

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-57>

УДК 504

ТЕТЕРЯТНИКОВ ГЛІБ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0008-0753-5055>

e-mail: glibtetryatnikov@gmail.com

КАРВАЦЬКИЙ АНТОН

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-2421-4700>

e-mail: a.karvatskii@gmail.com

ІВАНЕНКО ОЛЕНА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-6838-5400>

e-mail: olenka.vasaynovich@gmail.com

КОРІНЕНКО БОГДАН

Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України

<https://orcid.org/0009-0001-7581-5656>

e-mail: b.korinenko.b@gmail.com

КАТАЛІТИЧНИЙ ПІРОЛІЗ ВІДХОДІВ ПОЛІЕТИЛЕНУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ: ФАЗОВИЙ РОЗПОДІЛ ПРОДУКТІВ І ХІМІЧНИЙ СКЛАД

Динаміка світового виробництва пластику відображає зростання потреб суспільства у цьому матеріалі. Однак збільшення обсягів виробництва породжує проблему збільшення пластикових відходів, які у вигляді мікропластику накопичуються у навколишньому середовищі. Тому актуальними є дослідження, спрямовані на утилізацію таких відходів з пріоритетним використанням продуктів утилізації як цінної вторинної сировини.

Метою роботи є дослідження каталітичного піролізу відходів поліетилену високої щільності з урахуванням можливостей підвищення ефективності процесу та отримання альтернативних джерел енергії.

Дослідження проводилось в два етапи. На першому етапі готувалися каталізатори (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Ni/MgO , Ni/CaO , цеоліт Y у водневій формі, Аскарит). На другому етапі було реалізовано процес піролізу на лабораторному реакторі з датчиками температури і ЛАТРОм. Газова фаза була досліджена за допомогою методу хроматографічного аналізу, який підтвердив високу чутливість складу газоподібної продукції до типу каталізатора.

Проведений аналіз розподілу піролізних продуктів за фазовим складом (газ, рідина, твердий залишок) та газохроматографічний аналіз складу газової фази дали змогу оцінити якісні та кількісні характеристики кожної фракції. Встановлено, що вихід основних продуктів, зокрема піролізної рідини (у межах 63–71%), газів (12–21%) та твердого залишку (11–21%), добре узгоджується з існуючими даними, що відображають умови повільного піролізу поліетилену в присутності твердих каталізаторів.

Це дає підстави стверджувати, що каталітичний піроліз може розглядатися як перспективна альтернатива для переробки полімерних відходів. Це дозволить отримувати цінні газоподібні, рідкі та тверді вуглеводневі продукти, придатні для подальшого енергетичного або технологічного використання.

Ключові слова: пластикові відходи; поліетилен високої щільності; вторинна сировина; продукти утилізації; каталізатори; хроматографічний аналіз.

HLIB TETERIATNYKOV, ANTON KARVATSKII, OLENA IVANENKO

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

BOHDAN KORINENKO

V.P. Kukhar Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry of the NAS of Ukraine

CATALYTIC PYROLYSIS OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE WASTE: PHASE DISTRIBUTION OF PRODUCTS AND CHEMICAL COMPOSITION

The dynamics of global plastic production reflects the growing needs of society for this material. However, the increase in production volumes creates the problem of increasing plastic waste, which in the form of microplastics enters the environment. Therefore, research aimed at the recycling of such waste with the priority use of recycling products as valuable secondary raw materials is relevant.

The aim of this research is to study the catalytic pyrolysis of high-density polyethylene waste, taking into account the possibilities of increasing the efficiency of the process and obtaining alternative energy sources.

The study was conducted in two stages. At the first stage, catalysts were prepared (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Ni/MgO , Ni/CaO , zeolite Y in hydrogen form, ascarite). At the second stage, the pyrolysis process was implemented in a laboratory pyrolysis reactor with a temperature sensor and a laboratory autotransformer. The gas phase was investigated using a chromatographic analysis method, which confirmed the high sensitivity of the composition of the gaseous product to the type of catalyst.

The analysis of the distribution of pyrolysis products by phase composition (gas, liquid, solid residue) and gas chromatographic analysis of the gas phase composition made it possible to assess the qualitative and quantitative characteristics of each fraction. It was found that the yield of the main products, in particular pyrolysis liquid (within 63–71%), gases (12–21%) and solid residue (11–21%), is in good agreement with existing data reflecting the conditions of slow pyrolysis of polyethylene in the presence of solid catalysts.

This gives grounds to argue that catalytic pyrolysis can be considered as a promising alternative for the processing of polymer waste. This will allow obtaining valuable gaseous, liquid and solid hydrocarbon products suitable for further energy or technological use.

Keywords: plastic waste; high-density polyethylene; secondary raw materials; recycling products; catalysts; chromatographic analysis.

Стаття надійшла до редакції / Received 04.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Тетерятников Гліб, Карвацький Антон, Іваненко Олена, Коріненко Богдан

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Світове виробництво пластику демонструє стабільну тенденцію до зростання, що є наслідком як науково-технічного прогресу, так і зростаючих потреб суспільства. На рис. 1 зображено щорічні обсяги виробництва пластику у світі в період з 1950 по 2050 рік. Ділянка графіка з 1950 до 2025 року базується на фактичних статистичних даних, тоді як період з 2026 по 2050 рік представляє прогнозне зростання. Згідно з наведеними даними, у 2022 році глобальне виробництво пластику сягнуло близько 409 мільйонів тонн, а у 2025 році – 436 млн тонн. Подальший прогноз свідчить про поступове зростання до 590 млн тонн у 2050 році.

Однак, таке зростання пластикових відходів супроводжується серйозними екологічними викликами. Збільшення виробництва пластику прямо корелює зі зростанням обсягів пластикових відходів, значна частина яких потрапляє у навколишнє середовище – зокрема, в океани, ґрунти та атмосферу у вигляді мікропластику. Це створює навантаження на природні екосистеми та становить загрозу для здоров'я людини. Отже, динаміка, представлена на графіку, не лише свідчить про економічну важливість полімерних матеріалів, але й акцентує увагу на необхідності впровадження екологічно орієнтованих стратегій – таких як переробка, повторне використання та розвиток біорозкладних матеріалів. У цьому контексті полімерні відходи набувають додаткового значення як потенційно цінна вторинна сировина.

