

**Ігор Олександрович Петренко<sup>1</sup>, Тімур Рашитович Ганєєв<sup>2</sup>,  
Максим Геннадійович Болотов<sup>3</sup>, Микита Максимович Стеценко<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>асистент, викладач кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет “Чернігівська політехніка” (Чернігів, Україна)

E-mail: [igor.petrenko0511@stu.cn.ua](mailto:igor.petrenko0511@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2103-4324>. ResearcherID: IQV-2134-2023

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет “Чернігівська політехніка” (Чернігів, Україна)

E-mail: [t.ganeev@stu.cn.ua](mailto:t.ganeev@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2041-1685>

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет “Чернігівська політехніка” (Чернігів, Україна)

E-mail: [m.bolotov@stu.cn.ua](mailto:m.bolotov@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>. ResearcherID: H-4183-2014

<sup>4</sup>бакалавр, студент групи МБА-251 кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет “Чернігівська політехніка” (Чернігів, Україна)

E-mail: [malishkalia8@gmail.com](mailto:malishkalia8@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0863-4038>

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-ЯКІСНИХ ЗМІН ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТГЛІКОЛІ З ВКЛЮЧЕННЯМИ ПЕРЕРОБЛЕНОГО ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТГЛІКОЛЮ

У статті наведено результати дослідження впливу первинного PET-G та вторинного rPET-G на структуру й якість екструзійних полімерних зразків. У шести експериментах (5-30 % rPET-G) встановлено, що прозорість, однорідність і кількість дефектів проявляються не лише в процентному складі, а й температурою та стабільністю процесу екструзії. Оптимізація режимів дозволяє зменшити помутніння та повітряні включення. Отримані дані підтверджують можливість використання значної частки вторинного PET-G без помітної втрати якості, що підтримує принципи закритого циклу перероблення.

**Ключові слова:** екструзія; полімерні матеріали; PET-G; rPET-G; варіативність.

Рис.: 14. Табл.: 6. Бібл.: 10.

**Актуальність дослідження.** Проблема повторного використання полімерів набуває особливого значення в умовах зростання споживання пластикової продукції та необхідності зменшення обсягів відходів. PET-G є одним із найпоширеніших матеріалів у пакуванні та 3D-друку, тому дослідження можливостей залучення вторинного rPET-G без суттєвого погіршення якості є практично важливим.

У військових та польових умовах, де утворюються значні обсяги ПЕТ-відходів, організація їхнього збору та перероблення сприяє зниженню екологічного навантаження й забезпечує доступну вторинну сировину. Це підвищує автономність та економічність виробничих процесів.

Оскільки властивості rPET-G залежать від умов підготовки та параметрів екструзії, дослідження структурно-якісних змін матеріалу при різних співвідношеннях компонентів є необхідним для оптимізації технології. Отримані результати сприяють розширенню застосування вторинного PET-G та підтримують концепцію замкнутого циклу перероблення полімерів.

**Постановка проблеми.** Метою цієї роботи є дослідження властивостей пластику, для використання у циклічному процесі виробництва, який виготовляється методом екструдювання, шляхом змішування чистого PET-G з додаванням вторинного матеріалу типу PET-G у відсоткових пропорціях. Через проблематику зв'язку між чистим та вторинним PET-G.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Спираючись на прочитані матеріали та проведені дослідження вказані в списку використаних джерел [1-10], було прийняти рішення спробувати провести перший схожий експеримент в Україні, з використанням мінімально доступним обладнанням та дослідити властивості виробу в

умовах навчального дослідницької роботи. У статтях описувались громісткі процеси виконання з домішками та додатковими діями.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що ретельна підготовка сировини для досліду та додаткові процеси, добавки стабілізують зразки. У них не були наведені результати чис-тих дослідів без домішок та стабілізації зразка для подальшого вивчення.

**Метою статті** є експериментальне дослідження та узагальнення результатів щодо впливу первинного PET-G та вторинного rPET-G на структурні та якісні характеристики зразків, обґрунтування можливостей ефективного використання вторинної сировини. Стаття спрямована на демонстрацію потенціалу rPET-G у формуванні замкненого циклу перероблення та оптимізації технологічних параметрів екструзії для забезпечення стабільних властивостей матеріалу.

**Виклад основного матеріалу.** У рамках забезпечення екологічної безпеки в зоні дислокації військових формувань було впроваджено організований процес збору, транспортування та первинного сортування тари з поліетилентерефталату (ПЕТ, поліетилентерефталат), яка утворюється в результаті споживання бутильованої води особовим складом. Збір пляшок здійснювався силами особового складу підрозділів у спеціально відведені контейнери для вторинної сировини, після чого тара централізовано передавалася до сортувального пункту, де реалізовувався комплекс операцій із підготовки полімерної тари до подальшої утилізації та перероблення.

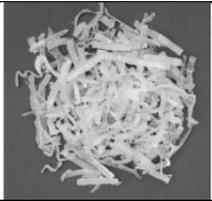
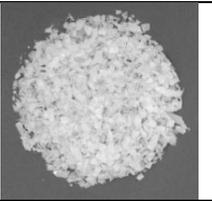
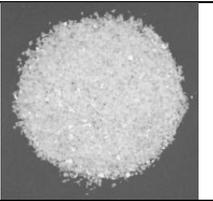
На першому етапі у сортувальному пункті здійснювалося приймання вторинної полімерної сировини з одночасним проведенням інспекції на наявність механічних домішок, залишків рідин, сторонніх матеріалів та забруднень. Після цього проводилось очищення тари шляхом промивання та механічного видалення етикеток і кришок. Оброблена тара надходила до сортувального модуля, де відбувалася класифікація за кольором, ступенем забруднення, а також за типом полімеру, з метою виокремлення саме ПЕТ-фракції, найбільш придатної до вторинного перероблення.

