

Politechnika Częstochowska  
Wydział Infrastruktury i Środowiska

mgr inż. Agnieszka Pudełko

Rozprawa doktorska

**Ocena możliwości zagospodarowania odpadów z tworzyw biodegradowalnych  
powstałych w wyniku uprawy roślin za pomocą kompostowania**

**Promotor:**

dr hab. inż. Krystyna Malińska, prof. PCz

**Promotor pomocniczy:**

dr inż. Tomasz Stachowiak

Częstochowa, 2022

## **Podziękowania**

Chciałabym serdecznie podziękować wszystkim za okazane wsparcie, pomoc i zrozumienie podczas całego procesu tworzenia rozprawy. W sposób szczególny dziękuję Pani dr hab. inż. Krystynie Malińskiej za opiekę promotorską oraz fachową pomoc. Za Jej nieocenioną życzliwość i poświęcony czas.

Dziękuję także promotorowi pomocniczemu Panu dr inż. Tomaszowi Stachowiakowi za pomoc i serdeczność mi okazaną, a także Pracownikom z Wydziału Infrastruktury i Środowiska oraz Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej, którzy przyczynili się do powstania pracy. Wyrazy podziękowania kieruję również do przedstawicieli firmy „Noweko” oraz „Marma Polskie Folie”.

## **Źródło finansowania badań**

Badania do pracy doktorskiej były realizowane w ramach międzynarodowego projektu badawczego Organic-PLUS pt. „Eliminowanie materiałów problematycznych z rolnictwa ekologicznego w Europie” (ang. „Pathways to phase-out contentious inputs from organic agriculture in Europe”) trwającego od 05.2018 do 10.2022, zgodnie z umową grantową nr 774340 Programu Unii Europejskiej-Horyzont 2020.

Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem infrastruktury laboratoryjnej Katedry Sieci i Instalacji Sanitarnych Wydziału Infrastruktury i Środowiska oraz Katedry Technologii i Automatykacji Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.

Biodegradowalna folia do ściółkowania została wyprodukowana w skali przemysłowej u czołowego producenta folii opakowaniowej: „Marma Polskie Folie” z Rzeszowa ([www.marma.com.pl](http://www.marma.com.pl)). Biodegradowalne akcesoria do uprawy roślin, tj. łuki podtrzymujące i zapinki, zostały wyprodukowane w skali pilotażowej w laboratorium Katedry Technologii i Automatykacji Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.

Biodegradowalna folia do ściółkowania oraz biodegradowalne akcesoria ogrodnicze poddano testom w uprawie szklarniowej pomidorów w gospodarstwie ogrodniczym koło Częstochowy.

## Spis treści

<b>ŹRÓDŁO FINANSOWANIA BADAŃ</b> .....	<b>3</b>
<b>STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM</b> .....	<b>7</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>8</b>
<b>WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ</b> .....	<b>9</b>
<b>WYKAZ STOSOWANYCH TERMINÓW I POJĘĆ</b> .....	<b>11</b>
<b>1. WSTĘP</b> .....	<b>13</b>
<b>2. CZĘŚĆ LITERATUROWA</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1. TWORZYWA SZTUCZNE I ICH ZUŻYCIE</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2. TWORZYWA SZTUCZNE W UPRAWIE ROŚLIN</b> .....	<b>16</b>
2.2.1. CHARAKTERYSTYKA TWORZYW SZTUCZNYCH WYKORZYSTYWANYCH W UPRAWIE ROŚLIN .....	16
2.2.2. ODPADY Z TWORZYW SZTUCZNYCH POCHODZĄCYCH Z ROLNICTWA I OGRODNICTWA .....	19
2.2.3. WPŁYW ODPADÓW Z TWORZYW SZTUCZNYCH NA ŚRODOWISKO .....	22
2.2.4. PRAKTYKI ZWIĄZANE Z ZAGOSPODAROWANIEM ODPADOWEJ FOLII PO PROCESIE ŚCIÓŁKOWANIA .....	25
<b>2.3. TWORZYWA BIODEGRADOWALNE</b> .....	<b>26</b>
2.3.1. SUROWCE DO PRODUKCJI BIODEGRADOWALNYCH FOLII I AKCESORIÓW DO UPRAWY ROŚLIN.....	28
2.3.2. DODATKI DO PRODUKCJI TWORZYW BIODEGRADOWALNYCH.....	32
2.3.3. WYMAGANIA PRAWNE DLA FOLII BIODEGRADOWALNYCH DO ŚCIÓŁKOWANIA .....	36
2.3.4. MATERIAŁY I AKCESORIA WYKORZYSTYWANE PODCZAS UPRAWY ROŚLIN .....	38
<b>2.4. FOLIE BIODEGRADOWALNE W PROCESIE ŚCIÓŁKOWANIA</b> .....	<b>40</b>
2.4.1. BIODEGRADOWALNE FOLIE DO ŚCIÓŁKOWANIA W CYKLU UPRAWY ROŚLIN .....	42
2.4.2. KORZYŚCI WYNIKAJĄCE Z ZASTOSOWANIA FOLII BIODEGRADOWALNEJ DO PROCESU ŚCIÓŁKOWANIA .....	43
2.4.3. OGRANICZENIA ZWIĄZANE ZE STOSOWANIEM TWORZYW BIODEGRADOWALNYCH .....	46
<b>2.5. ASPEKTY EKONOMICZNE ZWIĄZANE Z PRODUKCJĄ MATERIAŁÓW BIODEGRADOWALNYCH</b> .....	<b>47</b>
2.5.1. BIODEGRADOWALNE FOLIE DO ŚCIÓŁKOWANIA .....	47
2.5.2. AKCESORIA PRZYDATNE W UPRAWIE ROŚLIN .....	50
<b>2.6. PODSUMOWANIE</b> .....	<b>49</b>
<b>3. CEL I ZAKRES PRACY</b> .....	<b>50</b>
<b>4. CZĘŚĆ BADAWCZA</b> .....	<b>52</b>
<b>4.1. MATERIAŁY I METODY</b> .....	<b>55</b>
4.1.1. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW WYKORZYSTANYCH DO PRODUKCJI FOLII BIODEGRADOWALNYCH .....	55

4.1.2. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW WYKORZYSTANYCH DO PRODUKCJI AKCESORIÓW BIODEGRADOWALNYCH .....	56
<b>4.2. PRODUKCJA FOLII BIODEGRADOWALNYCH .....</b>	<b>57</b>
4.2.1. FOLIE BIODEGRADOWALNE CUT.....	59
<b>4.3. PRODUKCJA AKCESORIÓW BIODEGRADOWALNYCH PRZYDATNYCH W UPRAWIE ROŚLIN.....</b>	<b>60</b>
4.3.1. PRZYGOTOWANIE KOMPONENTÓW DO PROCESU WTRYSKIWANIA.....	61
4.3.2. PRODUKCJA ŁUKÓW BIODEGRADOWALNYCH .....	62
4.3.3. PRODUKCJA ZAPINEK BIODEGRADOWALNYCH .....	63
4.3.4. KOSZTY PRODUKCJI FOLII I AKCESORIÓW BIODEGRADOWALNYCH .....	65
<b>5. METODYKA BADAŃ .....</b>	<b>70</b>
<b>5.1. METODYKA BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH, TERMICZNYCH ORAZ STRUKTURALNYCH MATERIAŁÓW BIODEGRADOWALNYCH.....</b>	<b>70</b>
5.1.1. WYTRZYMAŁOŚĆ MECHANICZNA FOLII CUT NA ROZCIĄGANIE .....	70
5.1.2. BADANIA TERMICZNE FOLII I AKCESORIÓW BIODEGRADOWALNYCH .....	71
5.1.3. ANALIZA MIKROSKOPOWA.....	72
<b>5.2. ANALIZA CHEMICZNA ORAZ BADANIA BIODEGRADOWALNOŚCI, KOMPOSTOWALNOŚCI I FITOTOKSYCZNOŚCI .....</b>	<b>73</b>
5.2.1. ANALIZA CHEMICZNA BIODEGRADOWALNYCH FOLII I AKCESORIÓW DO UPRAWY ROŚLIN .....	73
5.2.2. BIODEGRADACJA W WARUNKACH KOMPOSTOWANIA PRZEMYSŁOWEGO .....	73
5.2.3. BIODEGRADACJA W WARUNKACH KOMPOSTOWANIA PRZYDOMOWEGO („HOME COMPOST”) .....	74
5.2.4. BADANIA DEZINTEGRACJI/ROZPADU .....	74
5.2.5. BADANIA FITOTOKSYCZNOŚCI .....	74
<b>5.3. BADANIE PODATNOŚCI NA BIODEGRADACJĘ FOLII I AKCESORIÓW W PROCESIE KOMPOSTOWANIA LABORATORYJNEGO .....</b>	<b>75</b>
5.3.1. STANOWISKO BADAWCZE .....	75
5.3.2. PRZYGOTOWANIE MIESZANKI KOMPOSTOWEJ.....	76
5.3.3. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK FOLII I AKCESORIÓW.....	77
5.3.4. KOMPOSTOWANIE LABORATORYJNE .....	78
<b>5.4. BADANIE PODATNOŚCI NA BIODEGRADACJĘ FOLII I AKCESORIÓW W PROCESIE KOMPOSTOWANIA PRZYDOMOWEGO .....</b>	<b>79</b>
5.4.1. STANOWISKO BADAWCZE .....	79
5.4.2. PRZYGOTOWANIE MIESZANKI KOMPOSTOWEJ.....	80
5.4.3. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK FOLII I AKCESORIÓW.....	81
5.4.4. KOMPOSTOWANIE PRZYDOMOWE .....	81

<b>5.5. TESTOWANIE FOLII I AKCESORIÓW .....</b>	<b>82</b>
5.5.1. TESTOWANIE FOLII BIODEGRADOWALNYCH .....	82
5.5.2. TESTOWANIE AKCESORIÓW BIODEGRADOWALNYCH .....	84
<b>6. WYNIKI BADAŃ .....</b>	<b>85</b>
<b>6.1. WŁAŚCIWOŚCI BIODEGRADOWALNYCH FOLII I AKCESORIÓW .....</b>	<b>85</b>
6.1.1. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE – WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE .....	85
6.1.2. BADANIA TERMICZNE .....	87
<b>6.2. ANALIZA CHEMICZNA ORAZ BADANIA BIODEGRADOWALNOŚCI, KOMPOSTOWALNOŚCI I FITOTOKSYCZNOŚCI .....</b>	<b>92</b>
6.2.1. ANALIZA CHEMICZNA BIODEGRADOWALNYCH FOLII I AKCESORIÓW.....	92
6.2.2. BADANIA BIODEGRADACJI W ŚRODOWISKU KOMPOSTOWYM – WARUNKI PRZEMYSŁOWE .....	93
6.2.3. BADANIA BIODEGRADACJI W ŚRODOWISKU KOMPOSTOWYM – WARUNKI PRZYDOMOWE .....	95
6.2.4. FOTODOKUMENTACJA PRÓBEK FOLII CUT3 ORAZ ZAPINEK CUT2 W ZALEŻNOŚCI OD METODY PRZEPROWADZONEGO PROCESU KOMPOSTOWANIA.....	96
6.2.5. BADANIA DEZINTEGRACJI/ROZPADU .....	99
6.2.6. BADANIA FITOTOKSYCZNOŚCI .....	100
<b>6.3. WYNIKI BADAŃ PODATNOŚCI NA ROZKŁAD FOLII I AKCESORIÓW PO PROCESIE KOMPOSTOWANIA LABORATORYJNEGO .....</b>	<b>104</b>
6.3.1. UBYTEK MASY BADANYCH FOLII I AKCESORIÓW PO PROCESIE KOMPOSTOWANIA .....	104
6.3.2. PRZEBIEG KOMPOSTOWANIA ORAZ CHARAKTERYSTYKA MIESZANKI KOMPOSTOWEJ PRZED I PO KOMPOSTOWANIU .....	106
6.3.3. FOTODOKUMENTACJA FOLII I AKCESORIÓW PO PROCESIE KOMPOSTOWANIA.....	109
6.3.4. WYNIKI ANALIZY MIKROSKOPOWEJ.....	115
<b>6.4. WYNIKI BADAŃ PODATNOŚCI NA ROZKŁAD FOLII I AKCESORIÓW PO PROCESIE W KOMPOSTOWNIKU PRZYDOMOWYM .....</b>	<b>125</b>
<b>6.5. TESTOWANIE FOLII I AKCESORIÓW W WARUNKACH RZECZYWISTYCH .....</b>	<b>129</b>
<b>7. DYSKUSJA WYNIKÓW .....</b>	<b>136</b>
<b>8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....</b>	<b>145</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>149</b>
<b>SPIS ZAMIESZCZONYCH TABEL.....</b>	<b>160</b>
<b>SPIS ZAMIESZCZONYCH RYSUNKÓW.....</b>	<b>162</b>

## **Streszczenie w języku polskim**

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy problemu zagospodarowania odpadów zużytych folii do ściółkowania i akcesoriów do uprawy roślin produkowanych z tworzyw sztucznych i możliwości zastąpienia ich biodegradowalnymi materiałami otrzymanymi z zasobów odnawialnych, które po zużyciu w uprawie roślin mogą ulegać biodegradacji w procesie kompostowania. Zakres prowadzonych badań obejmował: (1) produkcję biodegradowalnych folii do ściółkowania oraz akcesoriów do uprawy roślin, (2) analizę właściwości otrzymanych wyrobów (tj. mechanicznych, termicznych i strukturalnych), (3) laboratoryjne badania biodegradowalności w warunkach kompostowania przemysłowego oraz przydomowego, (4) kompostowanie w reaktorach laboratoryjnych i kompostowniku przydomowym, (5) testowanie biodegradowalnej folii do ściółkowania oraz akcesoriów do uprawy roślin w uprawie szklarniowej pomidora.

W pracy szczególną uwagę poświęcono ocenie możliwości zastosowania wybranych napełniaczy (takich jak węglan wapnia, sadza czy biowęgiel) do otrzymywania biokompozytów do produkcji biodegradowalnych folii do ściółkowania i akcesoriów do uprawy roślin. Oceniono wpływ dodatku zastosowanych napełniaczy na właściwości otrzymanych wyrobów. Określono rozkład biodegradowalnych folii do ściółkowania i akcesoriów w procesie kompostowania. W pracy poruszono również aspekty ekonomiczne związane z produkcją biodegradowalnych folii do ściółkowania i wybranych akcesoriów do uprawy roślin oraz zagospodarowaniem odpadów powstałych z tych wyrobów.

Tematyka i zakres przedstawionych badań wpisuje się w zakres dyscypliny naukowej: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Otrzymane wyniki badań przyczynią się do rozwoju stanu wiedzy w zakresie otrzymywania, właściwości i zastosowań w uprawie roślin takich wyrobów jak folie do ściółkowania czy akcesoria do uprawy roślin oraz sposobów zagospodarowywania odpadów powstałych po zużyciu tych wyrobów.

Słowa kluczowe: folia biodegradowalna z surowców biologicznych, akcesoria biodegradowalne, ściółkowanie, biodegradacja, kompostowanie, zagospodarowanie odpadów.

## **Summary**

The presented doctoral dissertation focuses on the emerging problem related to handling and managing plastic mulching films and accessories for plant growth and proposes to replace these materials with biodegradable and bio-based mulching films and accessories which can decompose during composting with plant residues.

The scope of the work included: (1) manufacturing of biodegradable and bio-based plastic mulching films and accessories for plant growth, (2) analyzing the properties of the manufactured products (i.e. mechanical, thermal and structural properties), (3) laboratory analysis of biodegradability of the obtained products in industrial and home composting, (4) composting of the obtained products in laboratory composting reactors and home composter, (5) testing of the obtained biodegradable and bio-based plastic mulching films and accessories in growing tomatoes in a greenhouse.

Particular emphasis was placed on the analysis of potentials of selected fillers (calcium carbonate, carbon black or biochar) to obtain biocomposites for production of biodegradable and bio-based plastic mulching films and accessories for plant growth. The impact of the selected fillers on the properties of the obtained products was analyzed. Biodegradability of biodegradable and bio-based plastic mulching films and accessories was determined in the process of composting. In addition, the economic aspects of manufacturing plastic mulching films and accessories for plant growth as well as their end-of-life management were addressed.

The scope of the presented work is in line with the scientific discipline of environmental engineering, mining and energy. The obtained results will contribute to the advancement of the state of the art in the area of manufacturing, properties and horticultural applications of biodegradable and bio-based plastic mulching films and other accessories as well as end-of-life management methods for biodegradable plastic waste.

**Key words:** biodegradable and bio-based mulching film, biodegradable accessories, mulching, biodegradation, composting, waste management.



## **Wykaz stosowanych skrótów i oznaczeń**

**APE Europe** (ang. Agriculture Plastics Environment) - to profesjonalne stowarzyszenie zrzeszające firmy i organizacje zajmujące się tworzywami sztucznymi wykorzystywanymi w rolnictwie

**BDM** (ang. biodegradable plastic mulches) – biodegradowalne folie do ściółkowania

**CaCO<sub>3</sub>** – węglan wapnia

**CUT1** – oznaczenie folii biodegradowalnej do ściółkowania lub zapinki i łuku bez dodatków

**CUT2** – oznaczenie folii biodegradowalnej do ściółkowania z dodatkiem 20% CaCO<sub>3</sub> lub zapinki i łuku z dodatkiem biowęgla 5% (% masowy)

**CUT3** – oznaczenie folii biodegradowalnej do ściółkowania czarnej z dodatkiem pigmentu

**HDPE** – polietylen o dużej gęstości

**LCA** – ocena cyklu życia produktu

**LDPE** – polietylen o niskiej gęstości

**PAE** – estry kwasu ftalowego

**PBAT** – poli(adypinian-co-tereftalan butylenu)

**PBS** – bursztynian polibutylenu

**PBT** – politereftalan butylenu

**PE** – polietylen

**PET** – politereftalan etylenu

**PHA** – polihydroksyalkaniany

**PHB** – polihydroksymaślan

**PLA** – polilaktyd, poli(kwas mlekowy)

**PP** – polipropylen

**PS** – polistyren

**PU** – poliuretan

**SVHC** (ang. Substances of Very High Concern) - substancje stanowiące bardzo duże zagrożenie

**TPS** – skrobia termoplastyczna

## Wykaz stosowanych terminów i pojęć

**Barwnik** – dodatek powodujący zmianę barwy tworzywa.

**Biodegradacja** – rozkład tlenowy lub beztlenowy związków organicznych przez żywe organizmy do prostszych związków nieorganicznych.

**Biotworzywa** – potoczne określenie dla biodegradowalnych materiałów polimerowych. Mogą być produkowane częściowo lub całkowicie z biomasy oraz paliw kopalnych. Nie wszystkie biotworzywa ulegają biodegradacji.

**Folia do ściółkowania** – stosowana jest do przykrywania gleby podczas uprawy roślin.

**Fotostabilizator** – substancja dodawana do tworzywa w celu zahamowania lub opóźnienia rozkładu pod wpływem promieniowania.

**Kompatybilizator** – dodatek wykorzystywany do poprawy właściwości tworzywa podczas procesu produkcji.

**Kompozyt** (tj. materiał kompozytowy) – połączenie co najmniej dwóch odmiennych materiałów o różnych właściwościach.

**Lista kandydacka** (ang. Candidate List) – wykaz substancji które wzbudzają szczególnie duże obawy. Lista publikowana jest i aktualizowana na stronach Europejskiej Agencji Chemikaliów <https://echa.europa.eu/pl/>.

**Plastyfikator** – dodatek ułatwiający proces przetwórczy tworzywa.

**Polimer** – związek chemiczny wielkocząsteczkowy składający się z monomerów, tj. prostych cząsteczek. Tworzywa sztuczne otrzymuje się na bazie polimerów.

**Przedmieszka** (ang. masterbatch) – skoncentrowany dodatek do tworzywa w postaci granulatu. Dodawany w celu zmiany barwy lub właściwości polimeru.

**Stabilizator** – substancja dodawana do tworzywa w celu opóźniania lub zapobiegania procesów starzenia, a tym samym polepszenia trwałości produktu.

**Tworzywa biodegradowalne** – tworzywa, które w wyniku biodegradacji ulegają rozłożeniu do składników monomerycznych lub polimerycznych, w tym biomasę, wodę i dwutlenek węgla lub metan, przy udziale mikroorganizmów.

**Tworzywa kompostowalne** – tworzywa, które ulegają kompostowaniu i są biodegradowalne. Natomiast tworzywa biodegradowalne nie zawsze są kompostowalne, ponieważ ich rozkład może trwać dłużej lub w innych warunkach. Tworzywa kompostowalne stanowią podgrupę tworzyw biodegradowalnych.

**Tworzywa sztuczne (konwencjonalne)** - materiały polimerowe, głównie pochodzenia syntetycznego lub półsyntetycznego; najczęściej otrzymywane z paliw kopalnych.

**Tworzywo termoplastyczne** – tworzywa, które mogą być kształtowane w wyniku tłoczenia i wtryskiwania w wysokiej temperaturze, a następnie szybko schładzane do temperatury, w której będą użytkowane.

## 1. WSTĘP

Aktualnie w rolnictwie i ogrodnictwie obserwuje się problem z utylizacją zużytych folii do ściółkowania wykonanych z konwencjonalnych tworzyw sztucznych. Najczęściej stosowane folie do ściółkowania to nie ulegające biodegradacji folie wyprodukowane z zasobów nieodnawialnych, np. polietylenu o niskiej gęstości.

Wykorzystanie tworzyw sztucznych do zastosowań w rolnictwie i ogrodnictwie w Europie (2019) wynosiło ok. 0,71 mln Mg, z czego ok. 44% w uprawie roślin, a 56% w hodowli zwierząt. Do ściółkowania gleby w uprawie roślin w Europie wykorzystano ok. 77 tyś. Mg, podczas gdy na świecie wykorzystanie folii do ściółkowania mogło wynieść nawet ok. 2,5 mln Mg (APE, 2019; FAO, 2021). Obserwuje się, że zapotrzebowanie na folie do ściółkowania z tworzyw sztucznych w uprawie roślin stale rośnie. Szacuje się, że ogólne zapotrzebowanie na folie w uprawach szklarniowych oraz polowych wzrośnie z 6,1 mln Mg (dane z 2018) do 9,5 mln Mg w 2030 roku (APE, 2019). Podyktowane jest to tym, że folie do ściółkowania z tworzyw sztucznych są wytrzymałe, a ich cena jest niska.

Jednakże folie do ściółkowania przyczyniają się do powstawania znacznych ilości odpadów z tworzyw sztucznych. Większość z tych folii średnio po 12 miesiącach użytkowania staje się odpadem (FAO, 2021). W 2019 roku zebrano w krajach Unii Europejskiej ok. 63% odpadów z tworzyw sztucznych (niebędących odpadami opakowaniowymi) z rolnictwa. Brak natomiast danych dotyczących pozostałych 37% ilości odpadów. Przypuszcza się, że te odpady mogą być przechowywane (np. w gospodarstwach po zebraniu z pól), spalane, zakopywane w glebie czy też odbierane wraz z odpadami komunalnymi. Zużyte folie do ściółkowania można poddać recyklingowi pod warunkiem, że zostały uprzednio zebrane z pola i odpowiednio oczyszczone. Zużyte folie do ściółkowania często charakteryzują się znacznym stopniem zabrudzenia ziemią i rozkładającymi się pozostałościami roślinnymi. Odbiorcy odpadów mają obowiązek mechanicznego oczyszczania folii, co generuje wysokie koszty poprzez zużycie dużej ilości wody oraz energii elektrycznej. Na przykład, linia do oczyszczenia folii PE firmy Rugao Packer Machinery w czasie 1 godziny zużywa 20 m<sup>3</sup> wody oraz około 90-100 KW (Packer, 2022). Proces usuwania z gleby folii służącej do ściółkowania jest pracochłonny i czasochłonny, a niewłaściwie zebrana folia po uprawie może przyczynić się do akumulacji mikroplastików w glebie. Szacuje się, że rocznie w Europie pozostaje od 63 do 430 tys. Mg mikroplastików w polach uprawnych (Lofty i in., 2022).

W praktyce, z uwagi na koszty związane z odbiorem i recyklingiem odpadów z tworzyw sztucznych powstających podczas upraw roślin, obserwuje się stosowanie niezgodnych z prawem sposobów unieszkodliwiania odpadów ze zużytych folii do ściółkowania, takich jak np. spalanie czy zakopywanie w glebie.

Z tego względu poszukuje się alternatyw dla najczęściej stosowanych w uprawach roślin folii do ściółkowania, tj. folii otrzymanej z polietyleny (jak również innych akcesoriów przydatnych w uprawie roślin), które można otrzymać z surowców odnawialnych i które nie będą stanowiły obciążenia dla środowiska naturalnego. Takim rozwiązaniem mogłyby być biodegradowalne folie do ściółkowania wyprodukowane z biopolimerów otrzymanych z surowców odnawialnych. Odpady ze zużytych biodegradowalnych folii do ściółkowania i akcesoriów do upraw roślin mogą zostać zagospodarowane razem z pozostałościami roślinnymi podczas, np. procesu kompostowania w pryzmach kompostowych bądź kompostownikach, gdzie ulegną biodegradacji. Zużyte biodegradowalne folie do ściółkowania mogą pozostać na polu po zakończeniu wegetacji i po zaoraniu ulec rozkładowi w glebie.

## 2. CZĘŚĆ LITERATUROWA

### 2.1. Tworzywa sztuczne i ich zużycie

Tworzywa sztuczne są wszechobecne w naszym codziennym życiu i znajdują szerokie zastosowanie w niemal każdej branży. W roku 2020 wyprodukowano 367 mln Mg tworzyw sztucznych, a dla porównania w roku wcześniejszym 368 mln Mg. Największy udział w światowej produkcji miały Chiny – 32%. W Europie można zaobserwować podobną tendencję. Z raportu „Plastics - the Facts 2021” wynika, że produkcja tworzyw sztucznych spadła z 57,9 mln Mg w 2019 roku do 55 mln Mg w 2020 roku<sup>1</sup> (Plastics Europe, 2022). Sektor, w którym szacuje się największe zużycie tworzyw sztucznych to sektor opakowalnictwa (40,5%) oraz budownictwa (20,4%). O znacznym zapotrzebowaniu na produkty z tworzyw sztucznych można mówić również w przypadku rolnictwa (3,2%). Największą popularnością w przetwórstwie tworzyw sztucznych cieszą się: polipropylen (PP) oraz polietylen (PE). Wszelkiego rodzaju opakowania i pojemniki przeznaczone dla żywności najczęściej wytwarzane są z polipropylenu. Z kolei polietylen to powszechny składnik, na bazie którego produkowane są folie rolnicze, torby wielokrotnego użytku czy zabawki.

Produkując i przetwarzając tworzywa sztuczne należy wziąć pod uwagę fakt powolnego uszczuplenia zasobów ropy naftowej oraz generowania znacznych ilości odpadów, które z powodu niewłaściwego zagospodarowania trafiają do środowiska, powodując jego zanieczyszczenie.

Cykl życia wyrobów z tworzyw sztucznych zależy od rodzaju polimeru. Największy problem stanowią tworzywa ropopochodne, które się praktycznie nie rozkładają lub degradują przez setki lat w środowisku naturalnym. Tworzywa pod koniec cyklu życia mogą być zagospodarowane poprzez ponowne użycie, recykling lub przetworzone z odzyskiem energii. Szacuje się, że w Europie w 2020 r. zebrano ponad 29 mln Mg odpadów z tworzyw konwencjonalnych w celu ich zagospodarowania. Znaczna ich część została przetworzona metodą recyklingu (34,6%) oraz w procesach związanych z odzyskiem energii (42%). Znaczne ilości odpadów trafiły na składowisko (23,4%). W ostatnich latach (2006-2020) poziom recyklingu wzrósł o prawie 120%, odzysk energii zwiększył się o 77%, a ilość składowanych odpadów na wysypiskach była niższa o ponad 46%. Spowodowane było to głównie zakazem składowania odpadów nadających się do

---

<sup>1</sup> Liczby te nie obejmują produkcji tworzyw sztucznych pochodzących z recyklingu.

recyklingu i odzysku. Kraje objęte ograniczeniami były zmuszone do poszukiwania rozwiązań, mogących podarować drugie życie tworzywom sztucznym. Komisja Europejska odniosła się również do tego problemu i opublikowała tzw. europejską strategię na rzecz tworzyw sztucznych (ang. EU Plastics Strategy), w której narzuca aby do roku 2030 połowa odpadów z tworzyw sztucznych produkowanych w Europie była poddana recyklingowi oraz aby możliwości sortowania i recyklingu wzrosły czterokrotnie począwszy od 2015 roku. Strategia ta ma głównie na celu wprowadzenie gospodarki o jak najbardziej zamkniętym obiegu (Kosior i in., 2020).

Obecnie, zanieczyszczenie tworzywami sztucznymi jest uważane za jeden z największych problemów środowiskowych ze względu na długą żywotność tego materiału trwającą nawet setki lat oraz ze względu na zaleganie znacznych ilości odpadów z tworzyw sztucznych na wysypiskach (Parlato i in., 2020).

## **2.2. Tworzywa sztuczne w uprawie roślin**

Zastosowanie tworzyw sztucznych w rolnictwie – z uwagi na ich powszechność – zyskało nawet swoją nazwę i określa się go jako tzw. plastikultura (ang. plasticulture). Już w 1930 roku zaczęto stosować folie z konwencjonalnych tworzyw sztucznych do uprawy roślin. Służyły one przede wszystkim do okrywania szklarni, z powodzeniem zastępując szkło. Za pomocą folii możliwe było także przeprowadzenie procesu ściółkowania, które doprowadziło do rewolucji na polach uprawnych (Serrano-Ruiz i in., 2021).

### **2.2.1. Charakterystyka tworzyw sztucznych wykorzystywanych w uprawie roślin**

Światowe zużycie polimerów w sektorze rolnictwa nadal wzrasta z powodu wielu korzyści jakie dają tworzywa podczas upraw roślin. Szacuje się, że rocznie zużywanych jest 4,6 mln Mg tworzyw sztucznych do zastosowań rolniczych na całym świecie, natomiast w Europie to 1,6 mln Mg. Globalne wykorzystanie rolniczych folii z tworzyw sztucznych według prognoz ma wzrosnąć o 59% od 2018 do 2026 roku (Sintim i in., 2020).

Według niektórych obliczeń, bez zastosowania tworzyw sztucznych zniknęłoby ok. 60% upraw roślinnych i produktów pochodzenia zwierzęcego. Nic więc dziwnego, że rolnicy i ogrodnicy chętnie wykorzystują tworzywa sztuczne, szczególnie, że



w przypadku ściółkowania plonowanie roślin może wzrosnąć nawet do ok. 40%, a oszczędności wody mogą sięgać co najmniej 50% (Siwek i in., 2019).

Tworzywa sztuczne oprócz ściółkowania (rys. 1) są wykorzystywane w rolnictwie do nakrywania tuneli foliowych wysokich i niskich oraz do systemów gromadzenia wody i nawadniania wraz z układami irygacyjnymi.



Rysunek 1. Przykłady zastosowań tworzyw sztucznych w uprawie roślin: ściółkowanie gleby (źródło: <https://www.istockphoto.com/pl>).

W rolnictwie i ogrodnictwie stosowane są również pojemniki i skrzynki z tworzyw sztucznych niezbędne podczas zbiorów, magazynowania i transportowania. W tunelach foliowych i szklarniowych natomiast często wykorzystuje się sznurki ogrodnicze i zapinki mające właściwości podporowe dla roślin. Do innych zastosowań zalicza się: siatki, folie zaciemniające oraz okrywy plastikowe do zabezpieczenia plonów przed różnorodnymi warunkami atmosferycznymi. Chroniona w ten sposób gleba jest bardziej wydajna, nie ma dużego zapotrzebowania na wodę, nawozy i środki ochrony roślin (Plastics Europe, 2020).

W tabeli 1. przedstawiono główne zastosowania tworzyw sztucznych.

Tabela 1. Przykłady zastosowań tworzyw sztucznych w rolnictwie i ogrodnictwie (Guerrini i in., 2017).

<b>Folie chroniące uprawy:</b>	<b>Siatki:</b>	<b>Opakowania:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- folie i tunele</li> <li>- niskie tunele</li> <li>- ściółkowanie</li> <li>- bezpośrednie krycie</li> <li>- pokrycia winnic i sadów</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ochrona przed ptactwem</li> <li>- ochrona przed gradem</li> <li>- ochrona przed wiatrem</li> <li>- cieniowanie</li> <li>- zbiory</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- worki na nawóz</li> <li>- pojemniki, skrzynie</li> <li>- puszki agrochemiczne</li> <li>- zbiorniki do przechowywania ciekłych substancji</li> </ul>
<b>Nawadnianie / drenaż:</b>	<b>Inne:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- zbiorniki wodne</li> <li>- taśmy i rury irygacyjne</li> <li>- rury drenażowe</li> <li>- mikronawadnianie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- folie do kiszonek</li> <li>- folie do fumigacji</li> <li>- sznurek do belowania</li> <li>- owijanie beli</li> <li>- sznury i liny</li> <li>- doniczki</li> </ul>	

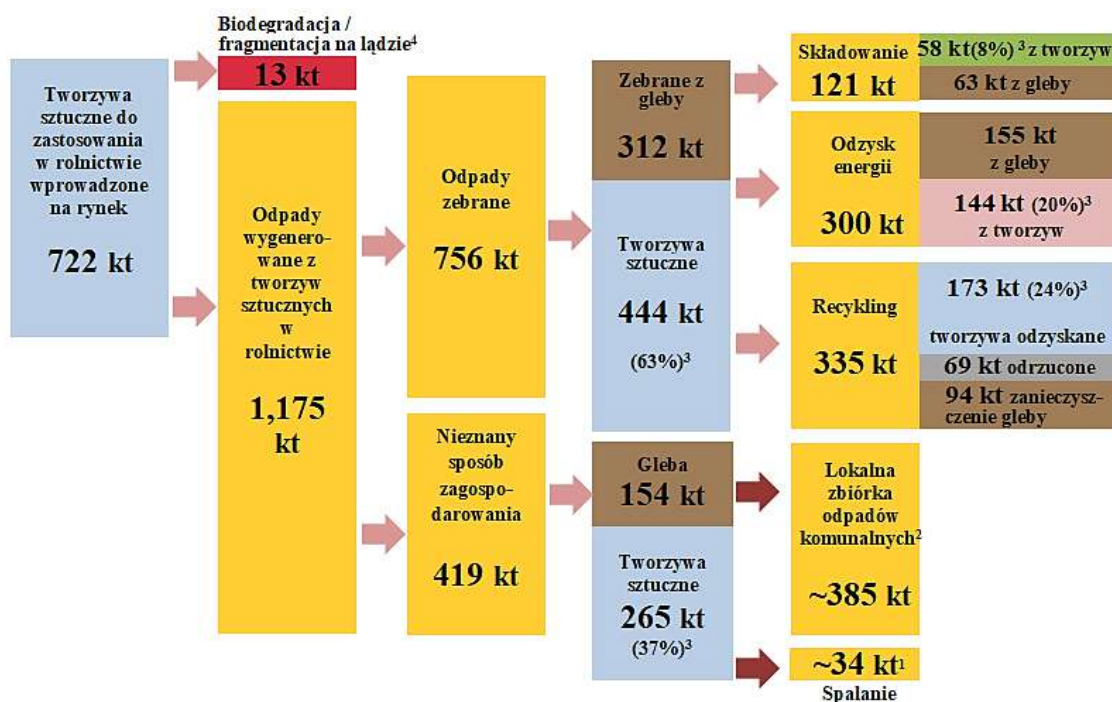
Tworzywa sztuczne cieszą się dużym zainteresowaniem ze względu na korzystne właściwości mechaniczne, odporność na czynniki atmosferyczne, w tym promieniowanie UV, oraz małą przepuszczalność pary wodnej. Najbardziej powszechnym rodzajem folii na rynku jest obecnie folia wykonana z polietylenu (PE). Ponad 80% światowej produkcji folii do zastosowań rolniczych jest wytworzona z polietylenu o niskiej gęstości (LDPE). Tworzywo to jest trwałe i może pozostawać w glebie nawet przez 200–400 lat (Li i in., 2020).

Światowym liderem w produkcji i wykorzystaniu folii z tworzyw sztucznych są Chiny. Folie są tam stosowane głównie jako osłony glebowe oraz osłony chroniące niskie i wysokie tunele. Na największych obszarach upraw prowadzi się proces ściółkowania (18,5 mln ha), a także produkcję pod tunelami niskimi (1,1 mln ha), tunelami wysokimi (2,9 mln ha) i sieciami (0,15 mln ha). Podstawowym materiałem używanym w Chinach do ściółkowania jest bezbarwna folia polietylenowa, natomiast w Europie głównie

wykorzystuje się folię czarną. Pomimo korzyści płynących z technologii ściółkowania za pomocą folii z tworzywa sztucznego, jej szerokie zastosowanie spowodowało zaleganie dużych ilości odpadów, które są trudne do zagospodarowania. W rezultacie, w świecie nauki zjawisko to ewoluuje od określenia „białej rewolucji” do „białego zanieczyszczenia” (Siwek i in., 2019).

### 2.2.2. Odpady z tworzyw sztucznych pochodzących z rolnictwa i ogrodnictwa

Według APE Europe, w 2019 roku zebrano około 63% odpadów z tworzyw sztucznych nieopakowaniowych pochodzących z rolnictwa ze wszystkich wytworzonych w krajach UE (Hann i in., 2021). Nie jest znany sposób zagospodarowania pozostałych 37% odpadów (rys. 2). Podejrzewa się, że tego typu odpady mogły być zakopywane w gruncie, spalane lub odbierane w ramach zbiórki odpadów komunalnych.



Legenda:

1. Na podstawie badań przeprowadzonych we Francji przyjęto, że spalaniu podlega 5% folii i 15% sieci/siatek - "nieznane odpady".
2. Zbierane jako część lokalnych odpadów komunalnych. Nie ma danych na temat tej działalności i zakłada się, że są to odpady pozostałe po otwartym spalaniu, których nie można uwzględnić.
3. Proporcja w stosunku do całkowitej ilości wprowadzonej na rynek (722 kt).
4. Obejmuje biodegradowalne folie do ściółkowania certyfikowane według EN17033 oraz pofragmentowane, oksydegradowalne tworzywa sztuczne, których stosowanie w UE jest ograniczone od 3 lipca 2021r.

Rysunek 2. Bilans masy odpadów z tworzyw sztucznych pochodzących z rolnictwa i ogrodnictwa w UE (Hann i in., 2021).

Odpady z tworzyw sztucznych powstałe po uprawie roślin mają duży potencjał recyklingowy, zwłaszcza folie szklarniowe ze względu na jakość i mniejsze zanieczyszczenia gromadzące się podczas użytkowania. Folie po procesie ściółkowania trudno jest natomiast poddać recyklingowi, ze względu na duży stopień zanieczyszczenia glebą i innymi substancjami organicznymi.

Główne bariery podczas recyklingu odpadów z tworzyw sztucznych stosowanych w uprawie roślin to:

- wysokie koszty przetwarzania, wynikające głównie ze znacznego poziomu zanieczyszczeń; w przypadku folii do ściółkowania należy spodziewać się poziomu zanieczyszczeń od 30% do 40% masy folii,
- niska jakość recyklatu, czyli końcowego produktu odzyskanego (EIP-AGRI Focus Group Final Report, 2021; Hann i in., 2021).

#### **Przykład: Odpady z tworzyw sztucznych w produkcji pomidora szklarniowego**

Pomidor jest drugą najważniejszą rośliną uprawianą na świecie. Każdego roku produkuje się około 180 mln Mg pomidorów, z czego około 40 mln Mg jest przetwarzanych w przemyśle spożywczym. Ich konsumpcja ma przekroczyć 50 milionów Mg do 2025 roku. Uprawa, zbiór i przetwarzanie generują znaczne ilości stałych i płynnych odpadów. Po uprawie i zbiorach zagospodarować należy pozostałości roślinne, w tym: łodygi, korzenie i liście, a także uszkodzone owoce. Na przykład, z pomidorów uprawianych w szklarni może powstać 4,5 Mg/ha/tydzień odpadów z liści pomidora i 15 Mg/ha/rok świeżych resztek roślinnych po zbiorach (Liadakis i in., 2022).

Uprawa pomidora często związana jest z wykorzystaniem folii oraz akcesoriów wspomagających wzrost. Na przykład, w szklarni o standardowych wymiarach 31 x 6 m, należy rozłożyć na czterech zagonach folię o łącznej powierzchni 132 m<sup>2</sup>. Liczba sadzonek pomidorów na taką powierzchnię szklarni to 720 sztuk. Przyjmując średnią masę dla każdego krzaka pomidora ok. 2,2 kg, można oszacować, że na każdy krzak należy przeznaczyć 3 sztuki zapinek i 6 sztuk łuków podtrzymujących. W tabeli 2 przedstawiono masy odpadów powstałych po uprawie pomidora z uwzględnieniem masy roślinnej oraz akcesoriów z tworzyw sztucznych (zapinek i łuków). W wyliczeniach należało uwzględnić zużytą folię po uprawie, zabrudzoną masą roślinną oraz ziemią. Przyjęto, że pozostałości stanowią ok. 40% masy folii.

Tabela 2. Zestawienie masy odpadów powstających po uprawie pomidora szklarniowego wraz z kosztami poniesionymi za ich utylizację (źródło własne).

	<b>Liczba (na 1 szklarnię)</b>	<b>Masa [kg]</b>	<b>Koszt utylizacji* [zł]</b>
<b>Krzaki pomidorów po uprawie</b> (liczba sadzonek x 2,2 kg średnia masa krzaku)	720 szt.	1584	594 zł/Mg* ~ 941
<b>Zapinki</b> (3 szt. x 2,22 g x liczba krzaków)	2160 szt.	4,80	575 zł/Mg* ~ 11
<b>Łuki</b> (6 szt. x 0,90 g x liczba krzaków)	4320 szt.	3,89	
<b>Folia o grubości 40μ</b> (masa 1m <sup>2</sup> – 55 g; zabrudzenie pozostałościami roślinnymi i ziemią ok. 40% masy folii)	132 m <sup>2</sup>	10,2	
<b>Pozostałe koszty [zł]</b>			
<b>Koszt pracy (30 zł/h)</b> zebranie folii rozdzielenie akcesoriów od roślin			60 420
<b>Koszt odbioru odpadów</b>			250
<b>Całkowity koszt utylizacji (odpady roślinne + odpady z tworzyw sztucznych)</b>			1 682
<b>Koszt utylizacji odpadów z tworzyw sztucznych</b>			741

\*koszt wyliczony na podstawie cennika dostępnego na stronie <https://prezero.pl/> - odbiorcy odpadów działającego na terenie Częstochowy.

Odpady z działalności ogrodniczej nie mogą być utylizowane jak odpady komunalne, dlatego należy zgłosić się do zakładu specjalizującego w odbiorze tego typu pozostałości lub samodzielnie je dostarczyć. Dla przykładowej uprawy pomidora w szklarni, koszt utylizacji odpadów roślinnych wyniósł ok. 941 zł, natomiast pozostałości po uprawie pomidora (tj. folie i akcesoria z tworzyw sztucznych do uprawy roślin) to ok. 11 zł. W kalkulacji należało uwzględnić również koszty pracy związane z zebraniem folii z gleby (60 zł) oraz rozdzieleniem akcesoriów od zielonych części roślin (420 zł).

Ponadto, jeśli transport odpadów do punktu zbiórki we własnym zakresie stanowi problem, należy wziąć pod uwagę koszt związany z odbiorem odpadów, który może wynosić ok. 250 zł. Podsumowując, zastosowanie w szklarni o standardowych wymiarach materiałów z tworzyw sztucznych, tj. folii do ściółkowania i akcesoriów wspomagających uprawę, wiąże się z wydatkiem rzędu ok. 741 zł za zebranie, odbiór i utylizację odpadów. Uprawa pomidorów w szklarni z zastosowaniem tradycyjnych folii i akcesoriów wiąże się nie tylko z kosztami utylizacji pozostałości roślinnych, ale również kosztami zebrania folii z gruntu, rozdzielania akcesoriów od roślin oraz kosztami transportu.

Dla porównania, według danych literaturowych, manualne usuwanie folii do ściółkowania z tworzyw sztucznych z pola o powierzchni 1 ha jest czasochłonne i może trwać ok. 42 godzin. Z kolei ponowne wykorzystanie folii jest praktycznie niemożliwe ze względu na zalegające resztki gleby i roślinności na foliach. Koszt utylizacji folii odpadowej z gleby w przeliczeniu na 1 hektar metodą składowania to ok. 186 euro, a z wykorzystaniem recyklingu to ok. 192 euro (Liu i in., 2022).

Uprawa pomidorów w szklarni z zastosowaniem tradycyjnych folii i akcesoriów wiąże się nie tylko z wysokimi kosztami utylizacji pozostałości, ale również kosztami zebrania folii z zagonów, rozdzielania akcesoriów od roślin oraz kosztami transportu. Z drugiej strony konieczność zagospodarowania trudnych w utylizacji odpadów zmusza do poszukiwania innych rozwiązań, które mogłyby pomóc w łatwiejszym i tańszym zagospodarowaniu pozostałości po tego typu produkcji roślinnej. Z drugiej strony, konieczność zagospodarowania trudnych w utylizacji odpadów zmusza do poszukiwania innych rozwiązań, które mogłyby pomóc w łatwiejszym i tańszym zagospodarowaniu pozostałości po tego typu produkcji roślinnej.

### **2.2.3. Wpływ odpadów z tworzyw sztucznych na środowisko**

Ze względu na ograniczone możliwości odzysku i odporność na degradację, pozostałości tworzyw sztucznych w coraz większym stopniu gromadzą się w środowisku naturalnym. Tam mogą zalegać przez długi czas, a następnie ulegać defragmentacji, tworząc mniejsze cząsteczki, tzw. mikroplastiki, których rozmiar jest mniejszy niż 5 mm (Wright i in., 2017). Ponieważ mniejsze fragmenty folii są podatne na erozję wiatrową i wodną, zostają rozproszone w środowisku (Sintim i in., 2021). Zdarza się, że w pobliżu cieków wodnych pozostawione są folie odpadowe, które mogą stanowić źródło

zanieczyszczeń wód gruntowych lub być przeszkodą w naturalnym przepływie wody (Parlato i in., 2020).

