

Characteristics of foils obtained from recycled poly(ethylene terephthalate)

Charakterystyka folii otrzymanych z recyklingowanego poli(tereftalanu etylenu)



DOI: 10.15199/62.2025.3.5

Foils obtained from recycled poly(ethylene terephthalate) were tested for thermal (glass transition, crystallization and melting temp.) and strength properties (tensile strength, relative elongation, linear modulus of strain). The effect of foil forming temp. and time on these properties was det. SEM morphological studies of the foils and surface anal. by atomic force microscopy were carried out, as well as UV-Vis absorption spectra were recorded.

Keywords: poly(ethylene terephthalate), foil, strength tests

Przedstawiono wyniki badań właściwości termicznych (temperatura zeszklenia, topnienia, krystalizacji) oraz wytrzymałościowych (wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie względne, moduł odkształcalności liniowej) folii otrzymanych z recyklingowanego poli(tereftalanu etylenu) (rPET) w celu określenia wpływu temperatury oraz czasu formowania na właściwości. Zarejestrowano także obrazy struktury morfologicznej folii za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego, poddano analizie jej powierzchnię za pomocą mikroskopu sił atomowych oraz zarejestrowano widma absorpcji w zakresie UV-Vis.

Słowa kluczowe: poli(tereftalan etylenu), folia, badania wytrzymałościowe

Polimery w postaci granulatów, płatków i folii są szeroko wykorzystywane w przemyśle tworzyw sztucznych¹). Poli(tereftalan etylenu) (PET) jako termoplastyczny polimer jest szeroko stosowany w przemyśle do produkcji opakowań do celów spożywczych, taśm, tekstyliów i butelek²). W sprzedaży detalicznej dostępne są opakowania wykonane z przezroczystego arkusza PET, do produkcji którego wykorzystywane są specjalistyczne linie wyposażone w ekstrudery³). Linie do wytłaczania folii charakteryzują się wysokimi kosztami utrzymania oraz małymi możliwościami modyfikacji celem otrzymania różnych typów folii polimerowych. Rosnące przez dekady światowe zapotrzebowanie na PET spowodowało

problemy z przechowywaniem, segregacją oraz utylizacją tego polimeru⁴). Metody recyklingu PET można podzielić na fizyczne (mechaniczne, rozpuszczalnikowe), chemiczne (np. glikoliza, hydroliza) oraz biotechnologiczne (rozkład enzymatyczny lub wykorzystanie metabolizmu mikroorganizmów⁵⁻⁸). Możliwy jest także recykling energetyczny bazujący na spalaniu w temp. ok. 1000°C⁹). Najbardziej rozpowszechnioną metodą recyklingu PET jest recykling mechaniczny polegający na sortowaniu, myciu, suszeniu oraz zmieleniu opakowań i butelek PET do postaci płatka¹⁰). Podczas mielenia następuje częściowa degradacja polimeru i tym samym pogorszenie jego właściwości. Dlatego też do recyklin-



Dr inż. Sonia KOTOWICZ (ORCID: 0000-0001-6021-0892) w roku 2013 ukończyła studia na kierunku inżynieria środowiska na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza. Stopień doktora nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki chemiczne otrzymała w 2019 r. na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii (obecnie Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych) Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, gdzie obecnie jest zatrudniona na stanowisku adiunkta w Instytucie Chemii. Specjalność – materiały funkcjonalne oraz chemia materiałów.



Dr hab. inż. Mateusz KORZEC (ORCID: 0000-0002-8658-1031) w roku 2012 ukończył studia na kierunku chemia na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii (obecnie Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych) Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Stopień doktora nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki chemiczne otrzymał w 2016 r., a stopień doktora habilitowanego w 2024 r. na tym samym wydziale. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Chemii Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Specjalność – synteza organiczna i materiały funkcjonalne.

