

Antibacterial and fungistatic properties of modified polyethylene films

Właściwości przeciwbakteryjne i grzybostatyczne modyfikowanych folii polietylenowych



DOI: 10.15199/62.2026.8.5

PE-LD films were modified with selected essential oils and zinc oxide. Their activity against *E. coli* and *S. aureus* bacteria, resistance to fungal growth, and changes in relative elongation after atmospheric aging were assessed. In particular, polyethylene-based composites modified with nanoparticles and bioactive components represent a promising group of next-generation materials.

Keywords: PE-LD foil, essential oils, zinc oxide, antibacterial activity, fungistatic activity, atmospheric aging

Przedstawiono wyniki badań folii PE-LD modyfikowanych wybranymi olejkami eterycznymi oraz tlenkiem cynku. Oceniono ich aktywność wobec bakterii *E. coli* i *S. aureus*, odporność na rozwój grzybów oraz zmiany wydłużenia względnego po starzeniu atmosferycznym. W szczególności kompozyty na bazie polietylenu modyfikowane nanocząstkami oraz składnikami bioaktywnymi stanowią obiecującą grupę materiałów nowej generacji.

Słowa kluczowe: folia PE-LD, olejki eteryczne, tlenek cynku, aktywność przeciwbakteryjna, aktywność grzybostatyczna, starzenie atmosferyczne

Rozwój nowoczesnych materiałów opakowaniowych stanowi jeden z kluczowych kierunków badań w inżynierii materiałowej oraz technologii żywności. Współczesne opakowania nie pełnią już wyłącznie funkcji biernej bariery chroniącej produkt przed czynnikami zewnętrznymi, lecz coraz częściej projektowane są jako tzw. opakowania aktywne, zdolne do wydłużania trwałości produktów oraz ograniczania rozwoju mikroorganizmów. W szczególności folie polimerowe modyfikowane dodatkami o działaniu przeciwdrobnoustrojowym zyskują na znaczeniu w przemyśle spożywczym, medycznym i farmaceutycznym^{1, 2}. Polietylen (PE), jako jeden z najpowszechniej stosowanych termoplastów, odgrywa istotną rolę w produkcji folii opakowaniowych ze względu na korzystne właściwości mechaniczne, niską przepuszczalność wilgoci oraz łatwość przetwórstwa. Jednak jego podstawową wadą jest brak naturalnych właściwości antybakteryjnych, co ogranicza

zastosowanie w obszarach wymagających podwyższonej higieny mikrobiologicznej. Z tego względu prowadzi się intensywne badania nad modyfikacją PE poprzez wprowadzanie dodatków bioaktywnych, w tym nanocząstek metali, ich tlenków oraz związków pochodzenia naturalnego³. Wykazano, że nawet niewielkie ilości modyfikatorów mogą znacząco poprawić właściwości przeciwdrobnoustrojowe oraz barierowe materiałów polimerowych^{4, 5}. Istotnym kierunkiem rozwoju są również biomateriały oraz biokompozyty, które łączą funkcjonalność tradycyjnych polimerów z biodegradowalnością i kompatybilnością biologiczną. W wielu badaniach wskazuje się na rosnące znaczenie biopolimerów, takich jak celuloza, chitozan i kwas polimlekowy, w tworzeniu aktywnych materiałów opakowaniowych. Integracja biomateriałów z dodatkami o działaniu przeciwdrobnoustrojowym umożliwia uzyskanie materiałów o złożonych właściwościach funkcjonal-



Mgr inż. Izabela GAJLEWICZ (ORCID: 0000-0003-3558-1274) w roku 2003 ukończyła studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, kierunek technologia chemiczna. Od 2004 r. pracuje w Centrum Farb i Tworzyw w Gliwicach należącym do Sieci Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Materiałów Polimerowych. Specjalność – badanie materiałów polimerowych, ich recykling i palność.



