

**Кліматична нейтральність економіки та зелений перехід**

Леся КОЛІНЕЦЬ,
Ольга ЮРАСОВА,
Дайва ЮРЕВІЧІНЄ

**РОЗВИТОК ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ
В КРАЇНАХ ЄС КРІЗЬ ПРИЗМУ ПЕРЕРОБКИ
ПЛАСТИКУ****Резюме**

У дослідженні проаналізовано ефективність розвитку циркулярної економіки (СЕ) у 27 країнах ЄС протягом 2015–2023 рр. на основі показників, пов'язаних із патентами, ресурсною продуктивністю, утворенням відходів пластикового пакування, торгівлею вторинною сировиною, зайнятістю в секторах циркулярної економіки та переробкою пластикового пакування. Емпіричний аналіз поєднує описову статистику, кореляційний аналіз, нечітку кластеризацію методом с-середніх та мультиноміальну логістичну регресію. Результати дали змогу виокремити три кластери країн ЄС: країни, що відстають і характеризуються слабкими показниками за більшістю вимірів; розвинені інтегровані економіки, що поєднують інноваційний потенціал і спроможність до переробки; а також ефективні рециклери, які досягають порівняно високих

© Леся Колінець, Ольга Юрасова, Дайва Юревічіне, 2026.

Колінець Леся, доктор економічних наук, доцент, кафедра економічної інженерії, Вільнюський технічний університет імені Гедиміна, Вільнюс, Литва. ORCID: 0000-0002-7005-0519 Email: lesya.kolinet@vilniustech.lt

Юрасова Ольга, доктор філософії (економіка), доцент, кафедра економічної інженерії, Вільнюський технічний університет імені Гедиміна, Вільнюс, Литва. ORCID: 0000-0001-9976-9124 Email: olga.iurasova@vilniustech.lt

Юревічіне Дайва, доктор філософії (економіка), професор, завідувач кафедри економічної інженерії, Вільнюський технічний університет імені Гедиміна, Вільнюс, Литва. ORCID: 0000-0002-0039-6290 Email: daiva.jureviciene@vilniustech.lt

результатів у сфері переробки, незважаючи на слабший інноваційний та трудовий потенціал. Отримані результати свідчать про те, що ефективність циркулярної економіки в ЄС не є одновимірною. Мультиноміальна логістична регресія підтверджує, що ефективність переробки є основним чинником переходу від систем низького рівня до систем проміжного рівня, а розвинені системи потребують ширшої структурної інтеграції. Результати вказують на поступовий, залежний від попередньої траєкторії характер переходів і надають емпіричні докази на користь диференційованих стратегій економічної політики, спрямованих як на розбудову спроможності, так і на підвищення ефективності переробки. Оригінальний внесок цього дослідження полягає в емпіричному розмежуванні між вимірами циркулярної економіки, що ґрунтуються на спроможності, та вимірами, орієнтованими на результат, а також у доведенні того, що проміжних результатів у сфері циркулярної економіки можна досягти за різних національних структурних конфігурацій. Це має безпосереднє значення для диференційованої політики згуртованості ЄС та фінансування заходів у сфері циркулярної економіки.

Ключові слова:

відходи пластикового пакування, ефективність переробки, країни ЄС, політика циркулярної економіки, ресурсна продуктивність, циркулярна економіка.

Класифікація за JEL: Q56, O52, Q53.

3 рисунки, 6 таблиць, 64 джерела літератури.

Постановка проблеми

Циркулярна економіка є стратегічним пріоритетом для ЄС як рамкова концепція, спрямована на зниження матеріаломісткості, підвищення ресурсної ефективності, зміцнення екологічної стійкості та посилення довгострокової економічної стійкості (European Commission, 2018a; Geissdoerfer et al., 2017). У цьому контексті оцінювання ефективності циркулярної економіки в країнах ЄС є не лише питанням екологічного моніторингу, а й важливою економічною проблемою, оскільки циркулярний перехід залежить від взаємодії результатів управління відходами, інноваційного потенціалу, трансформацій ринку праці та інтеграції у ринки вторинної сировини (PACE, 2021; Avdiushchenko & Zajac, 2019; Kamali Saraji & Torabi, 2025).

Однак емпіричне оцінювання ефективності циркулярної економіки залишається аналітично складним завданням. Циркулярність на рівні країни є багатовимірним явищем, а високі результати в одному вимірі не обов'язково свідчать про ширший структурний прогрес (Moraga et al., 2019; Fura et al., 2020; Lishchynskyy et al., 2025). Зокрема, високі показники переробки можуть поєднуватися з обмеженим рівнем інновацій, слабкою зайнятістю в секторах циркулярної економіки або низькою інтеграцією у потоки вторинних матеріалів. Тому інтерпретація ефективності циркулярної економіки лише на основі окремих індикаторів чи зведених рейтингів є недостатньою (PACE, 2021).

Попри те, що в наявних дослідженнях пропонуються цінні інструменти для порівняльного аналізу, вони часто ґрунтуються на описових панелях показників або композитних індексах, які згладжують неоднорідні моделі розвитку країн (Fura et al., 2020; Kamali Saraji & Torabi, 2025). Унаслідок цього такі підходи не повною мірою відображають, чи країни ЄС рухаються спільною траєкторією циркулярного переходу, чи, навпаки, формують відмінні, але частково взаємопов'язані структурні конфігурації (Avdiushchenko, 2021; Cader et al., 2024).

Отже, це дослідження має на меті ідентифікувати відмінні структурні моделі ефективності циркулярної економіки в країнах ЄС та оцінити наявність систематичного взаємозв'язку результатів переробки з ширшими спроможностями циркулярної економіки. Крім того, дослідження спрямоване на пояснення належності країн до відповідних кластерів і формування диференційованого тлумачення розвитку циркулярної економіки в ЄС.

Огляд літератури

Циркулярна економіка широко розглядається як системна альтернатива традиційній лінійній моделі виробництва і споживання, що ґрунтується на видобутку ресурсів, їх використанні та подальшій утилізації. У науковій літературі циркулярну економіку зазвичай визначають через такі стратегії, як скорочення споживання ресурсів, повторне використання, ремонт, відновлення, переробка та рекуперація матеріалів у процесах виробництва і споживання (Kirchherr et al., 2017). Подібні підходи акцентують увагу на трьох процесах: замиканні, уповільненні та звуженні ресурсних циклів. Це означає використання меншої кількості матеріалів, продовження життєвого циклу продукції та зменшення обсягів утворення відходів (Geissdoerfer et al., 2017; Dominish et al., 2018; Bocken et al., 2019; Reike et al., 2018). Хоча визначення циркулярної економіки відрізняються за акцентами, існує широкий консенсус щодо того, що вона передбачає структурну трансформацію систем виробництва і споживання у напрямку підвищення ресурсної ефективності та збереження вартості в часі (Kirchherr et al., 2023; Ellen Mac Arthur Foundation, 2025).

На національному рівні ефективність циркулярної економіки можна розглядати крізь дві взаємодоповнювальні призми: результати та сприятливі умови. Підходи, орієнтовані на результати, аналізують спостережувані наслідки циркулярності – зокрема частку відходів, що переробляються, або ступінь скорочення використання первинних ресурсів, тобто замкнені цикли і звужені ресурсні потоки. Підходи, орієнтовані на спроможність, наголошують на інституційних, технологічних і ринкових умовах, які забезпечують циркулярність, зокрема в інноваційному потенціалі, сприятливій політиці, ринковій інфраструктурі для вторинних матеріалів і кваліфікованій робочій силі в циркулярних секторах (PACE, 2021).

На макрорівні ефективність циркулярної економіки зазвичай структурується навколо обмеженого набору повторюваних вимірів, які переважно відображають практику моніторингу ЄС: управління відходами, моделі виробництва і споживання (використання ресурсів та ефективність), вторинна сировина (включно з циркулярним використанням матеріалів і торгівлею), конкурентоспроможність та інновації (інвестиції, додана вартість і патенти), а також аспекти ринку праці, що відображаються через зайнятість у секторах циркулярної економіки (Kamali Saraji & Torabi, 2025; Avdiushchenko & Zając, 2019; Cader et al., 2024; European Commission, 2018b). Наприклад, власна система моніторингу ЄС групує індикатори за такими напрямками, як виробництво і споживання, управління відходами, вторинна сировина, а також конкурентоспроможність та інновації (Fura et al., 2020), фактично охоплюючи перші чотири сфери. Деякі дослідження також додають п'ятий вимір для ширших ресурсних або екологічних результатів, зокрема ресурсної продуктивності або викидів парникових газів (Kamali Saraji & Torabi, 2025). Такий багатовимірний підхід дає змогу сформувати більш диференційований профіль сильних і слабких сторін кожної країни у процесі циркулярного переходу.

Для кількісного оцінювання ефективності циркулярної економіки країн застосовується широкий спектр індикаторів, які можна об'єднати в кілька груп.

Патенти як проксі-показники інновацій. Патенти у сфері переробки та вторинної сировини часто розглядаються як індикатори інновацій у циркулярній економіці. Вони демонструють, наскільки активно розробляються нові технології для переробки, управління відходами та підвищення ресурсної ефективності (Moraga et al., 2019; Pakuła et al., 2025; McMillin, 2025). У системі моніторингу ЄС вони трактуються як показник технологічного прогресу в циркулярних рішеннях (European Commission, 2018c). Однак кількість патентів відображає формальний інноваційний результат, а не фактично реалізовані циркулярні результати, і може залежати від міжкраїнних відмінностей в інноваційних системах, галузевій спеціалізації та нерівномірній схильності до патентування (Crescenzi et al., 2022; Crass et al., 2019; Taalbi, 2025; Lotti & Nobile, 2025; Reeb & Zhao, 2020). Отже, патенти доцільно інтерпретувати як непрямий показник інноваційного потенціалу, а не як прямий доказ ефективності циркулярної економіки.