* Adres do korespondencji:

Instytut Chemii, Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych, Uniwersytet Śląski w Katowicach, ul. Szkolna 9, 40-006 Katowice, tel.: (32) 359-15-14, e-mail: sonia.kotowicz@us.edu.pl

gowanego poli(tereftalanu etylenu) (rPET) dodaje się stabilizatory¹⁰). Prowadzone są również badania nowych materiałów opartych na mieszkankach polimerowych PET i np. poli(naftaleno-2,6-dikarboksylanu etylenu) (PEN) celem otrzymania kompatybilizatorów również poprawiających właściwości rPET¹¹). Nadal aktualnym tematem wielu badań jest opracowanie ekonomicznie opłacalnych, nieszkodliwych dla środowiska oraz efektywnych metod utylizacji wykorzystanego i przetworzonego poli(tereftalanu etylenu).

Przedstawione wyniki badań nad foliami otrzymanymi na bazie rPET są częścią badań prowadzonych w ramach projektu LIDER pt. „Uciąglenie procesu syntezy 1,3-dioksolanów wraz z poszerzeniem zakresu stosowalności docelowych produktów w branży chemicznej”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Badania projektowe ukierunkowane są na opracowanie metod mogących przyczynić się do racjonalnego wykorzystania odpadowego PET. W tym zakresie bezbarwny płatek po zmielonych butelkach PET był rozdrabniany w młynie nożowym, a następnie wykorzystany w bezpośredniej reakcji z różnymi aminami (reakcja aminolizy)¹² oraz do ponownego wytwarzania folii w opracowanej do tego celu matrycy¹³. W osobnych badaniach skupiono się również nad ciśnieniową hydrolizą w wodzie, pozwalającą na uzyskanie kwasu tereftalowego oraz mieszaniny wody z glikolem etylenowym, które są istotne dla zastosowań w przemyśle chemicznym.

Celem badań przedstawionych w pracy było otrzymanie folii do konkretnych zastosowań. W szczególności badano właściwości termiczne i wytrzymałościowe folii otrzymanych z rPET.

Część doświadczalna

Materiały

Folie otrzymano z bezbarwnych płatków PET z recyklingu (Indorama Ventures PCL, oddział Bielsko-Biała), zawierającego PVC 0,00–50,00 ppm, PP/PE 0,00–50,00 ppm, pył 0,01–0,25% i charakteryzującego się wilgotnością 0,01–1,2% oraz gęstością nasypową 240–340 kg/m³ (świadczenie jakości nr 9950). Materiał rozdrobniono w młynie tnącym, otrzymując płatki rPET o wielkości poniżej 1 mm. Otrzymanego rPET nie poddano dalszemu procesowi mycia i suszenia, redukując wydatek energetyczny. Na

podstawie krzywych TGA próbek rPET po rozdrobnieniu ubytek masy w temp. 100°C nie przekraczał 0,1%.

Aparatura

Proces rozdrabniania odbywał się w młynie tnącym Retsch SM100. Obrazy SEM oraz AFM zarejestrowano w temperaturze pokojowej za pomocą odpowiednio skaningowego mikroskopu elektronowego Quanta/FEG 250/FEI Co. oraz mikroskopu sił atomowych Dimension ICON NanoScope V Bruker. Badania wytrzymałościowe prowadzono przy statycznym rozciąganiu w maszynie wytrzymałościowej Instron Model 4204 z prędkością rozciągania 20 mm/min w temp. 25°C. Badano próbki folii w postaci pasków o wymiarach 1×3 cm. Wytrzymałość na rozciąganie (R_m) i wydłużenie względne (A) odczytano z wykresu zależności naprężenia od wydłużenia. Moduł Younga (E) wyznaczono zgodnie z prawem Hooke'a. Dla każdego analizowanego materiału zbadano 3 próbki.