Mgr inż. Marta LENARTOWICZ-KLIK (ORCID: 0000-0003-4935-6182) w roku 2008 ukończyła studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Od 2009 r. pracuje w Laboratorium Badawczym Tworzyw Polimerowych w Centrum Farb i Tworzyw w Gliwicach należącym do Sieci Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Materiałów Polimerowych. Specjalność – badanie tworzyw polimerowych, w szczególności przetwórstwo poli(chloru winylu), recykling i palność tworzyw polimerowych.

*** Adres do korespondencji:**

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Materiałów Polimerowych w Toruniu, Centrum Farb i Tworzyw w Gliwicach, ul. Chorzowska 50 a, 44-100 Gliwice, e-mail: izabela.gajlewicz@impib.lukasiewicz.gov.pl

Table 1. Symbols of samples and additive content, % by mass

Tabela 1. Oznaczenie próbek i zawartość dodatków, % mas.

Symbol próbki	PE, % mas.	Fusabond MB 226, % mas.	Olejek cedrowy, % mas.	Olejek grejpfrutowy + TiO ₂ , % mas.	Olejek cynamonowy, % mas.	ZnO, % mas.	Olejek oregano, % mas.
PE-1	100	-	-	-	-	-	-
PE-2	94	5	1	-	-	-	-
PE-3	94	5	-	1	-	-	-
PE-4	94	5	-	-	1	-	-
PE-5	94	5	-	-	-	1	-
PE-6	94	5	-	-	-	-	1

nych, takich jak aktywność antybakteryjna, zdolność do kontrolowanego uwalniania substancji aktywnych i poprawione właściwości barierowe^{6, 7}). Szczególne znaczenie w projektowaniu materiałów o właściwościach bakteriobójczych mają dodatki nieorganiczne, takie jak tlenek cynku, nanocząstki srebra i miedzi, które wykazują silne działanie przeciwdrobnoustrojowe dzięki generowaniu reaktywnych form tlenu oraz oddziaływaniu z błonami komórkowymi mikroorganizmów. Włączenie tych składników do matrycy polimerowej umożliwia uzyskanie folii aktywnych skutecznych wobec szerokiego spektrum bakterii Gram-dodatnich i Gram-ujemnych^{3, 8}). Do najczęściej stosowanych dodatków nadających właściwości antybakteryjne różnorodnym materiałom, w tym tworzywom polimerowym, należy srebro. Dzięki zdolności do uwalniania jonów Ag⁺ oraz oddziaływania z błonami komórkowymi mikroorganizmów, skutecznie hamuje wzrost bakterii i grzybów⁹). Z tego względu znajduje szerokie zastosowanie w modyfikacji polimerów, w tym materiałów opakowaniowych¹⁰), a także wyrobów lakierowych, gdzie często wprowadzane jest w postaci nanocząstek osadzonych na nośnikach (np. krzemionkowych), co pozwala na zwiększenie stabilności i kontrolowane uwalnianie^{11, 12}). Jednocześnie stosowanie srebra budzi pewne obawy związane m.in. z potencjalnym wpływem na środowisko oraz zdrowie, co skłania do poszukiwania alternatywnych rozwiązań, takich jak wykorzystanie olejków eterycznych bogatych w związki biologicznie aktywne jako naturalnych czynników przeciwbakteryjnych¹³). Są one bogatym źródłem związków biologicznie aktywnych, takich jak terpeny, fenole i aldehydy, które wykazują zdolność do niszczenia komórek bakteryjnych poprzez destabilizację błon komórkowych i zaburzenie metabolizmu mikroorganizmów. Inkorporacja olejków eterycznych do matrycy polimerowych pozwala na stworzenie tzw. bioaktywnych folii opakowaniowych, które łączą bezpieczeństwo stosowania z wysoką skutecznością przeciwdrobnoustrojową oraz potencjałem do zastosowań w opakowaniach żywności^{14, 15}).