Ресурсна продуктивність. Ресурсна продуктивність зазвичай вимірюється як відношення ВВП до внутрішнього матеріального споживання (GDP/DMC). Це стандартний індикатор матеріальної ефективності та декаплінгу, який широко використовується в дослідженнях циркулярної економіки та ресурсної ефективності (McCarthy et al., 2018; Eurostat, 2025b; OECD, 2024). Вищі значення цього показника свідчать про те, що економіка генерує більшу вартість на одиницю використаних матеріальних ресурсів. Водночас цей індикатор не є чистим вимірником циркулярності, оскільки він може також відображати структурні зрушення у напрямі сектору послуг, особливості торговельних потоків або винесення матеріаломісткого виробництва за межі країни, а не справжнє підвищення циркулярної ефективності (Bianchi et al., 2021; Krausmann et al., 2018; Alonso-Fernández & Regueiro-Ferreira, 2021; Schandl et al., 2024; Nowaczek et al., 2023). Тому цей показник є інформативним, однак його доцільно інтерпретувати з обережністю.

Торгівля вторинною сировиною. Торгівля вторинною сировиною зазвичай використовується для відображення рівня інтеграції країни у ринки вторинних матеріалів та її участі у транскордонних циркулярних потоках (Pakuła et al., 2025; Moraga et al., 2019). Високі обсяги торгівлі можуть свідчити про те, що країна активно купує або постачає матеріали для переробки, а отже, має тісніші зв'язки з циркулярною економікою за межами власних кордонів (van Beukering et al., 2014; Lingaitienė & Burinskienė, 2024; Burinskienė et al., 2025). Водночас інтенсивність торгівлі може також відображати такі структурні чинники, як розмір країни, логістична інфраструктура, портові функції або обмежена внутрішня переробна спроможність, а не цілеспрямований розвиток циркулярної економіки (European Commission, 2021; Yamaguchi, 2021). З цієї причини цей індикатор доцільно розглядати більше як проксі-показник ринкової інтеграції, ніж як прямий вимір циркулярних результатів.

Показники переробки. Показники переробки залишаються центральними для оцінювання циркулярної економіки на рівні країни, оскільки вони відображають міру фактичного замикання матеріальних циклів на практиці (Milanović et al., 2022; Kamali Saraji & Torabi, 2025). Зокрема, показник переробки відходів пластикового пакування є особливо значущим у контексті ЄС, оскільки пластикове пакування є як пріоритетним напрямом політики, так і технічно складним для переробки видом відходів (Matthews et al., 2021; Picuno et al., 2021; Anwar et al., 2024; Džajić Uršič et al., 2025). Порівняно з ширшими показниками переробки, цей індикатор забезпечує більш вимогливу перевірку ефективності системи у проблемному потоці відходів. З цієї причини в цьому дослідженні він використовується як цільовий результативний індикатор ефективності циркулярної економіки.

Утворення відходів пластикового пакування (GPPW). Показник утворення відходів пластикового пакування використовується як індикатор тиску, що відображає інтенсивність споживання, пов'язаного з пакуванням, а також масштаб відходів, якими мають управляти національні системи

(European Environment Agency, 2023; Perera et al., 2026). Оскільки пластикове пакування має короткий життєвий цикл, є помітним у потоках відходів і посідає центральне місце в екологічній політиці ЄС, високий рівень утворення відходів пластикового пакування на душу населення свідчить про сильніший тиск на системи збирання, сортування, переробки та запобігання утворенню відходів (Bullock et al., 2022; Bruns et al., 2024; Torkelis et al., 2024). З аналітичної перспективи цей індикатор доповнює показники переробки, оскільки допомагає розрізняти країни, які демонструють високі результати переробки навіть за умов значного тиску відходів, і країни, які мають слабкі результати навіть за нижчого рівня такого тиску. У цьому дослідженні показник утворення відходів пластикового пакування використовується для оцінювання інтенсивності споживання пластикового пакування та пов'язаного з ним рівня утворення відходів. Він дає змогу контекстуально інтерпретувати результати переробки та показники торгівлі вторинними матеріалами. Це дає змогу розмежувати системи, які досягають високої ефективності переробки попри значні обсяги утворення відходів, і системи, в яких нижчий рівень утворення відходів поєднується зі слабшою ефективністю циркулярної економіки.

Зайнятість у секторах циркулярної економіки. Показник «зайнятість у секторах циркулярної економіки» разом із пов'язаним показником «додана вартість у циркулярних секторах» призначений для відображення соціально-економічного виміру переходу, тобто того, яка частка робочої сили залучена до таких видів діяльності, як переробка, ремонт, відновлення, управління відходами та послуги оренди (Eurostat, 2025e). Зростання кількості робочих місць у циркулярних секторах може свідчити про те, що економіка реструктуризується у напрямі циркулярних видів діяльності, і часто наводиться як доказ «справедливого переходу», що створює нові можливості (Muñoz et al., 2022; Schröder, 2020). «Циркулярна зайнятість» розглядається як допоміжний індикатор, який сигналізує про соціально-економічну залученість до циркулярної економіки. Водночас у дослідженнях наголошується на необхідності розглядати цей показник у відповідному контексті, зокрема з урахуванням належного масштабування та разом із результативними індикаторами, щоб визначити, чи справді він відображає прогрес циркулярної економіки, чи лише є наслідком масштабу економіки.

Наявні дослідження ефективності циркулярної економіки сформували цінні наукові результати. Проте окремі обмеження залишаються. По-перше, багато досліджень ґрунтуються на описових панелях показників або композитних індексах, які зводять багатовимірні процеси циркулярної економіки до єдиного рейтингу, приховуючи структурну неоднорідність між країнами. По-друге, показники результативності, зокрема рівні переробки, часто аналізуються без достатньої уваги до чинників, що уможливають розвиток і вдосконалення систем циркулярної економіки. До таких чинників належать інновації, зайнятість у циркулярних секторах та інтеграція у ринки вторинної сировини. По-третє, недостатньо уваги приділено можливості того, що країни ЄС можуть розвиватися шляхом різних структурних конфігурацій циркулярного переходу, а не єдиною лінійною траєкторією розвитку.

На основі цієї дослідницької прогалини та мети дослідження сформульовано такі гіпотези:

H1. Ефективність циркулярної економіки в країнах ЄС є багатовимірною, а не одновимірною.

H2. Країни ЄС можуть бути згруповані у відмінні, але частково взаємопов'язані кластери ефективності циркулярної економіки.

H3. Високий рівень переробки не є достатнім для визначення розвинутої системи циркулярної економіки.

Методологія

Емпірична стратегія дослідження охоплювала п'ять етапів: 1) підготовку набору даних; 2) кореляційну діагностику; 3) кластеризацію за допомогою алгоритму нечітких с-середніх для ідентифікації міжкраїнних типологій ефективності ЦЕ; 4) посткластерний аналіз із мультиноміальною логістичною регресією для оцінювання чинників належності до кластерів; 5) діагностику мультиколінеарності. Для перевірки інтерпретованості та стабільності оцінених моделей використано фактори інфляції дисперсії (Variance Inflation Factors, VIF).

Попередня обробка даних та робота з пропущеними значеннями.

Набір даних охоплює 27 держав – членів ЄС за 2015–2023 рр. та містить 243 спостереження. До нього включено такі індикатори циркулярної економіки (табл. 1):

Заповнення пропущених значень щодо кількості патентів, пов'язаних із переробкою та вторинною сировиною, було важливим етапом підготовки даних. Набір даних щодо патентів охоплює період 2012–2021 років; значення за 2022 і 2023 роки були заповнені за допомогою прогнозування на основі середньорічного темпу зростання (Compound Annual Growth Rate, CAGR) (Dong, 2025). Для країн, у яких початкове значення у 2012 році дорівнювало нулю (що унеможливило математичний розрахунок CAGR), розрахунок здійснювався від першого року з ненульовим значенням до 2021 року.

Для Словенії розрахунок було здійснено з 2013 року, коли значення становило 2, до 2021 року, коли значення становило 1. Восьмирічний CAGR дорівнював -8,30%. На цій основі кількість патентів була розрахована на рівні 0,92 у 2022 році та 0,84 у 2023 році.

Оскільки кінцеве значення для країн Болгарії, Греції, Кіпру та Мальти у 2021 р. дорівнювало 0, математична формула інтерпретує це як повну втрату, тобто CAGR на рівні -100%. Відповідно, прогнозні значення для 2022 і 2023 років залишаються незмінними на рівні 0,00.