Folie formowano metodą rolowania na płycie grzewczej Chemland w specjalnie zaprojektowanej matrycy, będącej przedmiotem zgłoszenia patentowego¹³, a następnie ochładzano w prasie Secabo TPD7 z naciskiem pneumatycznym o sile 300 g/cm². Jednym z elementów matrycy jest folia z poli(tetrafluoroetyleny) o grubości 0,1 mm, odporna termicznie do temp. 300°C, charakteryzująca się chropowatą strukturą, co było przyczyną otrzymania nierównomiernej struktury finalnie uformowanych folii. Grubość otrzymanych folii oznaczono za pomocą mikrometru analogowego G01486 (0,01 mm). Temperaturę zeszklenia (T_g) oraz temperatury przejść fazowych (T_i , T_{zk} , T_k) wyznaczono za pomocą skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC), wykorzystując aparat TA DSC25 Discovery, z dokładnością pomiaru wynoszącą $\pm 1^\circ\text{C}$. Badania stabilności termicznej, 5-proc. ubytek masy ($T_{5\%}$) (analiza termogravimetryczna, TGA) wykonano za pomocą urządzenia PyrisTM 1 TGA (Perkin Elmer) z dokładnością do $\pm 1^\circ\text{C}$. Widma absorpcji w zakresie UV-Vis zarejestrowano za pomocą spektrometru Hitachi U-2900.

Metodyka badań

Folie do badań otrzymano z 1 g rozdrobnionych do wielkości < 1 mm płatków rPET, które umieszczono w specjalnie zaprojektowanej matrycy o wymiarach 5×5 cm¹³. Proces topnienia polimeru oraz jego formowania przeprowadzano w czasie 3, 5, 8 lub 10 min w temp. 265, 280 lub



Dr inż. Agnieszka K. PAJĄK (ORCID: 0000-0002-2684-4629) w roku 2018 ukończyła studia na kierunku chemia na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii (obecnie Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych) Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Stopień doktora nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki chemiczne otrzymała w 2024 r. na tym samym wydziale. Od 2022 r. jest zatrudniona na stanowisku asystenta w Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych PAN w Zabrze w Pracowni Inżynierii Materiałów Funkcjonalnych. Specjalność – materiały funkcjonalne i ogniwa fotowoltaiczne III generacji.



Dr inż. Paweł GNIDA (ORCID: 0000-0003-3350-9383) w roku 2018 ukończył studia na kierunku chemia na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii (obecnie Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych) Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Stopień doktora nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki chemiczne otrzymał w 2023 r. w Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych PAN w Zabrze, gdzie obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta. Specjalność – materiały funkcjonalne i ogniwa fotowoltaiczne III generacji.

300°C. Otrzymane folie podzielono na 5 równych części o wymiarach 1×5 cm. Tak przygotowane folie poddano badaniom wytrzymałościowym oraz zarejestrowano dla nich obrazy struktury morfologicznej za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) oraz poddano analizie powierzchni, używając mikroskopu sił atomowych (AFM). Rozdrobniony rPET oraz folie poddano charakterystyce termicznej, wykorzystując DSC oraz TGA. Badania DSC wykonano w cyklach: 1. cykl ogrzewania w zakresie 25–300°C, 1. cykl chłodzenia (po 1. cyklu ogrzewania) do 25°C, 2. cykl grzania (ponowne ogrzewanie do 300°C), 2. cykl chłodzenia (po 2. cyklu ogrzewania) do 25°C. Badania TGA wykonano w atmosferze azotu (przepływ 20 cm³/min), w zakresie temp. 25–550°C, z szybkością 15°C/min. Przygotowane folie analizowano ze względu na czas formowania oraz temperaturę, a ich grubość wyznaczono za pomocą mikrometru analogowego, wykonując pomiar w 4 miejscach na folii, powtarzając pomiar 2-krotnie, a otrzymane wyniki uśredniono.

