

Józef STABIK, Małgorzata SZYMICZEK, Gabriel WRÓBEL, Maciej ROJEK,  
Politechnika Śląska

## Wpływ filtracji uplastycznionego recyklatu PET na własności mechaniczne folii trójwarstwowej

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań mechanicznych trójwarstwowej folii wytłoczonej z poli(tereftalanu etylenu) - PET. Warstwa wewnętrzna folii wykonana była z recyklatu PET poddanego filtracji na zestawach sit o różnej wielkości oczek. Na wstępie omówiono proces filtracji uplastycznionych materiałów polimerowych. W ramach badań określono wpływ gęstości sit filtracyjnych na podstawowe własności mechaniczne określone w próbie rozciągania. Wyniki badań wskazują, że własności recyklatu poddanego filtracji są zbliżone do własności oryginalnego, handlowego tworzywa. Wraz ze wzrostem wielkości oczek zaobserwowano niewielkie obniżenie własności wytrzymałościowych i zwiększenie rozrzutu wyników.

**Słowa kluczowe:** recyklat poli(tereftalanu etylenu), sita filtracyjne, folia trójwarstwowa, własności mechaniczne

### THE INFLUENCE OF PET RECYCLATE MELT FILTRATION ON MECHANICAL PROPERTIES OF THREE-LAYER FILM

**Abstract:** The paper presents results of mechanical tests of extruded three-layer poly(ethylene terephthalate) - PET film. The inner layer of the film was produced of PET recycle subjected to filtration using sieves with different mesh size. At the beginning filtration process of polymer melts is shortly presented. Within the framework of research the influence of mesh size of filtration screens on basic mechanical properties determined in tensile strength test was determined. Achieved results indicate that properties of recycles subjected to filtration are similar to properties of virgin material. A slight decrease in strength properties and greater scatter of results with the mesh size increase was observed.

**Keywords:** poly(ethylene terephthalate) recycle, filtration screens, three-layer film, mechanical properties

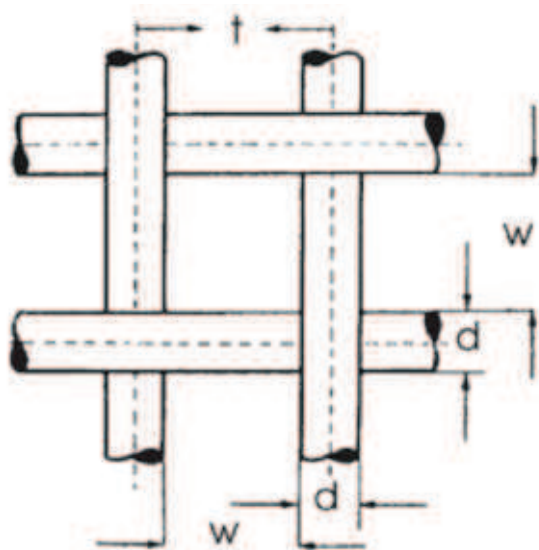
### 1. WSTĘP

Recykling poli(tereftalanu etylenu), ze względu na dużą ilość odpadów poprodukcyjnych oraz użytkowych jest istotnym problemem dla ochrony środowiska. Wielkość jego produkcji wyraża się w dziesiątkach tysięcy ton (od roku 2006 produkowanych jest w kraju około 500 mln sztuk opakowań wykonanych z PET rocznie). Dodatkowym problemem jest niewielka biodegradowalność tego polimeru. Koszty składowania odpadów są podstawowym czynnikiem przemawiającym za jego recyklingiem.

Ze względu na równowagowy charakter syntezy i stopniowy wzrost makrocząsteczek możliwy jest również recykling surowcowy poli(tereftalanu etylenu) [1,2]. Polega on na rozkładzie makrocząsteczki w wyniku reakcji degradacji i depolimeryzacji z przejściem do surowców wyjściowych lub do oligomerów, co daje możliwość powtórnej jego syntezy z dodatkiem czystego monomeru. Produkty otrzymane w ten sposób mogą zostać wykorzystane jako samodzielny surowiec lub domieszka do granulatu PET. Recykling surowcowy polega na wykorzystaniu procesu hydrolizy, alkoholizy lub glikolizy do otrzymania niskocząsteczkowych związków wyjściowych, które są następnie wykorzystywane do powtórnej syntezy PET. Takie podejście jest czasochłonne i energochłonne. W związku z tym na skalę przemysłową wykorzystuje się procesy filtracji recyklatu poli(tereftalanu etylenu) [3,4].