Celem pracy była ocena wpływu wybranych dodatków aktywnych: olejku cedrowego, grejpfrutowego, cynamonowego, oregano oraz tlenu cynku na aktywność przeciwbakteryjną i grzybost-

yczną folii PE-LD. Dodatkowo oceniono zmiany wydłużenia względnego przy zerwaniu po starzeniu atmosferycznym.

Część doświadczalna

Materiały

Przedmiotem badań były folie wytłoczone z polietylenu PE-LD Malen E GGNX 18-D003 (LyondellBasell) zawierające substancje o charakterze potencjalnie bakteriobójczym. Jako dodatki aktywne zastosowano olejki eteryczne (ETJA SA): cedrowy, grejpfrutowy, cynamonowy i oregano, w ilości 1% mas. Ponadto zastosowano tlenek cynku (WarChem) oraz ditlenek tytanu Aeroxide P25 (Evonik Industries) (tabela 1).

Folie o grubości 0,6–0,99 mm wytłoczono w wylączarce Plasti-Corder PLV 151 Brabender.

Metodyka badań

Aktywność przeciwbakteryjną oceniano zgodnie z normami^{14, 15}). Zastosowano szczepy referencyjne: *Escherichia coli* (ATCC 8739) oraz *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538P). Do badań przygotowano próbki o wymiarach 5 × 5 cm i grubości ok. 1 mm. Analizę prowadzono w 3 powtórzeniach dla każdej próbki badawczej. Na folie kontrolne (PE-1) i testowe (PE-2, PE-3, PE-4, PE-5, PE-6) наносono zawiesinę bakteryjną o znanym stężeniu 1,5 · 10⁸ jtk/mL. Po upływie czasu 0 h (dla próbki referencyjnej) oraz 24 h

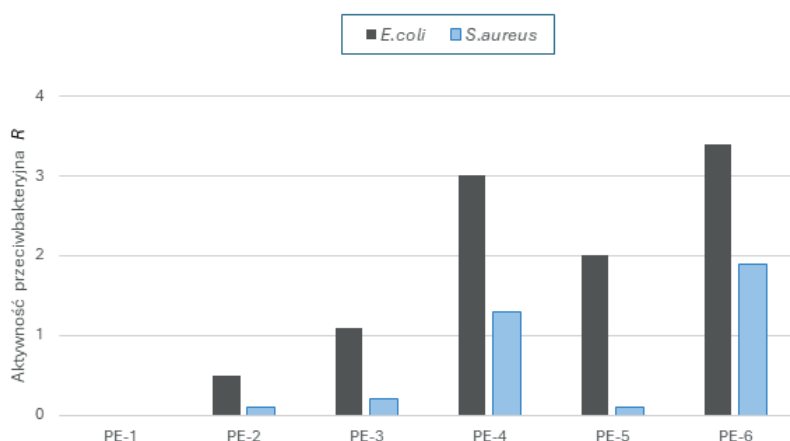
Fig. 1. Antibacterial activity of PE-LD film with additives active against *E. coli* and *S. aureus*Rys. 1. Aktywność przeciwbakteryjna folii PE-LD z dodatkami aktywnymi wobec *E. coli* i *S. aureus*

Table 2. Results of tests to determine the antimicrobial properties of the samples against strains of *E. coli* and *S. aureus*Tabela 2. Wyniki badań oznaczania właściwości przeciwbakteryjnych próbek w stosunku do szczepów bakterii *E. coli* i *S. aureus*