Таблиця 1

Опис показників дослідження

Фактор	Характеристика вимірювання	Опис та визначення індикатора
Патенти	Кількість патентів	Цей індикатор вимірює кількість груп взаємопов'язаних патентів, що стосуються переробки та вторинної сировини й ідентифікуються за відповідними кодами CPC, пов'язаними з технологіями пом'якшення наслідків зміни клімату у сфері очищення стічних вод та управління відходами (Eurostat, 2025a).
Ресурсна продуктивність	євро за кілограм	Ресурсна продуктивність визначається як відношення валового внутрішнього продукту (ВВП) до внутрішнього матеріального споживання (DMC) (Eurostat, 2025b).
Утворення відходів пластикового пакування (GPPW)	кг на душу населення	Індикатор утворення відходів пластикового пакування вимірює обсяг пластикового пакування на душу населення. Пакування охоплює всі матеріали, що використовуються для утримання, захисту, обробки, доставки та представлення товарів у межах ланцюга постачання (Eurostat, 2025c).
Торгівля вторинною сировиною (TRRM)	тонни	Цей індикатор відображає транскордонну торгівлю вторинною сировиною, фіксуючи міжнародний обмін матеріалами, придатними для переробки та вторинного використання (Eurostat, 2025d).
Зайнятість	особи	Показник охоплює кількість осіб, зайнятих у секторах циркулярної економіки, зокрема переробку, ремонт і повторне використання, а також оренду та лізинг (Eurostat, 2025e).
Рівень переробки відходів пластикового пакування (RRPW)	відсоток (%)	Рівень переробки відходів пластикового пакування визначається як частка перероблених відходів пластикового пакування відносно загального обсягу утворених відходів пластикового пакування (Eurostat, 2025f).
Рівень переробки муніципальних відходів	відсоток (%)	Рівень переробки муніципальних відходів визначається як частка перероблених муніципальних відходів відносно загального обсягу утворених муніципальних відходів (Eurostat, 2025g).

Джерело: складено авторами.

Пропущені значення, для яких були наявні дані за попередні та наступні роки, заповнювалися середнім значенням наявних показників. Остаточний набір даних містить 243 спостереження за 27 країнами ЄС за період 2015–2023 років. Спостереження з пропущеними значеннями за іншими змінними були вилучені. Така стратегія (listwise deletion) забезпечила використання узгодженої вибірки на етапах кластеризації та регресійного аналізу.

Після цього всі індикатори були нормалізовані для усунення спотворень, зумовлених різними масштабами вимірювання, та забезпечення рівного внеску кожного показника у метрику відстані, що використовувалася під

час кластеризації. Для цього було застосовано мін.–макс. нормалізацію за шкалою від 0 до 1.

Кореляційний аналіз та нормалізація. Для дослідження парних лінійних взаємозв'язків між індикаторами розраховано коефіцієнти кореляції Пірсона. Це дало змогу оцінити базову коваріаційну структуру, потенційне дублювання між змінними та концептуальну узгодженість набору індикаторів.

Нечітка кластеризація методом с-середніх. Для ідентифікації між-країнних типологій циркулярної економіки спочатку застосовано алгоритм нечіткої кластеризації методом с-середніх (Fuzzy c-means, FCM) для перехресного зрізу 2023 р. Цей етап використовувався для визначення референтної кластерної структури та центрів кластерів для найновішого року. Отримані центри кластерів за 2023 р. було збережено як фіксовані референтні точки та використано для розрахунку значень належності до кластерів для спостережень «країна-рік» за 2015–2022 роки. Отже, попередні спостереження не кластеризувалися незалежно, а проєктувалися на кластерну структуру 2023 р. і відносилися до кластерів відповідно до правила максимальної належності. Така процедура забезпечує часову порівнюваність і дає змогу інтерпретувати зміни в динаміці як рух відносно спільної еталонної типології.

FCM є методом м'якої кластеризації. На відміну від жорстких методів (наприклад, k-середніх), які передбачають взаємовиключне групування, FCM дозволяє кожному спостереженню належати до кількох кластерів із різними ступенями належності. Формально цей метод присвоює кожній країні ступінь належності $u_{ik} \in [0,1]$ до кластера k , за умови виконання обмеження $\sum_k u_{ik} = 1$. Для інтерпретації країни відносилися до «переможного» кластера на основі максимального коефіцієнта належності (Bublyk et al., 2021).

Мультиноміальна логістична регресія для оцінювання чинників кластерної належності. Після формування кластерів було застосовано мультиноміальну логістичну регресію. Вона пояснює належність до кластерів за допомогою обраних змінних. Для дослідження того, які індикатори циркулярної економіки пов'язані з належністю до певного кластера, було оцінено модель мультиноміальної логістичної регресії, у якій кластер 2 використано як референтну категорію. Додатні коефіцієнти свідчать про те, що вищі значення змінної збільшують імовірність належності до кластера (j), а не до кластера 2, за інших рівних умов. Від'ємні коефіцієнти свідчать про протилежний ефект. Статистичне виведення здійснювалося з використанням z-тестів і відповідних p-значень (Agresti, 2002; Liang et al., 2020).

Діагностика мультиколінеарності: фактори інфляції дисперсії (VIF). Перед оцінюванням моделі мультиколінеарність було перевірено за допомогою факторів інфляції дисперсії (Variance Inflation Factors, VIF) для всіх числових предикторів. VIF вимірює, наскільки дисперсія оціненого коефіцієнта збільшується внаслідок лінійної залежності між регресорами. Вищі

значення VIF свідчать про сильнішу мультиколінеарність. Для всіх змінних значення VIF залишалися нижчими за загальноприйняті критичні пороги 5–10, що свідчить про те, що мультиколінеарність не погіршує інтерпретованість коефіцієнтів. Відповідно до усталеної практики (James et al., 2013), змінні зі значеннями VIF понад 5 могли б розглядатися для вилучення, однак таких коригувань не знадобилося.

Результати дослідження

Описова статистика свідчить про високий рівень варіації між проаналізованими індикаторами, що демонструє виражені структурні відмінності в системах управління пластиковими відходами (табл. 2).

Таблиця 2

Описова статистика

	Min	Max	25-й процен- тиль	50-й про- цен-тиль (медіана)	75-й про- цен-тиль	Середнє	Ст. відхи- лення
Патенти	0,0	137,60	0,22	3,94	18,67	13,13	20,77
Ресурсна продук- тивність	0,30	7,42	1,08	1,65	2,85	2,03	1,26
Утворення відхо- дів пластикового пакування (GPPW)	12,50	72,95	23,88	30,6	37,16	31,26	9,96
Торгівля вторин- ною сировиною (TRRM)	0,0	170829,0	1492,0	11928,0	29738,0	25928,56	36949,25
Зайнятість	6457,0	783930,0	40141,0	69339,0	134088,0	153784,33	190245,77
Рівень перероб- ки муніципаль- них відходів	9,10	71,43	29,5	40,3	49,9	39,00	14,87
Рівень перероб- ки відходів плас- тикового паку- вання (RRPW)	31,80	85,30	58,55	64,70	69,55	63,07	9,91

Джерело: розрахунки авторів на основі даних Eurostat (2025a, 2025b, 2025c, 2025d, 2025e, 2025f, 2025g).

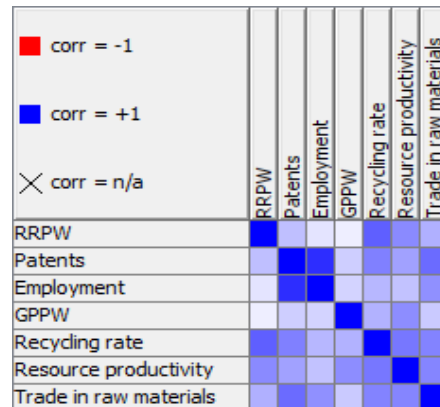
Табл. 2 демонструє суттєву міжкраїнну неоднорідність ефективності циркулярної економіки. Показники патентів, зайнятості та торгівлі вторинною сировиною мають виражену правосторонню асиметрію та високий рівень розсіювання, що свідчить про концентрацію цих вимірів, пов'язаних зі спроможністю, в обмеженій кількості країн. Натомість утворення відходів пласти-

кового пакування та рівень переробки розподілені більш рівномірно, хоча результати переробки все ще суттєво відрізняються в межах вибірки. Ресурсна продуктивність демонструє помірну правосторонню асиметрію, що свідчить про те, що менша частина спостережень досягає вищої матеріальної ефективності. Загалом описова статистика вказує на чіткий контраст між висококонцентрованими індикаторами, пов'язаними зі спроможністю, та більш збалансованими індикаторами, орієнтованими на результат.

На рис. 1 подано парні коефіцієнти кореляції Пірсона між індикаторами циркулярної економіки для країн ЄС за період 2015–2023 років. Результати виявляють кілька чітко виражених структурних взаємозв'язків, що свідчить про наявність частково незалежних вимірів у межах системи циркулярної економіки ЄС.

Рисунок 1

Кореляційний аналіз



Джерело: розрахунки авторів на основі даних Eurostat (2025a, 2025b, 2025c, 2025d, 2025e, 2025f, 2025g).

Кореляційна матриця (рис. 1) виявляє кілька змістовних взаємозв'язків між змінними, підкреслюючи структурні зв'язки в системах управління пластиковими відходами.

Результати свідчать про те, що інновації, економічний масштаб та інтенсивність торгівлі тісно взаємопов'язані. Рівень переробки демонструє кілька помірних додатних кореляцій, зокрема з ресурсною продуктивністю ($r = 0,53$) та торгівлею вторинною сировиною ($r = 0,45$). Ресурсна продуктивність корелює як із вищим рівнем матеріалоспоживання ($r = 0,48$), так і з показником утворення відходів пластикового пакування ($r = 0,44$), що вказує на вищу

системну ефективність. Це свідчить про те, що більш ефективні економіки та країни, інтегровані в ринки матеріальних ресурсів, зазвичай досягають кращих результатів у сфері переробки.

Торівля вторинною сировиною відображає її центральну роль у системі циркулярної економіки. Вона демонструє стійкі помірні кореляції з більшістю змінних.