Ponadto, odpady wyrzucone do akwenów wodnych stanowią zagrożenie dla organizmów tam żyjących. Przykładem może być wielka pacyficzna plama śmieci. Szacuje się, że co roku trafia do oceanów od 4 do 12 mln Mg tworzyw sztucznych, a w 2050 roku ilość ta zgodnie z prognozami przewyższy liczebność ryb (Bilal i in., 2020). W oceanach znajduje się zaledwie 20% tworzywa pochodzącego ze źródeł oceanicznych, takich jak łowiska i statki rybackie, natomiast pozostałe 80% pochodzi ze źródeł lądowych (Kershaw i in., 2015).

### **Mikroplastiki zalegające w glebie**

Po procesie ściółkowania odpady ze zużytych folii powinny być dokładnie zebrane z gleby. Wykorzystanie maszyn rolniczych do tego celu może spowodować uszkodzenia mechaniczne folii ściółkującej, wówczas niezbrane pozostałości ulegają rozproszeniu do głębszych warstw ziemi i tam gromadzą się przez długi okres czasu, powodując zanieczyszczenie mikroplastikami. Również w trakcie wzrostu roślin możemy mieć do czynienia z procesem starzenia się folii, czego skutkiem jest przedwczesna degradacja i odkładanie fragmentów folii w podłożu. Na przykład, w Chinach po wielokrotnym procesie ściółkowania w glebie może znajdować się od 72 kg/ha do 260 kg/ha mikroplastików (Brodhagen i in., 2017; Wang i in., 2019). Zhao i in. (2022) badali wpływ wieloletniego ściółkowania folią z polietylenu. Po 19 latach ściółkowania akumulacja mikroplastików w glebie wynosiła ok. 2900 n/kg. Z kolei, Li i in. (2022) badali akumulację makro- i mikroplastików po 32 latach ściółkowania folią (przy czym folia była usuwana po każdym sezonie wegetacyjnym). Okazało się, że ściółkowanie foliami z tworzyw sztucznych przyczyniło się do znacznego zanieczyszczenia mikroplastikami w warstwie gleby na głębokości od 0 do 100 cm i stanowiło 33-56% całkowitego zanieczyszczenia mikroplastikami w tej warstwie gleby. Zebranie odpadowej folii o niewielkiej masie cząsteczkowej jest bardzo utrudnione, nawet przy wykorzystaniu najnowocześniejszego sprzętu. Należy tutaj zaznaczyć, że nie wszyscy rolnicy dysponują odpowiednimi maszynami do zbioru zużytej folii, a to może skutkować zaleganiem znacznych fragmentów odpadów ze zużytej folii w glebach.

Skumulowane pozostałości folii w glebie prowadzą przede wszystkim do zubożenia terenów. Zbadano, że suma mikroplastików w glebie zwiększa się po każdej uprawie, w której zastosowano folię ściółkującą, co wpływa na jakość gleby i zmniejszenie

plonowania w perspektywie średnio- i długoterminowej (Serrano-Ruiz i in., 2021). Na przykład, zagęszczenie gleby poprzez mikroplastiki może powodować utrudnioną infiltrację wody. Nieprawidłowo zebrana folia po procesie ściółkowania może również niekorzystnie wpływać na kolejne uprawy roślin. Na przykład, resztki folii po ściółkowaniu w ilości 240 kg/ha w glebie pogorszyły plonowanie kolejnych upraw, natomiast poniżej tej wartości nie zaobserwowano wyraźnego wpływu na plonowanie (Gao i in., 2019).

Wpływ makro- i mikroplastików na wzrost roślin zbadali również Qi i in. (2018). Wyniki pokazały, że zanieczyszczenia mikroplastikiem wpływały negatywnie zarówno na nadziemne, jak i podziemne części pszenicy podczas wzrostu wegetatywnego jak i reprodukcyjnego. Wpływ ściółkowania foliami z tworzyw sztucznych na wzrost i plonowanie roślin badali także Zhang i in. (2020). Na podstawie meta analizy badacze zauważyli negatywny wpływ zanieczyszczenia mikroplastikami pochodzącymi z folii do ściółkowania z tworzyw sztucznych. Pomimo że w wyniku zastosowania folii do ściółkowania zaobserwowali oni średni wzrost plonowania w zakresie 25%-42%, to w następnym sezonie zaobserwowali spadek, m.in. plonowania średnio o 3%, wzrostu roślin o 2% i masy korzeni o 5%. Zaobserwowali oni również wpływ ściółkowania na właściwości gleby, które przyczyniło się do spadku współczynnika infiltracji o 8%, przyswajalnego fosforu o 5% czy materii organicznej o 0,8%.

Nie tylko zgromadzone pozostałości po folii wpływają negatywnie na glebę, ale również proces zbierania folii po ściółkowaniu powoduje, że wraz z foliowym odpadem zabierana jest część ziemi. Skutkiem może być zubożenie gleby i pogorszenie żyzności, m.in. ze względu na utratę węgla organicznego, czyli kluczowego składnika gleby. W związku z tym, rolnicy sięgają po nawozy mineralne aby zrekompensować ubytki (Geyer i in., 2017). W glebach po procesie ściółkowania mogą zalegać znaczne ilości organicznych chemikaliów pochodzących z nawozów, pestycydów i herbicydów (Serrano-Ruiz i in., 2021).

Pozostałości z tworzyw sztucznych mogą mieć także negatywny wpływ na żywe organizmy. W przypadku dżdżownic zaobserwowano, że wysokie stężenie polietylenu w glebie po ściółkowaniu zwiększyło ich śmiertelność (Sintim i in., 2021).

Należy również podkreślić, że negatywny wpływ na glebę mogą mieć dodatki do tworzyw sztucznych. Stanowią one zróżnicowaną grupę składników włączonych w strukturę polimeru, dodawanych w celu uzyskania pożądaných cech produktu końcowego. Folie do ściółkowania są zazwyczaj mieszkankami polimerów



z plastyfikatorami, barwnikami, kompatybilizatorami oraz innymi dodatkami poprawiającymi przetwarzanie, właściwości, kompatybilność chemiczną i jednorodność folii (Brodhagen i in., 2015). Dodatki mogą stanowić poważne zagrożenie, ponieważ są łatwo wmywane do gleby i szybko przedostają się do głębszych warstw. Na przykład, estry kwasu ftalowego (PAE) stanowią główny dodatek do folii z tworzyw sztucznych powszechnie stosowanych w rolnictwie. Podczas gdy folia rozpada się na mikroplastiki, do gleby mogą zostać uwolnione zanieczyszczenia, tj. PAE, które stwarzają potencjalne ryzyko zagrożenia dla ludzkiego zdrowia, mikrobiomu gleb rolniczych oraz jakości gleb (Qi i in., 2020).

#### **2.2.4. Praktyki związane z zagospodarowaniem odpadowej folii po procesie ściółkowania**

Odpadowa folia z tworzyw sztucznych po ściółkowaniu powinna być zagospodarowana poprzez oddanie jej do zakładu specjalizującego się w utylizacji tego typu materiałów. Niejednokrotnie można zaobserwować inne praktyki stosowane przez rolników takie jak, np. spalanie w niekontrolowanych warunkach. Podczas spalania uwalniane są organiczne zanieczyszczenia do atmosfery (np. dioksyny, furany). Pomimo obowiązujących zakazów takie praktyki wciąż są stosowane i mogą oddziaływać nie tylko negatywnie na środowisko naturalne, ale również niekorzystnie wpływać na stan zdrowia żywych organizmów. Długotrwałe narażenie na substancje toksyczne znajdujące się w zanieczyszczonym powietrzu wywierają negatywny wpływ na funkcjonowanie układu oddechowego.

Niezgodne z prawem praktyki zagospodarowania odpadów ze zużytych folii do ściółkowania mogą być wynikiem wysokich cen transportu odpadów, utylizacji oraz zapewnienia siły roboczej. Jeżeli wydatki związane z produkcją roślinną są niemalże równe przychodom, bądź kształtują się na podobnym poziomie, rolnicy decydują się na zagospodarowanie odpadów poprzez, np. zakopywanie, składowanie lub spalanie zużytych materiałów pomimo obowiązujących zakazów. Szacuje się, że do połowy tego wieku prawie  $12 \times 10^9$  Mg odpadów z tworzyw sztucznych będzie zgromadzonych na wysypiskach lub w naturalnym ekosystemie, jeśli utrzymają się trendy w produkcji i gospodarowaniu odpadami (Geyer i in., 2017).

Usuwanie i utylizacja folii z pól po zakończeniu uprawy jest nie tylko czasochłonna, ale również kosztowna. Na przykład, w USA wielu plantatorów wyrzuca zużytą folię po

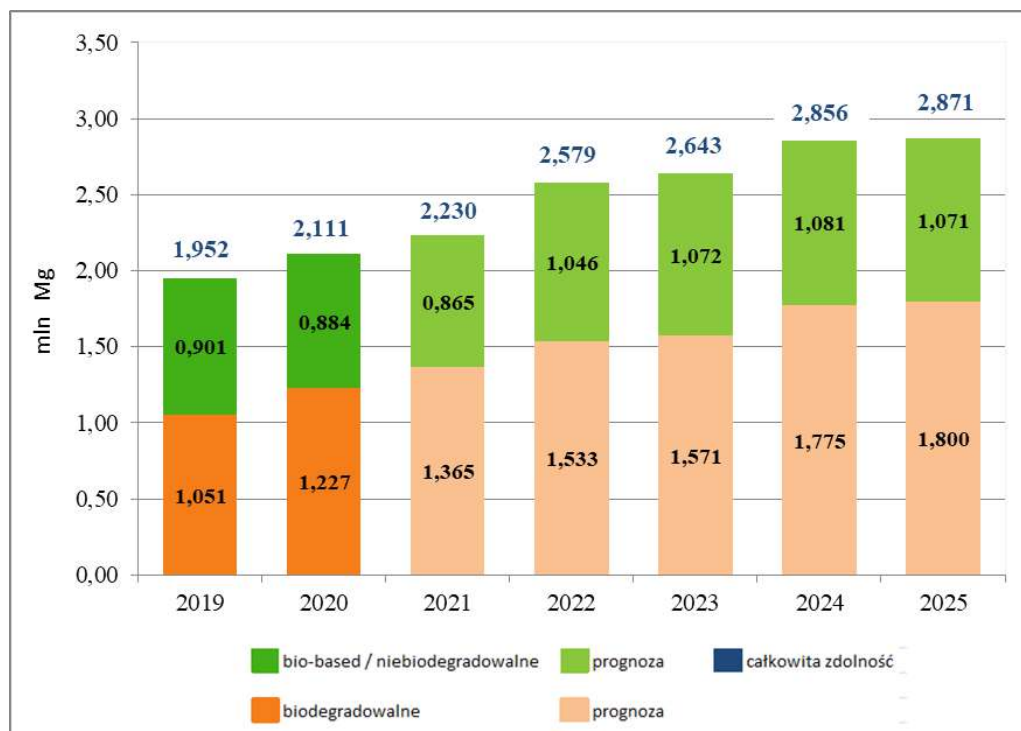
ściółkowaniu na wysypisko, co jest związane z poniesieniem kosztów rzędu 359–584 USD z 1 ha (Brodhagen i in., 2015).

Nie tylko odpady foliowe po procesie ściółkowania stanowią problem, ale również odpady z innych materiałów po zakończeniu uprawy roślin. Szacuje się, że ok. 30% odpadów wytwarzanych w rolnictwie i ogrodnictwie to materiały, których zastosowanie jest krótkoterminowe. Do nich również należą różnego rodzaju akcesoria przydatne w uprawie roślin, takie jak: siatki i zapinki do podtrzymywania roślin, doniczki, tace, dozowniki feromonów i geowłókniny. Istnieje ryzyko, że część z tych materiałów zostanie pominięta podczas zbiorów ze względu na rozmiary, a pozostałości będą zalegać latami powodując zanieczyszczenie środowiska (Guerrini i in., 2017).

Jednym ze sposobów wyeliminowania rosnących ilości odpadów z tworzyw sztucznych jest produkcja tworzyw biodegradowalnych, które mogą ulegać rozkładowi w środowisku, np. w glebie. Tworzywa biodegradowalne powinny być integralną częścią strategii minimalizowania zanieczyszczenia środowiska tworzywami sztucznymi, pod warunkiem że po zużyciu będą odpowiednio zagospodarowane (Flury i in., 2021; Moshood i in., 2022; Rayns i in., 2021; Rosenboom i in., 2022).

### **2.3. Tworzywa biodegradowalne**

Tworzywa biodegradowalne – określane potocznie jako biotworzywa – stanowią obiecującą alternatywę dla konwencjonalnych tworzyw sztucznych. Według prognoz (rys. 3) światowe zdolności produkcyjne tych materiałów wzrosną z około 2,11 miliona Mg w 2020 roku do około 2,87 mln Mg w 2025 r. (European Bioplastics, 2020).

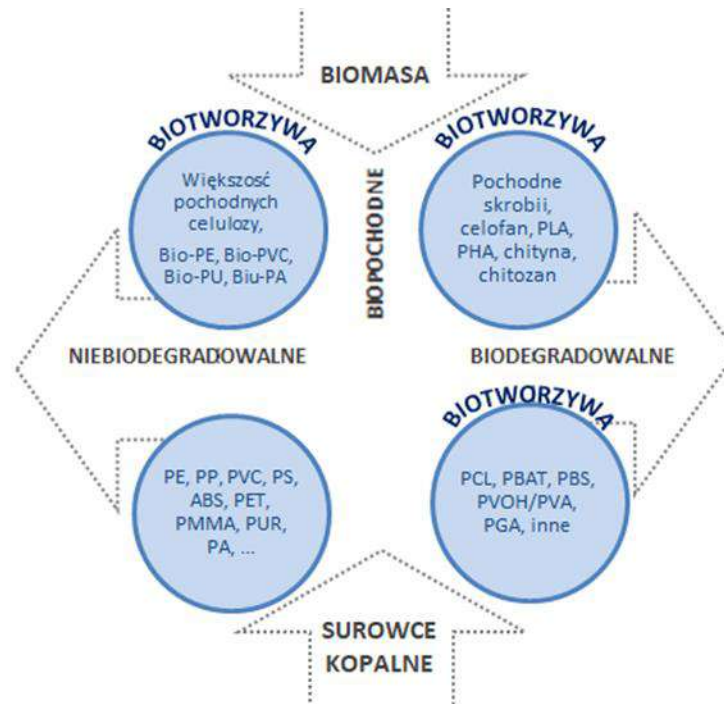


Rysunek 3. Globalne zdolności produkcyjne biotworzyw 2019-2025 (European Bioplastics, 2020).

Tworzywa biodegradowalne po zużyciu mogą podczas biodegradacji zostać przekształcone w dwutlenek węgla, metan i biomasę w wyniku działania mikroorganizmów. Ze względu na pochodzenie tych tworzyw wyróżnia się tworzywa:

- pochodzące ze źródeł odnawialnych, czyli polimery pochodzenia naturalnego, które są biodegradowalne i nie stanowią zagrożenia dla środowiska,
- pochodzące ze źródeł nieodnawialnych (np. zasobów ropy naftowej), czyli tzw. polimery syntetyczne (Polman i in., 2021).

Skład biotworzyw może opierać się częściowo lub w całości na biomase roślinnej z upraw rolnych i ich pozostałości, a także może zawierać materiały morskie i leśne, algi lub grzyby. Należy nadmienić, że tworzywa biodegradowalne, w których głównym budulcem jest węgiel organiczny pochodzący z zasobów ropy naftowej, gazu ziemnego czy innych zasobów kopalnych, nie jest pochodzenia biologicznego (Narayan R., 2017).



Rysunek 4. Klasyfikacja tworzyw (Plastic Europe, 2019).

Tworzywa biodegradowalne mogą być:

- wyprodukowane z naturalnych składników, takich jak: skrobia, celuloza,
- wytwarzanie z monomerów za pomocą konwencjonalnych technik chemicznych, np. polilaktyd (PLA),
- produkowane za pomocą hodowli i procesów adaptacyjnych kolonii drobnoustrojów wyizolowanych z naturalnego otoczenia lub wytworzonych za pomocą inżynierii genetycznej, np. polihydroksymaślan (PHB), oraz
- wytwarzane z częściowo biodegradowalnych polimerów, takich jak np. politereftalan butylenu (PBT), poli(adypinian-co-tereftalan butylenu) (PBAT), bursztynian polibutylenu (PBS) i poliuretan (PU) (Yadav i in., 2020).

### 2.3.1. Surowce do produkcji biodegradowalnych folii i akcesoriów do uprawy roślin

#### Polilaktyd (PLA)

PLA czyli poli(kwas mlekowy) to biodegradowalny polimer produkowany w wyniku aktywności mikroorganizmów zdolnych do przekształcania produktów rolnych w biopochodne monomery do polimeryzacji. Przykładami produktów rolnych wykorzystywanych do produkcji PLA są: trzcina cukrowa, kukurydza i burak cukrowy.

Wśród produktów rolnych, kukurydza jako wysokiej jakości substrat zwiększa wydajność procesu fermentacji, ponieważ może produkować kwas mlekowy o wysokiej czystości. Produkcja kwasu mlekowego w drodze fermentacji cieszy się coraz większym zainteresowaniem ze względu na jej przyjazność dla środowiska, niższe zużycie energii, niższą temperaturę produkcji i niższy koszt substratów. Głównym wyzwaniem w produkcji kwasu mlekowego na dużą skalę jest koszt surowca, jednakże wykorzystanie odpadów rolno-przemysłowych może być alternatywnym źródłem tańszego surowca (Chan i in., 2020).

PLA to tworzywo termoplastyczne o dużej wytrzymałości, które charakteryzuje się również dużą tolerancją na różnego rodzaju techniki i warunki przetwarzania. Polilaktyd posiada nieco gorsze właściwości termiczne w stosunku do konwencjonalnych tworzyw sztucznych. Problem ten może być rozwiązany na przykład poprzez zmieszanie z innym polimerem lub środkiem pomocniczym. Z raportu "Bioplastics market data 2018" wynika, że PLA stanowiło około 10,3% całkowitych globalnych zdolności produkcyjnych biotworzyw w roku 2018 (European Bioplastics, 2018).

W sektorze rolnictwa i ogrodnictwa PLA cieszy się dużym zainteresowaniem ze względu na biodegradowalność, biokompatybilność i dobre właściwości mechaniczne, zbliżone do tradycyjnie stosowanych polimerów, takich jak: HDPE, PET, PS (Knoch i in., 2020).

Polilaktyd z powodzeniem wykorzystuje się do produkcji na przykład folii ściółkujących. Przykładem może być folia Ecovio firmy BASF, która powstała z połączenia polimerów PLA i PBAT. Poli(kwas mlekowy) jest wykorzystywany również do produkcji włókien rolniczych jako samoistny materiał bądź w formie połączenia, stanowiącego dodatek do innych włókien (Oliveira i in., 2017).

### **Polihydroksyalkaniany (PHA)**

PHA to grupa poliestrów pochodzenia biologicznego ulegająca biodegradacji. Pomimo podobnych właściwości do tradycyjnych tworzyw sztucznych, produkcja PHA jest utrudniona ze względu na wysokie koszty. PHA mogą być wytwarzane przez liczne szczepy drobnoustrojów wykorzystujące źródła odnawialne w pewnych niekorzystnych warunkach, takich jak nadwyżka węgla i ograniczenie azotu, tlenu lub fosforu (Mostafa i in., 2018). PHA z powodzeniem są wykorzystywane w produkcji materiałów wspomagających uprawę roślin, tj. folii do ściółkowania czy siatek rolniczych. Z kolei worki uprawowe (tzw. gotowe worki z ziemią do uprawy roślin) wyprodukowane z PHA

są przyjazne dla korzeni i nie powodują żadnych deformacji w porównaniu z workami PE. Mogą one wpływać na wzrost upraw, odporność na patogeny i zdolność rośliny do szybkiego zakorzenienia w ziemi po przesadzeniu. Ponadto, worki do uprawy z PHA eliminują podwójne przetwarzanie i recykling po zużyciu. Niewątpliwie, zaletą stosowania tego tworzywa jest brak toksycznego działania jego pozostałości na glebę (El-Malek i in., 2020).

Zmianę właściwości PHA można uzyskać poprzez dobór substratu, szczepów bakterii i warunków fermentacji. PHA wykazuje podobne właściwości wytrzymałościowe na rozciąganie, co konwencjonalne tworzywo sztuczne HDPE. Głównym ograniczeniem są bardzo wysokie koszty produkcji. Konwencjonalne polimery kosztują około 1000–1500 USD/Mg, natomiast ceny biopolimerów takich jak PHB (polihydroksymaślany) będące odmianą PHA, wahają się od 4000 USD/Mg do nawet 15000 USD/Mg (Bhoomika i in., 2019). Do produkcji jest wykorzystywana biomasa, strumienie odpadów komunalnych lub strumienie odpadów rolno-przemysłowych (np. pozostałości rolne), które zapewniają zrównoważone źródło węgla zamiast paliw kopalnych. Następuje w ten sposób redukcja odpadów i kosztów utylizacji w środowisku. Jednocześnie obniża się całkowity koszt produkcji poprzez wykorzystanie odpadów jako substratów, ponieważ 30–50% całkowitego kosztu produkcji PHA przypada na surowiec. Narzędzia oceny środowiskowej, takie jak ślad środowiskowy i ocena cyklu życia (LCA), wykazały, że produkcja PHA może przyczynić się do redukcji emisji gazów cieplarnianych (o ok. 200%), zmniejszenia zużycia energii kopalnej (o ok. 95%) oraz zmniejszenia ilości odpadów (Yadav i in., 2020).

## **Skrobia**

Skrobia termoplastyczna (TPS) na bazie surowców odnawialnych jest obecnie dominującym surowcem, z którego produkuje się większość komercyjnie dostępnych biodegradowalnych folii wykorzystywanych do ściółkowania (Yang i in., 2020). Skrobia może być wykorzystana do produkcji folii biodegradowalnych na dwa sposoby: (1) jako biodegradowalne wzmocnienie lub (2) jako biodegradowalna matryca. Folie biodegradowalne do ściółkowania wyprodukowane na bazie skrobi wspomagają uprawę roślin oraz chronią uprawy przed szkodnikami (Menossi M. i in., 2021). Co ważne, po zakończeniu uprawy roślin, folie te nie muszą być usuwane z gleby, ponieważ ulegają biodegradacji (Bajer, 2015). Stwierdzono również, że odpady z folii na osnowie skrobi

mogą pełnić rolę nawozu, jednocześnie przyczyniając się do poprawy wzrostu i plonowania roślin (Kowalski, 2018).

W produkcji tworzyw biodegradowalnych pochodzenia biologicznego największe znaczenie ma koszt surowców. Skrobię otrzymuje się z surowców odnawialnych, dlatego jest tańsza, a ponadto szeroko dostępna. Zaaplikowanie skrobi jako dodatku do kompozytów biodegradowalnych może znacznie obniżyć cenę i sprawić by materiały biodegradowalne stały się bardziej konkurencyjne (Łodyga i in., 2015). Na rynku dostępne są tworzywa na bazie skrobi, tj. Mater-Bi® firmy Novamont, Bioflex®, Biopac, Bioplast® firmy Biotec, Clean Green, Cornpol®, Eco-flow czy Ecoplast.

Dla przykładu, tworzywo Mater-Bi® jest produkowane ze skrobi kukurydzianej. To całkowicie biodegradowalny i kompostowalny materiał. Po destrukuryzacji skrobi następuje kompleksowanie innymi polimerami biodegradowalnymi pochodzenia naturalnego bądź syntetycznego. Powstałe struktury kropelek skrobi są odporniejsze na wodę, a właściwościami mechanicznymi konkurują z konwencjonalnymi tworzywami. Przeprowadzono wiele badań potwierdzających bardziej korzystne parametry folii w stosunku do tradycyjnych tworzyw sztucznych. Materi-Bi® okrywająca niskie tunele oraz służąca do ściółkowania ulega rozkładowi w glebie w czasie nie dłuższym niż 6 miesięcy. W wyniku tego może z powodzeniem zastąpić tradycyjne folie polietylenowe, ograniczyć powstawanie odpadów i stosowanie chemikaliów w rolnictwie (Briassoulis i in., 2017).

Materiały na bazie skrobi mają słabsze właściwości mechaniczne, a ze względu na swój hydrofilowy charakter charakteryzują się wysoką przepuszczalnością pary, co ogranicza ich zastosowanie. Z tego powodu tworzy się różne modyfikacje w celu wzmocnienia kompozytów biodegradowalnych (Mostafa i in., 2017). Na przykład, folie rolnicze na bazie skrobi mogą być modyfikowane termoplastycznymi poliestrami, tj. PHB lub PLA. Tego typu kompozyty mają zbliżone właściwości do materiałów LDPE, jednak największą zaletą jest to, że ulegają biodegradacji i można poddać je kompostowaniu. Folie produkowane na bazie PHB degradują nawet w okresie 14 dni. Wspomniana wyżej skrobia może pochodzić z takich roślin jak ryż, ziemniaki czy kukurydza. Dlatego też rozróżnia się wiele odmian folii, każda o innych właściwościach zależnych od surowca z jakiego została wyprodukowana. Na przykład, białko sojowe wchodzące w skład folii sprawia, że powierzchnia materiału stanowi dobrą barierę dla promieniowania UV i tlenu (Siqueira i in., 2021).

### 2.3.2. Dodatki do produkcji tworzyw biodegradowalnych

W wyniku połączenia polimerów z różnymi dodatkami powstają tworzywa sztuczne. Funkcją dodatków jest, m.in. zmodyfikowanie właściwości fizycznych lub chemicznych końcowego tworzywa sztucznego i otrzymanie nowego wyrobu użytkowego. Dodatki mogą występować w postaci włókien, proszku, ścinek czy płatków. Do proszkowych napełniaczy nieorganicznych zalicza się na przykład proszki metali i ich tlenki, natomiast do organicznych żywice, mączkę drzewną oraz różne odmiany węgla takie jak np. sadza, grafit czy włókna węglowe.

Rodzaje dodatków i ich funkcje:

- napełniacze – poprawiają właściwości mechaniczne oraz obniżają cenę tworzywa,
- stabilizatory – chronią tworzywo sztuczne przed degradacją termiczną podczas przetwarzania lub użytkowania, czyli zwiększają odporność na starzenie,
- plastyfikatory – poprawiają elastyczność i ułatwiają przetwórstwo, a także mają wpływ na modyfikację właściwości mechanicznych i cieplnych tworzyw,
- barwniki i pigmenty – mają wpływ na barwę tworzywa,
- antystatki – modyfikują właściwości powierzchniowe tworzywa zapobiegając elektryzowaniu (Wagner i in., 2020).

Dodatki, które zostały słabo związane z polimerem, mogą w łatwy sposób przenikać do środowiska podczas normalnego użytkowania. Zjawisko to może występować częściej podczas degradacji tworzyw sztucznych w wyniku ich niewłaściwej utylizacji. Ponadto, dodatki są łatwo wymywane i uwalniane do gleby, zwłaszcza niektóre plastyfikatory. Wątpliwości mogą wzbudzać, np. estry ftalanowe (PAE), które są niebezpieczne dla środowiska. Odnotowano, że migracja związków PAE do gleby może powodować zahamowanie rozwoju roślin u kilku gatunków uprawnych, a także z łatwością przedostać się do zasobów wodnych, stwarzając zagrożenie dla ekosystemów i zdrowia ludzi (Serrano-Ruiz i in., 2021).

Odwrotna sytuacja jest w przypadku dodatków biodegradowalnych, tzw. bioplastyfkatorów pozyskanych na przykład z olejów roślinnych, tj. słonecznika, rzepaku, palmy. Takie bioplastyfkatory nie wpływają negatywnie na środowisko i mikroflorę pod warunkiem, że są biodegradowalne, nietoksyczne i nie migrują w środowisku (Hassan i in., 2019). Wykazano, że pozostałości po dodatkach nie mają



wpływu na umieralność dżdżownic oraz aktywność mikroorganizmów (Sintim i in., 2021).

Dodatki mają niewielki wpływ na ostateczny skład folii do ściółkowania. Jeśli ich zawartość nie przekracza 1%, nie ma wymogu udowodnienia ich biodegradowalności zgodnie z normą PN-EN 17033.

Dodatki stosowane podczas produkcji folii do ściółkowania stanowią zróżnicowaną grupę składników włączonych do szkieletu polimeru, które mają zasadnicze znaczenie dla uzyskania pożądanych właściwości produktu końcowego.

Dodatki do folii przeznaczonej do ściółkowania mają głównie na celu:

- ułatwienie mechanicznej instalacji materiału na podłożu (m.in. poprawę elastyczności folii),
- poprawę stabilności,
- zapewnienie określonych właściwości folii do ściółkowania (np. koloru),
- ułatwienie degradacji in situ do gleby po zastosowaniu folii,
- obniżenie kosztów materiału biodegradowalnego, ze względu na jego mniejsze zużycie.

Przykłady stosowanych dodatków:

- sadza pełniąca rolę stabilizatora, działająca jak ekran promieniowania UV,
- węglan wapnia ( $\text{CaCO}_3$ ) oraz talki, które obniżają koszt produkcji folii do ściółkowania oraz poprawiają właściwości mechaniczne folii, tj. sztywność, stabilność termiczną, wytrzymałość na rozciąganie czy odporność na ścieranie.

Tworzywa biodegradowalne często są modyfikowane plastyfikatorami, takimi jak glicerol i estry cytrynianowe, w celu poprawy właściwości mechanicznych (np. twardości, elastyczności) lub sadzą aby poprawić wytrzymałość na rozciąganie.

### **Aktualny stan wiedzy w zakresie dodatków do tworzyw biodegradowalnych**

Rynek biotworzyw i biododatków to z pewnością rynek obiecujący i dynamicznie rozwijający się, co jest szczególnie zauważalne w ostatnim czasie. Wynika to między innymi z rosnącej świadomości konsumentów na temat negatywnego wpływu tworzyw sztucznych na środowisko.

Wśród potencjalnych dodatków, które mogą obniżyć koszt produkcji kompozytów biodegradowalnych bez jednoczesnego pogorszenia właściwości fizykochemicznych są węglan wapnia i biowęgiel.

### **Węglan wapnia**

Węglan wapnia może być stosowany jako napełniacz do tworzyw sztucznych. Dodatek ten odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu gleby wpływając korzystnie na jej właściwości chemiczne i fizyczne.in.in. na porowatość, przepuszczalność, a także przywrócenie właściwego odczynu pH w glebie. Węglan wapnia przyczynia się również do produkcji węgla organicznego w glebie, tworzenia agregatów i stabilizacji węgla. Wykazano, że zwiększenie zawartości tego związku w glebie może sprzyjać wzrostowi roślin i plonowaniu, dzięki większej zawartości składników mineralnych. Rolnicy natomiast stosują często nawozy wapniowe do użyźniania gleby (Kowalska i in., 2019).

Niewątpliwie węglan wapnia jest jednym z najczęściej stosowanych napełniaczy nieorganicznych, ponadto jest nietoksyczny. Może być przetwarzany przy dużym obciążeniu, ma niski koszt i jest dostępny komercyjnie. Do tej pory badania prowadzone były przede wszystkim na polipropylenie (PP) i polietylenie (PE) wzmocnionymi cząstkami węglanu wapnia ( $\text{CaCO}_3$ ). Niewiele jednak wiadomo o wpływie tego napełniacza jako dodatku do polimerów biodegradowalnych. Badania nad wpływem węglanu wapnia na polimery biodegradowalne przeprowadzili Surya i in. (2021). Stwierdzili poprawę właściwości fizycznych, mechanicznych, termicznych, a także lepszą biodegradowalność folii. Właściwości folii poprawiały się już po zwiększeniu zawartości napełniaczy do 0,10% wagowych.

### **Biowęgiel**

Biowęgiel jest stosowany w rolnictwie od XIX wieku z powodu swoich korzystnych właściwości. Dodany do gleby sprzyja poprawie właściwości użytkowych, takich jak żyzność gleby oraz może przyczynić się do ograniczenia stosowania nawozów i środków ochrony roślin. Oprócz tego, biowęgiel może stanowić podłoże i dostarczać wielu składników odżywczych. Biowęgiel może być stosowany do rekultywacji terenów zdegradowanych (Gonzales i in., 2015). Ponadto, istotny wpływ ma także na kontrolowanie niewłaściwej kwasowości/zasadowości/zasolenia gleby. Biowęgiel może mieć zdolności do remediacji zanieczyszczonej gleby, zwiększenia zawartości wody oraz

retencji węgla organicznego, co w rezultacie może prowadzić do poprawy wydajności właściwości gleb i plonowania roślin (Palansooriya i in., 2019).

Z biowęgla można uzyskać szereg produktów do zastosowań rolniczych, zarówno do produkcji roślinnej jak i chowu zwierząt. Są to m.in.: polepszacze gleby (zmieszany biowęgiel z gnojowicą), nawozy (preparaty mikrobiologiczne na bazie biowęgla jako nośnika, komposty) czy suplementy paszowe z przeznaczeniem dla zwierząt w postaci karmy bądź kiszonki (Allohverdi i in., 2021; Ayaz i in., 2021). Biowęgiel w swoim składzie chemicznym zawiera część organiczną, węgiel wymywalny, popiół oraz cenne składniki mineralne. Biowęgiel otrzymuje się w wyniku pirolizy w odpowiednio wysokiej temperaturze bez dostępu tlenu. Najczęściej wykorzystywane substraty to odpady rolne (np. słoma, rzepak, kolby kukurydzy, odpady z chowu zwierząt, pozostałości spożywcze po przetwórstwie) lub biomasa (np. biomasa lignocelulozowa). Ponieważ biomasa odpadowa jest stosowana do produkcji biowęgla, a biowęgiel następnie wprowadzony do gleby w postaci nawozu, można mówić o zamkniętym obiegu materii (Weisser i in., 2016).

Biowęgiel może mieć odmienne właściwości, determinowane rodzajem biomasy użytej do jego produkcji, jak i warunkami prowadzonej pirolizy. Zastosowanie biowęgla w rolnictwie wiąże się z pewnymi wymogami jakości i bezpieczeństwa. Biowęgiel wprowadzany do gleb powinien spełniać zalecenia European Biochar Certificate (EBC), w szczególności nie powinien przekraczać dozwolonego poziomu zawartości zanieczyszczeń, tj. dioksyn, furanów, wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, polichlorowanych bifenyli i metali ciężkich (EBC, 2022).

Zastosowanie biowęgla jako napełniacza do tworzyw biodegradowalnych stanowi nowatorskie rozwiązanie. W literaturze występują publikacje dotyczące przede wszystkim zastosowania tego typu napełniaczy do konwencjonalnych tworzyw sztucznych. W literaturze można znaleźć nieliczne prace dotyczące wykorzystania biowęgla jako napełniacza do otrzymywania biokompozytów czy już gotowych wyrobów z polimerów biodegradowalnych. Napełniacz biowęglowy zastosowany w matrycy biodegradowalnej (PLA/Bioplast 2189) wpływa na poprawę absorpcji wody i sztywność biokompozytów. Z kolei biowęgiel pochodzący z osadów ściekowych jako napełniacz biodegradowalnych polimerów polepsza właściwości mechaniczne i termiczne badanych biokompozytów (Pudełko i in., 2021). Biokompozyty z dodatkiem biowęgla mogą być z powodzeniem wykorzystywane do produkcji akcesoriów, takich jak zapinki i łuki przydatne podczas uprawy roślin, np. pomidorów. Dużą zaletą stosowania takich

rozwiązań jest możliwość utylizacji po wykorzystaniu wraz z resztkami roślinnymi po zakończonym okresie wegetacji, np. w wyniku procesu kompostowania. Tym samym zapobiega się powstawaniu odpadów z tworzyw sztucznych z rolnictwa i ogrodnictwa, które są trudne w zagospodarowaniu (Pudełko i in., 2021).

### **2.3.3. Wymagania prawne dla folii biodegradowalnych do ściółkowania**

Wymagania dla folii biodegradowalnych stosowanych do ściółkowania w rolnictwie i ogrodnictwie tradycyjnym określa europejska norma PN-EN ISO 17033. Norma określa również metody badań w celu oceny tych wymagań, a także wytyczne dotyczące pakowania, identyfikacji i znakowania folii.

Zgodnie z powyższym, folia do ściółkowania uważana jest za biodegradowalną, jeśli jej mineralizacja zostanie osiągnięta na poziomie minimum 90% w okresie prowadzenia badań nie dłuższym niż 24 miesiące. Osiągnięcie wymaganego stopnia mineralizacji oznacza całkowitą biodegradację, pozostała część jest unieruchomiona jako biomasa. Dodatkowo, wymagana jest kontrola składników oraz badanie ekotoksyczności w celu sprawdzenia, czy nie są uwalniane szkodliwe substancje do gleby.

Uwalnianie szkodliwych substancji do gleby jest weryfikowane w dwóch etapach, tj. kontrola składników oraz badanie ekotoksyczności. Testy ekotoksyczności pozwalają zbadać wystąpienie niekorzystnych skutków degradacji folii przeznaczonej do ściółkowania gleby pod koniec określonego czasu użytkowania. W tym celu przygotowuje się próbki gleby z wysoką zawartością zdegradowanej folii i przeprowadza test wzrostu określonych roślin, które są wrażliwe na toksyczne związki. Oprócz tego, prowadzi się jednocześnie test o ostrej toksyczności z wykorzystaniem dżdżownic oraz test hamowania nityfikacji przez mikroorganizmy glebowe (Tosin i in., 2020).

W próbkach gleby oznacza się również pozostałości metali ciężkich, takich jak: Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb i Zn, w celu określenia czy nie zostały przekroczone ich maksymalne dopuszczalne stężenia. Norma PN-EN ISO 17033 reguluje również niedozwolone substancje wzbudzające szczególnie duże obawy (SVHC). Wykaz takich substancji znajduje się na tzw. liście kandydackiej (ECHA, 2022).

Z kolei w oparciu o normę PN EN / ISO 20200: 2016 przeprowadza się, m.in. ocenę kompostowalności materiałów w warunkach laboratoryjnych. Proces kompostowania prowadzi się w temperaturze  $58 \pm 2^{\circ}\text{C}$  oraz zawartości wilgoci kompostu w próbce na poziomie 55%. W podanych warunkach wszystkie materiały należące do grupy

biodegradowalnych ulegają całkowitej degradacji, w tym włókniny do zastosowań rolniczych (Siwek i in., 2019).

Zastosowanie biodegradowalnych folii do ściółkowania otrzymanych z surowców odnawialnych w ekologicznych uprawach roślin wiąże się z pewnymi wymaganiami. Folie takie muszą: (1) składać się w 100% z surowców odnawialnych, (2) ulegać przynajmniej w 90% biodegradacji w glebie w okresie 2 lat, (3) spełniać wymagania kompostowalności, oraz (4) nie być wytwarzane za pomocą zabronionych metod, np. poprzez dodatek pozostałości genetycznie modyfikowanych roślin (Zhang i in., 2021). Te wymagania mogą stanowić ograniczenie dla rolników prowadzących uprawy ekologiczne. Natomiast producentów biodegradowalnych folii z przeznaczeniem do zastosowań w uprawach ekologicznych zachęcają do produkcji folii otrzymanych w 100% z zasobów odnawialnych. Zastosowanie folii biodegradowalnej, zwłaszcza wykonanej z naturalnego polimeru, np. skrobi kukurydzianej niezmodyfikowanej genetycznie zalecane jest przez International Federation of Organic Agriculture Movement (IFOAM) czyli Międzynarodową Federacją Rolnictwa Ekologicznego (Lee i in., 2021).

W odpowiedzi na problemy i wyzwania związane z wprowadzaniem biodegradowalnych tworzyw z surowców odnawialnych Unia Europejska od 2019 roku prowadzi prace nad stworzeniem ramowej polityki dotyczącej biodegradowalnych i kompostowalnych tworzyw otrzymanych z surowców odnawialnych (pochodzenia biologicznego) (ang. Policy framework on biobased, biodegradable and compostable plastics, European Commission). Ta polityka ma w sposób kompleksowy regulować kwestie w zakresie pozyskiwania, etykietowania i wykorzystywania biodegradowalnych i kompostowalnych tworzyw z surowców pochodzenia biologicznego. Oczekuje się, że uwzględnione zostaną również kwestie związane z zagospodarowywaniem odpadów z tworzyw biodegradowalnych i kompostowalnych w sposób bardziej zrównoważony w oparciu o takie metody jak kompostowanie, fermentacja metanowa czy degradacja w otwartym środowisku (np. glebie czy wodzie) (Biodegradability of Plastics in the Open Environment, European Commission, 2020).

Należy podkreślić, że brak jest regulacji prawnych w zakresie sposobów zagospodarowywania odpadów z materiałów biodegradowalnych, w szczególności odpadów pochodzących ze zużytych biodegradowalnych folii oraz innych akcesoriów do uprawy roślin.

### **2.3.4. Materiały i akcesoria wykorzystywane podczas uprawy roślin**

W początkowej fazie wzrostu roślin często wykorzystuje się różnego rodzaju akcesoria z tworzyw sztucznych w celu zapewnienia wzrostu i plonowania roślin. Stosowane materiały powinny być wystarczająco wytrzymałe z uwagi na zwiększającą się masę roślin oraz odporne na warunki panujące podczas uprawy – zarówno na zewnątrz jak i pod osłonami (np. w szklarniach). Przede wszystkim, duże znaczenie będzie miała wilgotność oraz nasłonecznienie. Do najczęściej wykorzystywanych akcesoriów ogrodniczych wspomagających uprawę roślin zalicza się: sznurki, łuki i zapinki podtrzymujące.

#### **Sznurek**

Sznurek wykorzystywany jest w rolnictwie i ogrodnictwie podczas uprawy roślin i owoców, np. pomidorów czy ogórków. Do celów rolniczych produkowany jest najczęściej z polikwasu mlekowego (PLA). Biodegradowalny sznurek powinien się cechować wysoką odpornością na promieniowanie UV oraz „brakiem pełzania” czyli nie odkształcania obciążonych materiałów w dłuższym okresie czasu. Dlatego sznurek wykonany z PLA będzie odpowiedni ze względu na odporność na promieniowanie UV, niską chłonność wilgoci oraz niewielki ciężar właściwy. Co więcej, zużyte materiały wytworzone z PLA można utylizować razem z odpadami zielonymi, np. w wyniku kompostowania (Guerrini S. i in., 2017).

#### **Łuki i zapinki**

Łuki stosowane są w uprawie roślin (np. pomidorów) do usztywniania łodyg i gron. Zapobiegają obrywaniu i łamaniu gron pod wpływem ciężaru owoców. Z kolei zapinki mają za zadanie utrzymać roślinę w pionowej pozycji, mocując swoim zapięciem sznurek do łodygi rośliny. Łuki i zapinki powinny być: łatwe do przymocowania, odporne na warunki klimatyczne, lekkie, gładkie i zaokrąglone aby zapobiec uszkodzeniom rośliny. W konstrukcji akcesoriów muszą znaleźć się otwory zapewniające dobrą cyrkulację powietrza w celu ograniczenia pojawienia się chorób grzybowych. Najczęściej łuki i zapinki produkowane są z polipropylenu, co ogranicza możliwość utylizacji wraz z odpadami roślinnymi. Norma EN13432 oraz EN14995 określają wymagania dla akcesoriów biodegradowalnych, które zakładają biodegradację i rozpad w procesie kompostowania w określonym czasie. Ponadto, wytworzony kompost musi spełniać

odpowiednie wymagania. Na przykład, nad kompostowalnymi zapinkami z PLA prowadzono już badania, w wyniku których stwierdzono ich biodegradację po ponad 4 miesiącach (Guerrini i in., 2017).

Łuki, zapinki, sznurki i inne akcesoria są niezwykle przydatne dla roślin uprawianych w systemie hydroponicznym. Na przykład, podłoże w postaci wełny mineralnej nie jest tak stabilne dla roślin w porównaniu do gleby, dlatego wymaga zastosowania dodatkowej podpory. Problem pojawia się wtedy, kiedy utylizacja roślin po sezonie jest skomplikowana ze względu na zanieczyszczenie odpadów zielonych pozostałościami tworzyw sztucznych. Na przykład, w Holandii wprowadzono specjalne cenniki dla utylizacji odpadów zawierających, np. zużyte akcesoria po uprawie roślin. Czyste odpady zielone to koszt ok. 30 euro za utylizację 1 Mg. Cena zostaje podwojona, kiedy odpady zawierają sznurki. Obecność sznurków i zapinek w odpadach zielonych powoduje, że ogrodnik zapłaci 125 euro za 1 Mg. Jeśli całkowita ilość odpadów ze szklarni wynosi od 30 do 50 Mg z 1 ha, to właściciel może zaoszczędzić od 1950 do 3250 euro/ha w przypadku jeśli zastosuje biodegradowalne materiały. Zależy to również od rodzaju uprawy. Na przykład, liczba użytych zapinek różni się znacznie w zależności od systemu uprawy. W przypadku pomidorów stosuje się znacznie więcej zapinek (nawet 25 na roślinę) niż w przypadku papryki i ogórka (Guerrini i in., 2017).

## **Doniczki**

Doniczki z tworzyw sztucznych i ceramiki coraz częściej są zastępowane włókninowymi opaskami, służącymi do hodowli sadzonek. Podstawą produkcji biodegradowalnych doniczek jest igłowana włóknina pochodzenia naturalnego, np. z lnu oraz opaski wzmocnione siatką włókninową. Zaletą stosowania takich materiałów jest całkowita degradacja bez potrzeby usuwania pozostałości i konieczności zagospodarowania odpadów. Rozwiązanie sprzyja również dobrej cyrkulacji powietrza i utrzymaniu prawidłowej wilgotności. Dzięki zastosowaniu odpowiedniej struktury, system korzeniowy nie ulega uszkodzeniom. Zmniejsza się także czas pracy oraz nakład finansowy (Biotworzywa, 2015).