Proces filtracji polega na oczyszczeniu plastycznej masy lub roztworu tworzywa z mechanicznych i niepożądanych cząstek za pomocą odpowiednio dobranego narzędzia przeznaczonego do filtracji. Można tu wykorzystać różnego rodzaju włókna, piasek (kwarc), tkanie siatki metalowe, proszki spiekane lub membrany. Biorąc pod uwagę szczególne wymagania techniczne jak temperatura, wytrzymałość korozyjna oraz wytrzymałość mechaniczna specjalna rola przypada tu siatkom filtracyjnym wykonanym ze stali nierdzewnej, które stanowią optymalne rozwiązanie dla filtracji ze względu na ich specyficzne właściwości i parametry. Dobór siatki jest uwarunkowany obszarem aplikacji, wymaganą efektywnością oczyszczania, parametrami przetwórstwa (temperatura, ciśnienie itd.), wymogami chemicznymi oraz mechanicznymi [5,7].

W związku z powyższym dobór siatki o optymalnych parametrach powinien być dokładnie zdefiniowany przez określenie m.in. wielkości oczek –  $w$  (rys.1 i 2, zależność 1).



Rys. 1. Schemat siatki filtracyjnej [6]

Fig. 1. Scheme of filtration mesh [6]

Siatka (rys.1) składa się z osnowy o kierunku ułożenia drutu wzdłuż długości oraz wątku ułożonego wzdłuż szerokości. Podziałkę siatki  $t$  określa się z zależności:

$$t = w + d \quad , \quad (1)$$

gdzie:

$w$  – wielkość oczka – odległość pomiędzy sąsiednimi drutami w kierunku osnowy oraz wątku

$d$  – grubość wstęgi – średnica drutu, z którego splatana jest siatka

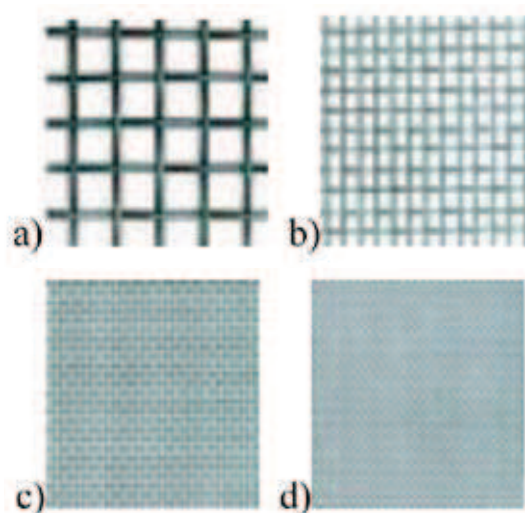
Dla stopnia filtracji istotne jest określenie czynnej przestrzeni  $A_0$  (procentowy udział roboczych oczek odniesiony do całkowitej powierzchni siatki), wg zależności:

$$A_0 = \frac{w^2}{(w+d)^2} \quad , \quad (2)$$

oraz parametru oznaczanego jako „mesh” z zależności:

$$Mesh = \frac{25,4}{w+d} \quad . \quad (3)$$

Najczęściej stosowane są siatki o oczkach kwadratowych (rys. 2), ze względu na stosunkowo niską cenę, łatwość doboru odpowiedniego oczka oraz relatywnie dużą powierzchnię czynną (do 81%), co daje małe straty ciśnienia podczas filtracji [6].