Wyniki badań i ich omówienie

Rozdrobniony rPET przed wykonaniem folii poddano charakterystyce termicznej za pomocą analizy DSC oraz TGA. Nie odnotowano znaczących odchyleń wartości tem-

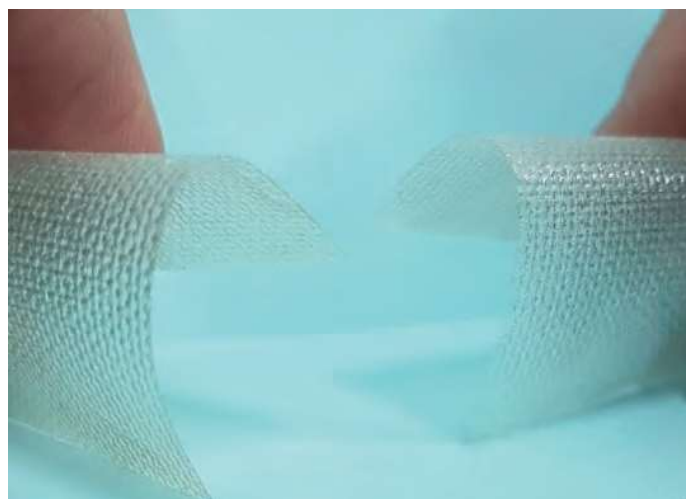


Fig. 1. Photos of the resulting rPET-based films: p79 (left), p74 (right)

Rys. 1. Zdjęcia otrzymanych folii na bazie rPET: p79 (z lewej), p74 (z prawej)

peratur zeszklenia, a także temperatur przejść fazowych od danych dostępnych w literaturze dla czystego PET¹⁴. Wykonano również analizę EDXRF, dzięki której stwierdzono obecność Co, Ni, Zn oraz W na poziomie ppm, co świadczy o przedostawaniu się zanieczyszczeń z młyną tnącego podczas rozdrabniania do analizowanego materia-

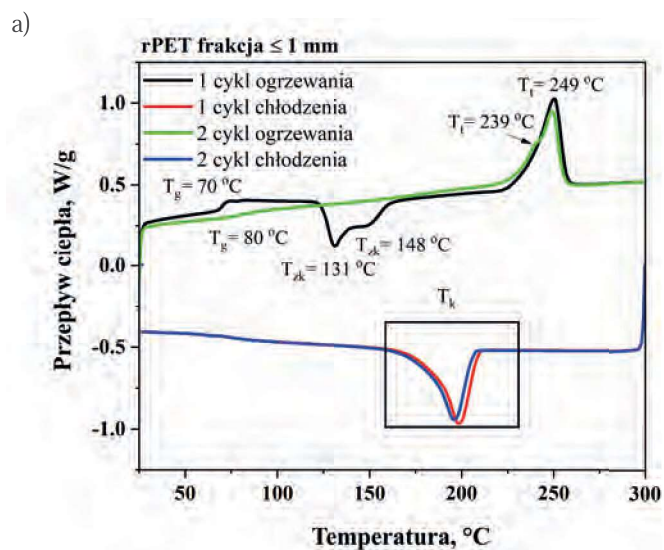
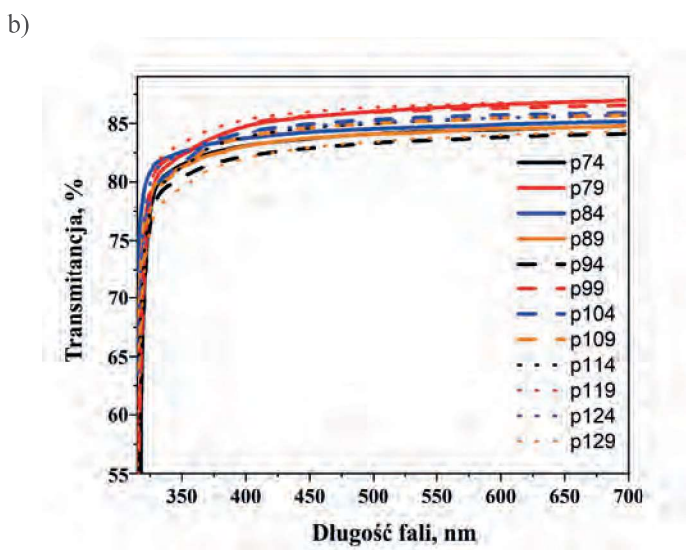


