

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

Факультет природничих наук

Кафедра хімії

ДИПЛОМНА РОБОТА

на тему: «Синтез та каталітичні властивості кобальтового фериту»

Студента 4 курсу, групи Х-41

спеціальності 102 Хімія

Шульги В.С.

Керівник: доцент кафедри хімії, к.х.н. Татарчук Т.Р.

Національна шкала: _____

Університетська шкала: _____

Оцінка ECTS: _____

Члени комісії: _____

(підпис) (прізвище та ініціали)

(підпис) (прізвище та ініціали)

(підпис) (прізвище та ініціали)

м. Івано-Франківськ – 2025

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Розділ 1. Літературний огляд.....	6
1.1. Загальна характеристика шпінельних феритів.....	6
1.2. Кобальт ферит (CoFe_2O_4) як каталізатор.....	7
1.3. Галова кислота як біомодифікатор	8
1.4. Розклад гідроген пероксиду як модельна реакція вивчення каталітичних властивостей наноматеріалів.....	8
Розділ 2. Експериментальна частина.....	10
2.1. Методика синтезу CoFe_2O_4 з галовою кислотою.....	10
2.2. Методика дослідження каталітичної активності (розкладання H_2O_2).....	12
Розділ 3. Результати та обговорення.....	14
3.1. Каталітична активність невідпалених феритів кобальту.....	14
3.2. Каталітична активність невідпалених феритів кобальту.....	17
3.3. Порівняння відпалених та не відпалених зразків фериту кобальту.....	29
Висновки.....	38
Список використаних джерел.....	39

ВСТУП

Актуальність теми. Забруднювачі поділяються на дві основні категорії: точкові та неточкові, а забруднення води є серйозною світовою проблемою. Промислові стічні води є одним з основних джерел забруднення у всьому світі, і вони містять важкі метали, леткі органічні сполуки та інші небезпечні речовини, які суттєво загрожують здоров'ю людей та водним екосистемам. Такі барвники, як МБ, родамін В (RhB), кристалічний фіолетовий (CV), МО та інші, викликають значне занепокоєння через їхні токсичні та канцерогенні властивості. Текстильна, шкіряна, паперова, косметична, фармацевтична, харчова промисловість та виробництво кормів для тварин є основними джерелами забруднення барвниками. Щорічно виробляється приблизно 1,6 мільйона тонн барвників, причому фарбувальна промисловість значною мірою покладається на реактивні, дисперсні та прямі барвники. Важкі метали, такі як свинець (Pb), мідь (Cu), хром (Cr), кадмій (Cd), нікель (Ni), ртуть (Hg), цинк (Zn), миш'як (As) і кобальт (Co) є наступною основною категорією забруднювачів води у промислових стоках. Ці метали становлять серйозну небезпеку для здоров'я та навколишнього середовища. Ці метали потрапляють у водні системи внаслідок промислової діяльності, наприклад, гальваніки, гірничодобувної промисловості, шкіряного виробництва, автомобілебудування та сільськогосподарських процесів. Ці галузі скидають важкі метали та токсичні барвники, що не піддаються біологічному розкладанню, у поверхневі водні об'єкти, такі як річки та озера, іноді забруднюючи підземні води. Отже, важливо очищати забруднені води від забруднюючих речовин[1].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наказами, рішеннями. Тема курсової роботи затверджена на засіданні кафедри хімії (протокол № 7 від 2025р).

Мета та завдання дослідження.

Мета роботи полягає в синтезі CoFe_2O_4 з використанням галової кислоти та дослідженні його каталітичної активності.

Об'єктом дослідження є кобальтовий ферит.

Предметом дослідження є каталітична активність фериту кобальту(II).

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні **завдання**:

- провести літературний огляд про шпінельні ферити;
- синтезувати кобальтовий ферит з використанням галової кислоти;
- дослідити каталітичні властивості синтезованого фериту кобальту(II) в реакції розкладу гідроген пероксиду.

Особистий внесок здобувача полягає у аналізі літературних джерел, синтезі фериту кобальту, проведенні експериментів із дослідження каталітичної активності, а також формулюванні висновків і оформленні тексту рукопису.

Структура і обсяг роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел (7 найменувань). Повний обсяг курсової роботи складає 40 сторінок.

Публікації пов'язані з темою роботи:

Шульга В. С., Татарчук Т. Р. Технологія очищення води з використанням гетерогенних каталізаторів фентона. *Перспективи хімії в сучасному світі* : тези доп. III Всеукр. інтерн.-конф. молодих вчених. (22 лист. 2023 р.). Житомир, 2023. С. 29-30.

Шульга В.С., Татарчук Т.Р., Токсикологічні дослідження води, очищеної гетерогенними фентон-подібними каталізаторами // VIII Всеукраїнська наукова конференція «Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи»

(1 травня 2024 року). Матеріали конференції. – Житомир: Видавництво ЖДУ ім. І.Франка, 2024. – ISBN 978-966-485-296-5. – С. 150.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

.1 Загальна характеристика шпінельних феритів

Шпінельні ферити - це оксиди металів зі структурою шпінелі, які мають загальну хімічну формулу AB_2O_4 , де А і В - катіони різних металів, що знаходяться в тетраедричній (ділянка А) і октаедричній (ділянка В) позиціях відповідно. Типи, кількість і розташування катіонів металів у кристалічній структурі мають значний вплив на фізико-хімічні властивості феритів.

Завдяки своїм унікальним і чудовим властивостям нанокристалічні магнітні матеріали привертають увагу з різних галузей, таких як фізика, хімія, біологія, медицина, матеріалознавство та інженерія. Наноматеріали мають розмір частинок до 100 нм і високе співвідношення поверхні до об'єму, що змінює або покращує реакційну здатність, термічні, механічні, оптичні, електричні та магнітні властивості порівняно з їх об'ємними аналогами.

Якщо хімічний склад сипучих матеріалів є основною детермінантою їхніх властивостей, то розмір частинок і морфологія наноматеріалів, окрім хімічного складу, визначають більшість їхніх характеристик.

Крім того, залежно від розміру частинок і хімічного складу, ці якості можна тонко регулювати. Ферити є важливими і цікавими матеріалами як з практичної, так і з теоретичної точки зору. Магнітні наночастинки $CoFe_2O_4$, термічній та хімічній стабільності, а також відмінним структурним, магнітним, оптичним, електричним та діелектричним властивостям, та їх широкому спектру технологічних застосувань, включаючи фотокаталіз, фотолюмінесценцію, біосенсиори, датчики вологості, каталіз, магнітне охолодження, постійні магніти, магнітну доставку ліків, магнітну (гіпертермію)[2].

.2 Кобальт ферит (CoFe_2O_4) як каталізатор

Магнітні наноматеріали дуже схильні до агрегації та окислення через велику питому поверхню, підвищену хімічну реактивність і сильну магнітну дипольну взаємодію. Окислення призводить до утворення тонких оксидних шарів, які суттєво змінюють властивості наночастинок. Як агрегація, так і окислення можуть знижувати їхню каталітичну ефективність[3].

Ферит кобальту (CoFe_2O_4), оксид магнітної шпінелі, є найкращим кандидатом для АОП завдяки своїм чудовим каталітичним властивостями, екологічності та економічній ефективності завдяки природному вмісту заліза. Його каталітична ефективність в активації ПМС в першу чергу пов'язана з участю іонно-редокс циклів металів, зокрема $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ і $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$, які полегшують перенесення електронів і генерують активні форми кисню. Крім того, нещодавні дослідження свідчать про існування високовалентних форм заліза, таких як Fe(IV)=O , як активних проміжних продуктів, що утворюються під час активації персульфату, підкреслюючи критичну роль окисно-відновної циклічності заліза в каталітичній ефективності. Притаманні фериту кобальту магнітні властивості також дозволяють легко відновлювати і повторно використовувати його, що робить його ідеальним кандидатом для сталого водоочищення[4].

.3 Галлова кислота як біомодифікатор

Галова кислота є широко розповсюдженою фенольною кислотою в рослинному світі, що має потужну антиоксидантну, протизапальну та протипухлинну активність. Інша назва галової кислоти 3,4,5-тригідроксibenзойна кислота.

Вплив галової кислоти на клітинну лінію гліобластоми щурів та культуру астроцитів оцінювали Педра та інші. Результати показали, що галова кислота проявляє селективну антигліомну активність *in vitro*, не викликаючи цитотоксичності в астроцитах. Такі ж висновки були отримані Beljanski & Crochet на клітинній лінії U251 Крім того, спостерігали, що галова кислота запобігає окислювальному стресу та змінам у гідролізі нуклеотидів у клітинах гліобластоми. За даними Paolini та ін., галова кислота може чинити подвійний вплив на клітини гліоми T98G залежно від концентрації. Виявлено, що *in vivo* галова кислота зменшує об'єм пухлини на 90 %, запобігаючи індукованому пухлиною окислювальному пошкодженню та підтримуючи деградацію нуклеотидів і нуклеозидів у лімфоцитах, тромбоцитах і сироватці крові (Pedra et al., 2022). У низьких концентраціях галова кислота підвищує антиоксидантну здатність мітохондрій і проліферацію клітин, тоді як у високих концентраціях знижує як мітохондріальну активність, так і проліферацію клітин[5].

Галова кислота є біологічно активним компонентом як вторинний рослинний метаболіт, який найефективніше захоплює вільні радикали серед інших фенольних сполук, має антиоксидантну та антимікробну активність[6].

1.4. Розклад гідроген пероксиду як модельна реакція вивчення каталітичних властивостей наноматеріалів.

Перекис водню - це широко використовувана хімічна сполука з формулою H_2O_2 . У чистому рідкому стані він має характерний блідо-блакитний колір [1]. Однак у розведеному розчині при кімнатній температурі він має вигляд безбарвної суміші зі злегка різким запахом [2]. При розчиненні у воді він не повністю іонізується. Розчин перекису водню є слабкою кислотою, на ринку він зазвичай пропонується в концентраціях 30, 50 і 70 відсотків за вагою. В'язкість H_2O_2 трохи вища, ніж у води. Газоподібний перекис водню природно присутній у повітрі в невеликих кількостях, які утворюються при дії ультрафіолетових променів на кисень у присутності вологи [3]. Пари перекису водню подразнюють дихальні шляхи і, крім того, є їдкими для шкіри та очей. Розбавлені розчини H_2O_2 можуть безпечно розкладатися в присутності відповідних ферментів, відомих як каталаза пероксидази, які є у всіх аеробів.

Сполуки з одинарним зв'язком кисень-кисень класифікуються як пероксиди. Перекис водню є найпростішим представником цієї групи хімічних речовин. Він характеризується схильністю до розкладання, що зумовлено природою його нестабільного пероксидного зв'язку. Його необхідно зберігати зі стабілізатором, наприклад, ацетанілідом або подібними органічними речовинами. Розчин не є легкозаймистим, незалежно від його концентрації. Однак перекис водню є сильним окислювачем завдяки своїй хімічній структурі та неспареним електронам[7].