Після сортування пляшки підлягали підготовці до подальших стадій механічного перероблення: пресування у тюки або подрібнення до флексу (флекс – гранульована або пластівцеподібна форма підготовленої ПЕТ-сировини), придатного до повторного використання в ланцюгу виробництва полімерної продукції. У результаті реалізації цього підходу забезпечується зниження обсягів полімерних відходів у польових умовах, створення передумов для замкненого циклу використання полімерів, а також інтеграція елементів системи управління відходами у військову логістику.

В дослідженні використовувалось змішування первинного чистого PET-G та вторинного PET-G, який отримували шляхом подрібнення, у співвідношенні 95/5 %, 90/10 %, 85/15 %, 80/20 %, 75/25 %, 70/30 %. Об'єктом дослідження є пластинчасті зразки, їхні характеристики взяті за основу дослідження.

Після збору та промивання тари, відкручування кришок та зняття захисного кільця, пластикові пляшки подрібнюють на “пластівці” (рис. 2). Фракція пластику показана в табл. 1, результати подрібнення показані на рис. 1.

Таблиця 1 – Фракція пластику

| Ім'я         | Великий   | Середній  | Міткий  |
|--------------|---|---|---|
| Візуально    |  |  |  |
| Розмір       | 0 – 30 мм   | 0 – 10 мм   | 0 – 7 мм  |
| Використання | Листовий прес   | Листовий прес, Ін'єкційний, Компресія   | Листовий прес, Ін'єкційний Компресія, Екструзія                                     |

Джерело: розроблено авторами.



Рис. 1. Результати механічного подрібнення пластикових пляшок



Рис. 2. Процес висушування подрібненого вторинного PET-G

Для дослідження та оцінювання характеристик зразків використано мілку фракцію полімерного матеріалу.

Співвідношення у грамах були підібрані наступним чином: 9,5/0,5 г, 9,0/1,0 г, 8,5/1,5 г, 8,0/2,0 г, 7,5/2,5 г, 7,0/3,0 г.

Під час початкової стадії екструзії у зразках 1 та 2 було зафіксовано незначне помутніння, зразок 3 зміна кольору, при незначному перегріві матеріалу та затримці в зоні плавлення PET-G може частково карамелізуватися, що призводить до появи жовтувато-коричневого відтінку. Зразки 4 та 5 більш прозорі з незначним помутнінням у центрі. Вид зразків під мікроскопом показаний на рис. 4. Види отриманих зразків наведені на рис. 3. На рис. 5 зображений графік коефіцієнтів якості кожного зразку першого дослідження. Арегування результатів наведені в таблиці 2.

Під час екструзії полімерної нитки спостерігалось утворення повітряних бульбашок, проте завдяки оптимальним параметрам плавлення та пресування більшість із них була елімінована, що забезпечило формування більш однорідної та стабільної структури матеріалу [2].

Таблиця 2 – Арегування результатів на прозорості, оцінка суцільності та кількості повітряних включень першого досліду

| № зразка | Оцінка прозорості                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 | +                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| № зразка | Оцінка суцільності                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| № зразка | Оцінка кількості повітряних включень |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 | +                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

Джерело: розроблено авторами.

Після проведення кореляції використаємо формулу коефіцієнта якості для показника прозорості та використовуємо її для подальших показників (1).