Fig. 2. a) DSC thermograms (exo up) of foil p74 showing 1st and 2nd heating cycle and 1st and 2nd cooling cycle (heating rate 10°C/min, nitrogen flow 25 cm³/min); b) UV-Vis electronic spectra

Rys. 2. a) Termogramy DSC folii o oznaczeniu p74 przedstawiające 1. i 2. cykl ogrzewania oraz 1. i 2. cykl chłodzenia (szybkość ogrzewania 10°C/min, przepływ azotu 25 cm³/min); b) widma elektronowe w zakresie UV-Vis



Mgr inż. Andrzej MARCINKOWSKI (ORCID: 0000-0002-7934-97861) w roku 1999 ukończył studia na kierunku technologia chemiczna na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Od 2006 r. pracuje w Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych PAN w Zabrze. Specjalność – mikroskopia sił atomowych.



Dr. Maciej KAPKOWSKI (ORCID: 0000-0003-1425-4522) w roku 2012 ukończył studia na kierunku chemia na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii (obecnie Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych) Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Stopień doktora nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki chemiczne otrzymał w 2016 r. na tym samym wydziale. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Chemii Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Specjalność – synteza organiczna i kataliza.

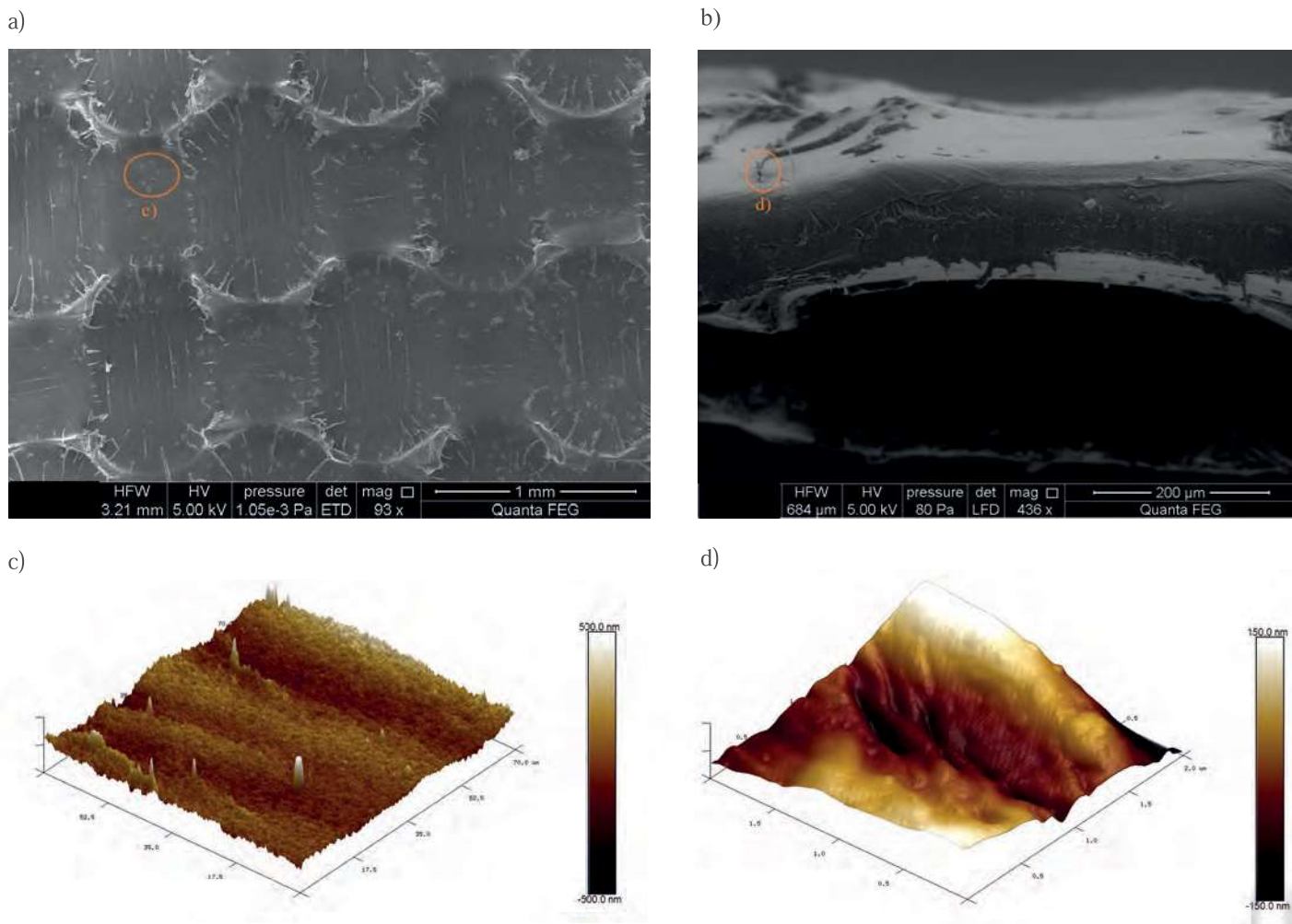


Fig. 3. SEM images of the p74 foil: a) top view, b) cross-section; c, d) the AFM micrographs