Próbka	Szczep bakteryjny	Średnia liczba żywych komórek bakterii, jtk/cm ²	Obliczony parametr	Aktywność antybakteryjna <i>R</i>
PE-1, kontrola 0 h, „0”	<i>E. coli</i>	$1,8 \cdot 10^4$	$U_o = 4,3$	-
	<i>S. aureus</i>	$2,2 \cdot 10^4$	$U_o = 4,3$	-
PE-1, kontrola 24 h, „0”	<i>E. coli</i>	$4,8 \cdot 10^5$	$U_t = 5,7$	-
	<i>S. aureus</i>	$6,2 \cdot 10^3$	$U_t = 3,8$	-
PE-2	<i>E. coli</i>	$1,8 \cdot 10^5$	$A_t = 5,2$	0,5
	<i>S. aureus</i>	$4,7 \cdot 10^3$	$A_t = 3,6$	0,1
PE-3	<i>E. coli</i>	$4,4 \cdot 10^4$	$A_t = 4,6$	1,1
	<i>S. aureus</i>	$4,0 \cdot 10^3$	$A_t = 3,6$	0,2
PE-4	<i>E. coli</i>	$4,4 \cdot 10^2$	$A_t = 2,6$	3,0
	<i>S. aureus</i>	$2,3 \cdot 10^2$	$A_t = 2,5$	1,3
PE-5	<i>E. coli</i>	$4,9 \cdot 10^3$	$A_t = 3,7$	2,0
	<i>S. aureus</i>	$4,3 \cdot 10^3$	$A_t = 3,7$	0,1
PE-6	<i>E. coli</i>	$2,8 \cdot 10^2$	$A_t = 2,3$	3,4
	<i>S. aureus</i>	$1,4 \cdot 10^2$	$A_t = 1,9$	1,9

dla próbki referencyjnej oraz prób właściwych odzyskiwano komórki bakteryjne z powierzchni folii i zawieszano w roztworze zubożającym. Następnie liczbę komórek zdolnych do wzrostu ustalono w wyniku zaszczepienia ich na pożywkę PCA (*plate count agar, oxoid*), stosowanej do określenia ogólnej liczby mikroorganizmów. Płytki zawierające pożywkę i mikroorganizmy inkubowano przez 48 h w temp. $35 \pm 1^\circ\text{C}$.

Aktywność antybakteryjną (*R*) obliczano wg wzoru (1):

$$R = (U_t - U_o) - (A_t - U_o) = U_t - A_t \quad (1)$$

w którym *R* (redukcja $\log_{10}$) oznacza aktywność antybakteryjną będącą różnicą pomiędzy logarytmem ze średniej liczby jtk (jednostka tworząca kolonię) na próbkach referencyjnych po 24 h a logarytmem ze średniej liczby *jtk* na próbkach badanych; U_o oznacza średnią z $\log_{10}$ z liczby żywych bakterii (komórki/cm²) odzyskanych z próby referencyjnej bezpośrednio po zaszczepieniu (0 h); U_t średnią z $\log_{10}$ z liczby żywych bakterii (kom./cm²) odzyskanych z próby referencyjnej po 24 h od zaszczepienia, a A_t średnią z $\log_{10}$ z liczby żywych bakterii (kom./cm²) odzyskanych z próby właściwej po 24 h od zaszczepienia.

Ocenę działania mikroorganizmów na folie przeprowadzono zgodnie z normą¹⁵⁾. Do badań zastosowano szczepy referencyjne: *Aspergillus niger* (ATCC 6275), *Penicillium pinophilum* (ATCC 36839), *Paecilomyces variotii* (ATCC 18502), *Trichoderma virens* (ATCC 9645) i *Chaetomium globosum* (ATCC 62 05). Próbkę do badań o wymiarach 5 × 5 cm następnie inkubowano przez 28 dni w temp. $29 \pm 1^\circ\text{C}$. Ocenę wizualną efektu grzybobójczego przeprowadzono na podstawie zdjęć wykonanych automatycznym liczni-

kiem kolonii SCAN 1200 (Interscience, Francja). Ocenę mikroskopową efektu grzybobójczego przeprowadzono za pomocą mikroskopu stereoskopowego Olympus SZX 12 (Olympus, USA) przy 42× powiększeniu obrazu próbki za pomocą kamery Arctam 300 MI (Artray, Japonia).

Do monitorowania procesów fotodegradacyjnych w wyniku starzenia w warunkach atmosferycznych wykorzystano pomiar zmiany właściwości mechanicznych (wytrzymałościowych) folii. Oznaczenie właściwości wytrzymałościowych wykonano za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej LABTest 6.100 firmy LaborTech. Badanie wykonano zgodnie z normami^{16, 17)}.