$$X_{норм} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} ; \tag{1}$$

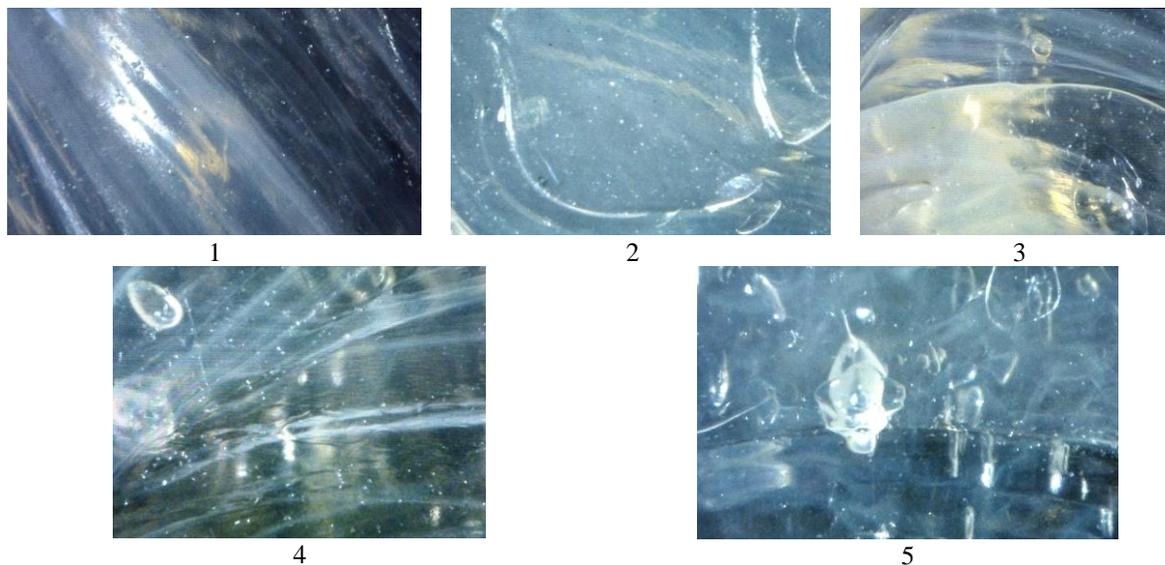


Рис. 3. Зразки під мікроскопом зі співвідношенням 95/5

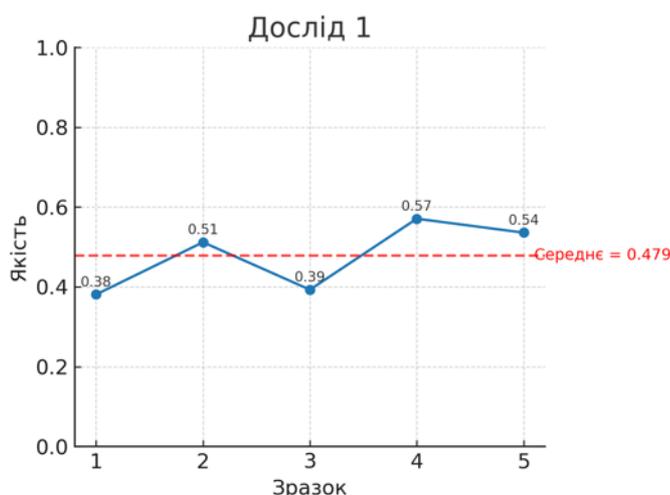


Рис. 4. Графік показників коефіцієнтів якості першого дослідю

На початкових етапах екструзії було зафіксовано значне помутніння всього зразку 1, це не допустиме, тому не будемо враховувати його характеристики.

Зразок 2 та 3 – карамелізувалися, через залишки попереднього плавлення та екструзування, пластик перегрівся та залишався якийсь час в точці підвищеної температури. У зразках 4 та 5 в центрі наявне помутніння, але зразки прозорі по краю, їхня структура більш-менш однорідна. Додатково встановлено, що після процесу екструзії у зразках на основі чистого та вторинного PET-G наявні дефекти у вигляді повітряних включень, аналогічні до попередніх спостережень. Арегування результатів показані в таблиці 3. Вид зразків під мікроскопом показаний на рис. 5. На рис. 6 показаний графік коефіцієнтів якості кожного зразку другого дослідю [3].

Таблиця 3 – Арегування результатів на прозорості, оцінка суцільності та кількості повітряних включень другого дослідю

| № зразка | Оцінка прозорості                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 | -                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| № зразка | Оцінка суцільності                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 | -                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| № зразка | Оцінка кількості повітряних включень |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 | -                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |

Джерело: розроблено авторами.

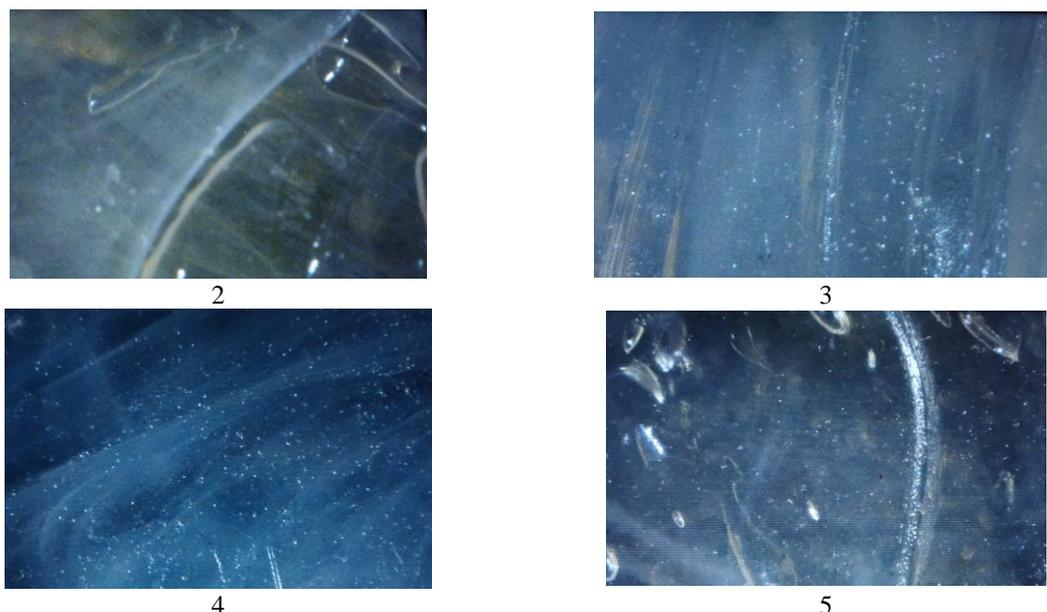


Рис. 5. Зразки під мікроскопом зі співвідношенням 90/10

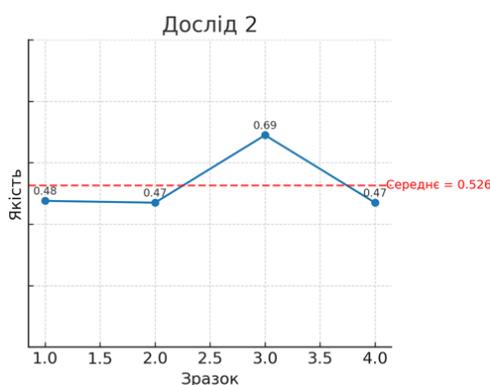


Рис. 6. Графік показників коефіцієнтів якості другого досліду

У процесі екструзії було зафіксовано посилення помутніння зразків 1, 2 та 3, що, ймовірно, пов'язане з впливом швидкого охолодження, яке сприяє утворенню внутрішніх напружень і структурних неоднорідностей. Зразок 1 повністю з помутнінням це не допустимо. У зразках 2 та 3 помутніння лише поверхове. 4 та 5 зразки з незначними помутніннями в центрі, але по краю зразків залишились прозорі частини. Додатково встановлено, що після екструзії у зразках на основі чистого та вторинного PET-G присутні дефекти у вигляді повітряних включень, які негативно впливають на однорідність структури. Вид зразків під мікроскопом показаний на рис 7. Арегування результатів показано в табл. 4. На рис. 8 показаний графік коефіцієнтів якості кожного зразку третього досліду [4].

