

Single-material polyethylene films for packaging

Monomateriałowe polietylenowe folie do opakowań



DOI: 10.15199/62.2025.7.4

Polyethylene (PE) films were com. produced by extrusion with blowing and machine oriented on the Hosokawa Alpine technological line, converted to a composite PE/PE film by solvent-less glue lamination using a Nordmeccanica laminator, studied for mech. and thermal properties and compared with ref. composite poly(ethylene terephthalate)/PE films. In particular, Young modulus of elasticity, yield point, tensile strength and ultimate elongation of the films, as well as DSC curves were detd. No significant differences between the foils were obsd. The produced PE/PE films should be suitable for flexographic printing and mech. recycling as confirmed by resp. certificate of compliance.

Folię z polietylenu (PE) wytwarzano w warunkach przemysłowych przez wytłaczanie i rozdmuch oraz maszynowo orientowano na linii technologicznej Hosokawa Alpine, laminowano bezrozpuszczalnikowym klejem przy użyciu laminatora firmy Nordmeccanica, a następnie badano mechaniczne i termiczne właściwości kompozytowej monomateriałowej wstęgi foliowej PE/PE i porównano je z właściwościami wstęgi foliowej PET/PE. W szczególności oznaczano moduł sprężystości przy rozciąganiu, granicę plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie przy zerwaniu, a także wyznaczono krzywe DSC. Folia PE/PE nie ustępowała pod względem jakości folii PET/PE. Zastosowanie kompozytowych folii PE/PE pozwoli na wykorzystanie tych samych procesów przetwórczych (druk metodą fleksograficzną) oraz na ich materiałowy recykling, potwierdzony Certyfikatami Zgodności nr 438661/24/POZ dla wersji bez bariery funkcyjnej oraz nr 444706/24/POZ dla wersji z barierą funkcyjną, wystawionymi przez JSH Hamilton.

Keywords: composite polyethylene film, film packaging, mechanical properties, mechanical recycling

Słowa kluczowe: kompozytowe folie polietylenowe, opakowania foliowe, właściwości mechaniczne, recykling mechaniczny

Przetwórstwo tworzyw sztucznych jest procesem stosowanym w wielu gałęziach światowego przemysłu¹⁻³. Szczególnie ważne jest wytwarzanie z nich opakowań, które dzięki swoim zaletom należą do najbardziej popularnych. Korzyści wynikające z ich małej masy, a równocześnie z dużej barierowości wobec gazów i pary wodnej, braku toksyczności, dobrej odporności mechanicznej i skutecznej izolacji od wpływu czynników zewnętrznych (mikroorganizmy) spowodowały, że są one szeroko stosowane do pakowania m.in. w branżach: spożywczej, budowlanej, motoryzacyjnej, medycznej oraz w chemii gospodarczej.

W dobie szerokich manipulacji ekologicznych, tworzywom sztucznym przypisywane są konsekwencje wynikają-

ce z niewłaściwego gospodarowania odpadami opakowaniowymi oraz z braku sposobów ich utylizacji, co wpływa na zanieczyszczenie środowiska. Faktem jest tu jednak brak standaryzacji rodzajów struktur opakowaniowych dla określonych grup produktowych, która nie tylko uprościłaby użytkownikom wybór właściwego typu opakowania, ale także ograniczyła producentów w dotychczasowej pełnej dowolności materiałowej. Wiele opakowań dla produktów spożywczych (segment *PET Food*) i chemii gospodarstwa domowego jest przewymiarowanych i złożonych materiałowo bez koniecznej potrzeby. Opakowania wielomateriałowe, zwłaszcza w przypadku wykorzystania skrajnie różnych grup materiałów, stanowią wyzwanie



Mgr inż. Michał MALKA (ORCID: 0000-0002-2297-3968) w roku 2018 ukończył studia magisterskie na kierunku zarządzanie i inżynieria produkcji na Wydziale Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej. Od 2022 r. jest doktorantem na Wydziale Inżynierii Materiałowej tej samej uczelni w programie doktoratu wdrożeniowego. Pracuje na stanowisku głównego technologa w Ela Wyrób Folii i Opakowań. Specjalność – ekstruzja folii polietylenowej, gospodarka w obiegu zamkniętym oraz recykling mechaniczny.