Rys. 2. Siatki o oczkach kwadratowych o różnych wielkościach oczek: a) mesh=2,  $w=6,300$ ; b) mesh=20,  $w=0,800$ ; c) mesh=150,  $w=0,100$ ; d) mesh=250,  $w=0,063$  [7]

Fig. 2. Sieves with mesh of a square shape and different dimensions: a) mesh=2,  $w=6,300$ ; b) mesh=20,  $w=0,800$ ; c) mesh=150,  $w=0,100$ ; d) mesh=250,  $w=0,063$  [7]

W ramach pracy dokonano oceny wpływu stopnia filtracji, określonego wielkością oczka siatki filtracyjnej, na własności wytrzymałościowe trójwarstwowej folii z poli(tereftalanu etylenu), która może być wykorzystywana na opakowania wytwarzane technologią termoformowania [8].

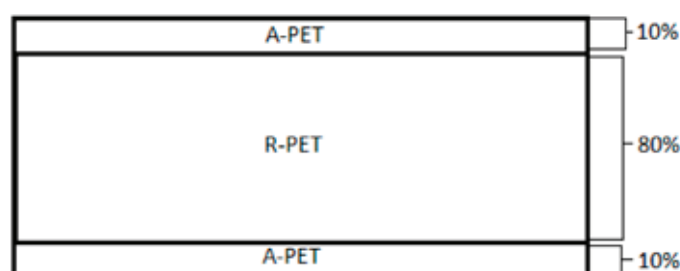
## 2. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

### 2.1 UŻYTE MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Celem pracy była ocena wpływu stopnia filtracji na własności wytrzymałościowe trójwarstwowej folii wytłaczanej z międzywarstwą z recyklatu z PET. Zewnętrzne warstwy wykonane były z tworzywa oryginalnego, bez dodatku recyklatu. Stanowiły one łącznie 20% grubości folii. Warstwy zewnętrzne folii posiadają lepsze własności, ze względu na udział jedynie czystego poli(tereftalanu etylenu). Ich zastosowanie spowodowane jest także wymogami dyrektywy Unii Europejskiej 94/62/WE, wg której tworzywa na opakowania mające styczność z produktami spożywczymi nie mogą pochodzić z recyklingu [8,9]. Wewnętrzną warstwę folii wykonano z recyklatu PET poddanego procesowi filtracji. Zastosowanie warstwy recyklatu pozwala na znaczną minimalizację kosztów produkcji, a także na ograniczenie zanieczyszczeń środowiska. Materiał do badań dostarczyła firma GTX Hanex Plastics Sp. z o.o. z Dąbrowy Górniczej. Warstwa wewnętrzna stanowiła pozostałe 80% grubości folii (rys. 3). Folia taka w dalszej części oznaczana będzie jako R-PET. Do badań wykorzystano folię wytworzoną

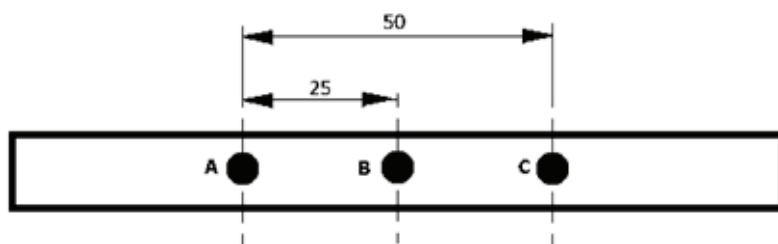
w tym samym przedsiębiorstwie na linii wytłaczarskiej dostarczonej przez włoską firmę Union Officine Meccaniche S.p.A. Przed głowicą wytłaczarską zamontowano urządzenie do filtracji uplastycznionego tworzywa niemieckiej firmy GNEUSS GmbH. Urządzenie to posiada możliwość wymiany sit filtracyjnych.