Na przykład, na polskim rynku można znaleźć doniczki biodegradowalne wytworzone w ramach projektu „Lubuskie Eko-Doniczki”. Zaprezentowane na stronie producenta ComPot Sp. z o.o. (<https://compot.pl/home-pl/>) doniczki są produkowane, m.in. z kompostu komunalnego i surowców odpadowych. Na podstawie informacji podanej

przez producenta, doniczki rozkładają się w okresie od kilku do kilkunastu tygodni, a w konsekwencji dostarczają roślinie cennych minerałów do wzrostu.

### **Agrowłókniny**

Agrowłókniny stosowane są w rolnictwie i ogrodnictwie, m.in. do cieniowania, zwalczania chwastów czy przedłużania sezonu wegetacyjnego. Na rynku europejskim stosuje się przeważnie ściółki z agrowłókniny polipropylenowej, w mniejszym stopniu maty organiczne z włókien naturalnych (np. juta, kenaf, kokos, bawełna, sizal i inne naturalne materiały, takie jak: liść palmowy, drewno i bambus) (Guerrini i in., 2017).

Coraz częściej mówi się o zastosowaniu biodegradowalnych polimerów, takich jak kwas polimlekowy (PLA) lub mieszanki PLA z PHB (polihydroksymaślan) do produkcji agrowłóknin. Takim przykładem jest biowłóknina firmy 3M wyprodukowana z PLA. Wortman i in. (2015) przeprowadzili badania nad degradacją tego materiału w glebie podczas uprawy pomidorów i papryki. Ściółka z biowłókniny firmy 3M po całym okresie wegetacji nadal cechowała się trwałością. Ponadto, przyczyniła się do poprawy wilgotności gleby w ciągu całego sezonu o 3% w stosunku do nieosłoniętej gleby. Dodatkową zaletą zastosowania tego typu materiału do ściółkowania było ograniczenie wzrostu chwastów. Ściółki z biowłókniny nie przyczyniły się do zwiększenia plonów owoców pomidorów i papryki, jednakże zaobserwowano, że mogą być szczególnie przydatne w sytuacjach, w których podwyższenie temperatury gleby nie jest pożądane (np. w cieplejszym klimacie), ale ważne jest zachowanie wilgoci i zwalczanie chwastów. Istotną zaletą agrowłóknin jest możliwość kontrolowania temperatury gleby poprzez swobodne przenikanie wody do wewnątrz i jednoczesne parowanie w przypadku zbyt dużej wilgotności.

Agrowłókniny biodegradowalne z PLA były również produkowane oraz badane w ramach europejskiego projektu BIOGRATEX. Stwierdzono, że parametry techniczne nie odbiegają od parametrów dla agrowłóknin produkowanych z polipropylenu. Ponadto, PLA jest polimerem w pełni biodegradowalnym, a szybkość biodegradacji zależna jest między innymi od temperatury. Efektywny rozkład można uzyskać już w temperaturze powyżej 50°C (Borreani i in., 2007).

#### **2.4. Folie biodegradowalne w procesie ściółkowania**

Folie biodegradowalne po raz pierwszy zastosowano w latach 90. XX wieku jako alternatywa dla tradycyjnej folii do ściółkowania (Siwek i in., 2019). Szacuje się, że do



2023 r. globalna produkcja folii biodegradowalnych wzrosła do  $2,62 \times 10^6$  Mg (Chen i in., 2021). Podczas procesu ściółkowania folia przykrywa glebę wokół roślin w celu poprawy mikroklimatu sprzyjającego wzrostowi plonów, umożliwiając tym samym uprawę na gruntach, na których warunki wodne i środowiskowe są ograniczone. Woda wykorzystywana jest w sposób bardziej efektywny, co sprzyja wzrostowi roślin (Serrano-Ruiz i in., 2021).

Folie do ściółkowania stosuje się na powierzchni gleby, ale nie wprowadza do niej. Przygotowanie folii pod uprawę jest równoznaczne z wykonaniem serii nacięć zgodnie z geometrią sadzenia i charakterem rośliny. Roślina ma możliwość wzrostu w miejscu nacięcia, wówczas pozostała powierzchnia gleby jest pokryta folią ściółkującą. Brzegi folii są natomiast zakopane w ziemi. Wykorzystywane są różne techniki instalacji folii do ściółkowania przez rolników, które różnią się w zależności od lokalizacji. Najprostsza metoda opiera się na narzędziach manualnych, które coraz częściej są zastępowane urządzeniami mechanicznymi. Na małych obszarach upraw warzywnych niezmiennie stosuje się ręczne układanie folii, z kolei pola uprawne przykrywane są za pomocą urządzeń mechanicznych. Sprzęt do mechanicznej instalacji folii LDPE może być również wykorzystany do folii biodegradowalnej, przy czym wymaga dostosowania naprężenia w celu uzyskania optymalnej wydajności folii. Nadmierne napięcie podczas ich montażu może zwiększyć prawdopodobieństwo późniejszego rozerwania, z kolei luźno rozłożona folia stwarza ryzyko podatności na rozerwanie przez wiatr (Martin-Closas i in., 2017). Innowacyjne technologie wprowadzono między innymi w Chinach, gdzie wykorzystanie folii do ściółkowania jest największe. Na przykład, tamtejsi rolnicy łączą metodę ściółkowania z nawadnianiem kropelkowym (Shah i in., 2020).

W procesie ściółkowania w zależności od potrzeb stosuje się folie o różnych kolorach, grubościach i właściwościach mechanicznych. Do upraw krótkotrwałych z powodzeniem można wykorzystać cieńszą folię, gdzie uprawa nie będzie narażona na silne opady i erozję wietrzną. Z kolei folie o większej grubości są przeznaczone dla upraw o dłuższym okresie wzrostu, narażonych na silne opady i mocne wiatry (Shah i in., 2020). Kolor folii do ściółkowania wpływa na zdolność gleby do magazynowania wody, a tym samym wspomaga wzrost upraw i plonowanie. Wykorzystanie czarnej folii do procesu ściółkowania może być alternatywą dla folii przezroczystych ze względu na mniejszy wpływ na temperaturę gleby. Badaniem nad porównaniem folii czarnej i przezroczystej zajęli się He i in. (2021). Zaobserwowali, że wykorzystanie czarnej folii do ściółkowania prowadzi do większego wzrostu plonów i wyższych korzyści ekonomicznych niż

zastosowanie przezroczystej folii, zwłaszcza w przypadku kukurydzy i ziemniaków. Plon kukurydzy wzrósł o 6%, z kolei wartość rynkowa bulw ziemniaka wzrosła o 9%. Ponadto, folia czarna eliminuje konieczność stosowania herbicydów, co przekłada się na dodatkowe oszczędności. W rezultacie korzyści ekonomiczne netto wynikające z zastosowania czarnej folii były o 5–11 % większe niż w przypadku folii transparentnej stosowanej w produkcji roślinnej.

#### **2.4.1. Biodegradowalne folie do ściółkowania w cyklu uprawy roślin**

Podczas gdy fragmentacja i degradacja folii LDPE na glebach jest niezwykle powolnym procesem, który szacuje się na setki lat, wystarczy nawet kilka miesięcy aby biodegradowalne folie do ściółkowania uległy rozkładowi (Touchaleaume i in., 2018).

Na rozkład biodegradowalnych folii do ściółkowania ma wpływ szereg czynników. Klim i in. (2020) wskazują na następujące czynniki:

- warunki fizykochemiczne panujące w środowisku (w glebie), takie jak: zawartość wody, pH, dostępność tlenu i składników odżywczych, potencjał oksydoredukcyjny,
- właściwości materiału, takie jak: masa molowa, skład polimeru, temperatura zeszklenia i topnienia, krystaliczność polimeru, porowatość, grubość, rodzaje dodatków i napełniaczy,
- warunki mikrobiologiczne: aktywność mikrobiologiczna, różnorodność mikroorganizmów oraz gęstość populacji mikroorganizmów.

Wskazuje się również takie czynniki, jak: warunki klimatyczne, w szczególności opady, promieniowanie słoneczne, stosowanie chemicznych środków ochrony roślin, tempo wzrostu roślin czy wzrost chwastów.

Równoległe ze wzrostem roślin uprawnych rosną także chwasty, które często przyczyniają się do rozerwania folii ściółkującej. Do tego może dochodzić stres związany z trwającymi pracami podczas upraw oraz czynniki atmosferyczne (np. wiatr). Skutkiem jest zapoczątkowanie fragmentacji oraz pojawienie się coraz większej liczby pęknięć. Z upływem czasu, starzenie folii postępuje. Po zakończonym cyklu upraw najczęściej biodegradowalne folie zostają zaorane, a następnie ulegają biodegradacji w obecności mikroorganizmów glebowych. Makro, mikro i nanofragmenty folii w glebie w sposób ciągły uwalniają dodatki, monomery i produkty uboczne procesu biodegradacji, aż do

całkowitej mineralizacji do dwutlenku węgla i wody lub do metanu i wody w przypadku warunków beztlenowych (Siwek i in., 2019).

Proces biodegradacji obejmuje trzy główne etapy:

- (1) kolonizację powierzchni polimeru przez drobnoustroje, głównie bakterie i grzyby,
- (2) depolimeryzację przez enzymy mikroorganizmów zewnątrzkomórkowych (trawiące łańcuch polimerowy),
- (3) zużycie produktów hydrolizy przez mikroorganizmy.

Rozkład materiałów biodegradowalnych rozpoczyna się od hydrolizy łańcuchów polimerowych oraz zmniejszenia masy cząsteczkowej. Najpierw atakowane są słabsze wiązania przez enzymy trawienne mikroorganizmów, po czym powoli następuje obniżenie masy cząsteczkowej. Rozpoczyna się proces erozji powierzchniowej i masowej, pogarsza się stan przekroju poprzecznego materiału i w konsekwencji pęka główny łańcuch polimeru (Kliem i in., 2020, Serrano-Ruiz i in., 2021).

Efektywność procesu biodegradacji folii zależy przede wszystkim od:

- struktury fizycznej i chemicznej tworzywa sztucznego (w tym, porowatości i struktury materiału),
- rodzaju i jakości gleby,
- panującego klimatu, czyli środowiska w jakim przebiega biodegradacja (tj. wilgotność, pH, dostęp tlenu, temperatura, aktywność biologiczna mikroorganizmów oraz występujące zanieczyszczenia) (Sintim i in., 2020).

#### **2.4.2. Korzyści wynikające z zastosowania folii biodegradowalnej do procesu ściółkowania**

Zastosowanie folii do ściółkowania czy to z tworzyw sztucznych czy ulegających biodegradacji przynosi podobne korzyści, jeżeli chodzi o uprawę roślin. Do głównych korzyści należą:

- ochrona roślin przed niską temperaturą w pierwszej fazie rozwoju (Dreni, 2019),
- polepszenie wilgotności gleby oraz zapobieganie erozji poprzez ochronę przed opadami deszczu, gradem, silnymi wiatrami (Zhang i in., 2020),
- zwiększenie dostępności składników odżywczych wpływających na polepszenie plonowania poprzez ograniczenie wymywania, np. większa zawartość

- nieorganicznego azotu w glebie (Jiang i in., 2018); wzrost zawartości suchej masy kukurydzy (Zhang i in., 2020); większy wzrost plonów kukurydzy (Wang i in., 2016),
- polepszenie jakości produktów z powodu ograniczenia ryzyka wystąpienia chorób, np. zmniejszenie populacji szkodników owadzych bytujących na chwastach (Jiang i in., 2018),
  - poprawa wydajności upraw w wyniku utrzymania wilgotności w glebie i ograniczonemu parowaniu (Gao i in., 2020),
  - ochrona uprawy przed nasionami chwastów z pobliskich upraw, zwłaszcza zastosowanie czarnej folii może hamować kiełkowanie i wzrost chwastów poprzez słabą przepuszczalność światła,
  - zwalczanie chorób poprzez podwyższenie temperatury gleby (tj. niekorzystne warunki bytowe dla patogenów) jako metoda eliminująca konieczność wykorzystania środków chemicznych i specjalistycznego sprzętu, np. podczas fumigacji (Gao i in., 2019),
  - zwiększenie zawartości węgla organicznego w glebie oraz stosunku C:N w porównaniu z glebą nieściółkowaną (Zhang i in., 2019),
  - zwiększenie temperatury strefy korzeniowej, a także długości, średnicy oraz masy korzeni w porównaniu do gleby nie okrytej folią (np. w badaniach nad rzodkiewką) (Lee, 2020),
  - zwiększenie powierzchni liści, zawartości chlorofilu i suchej masy poprzez zastosowanie białej folii do ściółkowania (Gao i in., 2020),
  - możliwość zmniejszenia emisji do atmosfery niektórych gazów cieplarnianych, np. CO<sub>2</sub>.
  - zmniejszenie zapotrzebowania na nawozy i wodę (oszczędność dzięki efektywniejszemu procesowi nawadniania roślin bezpośrednio do strefy korzeniowej – nawet do 40% oszczędności wody zużywanej w produkcji roślinnej) (Zhang i in., 2017).

Pomimo licznych zalet wynikających z zastosowania tradycyjnych folii do ściółkowania, należy zaznaczyć, że zagospodarowanie folii odpadowej nadal stanowi wyzwanie. Rozwiązaniem problemu z utylizacją zużytej folii oraz rosnących ilości odpadów może być zastosowanie folii biodegradowalnej.

Główne korzyści, jakie niesie ze sobą zastosowanie folii biodegradowalnych, w przeciwieństwie do folii wyprodukowanych z konwencjonalnych tworzyw sztucznych w procesie ściółkowania, są następujące:

- możliwość pozostawienia folii biodegradowalnej po procesie ściółkowania w glebie, co pozwala ograniczyć powstawanie trudnych do zagospodarowania odpadów folii z tworzyw sztucznych,
- możliwość zagospodarowania odpadów z folii biodegradowalnych za pomocą kompostowania wraz z pozostałościami roślinnymi (Guerrini i in., 2017);
- niewielki wpływ zdegradowanej folii na jakość gleby (Sintim, 2018).

Warto wskazać na korzyści ekonomiczne ze stosowania biodegradowalnych folii do ściółkowania, które przede wszystkim obejmują zmniejszenia kosztów wynikających z wyeliminowania etapu zbioru folii, czyszczenia i utylizacji (Dentzman i in., 2020). Należy również podkreślić, że w przypadku biodegradowalnych folii do ściółkowania, które zawierają dodatki funkcjonalne, istnieje możliwość wzbogacenia gleby o cenne składniki odżywcze w wyniku rozkładu biodegradowalnych folii w glebie. Zaletą folii biodegradowalnych jest także możliwość wykorzystania ich do kontrolowanego uwalniania aktywnych substancji chemicznych podczas zabiegu nawożenia. W ten sposób można ograniczyć zużycie nawozów chemicznych. W strukturze polimeru umieszcza się środek czynny w postaci rozproszonej, rozpuszczonej bądź w postaci kapsułki, a następnie w wyniku dyfuzji, rozkładu chemicznego bądź biologicznego następuje jego uwalnianie. Innym sposobem może być rozerwanie wiązania polimer – czynnik aktywny. Najczęściej do tego procesu wykorzystuje się polimery naturalne, takie jak: skrobia, celuloza, lignina, kwas alginowy (Pirzada i in., 2020).

W foliach biodegradowalnych upatruje się również szansę na rozwiązanie problemu migracji tworzyw sztucznych do gleb rolniczych w kierunku systemów wodonośnych. Badacze przeanalizowali, że tworzywa sztuczne zmieniają zachowanie sorpcyjne pestycydów w glebach rolniczych i zwiększają ich transport do leżących poniżej systemów wód gruntowych. Uważa się, że mikroplastiki obecne w glebach rolniczych mogą stanowić poważne zagrożenie dla leżących poniżej warstw wodonośnych i zaopatrzenia w wodę pitną (Wanner, 2021). Wody gruntowe zasilają rzeki oraz są źródłem wody pitnej w studniach przydomowych, a jeśli wody te są źródłem zanieczyszczeń pestycydami i mikroplastikiem to stanowią zagrożenia dla ludzi i zwierząt. Należy nadmienić, że pestycydy powszechnie występują w glebach

rolniczych. W jednych z badań wykryto pozostałości pestycydów w 80% próbek gleby uprawnej (Silva i in., 2019).

### **2.4.3. Ograniczenia związane ze stosowaniem tworzyw biodegradowalnych**

Jednym z najczęściej wskazywanych ograniczeń stosowania materiałów biodegradowalnych w rolnictwie i ogrodnictwie może być wyższa cena w porównaniu do folii wytworzonych z tradycyjnych tworzyw sztucznych (EIP-AGRI Focus Group Final Report, 2021; Rosenboom i in., 2022). Innym, równie często wskazywanym ograniczeniem jest brak świadomości i wiedzy wśród osób stosujących różnego rodzaju folie do ściółkowania. Wynika to przede wszystkim z niedostatecznych informacji o produkcie podanych przez producenta, w szczególności sposobu zagospodarowania odpadów z biodegradowalnych folii do ściółkowania. Konsumenci, którzy nie posiadają wiedzy dotyczącej różnych rodzajów biotworzyw oraz nie zostaną poinformowani przez producenta materiału o odpowiednim sposobie utylizacji po zużyciu mogą mieć problem z prawidłową segregacją. Na przykład, odpady z biotworzyw zmieszane razem z tworzywami sztucznymi spowodują zanieczyszczenie partii odpadów (np. przeznaczonych do recyklingu). Z kolei zmieszanie tworzyw kompostowalnych z odpadami z tworzyw sztucznych, spowoduje ograniczenia w rozkładzie tych pierwszych (Ansink i in., 2022). Ograniczeniem w zastosowaniu folii do ściółkowania może być również wydłużony okres degradacji. Na przykład, folia z PLA wymaga temperatury 55–60° C do degradacji, której nie można osiągnąć w glebie po zakończeniu uprawy roślin. Utrudnienia mogą być spowodowane także brakiem obecności mikroorganizmów powodujących degradację na powierzchni gleby, zwłaszcza w latach suchych, oraz zależnością biodegradacji od określonych warunków.

Rosenboom i in. (2022) wskazali 5 wyzwań dla wprowadzenia do praktyki ogrodniczej biodegradowalnych folii do ściółkowania oraz akcesoriów (ang. „5Es”: economics, efficiency, end of life, ethics and education). Są to: (1) aspekty ekonomiczne – wyższa cena tworzyw biodegradowalnych, (2) efektywność – niższa efektywność energetyczna w produkcji tworzyw biodegradowalnych, (3) koniec cyklu życia produktu – nie ma jeszcze określonych zasad postępowania z odpadami z tworzyw biodegradowalnych, (4) aspekty etyczne – wykorzystanie do produkcji polimerów biodegradowalnych roślin jadalnych (produkcja biopolimerów konkurencją dla produkcji żywności), (5) edukacja – brak pełnych informacji o produkcie, sposobie jego użytkowania, a także zagospodarowania odpadów (brak jednolitego oznakowania produktów

biodegradowalnych i otrzymywanych z surowców odnawialnych, standardów i zaleceń, a także zabiegi tzw. „greenwashingu” stosowane przez producentów tworzyw).

## **2.5. Aspekty ekonomiczne związane z produkcją materiałów biodegradowalnych**

### **2.5.1. Biodegradowalne folie do ściółkowania**

Ceny rynkowe biodegradowalnych folii są wyższe niż ceny folii polietylenowych, co zmniejsza ich atrakcyjność ekonomiczną dla rolników i ogrodników w perspektywie krótkoterminowej (EIP-AGRI Focus Group Final Report, 2021; Rosenboom, i in., 2022). Koszty biodegradowalnych folii mogą być wyższe od kosztów folii polietylenowych od 25% do nawet 188% (Marí i in., 2019). W Stanach Zjednoczonych i w Europie oszacowano, że w 2019 roku cena zakupu folii ulegającej biodegradacji w glebie wyniosła 2-3 razy więcej niż w przypadku materiału polietylenowego (Sintim i in., 2021).

Cena tworzyw sztucznych na bazie paliw kopalnych waha się w zależności od cen ropy. Wraz ze wzrostem ceny ropy naftowej, koszt zakupu tworzywa sztucznego również jest wyższy. W ostatnich latach obserwuje się popyt na tworzywa sztuczne, a to wiąże się ze wzrostem cen. Średni koszt zakupu folii z popularnych tworzyw sztucznych w maju 2022 roku to 10,70 zł/kg za folię z LDPE i 10 zł/kg za folię z HDPE. W porównaniu do roku 2020, w którym folia z LDPE kosztowała 3,90 zł/kg, a z HDPE 3,95 zł/kg (Plastech, 2022).

Niejednokrotnie koszty zakupu tworzyw sztucznych mogą być zbliżone do cen biodegradowalnego tworzywa (np. PLA). W przypadku większości biotworzyw można zaobserwować bardziej stabilną sytuację, ponieważ ich produkcja nie jest uzależniona od zasobów ropy naftowej. W przyszłości przewiduje się, że ceny biotworzyw będą spadać, gdy ekonomia skali produkcji, konwersji na produkty i logistyki stanie się korzystniejsza. Przykładem może być biopochodny bursztynian polibutylenu (bio-PBS). Przewiduje się spadek ceny bio-PBS nawet o połowę z 4400 USD/Mg do 2700 USD/Mg (Peñas i in., 2022).

W tabeli 3 przedstawiono koszty zakupu wybranych rodzajów folii biodegradowalnej potrzebnej do ściółkowania powierzchni 1500 m<sup>2</sup>. Cena zakupu takiej samej wielkości folii polietylenowej waha się od ok. 50 do ok. 160 euro. Cena folii biodegradowalnej jest co najmniej o ok. 169 euro wyższa w porównaniu do najtańszej folii polietylenowej. Wyższa cena folii biodegradowalnej może być obniżona za pomocą dodatków, tzw.

napełniaczy, które zmniejszają udział polimerów biodegradowalnych w kompozycie. Do nich należą napełniacze mineralne, kreda, węgiel wapnia i inne.

Tabela 3. Koszt zakupu wybranych rodzajów folii biodegradowalnych do ściółkowania powierzchni 1500 m<sup>2</sup> (Othman i in., 2022).

Nazwa handlowa folii	Producent	Koszt (USD)	Koszt (EURO)*
Materi-Bi	Novamont	~350	~ 326
Sphere	Sphere Group Spain	~ 235	~ 219
Bioflex	FKuR	~ 280	~ 260

\*Kurs euro na dzień 02.06.2022 r.

Pomimo zwiększonych kosztów zakupu folii biodegradowalnych należy wziąć pod uwagę również inne czynniki, które mają wpływ na całkowity koszt użytkowania biodegradowalnych folii do ściółkowania, szczególnie dotyczące usuwania i zagospodarowania zużytych folii po procesie ściółkowania. Koszty związane z usuwaniem konwencjonalnych folii z pól oraz ich utylizacja są znaczne i mogą sięgać nawet 270–370 euro/hektar, do tego należy doliczyć koszty związane z zatrudnieniem pracownika 50 euro/dzień. W przypadku zastosowania na polach folii biodegradowalnej nie uwzględnia się powyższych kosztów. Zwiększony wydatek poniesiony na zakup folii biodegradowalnej może być bardzo zbliżony do wydatków związanych z utylizacją odpadów ze zużytej folii do ściółkowania otrzymanej z tworzyw sztucznych. Co więcej, wartością dodaną jest zmniejszenie zużycia paliw kopalnianych oraz redukcja emisji CO<sub>2</sub> w zakładach, które przetwarzają zasoby ropy naftowej (Guerrini i in., 2018; Siwek i in., 2019).

Cena zakupu folii to jeden z najwyższych kosztów, który należy ponieść podczas procesu ściółkowania. Do pozostałych kosztów należą, m.in. zakup innych materiałów (nasiona, nawozy, herbicydy, pestycydy i woda do irygacji), nakład pracy fizycznej (przygotowanie terenu, budowa redlin i bruzd, ściółkowanie folią, nawożenie, siew, opryskiwanie herbicydami i pestycydami, nawadnianie, zbieranie i usuwanie folii) oraz eksploatację maszyn (uprawa roli, zbiory i systemy irygacyjne). Nawet brak odpowiedniej maszyny do zbioru zużytej folii może skutkować rozproszaniem pozostałości i negatywnym wpływem na środowisko. Zastosowanie biodegradowalnej folii eliminuje część wydatków, które należałoby ponieść w przypadku zastosowania folii



z tworzywa sztucznego. Naukowcy coraz częściej zwracają uwagę, że korzyści ekonomiczne związane z oszczędnością wody i wzrostem wydajności plonowania mogą przewyższyć koszty związane z robocizną, produkcją i zakupem folii biodegradowalnej do ściółkowania. Problemem może być fakt, że folie biodegradowalne stanowią nowość na rynku dla wielu rolników. Brak świadomości w zakresie prawidłowego obchodzenia się z takimi materiałami po zużyciu może przynieść wiele szkód dla środowiska (EIP-AGRI Focus Group Final Report, 2021; Yao i in., 2017).

Oceną kosztów dla procesu ściółkowania zajęli się m.in. Marí i in. (2019). Podczas uprawy papryki w Hiszpanii uwzględniono w kosztorysie następujące etapy: nawadnianie, stosowanie herbicydów, zaprawianie chemiczne oraz cenę materiału i jego mechanicznego zainstalowania na polu (tabela 4). Z kolei kondycjonowanie podczas ściółkowania obejmowało koszt nawadniania i zbioru plonów, a w przypadku niebiodegradowalnej folii również zagospodarowanie odpadów oraz użycie kultywatora.

Tabela 4. Koszty związane ze ściółkowaniem podczas uprawy papryki (Marí i in., 2019).

Czynności		Koszt (euro/ha)	
Przygotowanie pola		1448	
Działania w sezonie		3931	
Ściółkowanie mechaniczne	PE	548	
	Ecovio®	649	
	Sphere®	916	
	Bioflex®	1075	
Ściółkowanie foliami biodegradowalnymi	Materi-Bi®	1308	
	Zbiory papryki		2340
	Kondycjonowanie niebiodegradowalnej folii do ściółkowania <sup>a</sup>	Brak gospodarki odpadami	408,5
Składowanie		418	
Recykling		424	
Kondycjonowanie biodegradowalnej folii do ściółkowania		232	

<sup>a</sup> Przy zużyciu tworzywa sztucznego w ilości 160 kg ha<sup>-1</sup>. Uwzględniono gospodarowanie tworzywami sztucznymi, czas transportu oraz koszty składowania i recyklingu.

Materiały biodegradowalne zakupione do ściółkowania stanowiły od 7,5% do 14,1% całkowitych kosztów poniesionych podczas procesu ściółkowania. Jak wyliczają naukowcy, zastosowanie folii ulegającej degradacji na polu pozwoliło zaoszczędzić od 54,7 do 56,7% kosztów podczas etapu kondycjonowania w porównaniu do folii polietylenowej.

Z zestawienia kosztów wynika, że w przypadku materiałów biodegradowalnych całkowity wydatek związany ze ściółkowaniem jest zaledwie od 2,2% do 9,3% wyższy, niż w przypadku zastosowania folii polietylenowej. Jedynym wyjątkiem jest folia Ecovio®, ponieważ koszt jej zakupu był porównywalny do konwencjonalnego tworzywa sztucznego.

Pomimo iż istnieje przekonanie, że materiały biodegradowalne są znacznie droższe od tradycyjnych otrzymywanych z ropopochodnych, należy wziąć pod uwagę koszty zagospodarowania odpadów oraz ich recykling, co jest kluczowe dla właściwej oceny ekonomicznej i wykazania opłacalności. W niektórych krajach, jak np. Hiszpania, można liczyć na dotacje rządowe w ramach działań prośrodowiskowych, które wspierają rolników w zakupie biodegradowalnych materiałów do ściółkowania. Biorąc pod uwagę powyższe dane dotyczące kosztów oraz dotacje z rządu hiszpańskiego można stwierdzić, że folie biodegradowalne Ecovio® i Sphere® są najbardziej opłacalną alternatywą dla folii PE (Marí i in., 2019).

### 2.5.2. Akcesoria przydatne w uprawie roślin

#### Zapinki

Na podstawie danych dostępnych na rynku w tabeli 5 umieszczono ceny zapinek wyprodukowanych z tradycyjnych tworzyw sztucznych, natomiast w tabeli 6 przedstawiono przykładowe ceny zapinek biodegradowalnych.

Tabela 5. Ceny zapinek wykonanych z tradycyjnych tworzyw sztucznych dostępnych na rynku (dane na dzień 01.04.2022).

SKLEP	CENA ZAKUPU	CENA PLN/1000 SZT
<a href="https://www.epnos.pl/">https://www.epnos.pl/</a>	7,99 zł/40 szt.	199,75
<a href="https://plant-place.com/">https://plant-place.com/</a>	9,50 zł/50 szt.	190,00
<a href="https://ogrodnik24.pl/">https://ogrodnik24.pl/</a>	6,99 zł/50 szt.	139,80
<a href="https://agrido.pl/">https://agrido.pl/</a>	9,00 zł/100szt	90,00
<a href="https://rolmarket.pl/">https://rolmarket.pl/</a>	62,99 zł/2000 szt.	32,00

Tabela 6. Ceny zapinek wykonanych z tworzyw biodegradowalnych dostępnych na rynku (dane na dzień 01.04.2022).

SKLEP	CENA ZAKUPU	CENA PLN/1000 SZT
<a href="https://sklep.swiatkwiatow.pl/">https://sklep.swiatkwiatow.pl/</a>	23,30 zł/50 szt.	466 zł
<a href="https://www.johnnyseeds.com/">https://www.johnnyseeds.com/</a>	44,20 USD/500 szt.	ok. 392 zł
<a href="https://www.farmersfriend.com/">https://www.farmersfriend.com/</a>	75 USD/1000 szt.	ok. 333 zł

\*Kurs USD na dzień 13.06.2022 r.

Według danych z tabeli 5, koszt zapinek z tworzyw sztucznych waha się od ok. 32 do ok. 200 zł za 1000 sztuk w zależności od jakości wykonanych akcesoriów (np. tworzywo z recyklingu). Z kolei koszt zakupu biodegradowalnych zapinek mieści się w zakresie od ok. 333 zł do ok. 466 zł.

Oprócz kosztów zakupu należy wziąć pod uwagę koszty związane z etapem biodegradacji zapinek z pozostałościami roślinnymi, a w przypadku zapinek z konwencjonalnych tworzyw sztucznych koszty: zbierania, odkażania, mycia z pozostałości roślin oraz utylizacji.

## Łuki

W tabeli 7. podano ceny zakupu 1000 sztuk łuków wyprodukowanych z konwencjonalnych tworzyw sztucznych. Nie przedstawiono cen zakupu łuków wyprodukowanych z tworzyw biodegradowalnych, ponieważ są trudno dostępne na rynku. Nie znaleziono ofert sprzedaży łuków biodegradowalnych w sklepach internetowych.

Tabela 7. Ceny łuków wykonanych z tradycyjnych tworzyw sztucznych dostępnych na rynku (dane na dzień 01.04.2022).

SKLEP	CENA ZAKUPU	CENA PLN/1000 SZT
<a href="https://www.gardenersedge.com/">https://www.gardenersedge.com/</a>	15,26 USD/250 szt.	ok. 271
<a href="https://ogrodnik24.pl/">https://ogrodnik24.pl/</a>	6,99 zł/50 szt.	ok. 140
<a href="https://duboisag.com/">https://duboisag.com/</a>	7,35USD/250 szt.	ok. 130
<a href="https://rolmarket.pl/">https://rolmarket.pl/</a>	45,99 zł/2000 szt.	ok. 23,00

\*Kurs USD na dzień 13.06.2022 r.

Koszt zakupu łuków wyprodukowanych z tradycyjnych tworzyw sztucznych waha się od ok. 23 zł do ok. 271 zł za 1000 szt.

## 2.6. Podsumowanie

Tworzywa sztuczne to powszechny materiał stosowany do produkcji folii do ściółkowania i innych akcesoriów do uprawy roślin. Zasoby naturalne wykorzystywane do ich produkcji są ograniczone pod względem ilościowym, a odpady powstałe po zużyciu trudne do zagospodarowania. Metody stosowane do zminimalizowania ilości odpadów z tworzyw sztucznych ograniczają się przede wszystkim do spalania z odzyskiem energii i recyklingu. Spalanie wiąże się z generowaniem zanieczyszczeń uwalnianych do atmosfery, z kolei recykling stawia wyzwania w zakresie identyfikacji tworzyw sztucznych, zbierania odpadów nadających się do recyklingu oraz sortowania.

Alternatywą dla tworzyw petrochemicznych są tworzywa biodegradowalne, które swoimi właściwościami nie odbiegają od konwencjonalnych tworzyw. Zastosowanie odpowiednich dodatków podczas procesu przetwórczego pozwala w znacznym stopniu polepszyć właściwości użytkowe biodegradowalnych materiałów. Największą zaletą jaką przypisuje się tworzywom biodegradowalnym to możliwość degradacji w określonym czasie. Ograniczeniem w zastosowaniu materiałów biodegradowalnych może być wysoka cena, choć przewiduje się, że w najbliższych latach koszty zakupu będą porównywalne do klasycznych tworzyw sztucznych.

Tworzywa biodegradowalne stają się również realną alternatywą dla tradycyjnych tworzyw sztucznych wykorzystywanych w ogrodnictwie i rolnictwie podczas uprawy roślin. Folia biodegradowalna stosowana podczas ściółkowania jest atrakcyjnym i ekologicznym rozwiązaniem, ponieważ może ulegać degradacji w glebie po okresie przydatności, a ponadto do środowiska nie są uwalniane pozostałości substancji toksycznych. Choć koszty zakupu folii biodegradowalnej są wyższe niż konwencjonalnej folii z tworzyw sztucznych, wydatki można zrównoważyć ograniczeniem kosztów związanych z usuwaniem biodegradowalnej folii z pól oraz utylizacją.

Nowe folie biodegradowalne o dodatkowych funkcjonalnościach są przedmiotem ciągłych badań naukowców ze względu na potencjał zastosowań rynkowych. Brakuje natomiast w literaturze danych dotyczących wpływu wybranych dodatków stosowanych do produkcji materiałów biodegradowalnych na glebę oraz rośliny, a także określenia możliwości zagospodarowania zużytych biodegradowalnych folii do ściółkowania czy innych akcesoriów do uprawy roślin za pomocą metodą kompostowania z innymi odpadami ulegającymi biodegradacji, jak np. pozostałościami roślinnymi z upraw.

### 3. CEL I ZAKRES PRACY

Głównym celem pracy była ocena możliwości zagospodarowania odpadów z tworzyw biodegradowalnych, tj. biodegradowalnych folii do ściółkowania i akcesoriów do uprawy roślin, za pomocą kompostowania wraz z pozostałościami roślinnymi.

W pracy podjęto próbę rozwiązania problemu powstawania i zagospodarowywania znacznych ilości odpadów z konwencjonalnych tworzyw sztucznych, tj. folii do ściółkowania i różnego rodzaju akcesoriów wykorzystanych podczas uprawy roślin, poprzez zastąpienie ich biodegradowalnymi alternatywami otrzymanymi z surowców odnawialnych. Biodegradowalne materiały charakteryzują się wysoką ceną w porównaniu do ich tradycyjnych odpowiedników. W pracy założono, że wykorzystanie wybranych napełniaczy do produkcji biodegradowalnych kompozytów może przyczynić się do obniżenia kosztów produkcji biodegradowalnych folii i akcesoriów, bez znacznego obniżenia właściwości mechanicznych tych materiałów.

W oparciu o aktualny stan wiedzy postawiono następujące tezy:

1. Wybrane materiały, takie jak biowęgiel otrzymany z biomasy drzewnej oraz węglan wapnia, mogą stanowić napełnienie biokompozytu do produkcji biodegradowalnych folii do ściółkowania i akcesoriów wykorzystywanych w uprawie roślin i nie wpłyną na pogorszenie właściwości mechanicznych otrzymanych kompozytów.
2. Odpady stanowiące zużytą folię do ściółkowania oraz akcesoria do uprawy roślin, takie jak zapinki i łuki podtrzymujące, mogą być skutecznie zagospodarowane za pomocą kompostowania.

Postawiono następujące pytania badawcze:

1. Jak wybrane napełniacze wykorzystane do produkcji biodegradowalnych folii do ściółkowania (węglan wapnia, sadza) i akcesoriów do uprawy roślin (biowęgiel) będą wpływały na ich właściwości?
2. Czy zużyte folie do ściółkowania oraz akcesoria do uprawy roślin mogą być zagospodarowane w procesie kompostowania razem z pozostałościami roślinnymi z uprawy pomidora zmieszany z pomiotem kurzym i słomą pszeniczną?

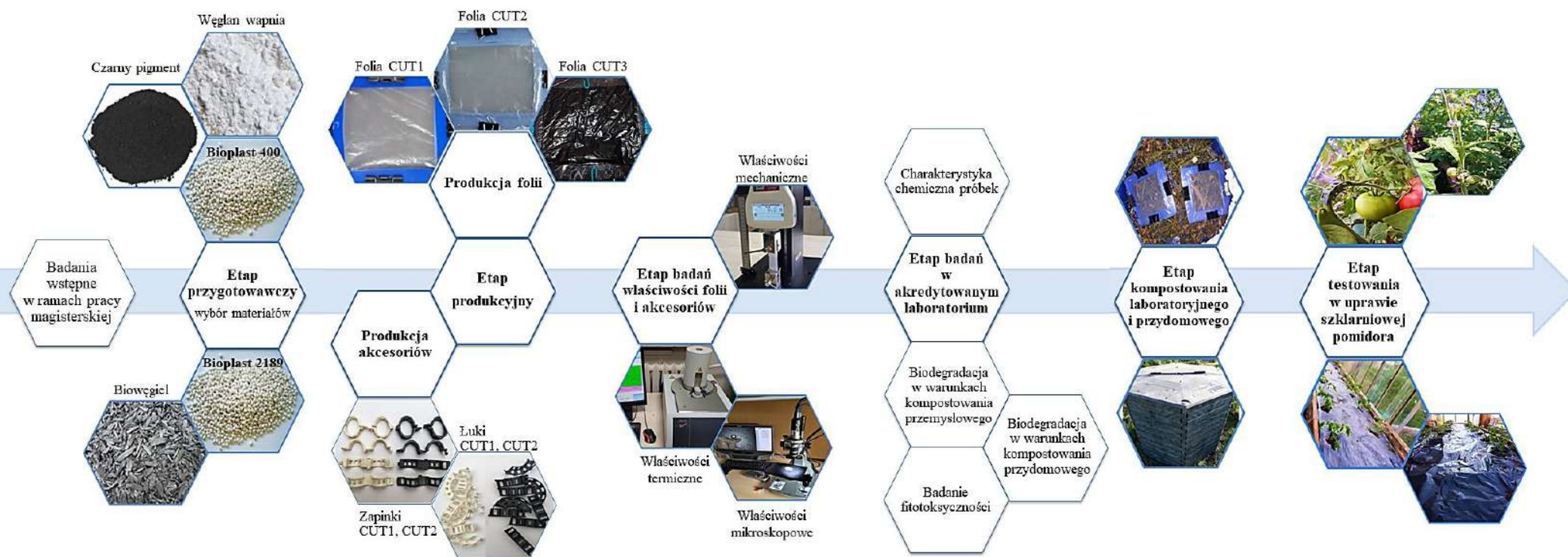
3. Czy pod względem ekonomicznym biodegradowalne folie do ściółkowania i akcesoria do uprawy roślin mogą być konkurencyjne dla dostępnych na rynku folii i akcesoriów z tworzyw sztucznych nie ulegających biodegradacji?

Aby znaleźć odpowiedzi na tak postawione pytania badawcze przyjęto następujący zakres pracy:

1. rozpoznanie aktualnego stanu wiedzy na podstawie przeglądu literaturowego,
2. opracowanie planu badań,
3. przygotowanie stanowisk badawczych,
4. realizacja badań:
  - produkcja folii biodegradowalnej,
  - produkcja biodegradowalnych akcesoriów do uprawy roślin,
  - badanie mechaniczne, termiczne i mikroskopowe próbek folii i akcesoriów biodegradowalnych,
  - kompostowanie laboratoryjne biodegradowalnych folii i akcesoriów w reaktorach laboratoryjnych,
  - badania biodegradacji w warunkach kompostowania przemysłowego oraz przydomowego folii i akcesoriów,
  - charakterystyka chemiczna próbek biodegradowalnych folii i akcesoriów oraz ocena ich fitotoksyczności,
  - kompostowanie przydomowe biodegradowalnych folii i akcesoriów wraz z pozostałościami roślinnymi,
  - testowanie biodegradowalnej folii i akcesoriów podczas uprawy pomidora w szklarni.
- 5) analiza i interpretacja otrzymanych wyników.

#### **4. CZĘŚĆ BADAWCZA**

Część badawcza – której schemat przedstawiono na rysunku 5 – obejmowała: (1) produkcję folii biodegradowalnej do ściółkowania w skali przemysłowej w firmie „Marma Polskie Folie” z Rzeszowa, (2) produkcję akcesoriów biodegradowalnych oraz badania właściwości mechanicznych, termicznych i strukturalnych folii oraz akcesoriów w laboratorium Katedry Technologii i Automatyzacji Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, (3) kompostowanie w reaktorach laboratoryjnych w laboratorium Katedry Sieci i Instalacji Sanitarnych Wydziału Infrastruktury i Środowiska, (4) badania biodegradowalności, kompostowalności i fitotoksyczności w Laboratorium Biodegradacji i Analiz Mikrobiologicznych w Sieci Badawczej Łukasiewicz – IBWCh, (5) kompostowanie przydomowe oraz testowanie biodegradowalnej folii i akcesoriów podczas uprawy szklarniowej w gospodarstwie ogrodniczym pod Częstochową.



Rysunek 5. Schemat części badawczej.





## 4.1. Materiały i metody

### 4.1.1. Charakterystyka materiałów wykorzystanych do produkcji folii biodegradowalnych

- **Polimery biodegradowalne**

Podstawowymi substratami do produkcji folii biodegradowalnych były granulaty firmy BIOTEC o nazwach BIOPLAST 400 Elite oraz BIOPLAST 400D. Są to polimery biodegradowalne wyprodukowane z odnawialnych surowców pochodzenia roślinnego.

**BIOPLAST 400 ELITE** to w pełni biodegradowalne i kompostowalne tworzywo termoplastyczne niezawierające plastyfikatorów. Materiał składa się wyłącznie z naturalnej skrobi ziemniaczanej i innych polimerów biopochodnych. Węgiel organiczny w składzie zawarty jest w ilości większej niż 40%. Materiały wyprodukowane na bazie tego surowca są biodegradowalne i kompostowalne zgodnie z normą EN 13432 oraz posiadają certyfikat „OK Compost HOME”.

**BIOPLAST 400D** to wolny od plastyfikatorów materiał termoplastyczny na bazie naturalnej skrobi ziemniaczanej (nie modyfikowanej genetycznie). BIOPLAST 400D zawiera 47% surowca odnawialnego, a udział węgla organicznego określany jest powyżej 40%. Elementy wyprodukowane na bazie tego polimeru są również biodegradowalne i kompostowalne zgodnie z EN 13432.

Szczegółowa charakterystyka obu tworzyw biodegradowalnych została zawarta na stronie producenta [/pl.biotec.de/](http://pl.biotec.de/).

- **Materiały pełniące rolę napelnacza w produkcji folii biodegradowalnych**

**WĘGLAN WAPNIA** pod nazwą handlową Oysterlean jest produktem końcowym powstałym w wyniku rafinacji łatwo dostępnego biomateriału odpadowego pochodzącego z muszli morskich ([www.capsandclosures.com.au/oysterlean/](http://www.capsandclosures.com.au/oysterlean/)). W wyniku tego procesu tworzy się biodnawialna żywica, która może stanowić dodatek do polimerów. Węglan wapnia jest składnikiem wielu nawozów wapniowych, które mają pozytywny wpływ na właściwości gleby, tj. strukturotwórcze, odkwaszające oraz poprawiające aktywność biologiczną. W wyniku rozkładu folii biodegradowalnej, związki wapniowe mogłyby również korzystanie wpływać na właściwości gleby.

Dodatek napelnacza może wpłynąć na:

- koszt produkcji folii biodegradowalnej,
- właściwości produktu finalnego,
- degradację folii.

**CZARNY PIGMENT** firmy Polyone o nazwie FDM 85911 BK BIO1 został użyty jako skoncentrowany dodatek, czyli tzw. przedmieszka do tworzywa w formie mikrosferycznej sadzy. Czarny pigment dodano do folii w celu oceny wpływu zabarwienia na proces ściółkowania.

**BIOWĘGIEL** ze ścinek drzewnych został zastosowany jako napelnacz podczas prób technologicznych produkcji folii.

#### **4.1.2. Charakterystyka materiałów wykorzystanych do produkcji akcesoriów biodegradowalnych**

- **Polimer biodegradowalny**

Akcesoria biodegradowalne zostały wyprodukowane z tworzywa biodegradowalnego **BIOPLAST GS2189** firmy BIOTEC. Dodatkowo, zastosowano napelnacz w postaci biowęgla w celu obniżenia kosztów produkcji akcesoriów ogrodniczych oraz określenia wpływu tego dodatku na właściwości i degradację materiałów biodegradowalnych.

**BIOPLAST GS2189** to termoplastyczny materiał bez dodatku plastyfikatorów o pochodzeniu biologicznym. Występuje w postaci granulatu o białym zabarwieniu. Składa się w 69% z węgla organicznego oraz 75% z surowców odnawialnych, tj. PLA i skrobi ziemniaczanej. Biopolimer ten łatwo poddaje się formowaniu z powodu wysokiego wskaźnika szybkości płynięcia (MFR 35g/10 min), co ma istotne znaczenie dla przetwarzania i produkcji biodegradowalnych tworzyw. **BIOPLAST** cechuje się trwałością, a jednocześnie podatnością na biodegradację w warunkach przemysłowego kompostowania zgodnie z normą EN 13432. Szybkość biodegradacji zależy od grubości materiału. Firma BIOTEC uzyskała na swój produkt certyfikat „OK kompost”, a także została zarejestrowana przez VINCOTTE zgodnie z powyższą normą.

- **Dodatek pełniący rolę napelnacza w produkcji akcesoriów biodegradowalnych**

**BIOWĘGIEL** może być stosowany w przetwórstwie tworzyw sztucznych jako napelniacz lub pigment. Do badań został wykorzystany biowęgiel pochodzący ze ścinek drzewnych, zakupiony od komercyjnego dostawcy. Właściwości biowęgla zostały przedstawione w tabeli 9.