Prof. dr hab. inż. Halina PODSIADŁO (ORCID: 0000-0002-2202-6215) w roku 1974 ukończyła studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej, po których podjęła pracę na Wydziale Inżynierijno-Ekonomicznym Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu (obecnie Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu), gdzie w 1980 r. uzyskała stopień doktora nauk technicznych. W 1991 r. uzyskała stopień doktora habilitowanego na Wydziale Chemicznym Politechniki Łódzkiej i rozpoczęła pracę w Instytucie Poligrafii Politechniki Warszawskiej. W 2015 r. otrzymała tytuł profesora nauk technicznych. Obecnie pracuje w Zakładzie Technologii Poligraficznych w Instytucie Mechaniki i Poligrafii na Wydziale Mechanicznym Technologicznym PW. Specjalność – inżynieria mechaniczna, inżynieria materiałowa.

* Adres do korespondencji:

Ela Wyrób Folii i Opakowań sp. z o.o., ul. Lubelska 2, 05-430 Celestynów,
e-mail: michal.malka.dokt@pw.edu.pl

dla gospodarki odpadami. Opakowania takie nie mogą być poddane efektywnemu i możliwie niskoemisyjnemu procesowi utylizacji odpadów, np. poprzez recykling mechaniczny i ponowne zawrócenie odzyskanego surowca do obiegu wtórnego⁴⁾.

Rozwiązaniem problemów środowiskowych jest gospodarka obiegu zamkniętego (GOZ)⁵⁾, która jasno wskazuje na konieczność wielokrotnego wykorzystywania surowców wtórnych przy jednoczesnej minimalizacji zużycia surowców pierwotnych. Wdrożenie GOZ w skali globalnej dla opakowań będzie wówczas osiągalne, gdy wszystkie przewymiarowane wielomateriałowe struktury opakowaniowe zostaną zastąpione opakowaniami monomateriałowymi o możliwie najmniejszym stopniu złożoności. W świetle zmieniających się przepisów dotyczących GOZ dla opakowań ważne jest zatem ograniczanie złożoności materiałowej opakowań, umożliwiające kierowanie ich do najprostszego i najmniej emisyjnego strumienia odpadów poddawanych recyklingowi mechanicznemu. Zastąpienie opakowań wielomateriałowych opakowaniami monomateriałowymi jest kluczowe dla wyeliminowania źródeł zanieczyszczeń strumieni odpadowych tworzyw sztucznych w procesie sortowania tych odpadów oraz wstępnego ich przygotowania do dalszego przetwórstwa. Struktury złożone z wielu różnych materiałów mogą być nadal jedynie spalane.

Problematyka opakowań polimerowych była przedmiotem kilku opracowań opublikowanych w ostatnim okresie⁶⁻⁸⁾.

W firmie Ela Wyrób Folii i Opakowań, Celestynów wytwarzane są oparte na PE kompozytowe folie monomateriałowe w szerokim asortymencie (rys. 1). Ich dostępność nie stwarza zatem większych trudności.

Celem przeprowadzonych badań było opracowanie, przetestowanie i rynkowe wdrożenie monomateriałowych kompozytowych folii polietylenowych wykorzystywanych w opakowalnictwie, z późniejszym przeznaczeniem do procesu recyklingu mechanicznego o możliwie najwyższym stopniu ich wykorzystania.

Część doświadczalna

Aparatura

Do wytwarzania struktur monomateriałowych wykorzystano infrastrukturę przemysłową przedsiębiorstwa Ela Wyrób Folii i Opakowań sp. z o.o., w tym moduł stacji *in-line* do maszynowego orientowania folii polietylenowej podczas procesu rozdmuchu firmy Hosokawa Alpine, a także technologie zadruku fleksograficznego firm Windmoller & Holsher, Bobst, Exper oraz laminowania klejowego bezrozpuszczalnikowego z wykorzystaniem laminatora firmy Nordmeccanica. Wszystkie procesy wytwórcze realizowano w warunkach przemysłowych w skali małotonażowej, umożliwiającej przeprowadzenie miarodajnych testów w dalszych procesach przetwórczych, takich jak pakowanie żywności, karm dla zwierząt domowych lub środków chemii gospodarczej.