Do oceny wpływu stopnia filtracji na własności wytrzymałościowe zastosowano zestawy sit o różnych wielkościach oczek od 0,025mm do 0,250 mm. Łącznie wykorzystano 10 zestawów sit. Sita dobrano tak, aby zaprezentowane badania były kontynuacją prac przedstawionych a poprzednim artykule [4]. Zaprezentowane w tym artykule wyniki wskazywały, że sita o bardzo małych oczkach pozwalają na uzyskanie recyklatu o własnościach zbliżonych do własności tworzywa oryginalnego. Wiadomo jednak, że sita takie szybko ulegają zatykaniu, co prowadzi do znacznego wzrostu ciśnienia. Z tej przyczyny w niniejszych badaniach podjęto próby filtracji sitami o większych oczkach. Dla celów porównawczych wytłoczono też folię bez dodatku recyklatu, oznaczaną dalej jako A-PET. Porównania własności mechanicznych dokonano na podstawie statycznej próby rozciągania folii. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 527-3 [10]. Rozciąganiu poddano próbki, w kształcie prostokąta o szerokości 15 mm (wg normy) i długości 150 mm. Grubość określono dla trzech punktów położonych w miejscach zamocowania w uchwytach i na środku rozciąganej części próbki (rys.4), co pozwoliło na wyznaczenie średniej grubości. Średnia grubość trójwarstwowej folii z A-PET wynosiła 0,3 mm. Wykonano po 10 próbek z każdego rodzaju badanej folii.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny folii trójwarstwowej R-PET [4]

Fig. 3. cross section of the three-layer film RPET [4]



Rys. 4. Punkty pomiaru grubości próbki [4]

Fig. 4. The points of sample thickness measurement [4]

Próby rozciągania przeprowadzonej na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell zgodnie z normą PN-EN ISO 527 [11]. Prędkość rozciągania wynosiła 100 mm/min. Odległość pomiędzy uchwytami maszyny wynosiła 50 mm.

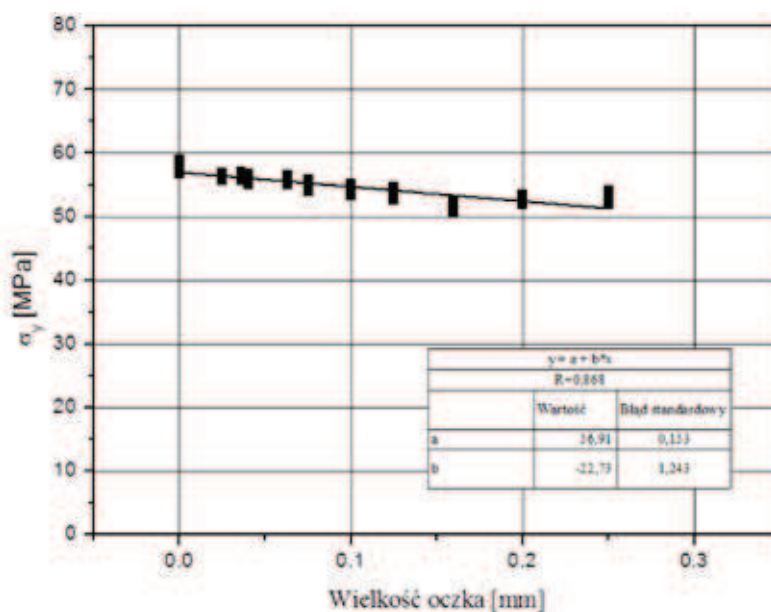
W wyniku przeprowadzonych badań określono następujące własności wytrzymałościowe:

- naprężenie na granicy plastyczności ( $\sigma_y$ ),
- naprężenie przy zerwaniu ( $\sigma_b$ ),
- odkształcenie przy zerwaniu ( $\epsilon_b$ ).

Wszystkie własności określono dla próbek wyciętych z folii wzdłuż kierunku wytłaczania.