РОЗДІЛ 2
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА
.1 Методика синтезу CoFe_2O_4 з галовою кислотою.

Щ

Б

б

Вважені солі Co (6,202 г) та Fe (17,219 г) висипали у термостійкий стакан на 0 літр, в який налили дистильованої води 200 мілілітрів і поставили на магнітну мішалку за температури $60\text{ }^\circ\text{C}$ на 20 хвилин, для перемішування до розчинення $\text{Co(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ і $\text{Fe(NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ взяли у молярному співвідношенні в якому іони Co^{2+} та

т Через 20 хвилин додали галову кислоту 1 грам, яку використовували як модифікатор і ще перемішувати 20 хвилин. Приготували 250 мл 5М розчину

з

у Після цього бюретку закріпили над хімічним стаканом із розчином волей, перелили NaOH у бюретку, відкрили краник і поступово додавали по краплях 5М розчин NaOH (приблизно 1 крапля за 2-3 секунди) до $\text{pH}=11$ при температурі $80\text{ }^\circ\text{C}$ при постійному перемішуванні за допомогою магнітної мішалки протягом 2 годин. Спостерігалось утворення чорного порошку – ферит кобальту.

Після того, як додали сіль натрій гідроксиду, стакан накрили скляною кришкою і продовжували перемішувати при $80\text{ }^\circ\text{C}$ 2 години. Потім вимкнули нагрів і перемішування. Залишили гарячий розчин охолоджуватися на магнітній мішалці на ніч.

о На наступний день витягнули тіло обертання із стакана. На тілі обертання була частина магнітного порошку. Для очищення тіла обертання від магнітного порошку використовували дистильовану воду, якою поливали тіло обертання, порошок змився і залишився в стакані

к

о

р

Злили обережно у окрему посудину рідину із стакана так, щоб магнітний порошок залишився у стакані, під дно стакана поставили неодимовий магніт. Магніт може різко притягнутись до стакану, від чого стакан трісне, тому магніт обгортали в серветку.

Осад промивали по сім разів дистильованою водою, температура 20 °С. Поки стало pH=7 для видалення іонів NO₃ – та Na⁺.

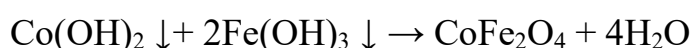
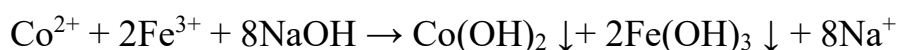
Використовували неодимовий магніт для відділення чорного порошку від води.

Далі залили водою порошок і перелили в міцні скляні стакани і поставили в ультразвукову баню на 480 секунд, тобто на 8 хвилин. Після ультразвуку частинки подрібнились і залишились без агрегатів.

Промитий осад висушили за температури 50-60 °С до постійної маси, на це пішло 4 доби. Зважили отриманий порошок і порахували вихід реакції. Маса виходу реакції становила 2,8831 г. $W = 2,8831/5 = 57,662\%$.

Потім отриманий порошок подрібнювали в ступці і вже подрібнений порошок перевіряли на магнітні властивості за допомогою магніту.

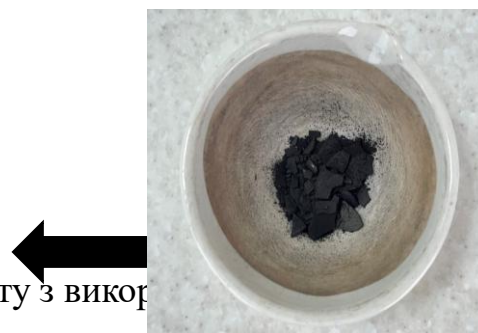
Реакції описуються наступними хімічними рівняннями:



У результаті синтезу утвориться чорний магнітний порошок CoFe₂O₄.



Рис. 1. Схема синтезу кобальтового фериту з викор
кислоти.



Для того, щоб отримати спечені зразки, готовий кобальтовий ферит з гисловою кислотою запікали в пічці при температурі 500 градусів Цельсія протягом декількох годин.

Методика дослідження каталітичної активності (розкладання H_2O_2)

В експерименті використовували пероксид водню, який попередньо підготували в лабораторії, використовували концентрації 5 мМ, 20 мМ, 50 мМ. Як використовувався зразок: 5 мМ – 115 мкл концентрованого пероксиду водню наливали в колбу об'ємом 40 мл і доливали дистильованої води до мітки, перемішували декілька хвилин і переливали в циліндр. Перед початком дослідження 2 мілілітра пероксиду водню змішували з 1,5 мілілітрами NH_4VO_3 та 1,5 мілілітрами H_2SO_4 , отриманий розчин переливали в кювету на 10 мм і перевіряли на спектрофотометрі, завчасно вимірювали розчин порівняння: в таку ж кювету наливали дистильовану воду, ставили в спектрофотометр та змінювали довжину хвилі на 470 нм.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Каталітична активність невідпалених феритів кобальту

Для визначення каталітичної активності невідпалених зразків фериту, синтезували зразки з різним вмістом галової кислоти, а саме 1%, 2% та 4%. Досліджували каталітичну активність феритів на реакції розкладання пероксиду водню різної концентрації: 5 мМ, 20 мМ, 50 мМ. Кінетичні дані були опрацьовані з використанням кінетичної моделі першого порядку.

Спочатку експериментально ми вимірювали концентрації пероксид водню в ході експерименту з невідпаленими каталізаторами CoFe_2O_4 .

З невідпаленими зразками каталізатора тривав 30 хвилин. Потім отримані результати перераховували у величини C/C_0 та $\ln(C/C_0)$. Після цього будували кінетичні криві з розкладу 5 мМ, 20 мМ та 50 мМ гідроген пероксиду на невідпалених каталізаторах кобальтового фериту.

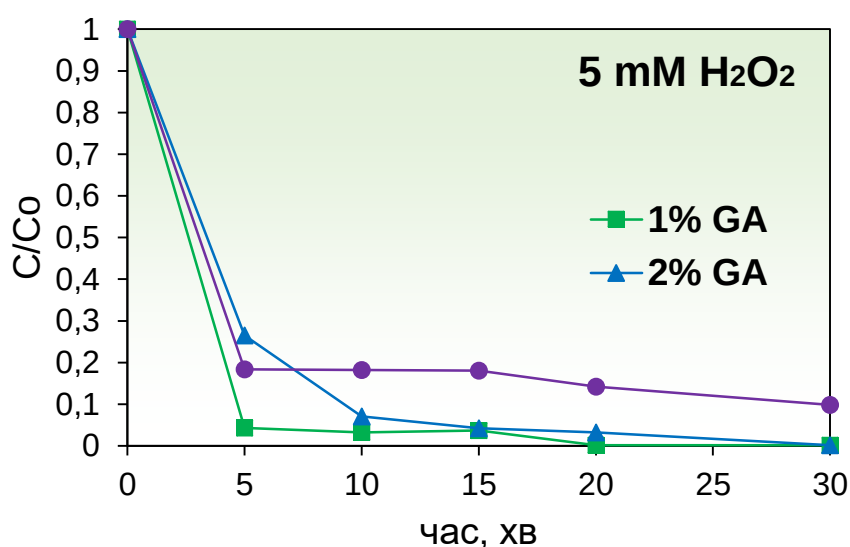


Рис. 2. Кінетичні криві розкладу 5 мМ гідроген пероксиду на невідпалених кобальт-феритних каталізаторах.

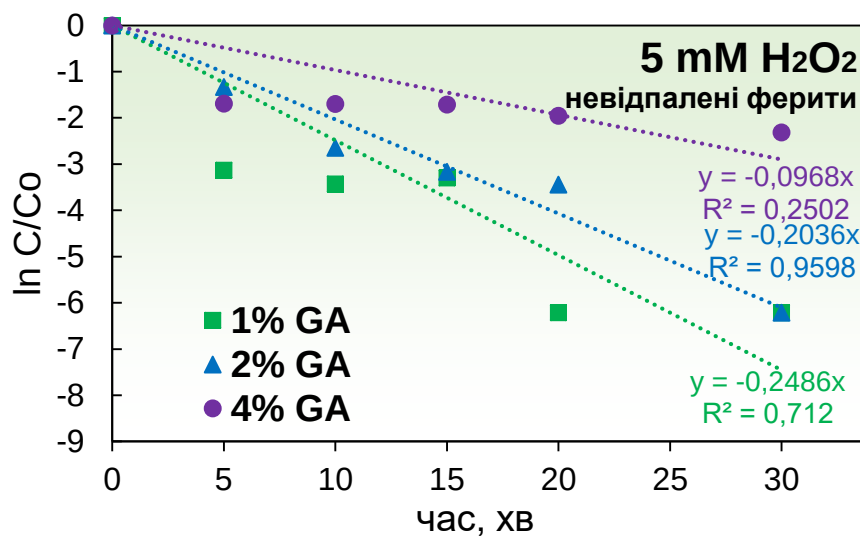


Рис. 3. Кінетична модель першого порядку для розкладу 5 мМ Н₂О₂ на невідпалених каталізаторах CoFe₂O₄.

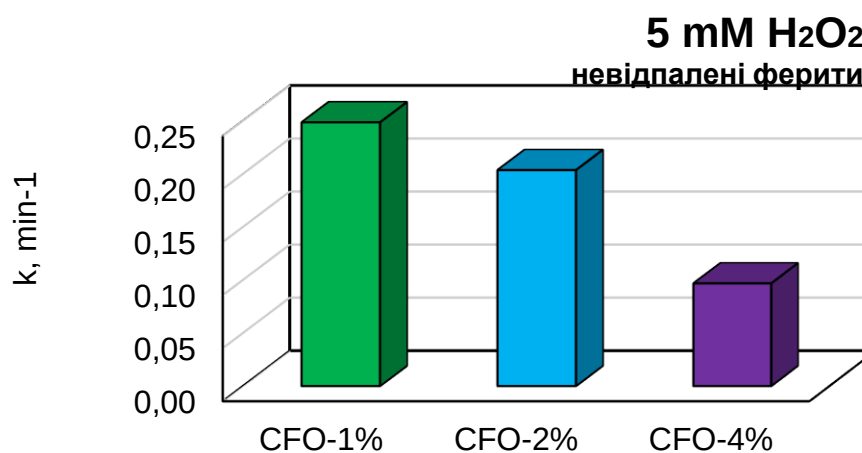


Рис. 4. Константи швидкості розкладу гідроген пероксиду 5 мМ на феритних каталізаторах.