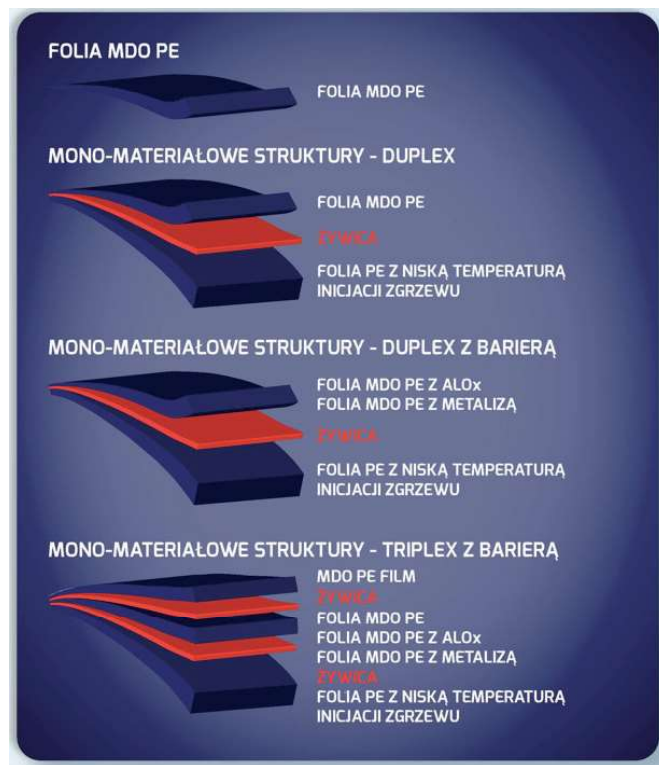


Fig. 1. Single-material composite polyethylene films produced by Ela Wyrób Folii i Opakowań, Celestynów

Rys. 1. Monomateriałowe kompozytowe struktury polietylenowe wytwarzane w firmie Ela Wyrób Folii i Opakowań, Celestynów

Materiały

Kluczowym materiałem była folia polietylenowa (PE) orientowana maszynowo w stacji MDO firmy Hosokawa Alpine. Odpowiednie zorientowanie folii pozwoliło uzyskać właściwości (parametry mechaniczne, organoleptyczne i wizualne) zbliżone do właściwości wstęg poliestrowych lub poliamidowych powszechnie stosowanych w złożonych strukturach opakowaniowych. Badane laminaty monomateriałowe PE o grubości sumarycznej 105 μm oraz PET/PE o grubości sumarycznej 102 μm w rozbiciu na indeksy komponentowe wchodzące w ich skład zestawiono w tabeli 1.

Table 1. PE/PE and PET/PE laminates tested

Tabela 1. Badane laminaty folii

Laminat PE25/PE80	Laminat PET12/PE90
PE 25 μm EC MDO LAM DS/TS OL PE 80 μm DP 40 HOS LTS V1 MS	PET 12 μm J222 (Firmy INPOLKRAK) PE 90 μm EC DP 40 HOS LTS V1 HS

Metodyka badań

Zbadano właściwości mechaniczne wyprodukowanego monomateriałowego laminatu polietylenowego MDO_PE/PE i porównano je z właściwościami laminatu wielomateriałowego PET/PE. Oznaczano moduł sprężystości przy rozciąganiu, granicę plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie przy zerwaniu, zgodnie z normą czynnościową⁹⁾. Do badań wykorzystano maszynę Zwick-Roell. Warunki prowadzenia badań: siła wstępna 0,5 MPa, prędkość (moduł rozciągania) 1 mm/min, prędkość badania 200 mm/min, odległość uchwytów przy pozycji startowej 50,00 mm. Analizę termiczną folii

prowadzono, wykorzystując różnicową kalorymetrię skaningową i stosując kalorymetr DSC 250 firmy TA Instruments.

Wyniki badań

Wyniki badań przedstawione w tabelach 2 i 3 oraz na rys. 2 i 3 prezentują naprężenia, a także wartość wydłużenia dla 20 próbek, każda o szerokości 15 mm, każdego z laminatów, w tym 10 prób badanych w kierunku maszynowym (KM) i 10 prób w kierunku poprzecznym (KP).

Struktura PET/PE wykazywała większą sztywność i osiągała równomierne naprężenia w kierunku maszynowym oraz poprzecznym, ale z ograniczonym wydłużeniem, co wskazywało na wysoki stopień kruchości. Strukturę PE/PE charakteryzowała znacznie większa plastyczność i zdolność do rozciągania. Oznaczało to, że mogła ona absorbować więcej energii przed ostatecznym pęknięciem struktury. Struktura monomateriałowa PE/PE ze względu na dużą plastyczność gwarantowała wysoki poziom odporności na pękanie przy zginaniu, co było częstym zjawiskiem ubocznym procesu transportowego czy pakowania w automatycznych instalacjach przemysłowych, gdzie wymagana była znaczna odporność na deformację. Różnice w otrzymanych wynikach badań mechanicznych zależały od stopnia orientacji. Wraz z jego wzrostem wytrzymałość mechaniczna folii PE wrastała. Z kolei rozbieżność pomiędzy kierunkiem maszynowym a poprzecznym zawsze była zauważalna ze względu na jednostronną orientację.