Таблиця 4 – Арегування результатів на прозорості, оцінка суцільності та кількості повітряних включень третього досліду

| № зразка | Оцінка прозорості |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 | +                 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                   |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                   | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                   |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                   |   |   |   |   |   |   | + |   |    |

Закінчення табл. 4

| № зразка | Оцінка суцільності                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 | +                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| № зразка | Оцінка кількості повітряних включень |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   | + |   |   | + |   |   |    |

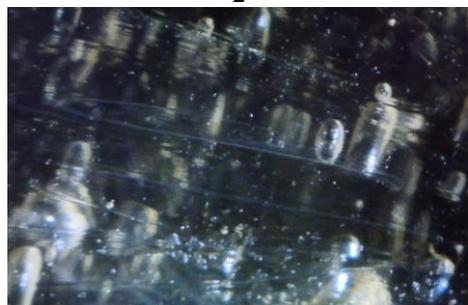
Джерело: розроблено авторами



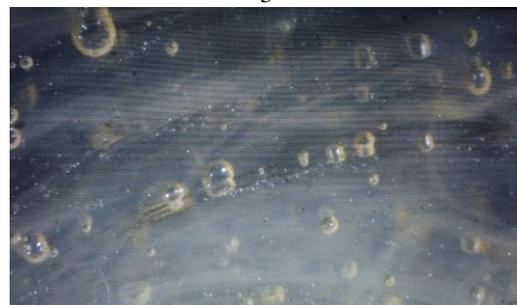
2



3



4



5

Рис. 7. Зразки під мікроскопом зі співвідношенням 85/15

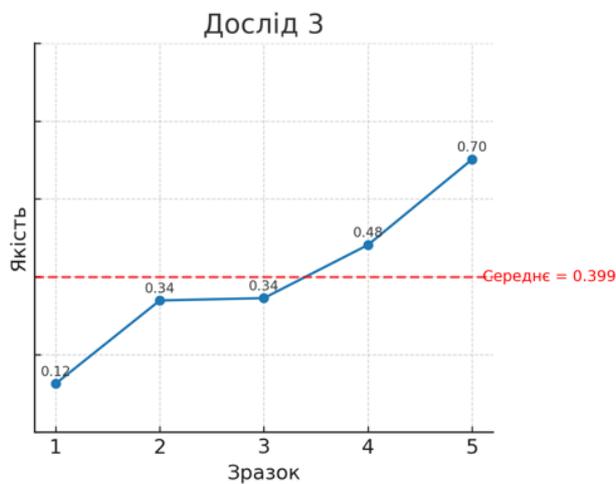


Рис. 8. Графік показників коефіцієнтів якості третього дослід

У процесі екструзії перший тестовий зразок продемонстрував майже повну втрату прозорості внаслідок інтенсивного помутніння, що унеможливило його подальше використання в аналізі. У зв'язку з цим до серії було додано ще один зразок, і загальна кількість дослідних зразків склала шість. Подальші екструзії виявили тенденцію до зменшення інтенсивності помутніння: на початкових стадіях дефекти локалізувалися переважно у центральній частині, це видно на зразках з 1 по 4, однак зі збільшенням температури їх прояв поступово знижувався. При виготовленні зразка 5, спостерігалось лише незначне помутніння на бічній поверхні. Крім того, у процесі підвищення температури було зафіксовано істотне зменшення кількості повітряних включень, що свідчить про позитивний вплив оптимізації параметрів екструзії на якість матеріалу. Вид зразків під мікроскопом показаний на рис. 9. Арегування результатів показані в таблиці 5. На рис. 10 показаний графік коефіцієнтів якості кожного зразку четвертого досліду [5].

Таблиця 5 – Арегування результатів на прозорості, оцінка суцільності та кількості повітряних включень четвертого досліду

| № зразка | Оцінка прозорості                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| № зразка | Оцінка суцільності                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| № зразка | Оцінка кількості повітряних включень |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |

Джерело: розроблено авторами.