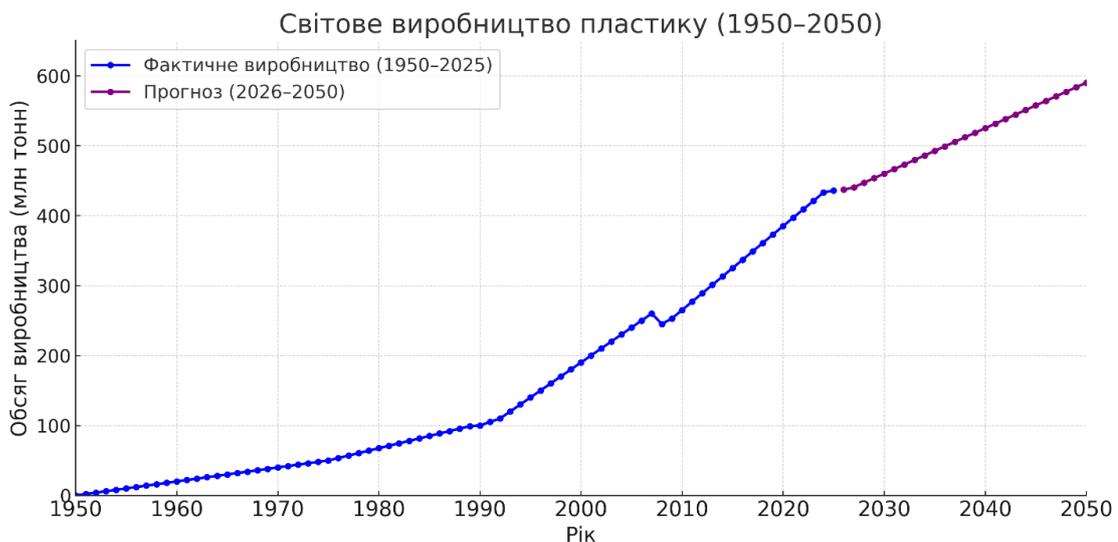


Рис. 1. Динаміка світового виробництва пластику у 1950–2050 роках: фактичні дані (1950–2025) та прогноз (2026–2050) на основі даних [1, 2]

Поліетилен високої щільності (ПЕВЩ) є одним із найпоширеніших видів термопластів, що активно застосовується в упаковці, трубопроводах, ємностях та інших побутових і промислових виробках. Через свою хімічну стійкість і високу інертність до зовнішніх впливів ПЕВЩ практично не піддається природному біологічному розкладу, що спричиняє його накопичення у довкіллі. Традиційні методи утилізації, зокрема захоронення або спалювання, супроводжуються низкою екологічних ризиків, включаючи утворення токсичних викидів та втрату потенційно цінної сировини. У цьому контексті постає нагальна потреба в розробці ефективних технологій термічної переробки ПЕВЩ, які б забезпечували не лише утилізацію відходів, але й отримання альтернативних енергоносіїв або цінних хімічних сполук.

ПЕВЩ практично не піддається біологічному розкладу, і його природне розпадання в навколишньому середовищі потребує значного часу – від кількох десятків до сотень років. Згідно з оцінками, ПЕВЩ-пляшки можуть розкладатися до 116 років у морських умовах та до 500 років у ґрунті або на суші [3]. Ці дані вказують на надзвичайну стійкість ПЕВЩ до природних процесів деградації, що становить екологічне навантаження й обґрунтовує пошук сучасних технологій переробки, таких як термохімічний або каталітичний піроліз, які здатні прискорити перетворення пластикових відходів у корисні продукти.

Серед сучасних технологій утилізації полімерних відходів особливу перспективу демонструє каталітичний піроліз, це процес термічного розкладу полімерів у безкисневому середовищі за участі або без участі каталізатора, який дає змогу отримувати корисні продукти з високим енергетичним потенціалом, зокрема піролізний газ, рідкі вуглеводні та вуглецевий залишок.

Полімерні відходи розглядаються як потенційно цінна вторинна сировина для виробництва відновлюваних енергоносіїв. Використання каталізу дає можливість активізувати процеси розкладу полімерів при нижчих температурах, порівняно з піролізом без каталізаторів, що, у свою чергу, сприяє збільшенню виходу цільових продуктів та зменшенню утворення токсичних або небажаних викидів у довкілля. Каталіз сприяє інтенсифікації процесу деструкції полімерних матеріалів, підвищує вихід рідких та газоподібних продуктів розкладу, а також дає змогу знизити енергетичні витрати на реалізацію термохімічної переробки [4, 5].

Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз наукових джерел свідчить про зростаючий інтерес до каталітичного піролізу як ефективного методу термічної утилізації ПЕВЩ. Основна увага дослідників зосереджена на вивченні впливу різних каталізаторів, оптимізації температурних параметрів, а також оцінці складу та властивостей продуктів, отриманих у результаті переробки. Значна частина робіт також спрямована на підвищення селективності процесу та зменшення енергоспоживання.

У роботі [6] проведено експериментальне дослідження термічного та каталітичного піролізу поліпропілену (ПП) з використанням природного цеоліту як каталізатора. При температурі 460 °C було досягнуто високого виходу рідких вуглеводнів (63 %) та 37 % синтез-газу без утворення твердого залишку, що свідчить про ефективне розщеплення полімерного ланцюга і термічну стабільність каталізатора. Результати підтверджують доцільність використання цеолітових систем для отримання високоякісного палива з полімерних відходів.

У дослідженні [7] розглянуто піроліз ПЕВЩ з каталізатором на основі зольного залишку вугільного пилу (Coal Fly Ash). Було показано, що при відповідних умовах процесу вихід рідкої фракції становить 46,4 %, газовой – 33,6 %, а вуглецевого залишку – 20 %. Хоча ефективність отримання рідких вуглеводнів дещо нижча, ніж у цеолітових систем, такий підхід вирізняється низькою вартістю та можливістю повторного використання каталізатора, що робить його привабливим для промислового застосування.

У роботі [8] каталітичний піроліз ПЕВЩ у трубчастому реакторі був досліджений з використанням каталізатора на основі титанату барію (BaTiO_3). При цьому, за температури 350 °C високий вихід рідких вуглеводнів був досягнутий – 80,88 %, що значно перевищує типові результати для термічного піролізу. Газова фракція складала 12,32 %, а вміст вуглецевого залишку – лише 5,71 %, що вказує на високу селективність реакції в бік утворення паливних компонентів і ефективність використання цього каталізатора BaTiO_3 .