Утворення відходів має слабші та менш послідовні взаємозв'язки, що свідчить про вплив додаткових структурних або поведінкових чинників. Помірні кореляції між переробкою, продуктивністю та торівлею підкреслюють системний характер ефективності циркулярної економіки, у межах якої кілька вимірів розвиваються взаємопов'язано, а не незалежно один від одного.

Між патентами та зайнятістю простежується сильна додатна кореляція ($r = 0,81$). Це свідчить про тісний зв'язок між технологічним розвитком і масштабом зайнятості.

Інновації пов'язані як зі зростанням матеріальних потоків, так і з поліпшенням результатів переробки, зокрема з торівлею вторинною сировиною ($r = 0,54$) та рівнем переробки ($r = 0,49$). Показник зайнятості демонструє помірну кореляцію з торівлею вторинною сировиною ($r = 0,40$), що свідчить про вищу активність більших економік у торівлі сировинними матеріалами. Водночас її зв'язок із рівнем переробки ($r = 0,27$) та ресурсною продуктивністю ($r = 0,23$) є відносно слабким, що вказує на те, що сам по собі масштаб не гарантує ефективних або сталих результатів.

Для визначення оптимальної кількості кластерів використано коефіцієнт силуєту – метрику, що оцінює внутрішню згуртованість та зовнішню відокремленість кластерів. Результати показують, що найвище значення коефіцієнта силуєту отримано для трьох кластерів (0,307). Це свідчить про найкращий загальний баланс між внутрішньою подібністю та зовнішньою відокремленістю серед усіх протестованих рішень (табл. 3).

Таблиця 3

Коефіцієнт силуєту

Кількість кластерів	Коефіцієнт
3	0,307
4	0,290
5	0,269
6	0,298
7	0,305
8	0,264
9	0,290
10	0,228
11	0,224

Джерело: розрахунки авторів на основі даних Eurostat (2025a, 2025b, 2025c, 2025d, 2025e, 2025f, 2025g).

У табл. 4 подано значення належності країн до трьох кластерів, отримані в результаті застосування нечіткої кластеризації методом с-середніх (Fuzzy c-means, FCM) для 2023 року. Результати свідчать про наявність трьох відмінних, але частково взаємопов'язаних груп. Кластер 2 охоплює найбільшу кількість країн у 2023 році. Кластер 1 представляє групу відносно розвинених економік, а Кластер 0 охоплює країни зі слабшими профілями циркулярної економіки. Кожна країна характеризується вектором ваг належності, сума яких дорівнює одиниці, що відображає ступінь подібності між профілем індикаторів країни та центром кожного кластера. Домінантний кластер визначається за максимальним значенням належності, однак величина цього максимального значення надає важливу інформацію про надійність класифікації та ступінь структурної гібридності країни.

Таблиця 4

Нечітка кластеризація методом с-середніх за країнами, 2023 р.

Країна	Кластер 0	Кластер 1	Кластер 2	Домінантний кластер
Бельгія	0,226	0,280	0,493	Кластер 2
Чехія	0,287	0,098	0,615	Кластер 2
Данія	0,214	0,121	0,665	Кластер 2
Естонія	0,445	0,099	0,455	Кластер 2
Ірландія	0,315	0,307	0,378	Кластер 2
Латвія	0,254	0,110	0,636	Кластер 2
Литва	0,230	0,105	0,665	Кластер 2
Люксембург	0,275	0,265	0,460	Кластер 2
Австрія	0,228	0,359	0,412	Кластер 2
Словенія	0,211	0,139	0,650	Кластер 2
Словаччина	0,235	0,105	0,660	Кластер 2
Фінляндія	0,337	0,231	0,432	Кластер 2
Німеччина	0,228	0,513	0,258	Кластер 1
Іспанія	0,122	0,739	0,139	Кластер 1
Франція	0,225	0,532	0,244	Кластер 1
Італія	0,104	0,768	0,128	Кластер 1
Нідерланди	0,248	0,458	0,294	Кластер 1
Швеція	0,316	0,355	0,330	Кластер 1
Болгарія	0,650	0,118	0,231	Кластер 0
Греція	0,728	0,090	0,182	Кластер 0
Хорватія	0,512	0,117	0,372	Кластер 0
Кіпр	0,667	0,109	0,224	Кластер 0
Угорщина	0,486	0,126	0,388	Кластер 0
Мальта	0,560	0,150	0,289	Кластер 0
Польща	0,454	0,240	0,307	Кластер 0
Португалія	0,527	0,131	0,342	Кластер 0
Румунія	0,582	0,166	0,251	Кластер 0

Джерело: розрахунки авторів на основі даних Eurostat (2025a, 2025b, 2025c, 2025d, 2025e, 2025f, 2025g).

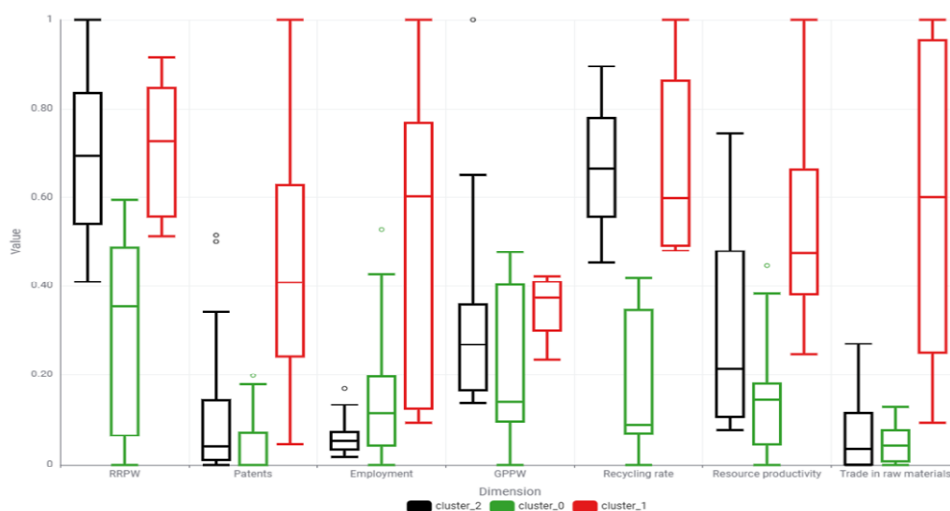
Результати виявляють чітку, але не абсолютну структуру групування, із різними ступенями належності країн до кластерів.

У табл. 4 показано, що кластерна структура країн ЄС є чіткою, однак не строго дискретною. Кластер 2 охоплює найбільшу групу країн і характеризується відносно високими значеннями належності для більшості віднесених до нього випадків, що свідчить про порівняно узгоджений профіль. Естонія та Ірландія демонструють більш збалансовані значення належності між кластерами, що вказує на їхні перехідні характеристики. Кластер 1 включає меншу кількість країн, причому особливо високі значення належності простежуються для Іспанії та Італії, а Швеція має менш чітке віднесення, оскільки її коефіцієнти належності розподілені більш рівномірно. Кластер 0 також є достатньо узгодженим, хоча Польща та Угорщина демонструють певне перекриття з іншими кластерами. Результати, наведені в табл. 4, свідчать про те, що ефективність циркулярної економіки в країнах ЄС організована у відмінні, проте частково взаємопов'язані моделі. Це підкреслює цінність нечіткої кластеризації для ідентифікації як домінантної належності країн, так і граничних випадків.

На рис. 2 показано розподіл обраних індикаторів за трьома кластерами, що дає змогу виявити їхні структурні відмінності.

Рисунок 2

Відмінності між кластерами за факторами



Джерело: розрахунки авторів на основі даних Eurostat (2025a, 2025b, 2025c, 2025d, 2025e, 2025f, 2025g).

Кластерно-специфічна описова статистика демонструє структурні відмінності між трьома групами, що свідчить про наявність відмінних профілів ефективності управління пластиковими відходами.

Кластер 0 характеризується порівняно низькими медіанними значеннями за більшістю індикаторів. Патентна активність є мінімальною (медіана = 0,000), що вказує на майже відсутній інноваційний потенціал. Зайнятість також є низькою (0,114), що свідчить про обмежений економічний масштаб сектору. Індикатори, пов'язані з відходами, демонструють слабкі результати. Медіанне значення рівня переробки є дуже низьким (0,089), а ресурсна продуктивність також залишається обмеженою (0,146). Торгівля вторинною сировиною є незначною (0,042). Квартильний діапазон є вузьким, особливо для патентів і торгівлі, що підтверджує низьку варіативність, але водночас і загально слабкі результати. Максимальні значення залишаються відносно низькими порівняно з іншими кластерами, що свідчить про відсутність сильних викидів. Кластер 0 не слід інтерпретувати як повністю однорідну групу країн-аутсайдерів, а радше як групу, що тяжіє до слабших результатів за інноваціями, ефективністю та ринковою інтеграцією.

Кластер 1 демонструє найвищі медіанні значення за всіма індикаторами і, ймовірно, представляє відносно найсильніший профіль ефективності. Патентна активність (0,409) і зайнятість (0,602) є вищими, ніж в інших кластерах, що свідчить про сильніший інноваційний потенціал та більший економічний масштаб. Медіанне значення рівня переробки є високим (0,599), ресурсна продуктивність є порівняно значною (0,473), а торгівля вторинною сировиною має найвище значення (0,600), що вказує на більш розвинену ринкову інтеграцію. Водночас з огляду на помірне значення коефіцієнта силуету цей кластер доцільно інтерпретувати як відносно розвинений профіль, а не як чітко ізольовану групу лідерів, оскільки певне перекриття з іншими кластерами залишається можливим.