Tabela 9. Właściwości biowęgla ze ścinek drzewnych.

	<b>Biowęgiel ze ścinek drzewnych</b>
Wilgotność [%]	5,25
pH	7,4
Zawartość popiołu [%]	4,13
Przewodność [ $\mu$ S/cm]	169 $\pm$ 15
Węgiel całkowity [%]	81,4 $\pm$ 3,4
Całkowity węgiel organiczny [%]	75,3 $\pm$ 7,2
Wartość opałowa [kJ/kg]	29780

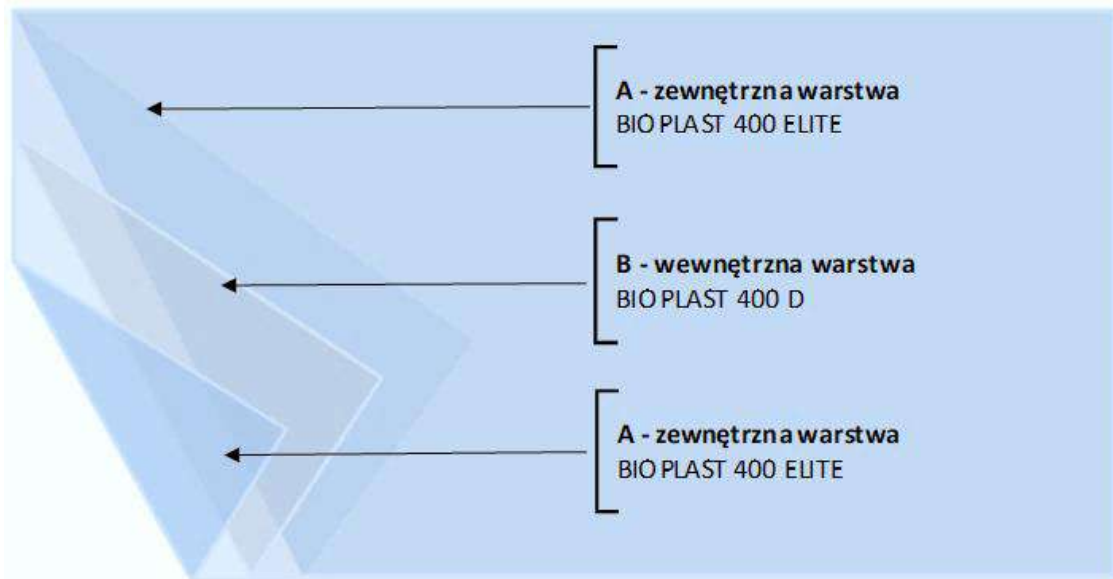
#### 4.2. Produkcja folii biodegradowalnych

Folia biodegradowalna została wyprodukowana za pomocą technologii ekstruzji. Właściwą produkcję folii poprzedzono próbami produkcyjnymi z wykorzystaniem linii technologicznej w skali przemysłowej, udostępnionej przez jednego z czołowych producentów materiałów opakowaniowych – „Marma Polskie Folie” z Rzeszowa ([www.marma.com.pl](http://www.marma.com.pl)).

Opracowana folia biodegradowalna jest innowacyjna ze względu na trójwarstwową strukturę folii oraz zastosowane dodatki. Sama struktura folii została objęta zgłoszeniem patentowym (numer: P.436213 Folia warstwowa biodegradowalna; P.436214 Wielowarstwowa folia biodegradowalna) w dniu 03.12.2020r. w Urzędzie Patentowym RP.

Innowacją w produkcji folii było użycie trzech warstw biodegradowalnego materiału, które przedstawiono na rysunku 6. W składzie znalazł się BIOPLAST 400D budujący warstwę wewnętrzną (około 60% grubości folii) oraz BIOPLAST 400 ELITE

w warstwach zewnętrznych stanowiących 40% grubości folii. Warstwy zewnętrzne A zwiększają wytrzymałość folii, a tym samym wydłużają czas procesu degradacji, natomiast wewnętrzna warstwa B jest bardziej podatna na rozkład i jednocześnie stwarza możliwość zaaplikowania różnych dodatków i napełniaczy mineralnych. Zawarte substancje w warstwie będącej nośnikiem mogą wpływać korzystnie na jakość gleby, postęp biodegradacji produktu końcowego, jak i również spowodować obniżenie kosztów produkcji folii.



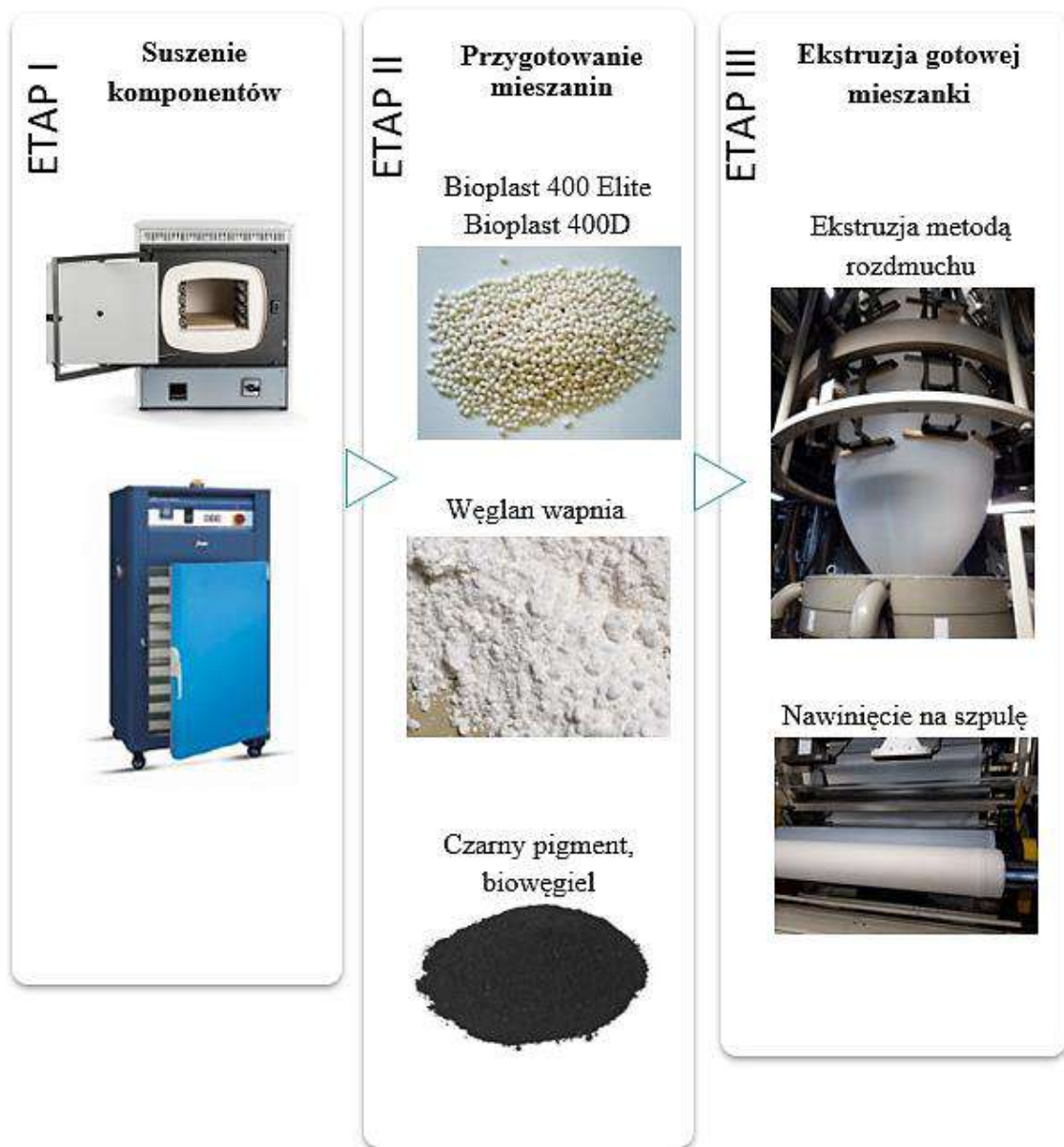
Rysunek 6. Struktura warstwowa folii biodegradowalnej.

Proces produkcji folii składał się z 3 etapów przedstawionych na rysunku 7. W pierwszej kolejności przygotowano komponenty do produkcji folii. Granulat biodegradowalny z powodu właściwości hydrofilnych należało suszyć przez 2 godziny w temperaturze 60°C. Po przeprowadzonej obróbce przetransportowano granulat do ekstrudera. Wykonano proces ekstruzji folii metodą wytłaczania z rozdmuchem dla trzech różnych mieszanin:

- polimeru biodegradowalnego,
- polimeru biodegradowalnego z 20% dodatkiem węgla wapnia (stosunek wagowy),
- polimeru biodegradowalnego z 5% dodatkiem czarnego pigmentu (stosunek wagowy).

Ekstruzja przeprowadzona została w urządzeniu przemysłowym o wydajności 100 kg/h w temperaturze 180°C. Po wytłoczeniu rękawa foliowego, wykonano rozcięcie wzdłużne,

a następnie nawinięto materiał na szpulę. Uzyskano gładką folię z równomiernie rozproszonymi składnikami. Nie zaobserwowano pęknięć oraz innych wad.






Rysunek 7. Etapy procesu produkcji folii biodegradowalnej.

#### 4.2.1. Folie biodegradowalne CUT

Wyprodukowane folie oznaczone jako CUT zestawiono w tabeli 10. Folie biodegradowalne CUT różnią się grubością oraz rodzajem zastosowanego napełnienia. Z uwagi na trudności podczas procesu przetwarzania, nie udało się wyprodukować folii z dodatkiem biowęgla.

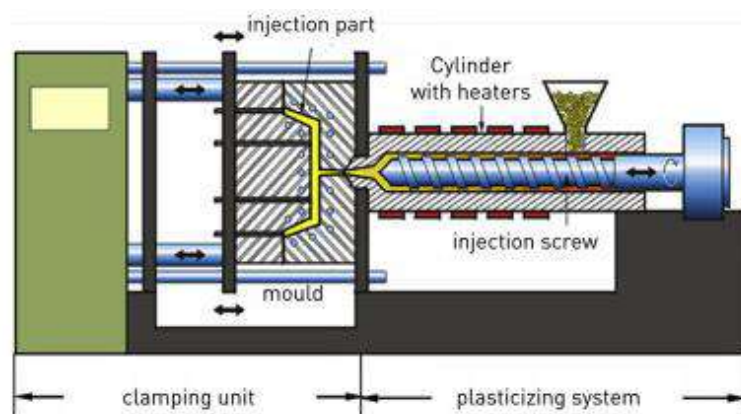
Tabela 10. Folie biodegradowalne CUT.

Oznaczenie	Zdjęcie	Struktura	Dodatek	Grubość [μm]
CUT1			-	30
CUT2		2 warstwy zewnętrzne A tzw. ochronne (Bioplast 400 Elite)  1 warstwa wewnętrzna B (Bioplast 400D)	Węglan wapnia (CaCO <sub>3</sub> ) 20% (masowo)	25
CUT3			Czarny pigment 5% (masowo)	40

#### 4.3. Produkcja akcesoriów biodegradowalnych przydatnych w uprawie roślin

Produkcja akcesoriów do uprawy roślin – łuków i zapinek biodegradowalnych – została przeprowadzona w laboratorium Katedry Technologii i Automatyk Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki na Politechnice Częstochowskiej. Łuki oraz

zapinki biodegradowalne zostały wykonane technologią formowania wtryskowego w urządzeniu firmy Krauss Maffei KM65 C3 ze sterowaniem komputerowym (rys.8).



Rysunek 8. Wtryskarka firmy Krauss Maffei KM65 C3.

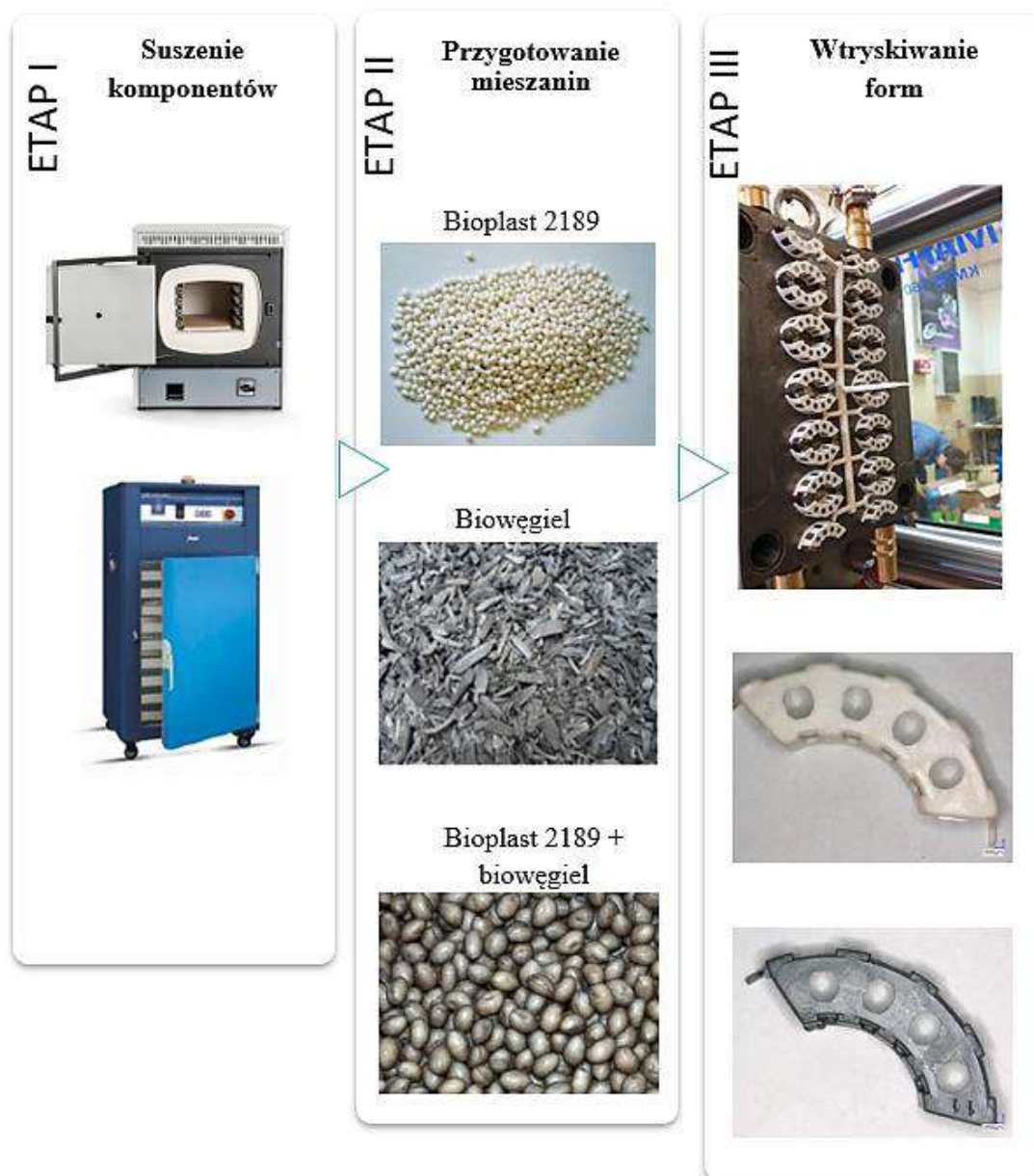
#### 4.3.1. Przygotowanie komponentów do procesu wtryskiwania

Przed rozpoczęciem procesu wtryskiwania biowęgiel rozdrobnilo za pomocą wysokoobrotowego młyna jednowałowego, a następnie przesiano przez sito o średnicy oczek 1,5 mm. Następnie wysuszono substrat w celu lepszego przetwarzania w procesie przetwórczym. Granulat suszono w temperaturze 60°C przez 2 godziny w suszarce laboratoryjnej CD9 firmy Shini, a biowęgiel w 95°C w czasie 3 godzin w suszarce SNOL LSM01. Tak przygotowane substraty zostały zaaplikowane do urządzenia wtryskującego.



### 4.3.2. Produkcja łuków biodegradowalnych

Pierwsze próby obejmowały produkcję łuków biodegradowalnych z czystego granulatu Bioplast 2189. W drugim etapie wtryskiwano polimer Bioplast 2189 z dodatkiem biowęgla zmieszanych w stosunku objętościowym 95:5. Proces formowania wtryskowego prowadzono w temperaturze 190°C z wykorzystaniem formy wtryskowej z 24 gniazdami (rys. 9).



Rysunek 9. Etapy procesu produkcji łuków biodegradowalnych.

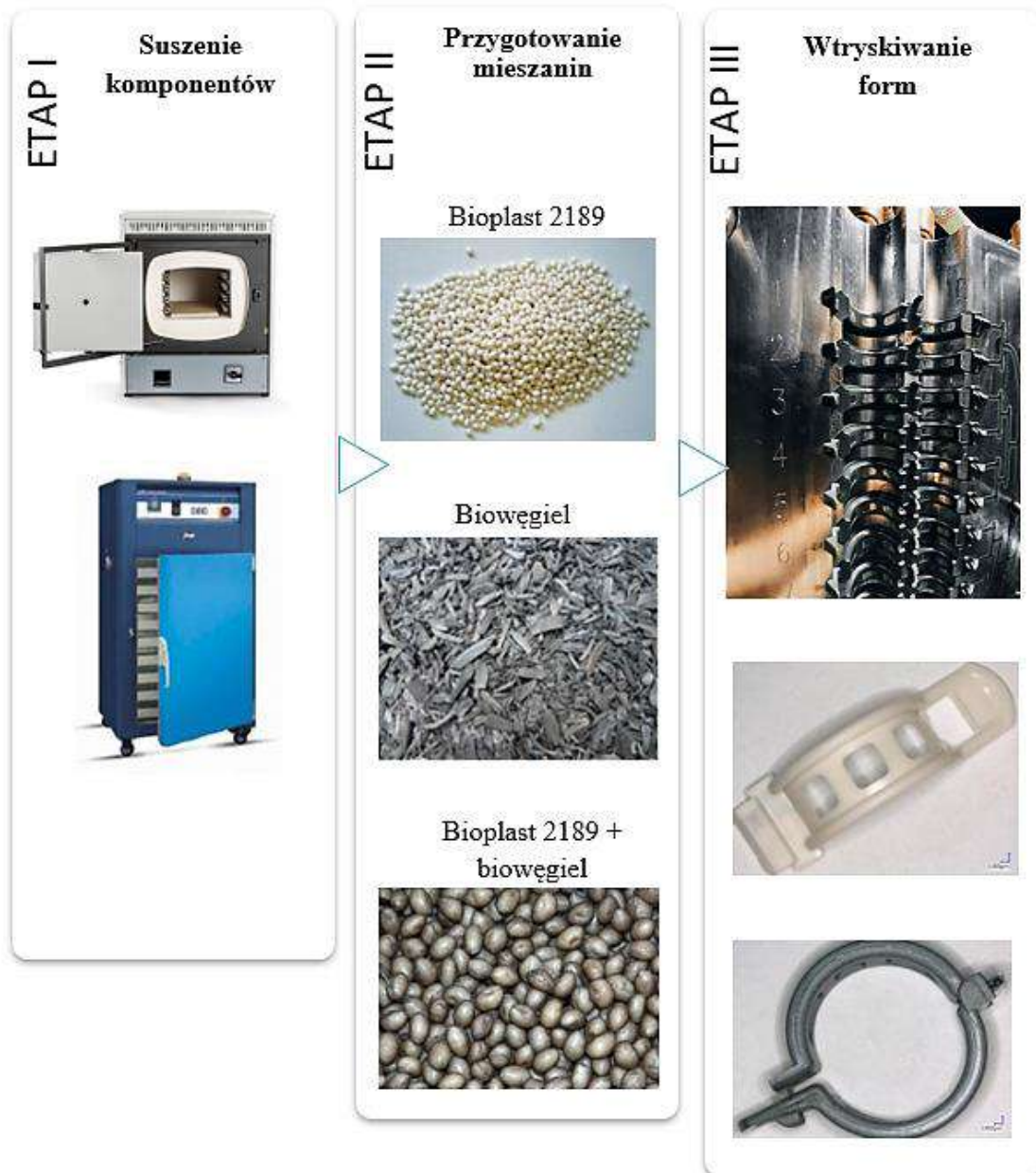
W wyniku procesu produkcyjnego powstały dwa rodzaje łuków biodegradowalnych (tabela 11).

Tabela 11. Łuki biodegradowalne CUT.

Oznaczenie	Zdjęcia	Skład	Dodatek
CUT1		Bioplast GS2189	-
CUT2		Bioplast GS2189	Biowęgiel 1% (masowo) 5% (obj.)

#### 4.3.3. Produkcja zapinek biodegradowalnych

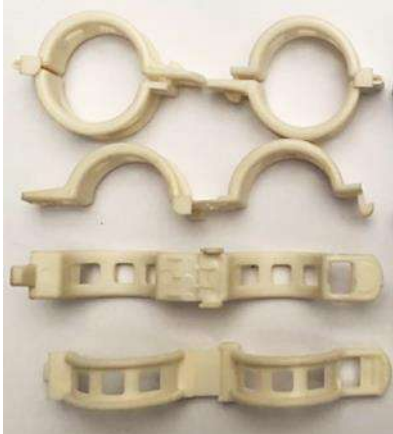

Substratem do produkcji zapinek biodegradowalnych było tworzywo biodegradowalne BIOPLAST 2189. Podobnie jak podczas produkcji łuków, substraty wysuszono, a następnie zaaplikowano do wtryskarki firmy Krauss Maffei KM65 C3. Pierwsze próby wykonane były z czystego granulatu biodegradowalnego, natomiast kolejne próby z dodatkiem biowęglu pochodzącego ze ścinek drzewnych w proporcjach 95:5 (% objętościowo). Formowanie wtryskowe mieszaniny prowadzono w temperaturze 190°C z wykorzystaniem specjalistycznej formy wtryskowej.



Rysunek 10. Etapy procesu produkcji zapinek biodegradowalnych.

W wyniku procesu produkcyjnego powstały dwa rodzaje zapinek biodegradowalnych (tabela 12).

Tabela 12. Zapinki biodegradowalne CUT.

Oznaczenie	Zdjęcia	Skład	Dodatek
CUT1		Bioplast GS2189	-
CUT2		Bioplast GS2189	Biowęgiel 1% (masowo) 5% (obj.)

#### 4.3.4. Koszty produkcji folii i akcesoriów biodegradowalnych

Na podstawie danych od producentów surowców oraz wytwórców tworzyw podjęto próbę określenia kosztów produkcji folii oraz akcesoriów biodegradowalnych. Pozostałe koszty dotyczące produkcji akcesoriów, tj. zapotrzebowanie na tworzywo, koszt pracy maszyny oraz koszty stałe oszacowano na podstawie licznych prób wykonanych na maszynie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki. Koszt zakupu biowęgla opierał się na danych literaturowych, ponieważ substrat uzyskano nieodpłatnie od firmy FLUID SA z przeznaczeniem do celów badawczych. Średnia cena rynkowa biowęgla waha się od 600 do 1300 USD za tonę (Thengane i in., 2021), czyli 2,50 zł – 5,46 zł za kilogram (kurs USD na dzień 02.04.2022). W wyliczeniach uwzględniono maksymalną cenę zakupu biowęgla tj. 5,46 zł/kg.

- Folie biodegradowalne

Dane dotyczące szacowanych kosztów produkcji folii biodegradowalnej przedstawiono w tabeli 13. Określono zapotrzebowanie na folię o powierzchni 132 m<sup>2</sup> do ściółkowania, przydatną podczas uprawy roślin na czterech zagonach w szklarni o standardowych wymiarach 31 x 6 m.

Tabela 13. Szacowany koszt produkcji folii biodegradowalnej CUT2 i CUT3 potrzebnej do pokrycia powierzchni 132 m<sup>2</sup> gleby.

	<b>Folia CUT2</b>	<b>Folia CUT3</b>
Koszt zakupu surowców [zł/kg]		
• tworzywo biodegradowalne 22 zł/kg	17,6	20,9
• 20% napelniazcz: węglan wapnia 2 zł/kg	0,4	-
• 5% napelniazcz: sadza 8 zł/kg	-	0,4
Średni koszt pracy maszyny [zł/kg]	3	3
Masa folii o powierzchni 1 m <sup>2</sup> [g]	52	55
Zapotrzebowanie na folię do pokrycia 4 grządek w standardowej szklarni [m <sup>2</sup> ]	132	132
Masa folii o powierzchni 132 m <sup>2</sup> [kg]	132 x 52 = 6,86	132 x 55 = 7,26
<b>Ogólny koszt produkcji folii w celu pokrycia gleby w szklarni [zł]</b>	(18 + 3) x 6,86 = <b>~ 144,00</b>	(21,3 + 3) x 7,26 = <b>~ 176,40</b>
<b>Ogólny koszt produkcji folii bez zastosowanych napelniazczy</b>	(22+3) x 6,86 = <b>~ 171,50</b>	(22+3) x 7,26 = <b>~ 181,50</b>

Szacunkowy koszt produkcji folii biodegradowalnej potrzebnej do ściółkowania gleby w szklarni o powierzchni 132 m<sup>2</sup> wynosi około 144 zł dla CUT2 oraz 176 zł dla CUT3. W wyniku zastosowania napelniazczy do folii możliwe było obniżenie kosztów produkcji folii CUT2 z napełnieniem 20% węglanu wapnia o 27,50 zł, a folii CUT3 z napełnieniem 5% sadzy o 5,10 zł.

Jeśli zużyta folia biodegradowalna pozostanie na glebie po uprawie roślin i będzie w niej degradować, to można uniknąć kosztów związanych ze zbieraniem folii z grządek, kosztów transportu odpadu oraz samej utylizacji. W przypadku zagospodarowania folii

po zużyciu we własnym zakresie, np. w wyniku kompostowania, dodatkowe koszty będą obejmowały wyłącznie zbiór folii odpadowej z gleby.

- Zapinki i łuki biodegradowalne

Zastosowano przeliczenie na 1000 sztuk akcesoriów biodegradowalnych. Do wyprodukowania łuków i zapinek biodegradowalnych zaaplikowano większą ilość substratu z powodu możliwości powstania odpadu w formie wtryskowej. Godzinowa wydajność maszyny została określona na poziomie ok. 2880 sztuk, biorąc pod uwagę 30-sekundowy cykl wtryskiwania 24 sztuk akcesoriów jednocześnie. Na koszt produkcji akcesoriów składały się: cena tworzywa oraz napełniacza, koszt pracy maszyny oraz koszty stałe. W tabelkach 14 i 15 dokonano zestawienia orientacyjnych kosztów produkcyjnych dla akcesoriów CUT1 oraz CUT2.

Tabela 14. Szacowane koszty produkcji łuków i zapinek biodegradowalnych (CUT1) w przeliczeniu na 1000 sztuk.

<b>Rodzaj materiału</b>	<b>Łuki biodegradowalne</b>	<b>Zapinki biodegradowalne</b>
Średnia masa pojedynczego elementu [g]	0,90	2,22
Zapotrzebowanie na tworzywo [kg]	1,5	2,5
Cena tworzywa 20 zł/kg [zł]	30	50
Koszt pracy maszyny 90 zł/h [zł]	32	32
Koszty stałe (pakowanie i suszenie tworzywa przed procesem) [zł]	10	10
<b>Ogólny koszt produkcji dla akcesoriów CUT1 w przeliczeniu na 1000 szt. [zł]</b>	<b>72</b>	<b>92</b>
<b>Ogólny koszt produkcji dla akcesoriów CUT1 w przeliczeniu na 100 000 szt. [zł]</b>	<b>7200</b>	<b>9200</b>
<b>Ogólny koszt produkcji dla akcesoriów CUT1 w przeliczeniu na 1 szt. [zł]</b>	<b>0,072</b>	<b>0,092</b>

Tabela 15. Szacowane koszty produkcji łuków i zapinek biodegradowalnych z dodatkiem biowęgla (CUT2) w przeliczeniu na 1000 sztuk.

Rodzaj materiału	Łuki biodegradowalne	Zapinki biodegradowalne
Średnia masa pojedynczego elementu [g]	0,90	2,22
Zapotrzebowanie na tworzywo [kg]	1,485	2,475
Zapotrzebowanie na biowęgiel [kg]	0,015	0,025
Cena tworzywa 20 zł/kg [zł]	29,7	49,5
Cena biowęgla 5,46 zł/kg [zł]	0,082	0,136
Koszt pracy maszyny 90 zł/h [zł]	32	32
Koszty stałe (pakowanie i suszenie tworzywa przed procesem) [zł]	10	10
<b>Ogólny koszt produkcji dla akcesoriów CUT2 w przeliczeniu na 1000 szt. [zł]</b>	<b>71,782</b>	<b>91,636</b>
<b>Ogólny koszt produkcji dla akcesoriów CUT2 w przeliczeniu na 100 000 szt. [zł]</b>	<b>7 178,20</b>	<b>9 163,60</b>
<b>Ogólny koszt produkcji dla akcesoriów CUT2 w przeliczeniu na 1 szt. [zł]</b>	<b>0,0718</b>	<b>0,0916</b>

Koszt wyprodukowania zapinek biodegradowalnych CUT1 (92 zł/1000 szt.) okazał się być konkurencyjny w stosunku do ceny zakupu akcesoriów dostępnych w sklepie (tabela 6), dla porównania najniższa cena za 1000 szt. to ok. 333 zł. Z kolei cena wytworzenia łuków biodegradowalnych wyniosła 72 zł/1000 szt. Ponieważ na rynku nie ma dostępnych biodegradowalnych łuków, należy zaznaczyć, że koszt wyprodukowania łuków CUT był w kilku przypadkach niższy niż cena zakupu łuków z tradycyjnych tworzyw sztucznych. Dla porównania, cena za 1000 szt. łuków z konwencjonalnego tworzywa to 23 – 271 zł (tabela 7). Biorąc pod uwagę koszty marży, podatku oraz marketingu, akcesoria biodegradowalne wydają się być konkurencyjne pod względem ceny zakupu.

Cena wyprodukowania akcesoriów biodegradowalnych z dodatkiem biowęgla CUT2 była nieznacznie niższa (1 gr/szt.) ze względu na śladową zawartość napelnacza (1%). Dodatek biowęgla nie wpłynął znacząco na obniżenie ceny. Niższy koszt wytwarzania akcesoriów będzie zauważalny w przypadku produkcji na skalę przemysłową lub poprzez

zastosowanie napełnienia w większej ilości. Na przykład, podczas produkcji 100 000 sztuk akcesoriów oszczędność z tytułu zaaplikowania biowęgla w ilości 1% do polimeru wyniosłaby ponad 36 zł dla zapinek, a w przypadku łuków – 22 zł.

Kierunkiem dalszych badań może być zastosowanie większej ilości biowęglowego napełniacza w gotowym produkcie. Pudelko i in. (2021) zastosowali napełnianie biowęglowe w ilości 10% oraz 20% do polimeru biodegradowalnego Bioplast 2189 w laboratoryjnie otrzymanych biokompozytach w postaci kształtek.



## 5. METODYKA BADAŃ

### 5.1. Metodyka badań właściwości mechanicznych, termicznych oraz strukturalnych materiałów biodegradowalnych

#### 5.1.1. Wytrzymałość mechaniczna folii CUT na rozciąganie

Jedną z cech określających właściwości tworzyw sztucznych jest wytrzymałość mechaniczna. Jest ona określana jako właściwość materiału świadcząca o odporności na obciążenia, czyli przeciwdziałania zerwaniom pod wpływem naprężenia mechanicznego. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1:2020. Do oceny właściwości wytrzymałościowych zastosowano maszynę wytrzymałościową Inspekt Desk 20 firmy Hegewald und Peshke, wyposażoną w czujnik cyfrowy siły zamontowany na uchwycie (rys. 11). Analizie poddano folie biodegradowalne CUT1, CUT2 oraz CUT3, a także dla porównania komercyjną czarną folię z tworzywa sztucznego zakupioną w sklepie ogrodniczym. W celu wykonania analiz przygotowano paski folii o wymiarach 22 mm szerokości i 200 mm długości. Próbki zamocowano w uchwytach, a następnie ustawiono parametry w programie w celu osiowego rozciągnięcia próbek.



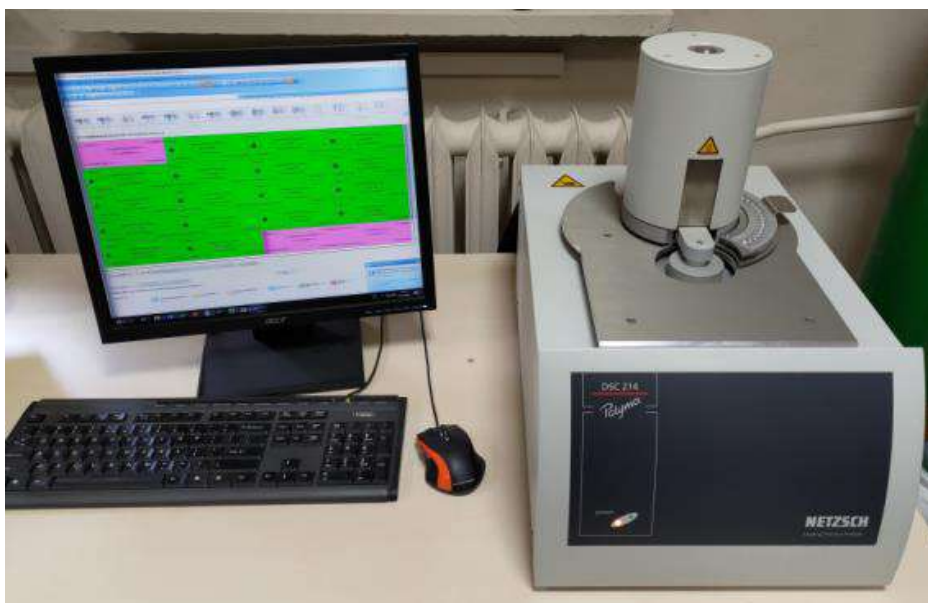
Rysunek 11. Maszyna wytrzymałościowa Inspekt Desk 20 firmy Hegewald und Peshke.

W badaniach określono maksymalną wartość siły podczas statycznej próby rozciągania, wartość maksymalnego naprężenia oraz wydłużenia przy zerwaniu.

### 5.1.2. Badania termiczne folii i akcesoriów biodegradowalnych

Analiza termiczna tworzyw sztucznych została wykonana za pomocą techniki termoanalitycznej DSC (ang. Differential Scanning Calorimetry), czyli różnicowej kalorymetrii skaningowej zgodnie z PN-EN ISO 11357-2:2020. Badanie to umożliwia określenie przemian właściwości fizycznych badanych próbek na skutek zmiany temperatury. Następuje bezpośredni pomiar ciepła pochłanianego lub wydzielanego przez substancję w momencie jej ogrzewania bądź chłodzenia. Wykresy z krzywą DSC to zobrazowanie piku topnienia i piku krystalizacji tj. wyznaczenie procesu pobierania ciepła (reakcja endotermiczna) i wydzielania ciepła (egzotermiczna) (Kane i in., 2022).

Do badań wykorzystano urządzenie typu HEAT-FLUX DSC, POLYMA 214 firmy NETZSCH (rys. 12). We wnętrzu zamocowano tygle aluminiowe w celu wykonania pomiarów.



Rysunek 12. Stanowisko badawcze do analizy termicznej: urządzenie DSC POLYMA 214 firmy NETZSCH.

Analiza składała się z następujących czynności:

- kondycjonowanie próbek materiałów przez 24h w temperaturze  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ,
- wycięcie materiału (próbki folii lub akcesoriów) oraz zważenie za pomocą wagi mikroanalitycznej masy nieprzekraczającej kilkunastu miligramów,

- umieszczenie materiału w tygielku i zamontowanie do części pomiarowej (tygielki ustawia się na sensorze, który rejestruje przemiany temperatury oraz strumień ciepła),
- zamknięcie komory pomiarowej oraz ustawienie zakresu przebiegu badań, programu zmiany temperatury (układ pomiarowy H-C-H) i szybkości tej zmiany.

Rozpoczęcie pomiaru jest równoznaczne z kontrolowaniem samoistnym zmiany temperatury. Pomiar strumienia ciepła pobranego lub wydzielonego w momencie chłodzenia bądź ogrzewania są zobrazowane na wykresie jako różnica temperatury pomiędzy źródłem ciepła, próbką a referencyjną próbką odniesienia.

### 5.1.3. Analiza mikroskopowa

Ocena struktury folii oraz akcesoriów przed procesem kompostowania, jak i po jego zakończeniu, została wykonana przy użyciu elektronicznego mikroskopu optycznego KEYENCE VHX 900 F, wyposażonego w obiektyw o odległości roboczej 10x oraz 50x (rys. 13).



Rysunek 13. Elektroniczny mikroskop optyczny KEYENCE VHX 900 F.

## **5.2. Analiza chemiczna oraz badania biodegradowalności, kompostowalności i fitotoksyczności**

Analizę chemiczną, badania biodegradowalności, kompostowalności i fitotoksyczności przeprowadzono w akredytowanym Laboratorium Biodegradacji i Analiz Mikrobiologicznych, Sieci Badawczej Łukasiewicza - IBWCh (Certyfikat akredytacji AB 388).

Do tych badań wybrano jeden rodzaj folii – CUT3 (ok. 400 g) oraz jeden rodzaj akcesoriów do uprawy roślin – zapinki z napełnieniem biowęglowym CUT2 (10 sztuk). Wybór ten był podyktowany tym, że w perspektywie czasowej planowane są działania zmierzające do komercjalizacji biodegradowalnej folii CUT3 oraz zapinek CUT2. Przeprowadzenie tych badań pozwoli na ubieganie się o certyfikat biodegradowalności lub/i kompostowalności w ramach programu „Ocena przydatności do biodegradacji i kompostowania materiałów i wyrobów pochodzenia naturalnego i syntetycznego”.

### **5.2.1. Analiza chemiczna biodegradowalnych folii i akcesoriów do uprawy roślin**

Próbki zostały przeanalizowane zgodnie z procedurą badawczą NL-13, wyd. V, z 01.04.2016 r. niżej wymienionymi metodami:

- ETAAS dla As, Cd, Mo, Se,
- FAAS dla Cr, Cu, Ni, Pb, Zn,
- CV AAS dla Hg,
- mineralizacja F (oznaczenie metodą PN-EN ISO 10304-1:2009 + AC:2012).

### **5.2.2. Biodegradacja w warunkach kompostowania przemysłowego**

Badanie biodegradacji w warunkach kompostowania przemysłowego (w temperaturze 58°C) trwało 24 tygodnie. Zostało przeprowadzone według następujących procedur badawczych:

- procedura badawcza nr 2 (wydanie V z 04.06.2018) „Oznaczanie stopnia rozpadu tworzyw sztucznych i wyrobów włókienniczych w symulowanych warunkach kompostowania w skali laboratoryjnej”,
- metoda wyznaczania ubytku masy w oparciu o normy PN-EN 14045:2012, PN-EN 14806:2010 (Opakowania - Ocena wstępna rozpadu materiałów

opakowaniowych w symulowanych warunkach kompostowania w badaniach w skali laboratoryjnej),

- PN-EN ISO 20200:2016-01 (Tworzywa sztuczne - Oznaczanie stopnia rozpadu materiałów polimerowych w symulowanych warunkach kompostowania w skali laboratoryjnej),
- PN-EN 14995:2009 (Tworzywa sztuczne. Ocena zdolności do kompostowania. Program badania i specyfikacja w zakresie dezintegracji).

### **5.2.3. Biodegradacja w warunkach kompostowania przydomowego („Home compost”)**

Badanie biodegradacji w warunkach kompostowania przydomowego (w temperaturze 30°C) trwało 48 tygodni. Zostało przeprowadzone według następujących procedur badawczych:

- procedura badawcza nr 6 (wydanie I z 31.12.2020) „Oznaczanie stopnia rozkładu surowców naturalnych i syntetycznych oraz materiałów różnego przeznaczenia w symulowanych w warunkach kompostowania przydomowego w skali laboratoryjnej”;
- metoda wyznaczania ubytku masy w oparciu o normy: PN-EN 14045:2012; PN-EN 14806:2010 oraz PN-EN ISO 20200:2016-01; PN-EN 13432:2002; PN-EN 14995:2009.

### **5.2.4. Badania dezintegracji/rozpadu**

Badania prowadzono w temperaturze 58°C w warunkach kompostowania przemysłowego przez 12 tygodni oraz 30°C przez 24 tygodnie w warunkach kompostowania przydomowego („Home compost”) zgodnie z normą PN-EN 14995:2009 „Tworzywa sztuczne - Ocena zdolności do kompostowania - Program badania i specyfikacja” w zakresie dezintegracji.

### **5.2.5. Badania fitotoksyczności**

Po zakończonym procesie biodegradacji podłoże badawcze zostało poddane badaniom fitotoksyczności, zgodnie z wytycznymi OECD 208. Celem badania było określenie skutków toksycznego działania wprowadzonych do kompostu substancji chemicznych na nasiona lub wczesne stadia rozwojowe różnych roślin lądowych. W badaniach

zastosowano nasiona trzech gatunków roślin: gorczycę, pszenicę i rzeżuchę. Nasiona wysiano na podłożu wzorcowym, mieszaninie podłoża wzorcowego z 25% oraz 50% udziałem podłoża po zakończonym procesie biodegradacji w warunkach przemysłowych. To samo badanie wykonano również dla podłoża po biodegradacji w warunkach przydomowych.

### **5.3. Badanie podatności na biodegradację folii i akcesoriów w procesie kompostowania laboratoryjnego**

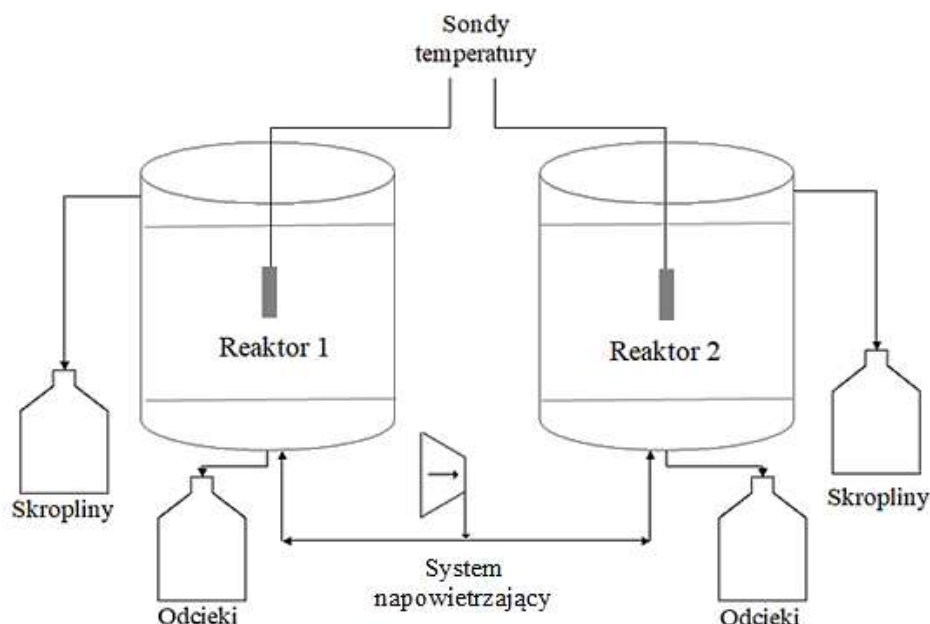
Kompostowanie laboratoryjne pozwoliło określić, czy tworzywa biodegradowalne tj. folie do ściółkowania oraz akcesoria przydatne podczas uprawy roślin, mogą być zagospodarowane po zużyciu w procesie kompostowania pozostałości roślinnych z uprawy pomidora zmieszanych z pomiotem kurzym i słomą pszeniczną. Analiza ubytku masy badanych materiałów po procesie kompostowania może stanowić potwierdzenie podatności na rozkład polimerów biodegradowalnych, tj. BIOPLAST 400 ELITE, BIOPLAST 400D oraz BIOPLAST GS 2189.

Kompostowanie laboratoryjne w reaktorach trwało od 23 listopada 2019 roku do 18 marca 2020 roku, czyli 116 dni (ponad 16 tygodni). Temperatura otoczenia w laboratorium wynosiła ok. 20°C.

#### **5.3.1. Stanowisko badawcze**

Kompostownie laboratoryjne było prowadzone w reaktorach o pojemności 60 litrów. Stanowisko badawcze składało się z dwóch izolowanych reaktorów wyposażonych w system napowietrzający oraz zbierający odcieki i skropliny (rys. 14). Proces kompostowania prowadzono równocześnie w dwóch powtórzeniach.

Warunki tlenowe niezbędne do procesu rozkładu zapewniono poprzez zastosowanie napowietrzania wymuszonego za pomocą pompy Hiblow HP 40 z regulatorem przepływu. Przepływ powietrza wynosił około 40 litrów/h.



Rysunek 14. Schemat laboratoryjnego stanowiska badawczego do kompostowania w laboratorium Katedry Sieci i Instalacji Sanitarnych.

### 5.3.2. Przygotowanie mieszanki kompostowej

Mieszanka kompostowa składała się z pomiotu kurzego z chowu klatkowego, łodyg i liści pomidorów oraz słomy pszennej. Proporcje składników w mieszance kompostowej przedstawia tabela 16 (Şevik i in., 2018).

Tabela 16. Skład mieszanki kompostowej.

	<b>REAKTOR NR 1</b> (powtórzenie 1)	<b>REAKTOR NR 2</b> (powtórzenie 2)
Proporcje (% wagowy)	Pmiot kurzy Łodygi pomidorów Słoma pszenna (1:2:0,2)	Pmiot kurzy Łodygi pomidorów Słoma pszenna (1:2:0,2)
Całkowita masa mieszanki kompostowej [kg]	13,22	14,65

Słoma pszenna oraz łodygi i liście pomidorów zostały pocięte na kawałki o długościach 4-5 cm, w celu zapewnienia większej jednorodności mieszaniny oraz ułatwienia procesu kompostowania. Składniki mieszanki kompostowej odważono zgodnie z proporcjami,

a następnie bardzo dokładnie wymieszano. Przygotowaną mieszankę umieszczono w reaktorach.