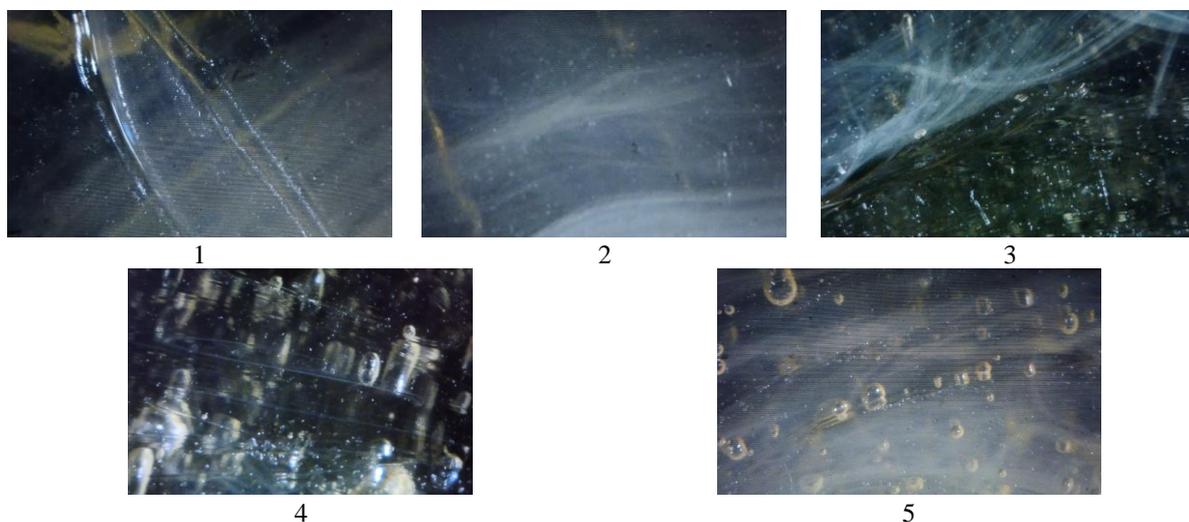


Рис. 9. Зразки під мікроскопом зі співвідношенням 80/20

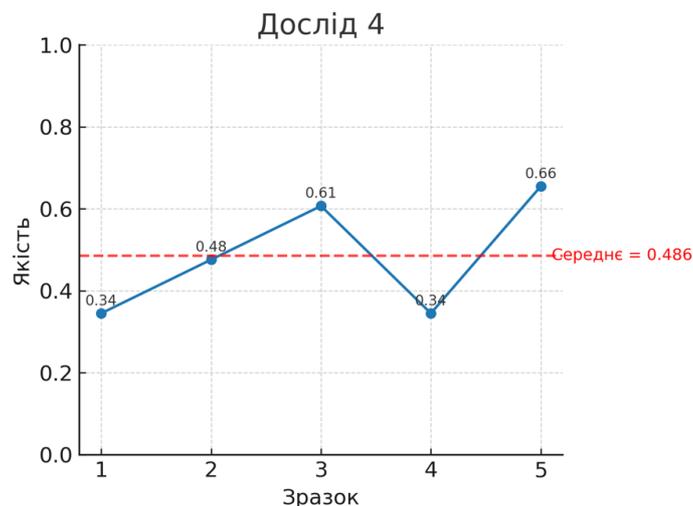


Рис. 10. Графік показників коефіцієнтів якості четвертого досліду

Зразок 1 характеризувався значним помутнінням, при цьому бокові ділянки залишалися відносно прозорими. У подальших експериментах спостерігалось зменшення інтенсивності помутніння: це видно на зразку 2, зразок 3 здобув карамельний відтінок, у зразків 4 та 5 дефект проявлявся лише у центральній частині. Важливим результатом є практично повне усунення повітряних включень, що свідчить про оптимізацію технологічних параметрів процесу. Однорідність зразка 4 майже ідеальна. Вид зразків під мікроскопом показаний на рис. 11. Арегування результатів показані в таблиці 6. На рис. 12 показаний графік коефіцієнтів якості кожного зразку п'ятого досліду [6].

Таблиця 6 – Арегування результатів на прозорості, оцінка суцільності та кількості повітряних включень п'ятого досліду

| № зразка | Оцінка прозорості                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 | +                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| № зразка | Оцінка суцільності                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| № зразка | Оцінка кількості повітряних включень |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   |   |   |   | + |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |

Джерело: розроблено авторами.

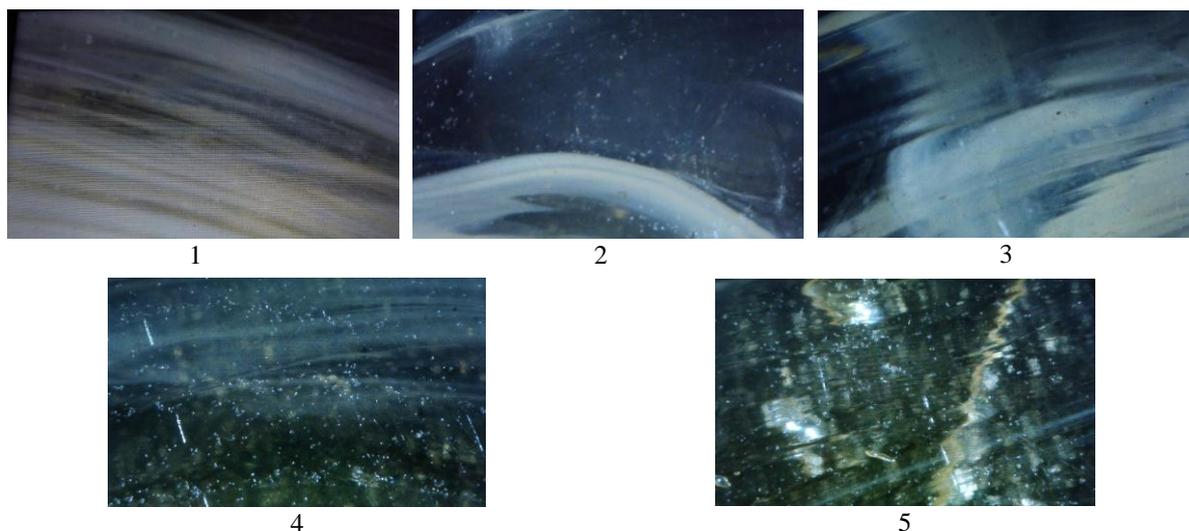


Рис. 11. Зразки під мікроскопом зі співвідношенням 75/25

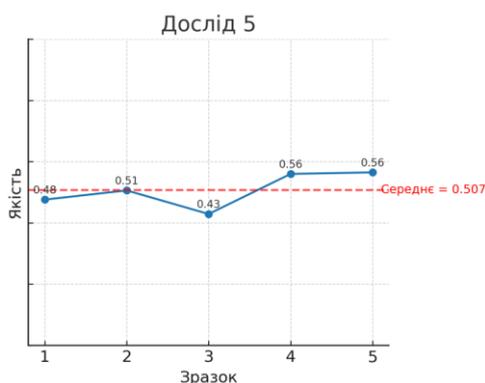


Рис. 12. Графік показників коефіцієнтів якості п'ятого дослід

Під час проведення екструзії зразків спостерігались різні ступені прозорості матеріалу. У частині зразків, а саме 1, 2, 3, відзначались виражені помутніння, що, ймовірно, пов'язано з локальними змінами щільності полімерної матриці, утворенням мікропор та швидкого охолодження. Водночас у зразку 4 помутніння були мінімальними, у зразку 5 повністю відсутні помутніння, що свідчить про рівномірне формування матеріалу під час процесу екструзії.