Stosowanie folii PET w strukturach opakowaniowych zapewniało bardzo wysoką odporność termiczną przed deformacją i uszkodzeniem wierzchniej strony opakowania. Zastąpienie jej folią PE maszynowo orientowaną nie zagwarantowało tego samego poziomu ochrony temperaturowej ze względu na niższą temperaturę topnienia polietylenu, także wysokiej gęstości.

Wyniki różnicowej kalorymetrii skaningowej przedstawiono na rys. 4 i 5. Krzywe na rys. 4 i 5 dostarczyły informacji o zachodzących w materiale procesach termicznych (topnienie, krystalizacja, przemiany fazowe). Dla struktury monomateriałowej zauważalna była niższa temperatura topnienia, co korelowało z rzeczywistą odpornością termiczną warstwy zewnętrznej w procesie przemysłowego zgrzewania (140°C) w kontakcie grzałek nie dłuższym niż 1 s. Zarówno

Table 2. Mechanical properties of PE/PE composite film

Tabela 2. Właściwości mechaniczne folii kompozytowej PE/PE

Nr próbki	Typ	σ_m , MPa	E_b , %
1	KM	42,3	140
2		38,3	110
3		40,4	120
4		40,2	110
5		40,1	120
6		41,2	110
7		37,5	110
8		41,5	120
9		41,7	120
10		42,9	130
11	KP	23,1	1000
12		23,4	1000
13		22,0	980
14		23,7	1000
15		20,2	910
16		20,2	900
17		23,7	1000
18		20,5	930
19		23,3	1000
20		23,2	990

Table 3. Mechanical properties of PET/PE composite film

Tabela 3. Właściwości mechaniczne folii kompozytowej PET/PE

Nr próbki	Typ	σ_m , MPa	E_b , %
1	KM	34,0	120
2		36,1	140
3		34,3	110
4		32,2	79
5		32	79
6		34,2	130
7		32,1	110
8		31,7	86
9		34,5	120
10		29,7	83
11	KP	31	98
12		32,4	120
13		33,3	140
14		28,5	100
15		31,2	110
16		30,2	94
17		32,6	130
18		31,8	110
19		28	71
20		32,4	130