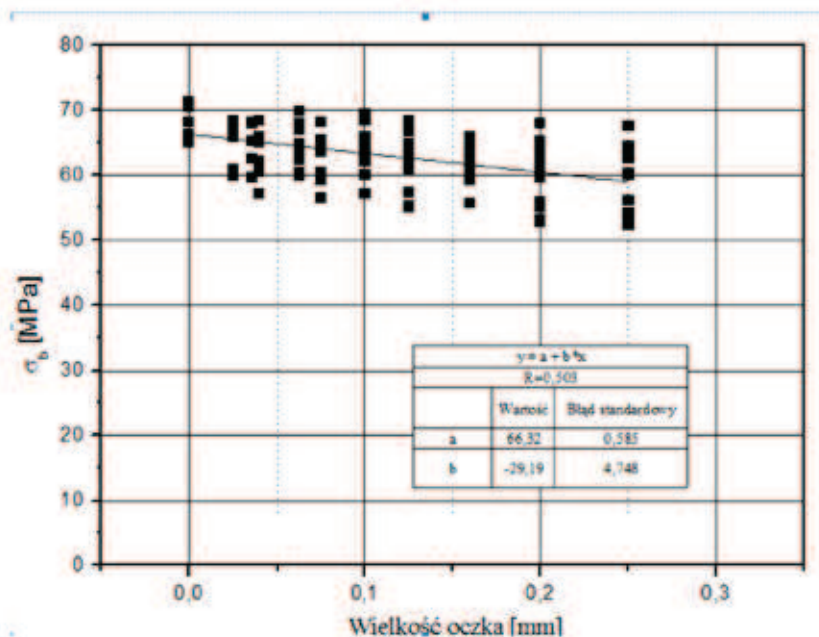
## 2.2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na rysunkach 5–7 przedstawiono zależności naprężenia na granicy plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenia przy zerwaniu folii trójwarstwowej z 80-procentowym rdzeniem z recyklatu R- PET poddanego filtracji na sitach od różnych wielkości oczek. Na wykresach tych jako punkty o zerowej wielkości oczka przyjęto wyniki dla folii wytłoczonej z oryginalnego poli(tereftalanu etylenu) – A-PET.



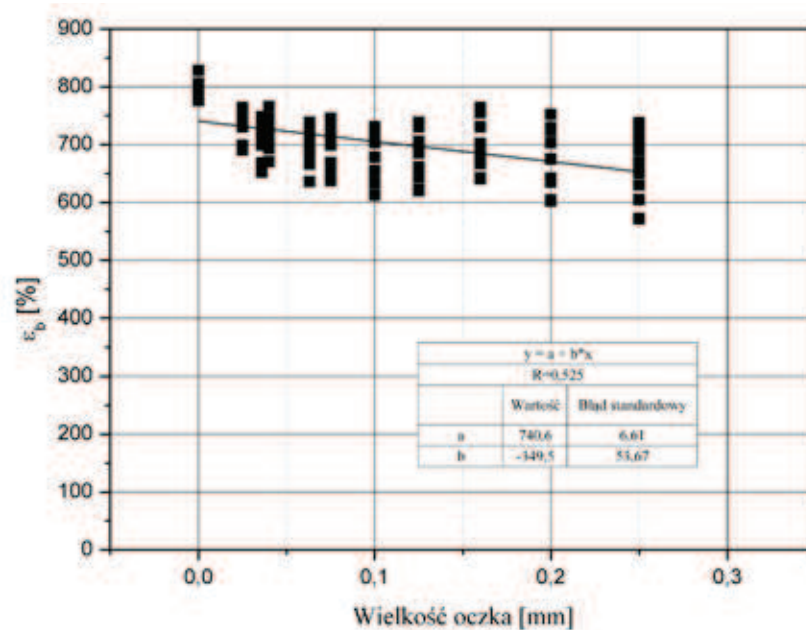
Rys. 5. Zależność naprężenia na granicy plastyczności folii od wielkości oczka sita filtracyjnego

Fig. 5. Dependence of stress at yield of the film on the size of the filter sieve mesh



Rys. 6. Zależność naprężenia przy zerwaniu od wielkości oczka sita filtracyjnego

Fig. 6. Dependence of the tensile strength on the size of the filter sieve mesh



Rys. 7. Zależność odkształcenia przy zerwaniu folii od wielkości oczka sita filtracyjnego

Fig. 7. Dependence of the strain at break of the film on the size of filter sieve mesh

