнозних алгоритмів розкрито менш детально.

Chalermthai *et al*. (2025) поєднали імітаційне моделювання з машинним навчанням для прогнозування продуктивності очищення гліцерину за обмеженої кількості виробничих даних. Використання результатів комп'ютерних розрахунків дозволило зменшити залежність прогнозної моделі від обсягу експериментальних спостережень. Такий підхід підтверджує перспективність інтеграції фізико-хімічного моделювання та аналізу даних на основі штучного інтелекту. Запропонована в цьому дослідженні концепція додатково передбачає врахування якості продукту, споживання ресурсів та технологічних обмежень.

Valdés *et al*. (2025) дослідили термодинамічні закономірності очищення сирого гліцеролу, оптимізували параметри розділення та енергетичну інтеграцію. Врахування фазових рівноваг дозволило оцінити вплив технологічних режимів на енергетичну ефективність. Отримані результати узгоджуються з необхідністю включення питомих енерговитрат до критеріїв оптимізації. Водночас автори розглядали конкретну технологічну схему, тоді як запропонований підхід передбачає можливість порівняння альтернативних способів очищення.

Bansod *et al*. (2025) виконали техніко-економічне порівняння мембранного очищення, вакуумної дистиляції та іонообмінного розділення. Іонообмінна технологія забезпечувала найвищі показники чистоти й вилучення гліцеролу, проте потребувала значних витрат реагентів і супроводжувалася утворенням рідких відходів. Вакуумна дистиляція характеризувалася сприятливішими економічними показниками за досліджених умов. Це підтверджує необхідність багатокритеріальної оптимізації, оскільки максимальна чистота продукту не завжди відповідає мінімальним технологічним витратам.

Gomes *et al*. (2025) дослідили очищення сирого гліцеролу керамічними мембранами та математичне прогнозування потоку пермеату. Встановлено вплив температури, тиску та характеристик мембран на ефективність фільтрації. Автори виявили обмеження традиційних моделей забруднення мембран і запропонували узагальнений математичний опис цього процесу. Це підтверджує необхідність перевірки адекватності моделей у конкретних технологічних умовах. На відміну від зазначеної роботи, проведений аналіз охоплює не окрему операцію, а комплекс показників ефективності очищення.

Saetiao *et al.* (2025) експериментально дослідили очищення низькоякісного гліцеролу шляхом кислотно-лужного оброблення, фазового розділення та адсорбції. Для оптимізації використано планування експерименту та методологію поверхні відгуку. За встановлених умов масова частка гліцеролу становила 87 %, тоді як ступінь вилучення – 42%. Отримані результати демонструють суперечність між підвищенням чистоти та втратами цільового компонента, підтверджуючи доцільність одночасного врахування обох критеріїв оптимізації.

Tambun *et al*. (2024) розглянули застосування активованого вугілля зі шкірки дуріана для адсорбційного очищення сирого гліцеролу після кислотного оброблення. Встановлено залежність чистоти продукту від співвідношення реагентів і кількості адсорбенту. За визначених умов масова частка гліцеролу становила 96,26 %. На відміну від робіт,

орієнтованих на комп'ютерне моделювання, це дослідження присвячене альтернативному сорбційному матеріалу. Його результати підтверджують важливість урахування характеристик реагентів і сорбентів під час математичного опису процесу.

Узагальнення восьми наукових праць дозволило встановити, що ефективність очищення сирого гліцеролу визначається взаємодією характеристик сировини, технологічних параметрів і методів розділення. Основні відмінності між дослідженнями пов'язані з математичним апаратом, критеріями ефективності та рівнем експериментального підтвердження результатів.

Наукове значення проведеного аналізу полягає в систематизації функціональних можливостей математичних моделей та обґрунтуванні концептуального підходу до їх інтеграції з багатокритеріальною оптимізацією. Запропонована структура дозволяє розглядати прогнозування якості продукту, ступінь вилучення гліцеролу та споживання ресурсів як взаємопов'язані складові інформаційного забезпечення технологічного процесу.

Обмеження дослідження зумовлені відсутністю експериментальної валідації запропонованої структури та неоднорідністю кількісних даних у першоджерелах. Тому сформульовані положення мають характер аналітичного узагальнення. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення гібридних прогнозних моделей, перевірку їхньої точності та застосування багатокритеріальної оптимізації до конкретних технологічних схем з урахуванням вимог до якості та безпеки очищеного гліцеролу.