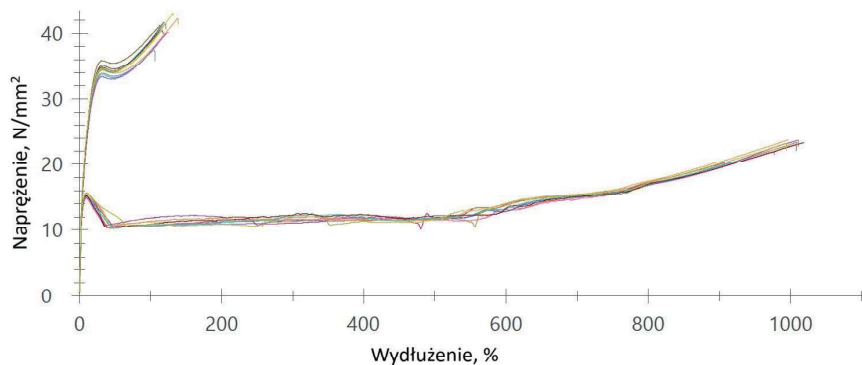


Fig. 2. Elongation/tension curves for PE/PE film

Rys. 2. Krzywa wydłużenie/naprężenie dla laminatu foliowego PE/PE

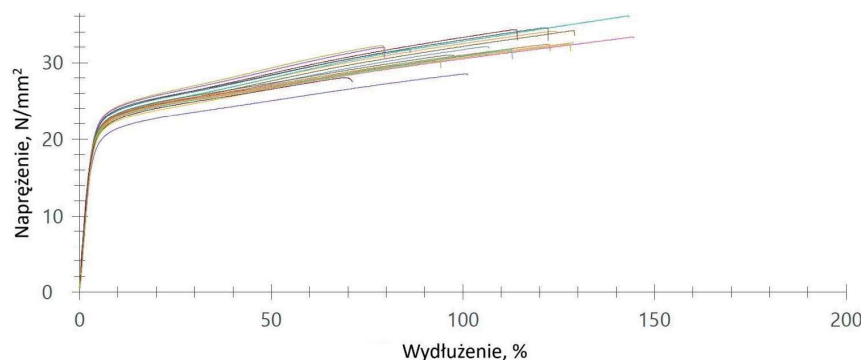


Fig. 3. Elongation/tension curves for PET/PE film band

Rys. 3. Krzywa wydłużenie/naprężenie dla wstęgi laminatu foliowego PET/PE

pierwszy, jak i drugi cykl ogrzewania oraz chłodzenia dawały bardzo podobne krzywe, co świadczyło o dobrej stabilności termicznej próbki. W przypadku struktury wielomateriałowej zauważalny był wysoki pik topnie-