Структурний аналіз показав майже однорідну морфологію зразків, без наявності повітряних включень у досліджуваних зразках. Така однорідність є важливим показником якості екструдованого матеріалу, оскільки відсутність газових порожнин сприяє підвищенню механічної міцності та оптичної прозорості виробів. Вид зразків під мікроскопом показаний на рис. 13. Арегування результатів показані в таблиці 7. На рис. 14 показаний графік коефіцієнтів якості кожного зразку п'ятого дослід [7].

Таблиця 7 – Арегування результатів на прозорості, оцінка суцільності та кількості повітряних включень шостого дослід

| № зразка | Оцінка прозорості |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                   | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                   |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                   |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                   |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 5 |                   |   |   |   |   |   |   |   | + |    |

Закінчення табл. 7

| № зразка | Оцінка суцільності                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 | +                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| № зразка | Оцінка кількості повітряних включень |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |

Джерело: розроблено авторами

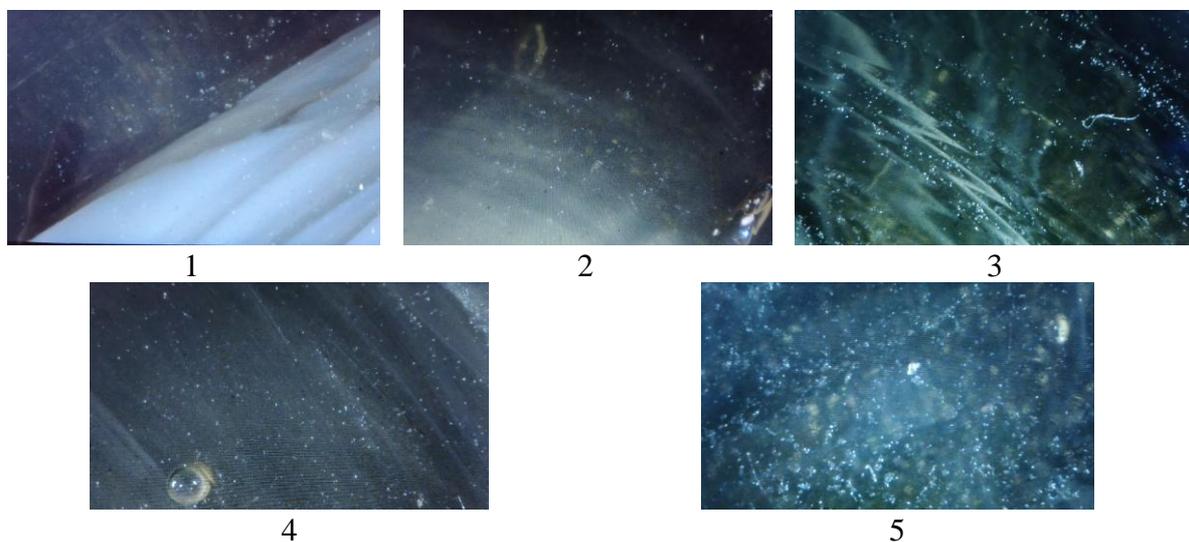


Рис. 13. Зразки під мікроскопом співвідношення 70/30

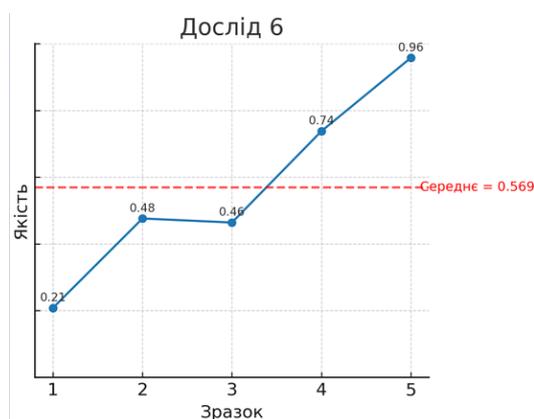


Рис. 14. Графік показників коефіцієнтів якості шостого дослідів

**Висновки.** Проведені дослідів показали, що прозорість та однорідність полімерних зразків на основі чистого та вторинного PET-G значною мірою залежать від порядку екструзії та співвідношення компонентів у об'ємі сировини. Зменшення інтенсивності помутніння у пізніших зразках свідчить про стабілізацію процесу та ефективне видалення газових включень.

На ранніх етапах екструзії спостерігались локальні помутніння, що були пов'язані з утворенням мікропор, залишковими легкими компонентами та інтенсивним охолодженням матеріалу. Оптимізація температурного режиму та параметрів пресування дозволила значно зменшити ці дефекти [8].

Структурний аналіз показав, що більшість досліджуваних зразків має майже однорідну структуру без повітряних включень. Це свідчить про високу ефективність процесу екструзії та потенціал для виробництва стабільного та чистого матеріалу.

Виявлено, що підвищення вмісту вторинного PET-G у суміші призводить до збільшення частоти помутнінь та утворення дефектів, але тільки до певного відсоткового значення вмісту вторинної сировини у первинній. Отримані результати дозволяють визначити оптимальні співвідношення компонентів для досягнення необхідних експлуатаційних властивостей матеріалу. На рис. 15 показана якість зразків у кожному досліді [9].