У дослідженні [9] вивчено вплив кальцію карбонату (CaCO_3) як твердого каталізатора при піролізі ПЕВЩ. За температури 460 °C вихід рідких продуктів склав 52,27 %, газових – 16,03 %, а твердої фази – 11,7 %. Каталізатор на основі CaCO_3 продемонстрував помірну активність, однак сприяв зниженню температури реакції та покращенню розкладу полімерного ланцюга без утворення значної кількості коксу, що робить його потенційно придатним для використання в маловитратних технологіях переробки полімерів.

У дослідженні [10] було проаналізовано піроліз ПЕВЩ у періодичному реакторі при температурі 450 °C протягом 60 хв. Отримані результати продемонстрували високий вихід піролізної рідини – 74,5 %, що свідчить про ефективність процесу навіть за відносно помірної температури. Газова фракція становила лише 5,8 %, а твердий залишок – 19,7 %. В цьому дослідженні використовувався періодичний піролізний реактор який працює за циклічним принципом: кожного разу в камеру завантажуються окрема порція матеріалу, після чого система нагрівається до заданої температури, і відбувається реакція термічного розкладу. Такий тип обладнання дає змогу гнучко контролювати параметри процесу і тому він особливо ефективний на лабораторному або маломасштабному рівні.

У роботі [11] досліджено процес повільного піролізу ПЕВЩ у реакторі з псевдозрідженим шаром при температурі 500 °C. Умови експерименту дали можливість досягти надзвичайно високого виходу піролізної рідини – 85 %, що свідчить про ефективність рівномірного теплообміну в псевдозрідженому середовищі. Газова фракція становила 10 %, а вміст твердого залишку – лише 5 %, що підтверджує низький вихід побічних продуктів. Цей підхід демонструє значний потенціал для масштабованої переробки полімерних відходів у цінні паливні компоненти за рахунок інтенсифікації масо- і теплопереносу.

У дослідженні [12] розглянуто повільний піроліз ПЕВЩ у періодичному реакторі при температурі 440 °C протягом 120 хв. Було досягнуто 74 % виходу рідкої фракції, тоді як газоподібні продукти склали 9 %, а твердий залишок – 17 %. Такий температурно-часовий режим забезпечив значний рівень розщеплення полімерного ланцюга при помірному енергоспоживанні. Отримані результати свідчать про ефективність контрольованого повільного нагрівання для максимізації виходу рідких вуглеводнів із збереженням якості кінцевих продуктів.

На промисловому рівні піроліз полімерів здійснюється за допомогою різних технологічних підходів. Серед них – установки з ротаційними барабанами (технології PYROPLEQ, ConTherm, PKA), печі з розплавленим теплоносієм (NRC, PYROMELT), реактори з циркулюючим киплячим або псевдозрідженим шаром (AKZO, NKT, BP), а також класичні піролізні печі, як-от BASF [13–15].

Попри досягнуті позитивні результати, у сфері каталітичного піролізу поліетиленових відходів зберігається низка нерозв'язаних наукових і технологічних проблем. Зокрема, потребують уточнення оптимальні типи каталізаторів для максимізації виходу рідкої фази, механізми впливу фізико-хімічних властивостей сировини (таких як ступінь забруднення чи наявність домішок), а також шляхи зниження енергозатрат та стабілізації складу кінцевих продуктів.

Формулювання цілей статті

Метою статті є дослідження процесу повільного каталітичного піролізу ПЕВЩ як ефективного методу глибокої термічної переробки полімерних відходів, вивчення механізмів піролізу, впливу різних типів каталізаторів на вихід рідких, газоподібних і твердих речовин. Зокрема, передбачається дослідити вплив різних типів каталізаторів (Ni/MgO , Ni/CaO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , HY , Аскарит), а також температурних параметрів, на кількісний і якісний склад газоподібних, рідких та твердих продуктів, з подальшим аналізом властивостей одержаних фракцій. Також увагу приділено оцінці енергетичного потенціалу каталітичного піролізу та екологічної безпеки з позицій сталого ресурсного використання.

Виклад основного матеріалу

Існує кілька основних типів піролізу, які класифікуються відповідно до умов проведення процесу, зокрема швидкості нагрівання, температурного режиму, тривалості реакції та характеру утворених продуктів. Найбільш поширеними є повільний, швидкий та надшвидкий піроліз. Кожен із цих підходів має свої особливості та застосовується залежно від бажаного продукту (рідина, газ або твердий залишок).

Повільний або звичайний піроліз здійснюється при низькій швидкості нагріву – зазвичай менш як 100 К/хв ($\approx 0,1\text{--}2\text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$) та температурах близько 400–500 °С, з тривалим часом перебування твердих речовин у реакторі. Цей режим сприяє максимальному виходу твердого залишку і меншій кількості летких продуктів. Повільний піроліз часто застосовується для утворення активованого вугілля, вуглецевих залишків або для стабільного знешкодження відходів [16].

Швидкий піроліз передбачає високу швидкість нагрівання – понад 1000 К/хв, короткий час перебування та температури близько 500 °С. Основна мета – отримання максимальної кількості рідких продуктів (біоолії, піролізної рідини). Цей режим вимагає ефективного та швидкого охолодження летких речовин для запобігання вторинним реакціям [17].

Надшвидкий піроліз, який іноді також називають миттєвий піроліз, – це процес, який здійснюється при екстремально високій швидкості нагрівання (понад 100 °С/с або навіть 1000 °С/с) і дуже короткій тривалості реакцій (менше 0,5 с). Він забезпечує утворення високої частки газоподібних продуктів та піролізної рідини, але вимагає точного контролю теплопередачі й часто використовується у випадках піролізу біомаси [18].

У процесі термічного розкладу полімерів основними шляхами руйнування макромолекул є випадкове розщеплення основного ланцюга та розрив по кінцевих групах. У разі випадкового розриву ланцюги руйнуються уздовж усієї довжини із утворенням фрагментів різної молекулярної маси, що веде до зменшення середньої молекулярної маси та формування летких продуктів – метилів, олефінів тощо.

На початковому етапі для проведення процесу піролізу були підготовлені відповідні катализатори:

1. Катализатор Fe_2O_3 – готовий лабораторний реагент виробництва Thermo Fisher Scientific, хімічна чистота якого становить понад 95%. Будь-яких попередніх обробок катализатора не виконували.
2. Катализатор і Fe_3O_4 – стандартний хімічний реагент виробництва Thermo Fisher Scientific, хімічна чистота якого становить понад 97%. Додаткової обробки перед використанням цей матеріал не потребував.
3. Катализатор Ni/MgO із вмістом 50% Ni готували шляхом змішування нітрату нікелю, нітрату магнію та 4 г лимонної кислоти в 40 см³ води. Після повного розчинення компоненти випаровували та прожарювали за високої температури протягом кількох годин.
4. За схожою методикою з Ni/MgO , також був підготовлений Ni/CaO .
5. Одержання цеоліту Y у водневій формі (HY) досягалось шляхом перетворення початкового цеоліту NaY у водневу форму, перемішуванням з розчином, промиванням водою та сушінням протягом 12 год.
6. Аскарит – азбест, просочений плавленням содіум хлоридом. Застосовується без попередньої обробки або активації.