Rysunek 15. Przygotowanie mieszanki kompostowej.

Analizy chemiczne i fizyczne mieszanek kompostowych przed oraz po zakończeniu procesu kompostowania zostały wykonane zgodnie z PN-Z-15011-3 i obejmowały:

- suchą masę wyliczoną po wysuszeniu w suszarce w temperaturze 105°C,
- zawartość związków mineralnych określoną po spaleniu suchej masy w piecu w temperaturze 550°C,
- odczyn pH i konduktywność zmierzona konduktometrem w wodnym roztworze,
- zawartość azotu organicznego analizowaną za pomocą metody Kjeldahla.

### 5.3.3. Przygotowanie próbek folii i akcesoriów

Próbki folii oraz akcesoriów biodegradowalnych przygotowano zgodnie z tabelą 17.



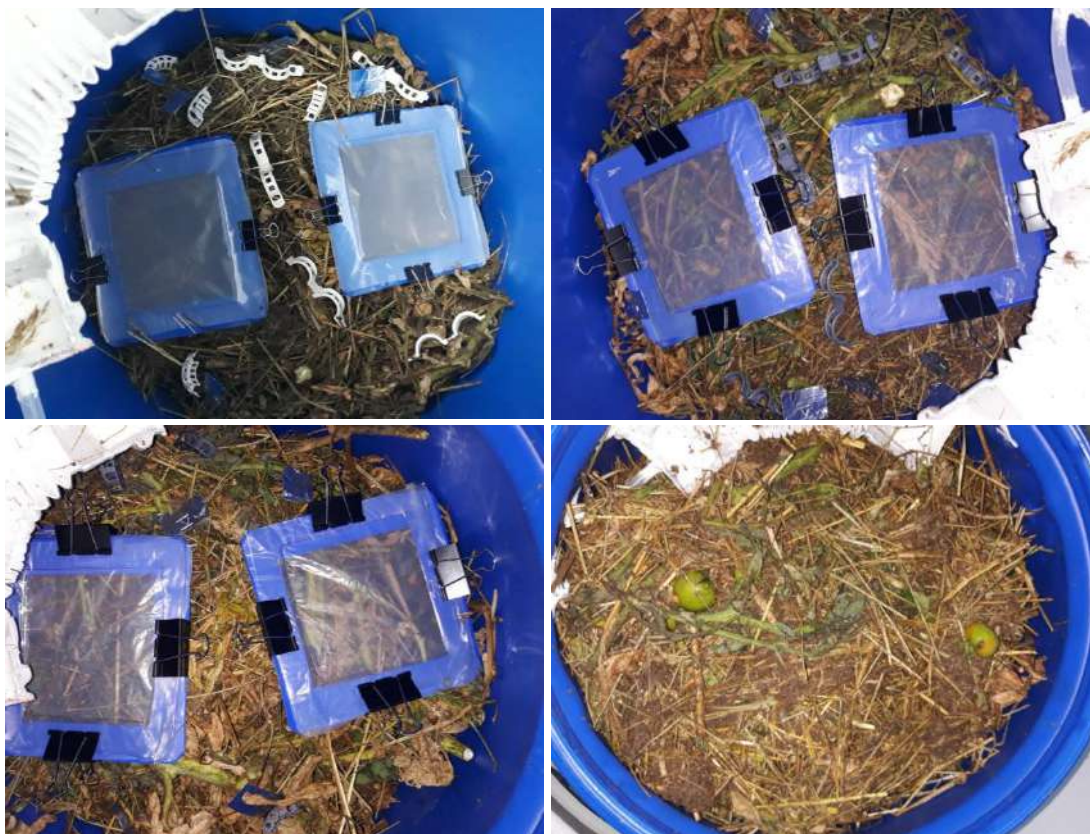
Tabela 17. Liczba próbek folii i akcesoriów umieszczonych w reaktorach laboratoryjnych.

	Reaktor 1	Reaktor 2
Folia biodegradowalna CUT1 bez napełniacza	8	8
Folia biodegradowalna CUT2 z napełnieniem 20% CaCO <sub>3</sub>	8	8
Łuki biodegradowalne CUT1 bez napełniacza	10	10
Łuki biodegradowalne CUT2 z napełnieniem 1% biowęgla	10	10
Zapinki biodegradowalne CUT1 bez napełniacza	10	10
Zapinki biodegradowalne CUT2 z napełnieniem 1% biowęgla	10	10

Przygotowanie każdej próbki folii polegało na wycięciu kawałka o wymiarach 16 x 16 cm, zważeniu i zamontowaniu wewnątrz ramki z tworzywa sztucznego. Ramki zostały wzmocnione spinkami, aby uniemożliwić przemieszczenie się materiału. Oznaczenie przeprowadzono w sposób trwały, aby po procesie kompostowania istniała możliwość identyfikacji próbek. Próbki łuków i zapinek oznaczono metalowymi tabliczkami, zamocowanymi za pomocą żyłki. Przed oznaczeniem każdy element został zważony.

#### 5.3.4. Kompostowanie laboratoryjne

W obu reaktorach na poszczególnych warstwach masy kompostowej znajdowały się równomiernie rozłożone próbki folii oraz akcesoriów ogrodniczych z odpowiednimi oznaczeniami (rys. 16). Reaktory zostały uzupełnione mieszanką kompostową do 90% pojemności, a następnie szczelnie zamknięte za pomocą izolowanej pokrywy. Dodatkowa izolacja reaktorów umożliwiła osiągnięcie wymaganej temperatury dla zapoczątkowania prawidłowego przebiegu procesu kompostowania. Pomiar temperatury wewnątrz reaktorów w trakcie procesu odbywał się za pomocą sondy.



Rysunek 16. Rozmieszczenie próbek w reaktorach laboratoryjnych.

#### **5.4. Badanie podatności na biodegradację folii i akcesoriów w procesie kompostowania przydomowego**

Kompostowanie przydomowe trwało około 1,5 roku. Zostało zapoczątkowane 8 grudnia 2019 roku i zakończone 30 kwietnia 2021 roku.

##### **5.4.1. Stanowisko badawcze**

Kompostowanie przydomowe prowadzono w kompostowniku o pojemności 730 litrów i średnicy 108 cm. Pojemnik o konstrukcji modułowej posiadał wbudowane otwory wentylacyjne, zapewniając niewymuszony obieg powietrza (rys. 17).



Rysunek 17. Kompostownik przydomowy firmy Comp 730 firmy Container Trading WFW GmbH.

#### 5.4.2. Przygotowanie mieszanki kompostowej

Mieszanka kompostowa została przygotowana z odpadków kuchennych, słomy oraz odpadów zielonych tj. łodyg i liści pomidorów pozostałych po sezonie wegetacyjnym (rys. 18).



Rysunek 18. Przygotowanie mieszanki kompostowej do przydomowego kompostownika.

Pomidory uprawiane były w szklarni, a po zakończeniu sezonu zagospodarowane w drodze kompostowania. Łodygi i liście pomidorów oraz słomę pocięto na mniejsze kawałki w celu poprawy jednorodności mieszanki kompostowej. Łodygi i liście pomidorów, słomę i odpadki kuchenne zmieszano w proporcji 3:2:1.

#### 5.4.3. Przygotowanie próbek folii i akcesoriów

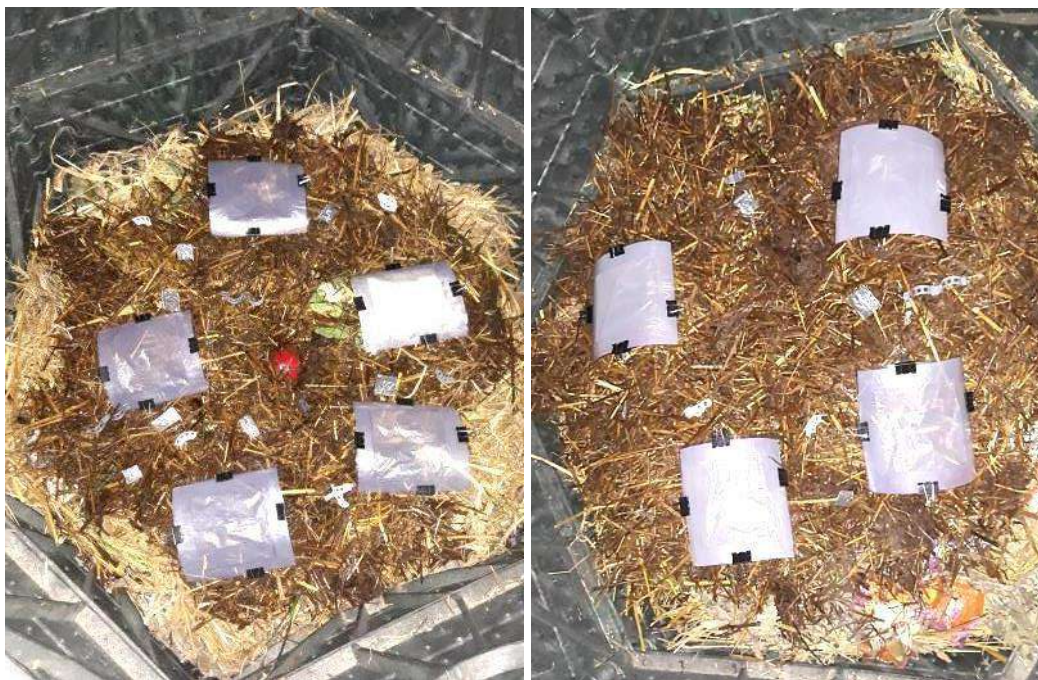
Przygotowano próbki folii i akcesoriów w celu zaaplikowania do kompostownika przydomowego w liczbie zgodnej z tabelą 18.

Tabela 18. Liczba próbek folii i akcesoriów zaaplikowanych do kompostownika.

	<b>Kompostownik przydomowy</b>
Folia biodegradowalna CUT1 bez napełniacza	6
Folia biodegradowalna CUT2 z napełnieniem 20% CaCO <sub>3</sub>	6
Folia biodegradowalna CUT3 czarna	6
Łuki biodegradowalne CUT1 bez napełniacza	3
Łuki biodegradowalne CUT2 z napełnieniem 1% biowęgla	3
Zapinki biodegradowalne CUT1 bez napełniacza	3
Zapinki biodegradowalne CUT2 z napełnieniem 1% biowęgla	3

#### 5.4.4. Kompostowanie przydomowe

Kompostownik przydomowy uzupełniono mieszanką kompostową z równomiernie rozłożonymi próbkami na trzech poziomach. Każdy z poziomów przedzielono warstwą mieszanki kompostowej (rys. 19).



Rysunek 19. Ułożenie próbek w kompostowniku przydomowym.

### **5.5. Testowanie folii i akcesoriów**

Podczas szklarniowej uprawy pomidorów w okresie jednego sezonu testowano biodegradowalne folie oraz akcesoria do uprawy roślin. Celem było sprawdzenie ich przydatności oraz wytrzymałości podczas uprawy pomidora.

Uprawa pomidorów z wykorzystaniem biodegradowalnych akcesoriów ogrodniczych oraz folii trwała od maja do początku października 2020 roku.

#### **5.5.1. Testowanie folii biodegradowalnych**

Sadzenie pomidorów w szklarni zapoczątkowano 2 maja 2020 roku. Folie rozłożono na zagonach, a następnie wykonano nacięcia i posadzono rośliny. Pomidory podlewano w miejscu nacięć folii. Folię biodegradowalną bez dodatków (CUT1) ułożono jak na rysunku 20.



Rysunek 20. Ułożenie folii biodegradowalnej CUT1 na zagonach w szklarni.

Drugi zagon został pokryty folią czarną (CUT3), natomiast trzeci zagon folią z dodatkiem 20%  $\text{CaCO}_3$  (CUT2).



Rysunek 21. Ułożenie folii biodegradowalnej z dodatkiem sadzy CUT3 (po lewej) oraz z dodatkiem 20%  $\text{CaCO}_3$  CUT2 (po prawej) na zagonach w szklarni.

### 5.5.2. Testowanie akcesoriów biodegradowalnych

Zapinki służą do utrzymania rośliny w pionie poprzez umocowanie łodygi do sznurka, z kolei łuki zapobiegają oderwaniu lub złamaniu grona z pomidorami. Naderwane grono powoduje utrudnienie w dojrzewaniu owoców oraz uniemożliwienie wzrostu pomidorów z pędów (rys. 22).



Rysunek 22. Złamane łodygi oraz grona roślin z powodu obciążenia.

Aby zapobiec uszkodzeniom łodyg oraz gałązek zastosowano zapinki oraz łuki biodegradowalne podczas całego sezonu wegetacyjnego.

## 6. WYNIKI BADAŃ

### 6.1. Właściwości biodegradowalnych folii i akcesoriów

#### 6.1.1. Właściwości mechaniczne – wytrzymałość na rozciąganie

Badanie wytrzymałości na rozciąganie zostało przeprowadzone w trzech powtórzeniach dla każdej z folii, tj. CUT1 (bez dodatków), CUT2 (z dodatkiem 20% CaCO<sub>3</sub>), CUT3 (z dodatkiem 5% czarnego pigmentu) oraz komercyjnie dostępnej folii z tworzyw sztucznych o grubości 67 μm (do celów porównawczych). Średnie wyniki z pomiarów zostały uwzględnione w tabeli 19. Podczas określania właściwości mechanicznych statycznej próby wytrzymałości na rozciąganie analizowano dwa podstawowe parametry do których należały: maksymalna siła przenoszona przez badaną folię (wyrażona w N) oraz wydłużenie przy zerwaniu (wyrażone w %).

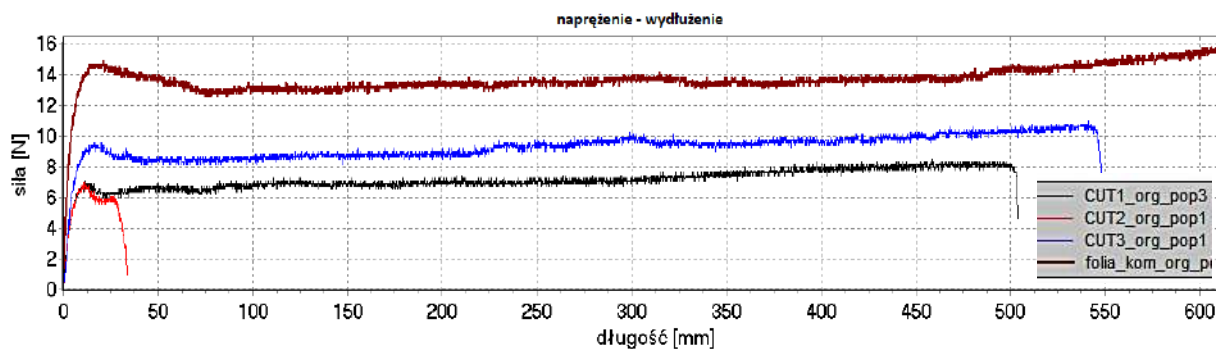
Określenie właściwości mechanicznych zostało przeprowadzone dla próbek folii przed ich użytkowaniem. Nie badano właściwości mechanicznych po użytkowaniu folii ani po ich kompostowaniu.

Tabela 19. Średnie wyniki dla wartości charakteryzujących wytrzymałość na rozciąganie poprzeczne dla czterech rodzajów próbek folii.

Nazwa próbki folii	Siła Fm [N]	Odształcenie εm [%]
CUT1	8,08±1,54	452,78±21,35
CUT2	6,51±0,88	11,42±1,45
CUT3	10,79±0,73	515,47±141,16
Folia komercyjna	15,40±0,58	416,28±343,06

Na rysunku 23 przedstawiono wykresy zmian właściwości mechanicznych uzyskanych podczas próby statycznego rozciągania reprezentatywnych próbek folii. Najkorzystniejszymi właściwościami mechanicznymi charakteryzowała się folia komercyjna (wytworzona z PE). Podczas określania właściwości mechanicznych średnia wartość siły wyniosła 15 N, a otrzymane wydłużenie przy zerwaniu było równe 416 %. Należy jednak zauważyć, że folia ta charakteryzowała się największą grubością (67 μm). Ponadto folia komercyjna nie zawierała napelnaczy, które mogłyby pogarszać jej właściwości mechaniczne.





Rysunek 23. Wykres wytrzymałości na rozciąganie poprzeczne dla folii komercyjnej, CUT1, CUT2 oraz CUT3.

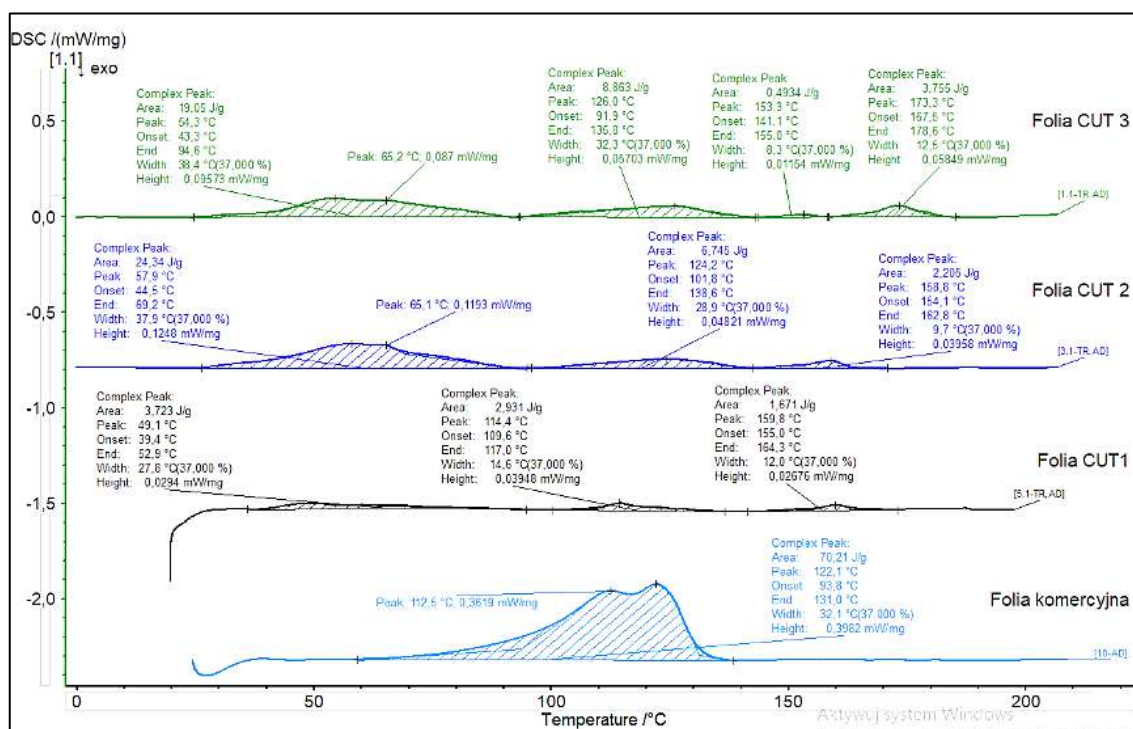
W grupie folii biodegradowalnych (CUT) najkorzystniejszymi właściwościami mechanicznymi charakteryzuje się folia CUT3. Średnia wartość przenoszonej siły dla tej folii to 10 N, a otrzymane wydłużenie podczas zerwania to 515%. Folia CUT3 charakteryzuje się zatem największym wydłużeniem podczas zerwania. Grubość folii CUT3 była mniejsza niż folii komercyjnej (wynosiła 40  $\mu\text{m}$ ), jednocześnie umożliwiła otrzymanie większego wydłużenia. Z praktycznego punktu widzenia, stanowi to bardzo korzystną własność, ponieważ podczas układania folii CUT3 w warunkach polowych jest ona w stanie bardziej się odkształcić przed pojawieniem się uszkodzeń mechanicznych. Jednakże należy zauważyć, że siła potrzebna do wywołania nieodwracalnych uszkodzeń mechanicznych jest mniejsza niż w przypadku folii komercyjnej (należy jednak pamiętać o różnicach grubości porównywanych folii).

Najmniej korzystnymi właściwościami mechanicznymi charakteryzuje się folia CUT2. Folia ta miała najmniejszą grubość (25  $\mu\text{m}$ ) oraz zawierała napelniacz w postaci węglanu wapnia. Wysoki stopień napełnienia oraz mała grubość folii znacząco wpłynęły na wartość maksymalnej siły oraz wydłużenia przy zerwaniu. W przypadku folii CUT2 osiągnięte podczas rozciągania maksymalne wydłużenie wyniosło 11% (co stanowi zaledwie 2% odkształcenia osiąganego dla folii CUT3). Zatem folie CUT2 ulegają uszkodzeniu już podczas przykładania niewielkiej siły, a ich odkształcenie powyżej 11% skutkować będzie powstawaniem przedarć lub pęknięć (z punktu widzenia kompostowalności i degradacji w środowisku naturalnym jest to przydatna własność, ponieważ folie te mogą ulegać szybszemu rozkładowi).

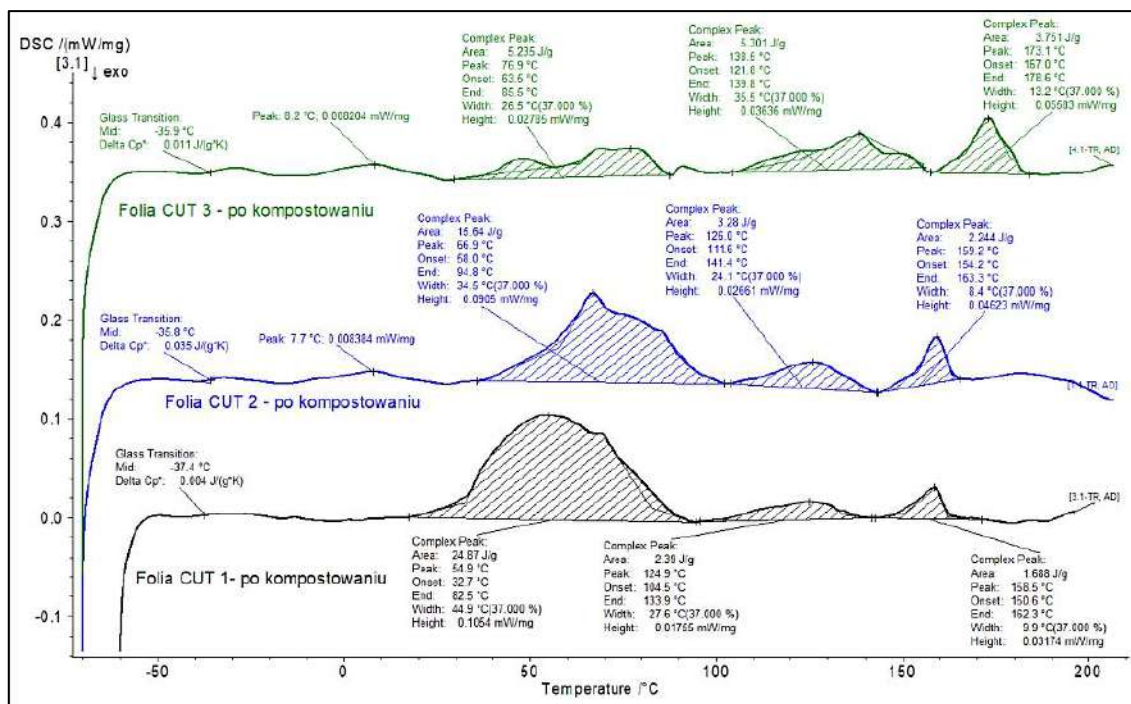
## 6.1.2. Badania termiczne

- Folie biodegradowalne

Celem badań było określenie wpływu procesu kompostowania (wpływu zjawisk zachodzących podczas procesu kompostowania) na zmianę (lub jej brak) właściwości termicznych folii CUT, określanych przez tzw. temperatury charakterystyczne (przemiany endotermiczne indukowane w materiałach polimerowych podczas absorbowania przez materiał polimerowy energii cieplnej). Przebieg wykresów (tzw. termogramów DSC) pozwala na określenie wpływu oddziaływania środowiskowego (zmian temperatury i wilgotności podczas procesu kompostowania) na zmianę właściwości termicznych folii. Porównanie termogramów DSC przed rozpoczęciem procesu kompostowania i po jego zakończeniu, pozwala na określenie stopnia degradacji (o ile takowa następuje), na podstawie różnic w wartościach otrzymanych temperatur charakterystycznych, jak również występowaniu lub zanikaniu wybranych przemian endotermicznych (podczas ogrzewania próbek).



Rysunek 24. Termogram zbiorczy DSC dla folii komercyjnej, CUT1, CUT2 oraz CUT3 przed procesem kompostowania.



Rysunek 25. Termogram zbiorczy DSC dla folii CUT1, CUT2 oraz CUT3 po procesie kompostowania.

Analiza termiczna pozwoliła również na określenie wpływu dodatków, tj. węgla wapnia ( $\text{CaCO}_3$ ) oraz czarnego pigmentu, na zmiany zachodzące w badanych próbkach podczas ogrzewania. Na termogramach poniżej zostały przedstawione próbki folii oraz akcesoriów biodegradowalnych przed oraz po procesie kompostowania.

Na rysunku 24 oraz 25 zostały przedstawione wykresy tzw. temperatur charakterystycznych dla folii CUT1, CUT2, CUT3 oraz folii komercyjnej z tworzyw sztucznych przed i po procesie kompostowania. Wszystkie badane folie zostały wytworzone z polimerów częściowo krystalicznych. Świadczy o tym występowanie tzw. pików topnienia, które odpowiadają przemianom endotermicznym i są związane z absorpcją energii podczas ogrzewania próbki. Próbki od CUT1 do CUT3 charakteryzują się występowaniem aż trzech przemian endotermicznych podczas ogrzewania. W zależności od rodzaju folii, przemiany te różnią się wartością temperatury (temperaturą topnienia) oraz entalpią przemiany (entalpią topnienia).

Folia komercyjna charakteryzuje się występowaniem jednej przemiany endotermicznej podczas ogrzewania. Jednakże należy zauważyć, że jest to przemiana złożona z zarejestrowanym dodatkowym pikiem endotermicznym występującym w obrębie przemiany głównej. Świadczy to o występowaniu dodatkowego materiału polimerowego – folia komercyjna jest mieszaniną dwóch materiałów polimerowych.

Cechą charakterystyczną badanych materiałów jest występowanie kilku przemian endotermicznych. Świadczy to o tym, że badane folie stanowią złożoną kompozycję materiałów termoplastycznych, dla których przemiany termiczne zachodzą w różnych temperaturach. Folie CUT zostały wytworzone na bazie tego samego biodegradowalnego materiału polimerowego (poszczególne folie oprócz grubości różniły się zawartością wypełniacza w postaci węgla wapnia lub czarnego barwnika).

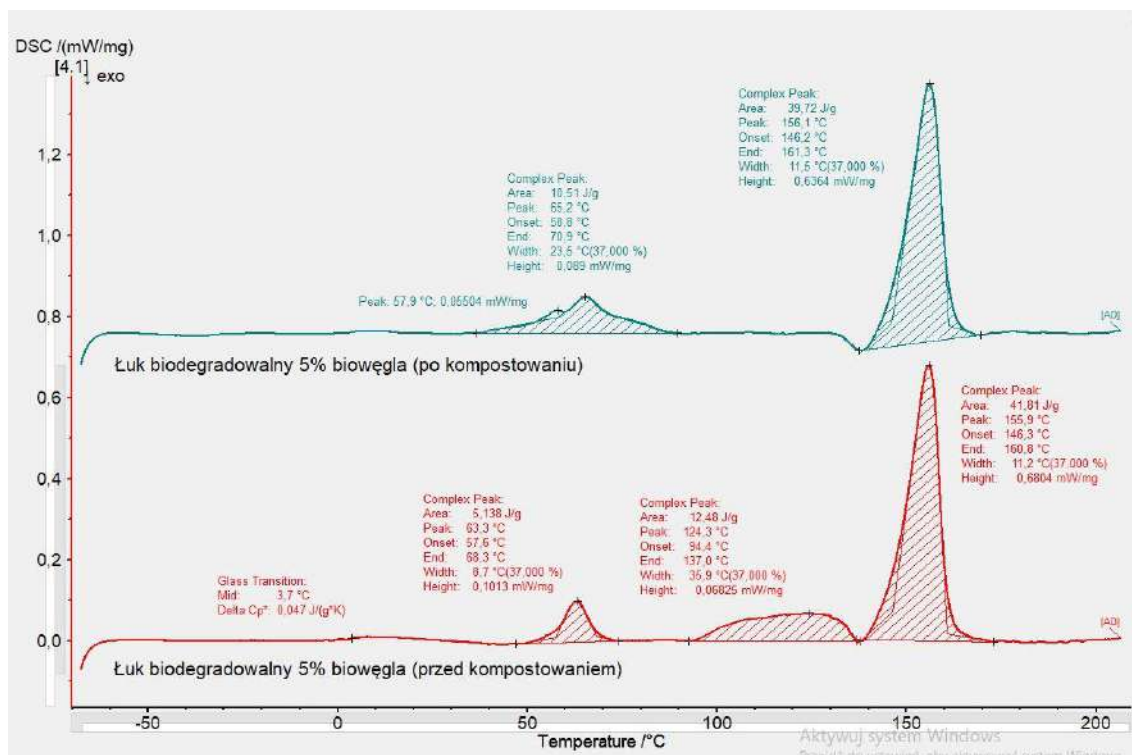
Analiza właściwości termicznych z wykorzystaniem metody DSC pozwoliła na wykazanie zmian termicznych zachodzących w kompostowanych foliach. Poszczególne folie przed i po procesie kompostowania różnią się otrzymanymi wartościami temperatur charakterystycznych oraz odpowiadającymi tym temperaturom entalpiami topnienia.

Zaobserwowane zmiany odnoszą się głównie do dwóch pierwszych zarejestrowanych przemian endotermicznych, gdzie w wyniku procesu kompostowania temperatury topnienia zwiększyły się, natomiast entalpie w zależności od rodzaju folii uległy zwiększeniu (folia CUT1 – pierwsza przemiana endotermiczna) lub zmniejszyły się (folia CUT2 oraz CUT3 – pierwsza przemiana endotermiczna). Dla folii CUT2 oraz CUT3 zaobserwowano ponadto zmianę temperatury topnienia dla drugiej przemiany endotermicznej (dla każdej folii ta temperatura jest wyższa), jednakże zmniejszyła się entalpia topnienia (ilość pochłoniętej przez próbkę energii). Dla trzeciej przemiany endotermicznej nie zarejestrowano znaczących różnic w wartości temperatury topnienia oraz entalpii topnienia.

Jak wykazały przeprowadzone badania, ilość rejestrowanych przemian endotermicznych oraz wartości odpowiadających im temperatur ulegają zmianie w badanych materiałach, pod wpływem procesu kompostowania. Jest to dowodem na postępującą degradację i rozkład materiału pod wpływem czynników środowiskowych oraz bakterii obecnych podczas procesu kompostowania.

- **Akcesoria biodegradowalne**

Analizie termicznej poddano również akcesoria do uprawy roślin, tj. łuki i zapinki. Cechą charakterystyczną akcesoriów wykonanych z tworzyw biodegradowalnych jest znacząco większa grubość ścianki, która wpływa na sposób procesu użytkowania, ale również na przebieg procesu kompostowania (zjawiska degradacyjne są rozłożone w czasie – okres indukowania przemian degradacyjnych i rozkład akcesoriów jest dłuższy w odniesieniu do folii).



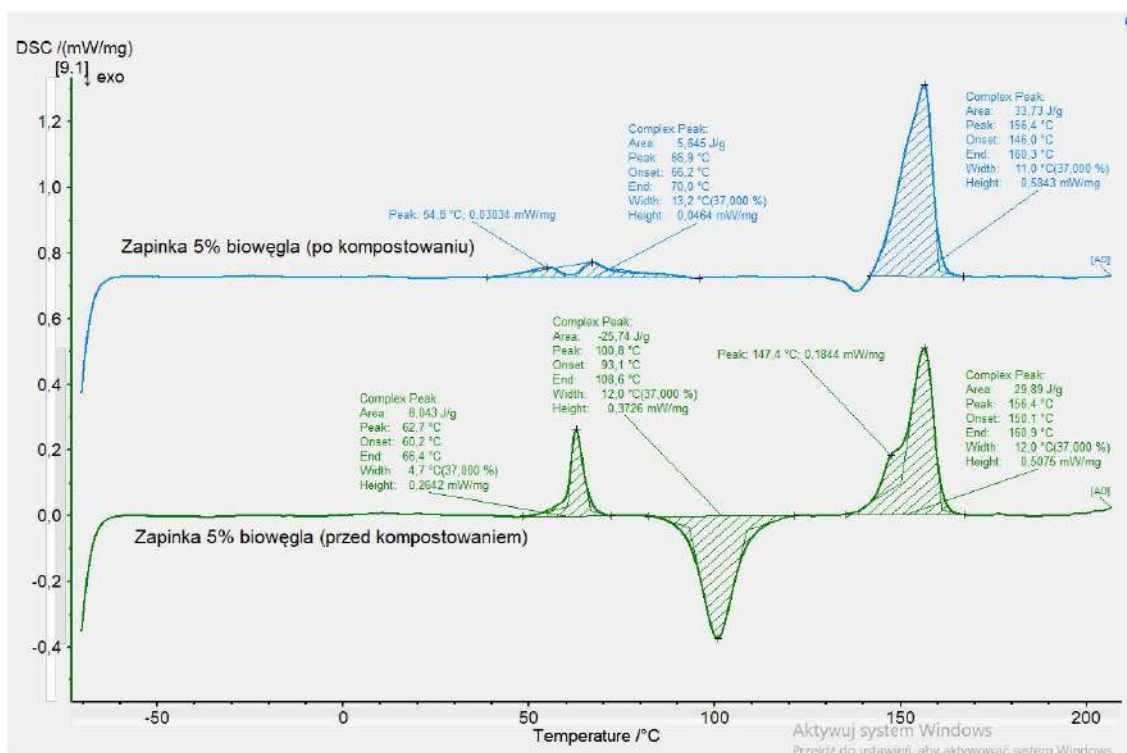
Rysunek 26. Termogram DSC dla łuków biodegradowalnych CUT2 przed i po procesie kompostowania.

Na rysunku 26 zostały przedstawione termogramy DSC obrazujące zmianę właściwości termicznych łuków biodegradowalnych przed i po zakończeniu procesu kompostowania. Dla łuku przed procesem kompostowania zarejestrowano występowanie przejścia szklistego w temperaturze 3,7 °C oraz trzech przemian endotermicznych w następujących temperaturach 63,3 °C, 124,3 °C oraz 155,9 °C. Natomiast dla próbki łuku po zakończonym procesie kompostowania nie udało się zarejestrować temperatury zeszklenia oraz zarejestrowano jedynie dwie przemiany endotermiczne w następujących temperaturach: 65,2 °C oraz 156,1 °C. Ponadto, indukowane przemiany endotermiczne dla próbek łuków przed i po procesie kompostowania różnią się wartością entalpii topnienia. Po procesie kompostowania próbka absorbuje zdecydowanie mniej energii.

Analiza właściwości termicznych łuków biodegradowalnych wykazała znaczące różnice w wartościach temperatur charakterystycznych oraz entalpii topnienia poszczególnych przemian. Po zakończeniu procesu kompostowania nie zaobserwowano przemiany drugiej (przed procesem kompostowania została ona zarejestrowana w temperaturze 124 °C). Po procesie kompostowania zmianie uległa również entalpia topnienia (entalpia pierwszej przemiany zwiększyła się o 5 J/g natomiast entalpia

przemiany trzeciej zmniejszyła się o 2 J/g). Zmianie uległ również przebieg i kształt krzywej (termogramu).

Zarejestrowane przemiany wskazują na dynamiczne zmiany właściwości termicznych kompostowanych łuków biodegradowalnych pod wpływem warunków panujących w reaktorze laboratoryjnym. Zaobserwowane zmiany wskazywać mogą na postępujące procesy degradacyjne (brak niektórych przemian po zakończonym procesie kompostowania, zmiany entalpii) w badanych próbkach łuków.



Rysunek 27. Termogram DSC dla zapinek biodegradowalnych CUT2 przed i po procesie kompostowania.

Na rysunku 27 zostały przedstawione termogramy DSC obrazujące zmianę właściwości termicznych zapinek biodegradowalnych przed i po zakończeniu procesu kompostowania.

Dla zapinek przed procesem kompostowania zarejestrowano występowanie dwóch przemian endotermicznych w temperaturach 62,7°C oraz 156,4°C oraz przemiany egzotermicznej w temperaturze 100,8°C. Natomiast dla próbki pobranej z zapinki po zakończonym procesie kompostowania nie udało się zarejestrować temperatury przemiany egzotermicznej (tzw. przejścia szklistego). Indukowane i zarejestrowane przemiany zachodzą kolejno w temperaturach 66,9°C oraz 156,4°C. Znaczące różnice zostały zarejestrowane dla wartości temperatur topnienia pierwszej przemiany

endotermicznej. Jej wartość dla próbki pobranej z zapinki po procesie kompostowania uległa znaczącemu obniżeniu. Podobne zjawisko zostało również zarejestrowane dla otrzymanych wartości entalpii. Po procesie kompostowania dla pierwszej przemiany endotermicznej entalpia uległa znaczącemu zmniejszeniu. Dla drugiej przemiany wartości temperatur są jednakowe, a entalpia w przypadku próbki po kompostowaniu uległa zwiększeniu (o blisko 4 J/g).

## 6.2. Analiza chemiczna oraz badania biodegradowalności, kompostowalności i fitotoksyczności

### 6.2.1. Analiza chemiczna biodegradowalnych folii i akcesoriów

Wyniki analizy chemicznej dla folii biodegradowalnej CUT3 zostały przedstawione w tabeli 20, a dla zapinki CUT2 w tabeli 21. Analiza została przeprowadzona zgodnie z PN-EN 13432:2002 (Wymagania dotyczące opakowań przydatnych do odzysku przez kompostowanie i biodegradację - Program badań i kryteria oceny do ostatecznej akceptacji opakowań).

Tabela 20. Charakterystyka chemiczna folii CUT3.

Symbol próbki	Pierwiastek	Maksymalna zawartość pierwiastków w materiale [mg/kg suchej substancji]	Oznaczone pierwiastki [mg/kg suchej substancji]
Folia do ściółkowania - CUT3	Zn (cynk)	150	1,74±0,27
	Cu (miedź)	50	<1
	Ni (nikiel)	25,0	<1
	Cd (kadm)	0,5	<0,01
	Pb (ołów)	50	<1,5
	Hg (rtęć)	0,5	<0,01
	Cr (chrom)	50	<1
	Mo (molibden)	1	<0,1
	Se (selen)	0,75	<0,1
	As (arsen)	5	<0,1
	F (fluor)	100	<10

Tabela 21. Charakterystyka chemiczna zapinki CUT2.

Symbol próbki	Pierwiastek	Maksymalna zawartość pierwiastków w materiale opakowaniowym [mg/kg suchej substancji]	Oznaczone pierwiastki [mg/kg suchej substancji]
Akcesoria do uprawy roślin – zapinka CUT2	Zn (cynk)	150	3,42±0,52
	Cu (miedź)	50	<1
	Ni (nikiel)	25,0	<1
	Cd (kadm)	0,5	0,030±0,008
	Pb (ołów)	50	<1,5
	Hg (rtęć)	0,5	<0,01
	Cr (chrom)	50	<1
	Mo (molibden)	1	<0,2
	Se (selen)	0,75	<0,1
	As (arsen)	5	<0,1
	F (fluor)	100	<10

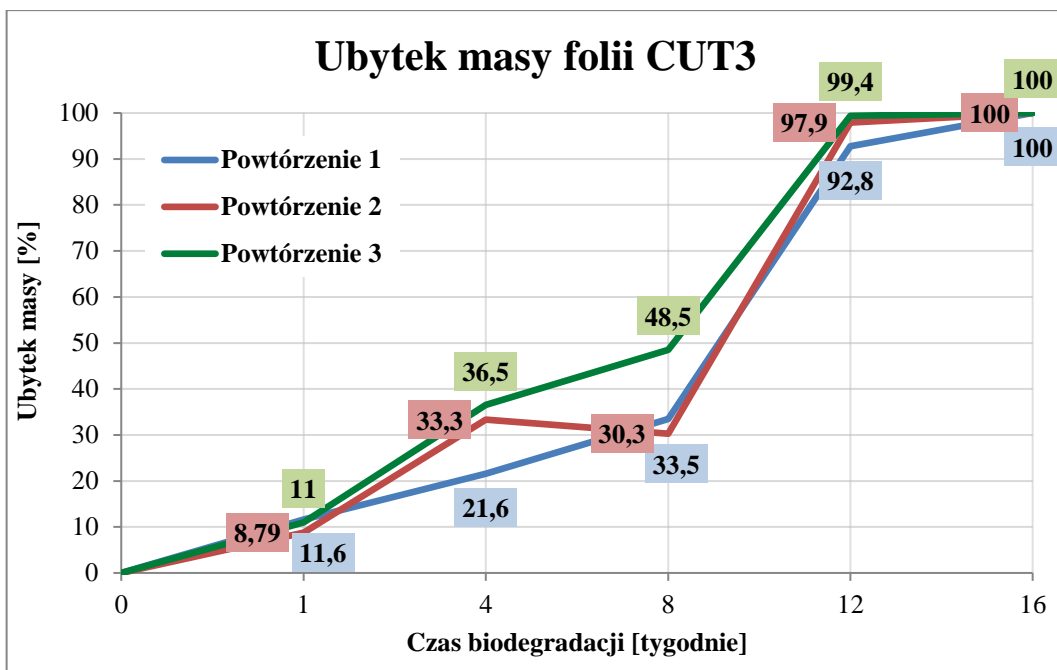
Analiza chemiczna próbek biodegradowalnych folii CUT3 oraz zapinek CUT2 wykazała śladowe ilości oznaczanych pierwiastków. Wyniki każdego oznaczenia nie przekroczyły maksymalnej dopuszczalnej zawartości pierwiastków w badanych materiałach.

### 6.2.2. Badania biodegradacji w środowisku kompostowym – warunki przemysłowe

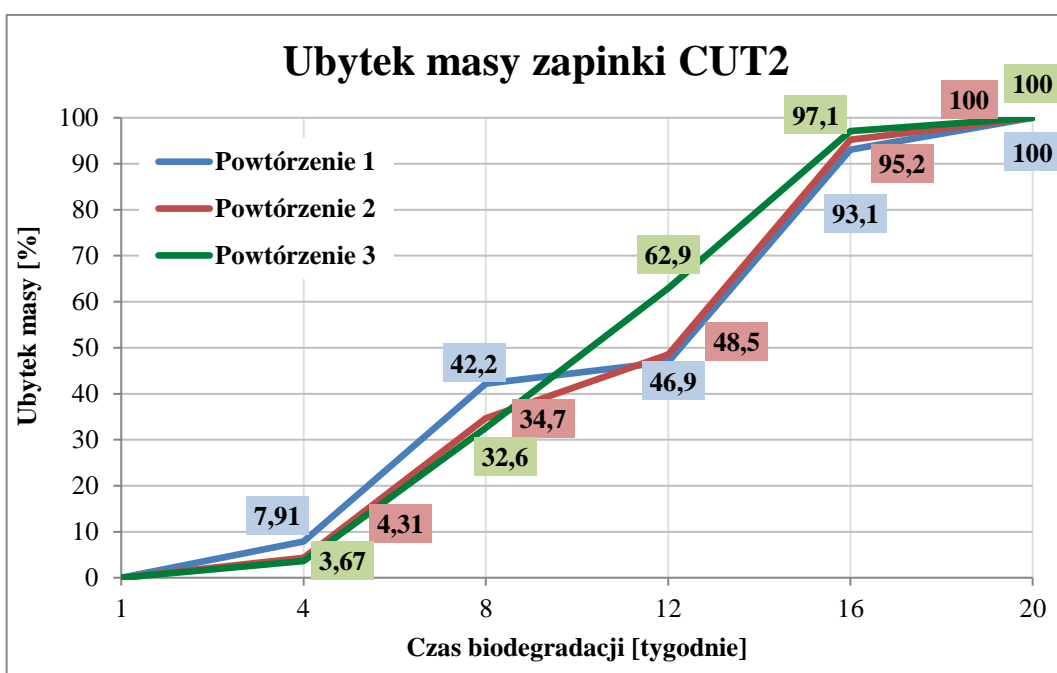
Ubytek masy dla folii CUT3 oraz zapinek CUT2 po procesie biodegradacji w warunkach przemysłowych (w temperaturze 58 °C) przedstawiono na rysunkach 28 i 29.

Całkowity ubytek masy dla folii CUT3 stwierdzono po 16 tygodniach, z kolei dla zapinki CUT2 po 20 tygodniach. Folia zaczęła degradować już w pierwszym tygodniu procesu kompostowania przemysłowego. Zapinka biodegradowalna charakteryzuje się większą grubością niż folia, dlatego hydroliza łańcuchów polimerowych przez mikroorganizmy trwała dłużej. Degradacja w obu przypadkach postępowała w czasie.