Wyniki badań

Wyniki badań przedstawione w tabeli 2 i na rys. 1 prezentują właściwości antybakteryjne próbek folii w stosunku do szczepów bakterii *E. coli* i *S. aureus*. Na podstawie analizy przedstawionych wyników badań bakteriobójczych próbek stwierdzono, że najsłabsze właściwości bakteriobójcze względem *E. coli* wykazywała próbka PE-2, natomiast względem *S. aureus* próbki PE-2 i PE-5. Uzyskane wyniki wskazują, że skuteczność przeciwdrobnoustrojowa folii PE-LD zależała od rodzaju zastosowanego dodatku aktywnego. Największą aktywność przeciwbakteryjną wobec *E. coli* wykazały próbki PE-6 oraz PE-4, dla których wartość parametru *R* wynosiła odpowiednio 3,4 i 3,0. W przypadku *S. aureus* również największą aktywność odnotowano dla próbek PE-6 i PE-4. Może to wskazywać, że olejek oregano oraz olejek cytrynowy były

Table 3. Results of tests on the antifungal properties of the samples according to PN-EN ISO 846:2019 (Method B); evaluation based on the scale specified in the standard

Tabela 3. Wyniki badań właściwości grzybobójczych próbek wg normy¹⁵⁾ (metoda B); ocena na podstawie skali przyjętej w normie

Partia	Ocena	PE-1	PE-2	PE-3	PE-4	PE-5	PE-6
Ia	wizualna	4	-	-	-	-	-
0	wizualna	-	0	0	0	0	0
S	wizualna	-	0	0	0	0	0
Ib	wizualna	-	3	2	0 lub 1	2	3
	mikroskopowa	nie dotyczy	nie dotyczy	nie dotyczy	0	nie dotyczy	nie dotyczy

najbardziej skutecznymi dodatkami ograniczającymi rozwój bakterii w badanych układach. Skuteczność tych olejków może być związana z obecnością związków biologicznie aktywnych, takich jak fenole, aldehydy i terpeny, które mogą oddziaływać na błony komórkowe bakterii, prowadząc do zaburzenia ich integralności i funkcji metabolicznych.

Mniejsza aktywność niektórych wariantów, szczególnie PE-2 wobec *E. coli* oraz PE-2 i PE-5 wobec *S. aureus* wskazuje, że nie każdy dodatek aktywny wprowadzony do matrycy PE-LD zapewnia porównywalny efekt przeciwbakteryjny. Różnice te mogą wynikać zarówno z odmiennego składu chemicznego olejków eterycznych, jak i z ich różnej zdolności do migracji lub uwalniania z matrycy polimerowej. Istotne znaczenie może mieć również kompatybilność dodatku z polietylenem oraz jego rozmieszczenie w strukturze folii.

Wyniki badań właściwości grzybobójczych badanych próbek przedstawiono w tabeli 3 i na rys. 2, a w tabeli 4 zaprezentowano ocenę wzrostu mikroorganizmów na badanych próbkach wg skali z normy przedmiotowej. Na podstawie przedstawionych wyników badań właściwości grzybobójczych dla próbki kontrolnej PE-1 stwierdzono znaczny wzrost, pokrywający więcej niż 50% badanej powierzchni. Dla próbek PE-2 i PE-6 zaobserwowano wzrost dostrzegalny nieuzbrojonym okiem pokrywający do 50% badanej powierzchni. Dla próbek PE-3 i PE-5 zaobserwowano wzrost nieuzbrojonym okiem, pokrywający do 25% badanej powierzchni. Próbka PE-4 wykazała brak widocznego wzrostu nieuzbrojonym okiem oraz pod mikroskopem. Wystąpienie zahamowania wzrostu mikroorganizmów na powierzchni próbki lub w jej bezpośrednim otoczeniu, w porównaniu z próbką kontrolną niezawierającą dodatku aktywnego, wskazuje na aktywność grzybobójczą badanego materiału. Wyniki badań grzybobójczych potwierdziły, że zastosowane dodatki wpływały także na ograniczenie wzrostu grzybów. W próbce kontrolnej PE-1 zaobserwowano znaczny wzrost mikroorganizmów, nato-