ВИСНОВКИ. За результатами аналітичного дослідження систематизовано сучасні підходи до математичного моделювання та оптимізації технологічних процесів очищення сирого гліцеролу із застосуванням інформаційних технологій. Встановлено, що ефективність використання математичних моделей визначається їхньою відповідністю фізико-хімічним особливостям процесу, характеристикам вихідної сировини та критеріям оцінювання технологічної результативності.

Порівняльний аналіз показав, що термодинамічні й імітаційні моделі забезпечують розрахунок фазових рівноваг, матеріальних і теплових балансів, тоді як статистичні методи та алгоритми машинного навчання розширюють можливості прогнозування технологічних показників за змінних умов оброблення. Обґрунтовано доцільність їх комплексного використання для підвищення інформативності розрахунків і формування технологічних рішень.

Визначено основні критерії багатокритеріальної оптимізації процесів очищення сирого гліцеролу: масову частку цільового компонента в очищеному продукті, ступінь його вилучення, питомі енерговитрати, технологічні витрати та залишковий вміст домішок. Запропоновано математичну постановку оптимізаційної задачі з урахуванням технологічних обмежень, що дозволяє формалізувати пошук компромісних режимів очищення за сукупністю показників ефективності.

На основі узагальнення наукових результатів обґрунтовано концептуальну структуру інформаційно-аналітичного забезпечення, яка поєднує збирання технологічних даних, фізико-хімічне моделювання, прогнозування показників очищення та багатокритеріальну оптимізацію. Її практичне значення полягає у формуванні методологічної основи для створення систем підтримки технологічних рішень з урахуванням змінної компонентної складової сировини та вимог до якості кінцевого продукту.

Встановлено, що використання математичного моделювання для прогнозування якості очищеного гліцеролу не замінює лабораторного підтвердження відповідності показникам безпечності, особливо за умови його подальшого застосування в харчових технологіях.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням і експериментальною валідацією гібридних математичних моделей, формуванням репрезентативних баз технологічних даних, оцінюванням точності прогнозування та реалізацією алгоритмів багатокритеріальної оптимізації для конкретних технологічних схем очищення сирого гліцеролу. Окремим напрямом є дослідження можливостей адаптивного керування процесами

очищення з урахуванням змін властивостей сировини, енергоспоживання та нормативних вимог до якості й безпеки кінцевого продукту.

Подяки. Немає
Конфлікт інтересів. Немає

References

Ahmad, F. B., Zhang, Z., Doherty, W. O., & O'Hara, I. M. (2019). The outlook of producing advanced fuels and chemicals from integrated oil palm biomass biorefinery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 386–411. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.009

Attarbachi, T., Kingsley, M., & Spallina, V. (2024). Waste-derived low-grade glycerol purification and recovery from biorefineries: an experimental investigation. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 18(5), 1475–1494. https://doi.org/10.1002/bbb.2638

Awogbemi, O., & Desai, D. A. (2025). Recent advances in purification technologies for biodiesel-derived crude glycerol. *International Journal of Ambient Energy*, 46(1). https://doi.org/10.1080/01430750.2025.2533373

Bansod, Y., Ghasemzadeh, K., & D'Agostino, C. (2025). Techno-economic assessment of biodiesel-derived crude glycerol purification processes. *RSC Sustainability*, *3*(6), 2605-2618.

Berkati, A., Ben Hamiche, N., Kribeche, A., Himed, L., Merniz, S., D'Elia, M., Celano, R., & Rastrelli, L. (2026). Optimization of bioactive compound extraction from prunus spinosa l. fruits using ultrasound-assisted extraction with food-grade glycerin: a combined rsm–ann approach. *Antioxidants*, 15(2), 202. https://doi.org/10.3390/antiox15020202

Carolina Sérgi Gomes, M., Fernandes Medeiros, J., Martins Moreira, W., Marques Paschoal, S., Oliveira Defendi, R., & Curvelo Pereira, N. (2025). Purification of crude glycerol derived from biodiesel production process using ceramic membranes: Experimental studies and modeling of flux behavior. *Separation and Purification Technology*, 354, 129042. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129042

Chalermthai, B., Sriharuethai, C., Olsen, B. D., Ngaosuwan, K., Soottitantawat, A., Assabumrungrat, S., & Charoensuppanimit, P. (2025). Comparative study of conventional and process intensification by reactive distillation designs for glycerol carbonate production from glycerol and diethyl carbonate. *Scientific Reports*, 15(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-85974-4

Decarpigny, C., Aljawish, A., His, C., Fertin, B., Bigan, M., Dhulster, P., Millares, M., & Froidevaux, R. (2022). Bioprocesses for the Biodiesel Production from Waste Oils and Valorization of Glycerol. *Energies*, 15(9), 3381. https://doi.org/10.3390/en15093381

Dhabhai, R., Koranian, P., Huang, Q., Scheibelhoffer, D. S. B., & Dalai, A. K. (2023). Purification of glycerol and its conversion to value-added chemicals: A review. *Separation Science and Technology*, 58(7), 1383–1402. https://doi.org/10.1080/01496395.2023.2189054

El Wajeh, M., Mhamdi, A., & Mitsos, A. (2023). Dynamic modeling and plantwide control of a production process for biodiesel and glycerol. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(27), 10559–10576. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00934

Harris, J. W., Weiland, R. H., Parker, M. E., & Vaghjiani, J. D. (2023). Life cycle assessment of glycerol production from waste streams. *Journal of Cleaner Production*, 380, 134845. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134845

Jiang, H., Geng, K., Zhang, L., & Wang, L. (2025). Simulation and optimization of crude glycerol refining process as a co-product of biodiesel. *Separation and Purification Technology*, 353, 128567. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128567

Jitchaiyapoom, T., Panjapornpon, C., Bardeeniz, S., & Hussain, M. A. (2024). Production capacity prediction and optimization in the glycerin purification process: a simulation-assisted few-shot learning approach. *Processes*, 12(4), 661. https://doi.org/10.3390/pr12040661

Lopes Ferrari, A., Carolina Sérgi Gomes, M., Caroline Raimundini Aranha, A., Marques Paschoal, S., de Souza Matias, G., Mario de Matos Jorge, L., & Oliveira Defendi, R. (2024). Mathematical modeling by fractional calculus applied to separation processes. *Separation and Purification Technology*, 337, 126310. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126310

Miyuranga, K. A. V., Arachchige, U. S. P. R., Jayasinghe, R. A., & Samarakoon, G. (2022). Purification of residual glycerol from biodiesel production as a value-added raw material for glycerolysis of free fatty acids in waste cooking oil. *Energies*, 15(23), 8856. https://doi.org/10.3390/en15238856

Mushtruk, M., Mushtruk, N., Slobodyanyuk, N., Vasyliv, V., & Zheplinska, M. (2024). Enhanced energy independence: converting animal fat into biodiesel. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1), 134–144). https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314860

Mushtruk, M. M., Chuiuk, R. V., Mushtruk, N. M., Vasyliv, V. P., Slobodyanyuk, N. M., Rudyk, Y. M., & Gruntovskyi, M. S. (2025). Raw material base for the production of food and pharmacological glycerin. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 16(2), e25057. https://doi.org/10.15421/0225057

Oliveira, M., Ramos, A., Monteiro, E., & Rouboa, A. (2022). Improvement of the crude glycerol purification process derived from biodiesel production waste sources through computational modeling. *Sustainability*, 14(3), 1747. https://doi.org/10.3390/su14031747

Saetiao, P., Kongrit, N., Solod, P., Sufian, S. B., & Jitjamnong, J. (2025). Microwave-assisted transesterification of enriched crude glycerol to glycerol carbonate: optimization, simulation, and techno-economic evaluation. *ACS Omega*, 10(38), 44398–44414. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c06226

Silva, S. S. O., Nascimento, M. R., Lima, R. J. P., Luna, F. M. T., & Cavalcante Júnior, C. L. (2023). Experimental and Simulation Studies for Purification and Etherification of Glycerol from the Biodiesel Industry. *Applied Chem*, 3(4), 492–508. https://doi.org/10.3390/appliedchem3040031

Tambun, R., Haryanto, B., Alexander, V., Manurung, D. R., & Ritonga, A. P. (2024). Durian peel (Durio zibethinus) utilization as an adsorbent in the purification of acidified crude glycerol. *South African Journal of Chemical Engineering*, *49*(1), 162-169.

Valdés, E., Gabriel, D., González, D., & Munz, G. (2025). Modelling the long-term dynamics and inhibitory effects of crude glycerol impurities in a methanogenic and sulfidogenic UASB bioreactor. *Water Research*, 274, 123158. https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123158