На другому етапі відбувалось завантаження подрібненого ПЕВЦ в лабораторний піролізний реактор періодичної дії (рис. 2.).

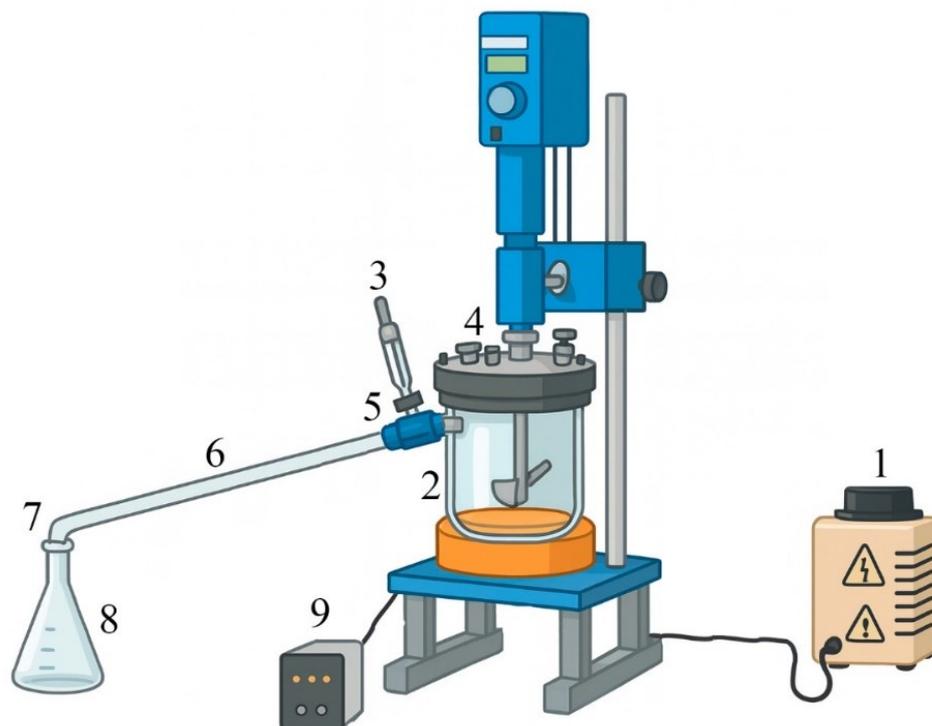


Рис. 2. Лабораторний піролізний реактор: 1 – ЛАТР; 2 – реактор; 3, 4 – термомпари; 5 – ректифікаційна колонка; 6 – повітряний холодильник; 7 – алонж; 8 – приймач; 9 – датчики температури

Лабораторний реактор (рис. 2.) складається з таких основних елементів: ЛАТР (1) – регулятор напруги для живлення нагрівника, реактор (2) – сталева герметична камера, в якій відбувається піроліз, термопари (3) для контролю температури, ректифікаційна колона (4), повітряний холодильник (5), алонж (6), приймальний балон (7), датчики температури (8). Для ініціювання процесу піролізу температура поступово підвищувалася за допомогою латра, який регулює електричну напругу, що подається на нагрівальний елемент реактора.

Для кожного дослідження використовували 100 г подрібненого поліетилену високої щільності та 2,5 г каталізатора (Ni/MgO, Ni/CaO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, аскарит, НУ). Процес проводили в герметичному реакторі без доступу кисню. Нагрів здійснювався за допомогою ніхромової спіралі, підключеної через ЛАТР, що давало змогу точно контролювати температуру. Температура піролізу становила 450 °С, а тривалість реакції – від 7 год 40 хв до 9 год 45 хв залежно від каталізатора. Після завершення піролізу установка охолоджувалася до кімнатної температури, після чого з реактора вилучали твердий залишок та зважували на лабораторних вагах. Усі фракції, отримані в процесі піролізу, направлялися на подальший аналіз. Газова фаза була досліджена за допомогою методу хроматографічного аналізу.

Під час експерименту досліджувалися такі параметри як температура реактора і пари в залежності від каталізатора, графіки яких зображені на рис. 3 і 4 відповідно.