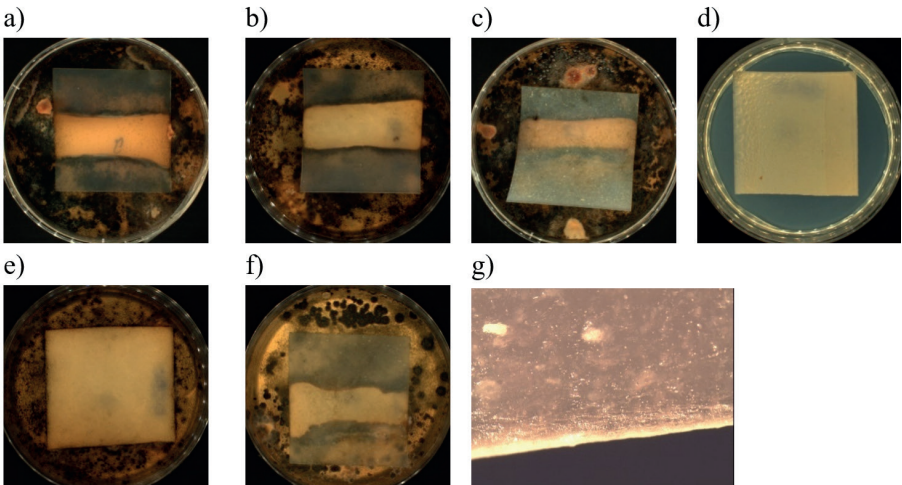


Fig. 2. Representative images of the visual assessment of the samples; a) control PE-1, b) PE-2, c) PE-3, d) PE-4, e) PE-5, f) PE-6, and microscopic evaluation of sample PE-4 (g)

Rys. 2. Poglądowe zdjęcia oceny wizualnej próbek: a) kontrola PE-1, b) PE-2, c) PE-3, d) PE-4, e) PE-5, f) PE-6, oraz oceny mikroskopowej próbki PE-4 (g)

miast w próbkach modyfikowanych rozwój grzybów był ograniczony. Najkorzystniejszy efekt uzyskano dla próbki PE-4, w której nie stwierdzono widocznego wzrostu ani w ocenie makroskopowej, ani mikroskopowej. Wynik ten wskazuje na wysoką skuteczność zastosowanego dodatku w ograniczaniu rozwoju mikroorganizmów grzybowych na powierzchni materiału.

Table 4. Assessment of microbial growth¹⁵⁾

Tabela 4. Ocena wzrostu mikroorganizmów¹⁵⁾

Intensywność wzrostu	Ocena
0	brak widocznego wzrostu pod mikroskopem
1	wzrost niewidoczny nieuzbrojonym okiem, lecz wyraźnie widoczny pod mikroskopem, w tym
1a	pokrywający do 25%
1b	pokrywający do 50%
1c	pokrywający powyżej 50% powierzchni próbki
2	wzrost dostrzegalny nieuzbrojonym okiem, pokrywający do 25% powierzchni badanej
3	wzrost dostrzegalny nieuzbrojonym okiem, pokrywający do 50% powierzchni badanej
4	znaczny wzrost, pokrywający więcej niż 50% powierzchni badanej
5	intensywny wzrost pokrywający całą powierzchnię badaną