З рисунку 4 ми бачимо, що в досліді з використанням 5 мМ пероксиду водню найактивнішим є зразок CoFe₂O₄-1%GA, значення константи швидкості для якого дорівнює 0,2486 хв⁻¹. Константа швидкості розкладу гідроген пероксиду на зразку CoFe₂O₄-2%GA рівна 0,2036 хв⁻¹. А найменш активним зразком є зразок CoFe₂O₄-4%GA: константа швидкості розкладу гідроген пероксиду рівна 0,0968 хв⁻¹.

Дослід для визначення каталітичної активності невідпалених зразків кобальтового фериту з використанням 20 мМ пероксиду водню виконувався в тій самій послідовності, що як і для досліду з використанням 5 мМ пероксиду водню. В результаті ми отримали константи швидкості розкладу гідроген пероксиду 20 мМ на феритних каталізаторах (рисунок 5). З рисунку ми бачимо, що значення константи швидкості зразку $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-2\%GA}$ є найбільшим, а саме $0,2042 \text{ хв}^{-1}$. Тобто цей зразок був найактивніший в даному експерименті. Зразок $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-1\%GA}$ має константу швидкості $0,1597 \text{ хв}^{-1}$. Зразок $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-4\%GA}$ має константу швидкості $0,0968 \text{ хв}^{-1}$. Це означає, що зразки $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-2\%GA}$ та $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-4\%GA}$ розкладали пероксид

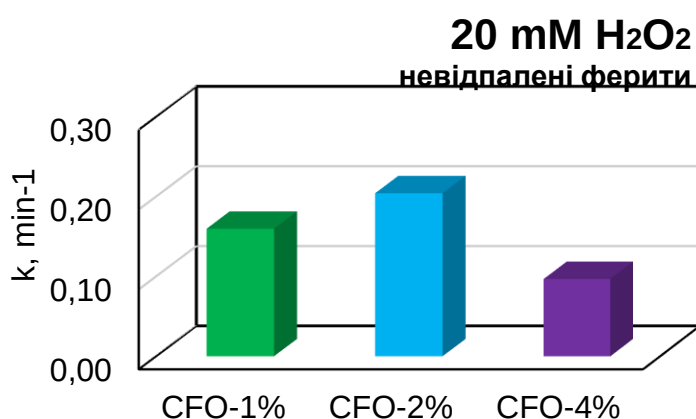


Рис. 5. Константи швидкості розкладу гідроген пероксиду 20 мМ на феритних каталізаторах.

В досліді з використанням 50 мМ H_2O_2 каталізатор $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-2\%GA}$ є найактивніший, і має константу швидкості $0,1463 \text{ хв}^{-1}$. $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-1\%GA}$ та ці каталізатори в даному досліді були менш активними.

Каталітична активність відпалених феритів кобальту

Каталітичну активність відпалених зразків фериту кобальту, синтезованого

з використанням галової кислоти концентрацією 1%, 2% та 4% досліджували на реакції розкладання гідроген пероксиду концентраціями 5 мМ, 20 мМ та 50 мМ. Дослід з відпаленими зразками проводили протягом години. Кінетичні дані опрацювали з використанням кінетичної моделі першого порядку.

Спочатку записувались експериментально виміряні концентрації пероксид водню в ході експерименту. В таблиці наведені концентрації пероксиду водню на початку експерименту, через 5 хвилин та через 60 хвилин. В кінці експерименту з $\text{CoFe}_2\text{O}_4/500 \text{ C-1\%GA}$, $\text{CoFe}_2\text{O}_4/500 \text{ C-2\%GA}$ та $\text{CoFe}_2\text{O}_4/500 \text{ C-4\%GA}$ залишилось пероксиду водню 0,035599 мМ, 0,02623 мМ та 0,234628 мМ відповідно.

Таблиця 1. Експериментальні та розрахункові дані з кінетики розкладу пероксиду водню в присутності відпалених зразків кобальтового фериту.

Зразки	С за 0хв, мМ	С за 5хв, мМ	С за 60 хв, мМ
$\text{CoFe}_2\text{O}_4/500 \text{ C-1\%GA}$	5	0,5	0,04
$\text{CoFe}_2\text{O}_4/500 \text{ C-2\%GA}$	5	0,7	0,02
$\text{CoFe}_2\text{O}_4/500 \text{ C-4\%GA}$	5	0,7	0,2

Далі отримані дані перераховували у величини C/C_0 та $\ln(C/C_0)$, розрахункові результати наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Розрахункові дані для кінетичної моделі першого порядку для розкладу гідроген пероксиду (5 мМ) в присутності невідпалених зразків

5 мМ H₂O₂

1% GA			2% GA			4% GA		
Час,хв	C/C0	ln(C/Co)	Час,хв	C/C0	ln(C/Co)	Час,хв	C/C0	ln(C/Co)
0	1	0	0	1	0	0	1	0
5	0,5	-0,618	5	0,6	-0,39	5	0,7	-0,3
15	0,3	-1,23	15	0,4	-0,908	15	0,6	-0,48
30	0,1	-2,23	30	0,1	-2,03	30	0,3	-1,0059
40	0,04	-3,09	40	0,07	-2,58	40	0,27	-1,29
60	0,03	-3,34	60	0,02	-3,64	60	0,23	-1,45

Після цього будували кінетичні криві розкладу 5 мМ пероксиду водню на відпалених зразках кобальтового фериту. З рисунку 3 ми бачимо, що каталізатор CoFe₂O₄500C-1%GA на початку експерименту ефективніше почав розклади пероксид. Через годину, в кінці експерименту результати розкладу H₂O₂ з використанням CoFe₂O₄ 500C-1%GA і CoFe₂O₄ 500C-2%GA зрівнялись і розклали пероксид водню майже на 100%. CoFe₂O₄ 500C-4%GA і на початку, і в кінці експерименту показав самі повільні результати.

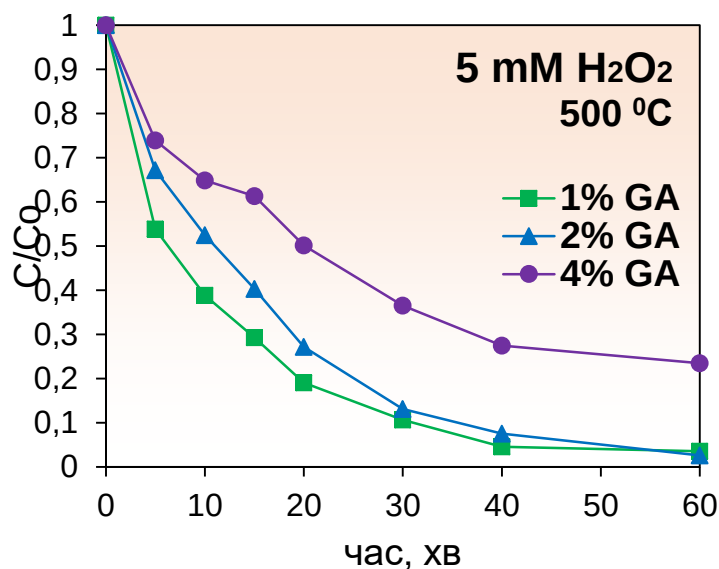


Рис. 6. Кінетичні криві розкладу 5 мМ гідроген пероксиду на відпалених кобальт-феритних каталізаторах.

Далі будувалась кінетична модель першого порядку для розкладу гідроген пероксиду 5 мМ на відпалених каталізаторах фериту кобальту.

Отримані дані виміряли у координатах $\ln(C/C_0)$ та τ (хв.), з цього були отримані константи швидкості розкладу H₂O₂.

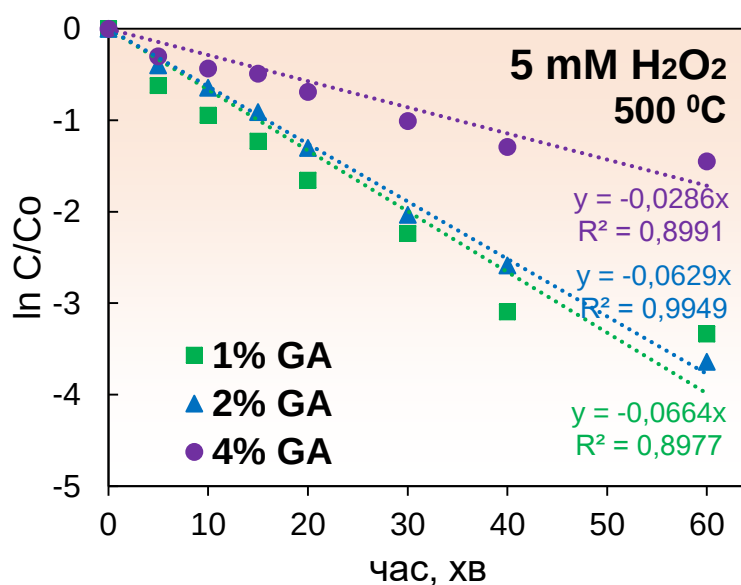


Рис. 7. Кінетична модель першого порядку для розкладу 5 мМ H₂O₂ на відпалених каталізаторах CoFe₂O₄.

Для зручності, константи швидкості розкладу гідроген пероксиду на відпалених феритних каталізаторах відтворили графічно. Як ми бачимо, константа швидкості розкладу пероксиду в досліді з CoFe_2O_4 500-1%GA дорівнює $0,0664 \text{ хв}^{-1}$ і є найбільшою в даному досліді.

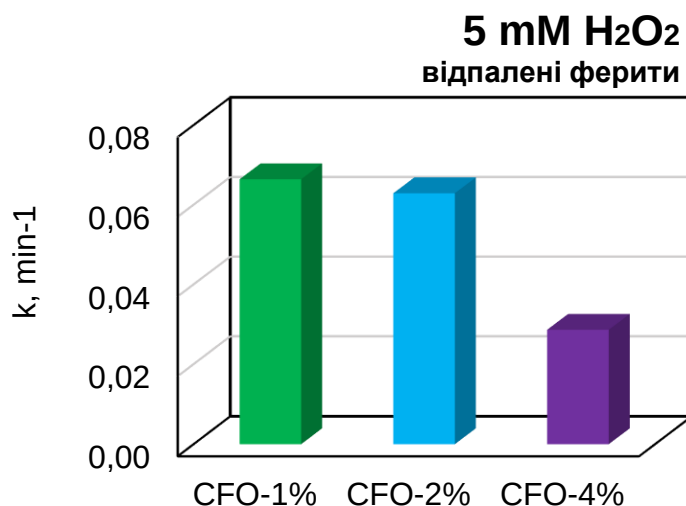


Рис. 8. Константи швидкості розкладу гідроген пероксиду на феритних каталізаторах.

Концентрація 20 мМ пероксиду водню через 5 хв змінилась на 0,707358 мМ, 0,588785 мМ та 0,852843 мМ в досліді з зразками CoFe_2O_4 500 С-експерименту концентрація пероксид водню зменшилась до 0,481605 мМ, 0,009346 мМ та 0,232441 мМ в зразках з 1%, 2% та 4% галової ксилоти відповідно.