Rys. 3. Obrazy SEM folii o oznaczeniu p74: a) widok z góry, b) przekrój; c, d) mikrofotografie AFM

łu. Otrzymane wyniki opisano w pracy⁹⁾. Charakterystyce termicznej poddano również otrzymane folie. Na rys. 1 przedstawiono zdjęcie otrzymanych folii o oznaczeniu p74 i p79, a na rys. 2 termogramy DSC folii o oznaczeniu p74 oraz widma elektronowe w zakresie UV-Vis.

Ubytek 5% masy otrzymanych folii mieścił się w zakresie 410–418°C, otrzymując tym samym nieznaczną różnicę między 5-proc. ubytkiem masy rozrobionego rPET⁹⁾. Temperatury zeszklenia (T_g) folii zarejestrowano w pierwszym cyklu ogrzewania, przy ok. 70°C, natomiast w przypadku rozdrobnionego rPET T_g nie było rejestrowane w 1. cyklu ogrzewania. Mogło to być związane z pamięcią termiczną i wcześniejszym formowaniem rozdrobnionego rPET, rozkładem masy lub też stopniem usieciowania. Zarejestrowano również dwie temperatury „zimnej” krystalizacji i jedną temperaturę topnienia podczas 1. cyklu ogrzewania oraz temperaturę krystalizacji przy ok. 200°C podczas ochładzania. Przy ponownym ogrzewaniu zarejestrowano T_g przy ok. 80°C oraz 2 endotermy topnienia. Dla zarejestrowanych widm elektronowych w zakresie Vis odnotowano transmitancję w przedziale 82–88%, natomiast w zakresie UV zarejestrowano spadek transmitancji, a tym

samym przepuszczalności optycznej folii. Otrzymane wyniki były zgodne z danymi literaturowymi¹⁵⁾. Największą transparentność wykazywały folie p79, p99 oraz p119 formowane w czasie 5 min.