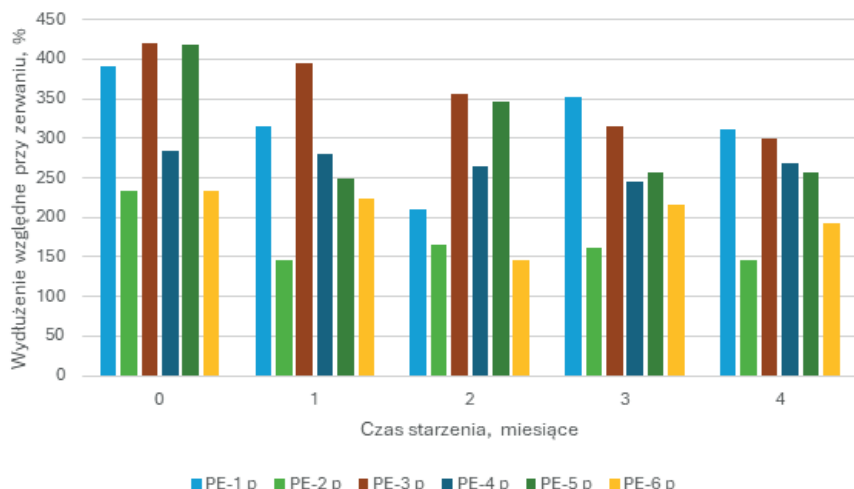


Fig. 3. Change in the relative elongation at break of the PE-LD film as a function of atmospheric aging time

Rys. 3. Zmiana wydłużenia względnego przy zerwaniu folii PE-LD w funkcji czasu starzenia atmosferycznego

Wyniki badań wytrzymałościowych wytłoczonych taśm przed i po starzeniu atmosferycznym zestawiono na rys. 3. W wyniku starzenia atmosferycznego po 1, 2, 3 i 4 miesiącach ekspozycji zauważono przebiegające procesy degradacji, najszybciej dla folii PE-2 zawierającej olejek cedrowy, a najwolniejsze dla próbek PE-4 zawierającej tlenek cynku. Porównując parametry wytrzymałościowe folii zawierające tylko olejki eteryczne o potencjalnych właściwościach antybakteryjnych, zaobserwowano podobnie przebiegające procesy degradacji. Po 1 miesiącu ekspozycji degradacja najszybciej zachodziła dla folii PE-2 (zawierającej olejek cedrowy), dla pozostałych folii (PE-4 i PE-6) w podobnym tempie. Wzrost parametrów wytrzymałościowych po 3 miesiącach starzenia dla niektórych próbek mógł wynikać z zachodzących reakcji sieciowania produktów degradacji pod wpływem tlenu z powietrza. Analiza zmian wydłużenia względnego przy zerwaniu po starzeniu atmosferycznym wykazała, że dodatki aktywne wpływały nie tylko na właściwości biologiczne, ale również na zachowanie mechaniczne folii PE-LD w czasie ekspozycji. Najszybsze zmiany zaobserwowano dla próbki PE-2 zawierającej olejek cedrowy, co może świadczyć o mniejszej stabilności tego układu w warunkach starzenia atmosferycznego. Z kolei próbka PE-4 charakteryzowała się wolniejszym przebiegiem zmian, co sugeruje korzystniejszy wpływ zastosowanego dodatku na trwałość materiału. Obserwowany okresowy wzrost wartości wydłużenia względnego dla niektórych próbek mógł być związany z przemianami zachodzącymi w materiale podczas starzenia, w tym z reorganizacją struktury polimeru lub reakcjami wtórnymi produktów degradacji.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że wybrane dodatki aktywne mogą poprawiać aktywność przeciwbakteryjną i grzybobójczą folii PE-LD, przy czym skuteczność zale-

ży od rodzaju dodatku. Wszystkie zastosowane dodatki zwiększyły aktywność grzybobójczą badanych materiałów. Próbkę zawierającą olejek oregano (PE-6) oraz olejek cynamonowy (PE-4) wykazały istotne ograniczenie liczebności bakterii *E. coli* i *S. aureus* w porównaniu z niemodyfikowanym polietylenem (PE-1). W wyniku starzenia atmosferycznego zaobserwowano procesy degradacyjne wywołane czynnikami zewnętrznymi, przy czym najszybciej przebiegały one w przypadku polietylenu modyfikowanego olejkiem cedrowym. W pozostałych próbkach modyfikowanych olejkami eterycznymi przebieg degradacji był porównywalny.