Таблиця 3. Експериментальні та розрахункові дані з кінетики розкладу пероксиду водню в присутності відпалених зразків кобальтового фериту.

Зразки	C за 0хв, мМ	C за 5хв, мМ	C за 60 хв, мМ
CoFe ₂ O ₄ 500 C-1%GA	5	0,7	0,4
CoFe ₂ O ₄ 500 C-2%GA	5	0,6	0,009
CoFe ₂ O ₄ 500 C-4%GA	5	0,8	0,2

Так само, як і в досліді з 5 мМ пероксиду водню, ми перераховували у величини C/C_0 та $\ln(C/C_0)$.

Таблиця 4. Розрахункові дані для кінетичної моделі першого порядку для розкладу гідроген пероксиду (20 мМ) в присутності відпалених зразків

20 мМ H₂O₂

1% GA			2% GA			4% GA		
Час,хв	C/C ₀	ln(C/C ₀)	Час,хв	C/C ₀	ln(C/C ₀)	Час,хв	C/C ₀	ln(C/C ₀)
0	1	0	0	1	0	0	1	0
5	0,7	-0,34	5	0,5	-0,53	5	0,8	-0,16
15	0,56	-0,62	15	0,2	-1,22	15	0,6	-0,409
30	0,51	-0,67	30	0,1	-2,13	30	0,5	-0,68
40	0,5	-0,68	40	0,05	-2,96	40	0,4	-0,9
60	0,4	-0,73	60	0,009	-4,67	60	0,2	-1,45

Будували кінетичну криву розкладу 20 мМ гідроген пероксиду на відпалених феритах кобальту. З рисунку бачимо, що зразок з 2% галової кислоти краще справився з розкладанням пероксиду водню, повністю розклавши його. Зразок з 1% галової кислоти показав найгірші результати.

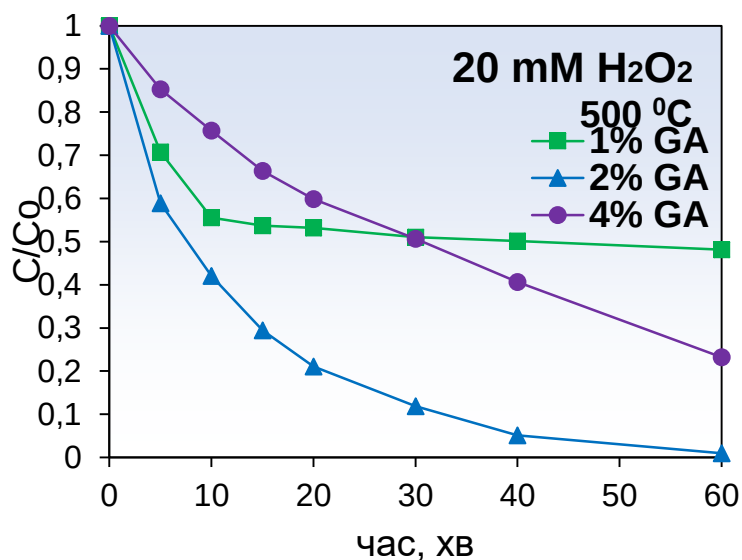


Рис. 9. Кінетичні криві розкладу 20 мМ гідроген пероксиду на відпалених кобальт-феритних каталізаторах.

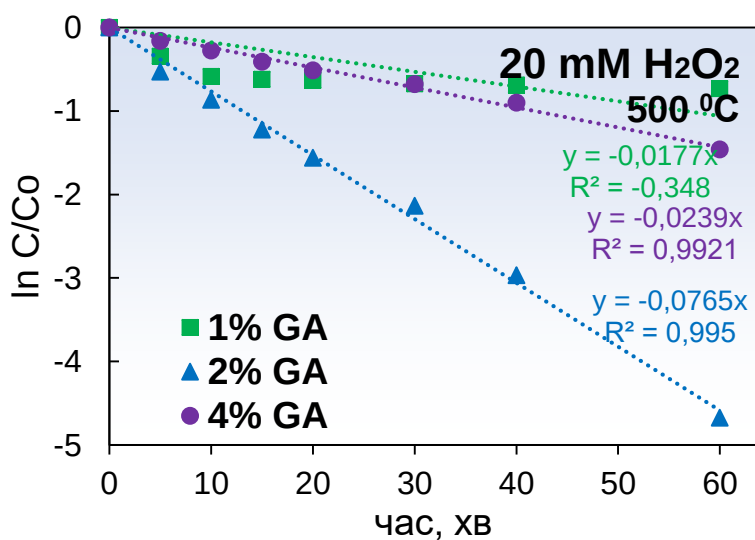


Рис. 10. Кінетична модель першого порядку для розкладу 20 мМ H_2O_2 на відпалених каталізаторах CoFe_2O_4 .

Значення константи швидкості суттєво більше для зразку CoFe_2O_4 500 C-4%GA значення константи швидкості дорівнюють $0,0177 \text{ хв}^{-1}$ та $0,0239 \text{ хв}^{-1}$ відповідно. Це свідчить про те, що каталізатор CoFe_2O_4 500 C-2%GA в даному експерименті є самим швидким, а каталізатор CoFe_2O_4 500 C-1%GA виявився самим повільним.

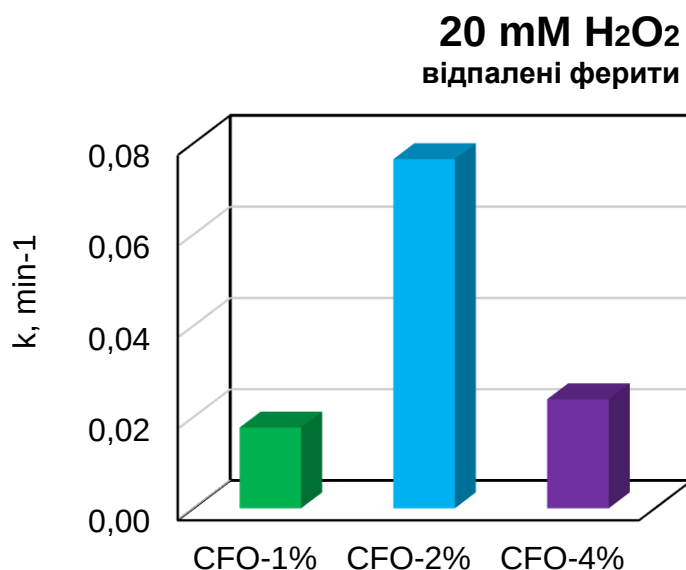


Рис. 11. Константи швидкості розкладу гідроген пероксиду на феритних каталізаторах.

З таблиці ми бачимо зміну значень концентрації пероксиду водню через 5 хвилин та 60 хвилин експерименту. Пероксид водню найкраще розклався за 60 хвилин в досліді з каталізатором з 2% галової ксилоти, а саме в кінці вийшло $0,026357 \text{ mM}$ пероксиду водню.

Таблиця 5. Експериментальні та розрахункові дані з кінетики розкладу пероксиду в присутності відпалених зразків кобальтового фериту.

Зразки	С за 0хв, мМ	С за 5хв, мМ	С за 60 хв, мМ
CoFe ₂ O ₄ 500 С-1%GA	5	0,7	0,05
CoFe ₂ O ₄ 500 С-2%GA	5	0,6	0,02
CoFe ₂ O ₄ 500 С-4%GA	5	0,7	0,1

Таблиця 6. Розрахункові дані для кінетичної моделі першого порядку для розкладу гідроген пероксиду (50 мМ) в присутності відпалених зразків

50 мМ H₂O₂

1% GA			2% GA			4% GA		
Час,хв	C/C0	ln(C/Co)	Час,хв	C/C0	ln(C/Co)	Час,хв	C/C0	ln(C/Co)
0	1	0	0	1	0	0	1	0
5	0,6	-0,36	5	0,6	-0,44	5	0,7	-0,28
15	0,3	-1,03	15	0,2	-1,26	15	0,6	-0,49
30	0,1	-1,73	30	0,08	-2,4	30	0,3	-0,96
40	0,09	-2,38	40	0,05	-2,97	40	0,2	-1,32
60	0,05	-2,97	60	0,02	-3,63	60	0,1	-1,63

З рисунку бачимо, що на початку експерименту всі каталізатори мали хороший результат, вже в кінці експерименту, каталізатор з 2% галової кислоти та каталізатор з 1% галової кислоти краще розклали пероксид водню.

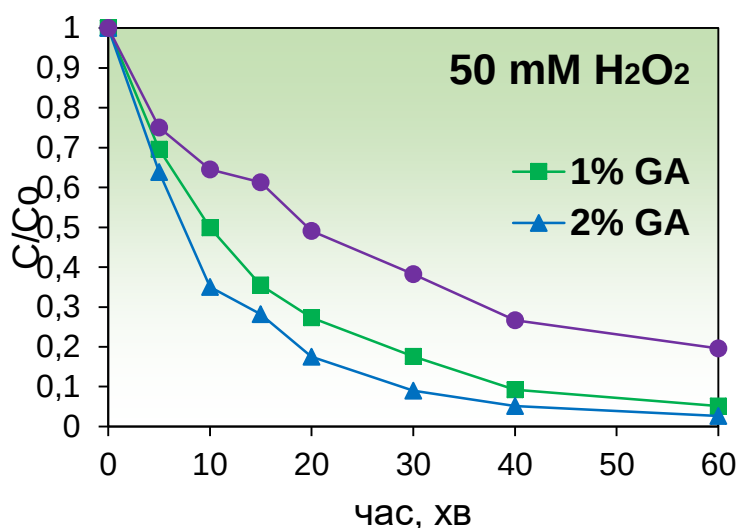


Рис. 12. Кінетичні криві розкладу 50 мМ гідроген пероксиду на відпалених кобальт-феритних каталізаторах.

Будуємо кінетичну модель першого порядку для розкладу 50 мМ H₂O₂ на відпалених каталізаторах CoFe₂O₄.

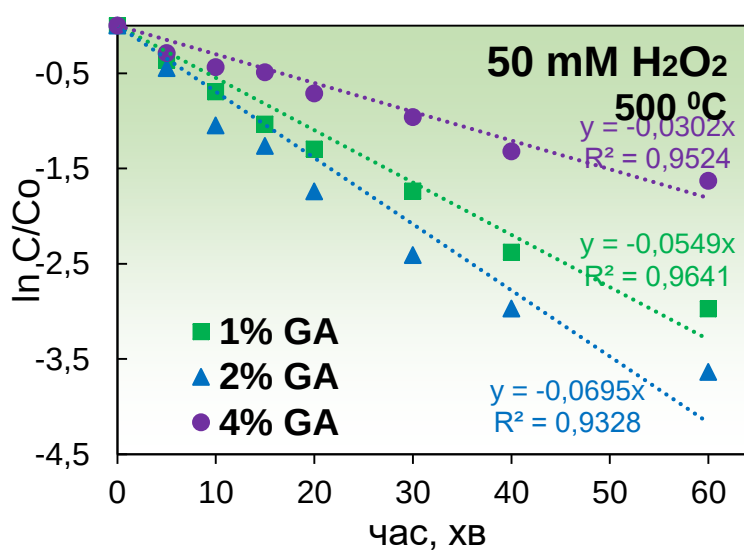


Рис. 13. Кінетична модель першого порядку для розкладу 50 мМ H₂O₂ на відпалених каталізаторах CoFe₂O₄.