Folie otrzymano ze wzorem za pomocą specjalnie zaprojektowanej matrycy, co przedstawiają obrazy SEM na rys. 3 oraz zdjęcie folii na rys. 1. Na obrazach SEM można zaobserwować niedoskonałości powierzchni oraz nieliczne zagłębienia pochodzące od formy (miejscowy nadmiar polimeru), co nie wpływało znacznie na jakość otrzymanych folii. Zdjęcia SEM wskazywały, że struktura folii była jednorodna i nie występowały rozwarstwienia materiału. Obserwowano także miejsca krystalizacji rPET, co nie jest rzadkością w przypadku polimerów z tendencją do krystalizacji¹⁶⁾. W tabeli przedstawiono wartości średnie parametrów wytrzymałościowych, takich jak wytrzymałość na rozciąganie (R_m), wydłużenie względne (A) oraz moduł sprężystości wzdłużnej (E) badanych próbek. Wydłużenie czasu formowania, bez względu na temperaturę, wpływało niekorzystnie na wytrzymałość mechaniczną badanych folii, powodując spadek wytrzymałości na rozciąganie.

Table. Average values of strength parameters along with thickness of tested rPET foils; standard deviation does not exceed 4%

Tabela. Wartości średnie parametrów wytrzymałościowych oraz grubości badanych folii z rPET; odchylenie standardowe nie przekraczało 4%

Oznaczenie próbki	Grubość folii, mm	Temperatura formowania, °C	Czas formowania, min	R_m , MPa	A , %	E , MPa
p74	0,46	265	3	40,6	4,42	1855,0
p79	0,38		5	28,6	3,33	1737,3
p84	0,25		8	23,0	2,42	1761,5
p89	0,25		10	18,5	2,33	1291,1
p94	0,42	280	3	35,1	2,50	1702,2
p99	0,43		5	37,0	2,34	1942,2
p104	0,33		8	24,3	1,59	1868,9
p109	0,23		10	20,4	1,81	1760,1
p114	0,48	300	3	29,3	2,34	1603,2
p119	0,22		5	28,0	1,75	1917,1
p124	0,34		8	25,2	1,59	1696,2
p129	0,29		10	16,6	1,09	1724,8

Wraz z wydłużeniem czasu formowania i wzrostem temperatury obserwowano spadek wydłużenia względnego przy zerwaniu, a tym samym wzrost kruchości folii⁽²⁾. Otrzymane folie można scharakteryzować jako materiały elastyczne ze względu na niski moduł Younga (poniżej 2 GPa). Aczkolwiek wydłużenie względne nie przekroczyło 4,5%, co wskazuje na wysoki stopień krystaliczności⁽²⁾. Folia p74 charakteryzowała się najwyższymi R_m i A wśród badanych folii oraz jedną z największych wartości modułu sprężystości wzdłużnej. Porównując otrzymane wyniki parametrów wytrzymałościowych z danymi literaturowymi dla folii z rPET oraz modyfikowanymi foliami z rPET, odnotowano pogorszenie właściwości badanych próbek^(17, 18). Należy jednak zaznaczyć, że m.in. obecność zanieczyszczeń (różny skład chemiczny materiału), mała masa cząsteczkowa i wysoki stopień krystaliczności miały wpływ na właściwości mechaniczne folii⁽¹⁷⁾.

Podsumowanie

Otrzymano 12 folii z rPET, w specjalnie zaprojektowanej matrycy, w różnym czasie formowania i różnej temperaturze. Otrzymane folie charakteryzowały się dobrą przepuszczalnością światła widzialnego oraz temperaturami przejść fazowych w zakresach odpowiadających PET. Na obrazach SEM oraz AFM można było zaobserwować niedoskonałości powierzchni (miejscowy nadmiar polimeru) przy jednoczesnym braku rozwarstwienia folii. Badania mechaniczne wykazały spadek wytrzymałości na rozciąganie przy wydłużaniu czasu formowania oraz spadek wydłużenia względnego przy zerwaniu, jednocześnie z wydłużeniem czasu formowania i wzrostem temperatury. Wydłużenie

względne mieściło się w zakresie 4,5–1,09%, wskazując na wysoki stopień krystaliczności badanych folii. Najbardziej korzystne energetycznie, czasowo oraz ze względu na właściwości mechaniczne jest otrzymywanie folii w krótkim czasie formowania oraz w temperaturze ok. T_g PET. Wytworzone za pomocą specjalnej formy folie można poddać barwieniu, a następnie wykorzystać metodę termoformowania próżniowego celem nadania odpowiedniego kształtu i wykorzystać ponownie dla zabezpieczenia m.in. elementów szklanych lub metalowych podczas przechowywania i/lub transportu.