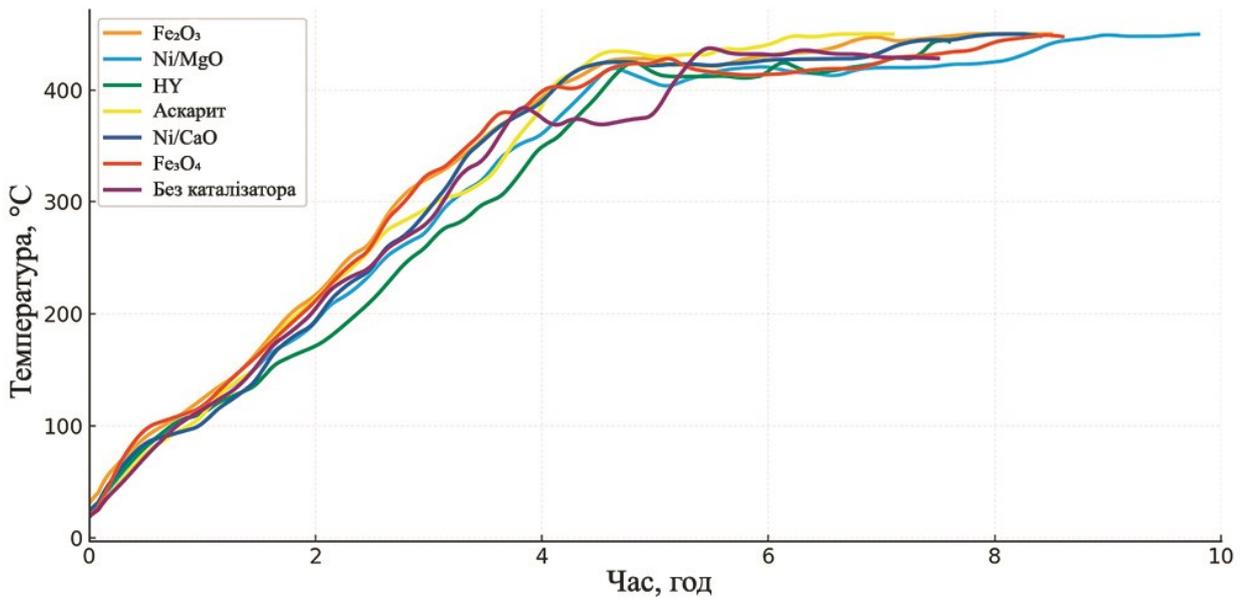


Рис. 3. Вплив каталізатора на температуру реактора в процесі піролізу ПЕВЩ

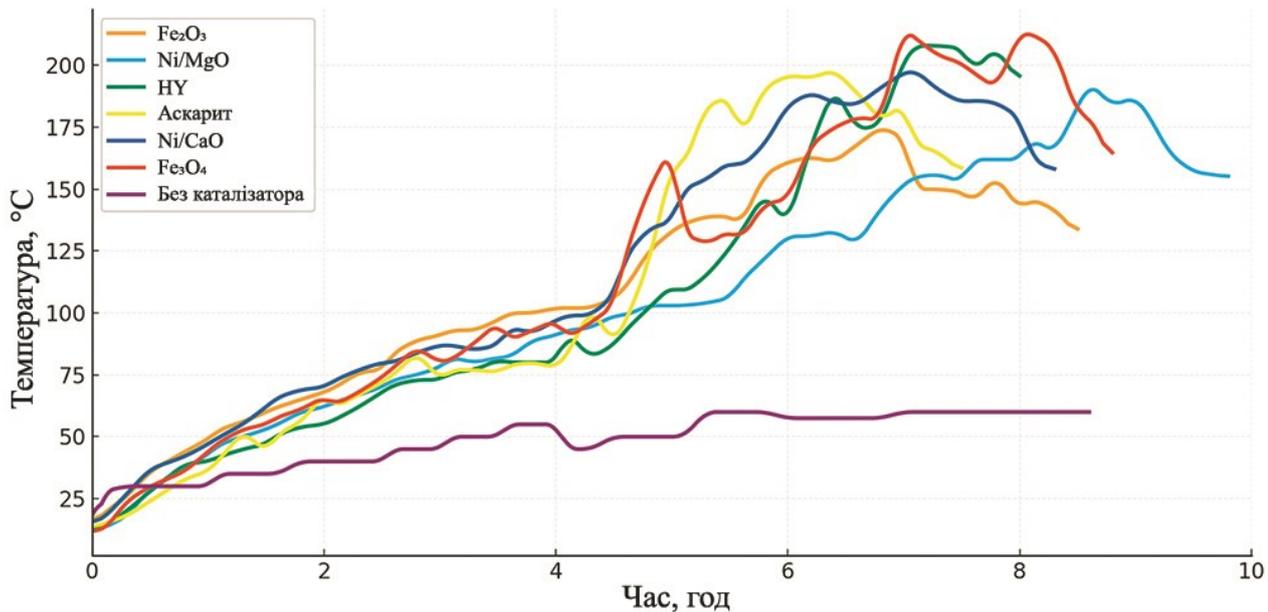


Рис. 4. Вплив каталізатора на температуру пари в процесі піролізу ПЕВЩ

Наступним кроком проведено порівняльний аналіз результатів піролізу ПЕВЩ у присутності різних каталізаторів: НУ, Fe₂O₃, Fe₃O₄, Ni/MgO, Ni/CaO та Аскарит. Одержано розподіл масових фракцій отриманих продуктів – піролізної рідини, газу, залишку та втрат – що дає можливість оцінити ефективність кожного каталізатора з точки зору виходу рідких і газоподібних продуктів, а також ступеня конверсії ПЕВЩ (табл. 1).

Таблиця 1

Розподіл піролізних продуктів при термодеструкції ПЕВЦ у присутності каталізаторів

Каталізатор	Рідина, %	Твердий залишок, %	Газ, %	Втрати, %
H ₂	63,9	20,6	12,5	3,0
Fe ₃ O ₄	65,7	11,4	19,9	3,0
Ni/MgO	66,3	16,1	14,5	3,1
Ni/CaO	67,2	17,1	12,6	3,1
Fe ₂ O ₃	64,3	11,9	20,8	3,0
Аскарит	71,0	13,0	13,0	3,0
Без каталізатора	69,7	25	2,3	3,0

Найвищий вихід рідкої фракції отримано при використанні Аскариту – близько 71 %, що свідчить про високу селективність цього каталізатора до утворення рідких вуглеводнів. Решта каталізаторів забезпечили схожий рівень виходу рідини в межах 64–67 %, демонструючи загалом ефективне перетворення ПЕВЦ на рідкі продукти піролізу. Найменший вміст твердого залишку спостерігався при застосуванні Fe₃O₄ (11,4 %) та Fe₂O₃ (11,9 %), що свідчить про високу ефективність цих каталізаторів у розщепленні полімеру. Більшість інших каталізаторів – Ni/MgO, Ni/CaO та Аскарит – забезпечили утворення твердої фракції в межах 13–17 %. Найбільший залишок зафіксовано при використанні H₂ – 20,6 %, це свідчить про те, що каталізатор H₂ сприяє утворенню більшої кількості твердих вуглецевих залишків.

Найбільша кількість газоподібних продуктів утворюється при піролізі з Fe₂O₃ (20,8 %) та Fe₃O₄ (19,9 %). Ці каталізатори, очевидно, сприяють глибшому розкладу ПЕВЦ до легких газів. Інші каталізатори забезпечують нижчий газовий вихід: Ni/MgO (14,5 %), Аскарит (13,0 %), Ni/CaO (12,6 %), H₂ (12,5 %). Втрати маси становлять від 3,0 % до 3,1 % для всіх каталізаторів, що свідчить про достатню точність експерименту та стабільність умов процесу.

Отримані результати добре узгоджуються з даними, наведеними в наукових працях інших авторів, де для повільного піролізу ПЕВЦ у присутності твердих каталізаторів типово фіксують вихід газів у межах 10–25 % [19, 20]. Аналогічна відповідність спостерігається і для інших фракцій – рідкої та твердої. Значення виходу рідини у межах 63–71 %, а також вміст твердого залишку в межах 11–21 % добре корелюють із літературними даними, що підтверджує достовірність проведених досліджень.

Подальший аналіз окремих випадків піролізу ПЕВЦ – від процесу без каталізатора до варіантів із застосуванням різних каталізаторів дає змогу кількісно і якісно оцінити склад газів та механізми їх селективного формування.