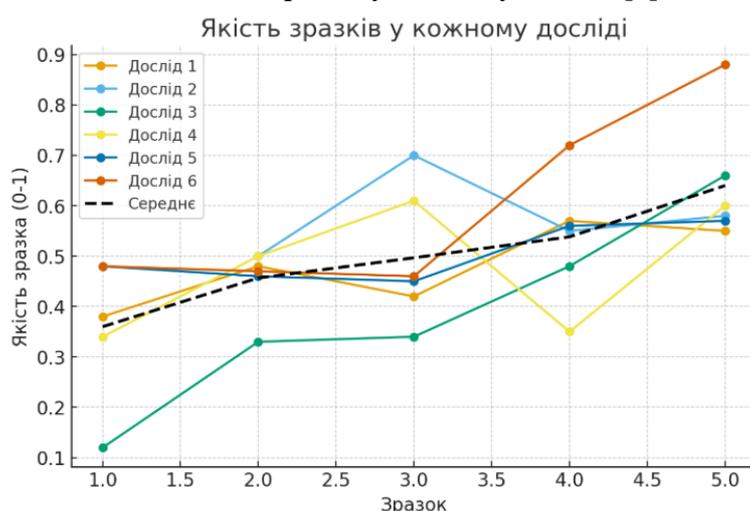


Рис. 15. Графік якості зразків у кожному досліді

Опираючись на результати отримані з шести дослідів (рис. 15), спостерігаємо, що досліді 1, 2 та 5 мають середні показники, у досліді 3 показники зразків 1-3 були нижчі за зразки 4-5 це обґрунтовано тим, що були присутні залишки сировини від попередніх дослідів які залишилися на стінках циліндра, після чого були видавлені при формуванні зразка. Четвертий дослід демонструє зниження якості зразка 4, це обґрунтовано тим, що відбулося різке відведення тепла зі зразка, що своєю чергою погіршило його якість та властивості, частина первинного та вторинного PETG залишалась у зоні нагріву та після підвищення швидкості при видавлюванні залишків сировини збільшилась кількість включень, це також вплинуло на погіршення показників характеристик та якості зразка [10].

Дослід 6 показує покращення результатів, збільшення вторинного PETG покращило якість зразків в порівнянні з попередніми дослідями. Результати досліді 6 є основою для подальшого вивчення та дослідження в цьому напрямку.

### Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автори використовували ChatGPT – більш коректний переклад розширених анотацій з мови оригіналу на англійську мову. Після використання цього інструменту/сервісу автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

### Список використаних джерел

1. Rahaf, A., Wisam, A. J., Hamna, A., & Eman, A. (2022). A revision for the different reuses of polyethylene terephthalate (PET) water bottles. *Sustainability*, 14(8), 4583. <https://doi.org/10.3390/su14084583>.

2. Sharon, B., Jennifer, S., Heather, W., & Ravi, J. (2010). An overview of the sustainability of solid waste management at military installations. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 12(3/4), 289–304. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2010.032534>.
3. Mario, G., & Francesca, V. (2020). *Analysis of the municipal solid waste management and treatment in Khartoum state and design of a mixed waste processing facility* (Master's thesis, Politecnico di Milano). <https://hdl.handle.net/10589/169977>.
4. Bajer, K. (2023). Post-consumer plastic waste management: From collection and sortation to mechanical recycling. *Energies*, 16(8), 3504. <https://doi.org/10.3390/en16083504>.
5. Vigneshwaran, S., Dutta, O., Elnour, R., Balasubramanian, K., Singh, S., et al. (2020). Polymer recycling in additive manufacturing: An opportunity for the circular economy. *Materials Circular Economy*, 2, 11. <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00012-0>.
6. Geena P., H. Arunav, S. Dwight, Madhav B. G., Madhav B. G., Ayona J., Deepa I. N. (2024). Advanc Paulose, G., Arunav, H., Dwight, S., Babu George, M., Babu George, M., Jothi, A., & Nair, D. I. (2024). Advancing sustainable practices in additive manufacturing: A comprehensive review on material waste recyclability. *Sustainability*, 16(23), 10246. <https://doi.org/10.3390/su162310246>.
7. Rusu, I.-C., Vintilă, A.-M., Cherecheș, D.-E., Barz, E., & Zaharia, C. (2025). Advancing sustainability in modern polymer processing: Strategies for waste resource recovery and circular economy integration. *Polymers*, 17(4), 522. <https://doi.org/10.3390/polym17040522>.
8. Acobs, G. P., Lankhorst, B. J., ten Cate, T., Sezen, M., & Ozkoc, G. (2021). Sustainable approach to produce 3D-printed continuous carbon fiber composites: A comparison of virgin and recycled PETG. *Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/pc.26143>.
9. Mercado-Colmenero, J. M., La Rubia, M. D., Mata-García, E., Rodríguez-Santiago, M., & Martín-Doñate, C. (2020). Experimental and numerical analysis for the mechanical characterization of PETG polymers manufactured with FDM technology under pure uniaxial compression stress states for architectural applications. *Polymers*, 12(10), 2202. <https://doi.org/10.3390/polym12102202>.
10. Valvez, S., Silva, A. P., & Reis, P. N. B. (2022). Optimization of printing parameters to maximize the mechanical properties of 3D-printed PETG-based parts. *Polymers*, 14(13), 2564. <https://doi.org/10.3390/polym14132564>.