З рисунку видно, що найбільша константа швидкості, яка вказує на те, що каталізатор був найшвидший в даному досліді, дорівнює $0,0695 \text{ хв}^{-1}$, в зразка 500 С-2%GA. Каталізатор CoFe_2O_4 500 С-1%GA має константу швидкості $0,0302 \text{ хв}^{-1}$.

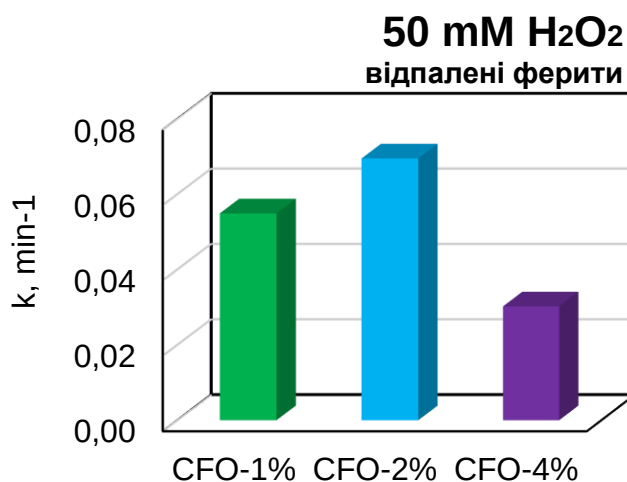


Рис. 14. Константи швидкості розкладу гідроген пероксиду на феритних каталізаторах.

. Порівняння відпалених та не відпалених зразків фериту кобальту.

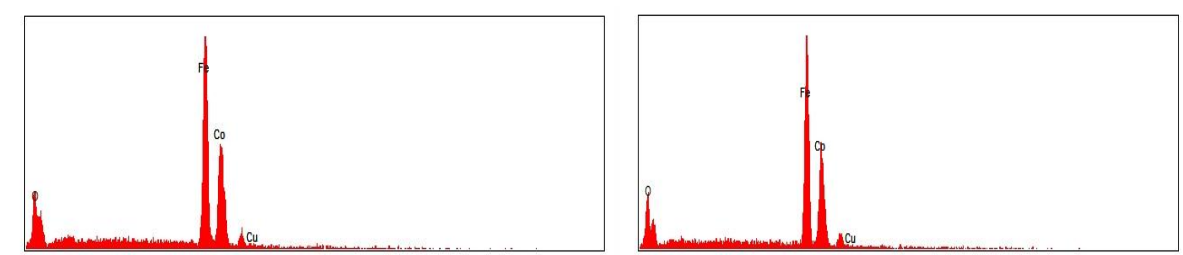


Рис. 15. Спектри енергодисперсійного аналізу, який підтверджує наявність кобальту та феруму у складі зразку CoFe_2O_4 -1%GA.

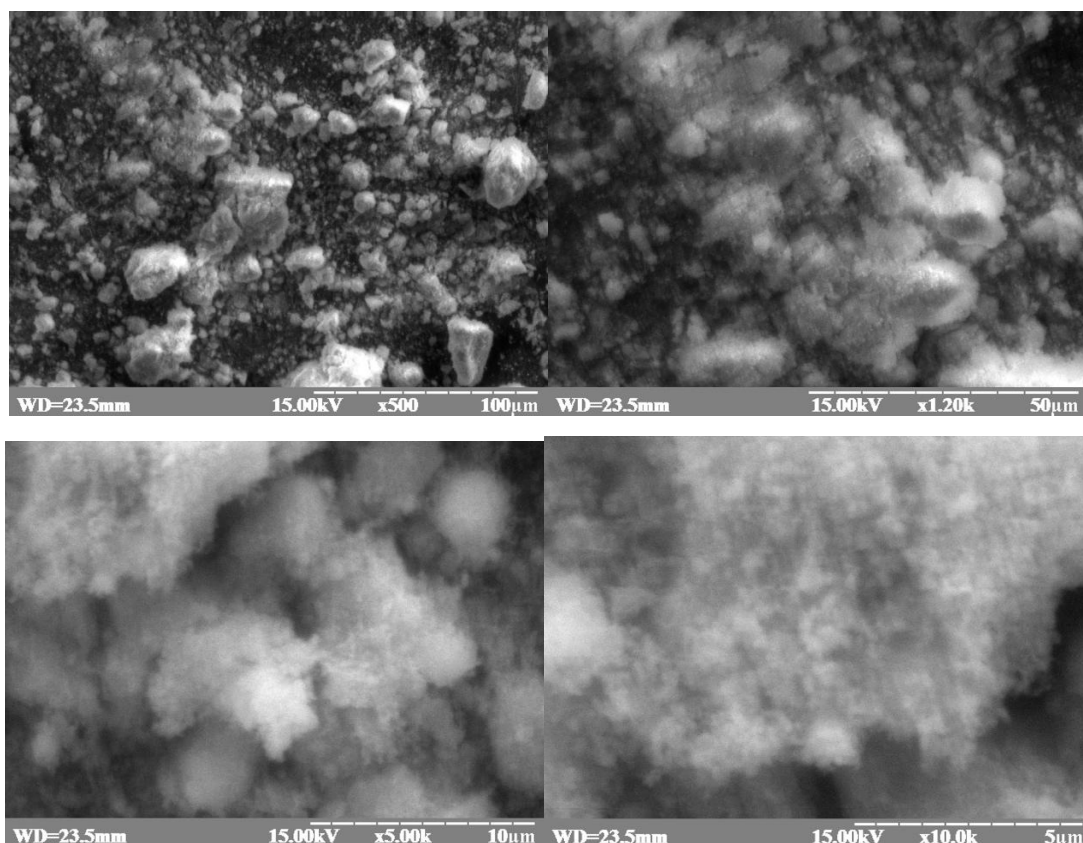


Рис. 16. Зображення синтезованого зразку кобальтового фериту з використанням галової кислоти CoFe_2O_4 -1%GA під різним збільшенням мікроскопу.

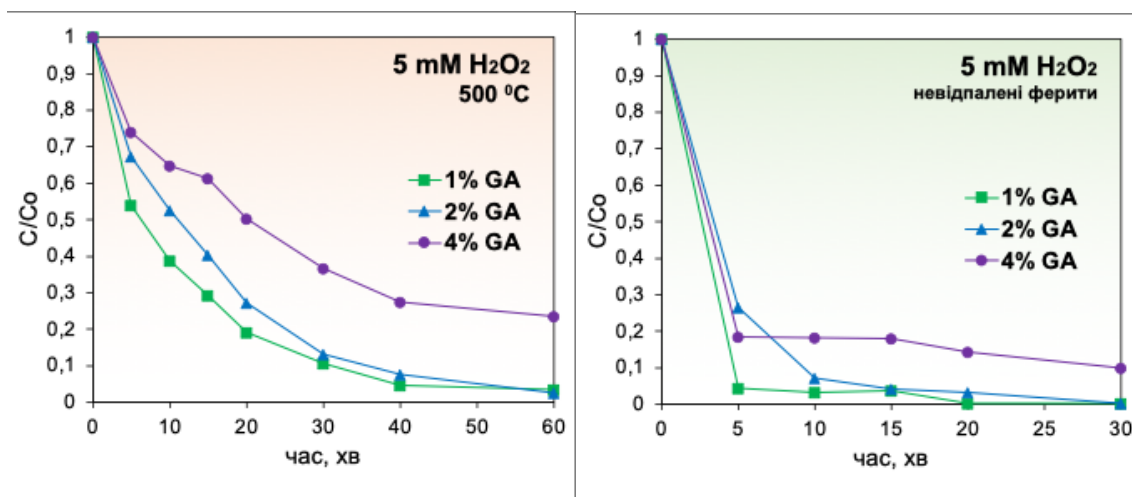


Рис. 17. Порівняння відпалених та не відпалених зразків кобальтового фериту в досліді 5 мМ H_2O_2 .

Як ми бачимо з рисунку, ще на початку експерименту невідпалені зразки почали швидше розкладати пероксид водню, найшвидшими були

невідпалені каталізатори з 1% та 4% галової кислоти. Вже в кінці експерименту, результати розкладу 5 мМ гідроген пероксиду для каталізаторів CoFe_2O_4 500 C-1%GA, CoFe_2O_4 500 C-2%GA та CoFe_2O_4 - розклали пероксид водню, відпалені показали результати наближені до нуля. Як ми можемо бачити, відпалені зразки довше розкладали пероксид водню, тому дослід з відпаленими зразками відбувався 60 хвилин, з не відпаленими зразками в двічі менше, тобто 30 хвилин. Самим повільним і найменш активним після дослідів виявився зразок CoFe_2O_4 500 C-4%GA.