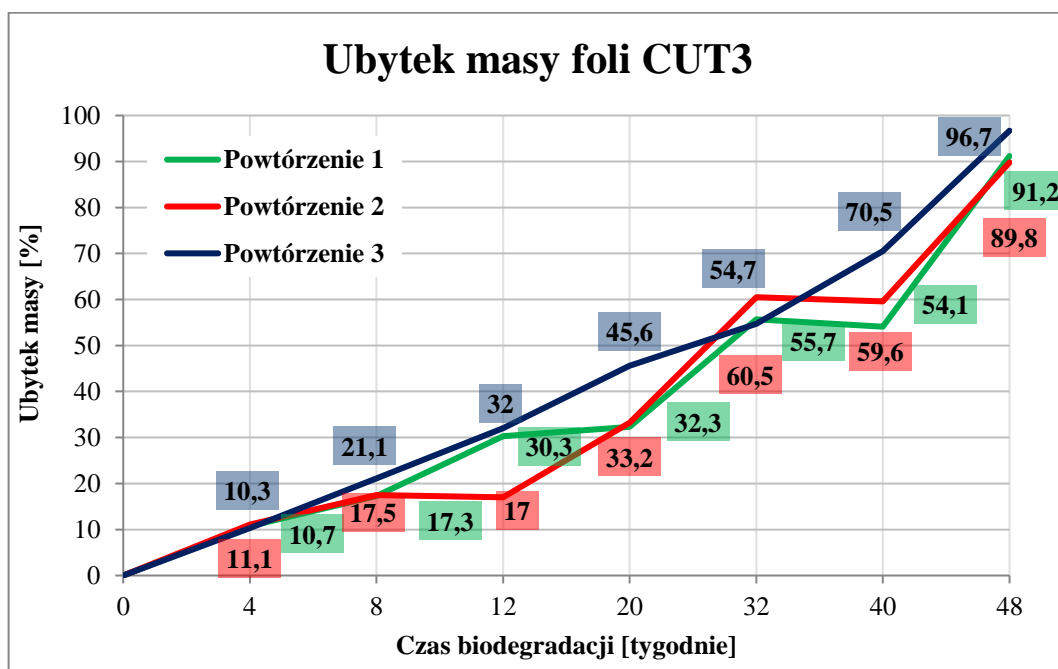
Rysunek 28. Ubytek masy w wyniku biodegradacji w warunkach kompostowania przemysłowego (w temperaturze 58 °C) próbki folii CUT3.



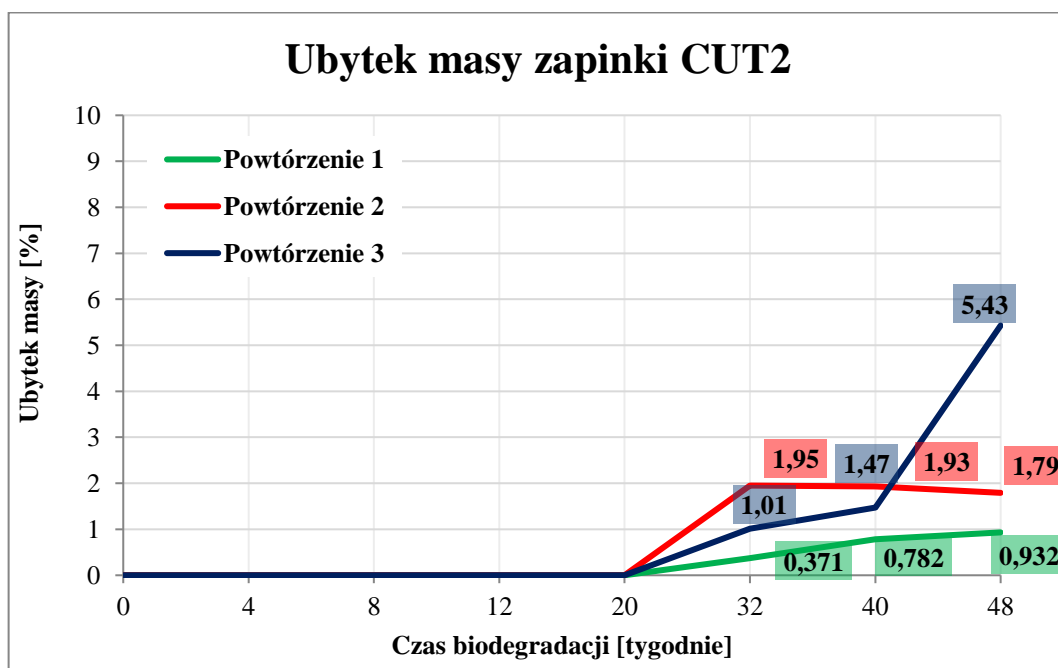
Rysunek 29. Ubytek masy w wyniku biodegradacji w warunkach kompostowania przemysłowego (w temperaturze 58 °C) próbki zapinki z dodatkiem biowęglu CUT2.

### 6.2.3. Badania biodegradacji w środowisku kompostowym – warunki przydomowe

Ubytek masy dla folii CUT3 oraz zapinek CUT2 po procesie biodegradacji w warunkach przydomowych przedstawiono na rysunkach 30 i 31.



Rysunek 30. Ubytek masy w wyniku biodegradacji w warunkach kompostowania przydomowego (w temperaturze 30 °C) próbki folii CUT3.








Rysunek 31. Ubytek masy w wyniku biodegradacji w warunkach kompostowania przydomowego (w temperaturze 30 °C) próbki zapinki z dodatkiem biowęgla CUT2.







Maksymalny ubytek masy w wyniku biodegradacji w warunkach kompostowania przydomowego po 48 tygodniach dla folii CUT3 to 96,7%, a dla zapinki CUT2 to 5,43%. Ubytek masy folii obserwuje się już w pierwszym tygodniu prowadzonego procesu kompostowania w warunkach przydomowych, natomiast degradacja zapinki została zapoczątkowana w 20 tygodniu.

#### 6.2.4. Fotodokumentacja próbek folii CUT3 oraz zapinek CUT2 w zależności od metody przeprowadzonego procesu kompostowania

W tabeli 22 przedstawiono fotodokumentację rozkładu próbek folii CUT3 w wyniku biodegradacji w warunkach przemysłowych oraz przydomowych.



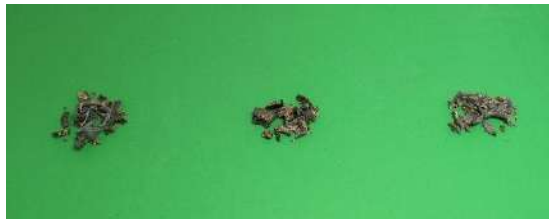






Tabela 22. Porównanie stopnia rozkładu folii CUT3 w zależności od warunków przebiegu procesu kompostowania.




Biodegradacja w warunkach przemysłowych (w temperaturze 58 °C)	Biodegradacja w warunkach przydomowych (w temperaturze 30 °C)
 <p>Po 1 tygodniu biodegradacji</p>	<p>---</p>
 <p>Po 4 tygodniu biodegradacji</p>	 <p>Po 4 tygodniu biodegradacji</p>
 <p>Po 8 tygodniu biodegradacji</p>	 <p>Po 8 tygodniu biodegradacji</p>

 <p>Po 12 tygodniu biodegradacji</p>	 <p>Po 12 tygodniu biodegradacji</p>
<p>Biodegradacja 100%</p> <p>Po 16 tygodniu biodegradacji</p>	 <p>Po 16 tygodniu biodegradacji</p>
<p>---</p>	 <p>Po 32 tygodniu biodegradacji</p>
<p>---</p>	 <p>Po 40 tygodniu biodegradacji</p>
<p>---</p>	 <p>Po 48 tygodniu biodegradacji</p>
<p>---</p>	<p>Biodegradacja 100%</p>

W tabeli 23 przedstawiono fotodokumentację rozkładu próbek zapinek CUT2 w wyniku biodegradacji w warunkach przemysłowych oraz przydomowych.

Tabela 23. Porównanie stopnia rozkładu zapinek CUT2 w zależności od warunków przebiegu procesu kompostowania.

<b>Biodegradacja w warunkach przemysłowych (w temperaturze 58 °C)</b>	<b>Biodegradacja w warunkach przydomowych (w temperaturze 30 °C)</b>
 <p>Po 4 tygodniu biodegradacji</p>	 <p>Po 4 tygodniu biodegradacji</p>
 <p>Po 8 tygodniu biodegradacji</p>	 <p>Po 8 tygodniu biodegradacji</p>
 <p>Po 12 tygodniu biodegradacji</p>	 <p>Po 12 tygodniu biodegradacji</p>
 <p>Po 16 tygodniu biodegradacji</p>	 <p>Po 16 tygodniu biodegradacji</p>
<p><b>Biodegradacja 100%</b> Po 20 tygodniu biodegradacji</p>	 <p>Po 20 tygodniu biodegradacji</p>

---	 <p>Po 32 tygodniu biodegradacji</p>
---	 <p>Po 40 tygodniu biodegradacji</p>
---	 <p>Po 48 tygodniu biodegradacji</p>

Kompostowanie w warunkach przemysłowych pozwoliło na osiągnięcie 100% biodegradacji badanych próbek w czasie nie przekraczającym 16 tygodni dla folii i 20 tygodni dla zapinek. Z kolei kompostowanie przydomowe wiąże się ze spowolnieniem rozkładu biologicznego i wydłużeniem czasu prowadzenia procesu.

#### 6.2.5. Badania dezintegracji/rozpadu

Wyniki z badań dezintegracji folii CUT3 oraz zapinek CUT2 przedstawiono w tabeli 24 dla środowiska kompostowego w temp. 58°C (12 tygodni) oraz w tabeli 25 dla środowiska kompostowego w temp. 30°C (24 tygodnie).

Tabela 24. Wyniki dezintegracji folii CUT3 i zapinki CUT2 w warunkach kompostowania w temperaturze 58 °C po 12 tygodniach.

Symbol próbki	Ilość frakcji o wielkości cząstek >2 mm	Kryterium
Folia do ściółkowania CUT3	0 %	<10%
Zapinka CUT2	0 %	<10%

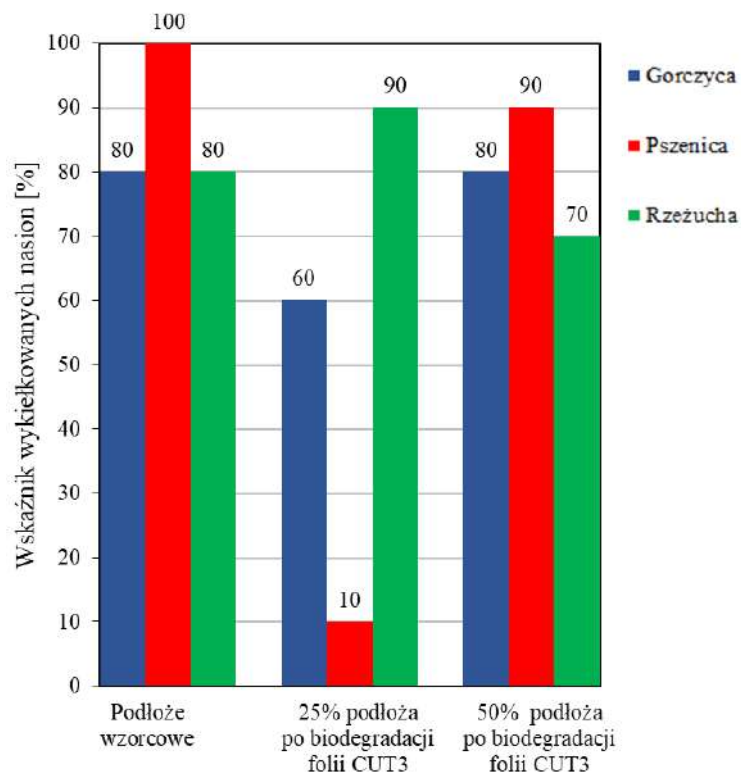
Tabela 25. Wyniki dezintegracji folii CUT3 i zapinek CUT2 w warunkach kompostowania w temperaturze 30 °C po 24 tygodniach

<b>Symbol próbki</b>	<b>Ilość frakcji o wielkości cząstek &gt;2 mm</b>	<b>Kryterium</b>
Folia do ściółkowania CUT3	59%	<10%
Zapinka CUT2	100%	<10%

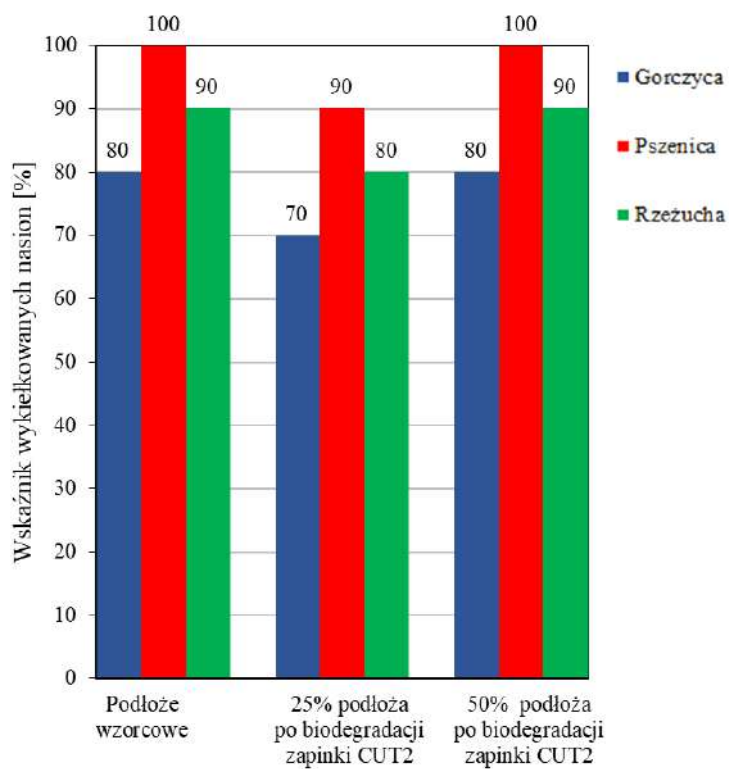
Otrzymane wyniki potwierdzają, że wyższa temperatura podczas kompostowania przyczynia się do szybszego rozkładu materiałów biodegradowalnych. Biodegradacja prowadzona w 58°C spowodowała rozkład próbek folii oraz zapinek na fragmenty mniejsze niż 2 mm. Z kolei w środowisku kompostowym w temperaturze 30°C w ciągu 24 tygodni nie doszło do całkowitego rozkładu folii i zapinek. Próbka folii została zdegradowana na fragmenty mniejsze niż 2 mm w 41%, natomiast zapinki nie uległy dezintegracji na frakcje mniejsze niż 2 mm.

#### **6.2.6. Badania fitotoksyczności**

W celu oceny potencjalnego zagrożenia dla środowiska wynikającego z zanieczyszczenia gleby odpadami tworzyw biodegradowalnych, przeprowadzono testy fitotoksyczności polegające na ocenie kiełkowania trzech rodzajów roślin, tj. gorczycy, pszenicy i rzeżuchy, na podłożach z kompostem po biodegradacji folii i zapinek w warunkach kompostowania przemysłowego i przydomowego. Wyniki badań fitotoksyczności dla próbek folii CUT3 oraz zapinek CUT2 wykonanych po procesie biodegradacji w warunkach kompostowania przemysłowego oraz przydomowego przedstawiono na rysunkach 32-35.



Rysunek 32. Wynik testu kiełkowania dla folii CUT3 po procesie biodegradacji w warunkach przemysłowych (w temperaturze 58°C).

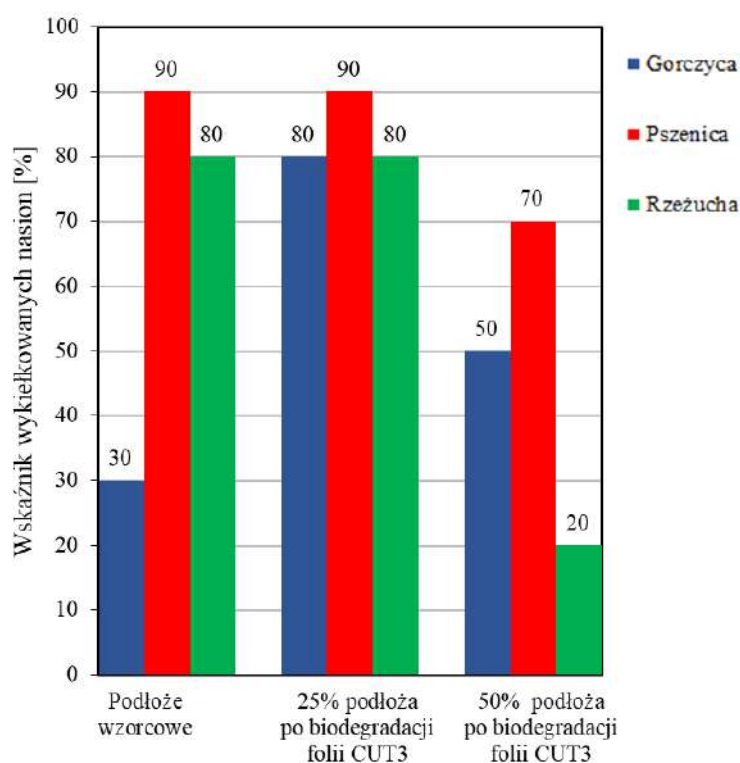


Rysunek 33. Wynik testu kiełkowania dla zapinki CUT2 po procesie biodegradacji w warunkach przemysłowych (w temperaturze 58°C).

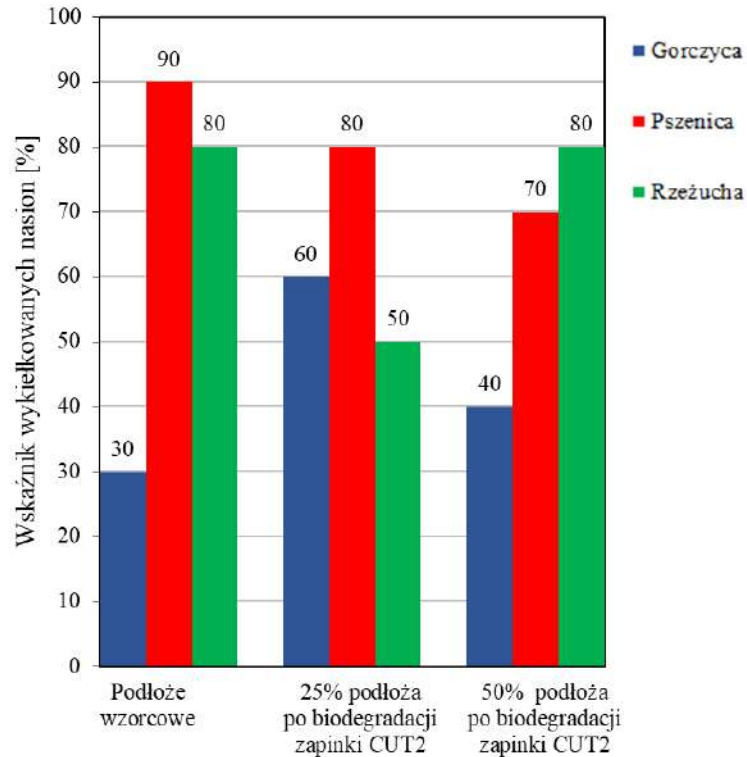


Biorąc pod uwagę wskaźnik wykiełkowanych nasion w mieszaninie podłoża wzorcowego z 50% udziałem podłoża po procesie biodegradacji w warunkach przemysłowych można stwierdzić, że:

- pozostałości po biodegradacji zapinki CUT2 nie miały żadnego wpływu na wskaźnik wykiełkowanych nasion gorczycy, pszenicy i rzeżuchy,
- spadek wskaźnika wykiełkowania o 10% obserwuje się wyłącznie dla pszenicy i rzeżuchy na podłożu ze zdegradowaną próbką folii CUT3,
- w rezultacie można stwierdzić brak wpływu pozostałości po biodegradacji CUT3 i CUT2 na wskaźnik kiełkowania gorczycy oraz nieznaczny wpływ (maksymalnie 10%) na pszenicę i rzeżuchę kiełkujące na podłożu z CUT3.



Rysunek 34. Wynik testu kiełkowania dla folii CUT3 po procesie biodegradacji w warunkach przydomowych (w temperaturze 30°C).



Rysunek 35. Wynik testu kiełkowania dla zapinki CUT2 po procesie biodegradacji w warunkach przydomowych (w temperaturze 30°C).

Analizując wskaźnik wykiełkowanych nasion w mieszaninie podłoża wzorcowego z 50% udziałem podłoża po procesie biodegradacji w warunkach przydomowych można wnioskować, że:

- wskaźnik wykiełkowania gorzycy był wyższy w glebie z pozostałościami zarówno CUT3 jak i CUT2 o odpowiednio: 20% i 10%,
- nasiona pszenicy nie wykiełkowały w 20% w podłożach z CUT3 oraz CUT2,
- kiełkowanie rzeżuchy było podobne w podłożu wzorcowym, jak i podłożu z zawartością CUT2, z kolei o 60% niższy wskaźnik kiełkowania obserwuje się w glebie z pozostałościami CUT3.

Podłoże wzorcowe zmieszane z podłożem po biodegradacji próbek w warunkach przemysłowych nie wpłynęło istotnie na wskaźnik wykiełkowanych nasion. Próbki folii i zapinek uległy biodegradacji w wyniku procesu kompostowania przemysłowego w 100%, dlatego pozostałości nie utrudniły kiełkowania nasion w glebie.

Mniej wykiełkowanych nasion zaobserwowano w przypadku podłoża wzrostowego z udziałem 50% podłoża po zakończonym procesie biodegradacji w warunkach przydomowych.

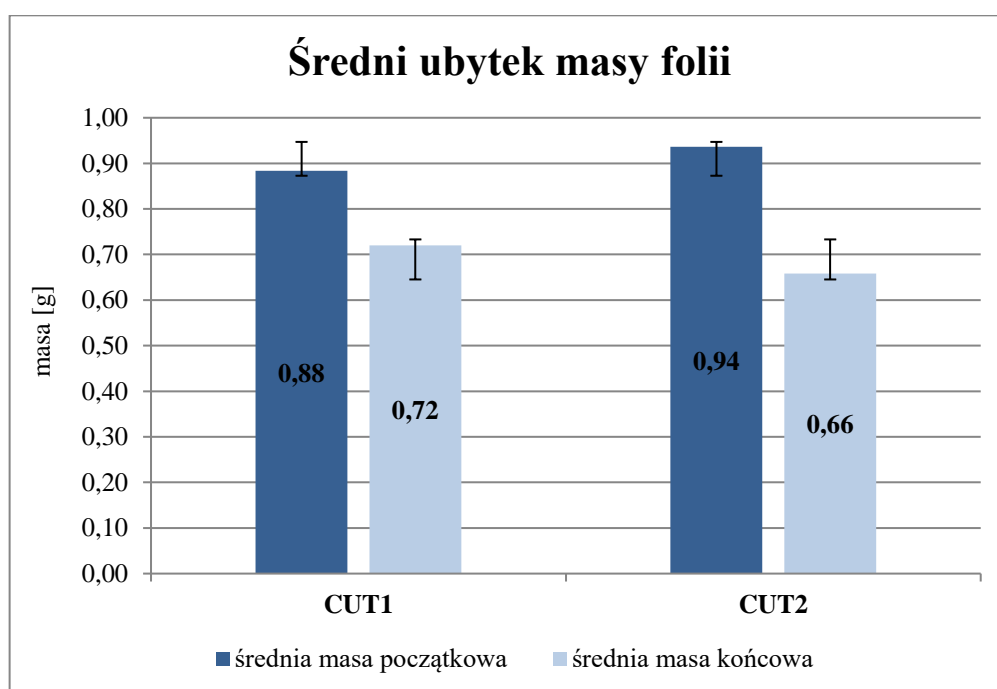
### 6.3. Wyniki badań podatności na rozkład folii i akcesoriów po procesie kompostowania laboratoryjnego

#### 6.3.1. Ubytek masy badanych folii i akcesoriów po procesie kompostowania

Próbki folii oraz akcesoriów zostały wyjęte z reaktorów, oczyszczone i poddane kondycjonowaniu obejmującym suszenie w temperaturze 40°C przez 48 godzin w urządzeniu SANYO STERILIZER MOV-212S. Następnie materiały zostały zważone w celu określenia ubytku masy po procesie kompostowania.

- **Zestawienie wyników dla folii CUT1 oraz CUT2**

Na rysunku 36 przedstawiono średnią masę próbek folii CUT1 oraz CUT2 zważonych przed oraz po kompostowaniu w warunkach laboratoryjnych.



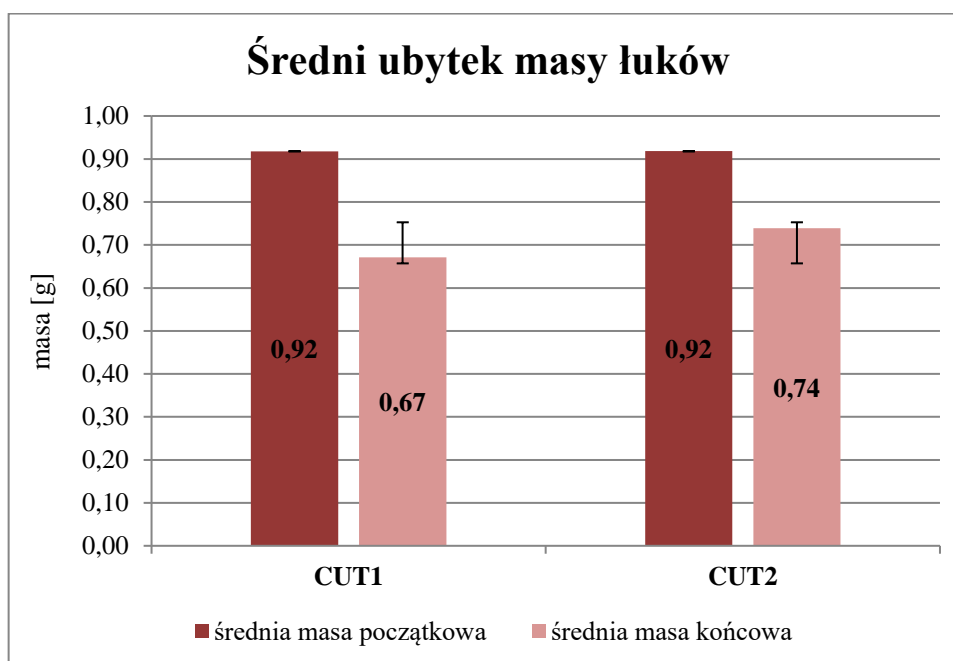
Rysunek 36. Porównanie średniej masy początkowej przed kompostowaniem do średniej masy końcowej po kompostowaniu dla próbek folii CUT1 i CUT2.

Z wykresu wynika, że folia biodegradowalna CUT2 napełniona 20% CaCO<sub>3</sub> uległa degradacji w większym stopniu w wyniku procesu kompostowania w porównaniu do folii CUT1 bez napełnienia. Średni ubytek masy dla folii CUT1 wyniósł 18,6%, a dla CUT2

wyniósł 29,5%. Różnica w ubytku masy mogła być spowodowana grubością folii. Folia CUT1 była 5  $\mu\text{m}$  grubsza niż CUT2, degradacja mogła postępować wolniej.

- **Zestawienie wyników dla łuków CUT1 oraz CUT2**

Na rysunku 37 przedstawiono średnią masę próbek łuków CUT1 oraz CUT2 zważonych przed kompostowaniem oraz po kompostowaniu.

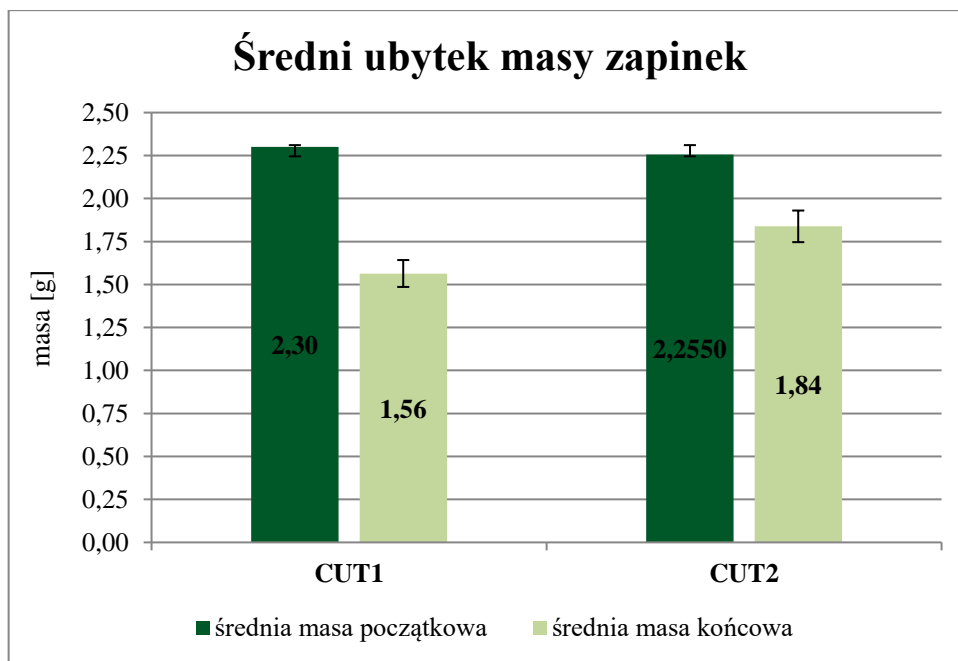


Rysunek 37. Porównanie średniej masy początkowej przed kompostowaniem do średniej masy końcowej po kompostowaniu dla łuków CUT1 i CUT2.

Stwierdzono ubytek masy dla wszystkich badanych łuków (10 powtórzeń). Średni ubytek masy dla łuków CUT1 wyniósł 26,8%, a dla CUT2 wyniósł 19,6%.

- **Zestawienie wyników dla zapinek CUT1 oraz CUT2**

Na rysunku 38 przedstawiono średnią masę akcesoriów, tj. zapinek CUT1 oraz CUT2 zważonych przed oraz po kompostowaniu.



Rysunek 38. Porównanie średniej masy początkowej przed kompostowaniem do średniej masy końcowej po kompostowaniu dla zapinek CUT1 i CUT2.

Po procesie kompostowania zaobserwowano degradację wszystkich badanych zapinek biodegradowalnych. Średni ubytek masy dla zapinek CUT1 wyniósł 32,1%, a dla CUT2 13,9%. W przypadku zapinek CUT1 doszło do częściowego rozdzielania i zagubienia w masie kompostowej. Część próbek nie została odnaleziona w masie kompostowej (powtórzenie nr 3, 5 i 8), dlatego ich ubytek masy uznano za całkowity.

### 6.3.2. Przebieg kompostowania oraz charakterystyka mieszanki kompostowej przed i po kompostowaniu

- **Parametry mieszanki kompostowej**

Mieszanka kompostowa została poddana analizie przed oraz po procesie kompostowania. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 26.

Waga mieszanki po procesie kompostowania zmniejszyła się w obu reaktorach w porównaniu do wagi przed rozpoczęciem badania. Masa początkowa mieszanki kompostowej w reaktorze nr 1 wynosiła 13,22 kg, po procesie wynosiła 8,1 kg (ubytek masy o 38,7%). Natomiast masa mieszanki kompostowej w reaktorze nr 2 z 14,65 kg uległa obniżeniu do 12,7 kg (ubytek masy o 13,3%). Gęstość nasypowa obniżyła się o 38,7% w reaktorze nr 1, natomiast w reaktorze nr 2 o 13,3%. Kompost po procesie charakteryzował się zbitą strukturą.

Tabela 26. Wybrane właściwości mieszanki kompostowej przed i po procesie kompostowania.

	Parametry mieszanki przed kompostowaniem		Parametry mieszanki po kompostowaniu	
	Reaktor nr 1	Reaktor nr 2	Reaktor 1	Reaktor nr 2
Gęstość nasypowa [kg/m <sup>3</sup> ]	244,81	271,30	150,00	235,19
pH	7,75	7,66	9,02	8,66
Konduktywność [ms/cm]	5,56	8,22	9,47	11,45
Zawartość wody [%]	67,26	69,00	58,99	78,32
Zawartość substancji organicznych [%]	78,90	79,35	73,58	70,70
Zawartość węgla organicznego [%]	43,84	44,08	40,88	39,28
Zawartość azotu organicznego [%]	2,88	2,95	3,22	3,00
Stosunek C:N	15:1	15:1	13:1	13:1

Po procesie kompostowania wzrosła wartość pH oraz konduktywność dla mieszaniny kompostowej. Wzrost pH może być spowodowany faktem tlenowego rozkładu związków organicznych, wówczas następuje przemiana azotu do amoniaku i wzrasta pH. Konduktywność wskazuje na obecność rozpuszczalnych soli w mieszankach kompostowych. Podczas gdy początkowe wartości konduktywności mieszanin wynosiły 5,56 i 8,22 ms/cm, końcowe wartości były bliskie wartości 9,47 i 11,45 ms/cm.

Optymalny zakres wilgotności mieszanki kompostowej przeznaczonej do kompostowania powinien wynosić od 50% do 55% (wagowo). Nadmierna wilgotność może prowadzić do niedoboru tlenu, a także do tworzenia odcieków zawierających potencjalnie zanieczyszczające związki. Porównując początkowe i końcowe zawartości wody w mieszankach kompostowych można zauważyć, że w reaktorze nr 1 wilgotność

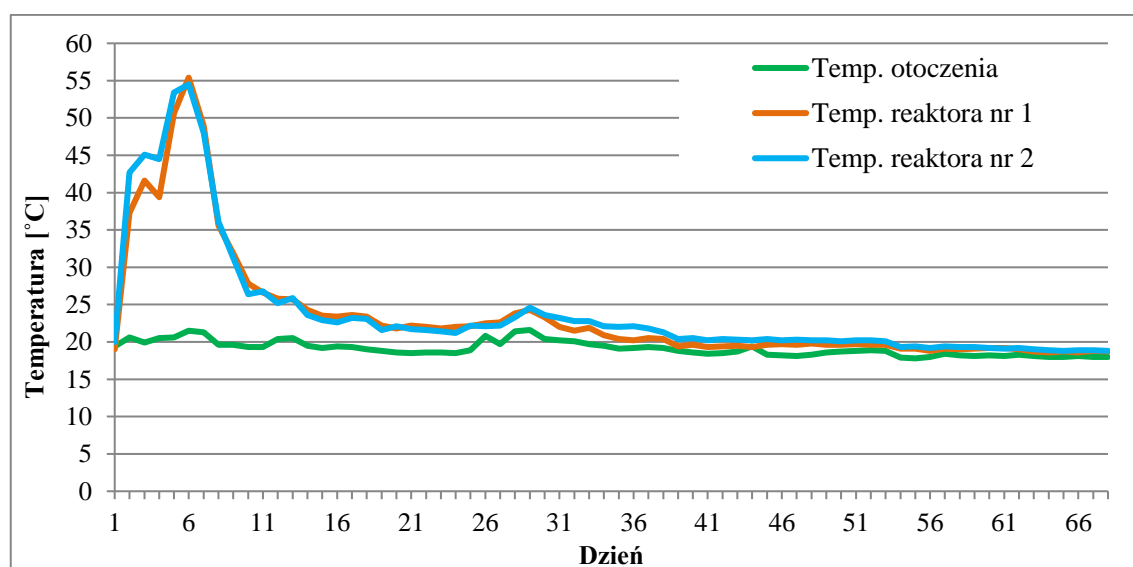
uległa obniżeniu po kompostowaniu. Z kolei w reaktorze nr 2 zaobserwowano wzrost zawartości wody. Wzrost zawartości wody po kompostowaniu w systemach zamkniętych z wymuszonym napowietrzaniem jest często obserwowany przez innych badaczy. Może to świadczyć o tym, że podczas kompostowania powstało więcej wody niż zostało odparowanej w wyniku wzrostu temperatury (Czekała i in., 2016; Janczak i in., 2017).

Zawartość substancji organicznych oraz węgla organicznego zmniejszyła się po procesie kompostowania. Stosunek węgla do azotu (C:N) wyniósł 15:1 dla mieszanki przed procesem kompostowania, po kompostowaniu 13:1.

Zawartość azotu amonowego po pierwszym tygodniu prowadzenia procesu kompostowania w skroplinach wyniosła 12,74 kg/m<sup>3</sup> dla reaktora nr 1 oraz 14,70 kg/m<sup>3</sup> dla reaktora nr 2. Z kolei w odciekach zawartość była równa 6,44 kg/m<sup>3</sup> dla reaktora 1 oraz 5,93 kg/m<sup>3</sup> dla reaktora 2. Zbyt mała ilość skroplin i odcieków w późniejszym czasie nie pozwoliła na ponowne oznaczenie.

- **Przebieg procesu kompostowania**

Proces kompostowania był monitorowany na podstawie dziennych pomiarów temperatury wewnątrz reaktorów przy pomocy czujnika z sondą. Zmiany temperatury podczas procesu kompostowania przedstawiono na rysunku 39.



Rysunek 39. Zmiany temperatury podczas procesu kompostowania w laboratoryjnych reaktorach do kompostowania.

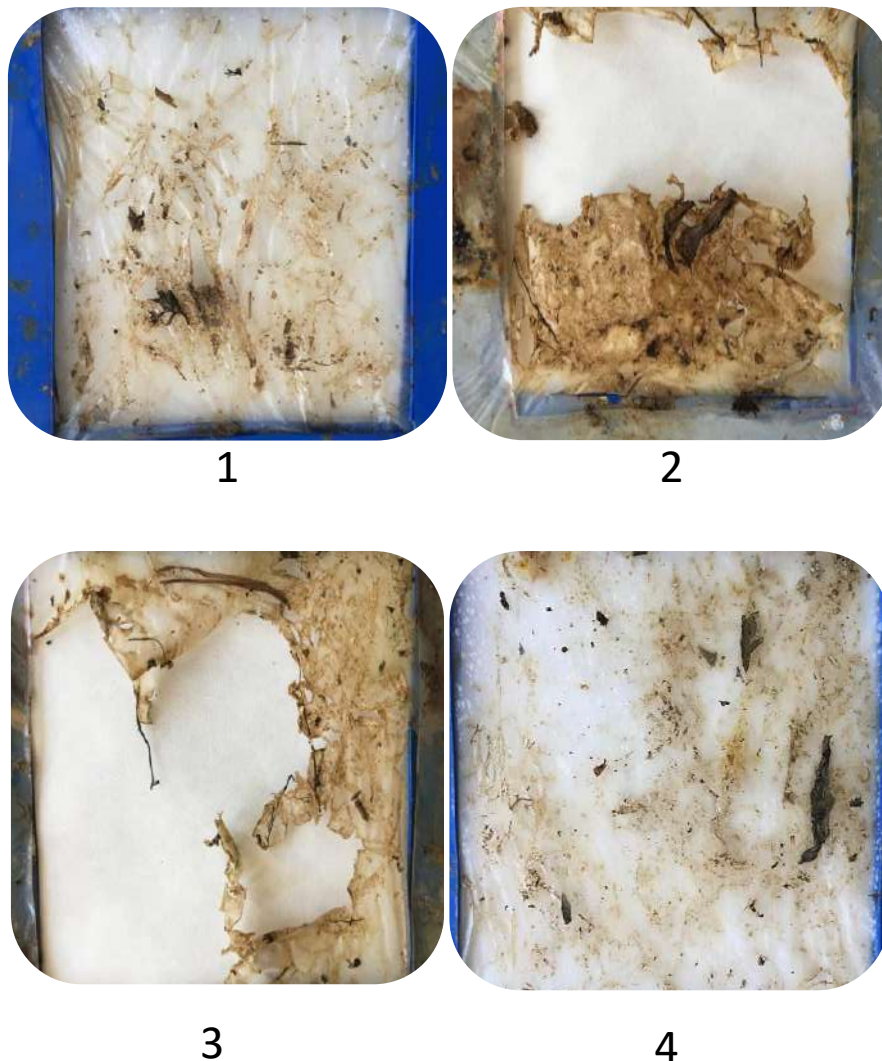
W pierwszych dniach nastąpił wzrost temperatury, podczas kolejnych dni temperatura podwyższyła się do 56°C, co świadczy o zapoczątkowaniu fazy termofilowej.

Równomierne obniżenie temperatury obserwuje się w fazie mezofilowej procesu kompostowania. Zaobserwowane zmiany temperatury są typowe dla procesu kompostowania i świadczą o prawidłowym przebiegu procesu.

### 6.3.3. Fotodokumentacja folii i akcesoriów po procesie kompostowania

- **Folie biodegradowalne CUT1**

Próbki folii biodegradowalnej CUT1 po procesie laboratoryjnego kompostowania w reaktorach zostały przedstawione na rysunku 40.







5



6



7



8

Rysunek 40. Próbkę folii CUT1 po zakończeniu kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

Próbki folii po procesie kompostowania uległy wyraźnej degradacji. Do folii przykleiły się liczne pozostałości z mieszanki kompostowej, częściowo wbudowane zostały w strukturę.

- **Folie biodegradowalne CUT2**

Próbki folii biodegradowalnej CUT2 po procesie kompostowania laboratoryjnego zostały przedstawione na rysunku 41.



1



2



3



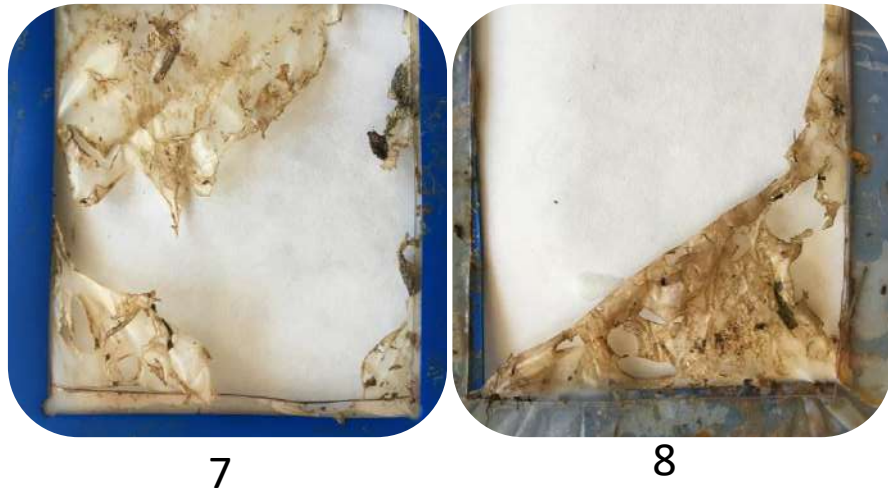
4



5



6



Rysunek 41. Próbki folii CUT2 po zakończeniu kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

Zaobserwowano, że próbki folii CUT2 uległy znacznej degradacji w porównaniu do próbek folii CUT1 bez napełnienia.

- **Łuki biodegradowalne CUT1**

Łuki biodegradowalne CUT1 po procesie kompostowania laboratoryjnego zostały przedstawione na rysunku 42.





Rysunek 42. Łuki biodegradowalne CUT1 po zakończeniu kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

- **Łuki biodegradowalne CUT2**

Na rysunku 43 przedstawiono łuki biodegradowalne CUT2 po procesie kompostowania laboratoryjnego.

Widoczne są ubytki i pęknięcia w strukturze próbek, świadczące o zapoczątkowanym procesie degradacji. Łuki CUT2 z dodatkiem biowęgla nie wykazały odmiennego zachowania w wyniku procesu kompostowania. Degradacja postępowała podobnie w przypadku łuków CUT1 jak i CUT2.





Rysunek 43. Łuki biodegradowalne CUT2 po zakończeniu kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

- **Zapinki biodegradowalne CUT1**

Na rysunku 44 przedstawiono zapinki biodegradowalne CUT1 po procesie kompostowania laboratoryjnego.



Rysunek 44. Zapinki biodegradowalne CUT1 po zakończeniu kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

- **Zapinki biodegradowalne CUT2**

Zapinki biodegradowalne CUT2 po procesie kompostowania laboratoryjnego zostały przedstawione na rysunku 45.



Rysunek 45. Zapinki biodegradowalne CUT2 po zakończeniu kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

Zarówno w strukturze zapinek CUT1 jak i CUT2 widoczne są oznaki rozkładu. Zaobserwowano ubytki i degradację w miejscu łączenia, co spowodowało rozdzieleniem na części niektórych akcesoriów.

#### **6.3.4. Wyniki analizy mikroskopowej**

Zdjęcia mikroskopowe dla folii biodegradowalnych oraz akcesoriów, tj. łuków i zapinek, wykonano po procesie kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

- **Folia biodegradowalna CUT1**

Zdjęcia mikroskopowe w powiększeniu 10x oraz 50x dla folii CUT1 po kompostowaniu laboratoryjnym przedstawiono na rysunkach 46 i 47.



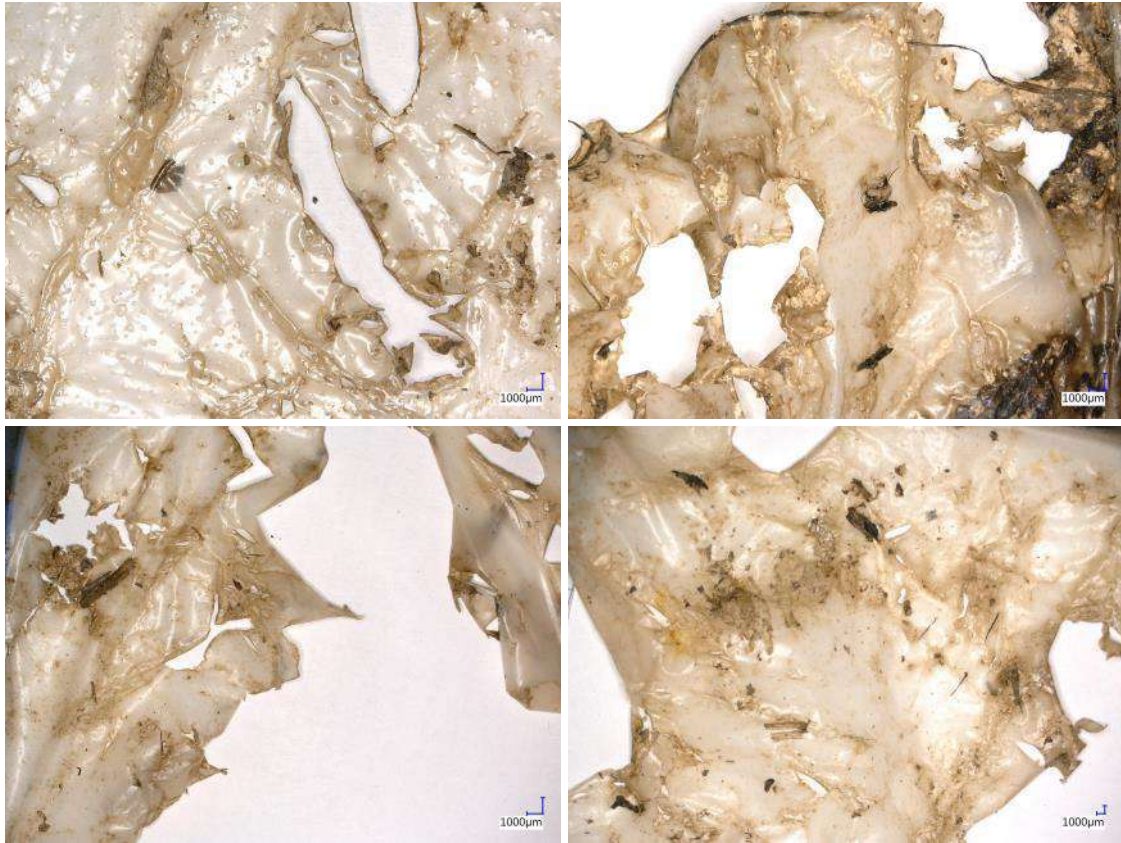
Rysunek 46. Folie CUT1 widoczne w powiększeniu 10x.