Кластер 2 має змішаний профіль. Інноваційна активність, виміряна через патенти (0,040), та зайнятість (0,052) є низькою, подібно до Кластера 0. Торгівля вторинною сировиною також є низькою (0,035). Водночас рівень переробки є найвищим серед усіх кластерів (медіана = 0,664). Це свідчить про високі результати управління відходами попри слабший економічний та інноваційний потенціал. Ресурсна продуктивність є помірною (0,215), вищою, ніж у Кластера 0, але нижчою, ніж у Кластера 1. Квартильний розподіл показує, що рівні переробки залишаються стабільно високими в діапазоні 0,558–0,780, а інші індикатори залишаються низькими. Така модель може відображати ситуацію, за якої сильніші результати переробки досягаються без настільки ж потужного інноваційного або промислового масштабу. Водночас, оскільки кластерна структура є лише помірно відокремленою, цей профіль слід розглядати як домінуючу тенденцію, а не як повністю окремий тип.

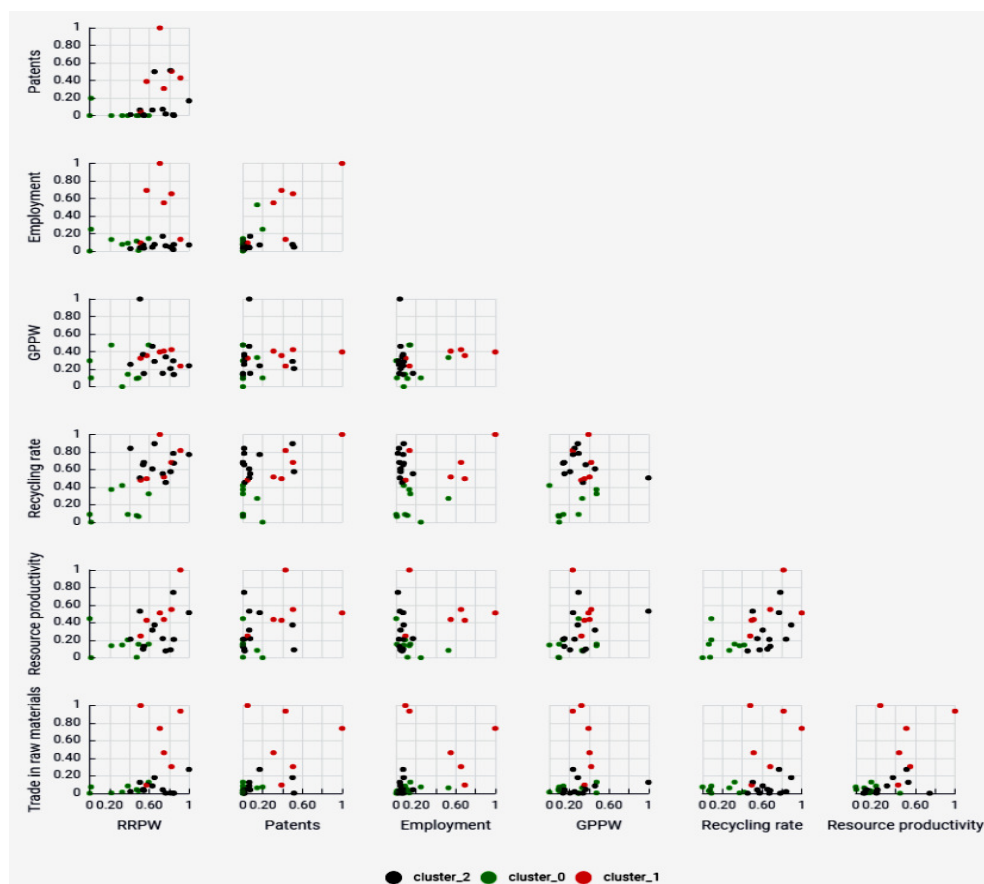
Результати свідчать про те, що три кластери відображають широкі відмінності в ефективності циркулярної економіки, однак помірне значення коефіцієнта силуету вказує на те, що ці відмінності не є абсолютними. Відповідно, кластерне рішення є корисним для ідентифікації загальних моделей

ефективності та відносних позицій країн, водночас зберігаючи можливість перекриття та наявності проміжних характеристик між групами.

Рис. 3 візуалізує попарну проєкцію країн за кластерами. Повного розмежування між кластерами немає, оскільки кластеризація виконувалася у багатовимірному просторі, а графіки відображають лише два виміри одночасно. Така візуалізація дає змогу оцінити як відокремленість кластерів, так і їхнє перекриття за кількома вимірами. Перекриття виникає тоді, коли окремі змінні не відображають повної кластерної структури.

Рисунок 3

Відхилення країн за кластерами та змінними



Джерело: розрахунки авторів на основі даних Eurostat (2025a, 2025b, 2025c, 2025d, 2025e, 2025f, 2025g).

Кластер 0 також є відносно помітним. У більшості графіків точки зосереджені переважно в нижній лівій частині. Кластер 2 займає перехідне положення у просторі ознак. За економічними змінними Кластер 2 перетинається з Кластером 0, а за показниками переробки – з Кластером 1.

Результати нечіткої кластеризації в динаміці виявляють чіткі моделі переходу між кластерами, що відображає різні траєкторії розвитку систем управління пластиковими відходами (Додаток А, Таблиця А1).

Кластерна структура є відносно стабільною, але не фіксованою, оскільки кілька країн поступово переходили між профілями впродовж досліджуваного періоду. Кластер 1 є найбільш стабільною та компактною групою. Німеччина, Франція, Італія та Нідерланди залишалися в Кластері 1 протягом усього періоду 2015–2022 років. Іспанія приєдналася до цієї групи у 2016 році та була в ній надалі. Це свідчить про наявність дуже стійкого ядра кластера з вкрай обмеженою мобільністю. Польща була єдиною країною, що тимчасово увійшла до цього кластера, перейшовши з Кластера 0 до Кластера 1 у 2021 році, а потім перемістившись до Кластера 2 у 2022 році. Загалом цей кластер відображає порівняно стабільний і чітко окреслений профіль.

Кластер 0 демонструє поступове зменшення розміру з часом, оскільки кілька країн вийшли з профілю з найнижчими результатами. У 2015 році Кластер 0 охоплював найбільшу кількість країн, зокрема Болгарію, Чехію, Естонію, Грецію, Іспанію, Хорватію, Кіпр, Латвію, Литву, Угорщину, Мальту, Польщу, Португалію, Румунію та Словаччину. З часом частина цих країн перейшла до Кластера 2. Литва перемістилася з Кластера 0 до Кластера 2 у 2016 році й залишалася там. Угорщина перейшла з Кластера 0 до Кластера 2 у 2018 році, хоча пізніші класифікації знову віднесли її до Кластера 0. Латвія та Словаччина перейшли з Кластера 0 до Кластера 2 у 2019 році й залишалися там у наступні роки. Чехія перейшла з Кластера 0 до Кластера 2 у 2020 році й залишалася там надалі. Польща мала складнішу траєкторію: вона залишалася в Кластері 0 до 2020 року, у 2021 році перейшла до Кластера 1, а у 2022 році перемістилася до Кластера 2. Ці переходи свідчать про покращення результатів переробки навіть без суттєвого зростання інноваційного потенціалу або економічного масштабу. Вони відображають прогрес, зумовлений політикою, зокрема вдосконаленням систем збирання відходів і досягненням цільових показників переробки. Польща демонструє більш нестабільну траєкторію, включно з тимчасовим переходом до профілю з вищими результатами.

Кластер 2 є найбільш динамічним і таким, що розширюється. Він поглинув країни, які переходили з Кластера 0, і став домінантним кластером у пізніші роки вибірки. Бельгія, Данія, Ірландія, Люксембург, Австрія, Словенія та Фінляндія залишалися в Кластері 2 протягом усього періоду. Швеція належала до Кластера 1 у 2015 році, але у 2016 році перейшла до Кластера 2 і залишалася там надалі. Литва приєдналася до Кластера 2 у 2016 році, Угорщина у 2018 році, Латвія та Словаччина у 2019 році, Чехія у 2020 році, а

Польща у 2022 році. Таке розширення свідчить про те, що Кластер 2 виконує роль широкого проміжного або альтернативного профілю ефективності, охоплюючи країни, які покращили свої позиції відносно Кластера 0, але не належать до стабільного ядра Кластера 1.

Модель переходів свідчить про наявність трьох різних рівнів часової стабільності. Кластер 1 має найвищу стійкість і найчіткіше ядро учасників. Кластер 0 поступово скорочувався, оскільки кілька країн з часом вийшли з нього. Нарешті, Кластер 2 став основним напрямом для більшості переходів і перетворився на найбільшу групу в пізніший період. Це означає, що кластери не слід інтерпретувати лише як статичні категорії перехресного зрізу, оскільки вони також відображають рух профілів країн у часі. Кластер 2, імовірно, представляє важливий перехідний або змішаний профіль, а не малу ізольовану групу.

У табл. 5 подано результати мультиноміальної логістичної регресії, у якій Кластер 2 використано як референтну категорію, тобто базову групу.