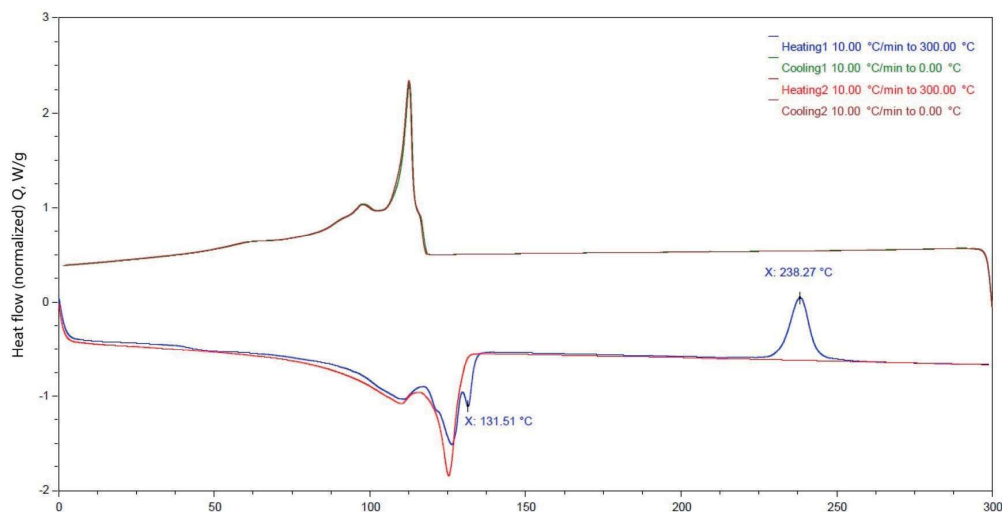


Fig. 4. Differential scanning calorimetry analysis of MDO_PE/PE film

Rys. 4. Krzywe DSC struktur monomateriałowej folii MDO_PE/PE

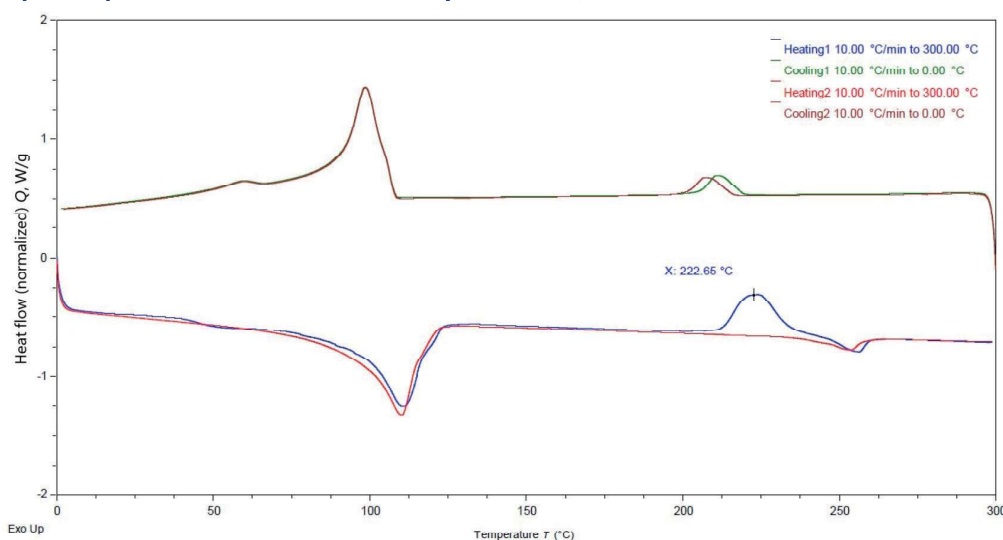


Fig. 5. Differential scanning calorimetry analysis of PET/PE film

Rys. 5. Krzywe DSC struktur wielomateriałowej folii PET/PE

nia charakterystyczny dla folii poliestrowej stosowanej jako warstwa zewnętrzna opakowania. Cykle ogrzewania (podobnie jak w strukturze monomateriałowej) wykazywały dobrą powtarzalność oraz zbliżone przebiegi krzywych. Mniejsza odporność folii PE maszynowo orientowanej stosowanej jako zewnętrzna warstwa opakowania nie stanowiła zagrożenia w opracowanej strukturze opakowaniowej, ponieważ w folii wewnętrznej zastosowano warstwę zgrzewalną o obniżonej temperaturze inicjacji zgrzewalności. Gwarantowało to właściwy transfer ciepła przez przekrój struktury do zainicjowania zgrzewu o wystarczająco wysokich wartościach odporności mechanicznej struktury opakowaniowej.

Badanie recyklingowalności struktur, zlecone w akredytowanym laboratorium JSH Hamilton, potwierdziło możliwość pełnego recyklingu mechanicznego opracowanych struktur opakowaniowych z uzyskaniem Certyfikatu Zgodności NR 438661/24/POZ dla wersji bez bariery funkcyjnej oraz Certyfikatu Zgodności NR 444706/24/POZ dla wersji z barierą funkcyjną.

Wnioski

Opracowane laminaty monomateriałowe charakteryzują się parametrami mechanicznymi zbliżonymi do parametrów struktur wielomateriałowych. Dostrzegalne różnice wartości naprężeń mechanicznych w kierunku poprzecznym struktury opakowaniowej są równoważone dużą plastycznością i zdolnością do znacznych odkształceń. W praktyce przetwórstwa przemysłowego oznacza to, że opakowanie wykonane ze struktury MDO_PE/PE będzie bardziej odporne na przebicie w procesie pakowania. Zostało to potwierdzone podczas testów przetwórczych w zakładzie pakującym produkty mrożone z ostrymi krawędziami. Mniejsza odporność mechaniczna w kierunku poprzecznym folii PE maszynowo orientowanej w stosunku do wstęg PET może być wyrównywana drugą wstęgą foliową przeznaczoną na wewnętrzną warstwę opakowania. Chodzi o strukturę odpowiadającą za zgrzewalność i szczelność. Testy wdrożeniowe wskazują na pełną zastępowalność struktur wielomateriałowych złożonych z poliestru i polietylenu lub poliamidu i polietylenu, strukturami złożonymi z PE maszynowo orientowanego z PE o niskiej temperaturze

inicjacji zgrzewalności. Wytworzone folie uzyskały certyfikaty recyklingowalności.

Otrzymano: 16-06-2025

Zrecenzowano: 24-06-2025

Zaakceptowano: 30-06-2025

Opublikowano: 18-07-2025

LITERATURA

- [1] J.F. Rabek, *Współczesna wiedza o polimerach*, t. 1 i 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
- [2] J.F. Rabek, *Polimery i ich zastosowania interdyscyplinarne*, t. 1 i 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2020.
- [3] G.W. Ehrenstein, Z. Brocka-Krzemińska, *Materiały polimerowe. Struktura. Właściwości. Zastosowanie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
- [4] A. Mroziński, *Inż. Ap. Chem.* 2010, **49**, nr 5, 89.
- [5] M. Czop, *Przem. Chem.* 2020, **99**, nr 12, 1773.
- [6] Anonim, *The plastics transition*, Plastics Europe, Bruksela 2023 r.; <https://plasticseurope.org/pl/2023/09/29/branza-tworzyw-sztucznych-2023-raport-plastics-europe-polska>.
- [7] Anonim, *Rewolucja w branży opakowań. Trendy kształtujące przyszłość w 2025 r.*, <https://www.lplanet.pl>, 25 kwietnia 2025 r.
- [8] M. Nałęcz, *Perspektywy branży opakowań na 2025 r. pod presją globalnych czynników*, Santander Bank Polska SA, 2025 r.; prezentacja na Międzynarodowej Konferencji Modern Packaging, Warszawa, 27 listopada 2024 r.; <https://pio.org.pl>, 2 grudnia 2024 r.
- [9] DIN EN ISO 527-1, *Plastics. Determination of tensile properties*; <https://www.iso.org/standard/75824.html>.