ПЕВЦ без каталізатора. Основними газовими компонентами є CO і CO₂, що вказує на активне окислення під час термічного розкладання. Метан представлений порівняно в меншій кількості, через те, що продукти розкладання мають тенденцію до утворення довших вуглеводневих молекул, а не найкоротших (як метан). Метан утворюється переважно в умовах сильнішого термічного розщеплення або за наявності специфічних каталізаторів, які сприяють його утворенню. Відсутність ізобутану в базовому піролізі без каталізаторів може свідчити про те, що без каталізатора реакція йде переважно за лінійними шляхами розщеплення поліетилену. Етанол (C₂H₅OH) може не утворюватися через те, що процеси окислення вуглеводнів за таких умов є недостатніми для утворення спиртів. В умовах базового піролізу реакція відбувається переважно з утворенням простих вуглеводнів, таких як метан, етан, пропан, а не оксигеновмісних сполук, таких як етанол. Окислювальні процеси, які ведуть до утворення спиртів, потребують інших умов або каталізаторів, які стимулюють реакції з участю кисню.

ПЕВЦ + H₂. Вміст діоксиду вуглецю (CO₂) значно підвищився порівняно з піролізом ПЕВЦ без каталізатора. Це може вказувати на підвищену каталітичну активність H₂ у реакціях декарбосиловання, що веде до інтенсивного утворення CO₂. Також відбувається зниження концентрації етану (C₂H₆) і пропану (C₃H₈). Поява ізобутану, що не було у пробі без каталізатора свідчить про розгалужене розщеплення полімерів при використанні H₂. Водень (H₂) зменшився до 0,5%, що може свідчити про інші домінуючі реакції, які не сприяють дегідруванню. Наприклад, домінуючі реакції це – декарбосиловання, під час якої відбувається відщеплення карбоксильної з утворенням CO₂, та реакція декарбонілювання – розщеплення молекул з утворенням монооксиду вуглецю (CO). Це також призводить до зниження кількості водню та простих вуглеводнів, таких як метан, етан і пропан, в порівнянні з піролізом ПЕВЦ без каталізатора.

ПЕВЦ + Fe₃O₄. CO₂ і CO залишаються основними газами, що утворюються при піролізі з Fe₃O₄. Високі концентрації цих газів свідчать про активне окислення під час розкладу поліетилену. Оксид заліза є ефективним каталізатором для окислювальних реакцій. Концентрація метану зменшується порівняно з піролізом без каталізатора. Це пояснюється тим, що Fe₃O₄ сприяє утворенню більш довших вуглеводневих ланцюгів, таких як етан (2 атоми вуглецю) і пропан (3 атоми вуглецю), а не найпростіших вуглеводнів. Вміст бутану теж є значним, що вказує на здатність Fe₃O₄ каталізувати реакції з утворенням таких вуглеводневих молекул, які мають 2-4 атоми вуглецю в своєму складі, тобто більше одної молекули вуглецю, як у складі метану. Відсутність ізобутану та етанолу свідчить про те, що ізобутан не утворюється, оскільки каталізатори сприяють лінійним реакціям, а не розгалуженим, а етанол не утворюється, бо немає кисневмісних реакцій, які призводили б до формування спиртів.

ПЕВЦ + Ni/MgO. Каталізатор на основі Ni/MgO значно збільшує утворення CO₂, що вказує на високу

активність у реакціях окислення. Ni і MgO активують механізми інтенсивного декарбокислювання. CO також утворюється в значній кількості, що свідчить про каталітичну здатність Ni/MgO до розщеплення молекул з утворенням монооксиду вуглецю. Концентрація метану дещо знижується порівняно з базовим піролізом, що збігається з даними використання Fe₃O₄. Це відбувається через те, що Ni/MgO стимулює розщеплення поліетилену таким чином, що вуглеводневі ланцюги не руйнуються повністю на найпростіші молекули, а зберігають більше атомів вуглецю в своїй структурі. Замість утворення дуже простих вуглеводнів (таких як метан), переважно утворюються вуглеводні з довшими ланцюгами такі як етан, пропан, бутан. Концентрація етану (C₂H₆) і пропану (C₃H₈) підвищується, що вказує на активацію процесів розпаду поліетилену з утворенням цих газів. Високий вміст бутану вказує на здатність Ni/MgO каталізувати розщеплення до більш довгих ланцюгів вуглеводнів. Ізобутан і етанол відсутні, що збігається з іншими пробами. Це вказує на те, що механізм розщеплення поліетилену з каталізатором Ni/MgO відбувається подібним чином, як і в пробі з Fe₃O₄.

ПЕВЩ + Fe₂O₃. CO₂ і CO утворюються у високих концентраціях, що також свідчить про сильний окислювальний вплив каталізатора Fe₂O₃. Це означає, що Fe₂O₃ стимулює реакції окислення, які призводять до розщеплення поліетилену з утворенням значної кількості продуктів окислення. При використанні Fe₂O₃ частка водню значно менша, що може вказувати на те, що цей каталізатор активніше сприяє реакціям окислення, при яких водень зв'язується з киснем для утворення води (H₂O), або водень не є основним побічним продуктом таких реакцій. Пропан та етан є основними серед продуктів, що вказує на те, що Fe₂O₃ каталізує реакції розщеплення поліетилену з утворенням простих вуглець-вуглецевих зв'язків (C₂-C₃). Ізобутан і етанол відсутні, що також спостерігається на інших пробах. Це вказує на те, що механізм розщеплення поліетилену при наявності Fe₂O₃, відбувається подібним чином, як і в інших експериментах з використанням каталізаторів на основі Ni/MgO та Fe₃O₄.

ПЕВЩ + Ni/CaO. При використанні Ni/CaO спостерігається значне утворення водню. Це свідчить про те, що цей каталізатор активує реакції дегідрування, під час яких водень відщеплюється від молекул поліетилену. Висока частка водню вказує на активний процес розщеплення вуглеводневих ланцюгів з виділенням водню як побічного продукту. Ізогексан (вуглеводень з 6 атомами вуглецю) присутній у більшій кількості при використанні Ni/CaO. Це може свідчити про те, що цей каталізатор краще активує реакції, що сприяють утворенню розгалужених вуглеводнів. Ізопентан, як і ізогексан, є розгалуженим вуглеводнем, який утворюється в невеликій кількості. Більша частка ізопентану у пробі з Ni/CaO вказує на те, що цей каталізатор сприяє розгалуженню ланцюгів під час піролізу, що є характерним для деяких нікелевих каталізаторів. Пентан (C₅H₁₂) має нерозгалужений ланцюг і утворюється у більшій кількості при піролізі з каталізатором Ni/CaO. Це знову підтверджує схильність цього каталізатора до утворення довгих вуглеводневих ланцюгів. Частка пентану є значною, що свідчить про ефективність цього каталізатора в утворенні вуглеводнів з 3-5 атомами вуглеводнів (C₃-C₅).