## References

1. Rahaf, A., Wisam, A. J., Hamna, A., & Eman, A. (2022). A revision for the different reuses of polyethylene terephthalate (PET) water bottles. *Sustainability*, 14(8), 4583. <https://doi.org/10.3390/su14084583>.
2. Sharon, B., Jennifer, S., Heather, W., & Ravi, J. (2010). An overview of the sustainability of solid waste management at military installations. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 12(3/4), 289–304. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2010.032534>.
3. Mario, G., & Francesca, V. (2020). *Analysis of the municipal solid waste management and treatment in Khartoum state and design of a mixed waste processing facility* (Master's thesis, Politecnico di Milano). <https://hdl.handle.net/10589/169977>.
4. Bajer, K. (2023). Post-consumer plastic waste management: From collection and sortation to mechanical recycling. *Energies*, 16(8), 3504. <https://doi.org/10.3390/en16083504>.
5. Vigneshwaran, S., Dutta, O., Elnour, R., Balasubramanian, K., Singh, S., et al. (2020). Polymer recycling in additive manufacturing: An opportunity for the circular economy. *Materials Circular Economy*, 2, 11. <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00012-0>.
6. Geena P., H. Arunav, S. Dwight, Madhav B. G., Madhav B. G., Ayona J., Deepa I. N. (2024). Advanc Paulose, G., Arunav, H., Dwight, S., Babu George, M., Babu George, M., Jothi, A., & Nair, D. I. (2024). Advancing sustainable practices in additive manufacturing: A comprehensive review on material waste recyclability. *Sustainability*, 16(23), 10246. <https://doi.org/10.3390/su162310246>.
7. Rusu, I.-C., Vintilă, A.-M., Cherecheș, D.-E., Barz, E., & Zaharia, C. (2025). Advancing sustainability in modern polymer processing: Strategies for waste resource recovery and circular economy integration. *Polymers*, 17(4), 522. <https://doi.org/10.3390/polym17040522>.
8. Acobs, G. P., Lankhorst, B. J., ten Cate, T., Sezen, M., & Ozkoc, G. (2021). Sustainable approach to produce 3D-printed continuous carbon fiber composites: A comparison of virgin and recycled PETG. *Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/pc.26143>.

9. Mercado-Colmenero, J. M., La Rubia, M. D., Mata-García, E., Rodríguez-Santiago, M., & Martín-Doñate, C. (2020). Experimental and numerical analysis for the mechanical characterization of PETG polymers manufactured with FDM technology under pure uniaxial compression stress states for architectural applications. *Polymers*, *12*(10), 2202. <https://doi.org/10.3390/polym12102202>.

10. Valvez, S., Silva, A. P., & Reis, P. N. B. (2022). Optimization of printing parameters to maximize the mechanical properties of 3D-printed PETG-based parts. *Polymers*, *14*(13), 2564. <https://doi.org/10.3390/polym14132564>.

Дата першого надходження статті до видання: 02.12.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.12.2025

UDC 678.027.32

**Ihor Petrenko<sup>1</sup>, Timur Hanieiev<sup>2</sup>, Maksym Bolotov<sup>3</sup>, Mykyta Stetsenko<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>assistant, Lecturer, Department of Welding and Construction Technologies  
National University “Chernihiv Polytechnic” (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [igor.petrenko0511@stu.cn.ua](mailto:igor.petrenko0511@stu.cn.ua) **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-2103-4324> **ResearcherID:** [IQV-2134-2023](https://orcid.org/IQV-2134-2023)

<sup>2</sup>candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding and Construction Technologies  
National University “Chernihiv Polytechnic” (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [t.ganeev@stu.cn.ua](mailto:t.ganeev@stu.cn.ua) **ORCID** [0009-0006-2041-1685](https://orcid.org/0009-0006-2041-1685)

<sup>3</sup>candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding and Construction  
National University “Chernihiv Polytechnic” (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [m.bolotov@stu.cn.ua](mailto:m.bolotov@stu.cn.ua) **ORCID** [0000-0002-0915-4132](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132) **ResearcherID:** [H-4183-2014](https://orcid.org/H-4183-2014)

<sup>4</sup>bachelor, student of the MBA-251 group of the Department of Welding and Construction Technologies  
National University “Chernihiv Polytechnic” (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [malishkalia8@gmail.com](mailto:malishkalia8@gmail.com) **ORCID** [0009-0001-0863-4038](https://orcid.org/0009-0001-0863-4038)

## STUDY OF STRUCTURAL AND QUALITATIVE CHANGES IN POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL WITH INCLUSIONS OF RECYCLED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL

*The article presents the results of a comprehensive experimental study examining the influence of primary PET-G and secondary rPET-G on the structural formation, optical transparency, and overall quality of polymer samples produced through extrusion. Six experimental series were conducted with recycled material content ranging from 5% to 30%. The findings show that the key quality parameters—such as haze formation, color stability, uniformity of the internal structure, and the presence of air inclusions—are determined not only by the proportion of rPET-G in the mixture but also by the thermal regime, extrusion sequence, and the overall stability of processing conditions.*

*The study demonstrates that insufficient temperature stabilization, non-uniform heating, residual material from previous cycles, and rapid cooling can significantly affect the properties of extruded samples. These factors contribute to structural heterogeneity, caramelization effects, and localized cloudiness within the polymer matrix. Detailed microscopic examination revealed that early-stage samples tend to accumulate micropores and air pockets, while optimized processing parameters noticeably reduce the intensity and frequency of such defects.*

*Moreover, the experiments confirm that careful adjustment of extrusion temperature, feed rate, and material preparation leads to improved structural homogeneity and enhanced transparency. The ability to nearly eliminate air inclusions in optimized regimes highlights the importance of process refinement for achieving stable material properties, even when using a considerable portion of recycled PET-G.*

*Overall, the results substantiate the feasibility of incorporating rPET-G without a significant decline in optical or mechanical quality, provided that extrusion parameters are carefully controlled. This reinforces the potential of recycled PET-G as a valuable component in polymer production, supporting sustainable manufacturing practices and contributing to the development of an efficient closed-loop recycling system. The study forms a solid basis for further technological optimization, encouraging broader industrial application of recycled polymer materials.*

**Keywords:** Extrusion; polymeric materials; PET-G; rPET-G; variability.

*Fig.: 14. Table: 6. References: 10.*