Upowszechnienie wyników prac badawczo-rozwojowych zrealizowano w ramach projektu nr FEKP.01.01-IZ.00-0002/25 pn. „Utworzenie Kujawsko-Pomorskiego Centrum Naukowo Technologicznego im. Jana Czochochalskiego: Regionalna Sieć Laboratoriów INNO-NET” współfinansowanego ze środków Program Fundusze Europejskie dla Kujaw i Pomorza 2021–2027, Priorytet 1 Fundusze Europejskie na rzecz wzrostu innowacyjności i konkurencyjności regionu, Działanie 01.01 Wzmocnienie potencjału badawczego i innowacji – tryb niekonkurencyjny.

Otrzymano: 17-06-2026

Zrecenzowano: 22-06-2026

Zaakceptowano: 29-06-2026

Opublikowano: 18-08-2026

LITERATURA

- [1] M.A.H. Shiam, A. Alam, B. Biswas, *Nutrition Food Sci.* 2026, **56**, nr 3, 657, <https://doi.org/10.1108/NFS-10-2025-0345>.
- [2] A. Brandelli, *Front. Chem.* 2024, **12**, 1356304, doi: 10.3389/fchem.2024.1356304.
- [3] E. Gibas, A. Richert, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 2, 291.
- [4] K. Shiva, A. Soleimani, J. Morshedani i in., *Sci. Rep.* 2024, **14**, 28802, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80349-7>.
- [5] R.C. de Souza, J.O. de Moraes, L.U. Haberbeck i in., *Food Bioproc. Technol.* 2021, **14**, 1872, <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02684-1>.
- [6] T. Periyasamy, S.P. Asrafali, J. Lee, *Polymers* 2025, **17**, 1257, <https://doi.org/10.3390/polym17091257>.
- [7] H. Shoba, S.K. Jain, N.L. Panwar i in., *Discov. Food* 2025, **5**, 369, <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00643-9>.
- [8] I. Kim, K. Viswanathan, G. Kasi, S. Thanakkasaranee, K. Sadeghi, J. Seo, *Food Rev. Int.* 2022, **38**, nr 4, 537, DOI: 10.1080/87559129.2020.1737709.
- [9] Ch.P. Randall, L.B. Oyama, J.M. Bostock, I. Chopra, A.J. O'Neill, *J. Antimicrob. Chemother.* 2013, **68**, nr 1, 131, <https://doi.org/10.1093/jac/dks372>.
- [10] S. da Costa Brito, J. Dias Bresolin, K. Siviéri, M.D. Ferreira, *Food Sci. Technol. Int.* 2020, **26**, nr 4, 353.
- [11] B. Kopyciński, E. Langer, D. Kowalczyk, A. Baranowska-Korczyc, M. Bodzek-Kochel, M. Cieślak, *Appl. Surf. Sci.* 2025, **709**, 163856, DOI:10.1016/j.apsusc.2025.163856.
- [12] B. Kopyciński, E. Langer, M. Bodzek-Kochel, *Przem. Chem.* 2026, **105**, nr 4, 368.
- [13] F.J. Álvarez-Martínez, E. Barrajón-Catalán, M. Herranz-López, V. Micol, *Phytomedicine* 2021, **90**, 153626.
- [14] ISO 22196:2011, *Measurement of antibacterial activity on plastics and other non-porous surfaces*.
- [15] PN-EN ISO 846:2019, *Tworzywa sztuczne. Ocena działania mikroorganizmów Metodą B. Określenie działania grzybobójczego*.
- [16] PN-EN ISO 527-1:2020-01, *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Cz. 1. Zasady ogólne*.
- [17] PN-EN ISO 527-3:2019-01, *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości przy rozciąganiu. Cz. 3. Warunki badań folii i płyt*.