ПЕВЩ + Аскарит. Утворення водню в процесі піролізу з Аскаритом як і у разі використання Ni/CaO свідчить про те, що цей каталізатор також сприяє реакціям дегідрування. Це досить висока частка порівняно з іншими каталізаторами, крім Ni/CaO, який має ще вищу частку водню. Такий результат може бути пов'язаний із характером Аскариту як поглинач кислих газів, що впливає на газовий баланс і каталізує певні дегідрувальні реакції. Зазвичай Аскарит застосовується як поглинач CO₂, але в процесі піролізу частка діоксиду вуглецю залишається досить значною. Утворення CO і CO₂ вказує на активні процеси окислення вуглеводнів. Частка метану є вищою, ніж у багатьох інших пробах (наприклад, з Fe₂O₃ або Ni/MgO). Значна частка етану вказує на те, що Аскарит сприяє реакціям розщеплення поліетилену з утворенням вуглеводнів з двома або більше атомами вуглецю. Пропан є основним продуктом піролізу з Аскаритом, що свідчить про те, що цей каталізатор сприяє розщепленню довгих вуглеводневих ланцюгів. Висока частка пропану може вказувати на активацію реакцій, що ведуть до утворення вуглеводнів із трьома атомами вуглецю. Аналогічний результат спостерігається з бутаном. Розгалужені ланцюги вуглеводнів, такі як ізогексан та ізопентан, утворюються у відносно невеликих кількостях, так як аскарит не є каталізатором, який активно сприяє утворенню розгалужених структур.

Як результат хроматографічний аналіз газоподібних продуктів піролізу ПЕВЩ дав можливість встановити детальний якісний та кількісний склад летких компонентів, що утворюються в процесі. У складі газової фази виявлено широкий спектр сполук, серед яких переважають оксиди вуглецю (CO та CO₂), водень, легкі насичені вуглеводні (метан, етан, пропан, бутан, пентан), а також їх ізомерні форми (ізобутан, ізопентан, ізогексан). У незначних кількостях були ідентифіковані кисневмісні сполуки, зокрема метанол і етанол, що можуть утворюватися як побічні продукти вторинних реакцій.

Отримані результати показують, що каталітичний піроліз значною мірою впливає на газогенерацію та розподіл компонентів газової суміші. Наприклад, каталізатори на основі нікелю сприяли утворенню більшої кількості водню та метану, тоді як оксиди заліза підвищували концентрацію оксидів вуглецю. Використання Аскариту зумовило значне зростання вмісту пропану та інших вуглеводнів середньої леткості, що свідчить про переважання реакцій деполімеризації з утворенням коротколанцюгових алканів.

Таким чином, хроматографічний аналіз підтвердив високу чутливість складу газоподібної продукції до типу каталізатора, що відкриває можливості для керування селективністю піролізного процесу залежно від подальшого використання.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Поліетилен високої щільності (ПЕВЩ) є одним із найбільш уживаних синтетичних полімерів, відходи якого становлять серйозну екологічну загрозу через свою стійкість до біодеградації та здатність накопичуватись

у навколишньому середовищі. Зважаючи на обмежену ефективність традиційних методів утилізації, каталітичний піроліз розглядається як перспективна альтернатива для переробки полімерних відходів, що дає змогу отримувати цінні газоподібні, рідкі та тверді вуглеводневі продукти, придатні для подальшого енергетичного або технологічного використання.

В процесі досліджень проведено аналіз розподілу піролізних продуктів за фазовим складом (газ, рідина, твердий залишок), а також газохроматографічний аналіз складу газової фази, що дало змогу оцінити якісні та кількісні характеристики кожної фракції. Встановлено, що вихід основних продуктів, зокрема піролізної рідини становить (63–71 %), газів – (12–21 %) та твердого залишку – (11–21 %), що добре узгоджується з літературними даними, які характерні для умов повільного піролізу поліетилену в присутності твердих каталізаторів.

Отримані результати підтверджують доцільність подальшого розвитку цієї технології як частини сталих рішень для утилізації пластикових відходів. Перспективними напрямками подальших досліджень є оптимізація складу каталізаторів, перехід до безперервного режиму піролізу, масштабування процесу та комплексна оцінка його енергетичної, екологічної та економічної ефективності.