Таблиця 5

Мультиноміальна логістична регресія за кластерами

Кластер	Змінна	Коефіцієнт	Стандартна похибка	z-статистика	P> z
Кластер 0	Патенти	-0,243	0,311	-0,784	0,433
	Ресурсна продуктивність	-0,233	0,305	-0,766	0,444
	Утворення відходів пластикового пакування (GPPW)	-0,279	0,300	-0,931	0,352
	Торгівля вторинною сировиною (TRRM)	-0,678	0,288	-2,353	0,019
	Рівень переробки муніципальних відходів	0,587	0,293	2,007	0,045
	Рівень переробки відходів пластикового пакування (RRPW)	-0,653	0,300	-2,173	0,030
	Зайнятість	-0,766	0,290	-2,639	0,008
	Константа	0,866	0,309	2,803	0,005
Кластер 1	Патенти	-0,330	0,308	-1,068	0,285
	Ресурсна продуктивність	-0,262	0,305	-0,8596	0,390
	Утворення відходів пластикового пакування (GPPW)	-0,297	0,301	-0,987	0,324
	Торгівля вторинною сировиною (TRRM)	-0,597	0,294	-2,035	0,042
	Рівень переробки муніципальних відходів	-0,989	0,294	-3,362	0,001
	Рівень переробки відходів пластикового пакування (RRPW)	-0,639	0,301	-2,120	0,034
	Зайнятість	-0,365	0,295	-1,234	0,217
	Константа	1,722	0,342	5,040	0,000

Джерело: розрахунки авторів на основі даних Eurostat (2025a, 2025b, 2025c, 2025d, 2025e, 2025f, 2025g).

Додатний і статистично значущий коефіцієнт для рівня переробки свідчить про те, що вищі результати переробки пов'язані з більшою ймовірністю належності до Кластера 2. Водночас від'ємні та статистично значущі коефіцієнти для зайнятості, торгівлі вторинною сировиною та переробки пластикового пакування вказують на слабший економічний масштаб і нижчу ринкову інтеграцію. Така модель підтверджує інтерпретацію Кластера 2 як профілю, орієнтованого на ефективність, який характеризується порівняно сильними результатами управління відходами без ширшої структурної глибини.

Натомість порівняння між Кластером 1 і Кластером 2 вказує на іншу конфігурацію. Статистично значущі від'ємні коефіцієнти для рівня переробки, торгівлі вторинною сировиною та переробки пластикового пакування свідчать про те, що належність до Кластера 1 не може бути пояснена лише цими індикаторами. Натомість Кластер 1, імовірно, відображає більш інтегровану та системну форму ефективності циркулярної економіки, у якій жоден окремий індикатор не є домінантним. Відсутність статистичної значущості для патентів, ресурсної продуктивності та утворення відходів пластикового пакування додатково свідчить про те, що відмінності між кластерами зумовлені не стільки ізольованим впливом окремих факторів, скільки ширшими багатовимірними конфігураціями.

Для оцінювання мультиколінеарності між пояснювальними змінними було розраховано фактори інфляції дисперсії (Variance Inflation Factors, VIF) (табл. 6).

Таблиця 6

Фактори інфляції дисперсії (VIF) для числових змінних

Змінна	Фактори інфляції дисперсії
Патенти	4,56
Ресурсна продуктивність	1,53
Утворення відходів пластикового пакування (GPPW)	1,33
Торгівля вторинною сировиною (TRRM)	2,44
Рівень переробки муніципальних відходів	2,40
Рівень переробки відходів пластикового пакування (RRPW)	2,01
Зайнятість	4,47

Джерело: розрахунки авторів на основі даних Eurostat (2025a, 2025b, 2025c, 2025d, 2025e, 2025f, 2025g).

Усі значення факторів інфляції дисперсії (Variance Inflation Factors) перебувають у межах від 1,33 до 4,56, що свідчить про помірну, але прийнятну мультиколінеарність. Жодна зі змінних не перевищує обраний пороговий рівень 5. Отже, мультиколінеарність не впливає на стабільність або інтерпретованість регресійних оцінок.

Модель не має проблеми сильної мультиколінеарності. Помірні значення факторів інфляції дисперсії для патентів і зайнятості свідчать про наявність певних спільних структурних ефектів, які слід враховувати під час інтерпретації їхнього індивідуального внеску.

Отримані результати свідчать про те, що політика циркулярної економіки в ЄС має бути диференційована відповідно до структурних профілів країн. Для країн Кластера 0 пріоритетом має бути розбудова базової спроможності, зокрема розвиток систем збирання відходів, сортувальної інфраструктури та забезпечення відповідності регуляторним вимогам. Для країн Кластера 2, які демонструють відносно високі результати переробки, але мають слабший інноваційний потенціал і нижчі можливості зайнятості, політика має зосереджуватися на розвитку досліджень, кращій інтеграції у ринки вторинної сировини та розвитку навичок у сфері циркулярної економіки. Для країн Кластера 1 політика має бути спрямована на підтримку інновацій, передавання знань і поширення найкращих практик циркулярної економіки в межах ЄС, оскільки трансфер успішного досвіду розвитку може сприяти структурній трансформації систем із нижчими результатами (Freyer et al., 2021). У ширшому контексті результати підтверджують необхідність таких механізмів фінансування та моніторингу, які розрізняють потреби в розбудові спроможності та результативність, орієнтовану на досягнуті показники, замість застосування однакових політичних очікувань до всіх держав-членів.

Для узагальнення політичних наслідків кластерного аналізу в табл. Б1 (додаток Б) подано огляд авторських пропозицій щодо посилення рамки циркулярної економіки ЄС. У таблиці кожен профіль країн пов'язано з основними структурними слабкими сторонами, виявленими в дослідженні, та відповідними пріоритетними напрямками політики.

Обговорення

У цьому дослідженні уточнено інтерпретацію пластикових індикаторів переробки: встановлено, що вони свідчать про циркулярний прогрес лише в поєднанні з ширшими технологічними, соціально-економічними та ринковими спроможностями. Це узгоджується з підходами Moraga et al. (2019), Saidani et al. (2019) та De Pascale et al. (2021), які стверджують, що індикатори циркулярної економіки відрізняються за охопленням, системним рівнем та аналітичною функцією. Отримані результати також відповідають системним визначенням циркулярності (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr et al., 2023).

Дослідження доповнює напрацювання Fura et al. (2020), Kamali Saraji and Torabi (2025) та Pakuła et al. (2025), демонструючи, що відмінності у розвитку циркулярної економіки в ЄС є не лише міжкраїнними, а й структурними та чутливими до вибору індикаторів.

Загалом дослідження показує, що прогрес у переробці пластику та зрілість циркулярної економіки пов'язані між собою, але не є тотожними. Тому індикатори, пов'язані з пластиком, слід інтерпретувати в межах ширшої системи моніторингу, орієнтованої на спроможності, а не як ізольовані показники національного розвитку циркулярної економіки, що також відповідає рекомендаціям OECD (2024).

Висновки

Результати дослідження свідчать про те, що ефективність циркулярної економіки в ЄС у 2015–2023 рр. характеризується щонайменше двома частково незалежними вимірами: виміром, орієнтованим на спроможність, який охоплює інновації, торгівлю вторинними матеріалами та зайнятість, і виміром, орієнтованим на результати, який відображає ефективність переробки. Таке розмежування формує корисну аналітичну рамку для розуміння того, чому країни можуть досягати подібних результатів переробки через різні структурні конфігурації.

Результати нечіткої кластеризації методом с-середніх свідчать, що країни не поділяються на відокремлені групи, а демонструють перехресні характеристики та спільні риси.

Співіснування чітко визначених основних учасників кластерів і країн із більш збалансованими значеннями належності свідчить про те, що рівні ефективності розвиваються вздовж континууму розвитку. Деякі країни займають проміжні позиції, що відображає їхню часткову відповідність кільком кластерним профілям.

Ці результати підтверджують, що нечітка кластеризація дає змогу відобразити як неоднорідність, так і перехідну динаміку, яку методи жорсткої класифікації не можуть повною мірою описати.

Порівняння кластерів додатково демонструє, що ефективність циркулярної економіки є багатовимірною не лише за рівнем, а й за структурою. Кластер 1 демонструє збалансовані та відносно високі результати за всіма основними вимірами і представляє найбільш інтегрований профіль циркулярної економіки. Кластер 2 досягає порівняно високих результатів переробки через альтернативну траєкторію, поєднуючи високий рівень переробки зі слабшими показниками інновацій, зайнятості та торговельної інтеграції. Кластер 0 відстає за більшістю індикаторів, що підкреслює необхідність ширших структурних покращень. Ці відмінності створюють підґрунтя для більш диференційованих політичних стратегій для різних груп країн.

Темпоральна динаміка підтверджує, що розвиток систем управління пластиковими відходами має еволюційний, а не різкий характер. Країни зазвичай рухаються від систем із низькою результативністю до моделей, орієн-

тованих на ефективність, перш ніж досягти повністю розвинених структур циркулярної економіки.

Домінування переходів у напрямі Кластера 2 свідчить про те, що покращення переробки є досяжним без повної економічної трансформації, а досягнення Кластера 1 потребує ширших системних змін, зокрема розвитку інноваційного потенціалу та ринкової інтеграції.

Мультиноміальна регресія підтверджує, що диференціація кластерів зумовлена різними комбінаціями факторів, а не ізольованими індикаторами. Хоча покращення рівня переробки є достатнім для переходу країн від кластерів із низькою результативністю до кластерів із проміжною результативністю, перехід до розвинених систем потребує ширшої структурної трансформації, включаючи системну інтеграцію матеріальних потоків і розвиток інституційної спроможності.

Діагностика мультиколінеарності свідчить про коректну специфікацію моделі, у якій кореляції між предикторами наявні, але не є надмірними. Баланс між незалежністю та взаємопов'язаністю змінних відображає внутрішню складність систем управління пластиковими відходами, у яких економічні, технологічні та екологічні фактори є тісно взаємопов'язаними.