Praca wykonana w ramach projektu LIDER/39/0137/L-11/19/NCBR/2020 „Uciąglenie procesu

syntezy 1,3-dioksolanów wraz z poszerzeniem zakresu stosowalności docelowych produktów w branży chemicznej”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Otrzymano: 28-01-2025

Zrecenzowano: 04-02-2025

Zaakceptowano: 12-02-2025

Opublikowano: 20-03-2025

LITERATURA

- [1] Praca zbiorowa, *Nowoczesne materiały polimerowe i ich przetwórstwo cz. 1* (red. T. Klepka), Politechnika Lubelska, Lublin 2017.
- [2] J. Janik, B. Schmidt, K. Wilpiszewska, J. Rokicka, *Przem. Chem.* 2022, **101**, nr 2, 140.
- [3] D.V. Rosato, *Extruding plastics. A practical processing handbook*, Springer, New York 1998.
- [4] N.A.S. Suhaimi, F. Muhamad, N.A.A. Razak, E. Zeimaran, *Polym. Eng. Sci.* 2022, **62**, nr 8, 2355.
- [5] D.S. Achilias, A. Giannoulis, G.Z. Papageorgiou, *Polym. Bull.* 2009, **63**, 449.
- [6] M.H. Ghasemi, N. Neekzad, F.B. Ajdari, E. Kowsari, S. Ramakrishna, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021, **28**, 43074.
- [7] S. Shirazimoghaddam, I. Amin, J.A.F. Albanese, N.R. Shiju, *ACS Eng. Au* 2023, **3**, 37.
- [8] Ch.I. Idumah, I.C. Nwuzor, *SN Appl. Sci.* 2019, **1**, 1.
- [9] S. Kotowicz, M. Korzec, K. Kocot, M. Kapkowski, [w:] *Najnowsze trendy w gospodarce odpadami komunalnymi i przemysłowymi* (red. A. Pilarska), Wyd. Tygiel, Lublin 2023.
- [10] P. Benyathiar, P. Kumar, G. Carpenter, J. Brace, D.K. Mishra, *Polymers* 2022, **14**, 1.
- [11] K. Gunes, A.I. Isayev, X. Li, Ch. Wesdemiotis, *Polymer* 2010, **51**, 1071.
- [12] S. Kotowicz, M. Korzec, M. Kapkowski, A.K. Pająk, *Ecol.Chem. Eng. S* 2024, **31**, 253.
- [13] *Zgł. pat. pol.* P.446378 (2023).
- [14] N.M. Alves, J.F. Mano, E. Balaguer, D.J.M. Meseguer, R.J.L. Gomez, *Polymer* 2002, **43**, 4111.
- [15] Y. Yao, J. Tao, J. Zou, B. Zhang, T. Li, J. Dai, M. Zhu, S. Wang, K.K. Fu, D. Henderson, E. Hitz, J. Peng, L. Hu, *Energy Environ. Sci.* 2016, **9**, 2278.
- [16] S. Aoyama, Y. Park, Ch.W. Macosko, T. Ougizawa, G. Haugstad, *Langmuir* 2014, **30**, 12950.
- [17] M.V. Candal, M. Safari, M. Fernández, I. Otaegi, A. Múgica, M. Zubitur, G. Gericca-Echevarria, V. Sebastián, S. Irusta, D. Loeza, M.L. Maspocho, O.O. Santana, A.J. Müller, *Polymers* 2021, **13**, 1.
- [18] X. Li, S. Fang, *J. Appl. Polym. Sci.* 2023, **140**, 1.