Література

1. Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2023 (in million metric tons). *Statista*. URL: <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/> (date of access: 26.11.2025).
2. Production forecast of thermoplastics worldwide from 2025 to 2050 (in million metric tons). *Statista*. URL: <https://www.statista.com/statistics/664906/plastics-production-volume-forecast-worldwide/> (date of access: 26.11.2025).
3. Degradation Rates of Plastics in the Environment / A. Chamas et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020. Vol. 8, no. 9. P. 3494–3511. URL: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635> (date of access: 26.11.2025).
4. Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review / R. Miandad et al. *Process Safety and Environmental Protection*. 2016. Vol. 102. P. 822–838. URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022> (date of access: 26.11.2025).
5. Potential for electricity savings by reducing potable water consumption in a city scale / L. C. Proença et al. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011. Vol. 55, no. 11. P. 960–965. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.003> (date of access: 26.11.2025).
6. Experimental Study of Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste Components / A. Anene et al. *Sustainability*. 2018. Vol. 10, no. 11. P. 3979. URL: <https://doi.org/10.3390/su10113979> (date of access: 26.11.2025).
7. Nalluri P., Prem Kumar P., Ch Sastry M. R. Experimental study on catalytic pyrolysis of plastic waste using low cost catalyst. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 7216–7221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.478> (date of access: 26.11.2025).
8. Catalytic efficiency of some novel nanostructured heterogeneous solid catalysts in pyrolysis of HDPE / I. Ahmad et al. *Polymer Degradation and Stability*. 2013. Vol. 98, no. 12. P. 2512–2519. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.009> (date of access: 26.11.2025).
9. Rasul Jan M., Shah J., Gulab H. Catalytic conversion of waste high-density polyethylene into useful hydrocarbons. *Fuel*. 2013. Vol. 105. P. 595–602. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.016> (date of access: 26.11.2025).
10. Thermal and thermo-catalytic degradation of high-density polyethylene waste / N. Miskolczi et al. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2004. Vol. 72, no. 2. P. 235–242. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.002> (date of access: 26.11.2025).
11. Catalytic degradation of high density polyethylene and polypropylene into liquid fuel in a powder-particle fluidized bed / G. Luo et al. *Polymer Degradation and Stability*. 2000. Vol. 70, no. 1. P. 97–102. URL: [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(00\)00095-1](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(00)00095-1) (date of access: 26.11.2025).
12. Pyrolysis of plastic waste for sustainable energy Recovery: Technological advancements and environmental impacts / M. M. Hasan et al. *Energy Conversion and Management*. 2025. Vol. 326. P. 119511. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119511> (date of access: 26.11.2025).
13. Al-Salem S. M., Lettieri P., Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*. 2009. Vol. 29, no. 10. P. 2625–2643. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004> (date of access: 26.11.2025).
14. Gebre S. H., Sendeku M. G., Bahri M. Recent Trends in the Pyrolysis of Non-Degradable Waste Plastics. *ChemistryOpen*. 2021. Vol. 10, no. 12. P. 1202–1226. URL: <https://doi.org/10.1002/open.202100184> (date of access: 26.11.2025).
15. Kaminsky W. The Hamburg Fluidized-bed Pyrolysis Process to Recycle Polymer Wastes and Tires. *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics / Ed. By J. Scheirs*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2006. P. 475–491. URL: <https://doi.org/10.1002/0470021543.ch17> (date of access: 26.11.2025).
16. Bridgwater A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 2012. Vol. 38. P. 68–94. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048> (date of access: 26.11.2025).
17. Mohan D., Pittman C. U., Steele P. H. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*. 2006. Vol. 20, no. 3. P. 848–889. URL: <https://doi.org/10.1021/ef0502397> (date of access: 26.11.2025).

18. Flash pyrolysis of biomass: a review of recent advances / J. O. Ighalo et al. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2022. Vol. 24, no. 8. P. 2349–2363. URL: <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02339-5> (date of access: 26.11.2025).

19. Aisien F. A., Aisien E. T. Production and characterization of liquid oil from the pyrolysis of waste high-density polyethylene plastics using spent fluid catalytic cracking catalyst. *Sustainable Chemistry for Climate Action*. 2023. P. 100020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100020> (date of access: 26.11.2025).

20. Catalytic processing of plastic waste on the rise / A. J. Martín et al. *Chem*. 2021. Vol. 7, no. 6. P. 1487–1533. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2020.12.006> (date of access: 26.11.2025).

References

1. Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2023 (in million metric tons). Statista. (n.d.). Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>
2. Production forecast of thermoplastics worldwide from 2025 to 2050 (in million metric tons). Statista. (n.d.). Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/664906/plastics-production-volume-forecast-worldwide/>
3. Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., Abu-Omar, M., Scott, S. L., & Suh, S. (2020). Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3494–3511. doi: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
4. Miandad, R., Barakat, M.A., Aburiazzaiza, A.S., Rehan, M., & Nizami, A.S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822–838. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>
5. Proença, L.C., Ghisi, E., Tavares, D. da F., & Coelho, G.M. (2011). Potential for electricity savings by reducing potable water consumption in a city scale. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 960–965. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.003>
6. Anene, A.F., Fredriksen, S.B., Sætre, K.A., & Tokheim, L.-A. (2018). Experimental Study of Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste Components. *Sustainability*, 10(11), 3979. doi: <https://doi.org/10.3390/su10113979>
7. Nalluri, P., Prem Kumar, P., & Ch Sastry, M.R. (2021). Experimental study on catalytic pyrolysis of plastic waste using low cost catalyst. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7216–7221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.478>
8. Ahmad, I., Ismail Khan, M., Ishaq, M., Khan, H., Gul, K., & Ahmad, W. (2013). Catalytic efficiency of some novel nanostructured heterogeneous solid catalysts in pyrolysis of HDPE. *Polymer Degradation and Stability*, 98(12), 2512–2519. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.009>
9. Rasul Jan, M., Shah, J., & Gulab, H. (2013). Catalytic conversion of waste high-density polyethylene into useful hydrocarbons. *Fuel*, 105, 595–602. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.016>
10. Miskolczi, N., Bartha, L., Deák, G., Jóver, B., & Kalló, D. (2004). Thermal and thermo-catalytic degradation of high-density polyethylene waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(2), 235–242. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.002>
11. Luo, G., Suto, T., Yasu, S., & Kato, K. (2000). Catalytic degradation of high density polyethylene and polypropylene into liquid fuel in a powder-particle fluidized bed. *Polymer Degradation and Stability*, 70(1), 97–102. doi: [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(00\)00095-1](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(00)00095-1)
12. Hasan, M.M., Haque, R., Jahirul, M.I., & Rasul, M.G. (2025). Pyrolysis of plastic waste for sustainable energy Recovery: Technological advancements and environmental impacts. *Energy Conversion and Management*, 326, 119511. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119511>
13. Al-Salem, S.M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
14. Gebre, S.H., Sendeku, M.G., & Bahri, M. (2021). Recent Trends in the Pyrolysis of Non-Degradable Waste Plastics. *ChemistryOpen*, 10(12), 1202–1226. doi: <https://doi.org/10.1002/open.202100184>
15. Kaminsky, W. (2006). The Hamburg Fluidized-bed Pyrolysis Process to Recycle Polymer Wastes and Tires. In J. Scheirs (Ed.), *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics* (pp.475–491). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. doi: <https://doi.org/10.1002/0470021543.ch17>
16. Bridgwater, A.V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
17. Mohan, D., Pittman, C.U., & Steele, P.H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889. doi: <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
18. Ighalo, J.O., Iwuchukwu, F.U., Eyankware, O.E., Iwuozor, K.O., Olotu, K., Bright, O.C., & Igwegbe, C.A. (2022). Flash pyrolysis of biomass: a review of recent advances. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(8), 2349–2363. doi: <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02339-5>
19. Aisien, F.A., & Aisien, E.T. (2023). Production and characterization of liquid oil from the pyrolysis of waste high-density polyethylene plastics using spent fluid catalytic cracking catalyst. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 2, 100020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100020>
20. Martín, A.J., Mondelli, C., Jaydev, S.D., & Pérez-Ramírez, J. (2021). Catalytic processing of plastic waste on the rise. *Chem*, 7(6), 1487–1533. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2020.12.006>