Загалом емпіричні результати підтверджують три запропоновані гіпотези та демонструють, що, за оцінювання через індикатори, пов'язані з пластиком, ефективність циркулярної економіки в країнах ЄС є багатовимірною, кластеризованою і не може бути зведена лише до ефективності переробки.

Це дослідження має кілька обмежень. По-перше, аналіз ґрунтується на обмеженому наборі макrorівневих індикаторів. По-друге, результати кластеризації є чутливими до вибору індикаторів і способів нормалізації. По-третє, значення патентів за 2022–2023 рр. були оцінені за допомогою прогнозування на основі середньорічного темпу зростання, що може вносити певну невизначеність у вимір інноваційного потенціалу. Подальші дослідження мають оновити аналіз після появи повних даних щодо патентів. Регресійний аналіз виявляє статистичні асоціації з належністю до кластерів, а не причинно-наслідкові зв'язки.

Список використаної літератури

- Agresti, A. (2002). *Categorical data analysis*. Wiley-Interscience. <https://doi.org/10.1002/0471249688>
- Alonso-Fernández, P., & Regueiro-Ferreira, R. M. (2021). An approximation to the environmental impact of economic growth using the material flow analysis: Differences between production and consumption methods, applied to China, United Kingdom and USA (1990–2017). *Sustainability*, 13(10), Article 5489. <https://doi.org/10.3390/su13105489>

- Anwar, M. A., Suprihatin, Sasongko, N. A., Najib, M., & Pranoto, B. (2024). Challenges and prospects of multilayer plastic waste management in several countries: A systematic literature review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, Article 100911. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100911>
- Avdiushchenko, A. (2021). Circular economy in Poland: Main achievements and future prospects. In A. Bisello, D. Vettorato, D. Ludlow, & C. Baranzelli (Eds.), *Smart and sustainable planning for cities and regions: Results of SSPCR 2019 – Open access contributions* (pp. 141–154). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57764-3_10
- Avdiushchenko, A., & Zajac, P. (2019). Circular economy indicators as a supporting tool for European regional development policies. *Sustainability*, 11(11), Article 3025. <https://doi.org/10.3390/su11113025>
- van Beukering, P., Kuik, O., & Oosterhuis, F. (2014). The economics of recycling. In E. Worrell & M. A. Reuter (Eds.), *Handbook of recycling: State-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists* (pp. 479–489). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07046-1>
- Bianchi, M., del Valle, I., & Tapia, C. (2021). Material productivity, socioeconomic drivers and economic structures: A panel study for European regions. *Ecological Economics*, 183, Article 106948. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.106948>
- Bocken, N., Strupeit, L., Whalen, K., & Nußholz, J. (2019). A review and evaluation of circular business model innovation tools. *Sustainability*, 11(8), Article 2210. <https://doi.org/10.3390/su11082210>
- Bruns, H., Borsello, A., Dupoux, M., Gaudillat, P., & Hamarat, Y. (2024). *Setting the scene for harmonised waste-sorting labels in the European Union – Insights from packaging waste data, survey findings and conceptual considerations* (JRC Science for Policy Report EUR 31960 EN). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/00013>
- Bublyk, M., Kowalska-Styczeń, A., Lytvyn, V., & Vysotska, V. (2021). The Ukrainian economy transformation into the circular based on fuzzy-logic cluster analysis. *Energies*, 14(18), Article 5951. <https://doi.org/10.3390/en14185951>
- Bullock, C. H., Thorball, N., Somlai, C., & Gallagher, J. (2022). *Packaging waste statistics, producer motivations and consumer behaviour* (EPA Research Report No. 426). Environmental Protection Agency. https://www.epa.ie/publications/research/circular-economy/Research_Report_426.pdf
- Burinskienė, A., Lingaitienė, O., & Byčenkaitė, G. (2025). Dynamics of trade of recycled raw materials and the connection with the circular economy. *Discover Sustainability*, 6, Article 680. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01502-4>

- Cader, J., Koneczna, R., & Marciniak, A. (2024). Indicators for a circular economy in a regional context: An approach based on Wielkopolska region, Poland. *Environmental Management*, 73, 293–310. <https://doi.org/10.1007/s00267-023-01887-w>
- Crass, D., Garcia Valero, F., Pitton, F., & Rammer, C. (2019). Protecting innovation through patents and trade secrets: Evidence for firms with a single innovation. *International Journal of the Economics of Business*, 26(1), 117–156. <https://doi.org/10.1080/13571516.2019.1553291>
- Crescenzi, R., Dyèvre, A., & Neffke, F. (2022). Innovation catalysts: How multinationals reshape the global geography of innovation. *Economic Geography*, 98(3), 199–227. <https://doi.org/10.1080/00130095.2022.2026766>
- De Pascale, A., Arbolino, R., Szopik-Depczyńska, K., Limosani, M., & Ioppolo, G. (2021). A systematic review for measuring circular economy: The 61 indicators. *Journal of Cleaner Production*, 281, Article 124942. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124942>
- Dominish, E., Retamal, M., Sharpe, S., Lane, R., Rhamdhani, M. A., Corder, G., Giurco, D., & Florin, N. (2018). "Slowing" and "narrowing" the flow of metals for consumer goods: Evaluating opportunities and barriers. *Sustainability*, 10(4), Article 1096. <https://doi.org/10.3390/su10041096>
- Dong, M. W. Y. (2025). Projecting the development of accelerator technologies using growth models and social cost benefit frameworks. *Journal of Digital Business and International Marketing*, 1(2), 109–118. <https://doi.org/10.64026/JDBIM/2025012>
- Džajić Uršič, E., Pandiloska Jurak, A., & Topić Božič, J. (2025). From policy to practice: EU circular economy legislation and Slovenia's implementation challenges – A systematic review. *Sustainability*, 17(21), Article 9408. <https://doi.org/10.3390/su17219408>
- Ellen MacArthur Foundation. (2025). *What is the meaning of a circular economy and what are the main principles?* <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- European Commission. (2018a). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on a monitoring framework for the circular economy* (COM/2018/29 final). Publications Office of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0029>
- European Commission. (2018b). *Commission staff working document: Measuring progress towards the circular economy in the European Union – Key indicators for a monitoring framework* (SWD(2018) 17 final). Publications Office of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018SC0017>

- European Commission. (2018c). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A European strategy for plastics in a circular economy (COM(2018) 28 final)*. Publications Office of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0028>
- European Commission. (2021). *Commission staff working document: Impact assessment accompanying the document Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on shipments of waste and amending Regulations (EU) No 1257/2013 and (EU) No 2020/1056 (SWD(2021) 331 final)*. Publications Office of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52021SC0331>
- European Environment Agency. (2023). *Tracking waste prevention progress: A narrative-based waste prevention monitoring framework at the EU level*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/612143>
- Eurostat. (2025a). *Patents related to recycling and secondary raw materials* [Data set]. Retrieved October 15, 2025, from https://doi.org/10.2908/CEI_CIE020
- Eurostat. (2025b). *Resource productivity* [Data set]. Retrieved October 15, 2025, from https://doi.org/10.2908/ENV_AC_RP
- Eurostat. (2025c). *Generation of plastic packaging waste per capita* [Data set]. Retrieved October 15, 2025, from https://doi.org/10.2908/CEI_PC050
- Eurostat. (2025d). *Trade in recyclable raw materials* [Data set]. Retrieved October 15, 2025, from https://doi.org/10.2908/CEI_SRM020
- Eurostat. (2025e). *Persons employed in circular economy sectors* [Data set]. Retrieved October 15, 2025, from https://doi.org/10.2908/CEI_CIE011
- Eurostat. (2025f). *Recycling rate of packaging waste by type of packaging* [Data set]. Retrieved October 15, 2025, from https://doi.org/10.2908/CEI_WM020
- Eurostat. (2025g). *Recycling rate of municipal waste* [Data set]. Retrieved October 15, 2025, from https://doi.org/10.2908/CEI_WM011
- Freyer, E., Lishchynskyy, I., & Lyzun, M. (2021). Development of renewable energy: The experience of East Germany for Ukraine. *Journal of European Economy*, 20(3), 442–460. <https://doi.org/10.35774/jee2021.03.440>
- Fura, B., Stec, M., & Miś, T. (2020). Statistical evaluation of the level of development of circular economy in European Union member countries. *Energies*, 13(23), Article 6401. <https://doi.org/10.3390/en13236401>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning: With applications in R*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>
- Kamali Saraji, M., & Torabi, M. (2025). Progress toward a circular economy: A comparative analysis of EU member states. *Sustainability*, 17(18), Article 8448. <https://doi.org/10.3390/su17188448>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kirchherr, J., Yang, N.-H.N., Schulze-Spüntrup, F., Heerink, M. J., & Hartley, K. (2023). Conceptualizing the circular economy (revisited): An analysis of 221 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*, 194, Article 107001. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>
- Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W., & Wiedenhofer, D. (2018). From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. *Global Environmental Change*, 52, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003>
- Liang, J., Bi, G., & Zhan, C. (2020). Multinomial and ordinal Logistic regression analyses with multi-categorical variables using R. *Annals of Translational Medicine*, 8(16), Article 982. <https://doi.org/10.21037/atm-2020-57>
- Lingaitiene, O., & Burinskiene, A. (2024). Development of trade in recyclable raw materials: Transition to a circular economy. *Economies*, 12(2), Article 48. <https://doi.org/10.3390/economies12020048>
- Lishchynskyy, I., Krysovatty, A., Desyatnyuk, O., Bogacki, S., & Lyzun, M. (2025). Quantitative measurement of glocalization to assess endogenous and exogenous parameters of regional sustainability. *Sustainability*, 17(17), Article 7584. <https://doi.org/10.3390/su17177584>
- Lotti, F., & Nobile, C. (2025). *The geography of innovation: Patent insights into Europe's green and digital transitions* (Occasional Paper No. 945). Banca d'Italia. <https://doi.org/10.32057/0.QEF.2025.945>
- Matthews, C., Moran, F., & Jaiswal, A. K. (2021). A review on European Union's strategy for plastics in a circular economy and its impact on food safety. *Journal of Cleaner Production*, 283, Article 125263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125263>
- McCarthy, A., Dellink, R., & Bibas, R. (2018). *The macroeconomics of the circular economy transition: A critical review of modelling approaches* (OECD Environment Working Papers No. 130). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/af983f9a-en>