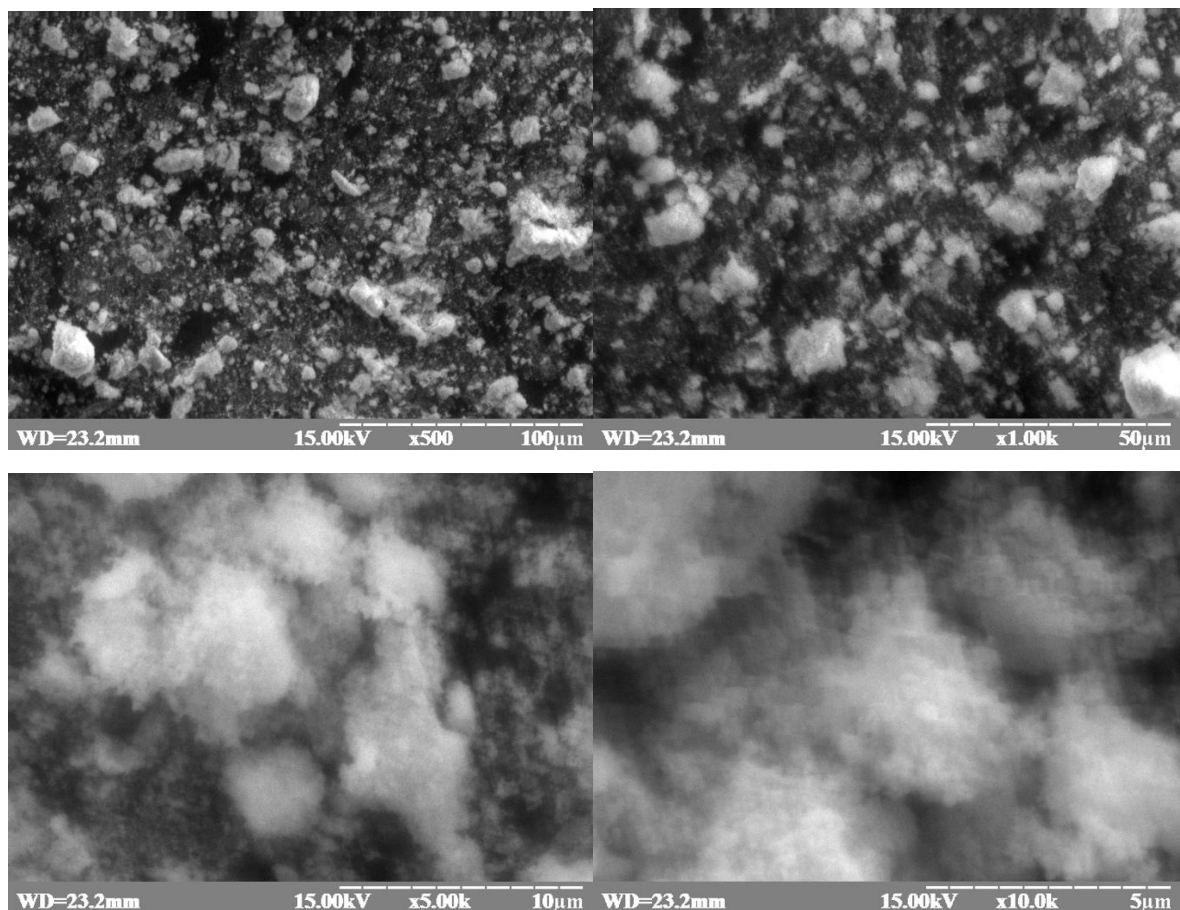


Рис. 18. Зображення синтезованого зразку кобальтового фериту з використанням галової кислоти CoFe_2O_4 -2%GA під різним збільшенням мікроскопу.

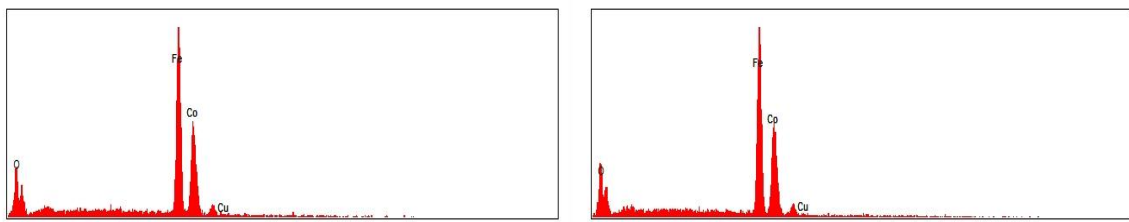


Рис. 19. Спектри енергодисперсійного аналізу, який підтверджує наявність кобальту та феруму у складі зразку $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-2\%GA}$.

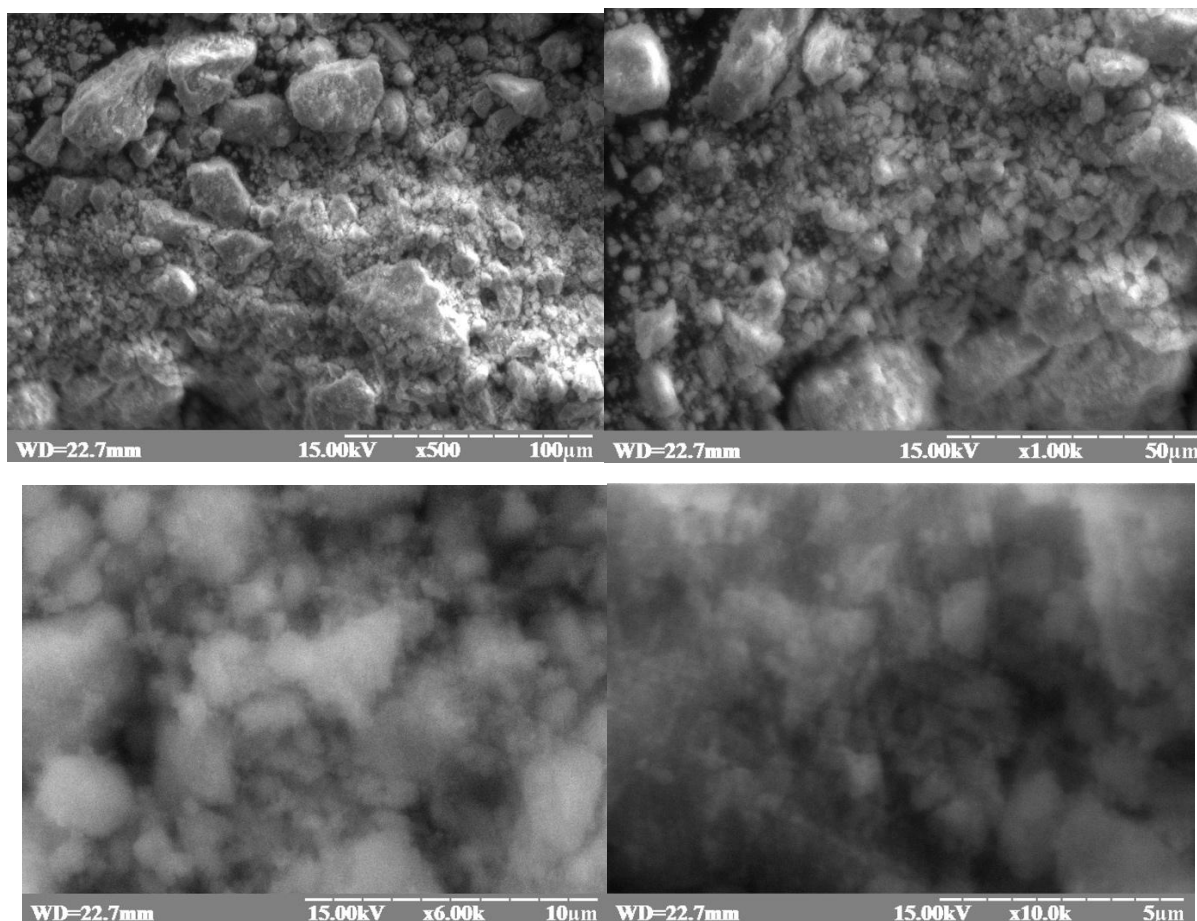


Рис. 20. Зображення синтезованого зразку кобальтового фериту з використанням галової кислоти $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-4\%GA}$ під різним збільшенням мікроскопу.

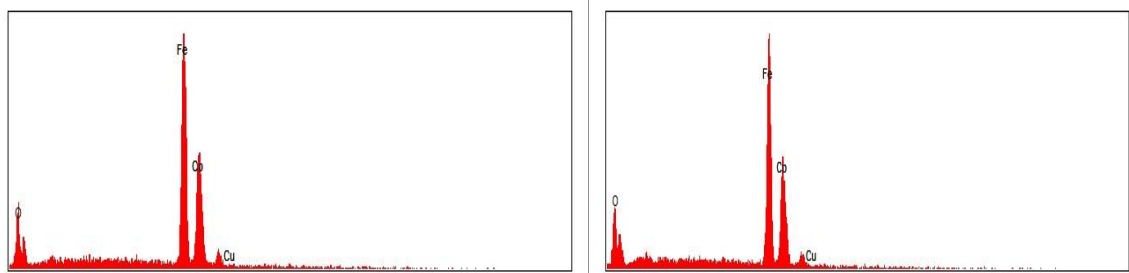


Рис. 21. Спектри енергодисперсійного аналізу, який підтверджує наявність кобальту та феруму у складі зразку $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-4\%GA}$.

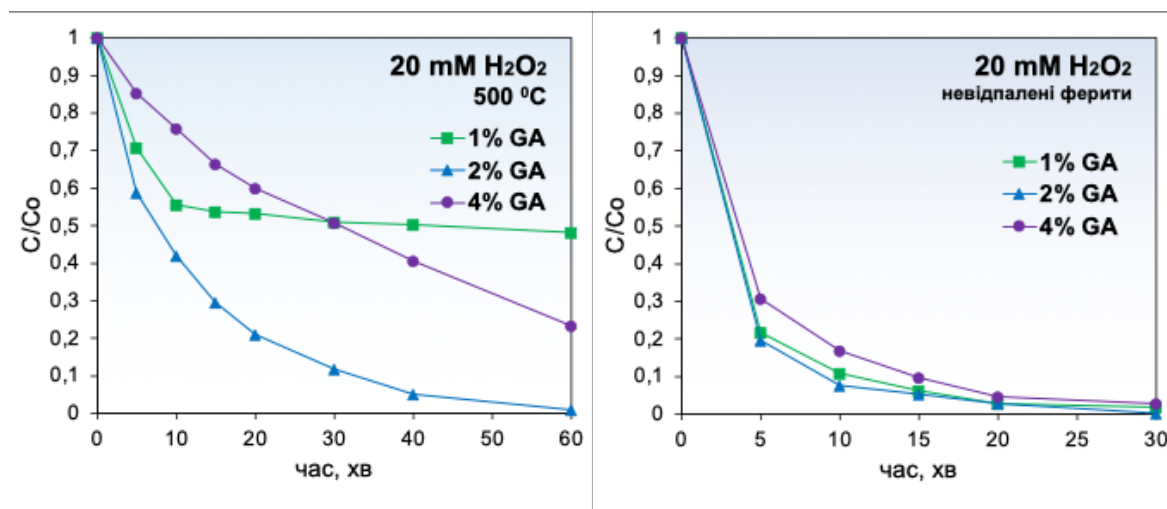


Рис. 22. Порівняння відпалених та не відпалених зразків кобальтового фериту в досліді 20 mM H₂O₂.