Rysunek 47. Folie CUT1 widoczne w powiększeniu 50x.

- **Folia biodegradowalna CUT2**

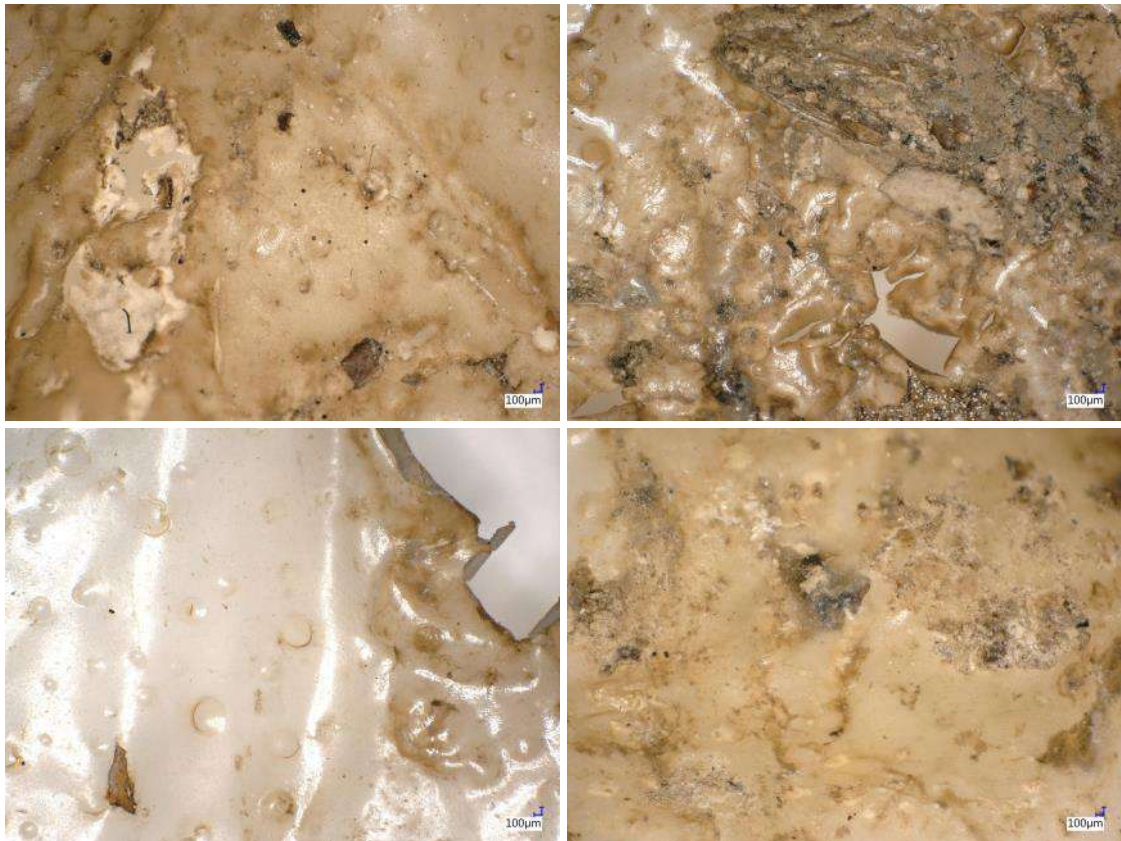
Zdjęcia mikroskopowe w powiększeniu 10x oraz 50x dla folii CUT2 przedstawiono na rysunkach 48 i 49.



Rysunek 48. Folie CUT2 widoczne w powiększeniu 10x.

Oba rodzaje folii wykazały degradację w wyniku procesu kompostowania. Widoczne są ubytki w strukturze folii, tj. bruzdy, rysy, pęknięcia, przetarcia i szczeliny. Zaobserwować również można pęcherzyki, które zapoczątkowują rozwarstwienie folii i proces degradacji. Pomiędzy tymi ubytkami, widoczna jest pierwotna struktura powierzchni folii z charakterystycznymi wgłębieniami powstałymi podczas procesu wytłaczania folii. Na zdjęciach można również zauważyć pozostałości gleby oraz resztki roślinne.





Rysunek 49. Folie CUT2 widoczne w powiększeniu 50x.

Przedstawione wyniki badań mikroskopowych potwierdzają znaczny spadek właściwości mechanicznych badanych folii wynikający z procesu degradacji. Folia biodegradowalna podczas kontrolowanego procesu kompostowania zgodnie z normą EN 13432 powinna ulec przekształceniu w 90% do dwutlenku węgla i wody w okresie do 6 miesięcy. Pomimo, że kompostowanie laboratoryjne trwało ok. 4 miesiące, można stwierdzić wyraźnie zapoczątkowany proces biodegradacji.

- **Łuki biodegradowalne CUT1**

Zdjęcia mikroskopowe w powiększeniu 10x oraz 50x dla łuków biodegradowalnych CUT1 przedstawiono na rysunkach 50 i 51.



Rysunek 50. Łuki biodegradowalne CUT1 przed kompostowaniem (po lewej) i po kompostowaniu (po prawej) widoczne w powiększeniu 10x.



Rysunek 51. Degradacja łuków biodegradowalnych CUT1 w wyniku kompostowania laboratoryjnego.

- **Łuki biodegradowalne CUT2**

Na rysunkach 52 i 53 przedstawiono zdjęcia mikroskopowe w powiększeniu 10x oraz 50x dla biodegradowalnych łuków CUT2.



Rysunek 52. Łuki biodegradowalne CUT2 przed kompostowaniem (po lewej) i po kompostowaniu (po prawej) widoczne w powiększeniu 10x.

Analizy mikroskopowe łuków wskazują, że zostały one częściowo zdegradowane w wyniku procesu kompostowania. Zarówno łuki bez napełnienia, jak i z napełnieniem biowęglowym, uległy defragmentacji. Białe łuki w wyniku procesu kompostowania uległy zabarwieniu. Widoczne ubytki, pęknięcia oraz bruzdy świadczą o zapoczątkowanym procesie degradacji. Akcesoria ogrodnicze zostały pokryte pozostałościami roślinnymi. Widoczne są również kolonie grzybów.



Rysunek 53. Degradacja łuków biodegradowalnych CUT2 w wyniku kompostowania laboratoryjnego.

- **Zapinki biodegradowalne CUT1**

Zdjęcia mikroskopowe w powiększeniu 10x oraz 50x dla zapinek biodegradowalnych CUT1 przedstawiono na rysunkach 54 i 55.



Rysunek 54. Zapinki biodegradowalne CUT1 przed kompostowaniem (po lewej) i po kompostowaniu (po prawej) widoczne w powiększeniu 10x.



Rysunek 55. Degradacja zapinek biodegradowalnych CUT1 w wyniku kompostowania laboratoryjnego.

- **Zapinki biodegradowalne CUT2**

Na rysunkach 56 i 57 przedstawiono zdjęcia mikroskopowe w powiększeniu 10x oraz 50x dla zapinek biodegradowalnych CUT2.



Rysunek 56. Zapinki biodegradowalne CUT2 przed kompostowaniem (po lewej) i po kompostowaniu (po prawej) widoczne w powiększeniu 10x.

Zapinki częściowo uległy defragmentacji, podobnie jak w przypadku łuków biodegradowalnych. Wgłębienia w strukturze świadczą o postępującym procesie degradacji. Niektóre zapinki podczas kompostowania uległy rozdzieleniu. Powodem mogła być cieńsza struktura polimeru w miejscu zgięcia akcesoriów. Na powierzchni zapinek widoczne są również kolonie grzybów z zarodnikami.



Rysunek 57. Degradacja zapinek biodegradowalnych CUT2 w wyniku kompostowania laboratoryjnego.

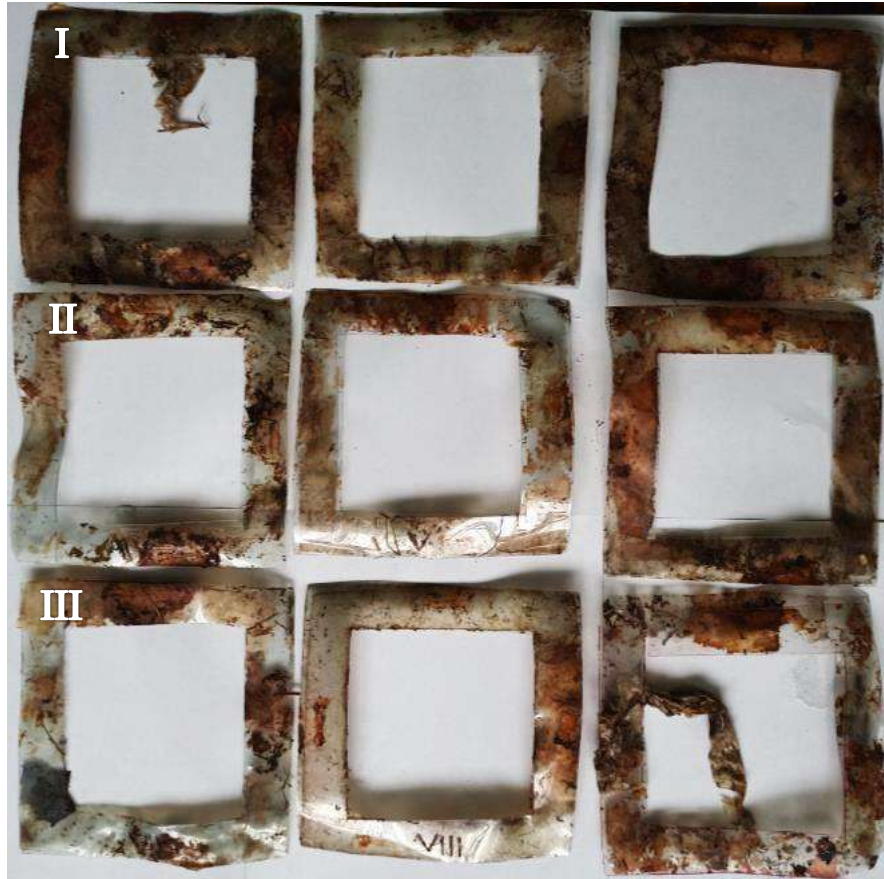
#### **6.4. Wyniki badań podatności na rozkład folii i akcesoriów po procesie w kompostowniku przydomowym**

Próbki folii CUT1 i CUT2 oraz akcesoriów ogrodniczych wyjęto z kompostownika przydomowego po około 18 miesiącach. Folia CUT3 była kompostowana 11 miesięcy, ponieważ została dodana do kompostownika przydomowego 7 miesięcy później.



- **Folie biodegradowalne CUT1 i CUT2**

Na rysunku 58 przedstawiono próbki folii CUT1 oraz CUT2 po zakończonym procesie kompostowania w warunkach przydomowych.



Rysunek 58. Pozostałości próbek CUT1 (I rząd) oraz CUT2 (II i III rząd) po wyjęciu z kompostownika przydomowego.

Próbki folii CUT1 oraz CUT2 uległy rozłożeniu w 100%. W dwóch przypadkach zaobserwowano niewielkie pozostałości, zabrudzone resztkami roślinnymi.

- **Folia biodegradowalna CUT3**

Próbki folii czarnej CUT3 po zakończonym procesie kompostowania w warunkach przydomowych przedstawiono na rysunku 59.



Rysunek 59. Pozostałości próbek CUT3 po wyjęciu z kompostownika przydomowego.

Próbki folii biodegradowalnej CUT3 uległy rozkładowi w 100% po 9 miesiącach przydomowego kompostowania.

- **Łuki i zapinki biodegradowalne**

Łuki i zapinki po zakończonym procesie kompostowania przydomowego przedstawiono na rysunku 60 oraz 61.



Rysunek 60. Próbki akcesoriów, tj. zapinek i łuków CUT1 po procesie kompostowania przydomowego.



Rysunek 61. Próbkki akcesoriów, tj. zapinek i łuków CUT2 po procesie kompostowania przydomowego.

Zaobserwowano niewielkie bruzdy i ubytki w badanych próbkach. Maksymalny ubytek masy po kompostowaniu dla łuków wyniósł 3,6%, natomiast dla zapinek 9,6%. Stwierdzono, że proces degradacji akcesoriów biodegradowalnych w wyniku kompostowania przydomowego nie był tak intensywny jak podczas kompostowania laboratoryjnego. Przyczyną mogła być niewystarczająco wysoka temperatura i wilgotność, które spowolniły proces degradacji (Kalita i in., 2021).

- **Pozostałości odpadów ze zużytych folii po kompostowaniu przydomowym**

Odpady ze zużytych folii (CUT2 oraz CUT3) zebrano z grządek po uprawie pomidorów, a następnie poddano kompostowaniu w przydomowym kompostowniku przez 11 miesięcy. Pozostałości odpadów ze zużytej folii CUT2 i CUT3 przedstawiono na rysunku 62.

Zużyte folie, pomimo znacznych rozmiarów zostały częściowo zdegradowane w wyniku przeprowadzonego procesu kompostowania przydomowego. Folia uległa defragmentacji, widoczne są przetarcia i ubytki.



Rysunek 62. Pozostałości odpadów ze zużytej folii CUT2 (po lewej) i CUT3 (po prawej) po wyjęciu z kompostownika przydomowego.

#### 6.5. Testowanie folii i akcesoriów w warunkach rzeczywistych

- **Folie biodegradowalne**

Folie biodegradowalne testowano podczas uprawy pomidorów w szklarni, co udokumentowano za pomocą zdjęć wykonanych po 1, 2, 4 i 5 miesiącu uprawy.



Rysunek 63. Folia biodegradowalna ułożona na zagonach po 1 miesiącu uprawy pomidorów. Na zdjęciach przedstawiono folię CUT2 oraz CUT3.



Rysunek 64. Folia biodegradowalna ułożona na zagonach po 2 miesiącach uprawy pomidorów. Na zdjęciach przedstawiono folię CUT1 oraz CUT3.

Nie zaobserwowano zmian w strukturze folii po dwóch miesiącach uprawy na zagonach. Chwasty zaczęły pojawiać się wyłącznie pod białą folią po ponad 2 miesiącach uprawy roślin. Intensywność wzrostu chwastów była mniejsza w porównaniu do zagonów nie pokrytych folią. Pod czarną folią nie wyrosły chwasty ze względu na dodatek czarnego pigmentu, który utrudniał przedostanie się promieni słonecznych.

Chwasty rosnące pod folią spowodowały pojawienie się naprężeń w badanych foliach, które z czasem zaczęły pękać. Po 3 miesiącach uprawy pomidorów, zaobserwowano pierwsze oznaki degradacji folii, tj. pęknięcia i przetarcia.

Wszystkie testowane folie białe wykazały zaawansowany proces degradacji pomiędzy 4 a 5 miesiącem od rozłożenia na zagonach. Straciły połysk i gładką powierzchnię, a w strukturze widoczne były większe ubytki (rys. 65).



Rysunek 65. Folia CUT1 oraz CUT2 po blisko 5 miesiącach użytkowania na zagonach.



Rysunek 66. Czarna folia CUT3 po ponad 5 miesiącach użytkowania na zagonach.

Nie zaobserwowano wzrostu chwastów pod czarną folią. Degradacja przebiegała znacznie wolniej w porównaniu do folii białych. Po 4 miesiącu zauważalne były niewielkie dziury i przetarcia. Degradacja przebiegała intensywniej w piątym miesiącu od rozłożenia folii na zagonach. W przypadku folii narażonych na działanie promieni słonecznych można mówić o procesie fotodegradacji.



Rysunek 67. Pozostałości folii biodegradowalnej w ziemi po uprawie pomidora.

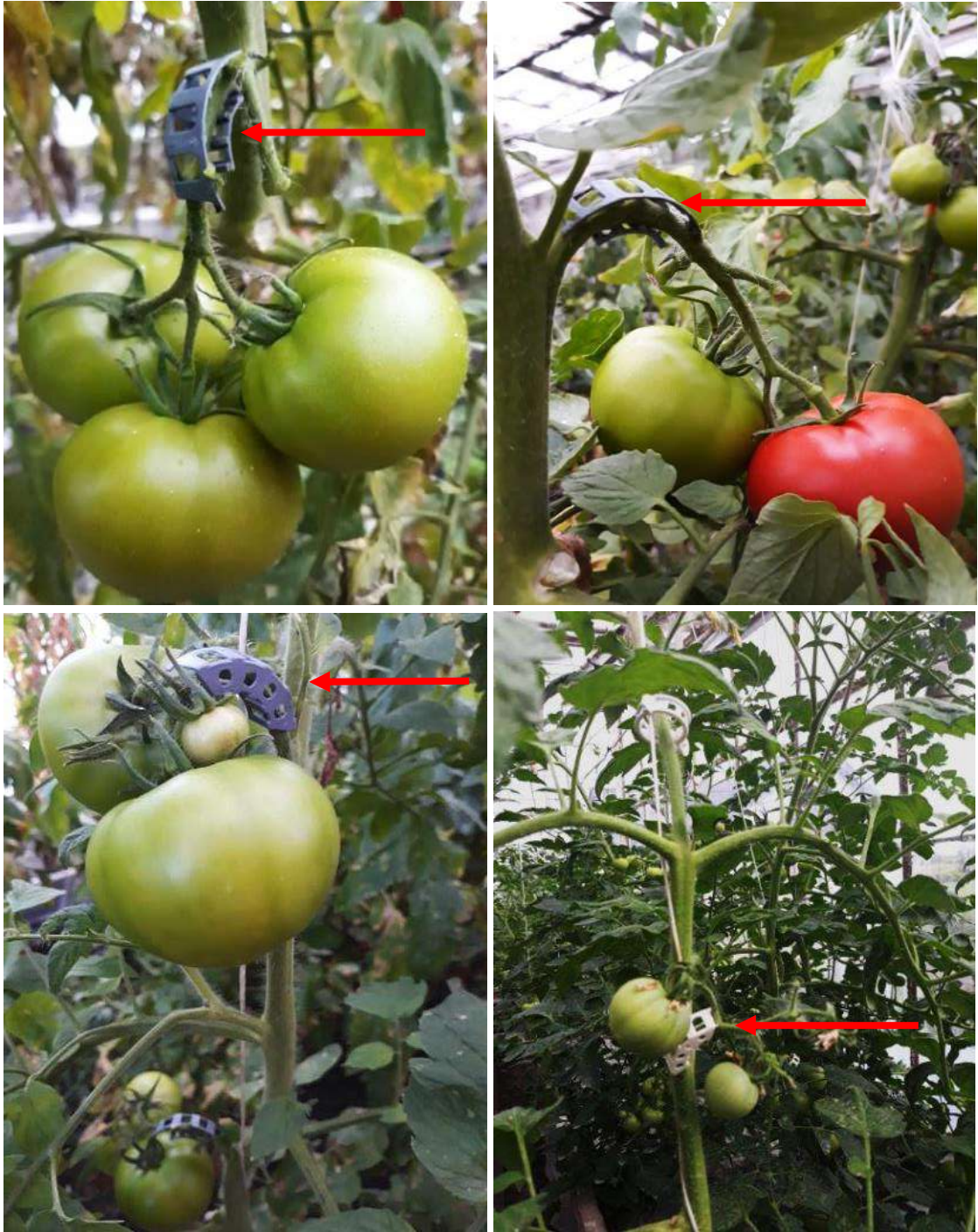
Folię biodegradowalną pozostawiono na zagonach po zakończonym sezonie uprawy pomidora. Z powodu okresu zimowego nie zaplanowano kolejnej uprawy roślin. Folia z czasem uległa znacznej degradacji, a po 10 miesiącach pozostały pojedyncze fragmenty zmieszane z ziemią.

- **Akcesoria ogrodnicze**

Akcesoria biodegradowalne, tj. zapinki i łuki zostały założone w trakcie uprawy pomidorów. Nie pękały podczas okresu wegetacji roślin.

Zastosowanie łuków i zapinek biodegradowalnych ułatwiło uprawę pomidorów szklarniowych. Akcesoria z powodzeniem posłużyły do podtrzymywania gron oraz utrzymania łodyg w pozycji pionowej. Na rysunkach 68 i 69 przedstawiono łuki i zapinki biodegradowalne wspomagające proces uprawy pomidorów szklarniowych.





Rysunek 68. Łuki biodegradowalne zastosowane podczas uprawy pomidorów w szklarni.



Rysunek 69. Zapinki biodegradowalne zastosowane podczas uprawy pomidorów w szklarni.

## **7. DYSKUSJA WYNIKÓW**

Zwiększające się wykorzystanie folii do ściółkowania i akcesoriów do uprawy roślin z tworzyw sztucznych przyczynia się do powstawania znacznych obciążeń na środowisko, które obejmują głównie zagospodarowywanie odpadów ze zużytych folii do ściółkowania z tworzyw sztucznych oraz zanieczyszczenia gleb mikroplastikami. Obiecującą alternatywą mogą okazać się folie i akcesoria otrzymane z surowców biologicznych, ulegające biodegradacji. Poza korzyściami, jakie niosą ze sobą folie do ściółkowania z tworzyw sztucznych, folie biodegradowalne dodatkowo przynoszą korzyści dla środowiska. Biodegradowalne folie do ściółkowania po zakończeniu cyklu upraw można pozostawić na polu i zaorać, co może znacznie ograniczyć powstawanie odpadów z tworzyw sztucznych z upraw roślin oraz zapobiegać zanieczyszczeniu gleby, np. mikroplastikami (Malinconico, 2017; Yin i in., 2019).

W pracy podjęto próbę oceny możliwości zagospodarowania odpadów z tworzyw biodegradowalnych, tj. zużytych folii i akcesoriów wspomagających uprawę roślin, za pomocą kompostowania. W tym celu wyprodukowano trzy rodzaje folii biodegradowalnych oraz cztery rodzaje akcesoriów: zapinki i łuki biodegradowalne, które następnie poddano badaniom, tj. właściwości mechanicznych, termicznych, mikroskopowych oraz analizie chemicznej. Ponadto, folie i akcesoria zostały zbadane pod kątem podatności na biodegradację w wyniku kompostowania przemysłowego, laboratoryjnego oraz przydomowego. Otrzymane folie i akcesoria testowano podczas szklarniowej uprawy pomidorów.

### **Wpływ wybranych napelnaczy na właściwości wytworzonych folii i akcesoriów**

Określenie wpływu napelnaczy, tj. węgla wapnia i sadzy, na właściwości biodegradowalnych folii do ściółkowania oraz biowęgla na właściwości akcesoriów biodegradowalnych było możliwe na podstawie przeprowadzonej analizy właściwości mechanicznych, termicznych oraz strukturalnych. Wyprodukowanie folii z napełnieniem biowęglowym nie powiodło się z uwagi na trudności w przetwarzaniu biowęgla podczas prób technologicznych. W zależności od zastosowanego napelnacza oraz jego zawartości masowej, zmieniły się właściwości mechaniczne gotowych wyrobów. Badań właściwości mechanicznych nie wykonano dla folii biodegradowalnych po procesie kompostowania ze względu na znaczną degradację.

Folia CUT3 z dodatkiem sadzy (5% masowo) cechowała się najkorzystniejszymi właściwościami mechanicznymi w porównaniu do folii CUT1 bez napełnienia oraz folii CUT2 z napełnieniem 20% CaCO<sub>3</sub>. Ponadto, folia CUT3 najlepiej sprawdziła się podczas testowania w uprawie szklarniowej pomidora jako folia do ściółkowania gleby. Należy wspomnieć, że ten rodzaj folii całkowicie ograniczył wzrost chwastów w porównaniu do folii CUT1 oraz CUT2 o mlecznobiałym zabarwieniu. Pierwsze oznaki degradacji folii CUT3 zaobserwowano po czwartym miesiącu. Zapoczątkowanie procesu degradacji nastąpiło wolniej o 1 miesiąc w porównaniu do folii CUT1 oraz CUT2. Na przykład, wpływ dodatku sadzy do kompozytu biodegradowalnego PLA/PHA w ilości 3% wagowo badali Mosnáčková i in. (2019). Zaobserwowano spowolnienie fotodegradacji folii podczas uprawy papryki słodkiej. Pomimo pogorszenia właściwości mechanicznych po 90 dniach użytkowania, folia była nadal zwarta, bez widocznych pęknięć.

Zastosowanie dodatku węgla wapnia do folii CUT2 spowodowało pogorszenie jej właściwości wytrzymałościowych (rys. 23). Folia ta cechowała się najmniejszą grubością (25 µm) oraz wysokim stopniem napełnienia, co mogło znacząco wpłynąć na pogorszenie właściwości. Można stwierdzić, że ten rodzaj folii będzie bardziej przydatny do ściółkowania gleb w uprawie roślin o krótszym okresie wegetacji lub w miejscach, gdzie wpływ warunków atmosferycznych nie będzie znacząco oddziaływał na właściwości folii do ściółkowania, np. w szklarni. Degradacja folii może nasilić się pod wpływem, m.in. oddziaływania warunków atmosferycznych, takich jak wiatr i opady lub w zależności od środowiska w jakim się znajduje (Havstad i in., 2021).

Potwierdzeniem przydatności folii z dodatkiem węgla wapnia są testy przeprowadzone podczas uprawy pomidorów w szklarni. Zaobserwowano, że degradacja folii bez napełnienia (CUT1) oraz z napełnieniem węgla wapnia (CUT2) przebiegała bardzo podobnie na grządkach w szklarni. Pomimo mniej korzystnych właściwości wytrzymałościowych dla folii z dodatkiem węgla wapnia stwierdzono, że obie folie spełniały swoją funkcję tak samo w trakcie trwania okresu wegetacyjnego pomidorów, natomiast po zakończeniu uprawy nie stwierdzono różnic w tempie degradacji na zagonach zarówno dla folii CUT1 jak i CUT2 (rys. 65). Istotnym czynnikiem będzie w tym przypadku osiągnięcie równowagi między zachowaniem właściwości wytrzymałościowych podczas użytkowania folii, a gwałtownym spadkiem wytrzymałości pod koniec procesu wegetacji.

Węgiel wapnia ze względu na dostępność i niski koszt jest jednym z często wykorzystywanych napełniaczy nieorganicznych w tworzywach termoplastycznych,

w celu polepszenia właściwości mechanicznych matrycy polimeru (Yang i in., 2021). W wyniku przeprowadzonych badań nie stwierdzono poprawy właściwości mechanicznych folii poprzez zastosowanie węgla wapnia. Według badaczy, możliwe jest natomiast obniżenie kosztów produkcji kompozytu oraz ułatwienie procesu degradacji folii z powodu tworzenia pustych przestrzeni, do których drobnoustroje mają łatwiejszy dostęp (Qi i in., 2021). Wykorzystanie folii z dodatkiem związków wapniowych podczas ściółkowania, a następnie zaoranie jej po sezonie uprawnym, może pozytywnie wpłynąć na jakość gleby i przyczynić się do zasilenia jej w związki mineralne, a tym samym wspomóc metabolizm mikroorganizmów oraz wzrost roślin (Kowalska i in., 2019; Wang i in., 2021). Wpływ napełnienia folii węglanem wapnia badali również Surya i in. (2021). Stwierdzili przyspieszenie degradacji folii i pozytywny wpływ na jakość gleby. W innych badaniach zaobserwowano, że zawartość węgla wapnia w ilościach 20% lub 30% może być głównym czynnikiem wpływającym na degradację folii do ściółkowania (Qi i in., 2021).

Otrzymane wyniki przemian termicznych zarówno dla folii CUT1, CUT2, CUT3 oraz zapinek i łuków biodegradowalnych pozwalają stwierdzić, że proces kompostowania w znaczący sposób wpływa na przemiany termiczne rejestrowane dla badanych materiałów. Dotyczy to zarówno wartości temperatur charakterystycznych indukowanych przemian, jak również entalpii topnienia tychże przemian. W wyniku procesu kompostowania (wzrostu temperatury oraz zawartości wilgoci w reaktorze laboratoryjnym) mogło dochodzić do przemian związanych ze zmianami strukturalnymi polimeru.

W badaniach Musioła i in. (2022) stwierdzono, że obecność biowęgla w ilości 10, 15, 20 i 30% nie wpłynęła znacząco na stabilność termiczną kompozytów PBAT/PLA w porównaniu z czystą osnową. W wynikach DSC zaobserwowano jedynie niewielki wzrost stopnia krystaliczności. Ocena wizualna wykazała, że wzrost zawartości biowęgla spowodował większą ilość pęknięć na powierzchniach próbek. Wartości właściwości termicznych po degradacji nie wskazują na wpływ biowęgla na mechanizm degradacji matrycy polimerowej.

### **Biodegradacja w wyniku kompostowania przemysłowego i przydomowego**

Analizie chemicznej oraz badaniom biodegradowalności, kompostowalności i fitotoksyczności poddano wyłącznie folię biodegradowalną CUT3 z dodatkiem sadzy oraz akcesorium, tj. zapinkę biodegradowalną CUT2 z napełnieniem biowęglowym.

W wyniku analizy chemicznej nie została przekroczona maksymalna zawartość oznaczanych pierwiastków dla próbki folii CUT3 oraz zapinki CUT2 (tab. 20, 21). Kompostowanie przemysłowe w temperaturze 58°C pozwoliło na całkowitą degradację obu rodzajów badanych próbek folii CUT3 oraz zapinki CUT2. Folia CUT3 zdegradowała całkowicie po 112 dniach (rys. 28), natomiast zapinka po 140 dniach (rys. 29). Czas degradacji był dłuższy dla zapinki ze względu na większą masę.

Dla porównania, przeprowadzono badania biodegradacji tych samych rodzajów próbek w środowisku kompostowym w kontrolowanych warunkach przydomowych (30°C). Degradacja folii CUT3 oraz zapinki CUT2 postępowała wolniej w porównaniu do warunków przemysłowych. Po 336 dniach procesu kompostowania, rozkład folii CUT3 nastąpił średnio w 92,6%, a zapinki maksymalnie w 5,43%. Na postęp degradacji duży wpływ miała podwyższona temperatura (55–60°C), wysoka wilgotność, obecność tlenu i okresowe mieszanie, co jest charakterystyczne dla kompostowania w warunkach przemysłowych (Dusselier i in., 2022).

Badanie dezintegracji folii CUT3 oraz zapinki CUT2 wykazało, że po zakończeniu procesu biodegradacji w warunkach przemysłowych rozkład tych materiałów nastąpił na fragmenty mniejsze niż 2 mm (tab. 24). Z kolei po biodegradacji w warunkach przydomowych, folia CUT3 zdegradowała w 41% na fragmenty mniejsze niż 2 mm, natomiast zapinka rozłożyła się wyłącznie na frakcje większe niż 2 mm (tab. 25).

Testy kiełkowania nasion gorczycy, pszenicy i rzeżuchy przeprowadzono na podłożu zmieszonym z 25% i 50% zawartością podłoża po biodegradacji folii CUT3 oraz zapinki CUT2. Proces biodegradacji odbywał się w środowisku przemysłowym oraz przydomowym, stąd różnice w degradacji folii CUT3 i zapinki CUT2. Pozostałości po biodegradacji w warunkach przemysłowych zapinki CUT2 nie wpłynęły na wskaźnik wykiełkowania nasion gorczycy, pszenicy i rzeżuchy. Natomiast w przypadku folii CUT3, zaobserwowano spadek wskaźnika wykiełkowania nasion pszenicy i rzeżuchy o 10%. Pozostałości CUT3 oraz CUT2 po biodegradacji w warunkach przydomowych spowodowały, że nasiona pszenicy nie wykiełkowały w 20%. Wskaźnik wykiełkowania gorczycy był wyższy w glebie z pozostałościami zarówno CUT3 jak i CUT2 o odpowiednio: 20% i 10%. Jak wskazuje literatura, biowęgiel może wpływać pozytywnie na kiełkowanie nasion, wzrost roślin i kwitnienie (Joseph i in., 2021). Kiełkowanie rzeżuchy było podobne w podłożu wzorcowym jak i podłożu z zawartością CUT2, z kolei o 60% niższy wskaźnik kiełkowania obserwuje się w glebie z pozostałościami CUT3.

## Rozkład folii i akcesoriów w wyniku procesu kompostowania w reaktorach laboratoryjnych i przydomowym kompostowniku

Wszystkie wyprodukowane rodzaje biodegradowalnych folii (CUT1, CUT2, CUT3) oraz akcesoriów, tj. zapinek (CUT1, CUT2) i łuków (CUT1, CUT2) poddano procesowi kompostowania laboratoryjnego oraz przydomowego w celu określenia ich podatności na rozkład. Zmiany temperatury podczas kompostowania w reaktorach laboratoryjnych oraz analiza parametrów mieszanki kompostowej przed i po kompostowaniu potwierdzają, że proces kompostowania przebiegał prawidłowo. Średni ubytek masy dla badanych folii i akcesoriów w wyniku kompostowania laboratoryjnego został przedstawiony w tabeli 27.

Tabela 27. Średni ubytek masy folii, łuków i zapinek biodegradowalnych po procesie kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

	Ubytek masy [%]
Folie CUT1	18,6±10,3
Folie CUT2	29,5±6,5
Łuki CUT1	26,8±13,6
Łuki CUT2	19,6±11,5
Zapinki CUT1	32,1±34,6
Zapinki CUT2	13,9±9,8

Analizując próbki folii CUT1 (bez wypełniacza) oraz CUT2 (z 20% CaCO<sub>3</sub>) po procesie kompostowania laboratoryjnego można stwierdzić, że ubytek masy był większy dla folii z wypełnieniem. Średni ubytek masy dla folii CUT1 wyniósł 18,6%, a dla CUT2 29,5%. Dodatek mineralny węgla wapnia zintensyfikował proces degradacji powierzchni folii, co było widoczne w badaniach pod mikroskopem w postaci rozległych pęknięć, naprężeń i rozwarstwień. Ubytek masy po procesie kompostowania laboratoryjnego dla folii CUT2 jest większy o średnio 10,9% w porównaniu do folii CUT1. Różnica w grubościach folii (wynosząca 5 µm) mogła mieć znaczenie w postępie degradacji.

W wyniku prowadzonego kompostowania w przydomowym kompostowniku przez 18 miesięcy zaobserwowano, że wszystkie rodzaje folii uległy degradacji. Całkowity rozkład próbek folii uniemożliwił określenie ubytku masy. Folia czarna CUT3 została umieszczona w kompostowniku 7 miesięcy później niż folie CUT1 i CUT2, mimo to

zdegradowała praktycznie w 100%. Można więc wywnioskować, że rozkład folii CUT3 w kompostowniku przydomowym trwał krócej niż 11 miesięcy.

Folia CUT3 (z dodatkiem sadzy) została poddana biodegradacji w warunkach przemysłowych i przydomowych oraz kompostowaniu w przydomowym kompostowniku. Kompostowanie tej folii w reaktorze laboratoryjnym nie było możliwe ze względu na wyprodukowanie folii CUT3 w późniejszym czasie. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano całkowitą degradację próbek folii CUT3. W warunkach przemysłowych folia CUT3 zdegradowała w 100% w ciągu 16 tygodni, w warunkach przydomowych rozkład nastąpił w 96,7% w czasie 48 tygodni, natomiast w kompostowniku przydomowym po 11 miesiącach zaobserwować można było pozostałości w postaci pojedynczych fragmentów (rys. 59).

Wyprodukowane folie biodegradowalne z dodatkiem węgla wapnia i sadzy mogą stać się obiecującą alternatywą dla istniejących folii z tworzyw sztucznych do zastosowań rolniczych i ogrodniczych. Wiele „biodegradowalnych” materiałów obecnych na rynku zostało przebadanych w ostatnich latach, część z nich cechuje się stosunkowo słabymi właściwościami mechanicznymi, wysoką ceną oraz brakiem możliwości skutecznej degradacji (Adhikari i in., 2016). Folie CUT ulegają degradacji zarówno metodą kompostowania przemysłowego jak i przydomowego. Dalsze badania mogą obejmować zagospodarowanie zużytych folii CUT poprzez pozostawienie ich w glebie po ściółkowaniu. Jak wynika z badań przeprowadzonych przez Sintima i in. (2020), rozkład folii w wyniku kompostowania jest szybszy w porównaniu do środowiska glebowego (Sintim i in., 2020).

W wyniku procesu kompostowania laboratoryjnego stwierdzono częściową degradację akcesoriów biodegradowalnych potwierdzoną badaniami pod mikroskopem. Zaobserwowano zróżnicowane wartości ubytku masy dla łuków i zapinek, zarówno bez dodatku biowęgla, jak i z dodatkiem. Średnie wartości ubytków masy przedstawiono w tabeli 27. Średni ubytek masy dla badanych łuków CUT1 jest większy o 7,2% w porównaniu do łuków CUT2 z dodatkiem biowęgla. Ubytek masy dla łuków biodegradowalnych jest zróżnicowany, co mogło być spowodowane umieszczeniem próbek w heterogenicznej masie kompostowej w reaktorach. W wyniku analiz stwierdzono, że dodatek biowęgla do polimeru biodegradowalnego w ilości 1% nie wpłynął istotnie na proces degradacji. Ponadto, na podstawie zdjęć mikroskopowych (rys. 50-53) oraz fotodokumentacji (rys. 42-43) nie zaobserwowano wyraźnych różnic w degradacji łuków.



W przypadku zapinek biodegradowalnych CUT1, część z nich uległa rozdzieleniu i nie została odnaleziona w masie kompostowej. Ubytek masy nieodnalezionych próbek uznano za całkowity, stąd wynik średniej arytmetycznej jest o wiele wyższy w porównaniu do zapinek z napełnieniem biowęglowym. Najwyższy ubytek masy dla próbek CUT2 to 28,3%, natomiast dla próbek CUT1, które nie uległy rozdzieleniu w kompoście to 34,6%. Rozkład zapinki CUT2 został potwierdzony również badaniem biodegradacji w warunkach przemysłowych oraz przydomowych. Całkowita degradacja zapinki nastąpiła po 20 tygodniach w wyniku kompostowania w warunkach przemysłowych, natomiast w warunkach przydomowych najwyższy ubytek masy po 48 tygodniach wynosił 5,43%. Kompostowanie przydomowe z kolei spowodowało ubytek masy zapinek biodegradowalnych po 127 tygodniach, który wyniósł 9,6%. Nie stwierdzono zależności między dodatkiem biowęgla, a ubytkiem masy zapinek biodegradowalnych. Potwierdzają to zdjęcia struktury pod mikroskopem (rys. 54-57).

Biowęgiel pełniący funkcję napełniacza w ilości 5% (masowo) nie wpłynął na szybkość degradacji łuków i zapinek. Być może większa zawartość biowęgla spowodowałyby szybszy rozkład akcesoriów. Choć jak donoszą badacze, w przypadku 15% (masowo) napełnienia biowęgłem PLA/PBAT czas degradacji kompozytu znacznie się wydłużył (Musioł i in., 2022).

Należy jednak podkreślić, że biowęgiel posiada funkcje wzmacniające z powodu porowatej struktury, powodując lepszą przyczepność tego dodatku do polimeru oraz jest tańszy w porównaniu do innych materiałów węglowych, np. węgla aktywnego (Alghyamah i in., 2021). Biowęgiel ponadto może mieć pozytywny wpływ na sam proces kompostowania poprzez dostarczenie cennych związków organicznych potrzebnych dla przemian metabolicznych mikroorganizmów. Jako dodatek do gleby wpływa na poprawę żyzności oraz zwiększenie wydajności upraw (Jindo i in., 2020). Pomimo braku wpływu biowęgla na proces degradacji, istnieje możliwość, że w wyniku całkowitego rozkładu akcesoriów, biowęgiel który stanowi napełnienie, pozostanie w kompoście lub glebie.

Przydatność wyprodukowanych biodegradowalnych folii i akcesoriów została potwierdzona w wyniku ich testowania podczas szklarniowej uprawy pomidora. Folia rozłożona na zagonach z glebą zahamowała wzrost chwastów (CUT1, CUT2) lub całkowicie ograniczyła wzrost chwastów (CUT3). Folia zatrzymywała wodę w glebie dłużej poprzez ograniczenie parowania, zatem podlewanie roślin było nieco rzadsze. Zaletą zastosowania biodegradowalnej folii do ściółkowania zagonów była możliwość pozostawienia folii na glebie i jej degradacja (rys. 62).

## Aspekty ekonomiczne

W Europie cena zakupu folii do ściółkowania z biodegradowalnego tworzywa może być nawet około 2-3 razy wyższa niż folii polietylenowej (Sintim i in., 2021). Jednym ze sposobów na obniżenie kosztów produkcji materiałów biodegradowalnych pomocnych w uprawie roślin jest zastosowanie napelniaczy. Duże oszczędności można uzyskać także z tytułu odmiennego sposobu zagospodarowania odpadów ulegających rozkładowi. Folię biodegradowalną po wykorzystaniu można pozostawić na glebie lub zagospodarować metodą kompostowania. Natomiast w przypadku stosowania konwencjonalnej folii do ściółkowania, odpady powstałe z jej użytkowania należy przekazać do utylizacji specjalistycznemu zakładowi. Często taka zużyta folia wymaga wcześniejszego, starannego zebrania z pola oraz oczyszczenia z pozostałości roślinnych.

Dokonano kalkulacji dotyczącej produkcji biodegradowalnej folii do ściółkowania CUT2, CUT3 oraz akcesoriów biodegradowalnych CUT1 i CUT2. Szacowany koszt wytworzenia folii biodegradowalnej potrzebnej do pokrycia zagonów o powierzchni 132 m<sup>2</sup> (standardowe wymiary szklarni) zgodnie z tabelą 13 to ok. 144 zł dla folii CUT2 oraz ok. 176 zł dla folii CUT3. Zastosowanie napelniacza w postaci węgla wapnia (20%) spowodowało obniżenie kosztów produkcji folii CUT2 o 27,50 zł, z kolei dodatek sadzy (5%) pozwolił na wyprodukowanie folii CUT3 o ponad 5 zł taniej. Folia biodegradowalna może być pozostawiona na glebie i ulec degradacji lub po zebraniu z pozostałościami roślinnymi może być zagospodarowana metodą kompostowania, co pozwala na szereg oszczędności w porównaniu do kosztów, jakie należy ponieść z tytułu utylizacji zużytej folii z tradycyjnych tworzyw sztucznych. W tabeli 2. przedstawiono koszty poniesione za utylizację zużytych folii i akcesoriów po uprawie pomidora szklarniowego. Oprócz kosztów związanych z utylizacją folii zabrudzonej pozostałościami roślinnymi, należy wziąć pod uwagę: (1) koszt pracy związany z zatrudnieniem pracownika do zebrania folii z gleby i rozdzielenia akcesoriów od roślin (480 zł) oraz (2) koszt odbioru odpadów przez wyspecjalizowany zakład (250 zł). Ponieważ akcesoria z tworzyw sztucznych nie mogą być utylizowane wraz z pozostałościami roślinnymi, należy je oddzielić od łodyg i przekazać pod innym kodem odpadu. Inaczej sytuacja wygląda w przypadku akcesoriów biodegradowalnych. Odpadowe akcesoria mogą być kompostowane wraz z pozostałościami roślinnymi. Podsumowując, folie biodegradowalne CUT2 i CUT3 o powierzchni 132 m<sup>2</sup> potrzebna do rozłożenia na glebie w szklarni o standardowych wymiarach to koszt ok. 144 zł dla CUT2 i 176 zł dla CUT3 (cena produkcji – należy

doliczyć marżę oraz podatek), a dla przykładowej folii z LDPE to cena około 78 zł (10,70 zł/kg). Koszt odbioru odpadów (250 zł) oraz koszty pracy (60 zł) mogą spowodować, że plantator zapłaci więcej za zakup i utylizację folii konwencjonalnej, niż za zakup folii biodegradowalnej.

W przypadku produkcji łuków i zapinek biodegradowalnych (CUT1) szacowany koszt w przeliczeniu na 1000 sztuk to 72 zł dla łuków i 92 zł dla zapinek (tab. 14). Z kolei dla akcesoriów CUT2 z dodatkiem biowęgla, produkcja 1000 szt. łuków biodegradowalnych kosztuje 71,78 zł, a zapinek 91,63 zł. Napełnienie akcesoriów biowęgłem w ilości 1% (masowo) nie spowodowało znaczącego obniżenia kosztów w przeliczeniu na sztukę wyprodukowanego akcesorium. Większe oszczędności z tytułu zaaplikowania tego napełniacza do matrycy polimeru biodegradowalnego można osiągnąć podczas produkcji na skalę przemysłową. Na przykład, 100 000 sztuk akcesoriów pozwala na oszczędności rzędu 36 zł w przypadku zapinek i 22 zł w przypadku łuków.

Należy podkreślić, że ogólny koszt wytworzenia biodegradowalnych akcesoriów na bazie polimeru Bioplast 2189 okazał się być konkurencyjny w porównaniu do cen rynkowych zakupu biodegradowalnych zapinek i łuków, a często nawet tych wyprodukowanych z tworzyw sztucznych. Zgodnie z tabelą 6, koszt zakupu zapinek biodegradowalnych dostępnych na rynku waha się od 333 do 466 zł za 1000 szt., z kolei zakup zapinek z tradycyjnych tworzyw sztucznych to 32 – 199,75 zł/1000 szt. (tab. 5). W porównaniu do powyższych kosztów, cena produkcji zapinki CUT była znacznie niższa (92 zł/1000 szt.). W przypadku łuków, na rynku dostępne są jedynie te wytworzone z konwencjonalnych tworzyw sztucznych w cenie ok. 23 – 271 zł (tab. 7). Biodegradowalne łuki CUT, których koszt produkcji wyniósł 72 zł/1000 szt., stanowią konkurencję nawet dla łuków wyprodukowanych z tradycyjnych tworzyw sztucznych.