- McMillin, K. W. (2025). Processed meats packaging technologies and recent innovations. In *Reference module in food science*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-34158-8.00025-6>
- Milanović, T., Savić, G., Martić, M., Milanović, M., & Petrović, N. (2022). Development of the waste management composite index using DEA method as circular economy indicator: The case of European Union countries. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(1), 771–784. <https://doi.org/10.15244/pjoes/139896>
- Moraga, G., Huysveld, S., Mathieux, F., Blengini, G. A., Alaerts, L., Van Acker, K., de Meester, S., & Dewulf, J. (2019). Circular economy indicators: What do they measure? *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 452–461. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>
- Muñoz H., M. E., Novak, M., Gil, S., Dufourmont, J., Goodwin Brown, E., Confiado, A., & Nelemans, M. (2022). Tracking a circular economy transition through jobs: Method development and application in two cities. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3, Article 787076. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.787076>
- Nowaczek, A., Dziobek, E., & Kulczycka, J. (2023). Benefits and limitations of indicators for monitoring the transformation towards a circular economy in Poland. *Resources*, 12(2), Article 24. <https://doi.org/10.3390/resources12020024>
- OECD. (2024, June 26). *Monitoring progress towards a resource-efficient and circular economy*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/3b644b83-en>
- PACE. (2021, April). *Circular indicators for governments: Accelerating action in the circular economy*. https://pacecircular.org/sites/default/files/2021-04/CircularIndicatorsForGovernments_FINAL.pdf
- Pakula, N., Łapniewska, Z., & Dutra, C. J. C. (2025). Comparative measurements of circular economy performance among European countries: Reviewing approaches and limitations. *Journal of Environmental Management*, 375(5), Article 124414. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124414>
- Perera, K. Y., Orhotohwo, O. L., Schutz, A., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2026). Chapter 10 –Smart packaging for sustainability and waste reduction. In S. Jaiswal, K. Y. Perera, & A. K. Jaiswal (Eds.), *Smart and intelligent food packaging* (pp. 263–306). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-24724-8.00014-4>
- Picuno, C., Van Eygen, E., Brouwer, M. T., Kuchta, K., & Thoden van Velzen, E. U. (2021). Factors shaping the recycling systems for plastic packaging waste – A comparison between Austria, Germany and the Netherlands. *Sustainability*, 13(12), Article 6772. <https://doi.org/10.3390/su13126772>

- Reeb, D. M., & Zhao, W. (2020). Patents do not measure innovation success. *Critical Finance Review*, 9(1–2), 157–199. <https://doi.org/10.1561/104.00000087>
- Reike, D., Vermeulen, W. J. V., & Witjes, S. (2018). The circular economy: New or refurbished as CE 3.0? Exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. *Resources, Conservation & Recycling*, 135, 246–264. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., & Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542–559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>
- Schandl, H., Marcos-Martinez, R., West, J., Miatto, A., Lutter, S., Lieber, M., Giljum, S., Lenzen, M., Li, M., Wang, H., Tanikawa, H., Krausmann, F., Eisenmenger, N., & Fischer-Kowalski, M. (2024). Global material flows and resource productivity: The 2024 update. *Journal of Industrial Ecology*, 28(6), 2012–2031. <https://doi.org/10.1111/jiec.13593>
- Schröder, P. (2020). *Promoting a just transition to an inclusive circular economy*. Chatham House. <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/2020-04-01-inclusive-circular-economy-schroder.pdf>
- Taalbi, J. (2025). Innovation with and without patents – An information-theoretic approach. *Scientometrics*, 130, 4879–4897. <https://doi.org/10.1007/s11192-025-05406-y>
- Torkelis, A., Dvarionienė, J., & Denafas, G. (2024). The factors influencing the recycling of plastic and composite packaging waste. *Sustainability*, 16(21), Article 9515. <https://doi.org/10.3390/su16219515>
- Yamaguchi, S. (2021). *International trade and circular economy – Policy alignment* (OECD Trade and Environment Working Papers No. 2021/02). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/ae4a2176-en>

Додаток А

Таблиця А1

Розподіл країн за кластерами за роками

Рік	Країни	Кластер
2015	Болгарія, Чехія, Естонія, Греція, Іспанія, Хорватія, Кіпр, Латвія, Литва, Угорщина, Мальта, Польща, Португалія, Румунія, Словаччина	Кластер 0
	Німеччина, Франція, Італія, Нідерланди, Швеція	Кластер 1
	Бельгія, Данія, Ірландія, Люксембург, Австрія, Словенія, Фінляндія	Кластер 2
2016	Болгарія, Чехія, Естонія, Греція, Хорватія, Кіпр, Латвія, Угорщина, Мальта, Польща, Португалія, Румунія, Словаччина	Кластер 0
	Німеччина, Іспанія, Франція, Італія, Нідерланди	Кластер 1
	Бельгія, Данія, Ірландія, Литва, Люксембург, Австрія, Словенія, Фінляндія, Швеція	Кластер 2
2017	Болгарія, Чехія, Естонія, Греція, Хорватія, Кіпр, Латвія, Угорщина, Мальта, Польща, Португалія, Румунія, Словаччина	Кластер 0
	Німеччина, Іспанія, Франція, Італія, Нідерланди	Кластер 1
	Бельгія, Данія, Ірландія, Литва, Люксембург, Австрія, Словенія, Фінляндія, Швеція	Кластер 2
2018	Болгарія, Чехія, Естонія, Греція, Хорватія, Кіпр, Латвія, Мальта, Польща, Португалія, Румунія, Словаччина	Кластер 0
	Німеччина, Іспанія, Франція, Італія, Нідерланди	Кластер 1
	Бельгія, Данія, Ірландія, Литва, Люксембург, Угорщина, Австрія, Словенія, Фінляндія, Швеція	Кластер 2
2019	Болгарія, Чехія, Естонія, Греція, Хорватія, Кіпр, Угорщина, Мальта, Польща, Португалія, Румунія	Кластер 0
	Німеччина, Іспанія, Франція, Італія, Нідерланди	Кластер 1
	Бельгія, Данія, Ірландія, Латвія, Литва, Люксембург, Австрія, Словенія, Словаччина, Фінляндія, Швеція	Кластер 2
2020	Болгарія, Естонія, Греція, Хорватія, Кіпр, Угорщина, Мальта, Польща, Португалія, Румунія	Кластер 0
	Німеччина, Іспанія, Франція, Італія, Нідерланди	Кластер 1
	Бельгія, Чехія, Данія, Ірландія, Латвія, Литва, Люксембург, Австрія, Словенія, Словаччина, Фінляндія, Швеція	Кластер 2
2021	Болгарія, Естонія, Греція, Хорватія, Кіпр, Угорщина, Мальта, Португалія, Румунія	Кластер 0
	Німеччина, Іспанія, Франція, Італія, Нідерланди, Польща	Кластер 1
	Бельгія, Чехія, Данія, Ірландія, Латвія, Литва, Люксембург, Австрія, Словенія, Словаччина, Фінляндія, Швеція	Кластер 2
2022	Болгарія, Естонія, Греція, Хорватія, Кіпр, Угорщина, Мальта, Португалія, Румунія	Кластер 0
	Німеччина, Іспанія, Франція, Італія, Нідерланди	Кластер 1
	Бельгія, Чехія, Данія, Ірландія, Латвія, Литва, Люксембург, Австрія, Польща, Словенія, Словаччина, Фінляндія, Швеція	Кластер 2

Джерело: розрахунки авторів на основі даних Eurostat (2025a, 2025b, 2025c, 2025d, 2025e, 2025f, 2025g).

Додаток Б

Таблиця Б1

Використання результатів кластеризації для посилення рамки циркулярної економіки ЄС

Профіль кластера	Основна слабка сторона	Пріоритетний напрям політики
Кластер 0: слабкий профіль циркулярної економіки	Низький рівень інновацій, переробки, ресурсної продуктивності та ринкової інтеграції	Базова інфраструктура управління відходами, системи сортування, регуляторна відповідність, цільове фінансування згуртованості
Кластер 1: відносно розвинений інтегрований профіль	Необхідність підтримання системного лідерства та передавання досвіду	Поширення інновацій, передавання найкращих практик, транскордонна співпраця, передові циркулярні технології
Кластер 2: змішаний профіль, орієнтований на ефективність	Сильні результати переробки, але слабші інновації, зайнятість і ринкова інтеграція	Підтримка досліджень і розробок, розвиток циркулярних навичок, ринки вторинної сировини, промислове оновлення

Джерело: власне дослідження авторів.

Отримано: 5 березня 2026 р.
Рецензовано: 15 травня 2026 р.
Рекомендовано до друку: 9 червня 2026 р.