З рисунку бачимо, що найгірші результати має зразок $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{ 500 C-1\%GA}$, який розклав пероксид водню тільки на половину. Найшвидшим виявився зразок $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-2\%GA}$. Вже в кінці експерименту зразки $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{ 500 C-пероксид водню}$ повністю, гірший результат показав зразок $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{ 500 C-}$

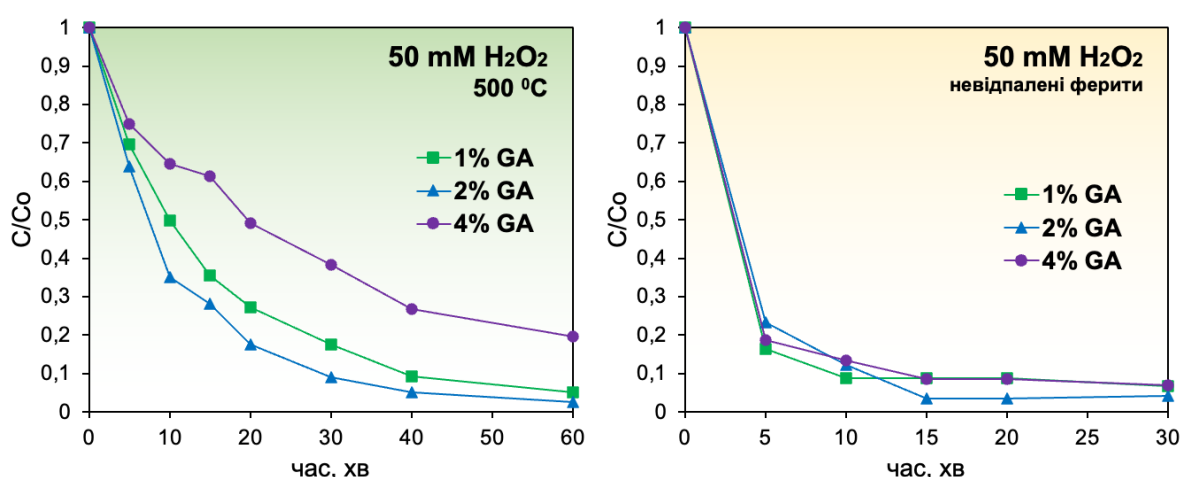


Рис. 23. Порівняння відпалених та не відпалених зразків кобальтового фериту в досліді 50 mM H₂O₂.

З рисунку бачимо, що на початку експерименту невідпалені зразки були швидші, розклавши пероксид водню за 5 хвилин на 80%. Самим не активним зразком виявився CoFe_2O_4 500 C-4%GA, який і на початку, і в кінці експерименту мав найгірші результати з 6 зразків.

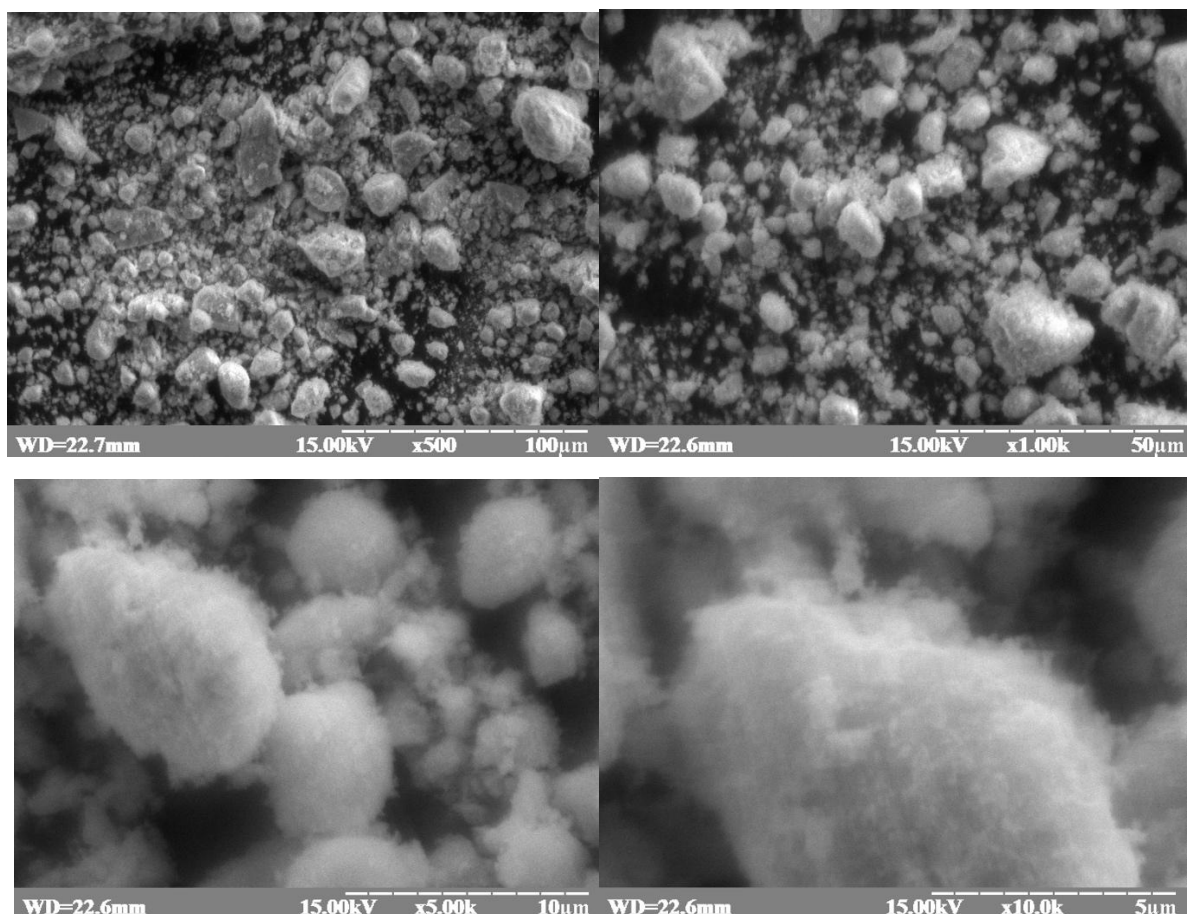


Рис. 24. Зображення синтезованого зразку кобальтового фериту з використанням галової кислоти CoFe_2O_4 500C-1%GA під різним збільшенням мікроскопу.

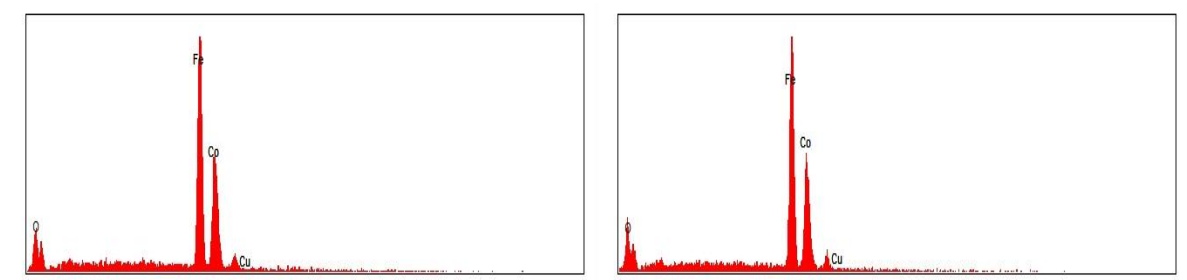


Рис. 25. Спектри енергодисперсійного аналізу, який підтверджує наявність кобальту та феруму у складі зразку CoFe_2O_4 500C-1%GA.

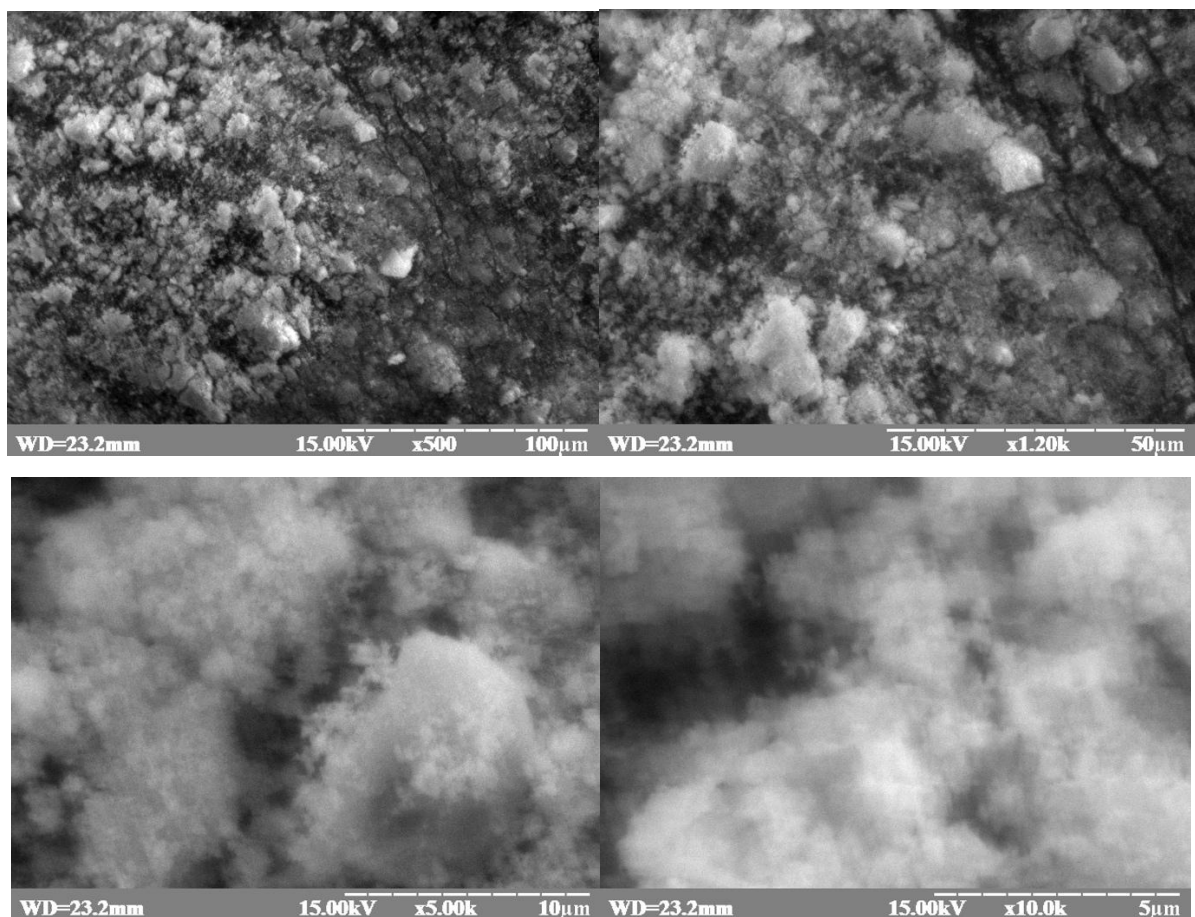


Рис. 26. Зображення синтезованого зразку кобальтового фериту з використанням галової кислоти CoFe_2O_4 500C-2%GA під різним збільшенням мікроскопу.