## 8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Folie do ściółkowania i akcesoria pomocne w uprawie roślin wytworzone z tworzyw sztucznych z powodu swoich właściwości, takich jak trwałość oraz niska cena, są powszechnie wykorzystywane podczas upraw rolnych i ogrodnich przede wszystkim w celu zwiększenia produkcji roślinnej. Wytwarzanie i eksploatacja tworzyw sztucznych nie powodują trudności, natomiast zagospodarowanie odpadów powstałych po zużyciu wyrobów z tworzyw sztucznych stanowi poważny problem.

Alternatywami dla folii do ściółkowania i innych akcesoriów z tworzyw sztucznych mogą być biodegradowalne folie i akcesoria otrzymane z surowców biologicznych, które po zużyciu mogą być zagospodarowane za pomocą kompostowania lub pozostawione w glebie, gdzie ulegają rozkładowi. Przykładem takiej alternatywy dla folii do ściółkowania z tworzyw sztucznych, np. z polietylenu, jest biodegradowalna folia CUT, która charakteryzuje się tym, że:

- posiada innowacyjną strukturę: folia biodegradowalna CUT składa się z trzech warstw funkcjonalnych, w porównaniu do innych dostępnych na rynku folii składających się z dwóch warstw,
- skład folii oparty jest na dostępnych, biodegradowalnych surowcach, dzięki temu możliwe jest ograniczenie zużycia surowców ropopochodnych,
- zastosowanie biodegradowalnej folii do ściółkowania może przyczynić się do znacznego ograniczenia problemu zagospodarowania odpadów zużytych folii z tworzyw sztucznych,
- podatność folii na rozkład została potwierdzona przeprowadzonymi badaniami biodegradacji oraz kompostowania w reaktorach laboratoryjnych i przydomowym kompostowniku,
- wyprodukowana folia biodegradowalna CUT może zostać wykorzystana podczas uprawy roślin do ściółkowania, a dodatki w niej zawarte mogą odgrywać różnorodne funkcje. Czarny pigment (CUT3) ogranicza wzrost chwastów, a węglan wapnia (CUT2) przyspiesza degradację folii i może pozytywnie wpływać na jakość gleby (Surya i in., 2021).

Folia biodegradowalna CUT nie tylko może być wykorzystywana do ściółkowania gleby w uprawie roślin ale może znaleźć również inne zastosowania w postaci, np. folii

okrywowej dla gleby i roślin (np. uprawa rzodkiewki), folii dla upraw ekologicznych, woreczków na odchody zwierzęce czy kompostowalnych worków na odpady kuchenne.

Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski szczegółowe:

1. Węglan wapnia dodany w ilości 20% oraz sadza dodana w ilości 1% mogą być stosowane jako napełniacze do produkcji folii biodegradowalnych na bazie skrobi ziemniaczanej (Bioplast 400 ELITE oraz Bioplast 400D).
2. Najkorzystniejsze właściwości mechaniczne stwierdzono dla folii biodegradowalnej z napełnieniem sadzy w ilości 5% wagowo.
3. Wytrzymałość na rozciąganie dla folii biodegradowalnych CUT jest mniejsza w porównaniu do folii komercyjnej.
4. Dodatki zastosowane jako napełnienia folii biodegradowalnych miały wpływ na właściwości mechaniczne wytworzonych materiałów. Największy wpływ miał dodatek węglanu wapnia (20%), który spowodował znaczny spadek wytrzymałości na rozciąganie (pogorszenie właściwości mechanicznych)
5. Analiza termiczna DSC folii i akcesoriów biodegradowalnych potwierdziła indukowanie przemian termicznych w badanych materiałach, prowadzących do postępującej degradacji, tj. zmiany strukturalne polimeru w wyniku procesu kompostowania.
6. W wyniku kompostowania laboratoryjnego w reaktorach zaobserwowano rozkład folii i akcesoriów biodegradowalnych z napełniaczami.
7. Na podstawie kompostowania laboratoryjnego można stwierdzić, że folie biodegradowalne do ściółkowania oraz akcesoria CUT wykorzystywane w uprawie roślin, po zużyciu mogą być zagospodarowane za pomocą kompostowania wraz z pozostałościami roślinnymi po uprawie pomidora dodatkiem pomiotu kurzego oraz słomy pszenicznej.
8. Na podstawie badań biodegradacji można stwierdzić, że biodegradowalna folia do ściółkowania CUT3 może stanowić alternatywę dla folii do ściółkowania z tworzyw sztucznych, a po zużyciu może zostać zagospodarowana za pomocą kompostowania.

9. Zastosowanie napełniaczy węgla wapnia (20%) oraz sadzy (5%) do polimeru biodegradowalnego powoduje obniżenie kosztów produkcji folii do ściółkowania.

10. Biodegradowalna folia do ściółkowania CUT3 (czarna) ułożona na zagonach w szklarni ograniczyła wzrost chwastów podczas uprawy pomidorów.

11. Nie zaobserwowano różnicy w degradacji na zagonach w szklarni pomiędzy folią CUT1 bez napełnienia oraz folią CUT2 z napełnieniem 20% CaCO<sub>3</sub>. Na podstawie obserwacji można stwierdzić, że folia CUT3 z dodatkiem sadzy zaczęła degradować wolniej.

12. Wyprodukowane biodegradowalne zapinki i łuki do podtrzymywania łodyg i gron w uprawie pomidorów spełniły swój funkcję. Nie zaobserwowano pogorszenia właściwości użytkowych w trakcie całego okresu wegetacyjnego roślin.

13. Biowęgiel może być wykorzystywany jako napełniacz do produkcji biodegradowalnych akcesoriów, takich jak zapinki i łuki technologią formowania wtryskowego.

14. Zastosowanie napełniacza biowęglowego do akcesoriów ogrodniczych przydatnych podczas uprawy roślin może obniżyć koszty produkcji w skali przemysłowej.

15. Na podstawie przeprowadzonej analizy kosztów można stwierdzić, że koszt produkcji folii i akcesoriów biodegradowalnych może być niższy niż koszt zagospodarowania odpadów pochodzących ze zużytych folii i akcesoriów z tworzyw sztucznych.

16. Wszystkie wyprodukowane materiały biodegradowalne wykazały podatność na rozkład w wyniku procesu kompostowania laboratoryjnego jak i przydomowego oraz nie wykazały fitotoksyczności względem testowanych roślin (gorczyca, pszenica, rzeżucha). Mniejszy wskaźnik wykiełkowania nasion obserwuje się na podłożu po biodegradacji przeprowadzonej w warunkach kompostowania przydomowego, gdzie rozkład folii CUT3 oraz zapinki CUT2 nie był całkowity.

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań oraz sformułowanych powyżej wniosków szczegółowych można potwierdzić tezy pracy, że wybrane materiały takie węgiel wapnia, sadza i biowęgiel mogą być napełniaczami podczas produkcji biodegradowalnych folii i akcesoriów. Na pogorszenie właściwości mechanicznych otrzymanych folii miał wpływ dodatek węgla wapnia. Odpady powstające po zużyciu

biodegradowalnych folii i akcesoriów mogą być skutecznie zagospodarowane za pomocą kompostowania.

Za kierunki dalszych badań można wskazać:

- wykorzystanie innych dodatków jako wypełniaczy do produkcji biodegradowalnych folii i akcesoriów pomocnych w uprawie roślin,
- ocena wpływu wybranych rodzajów folii biodegradowalnych na wzrost i plonowanie roślin w różnych warunkach klimatycznych.

## LITERATURA

1. Adhikari R., Bristow K., Casey P., Freischmidt G., Hornbuckle J., Adhikari B., Prefomed and sprayable polymeric mulch film to improve agricultural water use efficiency, *Agricultural Water Management*, Volume 169, 2016, 1-13.
2. Alghyamah A., Elnour A., Shaikh H., Haider S., Poulouse A., Al-Zahrani S.M., Almasry W., Park S., Biochar/polypropylene composites: A study on the effect of pyrolysis temperature on crystallization kinetics, crystalline structure, and thermal stability, *Journal of King Saud University – Science*, Volume 33, Issue 4, 2021, 101409.
3. Allohverdi T., Mohanty A., Roy P., Misra M., A Review on Current Status of Biochar Uses in Agriculture, *Molecules*, 2021, 26(18): 5584.
4. Ansink E., Wijk L., Zuidmeer F., No clue about bioplastics, *Ecological Economics*, Volume 191, 2022, 107245.
5. APE Europe. 2019. Statistics - Plastics in Europe. <https://apeeurope.eu/statistics/>.
6. Ayaz M., Feiziene D., Tilvikiene V., Akhtar K., Stulpinaite U., Iqbal R., Biochar Role in the Sustainability of Agriculture and Environment, *Sustainability* 2021, 13, 1330.
7. Bajer K., Skrobia jako potencjalny surowiec materiałowy, *Biotworzywa* 1, 2015, 30-34.
8. Bilal M., Iqbal H., Transportation fate and removal of microplastic pollution – A perspective on environmental pollution, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2020, 100015.
9. *Biotworzywa* 1/2015, [https://issuu.com/biotworzywa/docs/bio1\\_2015/35](https://issuu.com/biotworzywa/docs/bio1_2015/35), 21.01.2021.
10. Briassoulis D., Innocenti F., Standards for Soil Biodegradable Plastics, *Soil Degradable Bioplastics for a Sustainable Modern Agriculture*, 2017, DOI: 10.1007/978-3-662-54130-2\_6.
11. Borreani G., Tabacco E., Cavallarin L., A new oxygen barrier film reduces aerobic deterioration in farm scale corn silage, *Journal of Dairy Science*, 90, 2007, 4701–4706.



12. Brodhagen M., Peyron M., Miles C., Ann Inglis D., Biodegradable plastic agricultural mulches and key features of microbial degradation, 2015, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 1039-1056.
13. Brodhagen M., R.Goldberger J., G. Hayes D., Ann Inglis D., L. Marsh T., Miles C., Policy considerations for limiting unintended residual plastic in agricultural soils, *Environmental Science & Policy*, Volume 69, 2017, 81-84.
14. Calisti R., Regni L., Proietti P., Compost-recipe: A new calculation model and a novel software tool to make the composting mixture, *Journal of Cleaner Production*, Volume 270, 2020, 122427.
15. Chan J., Wong J., Hassan A., Zakaria Z., Bioplastics from agricultural waste, In book: *Biopolymers and Biocomposites from Agro-Waste for Packaging Applications*, 2020.
16. Chen N., Li X., Shi H., Yan J., Hu Q., Zhang Y., Assessment and modeling of maize evapotranspiration and yield with plastic and biodegradable film mulch, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 307, 2021, 108474.
17. Czekąła W., Malińska K., Janczak D., Caceres R., Dach J., Lewicki A. Composting of poultry manure mixtures amended with biochar – the effect of biochar on temperature and duration of thermophilic phase, *Bioresource Technology* 200, 2016, 921-927.
18. Dentzman K., Goldberger J., Organic standards, farmers' perceptions, and the contested case of biodegradable plastic mulch in the United States, *Journal of Rural Studies*, Volume 73, 2020, 203-213.
19. Di Mola I., Ventrino V., Cozzolino E., Ottaiano L., Romano I., Duri L., Pepe O., Mori M., Biodegradable mulching vs traditional polyethylene film for sustainable solarization: Chemical properties and microbial community response to soil management, *Applied Soil Ecology*, Volume 163, 2021, 103921.
20. Dreni M., The use of biodegradable mulching on industry tomatoes in northern Italy, *Acta Horticulturae*, 1252, 2019, 57-68,  
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1252.8>.
21. Dusselier M., Lange J., *Biodegradable Polymers in the Circular Plastics Economy*, ISBN: 978-3-527-34761-2, DOI: 10.1002/9783527827589, 2022.
22. EBC (2012-2022) 'European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.' European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. (<http://european-biochar.org>). Version 10.1 from 2022, 10.06.2022.

23. EIP-GRI Focus Group: Reducing the plastic footprint of agriculture. Final Report, 2021, [eip-agri\\_fg\\_plastic\\_footprint\\_final\\_report\\_2021\\_en.pdf \(europa.eu\)](#), 10.06.2022.
24. ECHA: European chemicals agency <https://echa.europa.eu/pl/candidate-list-table> 13.06.2022.
25. El-Malek F., Khairy H., Farag A., Omar S., The sustainability of microbial bioplastics, production and applications, International Journal of Biological Macromolecules Volume 157, 2020, 319-328.
26. European Bioplastics, Frequently Asked Questions on Bioplastics, EUPB, 2020. [https://docs.european-bioplastics.org/publications/EUBP\\_FAQ\\_on\\_bioplastics.pdf](https://docs.european-bioplastics.org/publications/EUBP_FAQ_on_bioplastics.pdf), 04.05.2021.
27. European Bioplastics, Bioplastics market data 2018 – Global production capacities of bioplastics 2018-2023.
28. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Biodegradability of plastics in the open environment, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/690248>
29. European Commission, Forthcoming policy framework on bio-based, biodegradable and compostable plastics, [https://ec.europa.eu/environment/topics/plastics/bio-based-biodegradable-and-compostable-plastics\\_en](https://ec.europa.eu/environment/topics/plastics/bio-based-biodegradable-and-compostable-plastics_en), 11.06.2022.
30. FAO, 2021. Assessment of agricultural plastics and their sustainability. A call for action.
31. Flury M., Narayan R., Biodegradable plastic as an integral part of the solution to plastic waste pollution of the environment, Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, Volume 30, 2021, 100490.
32. Gao H., Yan C., Liu Q., Ding W., Chen B., Li Z., Effects of plastic mulching and plastic residue on agricultural production: A meta-analysis, Science of The Total Environment Volume 651, Part 1, 2019, 484-492.
33. Gao Y., Li Y., Wang Y., Wu B., Ke J., Niu J., Guo L., Effect of different film color mulching on dry matter and grain yield of oil flax in dry-land, Oil Crop Science, vol. 5, Issue 2, 2020, 17-22.
34. Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., Production, use, and fate of all plastics ever made, Science Advances, vol. 3, 2017, 1700782.
35. Gonzales M., Medina J., Cea M., Diez M., Cartes P., Monreal C., Navia R., Evaluation of biodegradable polymers as encapsulating agents for the development

- of a urea controlled-release fertilizer using biochar as support material, *Science of the Total Environment*, 505, 2015, 446-453.
36. Guerrini S., Borreani G., Voojjs H., Chapter 3, *Biodegradable Materials in Agriculture: Case Histories and Perspectives*, Malinconico M., (ed.), *Soil Degradable Bioplastics for a Sustainable Modern Agriculture*, Green Chemistry and Sustainable Technology, 2017, DOI 10.1007/978-3-662-54130-2\_3.
  37. Guerrini S., Razza F. Impallari M., How sustainable biodegradable and renewable mulch films are? CIPA Congres Plastic & Environmental – XXI st., France, 2018.
  38. Hassan A., Abbas A., Rasheed T., Bilal M., Iqbal H., Wang S. Development, influencing parameters and interactions of bioplasticizers: An environmentally friendlier alternative to petro industry-based sources. *Science of The Total Environment*, 682, 2019, 394–404.
  39. Hann S., Fletcher E., Sherrington C., Molteno S., Elliott L., *Conventional and Biodegradable Plastics in Agriculture*, Final Report, 2021.
  40. He G., Wang Z., Hui X., Huang T., Luo L., Black film mulching can replace transparent film mulching in crop production, *Field Crops Research*, Volume 261, 2021, 108026.
  41. Havstad M., Juroš L., Katančič Z., Pilipovič A., Influence of Home Composting on Tensile Properties of Commercial Biodegradable Plastic Films, *Polymers* 2021, 13, 2785.
  42. Janczak D., Malińska K., Czekala W., Caceres R., Lewicki A., Dach J. Biochar to reduce ammonia emissions in gaseous and liquid phase during composting of poultry manure with wheat straw, *Waste Management* 66, 2017, 36-45.
  43. Jiang R., Li X., Zhu W., Wang K., Guo S., Misselbrook T., Hatano R., Effects of the ridge mulched system on soil water and inorganic nitrogen distribution in the Loess Plateau of China, *Agricultural Water Management*, Volume 203, 2018, 277-288.
  44. Jindo K., Sánchez-Monedero M., Mastrolonardo G., Audette Y., F. Higashikawa, Silva C., Akashi K. & Mondini C., Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 2: A review of the biochar roles in growing media, composting and as soil amendment, *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, vol. 7, 16, 2020.
  45. Joseph S., Cowie A., Zwieter L., Bolan N., Budai A., Buss W., Cayuela M., Graber E., Ippolito J., Kuzyakov Y., Luo Y., Ok Y., Palansooriya K., Shepherd J., Stephens S., Weng Z., Lehmann J., How biochar works, and when it doesn't: A review of

- mechanisms controlling soil and plant responses to biochars, *GCB Bioenergy: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy*, vol.13, Issue 11, 2021, 1731-1764.
46. Kalita N., Hazarika D., Kalamdhad A., Katiyar V., Biodegradation of biopolymeric composites and blends under different environmental conditions: Approach towards end-of-life panacea for crop sustainability, *Bioresource Technology Reports*, 15, 2021, 100705.
  47. Kane S., Roijen E., Ryan C., Miller S., Reducing the environmental impacts of plastics while increasing strength: Biochar fillers in biodegradable, recycled, and fossil-fuel derived plastics, *Composites Part C*, vol. 8, 2022, 100253.
  48. Kershaw P., Rochman, C., Corporate Author, Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part 2 of a global assessment, A report to inform the Second United Nations Environment Assembly, 2015.
  49. Kliem S., Kreutzbruk M., Bonten C., Review on the biological degradation of polymers in various environments, *Materials* 2020, 13, 4586.
  50. Knoch S., Pelletier F., Larose M., Chouinard G., Dumont M.J., Tavares J., Surface modification of PLA nets intended for agricultural applications, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol, 598, 2020, 124787.
  51. Kosior E., Mitchell J., Chapter 6, Current industry position on plastic production and recycling, *Plastic Waste and Recycling*, 133-162, 2020, ISBN 978-0-12-817880-5, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00006-2>.
  52. Kowalska J., Zaleski T., Józefowska A., Mazurek R., Soil formation on calcium carbonate-rich parent material in the outer Carpathian Mountains – A case study, *CATENA*, vol. 174, 2019, 436-451.
  53. Kowalski W., Oczyszczanie odcieków z przeróbki osadów, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, ISSN: 1505-3695, 2018.
  54. Lee N., Park H., Effects of different colored film mulches on the growth and bolting time of radish (*Raphanus sativus* L.), *Scientia Horticulturae*, vol. 266, 2020, 109271.
  55. Lee J., Chae H., Hwang H., Kim P., Cho S., Effect of plastic film mulching on maize productivity and nitrogen use efficiency under organic farming in South Korea, *Science of The Total Environment*, vol. 787, 2021, 147503.
  56. Liadakis G., Katsouli M., Chanioti S., Giannou V., Tzia C., Identification, quantification, and characterization of tomato processing by product, *Tomato Processing by-Products: Sustainable Applications*, 2022, 1-32.

57. Li R., Liu Y., Sheng Y., Xiang Q., Zhou Y., Cizdziel J., Effect of prothioconazole on the degradation of microplastics derived from mulching plastic film: Apparent change and interaction with heavy metals in soil, *Environmental Pollution*, vol. 260, 2020, 113988.
58. Li S., Ding F., Flury M., Want Z., Xu L., Li S., Jones D.L., Wang J. Macro- and microplastic accumulation in soil after 32 years of plastic film mulching, *Environmental Pollution* 300, 2022, 118945.
59. Liu L., Zou G., Zuo Q., Li S., Bao Z., Jin T., Liu D., Du L., It is still too early to promote biodegradable mulch film on a large scale: A bibliometric analysis, *Environmental Technology & Innovation*, vol. 27, 2022, 102487.
60. Lofty J., Muhawenimana V., Wilson C., Ouro P., Microplastics removal from a primary settler tank in a wastewater treatment plant and estimations of contamination onto European agricultural land via sewage sludge recycling, vol. 304, 2022, 119198.
61. Łodyga A., Tyński P., Koziół M., Sadurski W., Bogusz J., Ostrowska J., Skrobia termoplastyczna – alternatywne źródło innowacyjnych tworzyw biodegradowalnych. *Biotworzywa* 1, 2015, 23-29.
62. Malinconico M., *Soil Degradable Bioplastics for a Sustainable Modern Agriculture*, Springer-Verlag, 2017.
63. Martin-Closas L., Costa J., Pelacho A.M., *Agronomic Effects of Biodegradable Films on Crop and Field Environment*, M. Malinconico (Ed.), *Soil Degradable Bioplastics for a Sustainable Modern Agriculture*, 2017, 67-104.
64. Marí A., Pardo G., Cirujeda A., Martínez Y., *Economic Evaluation of Biodegradable Plastic Films and Paper Mulches Used in Open-Air Grown Pepper (Capsicum annum L.) Crop*, *Agronomia* 9 (1), 2019, 36.
65. Menossi M., Cisneros M., Alvarez V., Casalongué C., *Current and Emerging Biodegradable Mulch Films based on Polysaccharide Bio-composites. A review*, *Agronomy for Sustainable Development*, 2021, DOI: 10.1007/s13593-021-00685-0.
66. Moshood T.D., Nawanir G., Mahmud F., Mohamad F., Ahmad M.H., AbdulGhani A. Sustainability of biodegradable plastics: New problem or solution to solve the global plastic pollution? *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* 5, 2022, 100273.
67. Mosnáčková K., Šlosár M., Kollár J., Janigová I., Šišková A., Chmela Š., Sikorska W., Perďochová D., Galisová I., Alexy P., Chodák I., Mosnáček J., Ageing of plasticized poly(lacticacid)/poly(3-hydroxybutyrate)/carbon black mulching films

- during one season of sweet pepper production, *European Polymer Journal*, vol. 114, 2019, 81-89.
68. Mostafa N., Farag A., Abo-dief H., Tayeb A., Production of biodegradable plastic from agricultural wastes, *Arabian Journal of Chemistry* vol. 11, Issue 4, 2018, 546-553.
69. Musioł M., Rydz J., Janeczek H., Kordyka A., Andrzejewski J., Sterzyński T., Jurczyk S., Cristea M., Musiol K., Kampik M., Kowalczyk M., (Bio)degradable biochar composites -Studies on degradation and electrostatic properties, *Materials Science and Engineering B* 275:115515, 2022.
70. Narayan R., Chapter 2, *Biodegradable and Biobased Plastics: An Overview*, *Green Chemistry and Sustainable Technology*, 2017, Malinconico M. (ed.), *Soil Degradable Bioplastics for a Sustainable Modern Agriculture*, *Green Chemistry and Sustainable Technology*, DOI 10.1007/978-3-662-54130-2\_2.
71. Norma PN-EN ISO 17033 Tworzywa sztuczne, Biodegradowalne folie ściółkowe do stosowania w rolnictwie i ogrodnictwie, Wymagania i metody badań.
72. Oliveira J., Vandenberghe L., Zawadzki S., Rodrigues C., Carvalho J., Soccol C., Production and Application of Polylactides, *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering Production, Isolation and Purification of Industrial Products*, 2017, 633-653.
73. Othman Y., Leskovar D., Degradable Mulch as an Alternative to Polyethylene for Watermelon Production, *HortTechnology*, vol. 32, Issue 2, 2022.
74. Packer: <https://rcplasticmachinery.com/products/>; 12.06.2022
75. Palansooriya K., Ok Y., Awad Y., Lee S., Sung J., Koutsospyros A., Moon D., Impacts of biochar application on upland agriculture: A review, *Journal of Environmental Management*, vol. 234, 2019, 52-64.
76. Parlato M., Valenti F., Porto S., Covering plastic films in greenhouses system: A GIS-based model to improve post use sustainable management, *Journal of Environmental Management*, Volume 263, 2020, 110389.
77. Peñas M., Pérez-Camargo R., Hernández R., Müller A., A Review on Current Strategies for the Modulation of Thermomechanical, Barrier, and Biodegradation Properties of Poly (Butylene Succinate) (PBS) and Its Random Copolymers, *Polymers* 2022, 14(5), 1025; <https://doi.org/10.3390/polym14051025>.
78. Pirzada T., Farias B., Mathew R., Guenther R., Byrd M., Sit T., Pal L., Opperman C., Khan S., Recent advances in biodegradable matrices for active ingredient release

- in crop protection: Towards attaining sustainability in agriculture, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, vol. 48, 2020, 121-136.
79. Plastech: źródło internetowe <https://www.plastech.pl/ceny-tworzyw>, 02.06.2022.
80. Plastics Europe Raport roczny 2019, 04.05.2021, [https://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/raport\\_roczny\\_pep\\_updated](https://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/raport_roczny_pep_updated).
81. Plastics Europe - <https://plasticseurope.org/sustainability/sustainable-use/sustainable-agriculture/> 13.07.2020
82. Plastics Europe - Association of Plastic Manufacturers, An analysis of European plastics production, demand and waste data, *Plastics – the Facts 2021*, 05.02.2022, <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/Plastics-the-Facts-2021-web-final.pdf>.
83. Polman E., Gruter G., Parsons J., Tietema A., Comparison of the aerobic biodegradation of biopolymers and the corresponding bioplastics: A review, *Science of The Total Environment*, vol. 753, 2021, 141953.
84. Pudełko A., Postawa P., Stachowiak T., Malińska K., Drózdź D., Waste derived biochar as an alternative filler in biocomposites - Mechanical, thermal and morphological properties of biochar added biocomposites, *Journal of Cleaner Production*, vol. 278, 2021, 123850.
85. Qi Y., Yang X., Pelaez A., Lwanga E., Beriot N., Gertsen H., Garbeva P., Geissen V., Macro- and micro- plastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth, *Science of The Total Environment*, vol. 645, 2018, 1048-105615.
86. Qi R., Jones D., Li Z., Liu Q., Yan C., Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review, *Science of the Total Environment*, 2019, tom 703, 2020, 134722.
87. Qi R., Jones D., Liu Q., Liu Q., Li Z., Yan C., Field test on the biodegradation of poly(butylene adipate-co-terephthalate) based mulch films in soil, *Polymer Testing*, vol. 93, 2021, 107009.
88. Rayns R., Carranca C., Miličić V., Fonteyne K., Peñalva C., Hernandez A., Peireira R., Accinelli C., Zlatar K., New plastics in agriculture (Minipaper C), EIP-AGRI Focus Group Reducing the plastic footprint of agriculture, 2021, [eip-agri\\_fg\\_plastic\\_footprint\\_minipaper\\_c\\_final.pdf\(europa.eu\)](http://eip-agri_fg_plastic_footprint_minipaper_c_final.pdf(europa.eu)) (10.06.2022).
89. Rosenboom J-G., Langer R., Traverso G., Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews – Materials*, vol. 7, 117-137.

90. Serrano-Ruiz H., Martin-Closas L., Pelacho A., Biodegradable plastic mulches: Impact on the agricultural biotic environment, *Science of the Total Environment*, vol. 750, 2021, 141228, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141228>.
91. Şevik F., Tosun İ., Ekinçi K., The effect of FAS and C/N ratios on co-composting of sewage sludge, dairy manure and tomato stalks, *Waste Management*, vol. 80, 2018, 450-456.
92. Shah F., Wu W., Use of plastic mulch in agriculture and strategies to mitigate the associated environmental concerns, *Advances in Agronomy*, vol. 164, 2020, 231-287.
93. Silva V., Mol H., Zomer P., Tienstra M., Ritsema C., Geissen V., Pesticide residues in European agricultural soils - a hidden reality unfolded, *Science of the Total Environment*, 653 2019, 1532-1545.
94. Sintim H., *Biodegradable Plastic Mulch: Degradation and Impacts on Soil Health*, Washington State University, ProQuest Dissertations Publishing, 2018, 10784759.
95. Sintim H., Bary A., Hayes G., Wadsworth L., Anunciado M., English M., Bandopadhyay S., Schaeffer S., DeBruyn J., Miles C., Reganold J., Flury M., In situ degradation of biodegradable plastic mulch films in compost and agricultural soils, *Science of the Total Environment*, 727, 2020, 138668.
96. Sintim H., Bandopadhyay S., English M., Bary A., González J., DeBruyn J., Schaeffer S., Miles C., Flury M., Four years of continuous use of soil-biodegradable plastic mulch: impact on soil and groundwater quality, *Geoderma*, 381, 2021, 114665.
97. Siqueira L., La Fuente Arias C., Maniglia B., Tadini C., Starch-based biodegradable plastics: methods of production, challenges and future perspectives, *Current Opinion in Food Science*, vol. 38, 2021, 122-130.
98. Siwek P., Domagała-Świątkiewicz I., Bucki P., Puchalski M., Biodegradable agroplastics in 21st century horticulture, *Polimery* 2019, 64, nr 7-8.
99. Surya I., Chong E., Khalil H., Funmilayo O., Abdullah C., Aprilia N., Olaiya N., T., Lai, Oyekanmi A., Augmentation of physico-mechanical, thermal and biodegradability performances of bio-precipitated material reinforced in *Eucheuma cottonii* biopolymer films, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 12, 2021, 1673-1688.
100. Thengane S. Kung K., Hunt J., Gilani H., Lim J., Sokhansanj S., Sanchez D., Market prospects for biochar production and application in California, *Biofuels Bioproducts and Biorefining* 15(6), 2021.



101. Tosin M., Barbale M., Chinaglia S., Degli-Innocenti F., Disintegration and mineralization of mulch films and leaf litter in soil, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 179, 2020, 109309.
102. Touchaleaume F., Angellier-Coussy H., César G., Raffard G., Gontard N., Gastaldi E., How performance and fate of biodegradable mulch films are impacted by field ageing, *Journal of Polymers and the Environment.*, 26, 2018, 2588-2600.
103. Wagner S., Schlummer M., Legacy additives in a circular economy of plastics: Current dilemma, policy analysis, and emerging countermeasures, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 158, 2020, 104800.
104. Wang F. Wang Z., Zhang J., Li W., Combined Effect of Different Amounts of Irrigation and Mulch Films on Physiological Indexes and Yield of Drip-Irrigated Maize (*Zea mays L.*), *Water* 2019, 11(3), 472.
105. Wang Y., Li X., Zhu J., Fan C., Kong X., Turner N., Siddique K., Li F., Multi-site assessment of the effects of plastic-film mulch on dryland maize productivity in semiarid areas in China, *Agricultural and Forest Meteorology*, 220, 2016, 160-169.
106. Wang M., Vasconcelos M., Carvalho S., Chapter 19 - Role of calcium nutrition on product quality and disorder susceptibility of horticultural crops: processes and strategies for biofortification, *Calcium Transport Elements in Plants*, 2021, 315-335.
107. Wanner P., Plastic in agricultural soils – A global risk for groundwater systems and drinking water supplies? – A review, *Chemosphere*, vol. 264, Part 1, 2021, 128453.
108. Weisser P., Malińska K.: Od biomasy do biowęgla – pomysł na biznes, *Magazyn Biomasa*, 2016.
109. Wojnowska-Baryła I., Kulikowska D., Bernat K., Effect of Bio-Based Products on Waste Management, *Sustainability* 2020, 12, 2088.
110. Wortman S., Kadoma I., Crandall M., Assessing the potential for spunbond, nonwoven biodegradable fabric as mulches for tomato and bell pepper crops, *Scientia Horticulturae*, 193, 2015, 209–217.
111. Wright, S.L., Kelly, F.J., Plastic and human health: a micro issue?, *Environmental Science & Technology*, 51, 6634-6647, 2017.
112. Yadav B., Pandey A., Kumar L., Tyagi R., Bioconversion of waste (water)/residues to bioplastics- A circular bioeconomy approach, *Bioresource Technology*, vol. 298, 2020, 122584.

113. Yang Y., Li P., Jiao J., Yang Z., Lv M., Li Y., Zhou C., Wang C., He Z., Liu Y., Song S., Renewable sourced biodegradable mulches and their environment impact, *Scientia Horticulturae*, vol. 268, 2020, 109375.
114. Yang Y., Zhang C., Weng Y., Effects of CaCO<sub>3</sub> surface modification and water spraying on the weathering properties of PBAT/CaCO<sub>3</sub> films, *Polymer Testing*, vol. 102, 2021, 107334.
115. Yao, Z., Zheng, X., Liu, C., Lin, S., Zuo, Q., Butterbach–Bahl, K., Improving rice production sustainability by reducing water demand and greenhouse gas emissions with biodegradable films, *Scientific Reports*, 7, 2017, 39855.
116. Yin M., Li Y., Fang H., Chen P., Biodegradable mulching film with an optimum degradation rate improves soil environment and enhances maize growth, *Agricultural Water Management*, vol. 216, 2019, 127-137.
117. Zhang D., Ng E.L., Hu W., Wang H., Galaviz P., Yang H., Sun W., Li C., Ma X., Fu B., Zhao P., Zhang F., Jin S., Zhou M., Du L., Peng C., Zhang X., Xu Z., Xi B., Liu X., Sun S., Cheng Z., Jiang L., Wang Y., Gong L., Kou C., Li Y., Ma Y., Huang D., Zhu J., Yao J., Lin C., Qin S., Zhou L., He. B., Chen D., Li H., Zhai L., Lei Q., Wu S., Zhang Y., Pan J., Gu B., Liu H. Plastic pollution in croplands threatens long-term food security, *Global Change Biology* 2020; 1-12.
118. Zhao Z-Y., Wang P-Y., Xiong X-B., Wang Y-B., Zhou R., Tao H-Y., Grace U.A., Want N., Xiong Y-C. Environmental risk of multi-year polythene film mulching as its green solution in arid irrigation region, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 435, 2022, 128981.
119. Zhang H., Miles C., Gerdeman B., LaHue G.D., DeVeter L., Plastic mulch use in perennial fruit cropping systems – A review, *Scientia Horticulturae* 281, 2021, 109975.
120. Zhang P., Wei T., Cai T., Ali S., Han Q., Ren X., Jia Z., Plastic-Film Mulching for Enhanced Water-Use Efficiency and Economic Returns from Maize Fields in Semiarid China, *Frontiers in Plant Science*, 2017.
121. Zhang P., Ting Wei T., Jia Z., Xiaolong Ren X., Stratification of soil organic C, N and the C : N ratio as affected by different plastic film mulching modes in a semiarid region of China, *Soil Research* 57(4), 2019, 408-417.
122. Zhang P., Wei T., Han Q, Ren X., Jia Z., Effects of different film mulching methods on soil water productivity and maize yield in a semiarid area of China, *Agricultural Water Management*, vol. 241, 2020, 106382.

## **SPIS ZAMIESZCZONYCH TABEL**

Tabela 1. Przykłady zastosowań tworzyw sztucznych w rolnictwie i ogrodnictwie.

Tabela 2. Zestawienie masy odpadów powstających po uprawie pomidora szklarniowego wraz z kosztami poniesionymi za ich utylizację

Tabela 3. Koszt zakupu wybranych rodzajów folii biodegradowalnych do ściółkowania powierzchni 1500 m<sup>2</sup>.

Tabela 4. Koszty związane ze ściółkowaniem podczas uprawy papryki.

Tabela 5. Ceny zapinek wykonanych z tradycyjnych tworzyw sztucznych dostępnych na rynku (dane na dzień 01.04.2022).

Tabela 6. Ceny zapinek wykonanych z tworzyw biodegradowalnych dostępnych na rynku (dane na dzień 01.04.2022).

Tabela 7. Ceny łuków wykonanych z tradycyjnych tworzyw sztucznych dostępnych na rynku (dane na dzień 01.04.2022).

Tabela 8. Harmonogram realizacji zadań w ramach pracy doktorskiej.

Tabela 9. Właściwości biowęgla ze ścinek drzewnych.

Tabela 10. Folie biodegradowalne CUT.

Tabela 11. Łuki biodegradowalne CUT.

Tabela 12. Zapinki biodegradowalne CUT.

Tabela 13. Szacowany koszt produkcji folii biodegradowalnej (CUT3) potrzebnej do pokrycia powierzchni 132 m<sup>2</sup> gleby.

Tabela 14. Szacowane koszty produkcji łuków i zapinek biodegradowalnych (CUT1) w przeliczeniu na 1000 sztuk.

Tabela 15. Szacowane koszty produkcji łuków i zapinek biodegradowalnych z dodatkiem biowęgla (CUT2) w przeliczeniu na 1000 sztuk.

Tabela 16. Skład mieszanki kompostowej.

Tabela 17. Liczba próbek folii i akcesoriów umieszczonych w reaktorach laboratoryjnych.

Tabela 18. Liczba próbek folii i akcesoriów zaaplikowanych do kompostownika.

Tabela 19. Średnie wyniki dla wartości charakteryzujących wytrzymałość na rozciąganie poprzeczne dla czterech rodzajów próbek folii.

Tabela 20. Charakterystyka chemiczna folii CUT3.

Tabela 21. Charakterystyka chemiczna zapinki CUT2.

Tabela 22. Porównanie stopnia rozkładu folii CUT3 w zależności od warunków przebiegu procesu kompostowania.

Tabela 23. Porównanie stopnia rozkładu zapinek CUT2 w zależności od warunków przebiegu procesu kompostowania.

Tabela 24. Wyniki dezintegracji folii CUT3 i zapinki CUT2 w warunkach kompostowania w temperaturze 58 °C) po 12 tygodniach.

Tabela 25. Wyniki dezintegracji folii CUT3 i zapinek CUT2 w warunkach kompostowania w temperaturze 30 °C) po 24 tygodniach

Tabela 26. Wybrane właściwości mieszanki kompostowej przed i po procesie kompostowania.

Tabela 27. Średni ubytek masy folii, łuków i zapinek biodegradowalnych po procesie kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

## **SPIS ZAMIESZCZONYCH RYSUNKÓW**

Rysunek 1. Przykłady zastosowań tworzyw sztucznych w uprawie roślin: ściółkowanie gleby.

Rysunek 2. Bilans masy odpadów z tworzyw sztucznych pochodzących z rolnictwa i ogrodnictwa w UE.

Rysunek 3. Globalne zdolności produkcyjne biotworzyw 2019-2025.

Rysunek 4. Klasyfikacja tworzyw.

Rysunek 5. Schemat części badawczej.

Rysunek 6. Struktura warstwowa folii biodegradowalnej.

Rysunek 7. Etapy procesu produkcji folii biodegradowalnej.

Rysunek 8. Wtryskarka firmy Krauss Maffei KM65 C3.

Rysunek 9. Etapy procesu produkcji łuków biodegradowalnych.

Rysunek 10. Etapy procesu produkcji zapinek biodegradowalnych.

Rysunek 11. Maszyna wytrzymałościowa Inspekt Desk 20 firmy Hegewald und Peshke.

Rysunek 12. Stanowisko badawcze do analizy termicznej: urządzenie DSC POLYMA 214 firmy NETZSCH.

Rysunek 13. Elektroniczny mikroskop optyczny KEYENCE VHX 900 F.

Rysunek 14. Schemat laboratoryjnego stanowiska badawczego do kompostowania w laboratorium Katedry Sieci i Instalacji Sanitarnych.

Rysunek 15. Przygotowanie mieszanki kompostowej.

Rysunek 16. Rozmieszczenie próbek w reaktorach laboratoryjnych.

Rysunek 17. Kompostownik przydomowy firmy Comp 730 firmy Container Trading WFW GmbH.

Rysunek 18. Przygotowanie mieszanki kompostowej do przydomowego kompostownika.

Rysunek 19. Ułożenie próbek w kompostowniku przydomowym.

Rysunek 20. Ułożenie folii biodegradowalnej CUT1 na zagonach w szklarni.

Rysunek 21. Ułożenie folii biodegradowalnej z dodatkiem sadzy CUT3 (po lewej) oraz z dodatkiem 20% CaCO<sub>3</sub> CUT2 (po prawej) na zagonach w szklarni.

Rysunek 22. Złamane łodygi oraz grona roślin z powodu obciążenia.

Rysunek 23. Wykres wytrzymałości na rozciąganie poprzeczne dla folii komercyjnej, CUT1, CUT2 oraz CUT3.

Rysunek 24. Termogram zbiorczy DSC dla folii komercyjnej, CUT1, CUT2 oraz CUT3 przed procesem kompostowania.

Rysunek 25. Termogram zbiorczy DSC dla folii CUT1, CUT2 oraz CUT3 po procesie kompostowania.

Rysunek 26. Termogram DSC dla łuków biodegradowalnych CUT2 przed i po procesie kompostowania.

Rysunek 27. Termogram DSC dla zapinek biodegradowalnych CUT2 przed i po procesie kompostowania.

Rysunek 28. Ubytek masy w wyniku biodegradacji w warunkach kompostowania przemysłowego (w temperaturze 58 °C) próbki folii CUT3.

Rysunek 29. Ubytek masy w wyniku biodegradacji w warunkach kompostowania przemysłowego (w temperaturze 58 °C) próbki zapinki z dodatkiem biowęgla CUT2.

Rysunek 30. Ubytek masy w wyniku biodegradacji w warunkach kompostowania przydomowego (w temperaturze 30 °C) próbki folii CUT3.

Rysunek 31. Ubytek masy w wyniku biodegradacji w warunkach kompostowania przydomowego (w temperaturze 30 °C) próbki zapinki z dodatkiem biowęgla CUT2.

Rysunek 32. Wynik testu kiełkowania dla folii CUT3 po procesie biodegradacji w warunkach przemysłowych (w temperaturze 58°C).

Rysunek 33. Wynik testu kiełkowania dla zapinki CUT2 po procesie biodegradacji w warunkach przemysłowych (w temperaturze 58°C).

Rysunek 34. Wynik testu kiełkowania dla folii CUT3 po procesie biodegradacji w warunkach przydomowych (w temperaturze 30°C).

Rysunek 35. Wynik testu kiełkowania dla zapinki CUT2 po procesie biodegradacji w warunkach przydomowych (w temperaturze 30°C).

Rysunek 36. Porównanie średniej masy początkowej przed kompostowaniem do średniej masy końcowej po kompostowaniu dla próbek folii CUT1 i CUT2.

Rysunek 37. Porównanie średniej masy początkowej przed kompostowaniem do średniej masy końcowej po kompostowaniu dla łuków CUT1 i CUT2.

Rysunek 38. Porównanie średniej masy początkowej przed kompostowaniem do średniej masy końcowej po kompostowaniu dla zapinek CUT1 i CUT2.

Rysunek 39. Zmiany temperatury podczas procesu kompostowania w laboratoryjnych reaktorach do kompostowania.

Rysunek 40. Próbki folii CUT1 po zakończeniu kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

Rysunek 41. Próbki folii CUT2 po zakończeniu kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

Rysunek 42. Łuki biodegradowalne CUT1 po zakończeniu kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

Rysunek 43. Łuki biodegradowalne CUT2 po zakończeniu kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

Rysunek 44. Zapinki biodegradowalne CUT1 po zakończeniu kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

Rysunek 45. Zapinki biodegradowalne CUT2 po zakończeniu kompostowania laboratoryjnego trwającego 116 dni.

Rysunek 46. Folie CUT1 widoczne w powiększeniu 10x.

Rysunek 47. Folie CUT1 widoczne w powiększeniu 50x.

Rysunek 48. Folie CUT2 widoczne w powiększeniu 10x.

Rysunek 49. Folie CUT2 widoczne w powiększeniu 50x.

Rysunek 50. Łuki biodegradowalne CUT1 przed kompostowaniem (po lewej) i po kompostowaniu (po prawej) widoczne w powiększeniu 10x.

Rysunek 51. Degradacja łuków biodegradowalnych CUT1 w wyniku kompostowania laboratoryjnego.

Rysunek 52. Łuki biodegradowalne CUT2 przed kompostowaniem (po lewej) i po kompostowaniu (po prawej) widoczne w powiększeniu 10x.

Rysunek 53. Degradacja łuków biodegradowalnych CUT2 w wyniku kompostowania laboratoryjnego.

Rysunek 54. Zapinki biodegradowalne CUT1 przed kompostowaniem (po lewej) i po kompostowaniu (po prawej) widoczne w powiększeniu 10x.

Rysunek 55. Degradacja zapinek biodegradowalnych CUT1 w wyniku kompostowania laboratoryjnego.

Rysunek 56. Zapinki biodegradowalne CUT2 przed kompostowaniem (po lewej) i po kompostowaniu (po prawej) widoczne w powiększeniu 10x.

Rysunek 57. Degradacja zapinek biodegradowalnych CUT2 w wyniku kompostowania laboratoryjnego.

Rysunek 58. Pozostałości próbek CUT1 (I rząd) oraz CUT2 (II i III rząd) po wyjęciu z kompostownika przydomowego.

Rysunek 59. Pozostałości próbek CUT3 po wyjęciu z kompostownika przydomowego.

Rysunek 60. Próbki akcesoriów tj. zapinek i łuków CUT1 po procesie kompostowania przydomowego.

Rysunek 61. Próbki akcesoriów tj. zapinek i łuków CUT2 po procesie kompostowania przydomowego.

Rysunek 62. Pozostałości odpadów ze zużytej folii CUT2 (po lewej) i CUT3 (po prawej) po wyjęciu z kompostownika przydomowego.



Rysunek 63. Folia biodegradowalna ułożona na zagonach po miesiącu uprawy pomidorów. Na zdjęciach przedstawiono folię CUT2 oraz CUT3.

Rysunek 64. Folia biodegradowalna ułożona na zagonach po dwóch miesiącach uprawy pomidorów. Na zdjęciach przedstawiono folię CUT1 oraz CUT3.

Rysunek 65. Folia CUT1 oraz CUT2 po blisko 5 miesiącach użytkowania na zagonach.

Rysunek 66. Czarna folia CUT3 po ponad 5 miesiącach użytkowania na zagonach.

Rysunek 67. Pozostałości folii biodegradowalnej w ziemi po uprawie pomidora.

Rysunek 68. Łuki biodegradowalne zastosowane podczas uprawy pomidorów w szklarni.

Rysunek 69. Zapinki biodegradowalne zastosowane podczas uprawy pomidorów w szklarni.