Wszystkie badane własności ulegają niewielkiemu zmniejszeniu wraz ze wzrostem wielkości oczek sit filtrujących. Wartość naprężenia na granicy plastyczności uległa obniżeniu o 11%. Najmniejszą jej wartość zaobserwowano dla two-

rzywa poddanego filtracji przez sita o wielkości oczek 0,16 mm. Wartość naprężenia przy zerwaniu zmniejszyła się o 12% przy oczku sita filtrującego 0,25 mm. Natomiast odkształcenie przy zerwaniu zmniejszyło się o 16% również przy

wielkości oczka filtrującego 0,25 mm. Uzyskane zależności są zgodne z przewidywaniami. Im większe są wielkości oczek sit filtrujących tym większe zanieczyszczenia i ich zawartość w filtrowanym tworzywie. Pomimo zastosowania sit o oczkach większych niż we wcześniejszych badaniach [4], uzyskano recyklaty o podobnej jakości. Wskazuje to na zasadność stosowania takich sit, gdyż pozwalają one na dłuższą ich eksploatację i nie powodują tak dużych wzrostów ciśnienia jak sita o mniejszych oczkach.

Widocznym efektem zwiększenia wielkości oczek sit filtracyjnych jest zwiększenie rozrzutu wyników badań. Jest to szczególnie wyraźne dla naprężenia przy zerwaniu i dla odkształcenia przy zerwaniu. Coraz większe zanieczyszczenia przedostające się przez sita stanowią przypadkowo usytuowane karby, co w efekcie prowadzi do zerwania przy różnych wartościach naprężenia i odkształcenia.

### 3. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

Naprężenie przy zerwaniu folii wykonanej z czystego A-PET jest większa od wytrzymałości folii wykonanych z warstwą z recyklatu. Wartość różnicy zależy od wielkości oczka sita filtrującego. Maksymalna różnica wartości naprężenia przy zerwaniu wynosi 12%.

Naprężenie na granicy plastyczności ma największą wartość dla czystego A-PET. Wartość ta jest o 11% większa niż dla folii poddanej filtracji z użyciem siatki o wielkości oczka równym 0,160 mm.

Największe odkształcenie przy zerwaniu osiąga folia z czystego poli(tereftalanu etylenu). Jest ono o 16% większe od wydłużenia przy zerwaniu tworzywa filtrowanego na siatce o największej wielkości oczek.

Wraz ze wzrostem wielkości oczek filtrujących wyraźnie zwiększa się rozrzut wyników naprężenia przy zerwaniu i odkształcenia przy zerwaniu.

Uzyskane wyniki badań wskazują na zasadność stosowania sit o oczkach o badanych zakresach wielkości przy produkcji folii trójwarstwowej PET.

### BIBLIOGRAFIA

1. Morawiec J.: Wtórne zastosowanie polimerów. Referat w Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN, Łódź, 2001.
2. Błędzki A.K.: Recykling tworzyw sztucznych. PWN, Szczecin, 2002.
3. Wróbel G., Bagsik R.: Systemy filtracji w recyklingu tworzyw termoplastycznych. Materiały Konferencyjne VIII Ukraińsko – Polskiej Konferencji Młodych Naukowców „Mechanika i Informatyka”, Ukraina 2011, 206–207.
4. Rojek M., Wróbel G., Bagsik R., Szymiczek M.: Wpływ stopnia filtracji na własności wytrzymałościowe trójwarstwowej folii z PET, *Przetwórstwo tworzyw*, 1(151), 2013, 41–45.
5. [www.bagsik.net](http://www.bagsik.net).
6. [www.gneuss.com](http://www.gneuss.com).
7. Wróbel G., Szymiczek M., Rojek M.: Ocena wpływu wybranych parametrów termoformowania na rozkład grubości ścianki wyrobu. *Przetwórstwo Tworzyw*, 6(150), 2012, 699–702.
8. Ćwiek-Ludwicka K.: Politereftalan etylenu (PET) – aspekty zdrowotne i zastosowanie do pakowania żywności. Państwowy Zakład Higieny, Nr 2/2003.
9. Packaging Materials. 1. Polyethylene Terephthalate (PET) for Food Packaging Applications. ILSI Europe Report Series. Brussell 2000.
10. PN-EN ISO 527-3:1998: Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Warunki badań folii i płyt.
11. PN-EN ISO 527 – Tworzywa sztuczne. Oznaczenie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu.

Data przyjęcia publikacji do druku: 29-09-16