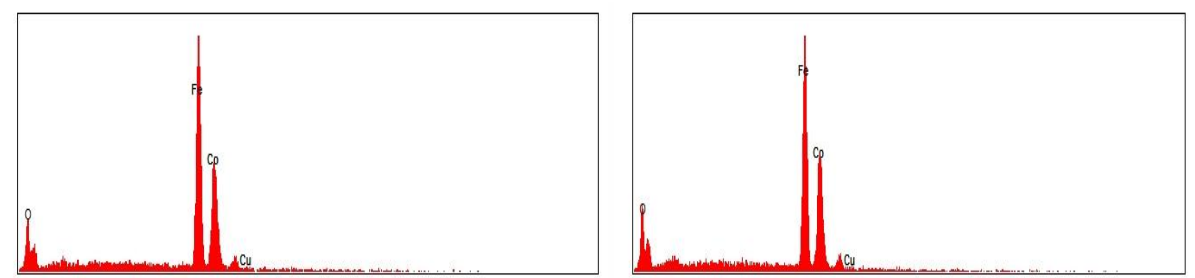


Рис. 27. Спектри енергодисперсійного аналізу, який підтверджує наявність кобальту та феруму у складі зразку CoFe_2O_4 500C-2%GA.

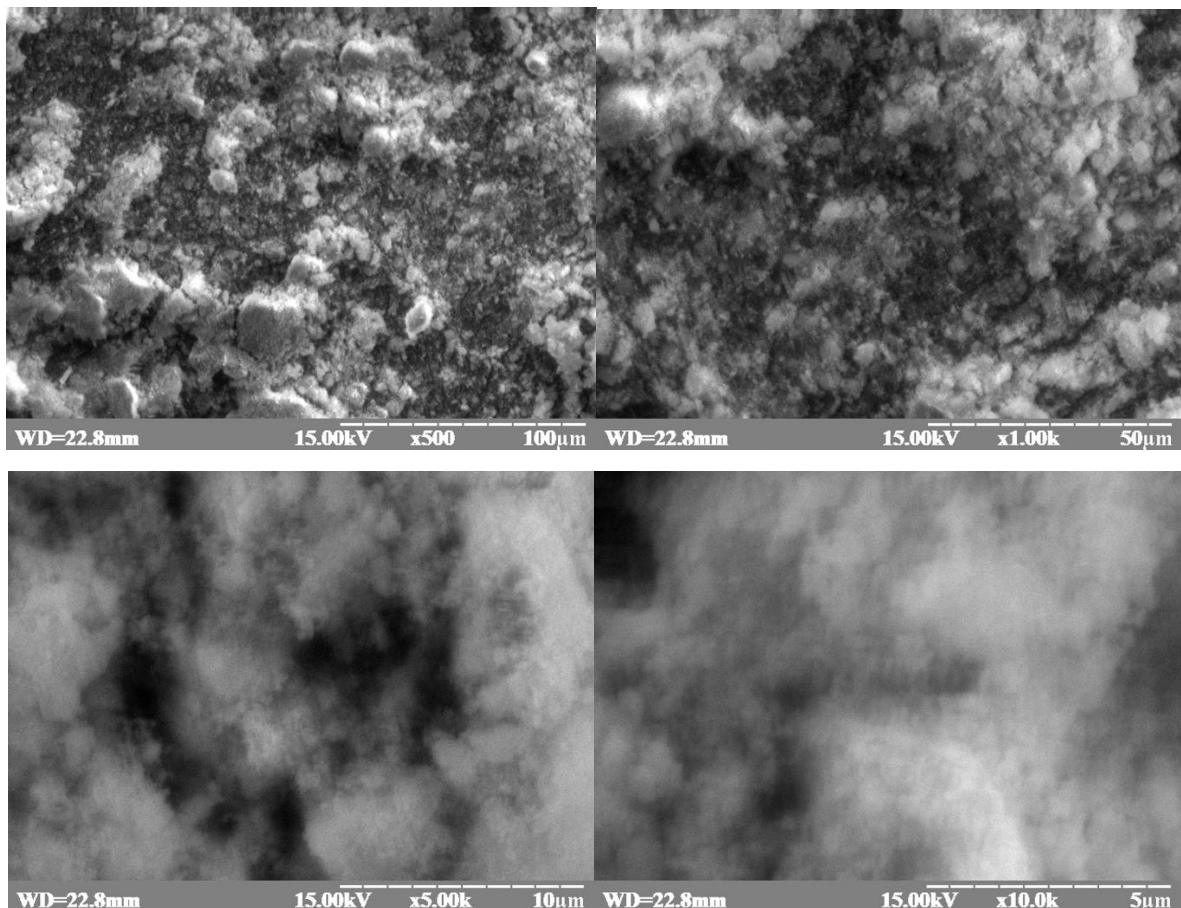


Рис. 28. Зображення синтезованого зразку кобальтового фериту з використанням галової кислоти CoFe_2O_4 500C-4%GA під різним збільшенням мікроскопу.

На рис. 16,18,20,24,26,28 наведено мікрофотографії поверхні синтезованих зразків кобальтового фериту, отриманих з використанням різних концентрацій галової кислоти, як до термічної обробки, так і після її проведення при температурі 500 °C. Зображення були

отримані за допомогою сканувального електронного мікроскопа при збільшенні x1000–x1200.

На зразках без термічної обробки (A–C) спостерігається поступове зменшення розміру частинок зі збільшенням концентрації галової кислоти. Зразок CoFe_2O_4 -1%GA характеризується вираженим агломеруванням та наявністю великих, нерівномірних частинок. У зразку CoFe_2O_4 -2%GA частинки стають більш дрібними та рівномірно розподіленими, з менш

вираженою агломерацією. Зразок CoFe_2O_4 -4%GA демонструє ще менший розмір частинок, з чітко вираженою пористістю структури, що свідчить про ефективний вплив більшої кількості галової кислоти на контроль морфології.

Після термічної обробки при 500 °C (D–F) структура частинок змінюється: спостерігається їх часткова перекристалізація та формування більш округлих гранул. У зразку CoFe_2O_4 -500 °C-1%GA частинки набувають чіткішої форми, хоча агломерація ще помітна. Зразок CoFe_2O_4 -500 °C-2%GA має більш однорідну структуру з рівномірно розподіленими частинками середнього розміру. Найбільш рівномірна та дрібнозерниста морфологія спостерігається у зразку CoFe_2O_4 -500 °C-4%GA, що свідчить про збереження позитивного ефекту високої концентрації галової кислоти навіть після термообробки. Таким чином, збільшення вмісту галової кислоти під час синтезу сприяє зменшенню розміру частинок та зниженню рівня агломерації. Проведення термообробки, у свою чергу, забезпечує покращення кристалічної структури, при цьому зразки з високим вмістом галової кислоти (4%) зберігають дрібнодисперсний характер, що є перспективним для подальшого використання у функціональних наноматеріалах.

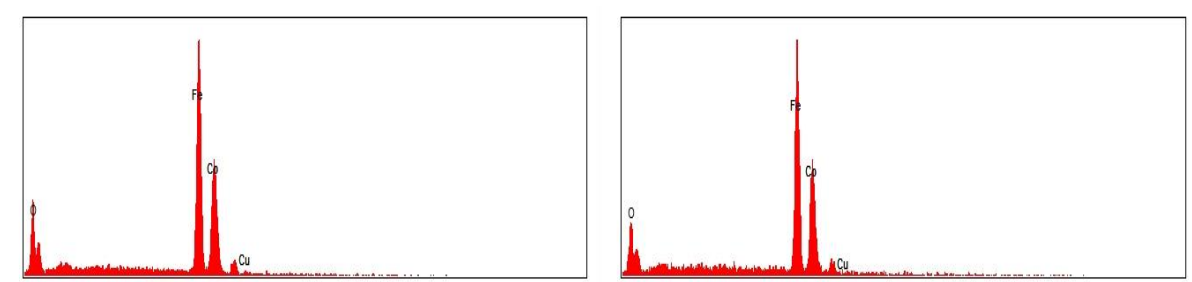


Рис. 29. Спектри енергодисперсійного аналізу, який підтверджує наявність кобальту та феруму у складі зразку CoFe_2O_4 500C-4%GA.

ВИСНОВКИ

Синтезовано кобальтовий ферит з використанням галової кислоти різної концентрації (1, 2 та 4%) як модифікатора та досліджено її вплив на каталітичні властивості кобальтового фериту в процесі розкладу гідроген пероксиду. Зображення скануючої електронної мікроскопії поверхні кобальтового фериту продемонстрували позитивний вплив галової кислоти на його морфологію: підвищення вмісту галової кислоти від 1 до 4% сприяє зменшенню розміру частинок, зниженню рівня агломерації та покращення дисперсності.

2. Проведено порівняння відпалених та невідпалених зразків кобальтових феритів з використанням галової кислоти. Виявлено, що невідпалені зразки є активніші та швидше і краще розкладають пероксид водню за час досліді. В досліді з 5 мМ H_2O_2 зразок CoFe_2O_4 -1%GA за 5 хвилин експерименту розклав H_2O_2 на 95%. Самим повільним виявився зразок CoFe_2O_4 500 C-

3. Для опису процесу розкладання H_2O_2 в присутності відпалених і невідпалених кобальтових феритів використовували кінетичну модель першого порядку. В досліді з 50 мМ пероксиду водню, самим повільним виявився зразок CoFe_2O_4 500 C-4%GA, який має константу швидкості $0,0302 \text{ хв}^{-1}$, а найбільшу константу мав зразок CoFe_2O_4 500 C-2%GA, константа швидкості якого дорівнює $0,0695 \text{ хв}^{-1}$.

Список використаних джерел:

- A. Akbar, M. Bhavani Lakshmi, T. K. Das, and M. Ghosh, “Spinel ferrites in the photocatalytic and adsorptive remediation of dyes and heavy metals: A
- S. J. Salih and W. M. Mahmood, “Review on magnetic spinel ferrite (MFe₂O₄) nanoparticles: From synthesis to application,” *Heliyon*, vol. 9, e
- v
- ou El-Nour, “A facile one-pot γ -radiation formation of gum arabic-stabilized cobalt ferrite nanoparticles as an efficient magnetically retrievable heterogeneous catalyst,” *RSC Adv.*, vol. 15, no. 12, pp. 9119–
- ,
- Joseph, R. Karayat, S. Vasudevan, and U. G. Panicker, “Molybdenum incorporated cobalt ferrite nanoparticles as heterogeneous activators of peroxymonosulfate for efficient rhodamine B degradation: Catalytic studies and mechanistic investigations,” *Chem. Eng. J.*, vol. 512, p. 162578, May
- [5] C. Macedo, P. C. Costa, and F. Rodrigues, “Bioactive compounds from *Actinidia arguta* fruit as a new strategy to fight glioblastoma,” *Food Res.*
- ,
- “Gallic acid: A promising bioactive agent for food preservation and sustainable packaging development,” *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol.
- [7] P. Pędziwiatr, F. Mikołajczyk, D. Zawadzki, K. Mikołajczyk, and A. Bedka, “Decomposition of hydrogen peroxide - kinetics and review of chosen catalysts,” *Acta Innov.*, no. 26, pp. 45–52, Jan. 2018, doi: