

POLITECHNIKA KRAKOWSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI
KATEDRA TECHNOLOGII ŚRODOWISKOWYCH

ROZPRAWA DOKTORSKA

**MIKROPLASTIKI JAKO OGRANICZENIE RECYKLINGU ORGANICZNEGO
I BARIERA GOZ – BADANIA EKSPERYMENTALNE**

mgr Katarzyna Grąz

PROMOTOR: PROF. DR HAB. INŻ. AGNIESZKA GENEROWICZ

PROMOTOR POMOCNICZY: DR INŻ. JUSTYNA KWAŚNY

Kraków 2025

„Ziemi nie dziedziczymy po naszych rodzicach, pożyczamy ją od naszych dzieci”

Antoine Marie Roger de Saint-Exupéry

*Składam najserdeczniejsze wyrazy wdzięczności i podziękowania
dla Pani Promotor **Prof. dr hab. Agnieszce Generowicz**
za nieocenioną wszechstronną pomoc, zaangażowanie oraz opiekę naukową,
która towarzyszyła mi przez cały proces powstawania tej pracy.*

*Dziękuję serdecznie Pani Promotor pomocniczej **dr inż. Justynie Kwaśny**
za cenne merytoryczne wskazówki, których mi udzieliła
oraz mojej koleżance z pracy **dr Ani Gronbie-Chyle** za okazaną mi życzliwość.*

*Podziękowania składam również wszystkim moim Bliskim,
którzy bardzo wspierali mnie na każdym etapie podczas realizacji tej pracy:
mojemu Mężowi, Dzieciom, Rodzicom oraz Bratu.*

Spis treści

1.	Wstęp	6
2.	Analiza literaturowa	8
2.1	Mikroplastik.....	8
2.1.1	Podział mikroplastików.....	9
2.1.2	Zanieczyszczenie środowiska mikroplastikami	10
2.1.2.1	Zanieczyszczania wód mikroplastikami.....	11
2.1.2.2	Zanieczyszczenia ścieków mikroplastikami pochodzącymi z kosmetyków.....	13
2.1.2.3	Zanieczyszczenia gleb przez mikroplastik	15
2.1.2.4	Zanieczyszczenia powietrza nano i mikroplastikami	16
2.1.2.4.1	<i>Mikroplastiki w powietrzu w pomieszczeniach zamkniętych</i>	<i>17</i>
2.1.3	Mikroplastik i ich wpływ na człowieka	17
2.1.3.1	Mikroplastik w żywności i w opakowaniach	18
2.2	Metody identyfikacji mikroplastików	20
2.3	Odpady z tworzyw sztucznych - czas rozkładu	20
2.4	Mikroplastiki biodegradowalne w odpadach, a produkcja nanocząstek	22
2.5	Kompostowanie jako sposób odzysku odpadów	23
2.6	Gospodarka odpadami a proces kompostowania.....	27
2.7	Prawo w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym	28
3.	Tezy, cele i zakres pracy badawczej	29
3.1	Tezy.....	29
3.2	Cele badawcze.....	29
3.3	Zakres pracy badawczej.....	29
4.	Metodyka badań.....	33
4.1	Materiał pobrany do badań wraz z charakterystyką miejsca poboru prób	33
4.1.1	Skoszona kompostowana trawa	33
4.1.2	Kompost z kompostownika przydomowego (odpady kuchenne)	34
4.1.3	Polepszacz glebowy – odpady biodegradowalne	35
4.1.4	Stabilizat – kompost z odpadów komunalnych	36
4.2	Zastosowane metody badawcze	39
4.2.1	Morfologia składu kompostów.....	39
4.2.2	Pomiary jakości kompostów	39
4.2.3	Badania wielkości cząstek DLS - Pomiar wielkości cząstek obecnych w kompostach	40
4.2.4	Spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera (FT-IR) – pomiary obecności mikroplastików w kompostach	41

4.2.5	Nasadenia roślin na kompostach	41
4.2.6	Schemat zastosowanych badań.....	42
5.	Część doświadczalna – przedstawienie wyników	43
5.1	Oznaczenie składu morfologicznego kompostów	43
5.1.1	Wyniki badania morfologii kompostów.....	43
5.1.1.1	Skoszona i przekompostowana trawa	44
5.1.1.2	Kompost przydomowy	45
5.1.1.3	Polepszacz glebowy – kompostowanie odpadów zielonych	46
5.1.1.4	Stabilizat	47
5.2	Badania jakości kompostów	50
5.2.1	Oznaczenie fosforanów i azotanów	50
5.3	Badania DLS (<i>dynamic light scattering</i>) – identyfikacja materiału pod kątem wielkości cząstek ⁶²	
5.3.1	Przygotowanie próbki do analizy.....	63
5.3.1.1	Ujednolicenie materiału.....	63
5.3.1.2	Sączenie i filtracja.....	65
5.4	Badania FT-IR (spektrofotometr w podczerwieni) – identyfikacja materiału pod kątem obecności mikroplastików	67
5.4.1	Mielenie materiału	68
5.4.1.1	Młyn tnący	68
5.4.1.2	Młyn planetarno – kulowy	70
5.5	Wyniki badań.....	73
5.5.1	Analiza skoszona kompostowana trawa.....	73
5.5.1.1	Analiza DLS – trawa kompostowana	73
5.5.1.2	Wyniki FT-IR - trawa kompostowana	76
5.5.2	Kompost przydomowy	81
5.5.2.1	Analiza DLS kompostu przydomowego.....	81
5.5.2.2	Analiza FT-IR kompostu przydomowego.....	83
5.5.3	Polepszacz glebowy (kompost z odpadów zielonych)	89
5.5.3.1	Analiza DLS polepszacza glebowego	89
5.5.3.2	Analiza FT-IR polepszacza glebowego.....	92
5.5.4	Stabilizat	99
5.5.4.1	Wyniki analizy stabilizatu - DLS.....	99
5.5.4.2	Wyniki analizy stabilizatu - FT-IR.....	103
5.5.5	Zestawienie zbiorcze wyników DLS	113
5.5.6	Zestawienie zbiorcze wyników FT-IR	115

5.6	Nasadenia roślin na wybranych typach kompostów z mikroplastikami	115
5.6.1	Podłoże: ziemia uniwersalna (Planta), nasadzenie: owies, pszenica, papryka, pomidor 117	
5.6.2	Podłoże: ziemia uniwersalna (Planta) plus polimery, nasadzenie: owies, pszenica, papryka, pomidor	118
5.6.3	Podłoże: kompost przydomowy, nasadzenie: owies, pszenica, papryka, pomidor	119
5.6.4	Kompost przydomowy plus polimery, nasadzenie: owies, pszenica, papryka, pomidor 119	
5.6.5	Polepszacz glebowy, nasadzenie: owies, pszenica, papryka, pomidor	120
5.6.6	Polepszacz glebowy plus polimery, nasadzenie: owies, pszenica, papryka, pomidor...	121
5.6.7	Stabilizat i stabilizat zmieszany z polimerami.....	122
5.7	Zestawienie wyników wzrostu poszczególnych roślin w zależności od rodzaju użytego podłoża	122
5.8	Przechodzenie mikroplastików do roślin.....	130
6.	Podsumowanie badań i dyskusja wyników	138
7.	Wnioski	147
8.	Streszczenie	150
9.	Abstract	152
10.	Literatura	154
11.	Spis tabel	168
12.	Spis rysunków	171
13.	Załączniki	176

1. Wstęp

Z punktu widzenia ochrony środowiska najważniejszym celem gospodarowania odpadami komunalnymi jest ograniczenie do niezbędnego minimum składowania odpadów w środowisku, maksymalizacja ich zagospodarowania i minimalizacja ich ilości. Niemniej jednak przez bardzo szeroko rozwijającą się egzystencję człowieka, na całym świecie powstaje coraz to więcej odpadów. Podobnie jest ze zwiększającą się ilością plastiku, a tym samym mikroplastiku. Zanieczyszczenie mikro- i nanoplastikami rośnie w zatrważającym tempie. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w 2023 r. w Polsce zebrano 13,4 mln ton odpadów komunalnych, co stanowi wzrost o 0,2% w porównaniu z 2022 rokiem, ale aż o 43,8 % wzrostu w porównaniu do 2005 roku. Według danych statystycznych na jednego mieszkańca Polski przypadało średnio ok. 356 kg wytworzonych odpadów komunalnych w roku 2023, co stanowi wzrost o 1,9 kg w porównaniu do roku poprzedniego, a o 111,6 kg więcej w odniesieniu do 2005 r. (GUS, 2023). Jedną z form przerobu odpadów jest proces kompostowania. W wyniku kompostowania zmieszanych odpadów komunalnych powstaje tak zwany stabilizat – odpad o kodzie z grupy 19 – stanowiący obecnie materiał, który jest deponowany na składowisku odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne. W pracy tej stabilizat został poddany szeregowi badań, aby udowodnić że należy szukać nowych form jego przerobu i szukać nowych rozwiązań jego wykorzystania. Ponadto przebadano skład morfologiczny wybranych kompostów (kompostowana trawa, kompost przydomowy, polepszacz glebowy oraz wspomniany już stabilizat), zbadano skład morfologiczny, właściwości jakościowe wymienionych kompostów, wielkość cząstek oraz skład polimerów w nim zawartych. Daje to nowe analizy i pogląd na strukturę kompostów, ale przede wszystkim dostarcza informacji o składzie i obecności mikroplastików - jako nowego współczynnika analizy tych wspomnianych materiałów.

Rozdział 2 niniejszej rozprawy doktorskiej zawiera analizę literaturową zagadnień związanych z zanieczyszczeniem środowiska mikroplastikami, wpływu na zdrowie, przedstawienie procesu kompostowania i zagadnień związanych z uwarunkowaniami prawnymi w kontekście tematu. Rozdział 3 zawiera sformułowane tezy, cele i zakres pracy badawczej. Rozdział 4 stanowi metodologia badań wraz z opisem próbek użytych do analiz i sposobem postępowania z danym materiałem podczas dokonywania analiz i pomiarów. Rozdział 5 niniejszej rozprawy doktorskiej stanowi opis części doświadczalnej i przedstawienie wyników badań. Rozdział 6 zawiera podsumowanie i dyskusję wyników. Rozdział 7 stanowią wnioski z badań. Rozdział 8 i 9 to streszczenia w języku polskim i angielskim niniejszej pracy. Rozdział 10 to przedstawiona

bibliografia. Rozdział 11 i 12 to kolejno zaprezentowany spis tabel i rysunków zawartych w pracy. Rozprawę kończą załączniki w postaci zestawienia szczegółowych wyników z przeprowadzonych badań (rozdział 13).

2. Analiza literaturowa

2.1 Mikroplastik

Tworzywa sztuczne są niezwykle użytecznym i niezbędnym materiałem towarzyszącym człowiekowi we wszystkich aspektach życia. Wiele osiągnięć w dziedzinie technologii, medycyny oraz przemysłu nie byłoby możliwych bez wykorzystania plastiku. Jego niski koszt produkcji i łatwa dostępność sprawiły, że jest narażony na powszechne globalne niewłaściwe zastosowanie (Bostan N. i in., 2023; Govarthanan M. i in., 2022; Liu P. i in., 2020). Masowa produkcja i szerokie zastosowanie tworzyw sztucznych i ich pochodnych doprowadziły do uwolnienia dużej liczby wyrzuconych produktów z tworzyw sztucznych do środowiska naturalnego, gdzie nadal się gromadzą ze względu na niski wskaźnik recyklingu i długą trwałość. Te duże kawałki plastiku stopniowo rozpadają się na mikroplastiki (<5 mm), które są wysoce trwałymi zanieczyszczeniami organicznymi i przyciągają uwagę całego świata ze względu na ich mały rozmiar cząstek i potencjalne zagrożenia dla ekosystemu (Ya H. i in., 2021; Mammo F. i in., 2020). Mikroplastiki (MPs) zostały już wykryte w różnych matrycach środowiskowych, takich jak gleba, osady i wody powierzchniowe, a ostatnio także w wodach gruntowych (Dey U. i in., 2023). Chociaż plastik jest obecny w środowisku od ponad stu lat, pierwsza wzmianka o małych kawałkach plastiku - mikroplastiku, miała miejsce w 1972 roku (Carpenter E., Smith K., 1972).

Od początku produkcji tworzyw sztucznych do chwili obecnej wyprodukowano około 8,3 miliarda ton metrycznych tego materiału (Khalid N. i in., 2021). Rocznie odnotowuje się średnio 3% wzrost produkcji tworzyw sztucznych. Z tego 94% plastiku trafia do środowiska na całym świecie. Plastik ze względu, że jest szeroko stosowany, ma on niski wskaźnik odzysku i długą stabilność. Dlatego też gromadzi się w środowisku. Większe kawałki plastiku obecne w środowisku są narażone na działanie biologiczne, zarysowania mechaniczne, hydrolizę, wietrzenie gleby i promieniowanie ultrafioletowe, tworząc cząstki mikroplastiku (Bostan N. i in., 2023). Zaśmiecanie tworzywami sztucznymi jest kwestią behawioralną, a niektórzy twierdzą, że rozwinęło się ono wraz z naszym większym wykorzystaniem wyrzucanych produktów i opakowań. Być może zwiększenie możliwości recyklingu może pomóc w odwróceniu tego trendu, tak aby materiały wycofane z eksploatacji były postrzegane jako użyteczne surowce do nowej produkcji, a nie śmieci. Będzie to wymagało lepszej edukacji, zaangażowania, egzekwowania przepisów i możliwości recyklingu (Barai D. P. i in., 2025).

2.1.1 Podział mikroplastików

Mikroplastiki to cząstki stałe o wielkości mniejszej niż 5 mm. W zależności od wytrzymałości i twardości istnieją różne formy mikroplastiku, takie jak np. polietylen (PE), polipropylen (PP), polichlorek winylu (PVC), politereftalan etylenu (PET) itp.

Mikrodrobiny plastiku dzielą się na dwa rodzaje: pierwotne i wtórne. Pierwotne mikrodrobiny plastiku są surowcami używanymi w produktach toaletowych, takich jak np. szampony i kosmetyki (Ya H. i in., 2021; 2022; Prosenc F. i in., 2021). Wtórne mikrodrobiny plastiku powstają w wyniku rozkładu pierwotnych mikrodrobin plastiku w procesach fizycznych, chemicznych i biologicznych. Mikroplastik i związane z nim chemikalia, które wchodzi w skład łańcuchów pokarmowych i gromadzą się na różnych poziomach troficznych, mają szkodliwy wpływ na zdrowie ludzi i innych organizmów (Bostan N. i in., 2023).

Istnieje podstawowa metoda klasyfikacji mikrodrobin plastiku. Zgodnie z tą metodą mikroplastik dzieli się na różne formy i rodzaje. Na podstawie różnych rodzajów surowców syntetycznego mikroplastiku, dzieli się go na dwa rodzaje, które są mikroplastikiem na bazie ropy naftowej i mikroplastikiem na bazie biologicznej. Na podstawie składu chemicznego mikroplastiku można wyróżnić jego dwa rodzaje: mikroplastik biodegradowalny i mikroplastik nieulegający biodegradacji. (Bostan N. i in., 2023). Na podstawie różnicy w ich wytrzymałości i twardości dzieli się je na termoutwardzalne i termoplastyczne (Chamas A. i in., 2020). Zgodnie z różnymi strukturami łańcuchowymi materiału polimerowego mikroplastiku, dzieli się go na dwa typy, tj. mikroplastik alifatyczny (zawiera łańcuch liniowy) i mikroplastik aromatyczny (ma pierścień w łańcuchu). Na podstawie źródeł mikrodrobin plastiku dzieli się je na dwie formy, takie jak mikrodrobiny pierwotne i mikrodrobiny wtórne. Są one również klasyfikowane na podstawie rozmiaru i kształtu.

Ze względu na wysoką masę cząsteczkową, amorficzną strukturę krystaliczną, silną hydrofobową powierzchnię i silne pojedyncze wiązanie C-C mikrodrobiny plastiku na bazie ropy naftowej nie ulegają degradacji. Mikrodrobiny plastiku na bazie ropy naftowej wychwytyują węgiel z paliw kopalnych i wykorzystują go. Przykładami mikroplastików na bazie ropy naftowej są wspomniane już: polietylen (PE), polistyren (PS), politetrafluoroetylen (PTFE). Polimery te mają wiele pożądanych właściwości, takich jak wytrzymałość, elastyczność, obojętność chemiczna i trwałość. Te oparte na ropie naftowej mikroplastiki są wykorzystywane do produkcji opon rowerowych, żagli wyścigowych i pancerzy bębnowych, ponieważ mają wysoką wytrzymałość na rozciąganie i mogą wytrzymać silne uderzenia. Oszacowano, że w 2010 r. około 4,8-12,7 ton odpadów z tworzyw sztucznych z polietylenu

trafiło do oceanów (Bostan N. i in., 2020; Kawecki D. i in., 2018; Marhoon A. i in., 2024). Mikroplastik polistyrenowy jest obecny w postaci kartonów na jajka i jednorazowych kubków, talerzy itp. Odnotowano znaczny wzrost stężenia PS w wodach przypowierzchniowych, które kształtuje się na poziomie 228 ± 350 cząstek/m³ i 148 ± 424 µg/m³ (Pabortsava K. i in., 2020).

2.1.2 Zanieczyszczenie środowiska mikroplastikami

Zanieczyszczenie mikrodrobinami plastiku jest jednym z największych problemów środowiskowych XXI wieku (Golwała H. i in., 2020). Mikroplastiki (MPs) są zanieczyszczeniami budzącymi coraz większe obawy ze względu na ich trwałe właściwości w środowisku (Raj D., Maiti, S. K., 2023). Badania wykazały, że mikrodrobiny plastiku zostały wykryte w środowisku lądowym, wodnym i atmosferycznym (He S. i in., 2022; Matthias C., 2012). Małe kawałki tworzyw sztucznych, takie jak mikroplastiki i nanoplastiki pochodzące ze źródeł pierwotnych i wtórnych, są głównym problemem na całym świecie ze względu na ich niekorzystny wpływ na środowisko i zdrowie publiczne (Lamichhane G. i in., 2023; Silva Ana B. i in., 2018). Ponieważ fizyczna i chemiczna degradacja tworzyw sztucznych prowadzi do produkcji cząstek plastiku o wielkości milimetra i mikrometra, ich obecność została uznana za zagrożenie dla środowiska (Jung S. i in., 2021). Plastik jest obecnie uważany za nieodłączną część codziennego życia ze względu na jego szerokie zastosowanie. Zanieczyszczenie mikroplastikiem (MP) staje się coraz większym zmartwieniem i zostało uznane za drugi najbardziej krytyczny problem naukowy w dziedzinie ekologii i środowiska. Mikroplastik jest mniejszy od plastiku i jest bardziej szkodliwy dla środowiska biotycznego i abiotycznego. Toksyczność mikroplastiku zależy od jego kształtu oraz rozmiaru i zwiększa się wraz ze wzrostem jego zdolności adsorpcyjnych. Powodem ich szkodliwego charakteru jest ich mały rozmiar i duży stosunek powierzchni do objętości. Mikroplastik może dostać się do owoców, warzyw, nasion, korzeni, łodyg i liści. W ten sposób mikroplastik dostaje się do łańcucha pokarmowego. Istnieją różne punkty wejścia mikroplastiku do łańcucha pokarmowego. Takie źródła mogą obejmować zanieczyszczoną żywność, napoje, przyprawy, plastikowe zabawki i gospodarstwa domowe (pakowanie, gotowanie itp.). Stężenie mikroplastiku w środowisku lądowym rośnie z dnia na dzień. Mikroplastik powoduje niszczenie struktury gleby (niszczy mikrobiotę gleby), powoduje zubożenie składników odżywczych w glebie, a ich wchłanianie przez rośliny zmniejsza wzrost roślin. Oprócz innych problemów środowiskowych powodowanych przez mikroplastik, zanieczyszczenie mikroplastikiem obecne w środowisku lądowym ma również negatywny wpływ na zdrowie ludzi. Mikrodrobiny plastiku są uwalniane do środowiska bezpośrednio z używanych na co

dzień plastikowych przedmiotów, degradacji tworzyw sztucznych, przemysłu i oczyszczalni ścieków. Gdy te zanieczyszczenia dostaną się do wody, życie wodne żywi się nimi, a mikrodrobiny plastiku wchodzą do łańcucha pokarmowego i powodują poważne zagrożenie dla zdrowia (Vivekanand A. Ch. i in., 2021; Lv L. i in., 2021). Mikroplastiki mogą przez długi czas przebywać w wodzie, ponieważ charakteryzują się wysoką stabilnością, posiadają wysoki potencjał fragmentacji i mogą adsorbować inne zanieczyszczenia. Wiele gatunków wodnych zawiera mikroplastik, który jest szczególnie łatwo akumulowany przez organizmy planktoniczne i bezkręgowce (Padervand M. i in., 2020; Goswami R.K. i in., 2021). Drobinę polimerów mniejsze niż 5 mm stanowią globalne niebezpieczeństwo, ponieważ mogą stanowić zagrożenie dla fauny i flory oraz zdrowia publicznego (Weithmann N. i in., 2018). Mikrodrobiny plastiku w środowisku ulegają degradacji mechanicznej, chemicznej i biologicznej. Szybkość degradacji zależy od właściwości polimeru, takich jak struktura, dodatki i skład chemiczny, a także od właściwości środowiskowych, takich jak temperatura i wilgotność oraz ośrodek (matryca) depozycji (np. woda, gleba, piasek, środowisko lądowe lub wodne) oraz środowisko depozycji. Ten ostatni czynnik odgrywa integralną rolę w określaniu, czy cząstki mikroplastiku są wystawione na działanie światła słonecznego, czy też są zakopane pod słupem wody lub w bentosie, a także w ilości mechanicznego ścierania, które występuje w takich warunkach, jak plaże w porównaniu ze składowiskami odpadów. Chociaż degradacja mechaniczna, chemiczna i biologiczna może spowodować rozpad mikrodrobin plastiku na nanoplastiki lub oligomery i monomery, połączenie dwóch lub wszystkich trzech procesów wietrzenia zwykle współdziała ze sobą, prowadząc do degradacji mikrodrobin plastiku (Corcoran P. L., 2022).

2.1.2.1 Zanieczyszczania wód mikroplastikami

Powszechnie odpady z tworzyw sztucznych generowane na lądzie trafiają do zbiorników wodnych, powodując szkodliwy wpływ na środowisko wodne poprzez zatrucie i zanieczyszczenie ekosystemu morskiego (Kalali E. N., 2023). Rozpowszechnienie mikroplastiku w ekosystemach wodnych w wyniku działalności antropogenicznej przyciągnęło uwagę całego świata (Ma H. i in., 2020). Mikrodrobiny plastiku są powszechnie obecne w środowisku morskim i przybrzeżnym, co w ostatnich latach wzbudza globalne zaniepokojenie (Samanta P. i in. 2022). Dotychczasowe badania wykazały niekorzystny wpływ mikro- i nanoplastików zarówno na organizmy słodkowodne, jak i morskie (Timilsino A. i in., 2023). Wykryto je w zbiornikach wodnych i osadach siedmiu kontynentów i czterech oceanów. Co więcej, badania

wykazały, że skład chemiczny mikrodrobin plastiku, a także zaadsorbowane na nich zanieczyszczenia, mogą mieć negatywny wpływ na organizmy morskie. Nadal nie jest jasne, czy i w jaki sposób spożycie produktów wodnych zanieczyszczonych mikrodrobinami plastiku wpływa na zdrowie ludzi. Dlatego zaleca się, aby przyszłe badania koncentrowały się na przenoszeniu, akumulacji i skutkach mikrodrobin plastiku w łańcuchu pokarmowym (Yu Q. i in., 2020).

Wraz ze wzrostem liczby ludności, gospodarka odpadami staje się głównym problemem, a najnowsze badania podkreślają również inną poważną kwestię, jaką są odpady morskie. Zaobserwowano, że odpady wytwarzane przez ludzi gromadzą się w środowisku morskim, w dużych ilościach mikroplastiku w zbiornikach wodnych, takich jak rzeki, jeziora, morza i oceany. Badania wykazały, że światło UV i niska temperatura pomagają w rozkładzie zwykłego plastiku na mniejsze kawałki, które ogólnie nazywamy mikroplastikami i poprzez spływ przedostają się do środowiska morskiego. Generalnie mikroplastik identyfikowany jest jako polichlorek winylu (PVC), politereftalan etylen (PET), polistyren (PS) i nylon itp. Z powodu braku skutecznego zarządzania, stężenie tych mikrodrobin plastiku rośnie w alarmującym tempie, co nie tylko wpływa na środowisko morskie, ale także bezpośrednio wpływa na życie morskie. Niektóre niedawne badania wykazały, że środowisko morskie bliżej obszarów miejskich ma wyższy poziom mikroplastiku, a zwierzęta wodne z tych obszarów wykazały wysoką akumulację mikroplastiku w swoich tkankach. Co więcej, doniesiono również, że inne zanieczyszczenia wody, takie jak barwniki, metale ciężkie i inne chemikalia mogą łatwo łączyć się z mikroplastikami, a te mikroplastiki działają również jako nośnik innych zanieczyszczeń w organizmie zwierząt wodnych, które następnie wchodzi do łańcucha pokarmowego (Gola D. i in., 2021). W kontekście ekosystemu wodnego mikroplastiki nie są biernymi „mieszkańcami”, ale raczej integralnymi składnikami tego ekosystemu. Gdy te niewielkie cząsteczki tworzyw sztucznych są połykane przez organizmy wodne, stają się częścią wodnej sieci pokarmowej. W miarę jak organizmy na niższych poziomach troficznych spożywają mikroplastik, stopniowo przesuwają się one w górę łańcucha pokarmowego, gdy drapieżniki żywią się ofiarami, które zawierają te cząstki. Proces ten inicjuje bioakumulację, mechanizm, dzięki któremu te mikrozanieczyszczenia gromadzą się i rozprzestrzeniają na różnych poziomach troficznych w ekosystemie. W konsekwencji mikroplastiki stają się osadzone w samej strukturze ekosystemu wodnego, wpływając nie tylko na poszczególne gatunki, ale także na skomplikowaną sieć interakcji między organizmami wodnymi. Obecność małych cząstek plastiku w ekosystemach wodnych wzbudziła obawy dotyczące ich potencjalnego wpływu na środowisko. Jak już było wspomniane mikroplastiki

mogą absorbować zanieczyszczenia środowiskowe, takie jak związki organiczne, metale i nowe zanieczyszczenia. Bioakumulacja mikroplastiku może wywoływać stany zapalne, wpływając na wzrost i reprodukcję. Ponadto interakcja MP z innymi zanieczyszczeniami może wywoływać połączone reakcje toksyczne (Chen Y.Y. i in., 2023; Li R. i in., 2020).

2.1.2.2 Zanieczyszczenia ścieków mikroplastikami pochodzącymi z kosmetyków

Obecnie, ze względu na szybki rozwój industrializacji i urbanizacji, generowana jest ogromna ilość ścieków (Kumar M. i in., 2022). Kosmetyki i produkty higieny osobistej, takie jak pasta do zębów i peelingi do twarzy, zawierają plastikowe mikrogranulki, które mogą przyczyniać się do obecności mikro i nanoplastików (MNP) w środowisku. Te tworzywa sztuczne są wykorzystywane w środkach do mycia twarzy i kosmetykach, a także odnotowano ich wykorzystanie jako wektorów leków w medycynie. Ponadto, ze względu na obowiązujące przepisy dotyczące mikrogranulek, mikroplastikowe „peelingi” stosowane w środkach do mycia rąk i peelingach do twarzy zostały zastąpione związkami pochodzenia naturalnego. Ze względu na opatentowanie w latach 80. mikroplastikowych środków do szorowania w kosmetykach, stosowanie złuszcających środków czyszczących z tworzyw sztucznych gwałtownie wzrosło. Te tworzywa sztuczne, znane jako „mikrogranulki” lub „mikrozłuszczacze” w zależności od produktu, mogą różnić się formą, rozmiarem i składem. Niektóre firmy kosmetyczne włączają granulki PE i PP (5 mm), a także kulki PS (2 mm) do swoich produktów kosmetycznych. Ponadto badacze zaobserwowali ostatnio występowanie mikroplastików o nieregularnych kształtach w różnych produktach kosmetycznych, o średniej średnicy 0,5-0,1 mm (Meegoda J. N, Hettiarachchi M.C., 2023). Podobnie, gdy mikrogranulki są stosowane jako środki czyszczące lub złuszczące w szerokiej gamie produktów do pielęgnacji ciała i kosmetyków, w tym w żelach pod prysznic, pastach do zębów, farbach do paznokci i cieniach do powiek. Większość z nich jest wypłukiwana w ściekach po użyciu, które są przetwarzane w oczyszczalniach ścieków lub odprowadzane bezpośrednio do środowiska. Hunt C. F. i współpracownicy podają, że mikrokulki nie mogą być całkowicie wyeliminowane przez procedury oczyszczalni ścieków. Według badania skuteczność oczyszczalni ścieków w zatrzymywaniu mikroplastików (MP) wahała się od 95,65% w przypadku oczyszczalni ścieków z oczyszczaniem wtórnym do 99,4% w przypadku pilotażowego systemu bioreaktora membranowego. Niemniej jednak szacuje się, że 15 miliardów cząstek dziennie byłoby dostarczanych do analizowanego zbiornika wodnego. Aby rozwiązać tę kwestię, wiele krajów

wprowadziło zakazy lub ograniczenia dotyczące stosowania plastikowych mikrogranulek w kosmetykach i produktach higieny osobistej. Podczas gdy rozwój dowodów naukowych dotyczących uwalniania do środowiska i toksyczności skłonił do wprowadzenia ograniczeń regulacyjnych dotyczących stosowania mikrogranulek z tworzyw sztucznych, dostępność alternatywnych materiałów miała kluczowe znaczenie dla wprowadzenia tych przepisów. Obecnie na rynku dostępnych jest wiele alternatywnych materiałów, takich jak pokruszone łupiny orzechów włoskich, owies, cukier i nasiona jojoby, z których wiele było używanych w niedawnej przeszłości przed wprowadzeniem plastikowych mikrogranulek i są one nadal używane w kosmetologii, często sprzedawane jako „naturalne” alternatywy. Podjęto również ponowne wysiłki w celu wytworzenia syntetycznych biodegradowalnych mikrogranulek opartych na materiałach takich jak celuloza (Hunt C.F i in. 2020). Poza Stanami Zjednoczonymi, Kanadą i Chinami, Nowa Zelandia i Korea Południowa są jedynymi krajami pozaeuropejskimi, wraz z prowincją Tajwan, które już zakazały stosowania mikrogranulek w kosmetykach spłukiwanych. Islandia zgodziła się na wprowadzenie zakazu, podczas gdy Indie badają obecnie przyszłe ograniczenia - status zakazu nie jest znany (Anagnosti L. i in., 2021). Oczyszczalnie ścieków powszechnie są pierwszą linią obrony przed wprowadzeniem do naturalnych ekosystemów wodnych mikroplastików, co prowadzi do przekształcenia pierwotnych MP (mikroplastików) we wtórne MP. Obecność MP w ściekach komunalnych wynika głównie z rutynowej działalności człowieka. Na przykład odzież wykonana z poliestru i poliamidu uwalnia cząsteczki w trakcie prania, podczas gdy produkty higieny osobistej, takie jak pasta do zębów, środki czyszczące i żele pod prysznic, wprowadzają MP do oczyszczalni ścieków poprzez codzienne użytkowanie. Co więcej, odpady z tworzyw sztucznych na wysypiskach ulegają rozkładowi mikrobiologicznemu w odciekach, a następnie trafiają do oczyszczalni ścieków. Z kolei MP zawieszone w atmosferze, emitowane przez przemysł i pojazdy, również trafiają do oczyszczalni ścieków poprzez depozycję atmosferyczną. Badania wykazały, że nieoczyszczone MP są często uwalniane z oczyszczalni ścieków, ostatecznie dostając się do zbiorników wodnych i gromadząc się w środowisku (Liu W. i in., 2021; Bashir S.M i in., 2021). Kwestię tę dodatkowo pogarsza znaczny udział spływów tekstylnych, pyłu miejskiego, ścierania opon, fragmentów plastikowych granulek i opon, farb drogowych i różnych produktów na bazie tworzyw sztucznych, z których wszystkie są często wyrzucane do toalet lub wprowadzane do wód powierzchniowych. Rozmieszczenie zanieczyszczeń mikroplastikiem (MP) wykazuje zróżnicowanie geograficzne, na które wpływają takie czynniki jak lokalizacja regionalna, dominujące wiatry, wzorce cykloniczne, dynamika pływów, obciążenia środowiskowe, charakterystyka hydrodynamiczna, ekspozycja na światło

słoneczne, występowanie huraganów, tsunami, silne prądy morskie, praktyki rolnicze, a także różnice w morfologii i topografii linii brzegowej (Sadia M. i in., 2022). Erdle L.M. podaje, iż badanie przeprowadzone w lokalnej społeczności wykazało, że filtry pralek skutecznie wychwytywały mikrowłókna i inne cząstki, zanim dostały się one do ścieków. Wdrożenie tych filtrów zmniejszyło emisję mikrowłókien i zanieczyszczeń chemicznych do środowiska. W badaniu zaobserwowano również znaczny spadek ilości mikrowłókien w końcowych ściekach z oczyszczalni ścieków, co wskazuje, że filtry do pralek mogą skutecznie zmniejszać emisję mikrowłókien do zbiorników wodnych (Erdle L. M. i in., 2021). Mikrowłókna plastikowe (< 5 mm) i nanowłókna (< 100 nm) stanowią dominującą kategorię MP. Włókna te wykazują powszechną dystrybucję i stanowią do 35% wtórnych MP, pochodzących głównie z szarej wody z gospodarstw domowych. Mikrowłókna są szczególnie obfite w ściekach i oczyszczalniach ścieków, co sprawia, że są one znaczącym czynnikiem przyczyniającym się do powstawania lądowych MP w ekosystemach wodnych. Mikrowłókna dostają się do środowiska zarówno w formie pierwotnej, jak i wtórnej, uwalniane podczas produkcji lub użytkowania tekstyliów. Obecność włókien we wpływach i ściekach z oczyszczalni ścieków jest szeroko udokumentowana, szczególnie w kontekście prania włókien syntetycznych. Na przykład, w badaniu oszacowano, że 6-kilogramowy wsad do prania może emitować od $13,8 \times 10^3$ do $72,8 \times 10^3$ włókien, w zależności od rodzaju tkanin syntetycznych. Uwalnianie włókien zależy w szczególności od zmiennych, takich jak cotygodniowe cykle prania, skład detergentu, temperatura wody, ilość zużytej wody i właściwości tkaniny (Yaseen A., i in., 2022).

2.1.2.3 Zanieczyszczenia gleb przez mikroplastik

Kolejną ścieżką związaną z zanieczyszczeniem mikroplastikami środowiska, jest przenikanie mikroplastików do gleb (Kochanek A. i in., 2025; Li. R i. in., 2020). Jak podaje Ren Z. i inni (2021) w wyniku migracji mikroplastików w glebie, mogą one przedostawać się w głąb, także do wód gruntowych. Zanieczyszczenia w postaci mikroplastików dostają się do gleby kilkoma drogami: na przykład poprzez stosowanie osadów ściekowych, nawożenie gleb kompostem (Accinelli C. i in., 2022; Scopetani C. i in., 2022), a także nawadnianie gleb ściekami (Sajjad M. i in., 2022; En-Nejmy K. i in., 2024). Badania wykazują, że mikroplastiki pochodzące z folii z tworzywa sztucznego, służące jako mata ograniczająca przed chwastami mogą także łatwo migrować w dół profilu gleby (Li. S i in., 2022). Wśród innych czynników związanych z egzystencją człowieka, które powodują zanieczyszczenie gleby mikroplastikami, możemy

zaliczyć ruch uliczny, a także ścieki drogowe, które zawierają cząstki opon pojazdów. Składowanie odpadów na nieodpowiednio zaprojektowanych składowiskach, tj. bez odpowiedniego systemu drenażowego tak samo będzie źródłem zanieczyszczeń. Mikroplastiki mogą również przedostać się do gleby poprzez ruch powietrza atmosferycznego, może to tak samo przyczynić się do przedostania się ich do gleb, gdyż cząstki te posiadają dużą mobilność eoliczną (Xu L. i in., 2024; Dris R. i in., 2016; Yu F. i in., 2022). Biodegradacja mikroplastiku w glebie następuje zazwyczaj poprzez kolonizację powierzchni tworzyw sztucznych przez mikroorganizmy i depolimeryzację do mono- i oligomerów poprzez hydrolizę enzymatyczną (He D. i in., 2018; Chai B. i in., 2020; Yang H. i in., 2022; Ren X. i in., 2018). Jak podaje literatura nie tylko obecność mikroplastików ma wpływ na właściwości gleby, ale również kształt ich cząstek. Zanieczyszczenia w postaci włókien mogą powodować zaburzenia struktury gleby, co ma wpływ na jej porowatość, a tym samym na przepuszczalność wody, co w konsekwencji może to prowadzić do zmniejszenia cyrkulacji powietrza w glebie. Wpłynie to negatywnie na procesy biologiczne, np. takie jak aktywność mikrobiologiczna (Arab M. i in., 2024; Bao Z. i in., 2023; Huang W. i in., 2023; Rolsky Ch., 2020). Mikroorganizmy, które rozkładają materię organiczną w glebie, znacząco oddziałują z mikroplastikiem. Złożona sieć mikrobiologiczna bakterii, grzybów, pierwotniaków i glonów odgrywa kluczową rolę w agroekosystemach. Nierównowaga i zmiany w funkcjonowaniu i strukturze kolonii mikrobiologicznych mogą mieć konsekwencje dla całego systemu, a tym samym dla upraw. Ponadto rośliny są powiązane z mikrobiomem glebowym i fauną. Zależą one od tej sieci w zakresie różnych funkcji, tj. wzrost i rozwój, ochrona przed patogenami, produktywność i plony oraz mobilizacja i dostępność składników odżywczych (Chai. B. i in., 2020; Arab M. i in., 2024).

2.1.2.4 Zanieczyszczenia powietrzna nano i mikroplastikami

Mikrodrobiny plastiku w powietrzu stopniowo przyciągają uwagę naukowców w ostatnich latach, jednak są dość rzadko omawiane i badane. Mikroplastki występują już w powietrzu atmosferycznym. Cząsteczki mikro- i nanoplastiku mogą być unoszone przez wiatr lub deszcz. Dzięki temu mogą rozprzestrzeniać się na dużą skalę, zarówno na terenach wiejskich jak i w miastach (Sorensen R.M., Jovanović B., 2021; Nordahl S.L., i in. 2023; Aylaj M., 2023). Unoszące się w powietrzu nanoplastiki mogą być wdychane, co zagraża zdrowiu ludzi, ale badania nad toksycznością wdychanych nanoplastików (cząstek mniejszych niż 100 nm) są

mało zaawansowane, a mechanizmy interakcji są w dużej mierze nieznane. Wyniki te dostarczają nowych spostrzeżeń na poziomie molekularnym na temat losu i toksyczności unoszących się w powietrzu nanoplastików w ludzkim układzie oddechowym (Li i in., 2022, Bhat i Gaga, 2024; Yu F. i in., 2022).

2.1.2.4.1 *Mikroplastiki w powietrzu w pomieszczeniach zamkniętych*

Zhang Q. i inni przeprowadzili badanie powietrza w akademiku w pokojach pod względem obecności mikroplastików. Autorzy analizowali opad mikroplastiku w biurze i korytarzu, zarówno w dni robocze, jak i weekendy przez trzy miesiące. Ponadto zastosowano klimatyzator, aby zrozumieć wpływ przepływu powietrza na resuspensję mikroplastiku w akademiku. Spośród trzech miejsc pobierania próbek, najwyższa średnia obfitość mikroplastiku pojawiła się w akademiku ($9,9 \times 10^3$ MPs/m²/d), a następnie w biurze ($1,8 \times 10^3$ MPs/m²/d) i korytarzu ($1,5 \times 10^3$ MPs/m²/d). W akademiku średnia liczebność MP w weekendy ($1,4 \times 10^4$ MP/m²/d) była około trzy razy większa niż w dni powszednie ($5,8 \times 10^3$ MP/m²/d). Jednak w biurze obfitość w weekendy ($1,2 \times 10^3$ MPs/m²/d) wynosiła 50% obfitości w dni powszednie ($2,4 \times 10^3$ MPs/m²/d). Opad mikroplastiku występował głównie w postaci włókien i wykazywał podobny skład polimerów do produktów tekstylnych stosowanych w środowiskach wewnętrznych. Testy przepływu powietrza przy użyciu klimatyzatora sugerowały, że turbulencje przepływu powietrza zwiększały resuspensję mikrodrobin plastiku. Podsumowując autorzy doszli do wniosku, że środowiska wewnętrzne są podatne na poważne zanieczyszczenie mikroplastikami, ale poziom mikroplastiku jest bardzo zróżnicowany ze względu na różne cechy środowiska wewnętrznego. Wyniki wskazują również, że ilość tekstyliów jest jednym z głównych czynników wpływających na obfitość mikroplastiku w powietrzu w pomieszczeniach, podczas gdy turbulencje przepływu powietrza wywołane przez klimatyzator mogą powodować migrację mikroplastiku w środowiskach wewnętrznych (Zhang Q. i in., 2020).

2.1.3 *Mikroplastik i ich wpływ na człowieka*

Mikrodrobiny plastiku (ang. microplastics, MPs) to zanieczyszczenia, które w ciągu ostatnich kilku dekad zyskały znaczną uwagę ze względu na ich niekorzystny wpływ na organizmy żywe i środowisko (Mammo F. K i in., 2020). Obecność mikroplastiku w ludzkim ciele została potwierdzona. Mikroplastik dostaje się do organizmu człowieka na różne możliwe sposoby.

W zależności od sposobu, w jaki dostają się do organizmu, mikrodrobiny plastiku powodują różne choroby u ludzi. Mikrodrobiny plastiku mają również negatywny wpływ na układ hormonalny człowieka. Na poziomie ekosystemu wpływ mikrodrobin plastiku jest wzajemnie powiązany i może zakłócać procesy ekologiczne. Choć ostatnio opublikowano różne artykuły na temat kilku aspektów mikroplastiku obecnego w środowisku lądowym, nie ma pełnego przeglądu, który koncentrowałby się na wzajemnych powiązaniach MP w roślinach i glebie oraz ich wpływie na zwierzęta wyższe, takie jak człowiek (Bostan N. i in., 2023; Vivekanand A. Ch. i in., 2021).

Uświadomienie sobie istotnego zagrożenia, jakie mikrodrobiny plastiku stanowią dla środowiska i zdrowia ludzkiego, jest koniecznością. Ta forma zanieczyszczenia jest wszechobecna w powietrzu i żywności i przenika do naszych ciał poprzez spożycie, wdychanie lub kontakt ze skórą. Niezbędne jest dokonanie oceny potencjalnych zagrożeń, jakie mogą stwarzać MP. Istnieją dowody sugerujące, że substancje te mogą mieć negatywny wpływ na różne obszary ludzkiego zdrowia. Obejmują one układ oddechowy, pokarmowy, odpornościowy, nerwowy i rozrodczy, wątrobę i narządy, skórę, a nawet łożysko. Cieszy fakt, że większość krajów podjęła kroki w celu uregulowania kwestii cząstek plastiku. Środki te mają na celu zmniejszenie zużycia tworzyw sztucznych, co jest obecnie niezbędne (Lin Y-D. i in., 2023). Z badań wynika, że skuteczność wychwytywania cząstek MP przez nabłonek dróg oddechowych lub przewodu pokarmowego prawdopodobnie wzrasta wraz ze spadkiem wielkości tych cząstek. Mniejsze cząstki mogą być lepiej wchłaniane przez układ trawienny niż większe (Vethaal A.D. i in., 2001; Hussain N. i in., 2001). Badacze wskazują również, że te mniejsze MP są ogólnie uważane za bardziej niebezpieczne dla zdrowia ludzkiego (Yang X. i in., 2022; Wu X. i in., 2019). Im mniejsza cząsteczka, tym większe prawdopodobieństwo, że dotrze ona do innych obszarów ludzkiego ciała. Na przykład cząstki $\leq 10 \mu\text{m}$ są przede wszystkim zdolne do przechodzenia przez błony komórkowe (Barceló D. i in., 2023; Zurub R.E. i in., 2024). Reasumując, powyższe badania dowodzą, iż obecność mikrocząstek w powietrzu stanowi możliwość przedostania się do dróg oddechowych u człowieka (Fan F., 2023; Tourinho P.S. i in., 2019).

2.1.3.1 Mikroplastik w żywności i w opakowaniach

W ostatnich latach większą uwagę zwrócono na potencjalne zagrożenia dla zdrowia ludzkiego, ponieważ mikrodrobiny plastiku znaleziono w różnych produktach spożywczych i środowiskowych, takich jak woda pitna, sól kuchenna, cukier i powietrze. Oszacowano, że spożycie mikrodrobin plastiku przez ludzi za pośrednictwem powietrza i powszechnie

spożywanej żywności wynosi od 203 do 332 cząstek na osobę dziennie. Mikrodrobiny plastiku zostały wykryte w różnych ośrodkach (mediach), w tym w wodzie, osadach i owocach morza, podczas gdy niewiele badań koncentruje się na mikrodrobinach plastiku w pojemnikach na wynos. Przeprowadzono badania pojemników na wynos wykonane z popularnych materiałów polimerowych (polipropylen, PP; polistyren, PS; polietylen, PE; politereftalan etylenu, PET) z pięciu miast w Chinach. Mikroplastik w pojemnikach analizowano po różnych zabiegach (bezpośrednie płukanie i płukanie po zanurzeniu w gorącej wodzie). Wyniki wykazały, że mikrodrobiny plastiku znaleziono we wszystkich pojemnikach na wynos, a ich liczebność wahała się od 3 do 29 sztuk/pojemnik. Największa ich ilość występowała w pojemnikach PS o chropowatej powierzchni. Typy polimerów niektórych wykrytych cząstek były takie same jak w oryginalnych pojemnikach, co stanowiło 30% wszystkich mikroplastików; inne typy obejmowały poliester, sztuczny jedwab, akryl i nylon. Traktowanie pojemników gorącą wodą nie miało wpływu na liczebność mikroplastiku. Du F. wraz z współpracownikami podaje, że badanie wskazuje, iż mikrodrobiny plastiku w pojemnikach na wynos pochodzą z opadów atmosferycznych oraz z wewnętrznych powierzchni pojemników. Pod wpływem niewielkiej siły mechanicznej, luźna struktura i chropowata powierzchnia pojemników PS może złuszczać mikroplastik, łatwiej dostając się do wody. W oparciu o obfitość mikroplastiku w pojemnikach na wynos, osoby zamawiające jedzenie na wynos 4-7 razy w tygodniu mogą spożywać 12-203 kawałki mikroplastiku przez pojemniki (Du F. i in., 2020; Cox K. i in., 2019). Mikrodrobiny plastiku są wszechobecne w ekosystemach, ale ryzyko narażenia na nie ludzi jest nierozwiązane. Koncentrując się na amerykańskiej diecie, oceniliśmy liczbę cząstek mikroplastiku w powszechnie spożywanych produktach spożywczych w odniesieniu do ich zalecanego dziennego spożycia. Zbadano również potencjał wdychania mikroplastiku oraz to, w jaki sposób źródło wody pitnej może wpływać na spożycie mikroplastiku. Cox K. i inni w swojej analizie wykorzystali 402 punkty danych z 26 badań, co stanowi ponad 3600 przetworzonych próbek. Oceniając około 15% spożycia kalorii przez Amerykanów, szacujemy, że roczne spożycie mikroplastików waha się od 39000 do 52000 cząstek w zależności od wieku i płci. Szacunki te wzrastają do 74000 i 121000, gdy weźmie się pod uwagę wdychanie. Ponadto osoby, które spełniają zalecane spożycie wody wyłącznie ze źródeł butelkowanych, mogą spożywać dodatkowe 90000 mikrodrobin plastiku rocznie, w porównaniu do 4000 mikrodrobin plastiku w przypadku osób spożywających wyłącznie wodę z kranu. Szacunki te podlegają dużym wahaniom, jednak biorąc pod uwagę ograniczenia metodologiczne i ograniczenia danych, wartości te są prawdopodobnie niedoszacowane (Cox K. i in., 2019).

2.2 Metody identyfikacji mikroplastików

W ostatnich dziesięcioleciach mikrodrobiny plastiku stały się głównym globalnym problemem środowiskowym ze względu na ich wszechobecność w oceanach, biodostępność i zdolność do przenoszenia toksycznych chemikaliów. Analiza mikroplastiku w próbkach środowiskowych i eksperymentalnych staje się coraz bardziej powszechna. Identyfikacja mikrodrobin plastiku opiera się na fizycznej i chemicznej charakterystyce wyizolowanych cząstek w mieszaninach nieorganicznych i organicznych jako pozostałości po etapach ekstrakcji i oczyszczania. Obecnie szeroko stosowane są analizy fizyczne (np. mikroskopia) i chemiczne (np. spektroskopia). Jak podaje Shin W. J. i inni fizyczną charakteryzację możemy dokonać za pomocą mikroskopii elektronowej, atomowej, fluorescencyjnej, polaryzacyjnej. Natomiast do chemicznych metod analizy zaliczymy spektroskopie fouriera, ramanowską, transmisyjną, promieniowanie rentgenowskie oraz analizy termiczne np. skaningowa kalorymetria różniczkowa czy chromatografia gazowa. Istnieje jednak potrzeba ulepszenia i opracowania nowych metod w celu skrócenia czasu i wysiłku związanego z identyfikacją oraz wykrywania submikronowych tworzyw sztucznych w próbkach środowiskowych (Shin W. J. i in., 2017). W większości istniejących badań terenowych, mikroplastiki (MP) są zwykle identyfikowane i wykrywane za pomocą obserwacji mikroskopowej i analizy w podczerwieni z transformacją Fouriera (FT-IR), co maksymalizuje prawdopodobieństwo błędu w procesie szacowania. Połączenie analizy termogravimetrycznej i spektroskopii FT-IR, mikrospektroskopii Ramana, optycznej fototermicznej podczerwieni i pirolizy / chromatografii gazowej oraz spektrometrii masowej jest wykorzystywane do identyfikacji, rozpoznawania i kwantyfikacji MP w heterogenicznych matrycach stałych i ciekłych w celu zminimalizowania zakłóceń i błędnej interpretacji innych składników (materii organicznej) obecnych w próbkach, zwłaszcza gleby, osadów i biosolidów (Raj D. i in., 2023; Bhat M.A. i in., 2025; Sikorski W. i in., 2019; Schwarz A.E. i in., 2023).

2.3 Odpady z tworzyw sztucznych - czas rozkładu

Zanieczyszczenie tworzywami sztucznymi w różnych formach stało się najpoważniejszym zagrożeniem dla środowiska (Lamichhane, G. i in., 2023; Palas S. i in., 2022; Rafey A. i in., 2023).

Ilość tworzyw sztucznych gromadzących się w środowisku szybko rośnie, ale nasza wiedza na temat ich trwałości jest bardzo ograniczona. Niniejsza perspektywa podsumowuje istniejącą

literaturę na temat szybkości i ścieżek degradacji środowiskowej głównych rodzajów polimerów termoplastycznych. Metryka służąca do harmonizacji różnych typów pomiarów, specyficzny wskaźnik degradacji powierzchni (SSDR), została zaimplementowana i wykorzystana do ekstrapolacji okresów półtrwania. Wartości SSDR obejmują bardzo szeroki zakres, przy czym część zmienności wynika z badań degradacji przeprowadzonych w różnych środowiskach naturalnych. SSDR dla polietylenu o wysokiej gęstości (HDPE) w środowisku morskim wynosi od praktycznie 0 do około 11 $\mu\text{m rok}^{-1}$. Podejście to daje szereg interesujących spostrzeżeń. Wykorzystując średni SSDR dla HDPE w środowisku morskim, ekstrapolacja liniowa prowadzi do szacunkowych okresów półtrwania w zakresie od 58 lat (butelki) do 1200 lat (rury). Na przykład, SSDR dla HDPE i kwasu polimlekowego (PLA) są zaskakująco podobne w środowisku morskim, chociaż PLA ulega degradacji około 20 razy szybciej niż HDPE na lądzie. Badanie te wskazują większą potrzebę badań eksperymentalnych w dobrze zdefiniowanych warunkach reakcji, znormalizowanego raportowania szybkości i metod symulacji degradacji polimerów (Chamas A. i in., 2020; Han W. i in., 2024).

Jednym z głównych czynników zagrażających środowisku są odpady z tworzyw sztucznych, które powstają w dużych ilościach i powodują poważne szkody zarówno dla mieszkańców, jak i dla środowiska. Powszechnie odpady z tworzyw sztucznych generowane na lądzie trafiają do zbiorników wodnych, powodując szkodliwy wpływ na środowisko wodne poprzez zatrucie i zalanie ekosystemu morskiego. Istnieją różne podejścia do przekształcania odpadów z tworzyw sztucznych w nowe produkty, znane jako skuteczny sposób zarządzania nimi i poprawy zrównoważonego rozwoju środowiska. Ponadto rozważane są również ograniczenia w stosowaniu odpadów z tworzyw sztucznych do celów budowlanych. Wykorzystanie odpadów z tworzyw sztucznych do celów budowlanych znacznie poprawi zrównoważony rozwój naszego środowiska, a także będzie uważane za godne zaufania źródło materiałów do zastosowania w konwencjonalnych materiałach, takich jak beton i asfalt. (Kalali E. N. i in., 2023). Mahabeer J. i współpracownicy udowodnili, że istnieje możliwość uzyskania mikroplastików z odpadów tworzyw sztucznych, które przyczynią się do wychwytywania błękitu metylenowego ze ścieków syntetycznych (Mahabeer J. i in., 2022; Dutta D. i in., 2023). Odpady z tworzyw sztucznych zakopane na składowiskach odpadów są stopniowo rozkładane na mikrodrobiny plastiku pod wpływem czynników fizycznych, chemicznych i biologicznych, co stanowi zagrożenie dla środowiska w związku z eksploatacją zasobów odpadów. Odcieki ze składowisk odpadów jako potencjalne źródło mikrodrobin plastiku w środowisku (Shen M. i in., 2022).

2.4 Mikroplastiki biodegradowalne w odpadach, a produkcja nanocząstek

Współczesny świat zajmuje się wyłącznie gospodarką odpadami nieulegającymi biodegradacji, która wymaga bardziej wyrafinowanych procedur w porównaniu z gospodarką odpadami ulegającymi biodegradacji (Wei W. i in., 2019). Odpady biodegradowalne mogą stać się użyteczne dla społeczeństwa dzięki prostej technice podniesienia ich jakości poprzez zmniejszenie ich wpływu na środowisko. Naukowcy stoją za zrównoważonymi ścieżkami nanotechnologii, które są możliwe dzięki wykorzystaniu odpadów biodegradowalnych do przygotowania nanomateriałów. Istnieje duży potencjał biodegradowalnych odpadów jako realnej alternatywy dla stworzenia zrównoważonej gospodarki, która przyniesie korzyści wszystkim ludziom. Waloryzacja prowadzi do wykorzystania bioodpadów, a także zapewnia bezpieczniejsze i wolne od zagrożeń ekologiczne metody syntezy nanocząstek. Począwszy od różnych źródeł, a skończywszy na zastosowaniach obejmujących medycynę, przemysł spożywczy i uzdatnianie wody. Analizując zalety i wady nanocząstek wytwarzanych z bioodpadów można dostosować możliwości związane z postępami w ich stosowaniu. W obecnym scenariuszu połączenie zielonej syntezy i bioodpadów może przynieść szeroką gamę zastosowań w nanotechnologii, gdy tylko zostaną rozwiązane przeszkody związane z produkcją przemysłową na masową skalę. Biorąc pod uwagę powyższe punkty Aswathi V. P. i inni koncentrują się na opłacalnej syntezie nanocząstek metali i tlenków metali. Nanocząstki metaliczne (MNP) posiadają nieorganiczny rdzeń z metalu lub tlenku metalu, który jest zwykle otoczony powłoką wykonaną z materiału organicznego lub nieorganicznego lub tlenku metalu. Kształt MNP jest ważnym elementem wpływającym na reakcję biologiczną. Geometria nanocząstek ma wpływ na ich zdolność do przekraczania barier biologicznych. Mikronanocząstki mogą również wykazywać szereg zachowań, w tym aglomerację lub agregację, interakcje z naturalną materią organiczną (NOM) w wodzie oraz adsorpcję cząstek na powierzchniach. Właściwości fizykochemiczne są częściowo odpowiedzialne za te zachowania. Na właściwości MNP wpływa również efekt rozpuszczalności. MNP są zaprojektowane tak, aby funkcjonować jako źródło jonów metali w komórkach, stale uwalniając jony metali do komórek cytoplasm. Uwalnianie jonów metali zależy od ich rozpuszczalności i szybkości rozpuszczania. Chociaż niektóre nanocząstki metali mają słabą rozpuszczalność, nadal powodują ogromną toksyczność w środowisku fizjologicznym. Spośród nanocząstek metali, większość badań koncentruje się na nanocząstkach metali szlachetnych. Nanocząstki tlenków metali (MONP) są zwykle wytwarzane przez hydrolizę soli metali w temperaturze otoczenia lub w temperaturze poniżej 100 °C, ze względu na ich mały rozmiar

i wysoką gęstość narożnych lub krawędziowych miejsc powierzchniowych, nanocząstki tlenków metali mogą mieć wyjątkowe właściwości fizyczne i chemiczne. Korzystne substancje bioaktywne znajdujące się w owocach i odpadach roślinnych, takie jak alkaloidy, aminokwasy, enzymy, fenole, białka, polisacharydy, garbniki, saponiny, witaminy i terpenoidy, a także inne związki, działają jako środki redukujące w tworzeniu nanocząstek metali (NPs).

Podsumowując powyższe analizy, najnowsze osiągnięcia ostatniej dekady w zakresie wykorzystania bioodpadów do zrównoważonej produkcji NPs to liczne zastosowania w przemyśle medycznym (dostarczaniu leków, leczeniu raka), przemyśle spożywczym i uzdatnianiu wody. Łącznie badanie ostatnich dwóch dekad pokazuje wykładniczy wzrost tempa syntezy nanomateriałów wspomaganą bioodpadami ze względu na ich łatwą dostępność, lepszą stabilność i dyspersję w roztworach wodnych. W końcowej analizie stwierdzono, że wykorzystanie bioodpadów jest bardziej korzystne niż innych surowców pod względem zerowego zanieczyszczenia, prostych procedur, niskiej toksyczności, wysokiej stabilności i opłacalności w syntezie NPs. Z drugiej strony, interakcja między prekursorem metalu a bioodpadami, mechanizm interakcji w redukcji prekursora metalu, techniki izolacji lub oczyszczania interesującego składnika z bioodpadów, funkcjonalizacja, cytotoksyczność, masowa produkcja przemysłowa, selektywna pod względem kształtu synteza nanocząstek nadal wymagają szeroko zakrojonych badań w celu rozszerzenia przyjaznego dla środowiska wdrożenia nanomateriałów w biomedycynie, bioczułnikach, magazynowaniu baterii, energii, produkcji roślinnej, opakowaniach jadalnych i urządzeniach do noszenia. Biorąc wszystko pod uwagę, nanosynteza wspomagana bioodpadami ma potencjał do zwiększenia skali przy odpowiednim kształtowaniu polityki przez rząd lub zainteresowane władze, aby sprostać zrównoważonym, ekologicznym zastosowaniom, które otwierają nowe horyzonty na lepsze jutro (Aswathi V. P., 2023; Nagalakshmaiah M. i in., 2019; Real L. i in., 2022).

2.5 Kompostowanie jako sposób odzysku odpadów

Kompostowanie to kontrolowane przekształcanie degradowalnych produktów organicznych i odpadów w stabilne produkty przy pomocy mikroorganizmów (Majdouline Ch. i in., 2023; Waitt G. i in., 2022; Węglarz C. i in., 2018). Kompostowanie może być stosowane w celu zmniejszenia ilości łatwo psujących się odpadów spożywczych i zwiększenia żyzności gleby (Zhou X. i in., 2020; Awasthi M. K. i in., 2014; Bhave P. i in., 2019; Sobieraj i in., 2022). Kompostowanie jest od dawna stosowaną technologią, choć ma pewne niedociągnięcia, które ograniczyły jej szerokie zastosowanie i wydajność. Wady te obejmują wykrywanie patogenów,

niski poziom składników odżywczych, długi czas kompostowania, długi czas mineralizacji oraz wytwarzanie nieprzyjemnego zapachu. Wyzwania te przyczyniły się do upowszechnienia stosowania nawozów chemicznych produkowanych jako alternatywy dla kompostu (Manu M. K. i in., 2019; Mo J. i in., 2023). Nawozy chemiczne sprawiają, że składniki odżywcze są łatwo dostępne dla roślin, ale ich wady przeważają nad zaletami. Na przykład, nawozy chemiczne przyczyniają się do efektu cieplarnianego, zanieczyszczenia środowiska, śmierci organizmów glebowych i mieszkańców mórz, zubożenia warstwy ozonowej i chorób u ludzi. Spowodowało to, że rolnicy powracają do stosowania kompostów jako sposobu na przywrócenie żyzności gleby. Kompostowanie jest podstawowym procesem w rolnictwie i pomaga w recyklingu odpadów pochodzenia rolniczego (Ayilara M. S. i in., 2020; Rodziejewicz i in., 2009). Kompostowanie jest strategią gospodarki stałymi odpadami komunalnymi, która może zmniejszyć objętość i wagę materiałów jednorazowego użytku, zmniejszyć emisję odcieków, poddać recyklingowi zasoby i zmniejszyć koszty wymagane do usuwania odpadów (Erfani H. i in., 2023; Dede C. i in., 2023; Iqbal M. K. i in., 2015). Zdecentralizowane sortowanie i kompostowanie odpadów może zapobiec składowaniu prawie dwóch trzecich odpadów pochodzących z gospodarstw domowych (Sewak A. i in., 2021).

Kompostowanie to tlenowe przekształcanie organicznych odpadów stałych w nawozy (Ma R. i in., 2023; Agapiou A. in., 2020). W gospodarce stałymi odpadami komunalnymi podejście sortowania - jako kompostowania ma wiele zalet. Jednakże, ponieważ odpady komunalne zawierają szereg substancji i czynników zarówno chemicznych jak i biologicznych, kompost niekoniecznie musi być produktem nieszkodliwym. Zanieczyszczenia te mogą narażać różne populacje na zagrożenia dla zdrowia, od pracowników kompostowni po konsumentów produktów roślinnych uprawianych na glebach traktowanych kompostem (Domingo J. L. i in., 2009). Niemniej jednak, proces kompostowania jest najbardziej elastyczną i owocną metodą zarządzania biodegradowalnymi odpadami stałymi. Jest to główna praktyka rolnicza, która przyczynia się do recyklingu odpadów zielonych. Proces ten jest opłacalny w przypadku różnych odpadów roślinnych, zwierzęcych i syntetycznych, od pojemników przydomowych po duże kontenery. Praktyki kompostowania i gospodarowania odpadami rolniczymi kwitną w krajach rozwijających się, zwłaszcza w Pakistanie (Waqas M. i in., 2018). Kompostowanie przydomowe jest szeroko stosowane do przetwarzania odpadów warzywnych, owocowych i ogrodowych (bioodpadów) w ogrodach. Niestety, niewiele wiadomo na temat skuteczności higienizacji podczas tego procesu kompostowania na małą skalę (Ryckeboer J. i in., 2002; Tognetti C. i in., 2005). Kompostowanie ma przewagę nad innymi praktykami, takimi jak składowanie odpadów rolniczych, które zwiększają ryzyko zanieczyszczenia wód

gruntowych przez odcieki, podczas gdy kompostowanie zmniejsza zanieczyszczenie wody. Ponadto odpady są spalane, składowane na otwartych wysypiskach i wyrzucane do zbiorników wodnych, co prowadzi do zagrożeń dla środowiska i globalnego ocieplenia. Kompostowanie jest przyjazną dla środowiska i opłacalną praktyką utylizacji odpadów rolniczych. To biologiczne przekształcanie stałych odpadów roślinnych i zwierzęcych materiałów organicznych w żyzną matrycę przez liczne mikroorganizmy, w tym promieniowce, bakterie i grzyby, w obecności tlenu. Dodanie różnorodnych mikroorganizmów do odpadów stałych może przekształcić je w kompost lub wiele produktów ubocznych, np. ciepło, wodę i CO₂ (Waqas M. i in., 2018). Kompostowanie może zapobiec składowaniu odpadów organicznych na wysypiskach, ograniczyć emisję metanu i odzyskać składniki odżywcze z powrotem do gleby. Proces kompostowania jest jednak również źródłem emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń powietrza. Naukowcy, organy regulacyjne i decydenci polityczni polegają na szacunkach emisji w celu opracowania lokalnych wykazów emisji i rozważenia konkurencyjnych opcji przekierowania odpadów, jednak zgłoszone wskaźniki emisji są trudne do interpretacji i bardzo zmienne (Sarah L., i in., 2023; Karnchanawong S. i in., 2011).

Niemniej jednak humus to stała i stabilna matryca po procesie mikrobiologicznym, którą można z powodzeniem stosować na gruntach jako nawóz organiczny w celu zwiększenia żyzności i struktury gleby. W starożytnej historii prekolumbijscy Indianie z Amazonii lub starożytni Egipcjanie i liczne kultury prehistoryczne stosowały kompostowanie jako prymitywną technikę poprawy gleby. W ciągu ostatnich czterech dekad technika kompostowania rozkwitła, a jej korzystny wpływ został zilustrowany badaniami naukowymi. Ustalono podatność i wzajemne powiązania różnych konkurencyjnych czynników dotyczących wiedzy i inżynierii procesowej matrycy kompostowania (Waqas M. i in., 2018).

Innowacyjne procesy kompostowania zostały opracowane i zastosowane przez rolników prowadzących działalność na dużą lub średnią skalę, ale są one kosztowne dla rolników prowadzących działalność na małą skalę, ponieważ techniki te wymagają zaawansowanego technologicznie sprzętu do kompostowania. Pomimo odrębnych procesów/technik, kluczowe punkty procesów kompostowania były za każdym razem nierozróżnialne, takie jak właściwości naturalne, chemiczne i fizyczne. W celu zbadania i rozróżnienia kompostu i procesów kompostowania konieczne jest zastosowanie odpowiednich materiałów wsadowych i zmian oraz ich dopasowanej struktury, degradowalności substratu, zarządzania wilgocą, energii, porowatości, przestrzeni powietrznej, dostosowania energii, degradacji i stabilizacji (Avidov R. i in. 2017; Wagas M. i in., 2023).

Jednym z nielicznych naturalnych procesów, który może stabilizować odpady organiczne, jest właśnie proces kompostowania (Dz.U. 2022 poz. 699). Proces stabilizacji eliminuje większość pasożytów, patogenów i wirusów obecnych w odpadach, co znacznie zmniejsza emisję odorów. Dzieje się tak poprzez zmniejszenie poziomu węglowodorów ulegających biodegradacji oraz wysuszenie odpadów, czyniąc je nieatrakcyjnymi dla owadów (Barrington S. i in., 2002). Właściwości fizykochemiczne i biologiczne gleb są poprawiane za pomocą kompostu. Po systematycznym nawożeniu organicznym gleby lekkie mają większą pojemność sorpcyjną, a gleby cięższe mają lepszą strukturę. Kompost zawiera mikro- i makroelementy, które są niezbędne do życia roślin, co czyni go kompleksowym nawozem wieloskładnikowym. Zmniejsza również jednostronne lub niezrównoważone nawożenie mineralne. Spożywanie kompostu zwiększa aktywność mikrobiologiczną gleby i wzrost przeciwników mikroflory. Zgodnie z ustawą o nawozach i nawożeniu (Dz.U. 2021 poz.76) komposty mogą być używane jako nawozy organiczne. Aby kompost z odpadów komunalnych był wysokiej jakości, niezbędne są rodzaj wsadu i odpowiednie prowadzenie procesu technologicznego. Gotowy kompost musi spełniać wysokie standardy jakości. Zawartość metali ciężkich, normowana zawartość biogenów oraz wymagania sanitarne i parazytologiczne to jedne z najważniejszych parametrów określających tę jakość. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi odpowiednia zawartość azotu (N) wynosząca co najmniej 0,3 procent (m/m) i fosforu (w przeliczeniu na P_2O_5) wynosząca co najmniej 0,2 procent mas.. Kompost ten jest stosowany w systemach bioretencyjnych, aby poprawić jakość gleby, zwiększyć infiltrację wody i zatrzymać zanieczyszczenia. Jednak kompost zawiera rozpuszczoną materię organiczną, azotany i fosfor, które mogą się wymywać i zanieczyszczać wody gruntowe i powierzchniowe. W celu poprawy jakości gleby i wspomagania wzrostu roślin, komposty ze stałych odpadów komunalnych (MSW) są często stosowane jako dodatki azotowe i węglowe. Ponadto MSW zmniejszają koszty utylizacji odpadów. Zakłady mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych (MBP) zbierają odpady. Kompost dojrzewający, który może dojrzewać w pryzmach lub specjalnych kontenerach i stabilizat po MBP to dwa różne rodzaje kompostu. Stabilizat po MBP zawiera dużą ilość części nieorganicznych i jest składnikiem składowiska odpadów (Sánchez Ó. J. i in., 2017; Grąż K. i in., 2022; Sonu N. i in., 2023). Komposty zwykle zawierają od 0,75 do 1,5% N i od 0,25 do 0,5% P_2O_5 . Często działanie obornika i kompostów jest porównywalne. W kompostach, oprócz zawartości azotu, fosforu i potasu, obserwuje się wysoki poziom substancji organicznej, a także różnorodność innych makro- i mikroskładników, a także substancji stymulujących wzrost roślin (Grąż K., 2021).

2.6 Gospodarka odpadami a proces kompostowania

Szybki wzrost populacji i urbanizacja przyspieszyły wytwarzanie odpadów, a skuteczne zarządzanie nimi stało się głównym wyzwaniem na całym świecie (Kurniawan T.A i in., 2023; Jiang P. i in., 2023). Powszechnie rekomendowany przez międzynarodowe instytucje jest sposób gospodarowania odpadami poprzez m.in. hierarchie zagospodarowania odpadów (Borkowski M., 2023; Namieciński B., 2023). Analizując globalne strategie i przedsiębiorstwa w zakresie zrównoważonej gospodarki odpadami stałymi, ze szczególnym uwzględnieniem alternatywnych metod składowania odpadów, jak podaje Karimi N., zebrano znaczną liczbę dokumentów z różnych regionów, ujawniając, że Azja jest głównym dostawcą tych odpadów (dla zgromadzonych dokumentów)- (48,7%), a następnie Ameryka Północna (24,3%) i Europa (15,8%). Recykling okazał się najskuteczniejszą alternatywną metodą przetwarzania odpadów, stanowiąc 52,3% udokumentowanych podejść, z recyklingiem przemysłowym (22,6%) i recyklingiem mieszkalnym / niemieszkalnym (20,2%) jako najważniejszymi kategoriami. Odpady żywnościowe były istotnym problemem we wszystkich regionach, stanowiąc 21,4% zebranych dokumentów. Kompostowanie było powszechnie stosowane (15,4%) ze względu na jego prostotę i korzyści dla ogrodnictwa i poprawy gleby. Inne metody, takie jak pozyskiwanie biogazu, ponowne wykorzystanie, podnoszenie świadomości, spalanie, redystrybucja, redukcja i fermentacja, stanowiły łącznie 13,1%. Badanie podkreśla potrzebę przyjęcia rozwiązań w zakresie gospodarki odpadami w oparciu o regionalne wyzwania i udane praktyki. Promowanie infrastruktury recyklingu, kompostowania i metod redukcji odpadów ma kluczowe znaczenie dla osiągnięcia zrównoważonej gospodarki odpadami zgodnej z celami zrównoważonego rozwoju. Współpraca i wymiana wiedzy między regionami są niezbędne do poprawy nieefektywnych mechanizmów gospodarki odpadami. Uwzględnienie wyników badań w kształtowaniu polityki i praktykach branżowych może prowadzić do bardziej zrównoważonej przyszłości przy zmniejszonym wpływie na środowisko (Karimi N., 2023; Godswill A. i in., 2020; Zhao X. i in., 2022). Nowe globalne trendy łączą gospodarkę odpadami komunalnymi z polityką łagodzenia zmian klimatycznych i wyczerpywania zasobów. W tym kontekście zdecentralizowane kompostowanie wyróżnia się jako narzędzie, które ma potencjał, aby jednocześnie skierować około 50% odpadów ze składowisk i przetwarzać je w sposób odpowiedni dla środowiska, zwracać składniki odżywcze do gleby, usuwane na początku cyklu produkcyjnego i promować świadomość ekologiczną (de Souza i in., 2022).

2.7 Prawo w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym

Globalne uprzemysłowienie i nadmierna zależność od nieodnawialnych źródeł energii doprowadziły do wzrostu ilości odpadów stałych i zmian klimatycznych, wzywając do wdrożenia strategii gospodarki o obiegu zamkniętym we wszystkich sektorach w celu zmniejszenia emisji dwutlenku węgla o 45% do 2030 r. i osiągnięcia neutralności węglowej do 2050 r. (Yang M. i in., 2023). Efekty środowiskowe drugiego rzędu, takie jak poprawa efektywności wykorzystania zasobów i redukcja emisji, odpadów i zużycia materiałów w produktach i procesach produkcyjnych, są często przewidywane (Piscicelli L., 2023). Badania nad gospodarką o obiegu zamkniętym są obecnie podzielone na różne dyscypliny i często istnieją różne perspektywy i interpretacje tej koncepcji oraz powiązanych z nią aspektów, które należy ocenić (Rizos V. i in., 2017). Człowiek od zawsze produkuje odpady (Liu K., 2023; Romero-Hernández O. i in., 2018). W przeciwieństwie jednak do wytwarzanych naturalnych odpadów produkowanych przez wszystkie organizmy, które stanowią surowiec przykładowo dla innych gatunków, to odpady, które są wytwarzane przez człowieka nie są i nie wchodzą w skład naturalnego obiegu materii w przyrodzie. W ostatnich latach ciągle powiększa się i wzrasta produkcja odpadów komunalnych i przemysłowych, a to wiąże się przede wszystkim ze wzrostem standardu życia człowieka, także z postępującym rozwojem gospodarczym i przemysłowym, jak i rosnącą na całym świecie komercjalizacją w wielu krajach. Ten zwiększający się konsumpcjonizm społeczeństwa ciągle skutkuje masową produkcją odpadów, gdzie znajdują się wśród nich także odpady toksyczne i niebezpieczne dla środowiska przyrodniczego (Kostecka J. i in., 2014; Hidalgo D. i in., 2019; Tomić T., 2020). Wykorzystanie odpadów rolniczych wspiera cel zrównoważonego rozwoju w gospodarce o obiegu zamkniętym (Verghese S. A. i in., 2023). Aby ograniczyć ilość odpadów podjęte zostały pewne uwarunkowania prawne. Celem obecnych dyrektyw Unii Europejskiej w sprawie gospodarki odpadami jest promowanie zapobiegania powstawaniu odpadów i stosowanie hierarchii postępowania z odpadami: przygotowanie do ponownego użycia, recykling, inny odzysk i unieszkodliwianie (Pires A. i in., 2019). Wcielając te zasady w życie, żeby działania te były w pełni skuteczne (a zarazem zgodne z zasadą zrównoważonego rozwoju), to musi im towarzyszyć wzrost świadomości ekologicznej wśród ludzi, prowadzącej do zaangażowania mieszkańców w segregację odpadów i prawidłowe gospodarowanie odpadami (Pawul M. i in., 2011; Sołtyk P. i in., 2023; Shah S. i in., 2023).

3. Tezy, cele i zakres pracy badawczej

3.1 Tezy

Podjęta tematyka pracy dotyczy określenia zanieczyszczenia kompostu oraz innego materiału pochodzącego z recyklingu organicznego mikroplastikami. W oparciu o wiedzę literaturową i ukazaną lukę badawczą sformułowano następujące tezy:

1. Istnieje możliwość opracowania metodyki dla znalezienia mierzalnych wartości mikro- i nanoplastików w kompostach pochodzących z przetwarzania odpadów biodegradowalnych w procesach stabilizacji tlenowej.
2. Istnieje możliwość zdefiniowania mierzalnej wielkości zanieczyszczenia kompostu lub innego materiału pochodzącego z procesów recyklingu organicznego jako materiału nadającego się do wykorzystania w procesach rekultywacji w realizacji gospodarki o obiegu zamkniętym.
3. Zanieczyszczenie mikro- i nanoplastikami frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych jest realnym zagrożeniem dla realizacji procesów recyklingu organicznego i założeń gospodarki o obiegu zamkniętym.

3.2 Cele badawcze

1. Opracowanie metodyki badawczej definiującej ilość (wielkość) i jakość zanieczyszczeń mikro- i nanoplastikami w odpadach biodegradowalnych i produktach ich przetwarzania w procesach stabilizacji tlenowej.
2. Weryfikacja możliwości kompostowania odpadów biodegradowalnych różnego pochodzenia, zanieczyszczonych w różnym stopniu mikro- i nanoplastikami.
3. Weryfikacja możliwości wykorzystania produktów recyklingu organicznego do celów rolniczego wykorzystania.

3.3 Zakres pracy badawczej

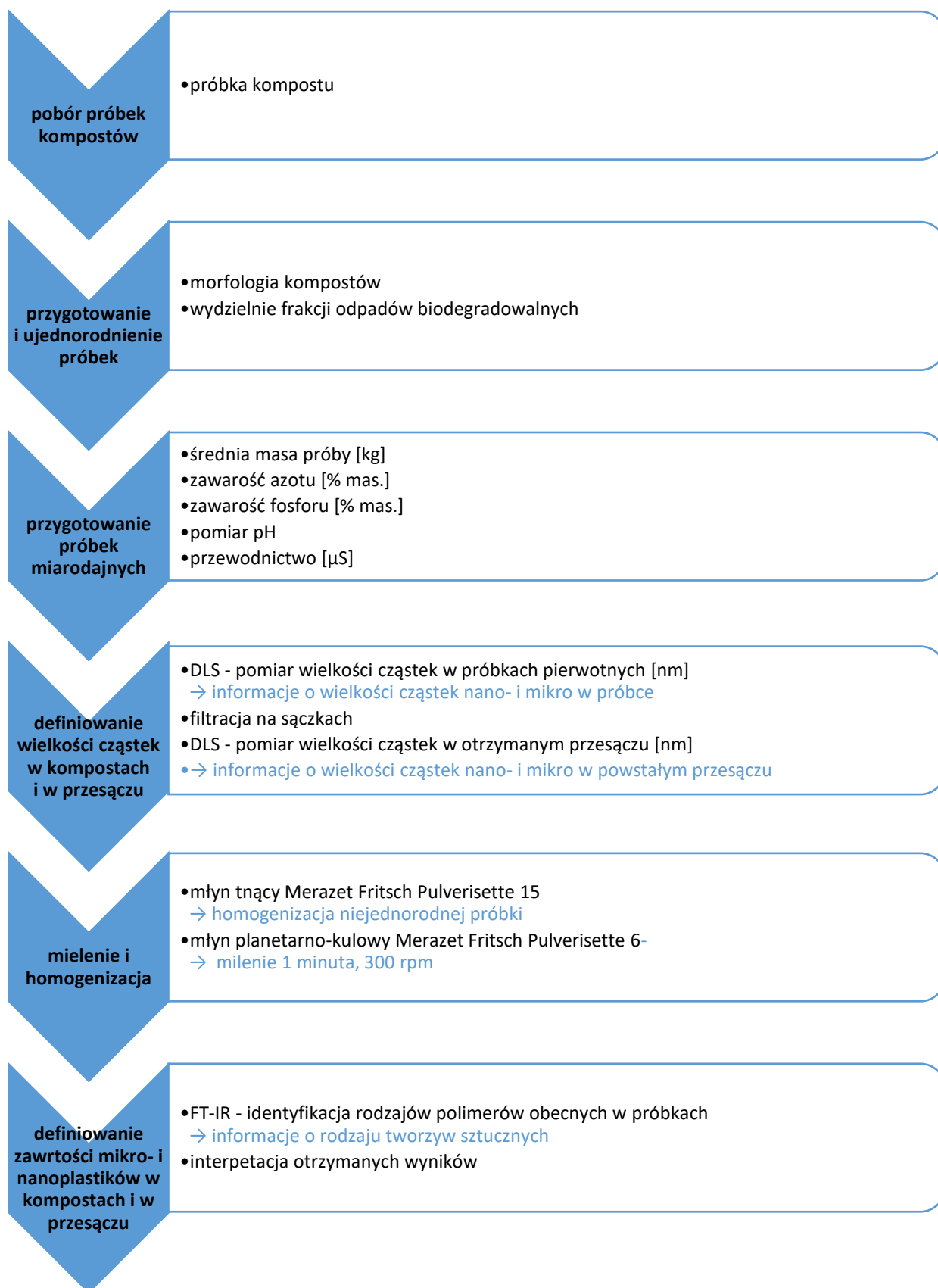
1. Przegląd literatury dotyczący charakterystyki zanieczyszczeń środowiska z uwzględnieniem mikroplastików oraz ich występowanie w poszczególnych komponentach środowiska ze szczególnym zawężeniem do kompostów wraz z uwarunkowaniami prawnymi dotyczącymi gospodarki obiegu zamkniętego.

2. Wybór i scharakteryzowanie rodzajów kompostów, pochodzących z różnych rodzajów odpadów, stanowiących produkty procesu ich stabilizacji tlenowej.
3. Badanie składu morfologicznego wybranych odpadów i kompostów.
4. Badania jakościowe kompostów, w celu opracowania prób miarodajnych, powtarzalnych.
5. Badanie wielkości cząstek wybranych kompostów w celu określenia czy obecne cząstki to wielkości mikro- bądź nanoplastiki.
6. Badanie składu kompostów ze szczególnym uwzględnieniem obecności tworzyw sztucznych.
7. Dokonanie nasadzeń roślin na wybranych typach kompostów w celu określenia czy dodatek do podłoża mikroplastików wpływa na wzrost roślin.
8. Przenikalność mikroplastików do roślin.
9. Podsumowanie i wnioski z badań.

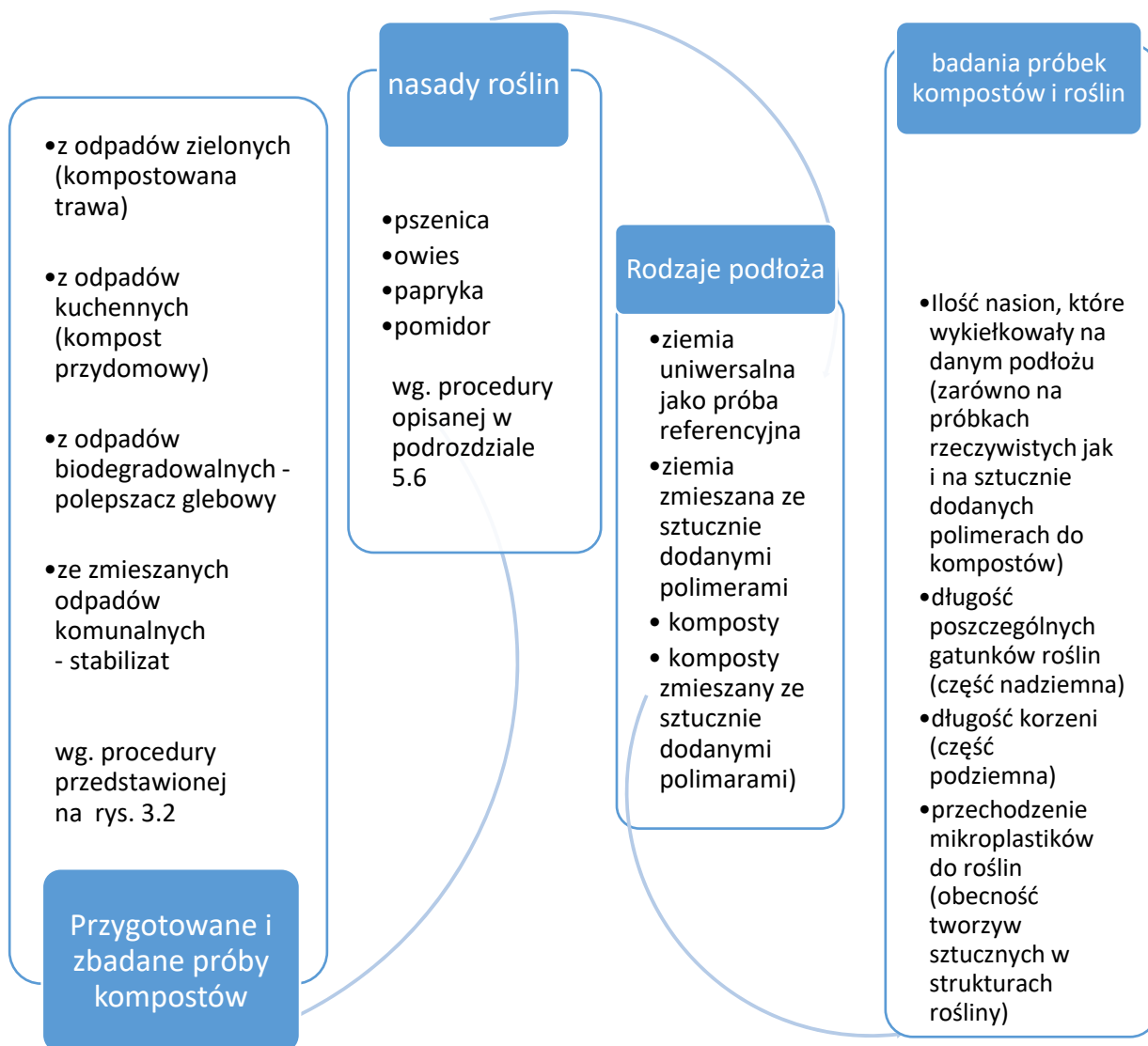
Poniższe rysunki (rys. 3.1-3.3) w sposób schematyczny przedstawia kolejne kroki wykonane w niniejszej rozprawie doktorskiej.



Rysunek 3.1 Schemat obrazujący zakres pracy badawczej - plan badań (opracowanie własne)



Rysunek 3.2 Schemat przygotowania próby miarodajnej do określenia ilości i jakości zanieczyszczeń mikro- i nanoplastików do dalszych badań (opracowanie własne)



Rysunek 3.3 Schemat obrazujący migrację mikroplastików do roślin (opracowanie własne)

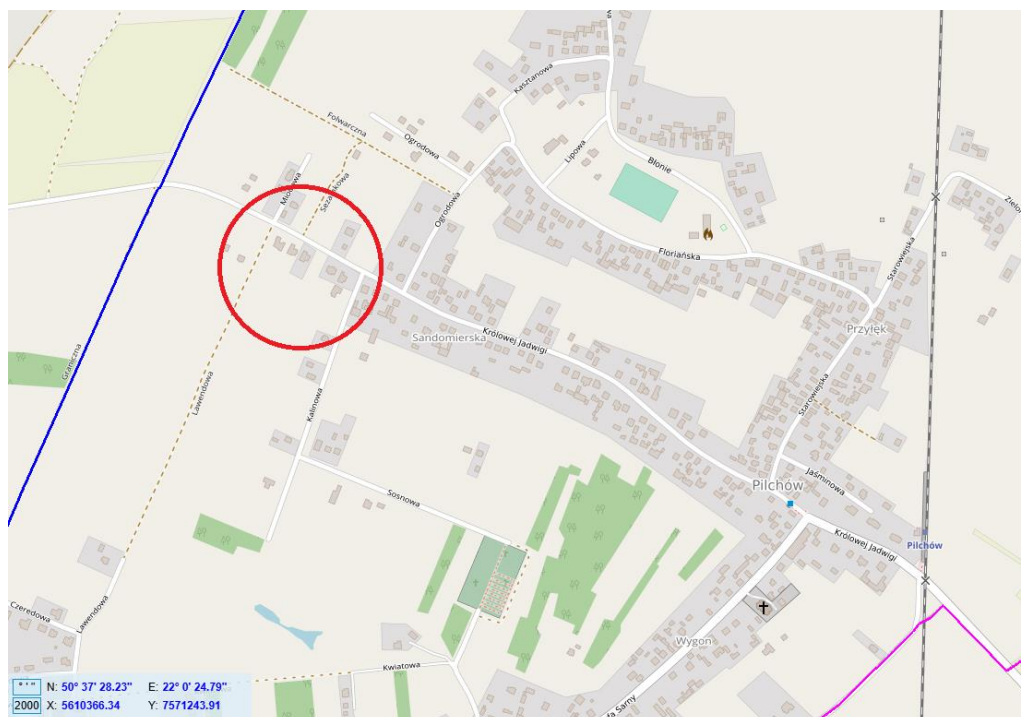
4. Metodyka badań

4.1 Materiał pobrany do badań wraz z charakterystyką miejsca poboru prób

Do badań wykorzystano cztery rodzaje kompostów organicznych. Wybrano: skoszoną kompostowaną trawę, kompost przydomowy, polepszacz glebowy oraz stabilizat. Dwa ostatnie rodzaje kompostów pobrano z zakładu mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych. Wybór tego rodzaju materiału badawczego wynikał z uwidocznionej luki w źródłach literaturowych w zakresie tego rodzaju kompostów. W skoszonej i przekompostowanej trawie do tej pory nie badano zaproponowanych parametrów, zaś o stabilizacie jest znikoma ilość informacji, zwłaszcza o jego frakcji podsitowej - najdrobniejszej tj. poniżej 80 mm.

4.1.1 Skoszona kompostowana trawa

Trawę skoszono na posesji 15 arowej znajdującej się w miejscowości Pilchów, w gminie Zaleszany w powiecie stalowowolskim, w województwie podkarpackim (rys. 4.1). Pilchów to wieś licząca około 1200 mieszkańców. Leży na lewym brzegu rzeki San, sąsiadując od poł.-wsch. z Charzewicami tj. dzielnicą Stalowej Woli. Odpady w tej miejscowości zbierane są w sposób selektywny, raz w miesiącu.



Rysunek 4.1 Miejsce posesji poboru próbek kompostowanej trawy (opracowanie własne)

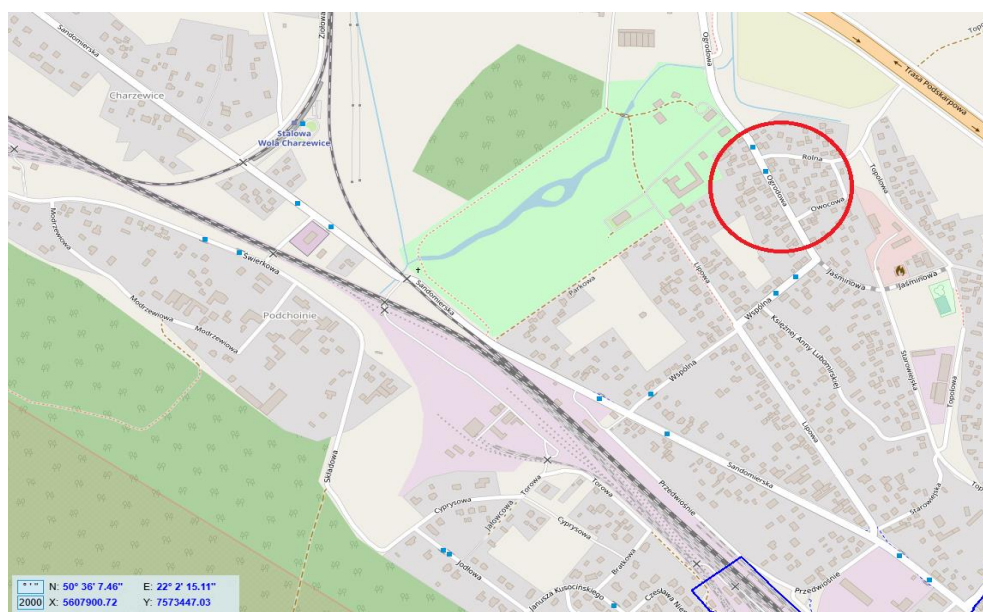
Koszenia dokonano dnia 4 czerwca 2022 roku. Z pozyskanego materiału usypano pryzmę wielkości 1,0 m x 1,0 m. Trawę przez kolejne 7 dni codziennie przerzucano, w celu mieszania materiału oraz rozpoczęcia procesu kompostowania.



Rysunek 4.2 Przekompostowana skoszona trawa pobrana do badań (fot. autor)

4.1.2 Kompost z kompostownika przydomowego (odpady kuchenne)

Kolejnym materiałem do badań był kompost powstały z odpadów kuchennych pobrany z przydomowego kompostownika (rys. 4.4) znajdującego się na posesji prywatnej w miejscowości Stalowa Wola na osiedlu Charzewice, leżącej w województwie podkarpackim.



Rysunek 4.3 Miejsce poboru próbek z kompostownika przydomowego (opracowanie własne)



Rysunek 4.4 Kompostownik przydomowy, z którego pobierano próbki do badań (fot. autor)

Materiał do badań jako kompost przydomowy (rys. 4.5) pobierano bezpośrednio z kompostownika zlokalizowanego w gospodarstwie domowym należącym do 4 osobowej rodziny.



Rysunek 4.5 Próbka kompostu przydomowy pobranego do badań (fot. autor)

4.1.3 Polepszacz glebowy – odpady biodegradowalne

Następnym materiałem użytym do badań był polepszacz glebowy (rys. 4.6, rys. 4.7). Jest to kompost powstały z odpadów zielonych, biodegradowalnych pobrany z zakładu mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych. Producenci podają, że jest to produkt w stu procentach organiczny, poprawiający właściwości biologiczne, fizyczne i chemiczne

gleby, wzmacniając je w składniki pokarmowe. Zakład, z którego pobrano materiał do badań jest umiejscowiony w mieście o średniej wielkości na terenie Polski.

Powstanie zakładu miało na celu przerób i ograniczenie składowania odpadów komunalnych biodegradowalnych. Idąc za ideą taką jak krajowa polityka w zakresie gospodarowania odpadami, mającą na celu ochronę kurczących się niektórych zasobów środowiska naturalnego, a także troskę o zdrowie lokalnych mieszkańców. W zakładzie zastosowano technologie uznawane za nowoczesne, służące zarówno do segregowania jak i przetwarzania odpadów. Źródłem tych odpadów są gospodarstwa domowe. Funkcjonowanie zakładu sprzyja zapewnieniu stabilnych i długotrwałych efektów środowiskowych, mających na celu polepszenie komfortu oraz warunków życia lokalnych mieszkańców. Instalacja ta jest jednym z największych i najbardziej innowacyjnych zakładów branży komunalnej w Polsce. Instalacja mechaniczno - biologicznego przerobu odpadów pozwala na zagospodarowanie około 60 tys. Mg odpadów komunalnych rocznie. Dodatkowo z odpadów tych można wyprodukować około 3 mln kWh energii elektrycznej oraz ciepłej. Instalacja ta spełnia wszystkie dyrektywy Unii Europejskiej, które związane są z odzyskiem i recyklingiem odpadów. `



Rysunek 4.6 Polepszacz glebowy
(fot. autor)



Rysunek 4.7 Polepszacz glebowy
(fot. autor)

4.1.4 Stabilizat – kompost z odpadów komunalnych

Ostatnim – czwartym - materiałem pozyskanym do dalszych prac badawczych był stabilizat (rys. 4.8, rys. 4.9). Jest to odpad o kodzie odpadów 19 05 99 - *Inne niewymienione odpady* zaklasyfikowany zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 28 grudnia

2022 r. w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania niesegregowanych (zmieszanych) odpadów komunalnych, Dz.U.2024 poz. 666. Stabilizat to odpad wytworzony w procesach biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych, prowadzonych w warunkach tlenowych (tzw. tlenowa stabilizacja) lub dwuetapowo, najpierw w warunkach anaerobowych (tzw. beztlenowa stabilizacja), a następnie aerobowych w instalacjach mechaniczno-biologicznego przetwarzania (w skrócie MBP), który jest przeznaczony do składowania czyli unieszkodliwiania, bądź innych procesów przetworzenia takich jak: odzysk na składowiskach odpadów (*ROZPORZĄDZENIE MINISTRA KLIMATU I ŚRODOWISKA 1 z dnia 28 grudnia 2022 r. w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania niesegregowanych (zmieszanych) odpadów komunalnych, Dz.U.2024 poz. 666*)

Kolejne zdjęcia (rys. 4.10-4.14) przedstawiają przykładowe próbki użyte do badań.



Rysunek 4.8 Stabilizat przeznaczony do składowania (fot. autor)



Rysunek 4.9 Stabilizat (fot. autor)



Rysunek 4.10 Stabilizat (fot. autor)



Rysunek 4.11 Stabilizat (fot. autor)



Rysunek 4.12 Stabilizat (fot. autor)



Rysunek 4.13 Stabilizat (fot. autor)



Rysunek 4.14 Stabilizat (fot. autor)

4.2 Zastosowane metody badawcze

Do badań i dokładnych analiz laboratoryjnych użyto prób i materiałów opisanych powyżej w podrozdziale 4.1.

Pierwszym etapem było zbadanie morfologii wybranych kompostów. Kolejno w warunkach laboratoryjnych przebadano jakość tych kompostów. Następnie zbadano wielkości cząstek kompostów, w celu sprawdzenia czy są to cząstki wielkości mikro-, a nawet nanometrów - analiza DLS - pomiary te przeprowadzono na analizatorze wielkości cząstek. Następnie przystąpiono do analiz na spektrofotometrze FT-IR w celu zbadania składu prób pod kątem obecności plastików. Ostatnim etapem badań było dokonanie nasadzeń wybranych czterech roślin na określonych podłożach oraz dodatku polimerów do podłoża w celu przeprowadzenia pomiarów wzrostu i kwitnienia u roślin. Na koniec za pomocą spektrofotometru FT-IR zbadano czy w strukturach wyhodowanych roślin znajduje się mikroplastik.

4.2.1 Morfologia składu kompostów

Badania składu morfologicznego kompostów dokonano zgodnie z normą PN-93-Z-15006.

Szczegółowa kolejność postępowania przedstawiona jest w podrozdziale 5.1.

4.2.2 Pomiary jakości kompostów

Po dokonanej analizie morfologicznej kompostów przystąpiono do badań jakości kompostów.

Fosfor (P) jest to niezbędny pierwiastek dla wzrostu roślin, a jego wprowadzanie do gleby już od dawna jest uznawane za niezbędne do utrzymania ekonomicznie opłacalnych poziomów produkcji roślinnej. W systemach rolniczych P jest uważany za pierwiastek potrzebny do gromadzenia i uwalniania energii związanej z metabolizmem komórkowym, także do tworzenia się nasion jak i formowaniem korzeni. Wpływa dodatnio na dojrzewanie roślin, jakość plonów oraz wytrzymałość słomy w zbożach. W systemach zaś naturalnych (pozarolniczych) P jest ponownie wprowadzany do gleby w ściółce, resztkach roślinnych i zwierzęcych.

Stężenia poziomu fosforanów w analizowanych kompostach zbadano przy pomocy spektrofotometru UV-VIS. Dokładny opis przeprowadzonej procedury znajduje się w podrozdziale 5.2.

Azot (N) to pierwiastek biogeny, którego potrzebują wszystkie organizmy jako źródła podstawowego składnika budulcowego. W ekosystemach lądowych dostępność tego pierwiastka dla roślin jest na ogół ograniczona, co skutkuje silną konkurencyjnością między mikroorganizmami, a roślinami. Mikroorganizmy wykształciły różne mechanizmy pobierania

i asymilacji mineralnych i organicznych form azotu (N), co umożliwia im wykorzystanie szerokiej gamy związków organicznych oraz mineralnych.

Stężenia poziomu azotu w analizowanych kompostach dokonano za pomocą miareczkowania – tzw. metoda Kjeldahla. Metoda ta umożliwia pomiar zawartości azotu w produktach organicznych. Wymaga zagotowania próbki stężonego kwasu siarkowego i innych substancji chemicznych (katalizatora), dodania mocnej zasady, destylacji, zebrania uwolnionego amoniaku, a następnie miareczkowania w celu określenia ilości azotu w postaci amoniaku (Graż K. i in., 2022). Wyniki przedstawiono również w podrozdziale 5.2.

4.2.3 Badania wielkości cząstek DLS - Pomiar wielkości cząstek obecnych w kompostach

Dynamiczne Rozpraszanie Światła (DLS) z ang. *Dynamic Light Scattering* jest cenioną i precyzyjną techniką pomiarową umożliwiającą charakterystykę wielkości cząstek w emulsjach oraz zawiesinach. Opiera się ona na analizie chaotycznych ruchów cząstek w badanej próbce (ruchy Browna). Robert Brown odkrył, że mniejsze cząstki poruszają się w cieczy z większą prędkością, podczas gdy cząstki większe zdecydowanie wolniej. Technika dynamicznego rozpraszania światła (DLS) umożliwia pomiar ruchu metodą optyczną dzięki rejestracji sygnału światła rozproszonego w zależności od wybranego kąta. Początkowo cząstki oświetlane są monochromatycznym, koherentnym źródłem światła - laserem, a następnie zarejestrowane zostaje światło rozproszone właśnie przez te cząstki. Kluczową rolę odgrywa tu czasowa fluktuacja sygnału światła rozproszonego, ponieważ jest ona źródłem informacji na temat ruchu tych cząstek. Fluktuacje te wywołane są tym, że cząsteczki powodujące rozpraszanie światła poruszają się względem siebie, co skutkuje ciągłymi zmianami interferencji w całkowitym - rozproszonym świetle. Światło rozproszone poprzez cząsteczki zawiera więc niewielkie zmiany częstotliwości spowodowane zależnym od czasu położeniem lub prędkością cząsteczek. Mierzony w czasie, ruch powoduje rozkład przesunięć częstotliwości. Częstotliwości tych przesunięć mogą być określone przez porównanie z koherentnym optycznym punktem odniesienia. W dynamicznym rozpraszaniu światła, częstotliwości przesunięć mieszczą się w przedziale od 1 Hz do 100 kHz (<https://www.microtrac.pl/pl/produkty/dynamiczne-rozpraszanie-swiatla>).

4.2.4 Spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera (FT-IR) – pomiary obecności mikroplastików w kompostach

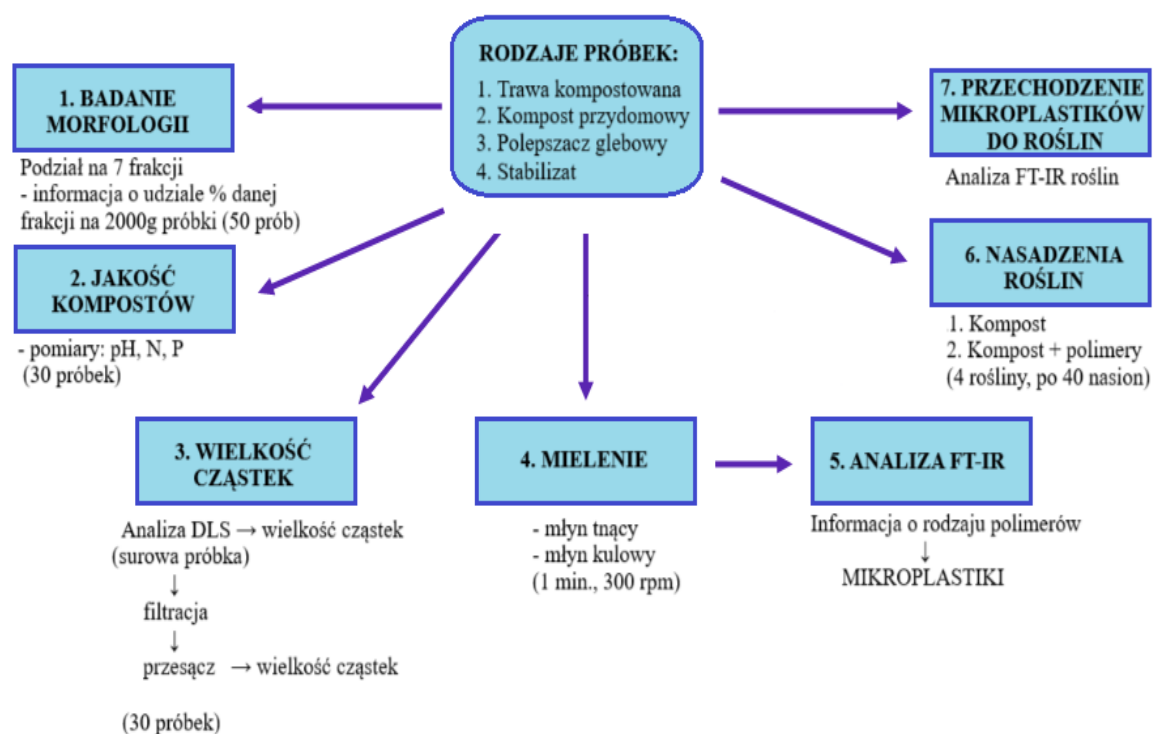
Spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera (FT-IR) jest techniką analityczną, która jest stosowana do identyfikacji grup funkcyjnych w badanej cząsteczce. Spektrometr FT-IR wyposażony jest w przystawkę ATR do szybkich pomiarów próbek np. w postaci proszków czy granulatów. Kryształ diamentowy stosowany jest do pomiaru próbek zarówno miękkich, jak i twardych np. granulek. Pomiar kończy się wygenerowaniem widma, tzw. widma adsorpcyjnego lub emisyjnego, które otrzymuje się mierząc zależność względnej intensywności światła pochłoniętego lub przepuszczonego od liczby falowej. Położenie (częstotliwość) i intensywność tych poszczególnych pasm składają się na ogólne widmo. Na jego podstawie można zbadać strukturę cząsteczkową substancji, a porównując otrzymane widmo z biblioteką widm, możliwa jest identyfikacja materiału. Zaletą analizy FT-IR-ATR jest niewielka ilość próbki potrzebna do badania, stosunkowo krótki czas badania oraz wysoka precyzyjność. Uzyskano wyniki transmitancji widm badanego materiału, gdzie transmitancja jest to stosunek natężenia światła przepuszczonego przez próbkę do natężenia światła padającego na próbkę. Absorbancja zaś jest logarytmem dziesiętnym odwrotności transmitancji $A = \log_{10}(1/T)$.

4.2.5 Nasadzenia roślin na kompostach

Po przeprowadzonych badaniach wybranych kompostów, przystąpiono do dokonania nasadzeń 4 wybranych gatunków roślin na 4 typach podłoża. Do każdego typu podłoża dodano kolejno zmieszaną próbkę polimerów w celu sprawdzenia czy ograniczają one wzrost u roślin. Całą procedurę szczegółowo opisano wraz z otrzymanymi wynikami w podrozdziale 5.6 i 5.7 niniejszej rozprawy doktorskiej.

4.2.6 Schemat zastosowanych badań

Poniższy rysunek (rys. 4.15) przedstawia kolejność wykonywanych badań.



Rysunek 4.15 Schemat zastosowanych badań (opracowanie własne)

5. Część doświadczalna – przedstawienie wyników

W rozdziale tym przedstawiono kolejno wyniki badań uzyskanych podczas dokonywania kolejnych etapów analiz.

5.1 Oznaczenie składu morfologicznego kompostów

Dokonano badania morfologii kompostów organicznych. Analizując próbki kompostów, postępowano zgodnie z normą PN-93-Z-15006. Badaniom poddano cztery rodzaje kompostów:

- kompostowaną trawę, uprzednio skoszoną, pobraną z posesji w terenie wiejskim, położonym na podkarpaciu;
- kompost przydomowy, pochodzący z posesji w niewielkiej miejscowości na podkarpaciu;
- polepszacz glebowy - kompost powstały po przekompostowaniu odpadów zielonych, pobranych z zakładu mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych;
- stabilizat – odpad powstały z mechaniczno-biologicznego oczyszczania odpadów komunalnych pobrany z zakładu mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych z miasta o średniej wielkości.

Badania przeprowadzano w miesiącach letnich to jest czerwiec – lipiec 2022 roku.

Z każdej grupy kompostów pobrano odpowiednio 50 prób, po 2 kilogramy każda. Łącznie przebadano 100 kg z każdego typu kompostu. Postępowano z próbkami kompostów analogicznie, tak samo jak z badaniem morfologii odpadów komunalnych zgodnie z normą PN-93-Z-15006. Każdą pobraną próbkę kompostów przesiano przez sito o wielkości oczek 80 mm, na wytrząsarce laboratoryjnej.

Następnie rozdzielono próbki wyodrębniając 7 frakcji, takie jak: odpady organiczne, tworzywa sztuczne, ceramika, papier i tektura, szkło, metal oraz tak zwane inne komponenty. Każdą próbkę dokładnie zważono na wadze laboratoryjnej. Wyniki prezentowane są w tabelach poniżej (tab. 5.1, tab. 5.2, tab. 5.3, tab. 5.4).

5.1.1 Wyniki badania morfologii kompostów

Analizując wyniki uzyskane z poszczególnych frakcji (odpady organiczne, tworzywa sztuczne, ceramika, papier i tektura, szkło, metal oraz inne) różnych rodzajów kompostów i porównując je ze sobą można wyciągnąć prostą konkluzję, że wybrana metoda przygotowania próbek była odpowiednia do tego typu badań. Widać bardzo duże rozbieżności w średnich wartościach

poszczególnych frakcji w różnych kompostach. Nie ulega wątpliwości, że próbki były niejednorodne i są duże różnice wagowe poszczególnych frakcji w obrębie badanych czterech typów materiałów – kompostów.

5.1.1.1 Skoszona i przekompostowana trawa

Tabela 5.1 Kompostowana trawa – skład morfologiczny (opracowanie własne)

	Odpady organiczne	Tworzywa sztuczne	Ceramika	Papier i tektura	Szkło	Metal	Inne
Średnia waga próbki	1959,16 g	10,83 g	25,85 g	0,48 g	0,61 g	2,32 g	0,76 g
Odchylenie standardowe	64,1	23,35	64	1,52	2,22	12,61	2,66
Współczynnik zmienności	3%	216%	248%	317%	364%	544%	350%

W tabeli 5.1 przedstawiono badania morfologii skoszonej i przekompostowanej trawy, pobranej z terenu posesji gminy wiejskiej znajdującej się na podkarpaciu.

Pobrano 50 prób po 2000 gramów każda, to jest łącznie 100 kilogramów przekompostowanej trawy.

Wyodrębniono następujące średnie wagowe:

odpady organiczne ważyły średnio 1959,16 g, tworzywa sztuczne stanowiły średnio 10,83 g badanej próbki. Ceramika ważyła średnio 25,85 g. Wyodrębniono średnio 0,48 g papieru i tektury. Szkło stanowiło średnio 0,61 g. Metal znaleziony w badanych próbkach średnio ważył 2,32 g. Znaleziono inne pozostałości, nie przynależące do żadnej poprzednio wyszczególnionej frakcji ważyły one średnio 0,76 g.

Zarówno odchylenie standardowe jak i współczynnik zmienności były bardzo rozbieżne w obrębie próbek. Współczynnik zmienności dotyczący wagi odpadów organicznych stanowił 3% różnicy próbki. Największą zmiennością charakteryzowały się pomiary zawartości metalu w próbkach, różnica 544%, co stanowi o bardzo niejednorodnych próbkach, pod względem zawartości tego komponentu. Wynikało to z faktu, że w niektórych próbkach nie zanotowano zawartości metalu. Kolejno dla następnej frakcji, to jest dla szkła, współczynnik zmienności również był wysoki – 364%, co świadczy o tym, że w nie we wszystkich z 50 pobranych próbek występowało szkło. Podobnie było z ceramika, współczynnik zmienności 248%, co świadczy także o braku jednorodności pod względem zawartości materiałów ceramicznych. W niektórych próbkach wykryto np. kamyczki ozdobne ze znajdujących się rabat obok trawników. Tak samo w badanych próbkach były duże różnice w zawartości tworzyw sztucznych, współczynnik zmienności wynosił 216%. Wyodrębnione tworzywa sztuczne

stanowiły głównie elementy plastikowe, będące pozostałością po żyłce z podkaszarki służącej do podcinania trawnika. W załączniku w tabeli nr 13.1 przedstawiono szczegółowy rozkład wagowy pobranych próbek.

5.1.1.2 Kompost przydomowy

Tabela 5.2 Kompost przydomowy – skład morfologiczny (opracowanie własne)

	Odpady organiczne	Tworzywa sztuczne	Ceramika	Papier i tektura	Szkło	Metal	Inne
Średnia waga próbki	1995,68 g	0,17 g	0,44 g	3,7 g	0 g	0 g	0 g
Odchylenie standardowe	15,67	0,51	1,7	15,52	0	0	0
Współczynnik zmienności	1%	283%	370%	419%	0%	0%	0%

W tabeli 5.2 przedstawiono badania morfologii próbek pochodzących z kompostownika przydomowego znajdującego się na terenie działki przy domu jednorodzinnych, 4 osobowej rodziny, w gminie wiejskiej. Pobrano 50 prób po 2000 g każda, to jest łącznie 100 kilogramów kompostu z kompostownika przydomowego. Wyodrębniono następujące średnie wagowe:

odpady organiczne ważyły średnio 1995,68 g, co stanowiły głównie widocznie obierki z warzyw i owoców oraz resztki pożywienia, tworzywa sztuczne stanowiły średnio 0,17 g badanej próbki, tu głównie naklejki z owoców i warzyw. Ceramika ważyła średnio 0,44 g. Wyodrębniono średnio 3,7 g papieru i tektury, głównie pozostałości po wydmuszkach po jajkach. Szkła, metalu i tak zwanej innej frakcji - nie wykryto, co świadczy o dokładnej segregacji i skrupulatności we wprowadzaniu materiału do kompostownika. Współczynnik zmienności dotyczący wagi odpadów organicznych stanowił 1% różnicy próbki, co potwierdza dokładną segregację materiału wsadowego do procesu.

Największą zmiennością tyczyły się pomiary zawartości papieru i tektury w próbkach, różnica 419%, co stanowi o bardzo niejednorodnych próbkach pod względem zawartości tego komponentu. Właściciel być może celowo wprowadza wydmuszki po jajkach do ulepszenia procesu kompostowania.

Kolejno dla następnej frakcji, to jest dla ceramiki, współczynnik zmienności również był wysoki – 370%, co świadczy o tym, że w nie we wszystkich z 50 pobranych próbek występowała ceramika, a jej śladowe ilości pojawiły się być może z jednorazowego rozbicia naczynia w domu, którego resztki z obierkami trafiły do kompostownika. Podobnie było z tworzywami sztucznymi współczynnik zmienności 283%, co świadczy także o braku

jednorodności pod względem zawartości plastików czy nawet mikroplastików w próbce. W niektórych próbkach były sporadycznie widoczne naklejki po owocach czy warzywach przyklejane do skórek przez producentów, które wraz z obierkami trafiały na kompostownik. W załączniku w tabeli nr 13.2 przedstawiono szczegółowy rozkład wagowy pobranych próbek.

5.1.1.3 Polepszacz glebowy – kompostowanie odpadów zielonych

Tabela 5.3 Polepszacz glebowy – skład morfologiczny (opracowanie własne)

	Odpady organiczne	Tworzywa sztuczne	Ceramika	Papier i tektura	Szkło	Metal	Inne
Średnia waga próbki	1935,79 g	12,04 g	30,26 g	0,82 g	0,21 g	2,69 g	0,8 g
Odchylenie standardowe	70,31	19,16	67,09	2,24	0,6	13,03	3,10
Współczynnik zmienności	4%	159%	222%	273%	286%	484%	388%

W tabeli 5.3 przedstawiono badania morfologii próbek organicznych pochodzących z odpadów zielonych tak zwanego polepszacza glebowego, pochodzącego z zakładu mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych z terenu gminy miejskiej.

Pobrano 50 prób po 2000 gram każda, to jest łącznie 100 kilogramów materiału.

Wyodrębniono następujące średnie wagowe: odpady organiczne ważyły średnio 1935,79 g, tworzywa sztuczne stanowiły średnio 12,04 g badanej próbki. Ceramika ważyła średnio 30,26 g. Wyodrębniono średnio 0,82 g papieru i tektury. Szkło stanowiło średnio 0,21 g. Metal znaleziony w badanych próbkach średnio ważył 2,69 g. Znaleziono inne pozostałości, nie przynależące do żadnej poprzednio wyszczególnionej frakcji ważyły one średnio 0,8 g. Zarówno odchylenie standardowe jak i współczynnik zmienności były bardzo rozbieżne w obrębie próbek. Współczynnik zmienności dotyczący wagi odpadów organicznych stanowił 4% różnicy próbki. Największą zmiennością dotyczyły się pomiary zawartości metalu w próbkach, różnica 484%, co stanowi o bardzo niejednorodnych próbkach, pod względem zawartości tego składnika. Świadczy to o tym, że w niektórych próbkach nie zanotowano zawartości metalu. Kolejno dla następnej frakcji, to jest dla szkła, współczynnik zmienności również był wysoki – 286%, co świadczy o tym, że w nie we wszystkich z 50 pobranych próbek występowało szkło. Podobnie było z ceramika, współczynnik zmienności 222%, co świadczy także o braku jednorodności pod względem zawartości materiałów ceramicznych.

W załączniku w tabeli numer 13.3 przedstawiono szczegółowy rozkład wagowy pobranych próbek.

5.1.1.4 Stabilizat

W tabeli 5.4 przedstawiono badania morfologii próbek stabilizatu - odpadu o kodzie 19 05 99 powstałych na skutek przekompostowania odpadów komunalnych z zakładu mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych z terenu gminy miejskiej. Pobrano 50 prób po 2000 gram każda, to jest łącznie 100 kilogramów materiału.

Tabela 5.4 Stabilizat – skład morfologiczny (opracowanie własne)

	Odpady organiczne	Tworzywa sztuczne	Ceramika	Papier i tektura	Szkło	Metal	Inne
Średnia waga próbki	706,8 g	1234,39 g	43,8 g	5,07 g	5,28 g	2,86 g	1,8 g
Odchylenie standardowe	234,83	233,31	75,04	8,14	7,63	5	3,92
Współczynnik zmienności	33%	19%	171%	161%	145%	175%	218%

Wyodrębniono następujące średnie wagowe:

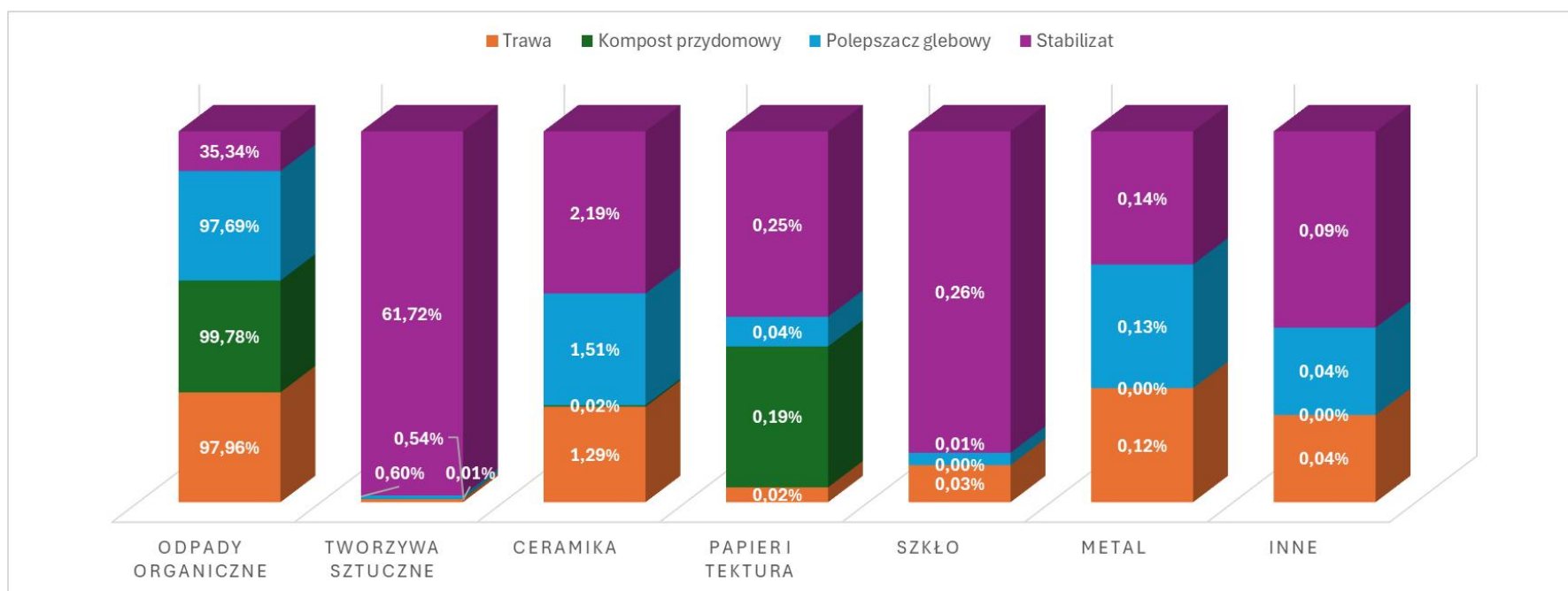
odpady organiczne ważyły średnio 706,8 g, tworzywa sztuczne stanowiły średnio 1234,39 g badanej próbki. Ceramika ważyła średnio 43,8 g. Wyodrębniono średnio 5,07 g papieru i tektury. Szkło stanowiło średnio 5,28 g. Metal znaleziony w badanych próbkach średnio ważył 2,86 g. Znaleziono inne pozostałości, nie przynależące do żadnych poprzednio wyszczególnionych składników ważyły one średnio 1,8 g. Zarówno odchylenie standardowe jak i współczynnik zmienności były bardzo rozbieżne w obrębie próbek. Współczynnik zmienności dotyczący wagi odpadów organicznych stanowił 33 % różnicy próbki. Największą zmiennością tyczyły się pomiary zawartości składników “inne” w próbkach, różnica 218%, co stanowi o bardzo niejednorodnych próbkach, pod względem zawartości tych nieokreślonych składników. Kolejno dla następnej frakcji, to jest dla szkła, współczynnik zmienności również był wysoki – 145%, co świadczy o tym, że w nie we wszystkich z 50 pobranych próbek występowało szkło. Podobnie było z ceramiką, współczynnik zmienności 171%, co świadczy także o braku jednorodności pod względem zawartości materiałów ceramicznych. Jeśli chodzi o wagę materiałów z tworzyw sztucznych znalezionych w pobranych próbkach, to współczynnik zmienności wynosił jedynie 19%, co świadczy o tym, że w każdej próbce występowały tworzywa sztuczne, z niewielkimi różnicami w ich łącznej masie (Grąż K., 2024). W załączniku w tabeli numer 13.4 przedstawiono szczegółowy rozkład wagowy pobranych próbek.

Podsumowanie wyników zestawiono w poniższej tabeli (tab. 5.5).

Tabela 5.5 Zbiorne zestawienie zawartości poszczególnych frakcji w wybranych typach kompostów (opracowanie własne)

% wagowy [śr. wartość]	Odpady organiczne	Tworzywa sztuczne	Ceramika	Papier i tektura	Szkło	Metal	Inne
Trawa	97,96%	0,54%	1,29%	0,02%	0,03%	0,12%	0,04%
Kompost przydomowy	99,78%	0,01%	0,02%	0,19%	0,00%	0,00%	0,00%
Polepszacz glebowy	97,69%	0,60%	1,51%	0,04%	0,01%	0,13%	0,04%
Stabilizat	35,34%	61,72%	2,19%	0,25%	0,26%	0,14%	0,09%

Udział poszczególnych frakcji w badanym materiale przedstawiono również na poniższym rysunku (rys. 5.1)



Rysunek 5.1 Udział frakcji w badanych próbkach (opracowanie własne)

Reasumując powyższe w tabeli 5.5 oraz na rysunku 5.1 zaprezentowano zbiorcze zestawienie przedstawiające procentowy udział poszczególnych frakcji z podziałem na poszczególne komponenty w badanych kompostach. Można zauważyć, że kompostowana trawa, kompost przydomowy i polepszacz glebowy, zawierają niewielkie ilości tworzyw sztucznych, zaś stabilizat zawiera w ponad połowie swojej objętości tworzywa sztuczne. W załączniku zaprezentowano dokładne ilości w gramach masy poszczególnych frakcji w kompostach (zał. tab. 13.1-13.4.)

Wnioski z morfologii

1. Kompostowanie jest procesem czasochłonnym i bardzo ciężko jest uzyskać jednolity kompost, ze względu na niejednorodność w materiale wsadowym.
2. W wyniku przeprowadzonej analizy zgodnie z normą PN-93-Z-15006 udało się wyselekcjonować poszczególne frakcje (odpady organiczne, tworzywa sztuczne, ceramika, papier i tektura, szkło, metal oraz inne) w wybranych 4 kompostach to jest: kompostowana trawa, kompost przydomowy, polepszacz glebowy oraz stabilizat.
3. Stwierdzono, że poszczególne próbki są bardzo niejednorodne, jest bardzo duża rozbieżność w wadze poszczególnych frakcji wyodrębnionych w analizowanych kompostach.
4. Najwięcej substancji organicznej znajdowało się w skoszonej kompostowanej trawie to jest średnio 1959,16 g na 2000 g próbki, a najmniej miał stabilizat to jest 706,8 g z 2000 g próbki.
5. Najmniej tworzyw sztucznych znajdowało się w kompoście przydomowym tj. 0,17 g co stanowi jedynie 0,0085% próbki, a najwięcej w stabilizacie tj. 1234,39 g z 2000 g, co stanowi ok. 62% próbki.

5.2 Badania jakości kompostów

Po dokonaniu dokładnej analizy morfologicznej kompostów, przedstawionej w poprzednim podrozdziale (5.1), przystąpiono do analiz jakościowych, w celu określenia poziomu stężenia fosforu i azotu oraz innych parametrów fizykochemicznych w analizowanych kompostach.

5.2.1 Oznaczenie fosforanów i azotanów

Procedura postępowania – oznaczenie fosforanów :

Pobrana została odpowiednia ilość kompostów (rys. 5.2-5.3) zgodnie z wynikami przedstawionymi w tabelach (tab. 5.6-5.9), gdzie uprzednio zważono próbki na wadze

laboratoryjnej i zapisano wyniki. Próbkę zostały pobrane zgodnie z normą PN-Z-15011-1:1998, *Kompost z odpadów komunalnych. Pobieranie próbek.*



Rysunek 5.2 Próbkę kompostu nakładana do wytrząsarki lab. (fot. autor)



Rysunek 5.3 Próbkę analizowanego nawozu z MBP przygotowywana do analizy frakcyjnej (fot. autor)

Następnie przy użyciu wytrząsarki laboratoryjnej (rys. 5.4) kolejno badane komposty zostały przesiane z podziałem na poszczególne frakcje (10 mm; 2 mm; 0,05 mm oraz na frakcje poniżej 0,05 mm). Następnie, tak przesiane i podzielone poszczególne frakcje kompostów zostały zważone na wadze laboratoryjnej. Wyniki zostały zapisane w tabelach (tab. 5.6-5.9).



Rysunek 5.4.Wytrząsarka laboratoryjna zlokalizowana na terenie Filii KUL w Stalowej Woli (fot. autor)

Tabela 5.6 Frakcje z kompostowanej trawy (opracowanie własne)

Masa ogólna [g]	687,6
Frakcja 10 mm [g]	268,15
Frakcja 2 mm [g]	397,6
Frakcja 0,05 mm [g]	21,85

Tabela 5.6 przedstawia podział kompostowanej trawy na poszczególne frakcje, gdzie masa ogólna próbki wynosiła 687,6 g. Po przesianiu na sitach odpowiednio masa kompostu wynosiła, dla frakcji 10 mm – 268,15 g, dla frakcji 2 mm – 397,6 g, dla frakcji 0,05 mm – 21,85 g, zaś frakcji mniejszej niż 0,05 mm nie zanotowano.

Tabela 5.7 Frakcje z przydomowego kompostownika (opracowanie własne)

Masa ogólna [g]	573,0
Frakcja 10 mm [g]	128,5
Frakcja 2 mm [g]	182,5
Frakcja 0,05 mm [g]	248,5
Frakcja > 0,05 mm [g]	11,5

Tabela 5.7 przedstawia podział kompostu przydomowego na poszczególne frakcje, gdzie masa ogólna próbki wynosiła 573,0 g. Po przesianiu na sitach odpowiednio masa kompostu wynosiła, dla frakcji 10 mm – 128,5 g, dla frakcji 2 mm – 182,5 g, dla frakcji 0,05 mm – 248,5 g, zaś frakcji mniejszej niż 0,05 mm 11,5g.

Tabela 5.8 Frakcje kompostu polepszacza glebowego z mechaniczno-biologicznej przeróbki odpadów (opracowanie własne)

Masa ogólna [g]	126,7
Frakcja 10 mm [g]	10,0
Frakcja 2 mm [g]	78,4
Frakcja 0,05 mm [g]	38,3

Tabela 5.8 przedstawia podział polepszacza glebowego na poszczególne frakcje, gdzie masa ogólna próbki wynosiła 126,7 g. Po przesianiu na sitach odpowiednio masa kompostu wynosiła, dla frakcji 10 mm – 10,0 g, dla frakcji 2 mm – 78,4 g, dla frakcji 0,05 mm – 38,3 g, zaś frakcji mniejszej niż 0,05 mm nie zanotowano.

Tabela 5.9 Frakcje stabilizatu z mechaniczno - biologicznej przeróbki odpadów komunalnych (opracowanie własne)

Masa ogólna [g]	625,0
Fracja 10 mm [g]	248,0
Fracja 2 mm [g]	199,5
Fracja 0,05 mm [g]	173,0
Fracja > 0,05 mm [g]	2,5

Tabela 5.9 przedstawia podział stabilizatu na poszczególne frakcje, gdzie masa ogólna próbki wynosiła 625,0 g. Po przesianiu na sitach odpowiednio masa kompostu wynosiła, dla frakcji 10 mm – 248,0 g, dla frakcji 2 mm – 199,5 g, dla frakcji 0,05 mm – 173,0 g, zaś frakcji mniejszej niż 0,05 mm – 2,5 g.

Tak przesiane zostały próbki kompostowanej trawy, kompost przydomowy, polepszacza glebowego z MBP oraz stabilizatu. Wyniki przesianych kompostów prezentują powyższe tabele (tab. 5.6-5.9).

Kolejnym celem badań było wyznaczenie stężenia fosforanów w danych kompostach. W tym celu posłużono się sprzętem laboratoryjnym: spektrofotometrze UV-VIS.

Sprzęt i odczynniki użyte do badań:

- Spektrofotometr - Thermo Spectronic 200 (rys. 5.7-5.8)
- Kolba miarowa 100 ml
- Kolba miarowa 50 ml
- Kuwety
- Pipeta
- 2,5% w/v roztwór $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ w 30% w/v H_2SO_4
- 2,5% w/v roztwór SnCl_2 w glicerynie
- Roztwór podstawowy fosforanów $2,0 \text{ mg PO}_4^{3-} \text{ mL}^{-1}$
- Do wykonania badania przygotowany został roztwór wzorcowy fosforanu. Następnie przygotowano roztwór wzorcowy roboczy. W tym celu do kolby miarowej 100 ml pobrano 1 ml roztworu wzorcowego fosforanów i uzupełniono wodą destylowaną. W celu wyznaczenia krzywej wzorcowej do kolb miarowych 50 ml, odmierzono kolejno: 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 3,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,5 i 10,0 ml roboczego roztworu wzorcowego fosforanu i uzupełniono wodą destylowaną do kreski. Następnie dodano 1 ml roztworu molibdenianu amonu i 200 μl roztworu chlorku cyny (II), po czym starannie wymieszano i po kilku minutach odczytano absorbancję przy długości fali (λ) = 690 nm. Jako ślepą próbę stosowano roztwór odczynników z wodą destylowaną. W celu określenia zawartości

fosforanów w próbkach badanych, do kolby miarowej o pojemności 50 ml odmierzone 15 ml badanej próbki i dodano 1 ml roztworu molibdenianu amonu i 200 μ l roztworu chlorku cyny (II), po czym starannie wymieszano. Po kilku minutach przy pomocy spektrofotometru zmierzono absorbancję. Wyniki przedstawiono w tabeli 5.10. Rysunek 5.5 prezentuje kolejno przygotowane w laboratorium roztwory wzorcowe wykorzystane do analiz.



Rysunek 5.5 Próbki wzorcowe (fot. autor)

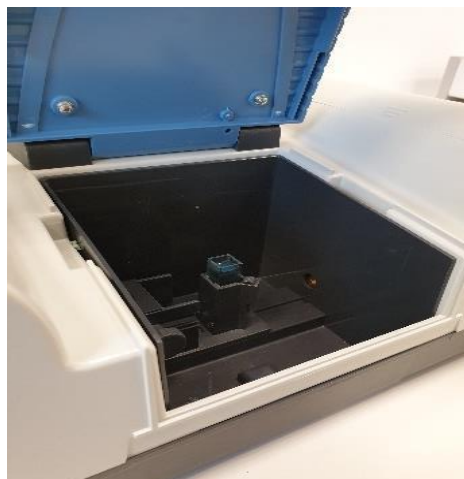
Na rysunku 5.6 przedstawiono przykładowe zdjęcie próbek wyciągów wodnych kompostów użytych do badań stężenia fosforanów w warunkach laboratoryjnych. Próbki uzyskano w wyniku gotowania przez godzinę kompostów, a następnie ich przesączenia.



Rysunek 5.6 Próbki z kompostami użyte do badań (fot. autor)



Rysunek 5.7 Spektrofotometr użyty do pomiaru zawartości fosforanów (fot. autor)



Rysunek 5.8 Kuweta z próbką w celi pomiarowej spektrofotometru UV-VIS (fot. autor)

Tabela 5.10 Wyniki absorbancji dla kompostów i prób wzorcowych (opracowanie własne)

ilość roztworu roboczego (ml)	roztwór roboczy (absorbancja)	kompost przydomowy	kompostowana trawa	kompost z MBP	stabilizat
Pomiar absorbancji					
0	0,010	2,5	1,49	2,5	2,14
0,5	0,178				
1	0,208				
1,5	0,252				
2,5	0,312				
3,5	0,397				
5,0	0,563				
6,0	0,651				
7,5	0,815				
8,5	0,850				
10	1,06				

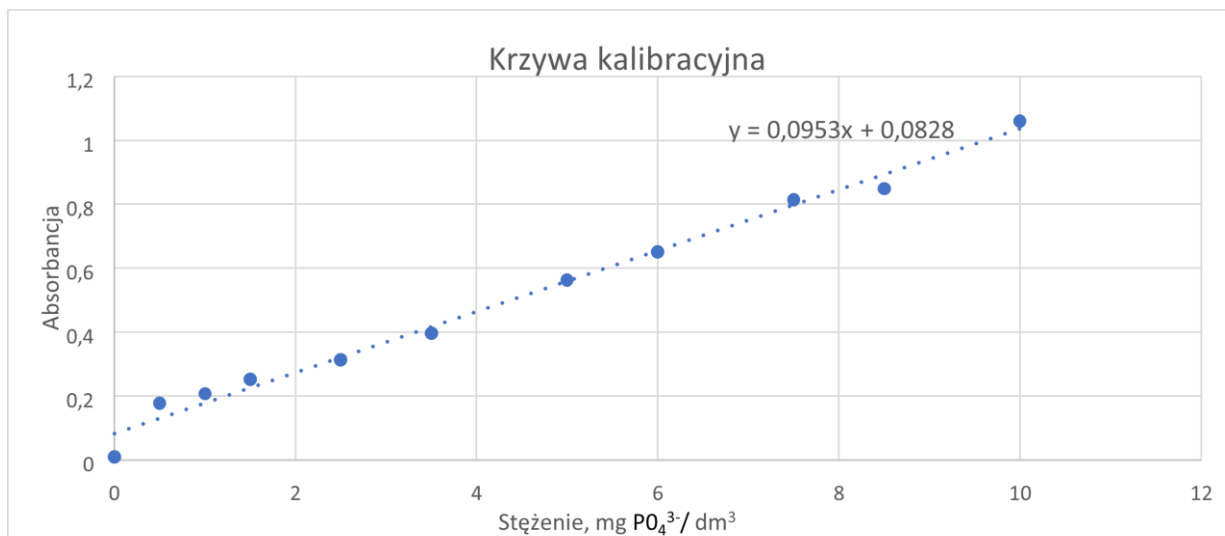
Po dokonanej analizie wykreślono krzywą wzorcową, odkładając na osi odciętych stężenia fosforanów (PO_4^{3-}) wzorców, a na osi rzędnych - odpowiednie wartości absorbancji. Stężenie fosforanów obliczono wg wzoru:

$$X = a \cdot 1000 / V \text{ mg/dm}^3 PO_4^{3-}$$

gdzie:

a – ilość fosforanów odczytana ze skali wzorców lub z krzywej wzorcowej w miligramach [mg],

V – objętość próbki wziętej do badania wyrażona w mililitrach [ml]



Rysunek 5.9 Wykres krzywej kalibracyjnej zależności absorbancji od stężenia dla poszczególnych próbek wzorcowych stężenie fosforanów dla badanych kompostów (opracowanie własne)

Po dokonaniu obliczeń i analiz (podstawieniu do wzorów) wyniki przedstawiały się następująco - wyniki stężenia fosforanów w badanych kompostach [$\text{mg/dm}^3 \text{PO}_4^{3-}$]:

- Kompostowana trawa - 0,98
- Kompost przydomowy - 1,69
- Kompost z mechaniczno-biologicznej przeróbki odpadów - 1,62
- Stabilizat - 1,44

Z przeprowadzonych badań wynika, że największe stężenie fosforanów wystąpiło w próbkach z kompostem przydomowym $1,69 \text{ mg/dm}^3$. Stężenia te mogą być wyższe ponieważ próbki te mogą być zanieczyszczone na przykład w przypadku kompostownika przydomowego detergentami pochodzącymi z mycia warzyw czy owoców, więc mogły się tam znaleźć różne środki chemiczne. Najmniejsze stężenie zmierzono dla kompostowanej trawy $0,98 \text{ mg/dm}^3$, oznacza to że kompost ten jest naturalny i bez żadnych szkodliwych substancji.

Następna część badań obejmowała zbadanie przewodności przesącza z wyciągu z kompostów oraz odczynu pH. Pomiar pH został wykonany przy pomocy pHmetru, dla każdego z kompostów. Przewodność została zbadana za pomocą konduktometru firmy Elmetrom. Największe przewodnictwo, zanotowano w polepszaczu glebowym tj. $744 \mu\text{S}$, a najmniejsze w kompostowanej trawie tj. $337,9 \mu\text{S}$. Wskaźnik ten pokazuje czy prąd przepływa dość łatwo przez kompost. Duże przewodnictwo, wskazuje na wyższą zawartość np. soli rozpuszczalnych w kompoście. Wyniki zostały zapisane w tabeli poniżej (tab. 5.11).

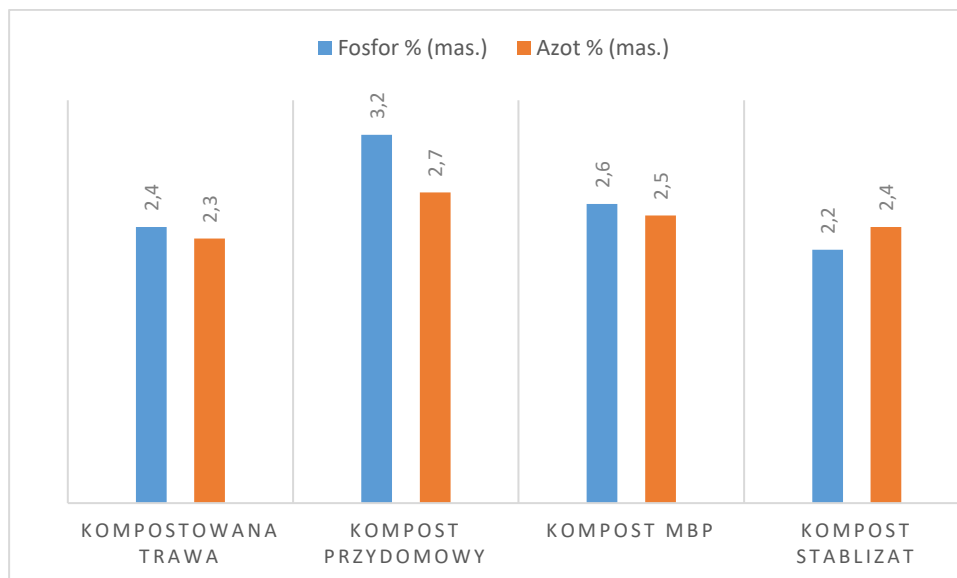
Tabela 5.11 Wyniki odczynu pH i przewodności w badanych kompostach (opracowanie autor)

Badane wartości	Kompost przydomowy	Kompostowana trawa	Kompost MBP (polepszacz glebowy)	Stabilizat
Odczyn pH (pH-metr)	7,952	7,929	7,996	8,294
Przewodność [μ S]	489,0	337,9	744,0	566,0

Powyżej opisano procedurę postępowania z jedną próbką z każdego rodzaju kompostu dla zobrazowania przykładowego pomiaru stężenia fosforanów. W pracy tej dla każdego z kompostów pobrano 30 prób z różnych miejsc i dokonano oznaczeń fosforu i azotu. W załączniku przedstawiono wykres rys. 13.1 i rys. 13.2 obrazujący średnie otrzymane wyniki. Analiz dokonywano zgodnie z normą PN-Z-15011-3:2001, *Kompost z odpadów komunalnych. Oznaczanie: pH, zawartości substancji organicznej, węgla organicznego, azotu, fosforu i potasu*.

Procedura postępowania z oznaczeniem azotu:

Do analiz wykorzystano metodę Klejdaha. Metoda ta umożliwia pomiar zawartości azotu Klejdaha w produktach organicznych. Próbkę poddaje się mineralizacji ogrzewając ją w temperaturze wrzenia stężonego kwasu siarkowego (VI), w obecności katalizatora (siarczan (VI) miedzi (II)). Następnie mieszanina reakcyjna jest alkalizowana poprzez dodatek mocnej zasady, najczęściej roztworu NaOH. W dalszej kolejności przeprowadza się destylację, w efekcie czego uwalnia się gazowy amoniak, który poddaje się reakcji z kwasem solnym. Nieprzereagowany HCl miareczkuje się w celu określenia ilości azotu w postaci azotu amonowego i organicznego. Analiza miareczkowania to technika analityczna, która umożliwia ilościowe oznaczenie określonej substancji rozpuszczonej w próbce, poprzez dodanie odczynnika o znanym stężeniu. Metoda ta opiera się na pełnej reakcji chemicznej między substancją (tzw. analitem), a odczynnikiem (tzw. titrantem). Poniższy wykres (rys. 5.10) przedstawia średnią zawartość fosforu i azotu dla badanych kompostów.



Rysunek 5.10 Średnia zawartość fosforu i azotu w poszczególnych badanych kompostach (opracowanie własne)

Uśredniając wyniki analiz na zawartość fosforu (P) i azotu (N) odnotowano najmniejszą średnią zawartość fosforu (2,2% mas.) dla stabilizatu. Najwyższą wartość wykazał kompost przydomowy głównie z odpadów kuchennych z gospodarstwa wiejskiego. W kompoście po MBP tzw. polepszaczu glebowym średnia zawartość fosforu wynosiła 2,6% mas., a w kompostowanej trawie wynosiła 2,4% mas. (rys. 5.10). Najmniejszą średnią zawartość azotu (2,3% mas.) obserwowano w kompostowanej trawie, a największą średnią zawartość azotu w kompoście przydomowym (2,7% mas.). W kompoście po MBP tzw. polepszaczu glebowym zawartość azotu wyniosła 2,5% mas., a w stabilizacie 2,4% mas. (rys. 5.10).

Badania wykazały współzależność występowania fosforu i azotu w wybranych kompostach. Największą zawartość azotu i fosforu odnotowano w kompoście przydomowym, najmniejszą w kompoście tzw. stabilizacie. Najbardziej stabilnym kompostem pod względem powtarzalności wyników okazał się tzw. polepszacz glebowy z MBP, ale także kompost przydomowy oraz kompostowana trawa. Największa rozbieżność otrzymanych wyników wystąpiła dla stabilizatu pochodzącego z zakładu mechaniczno - biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych. Rozbieżność wyników w stabilizacie podkreśla zapewne niehomogeniczność odpadów.

Stężenia związków fosforu i azotu w badanych kompostach pokrywają się z danymi prezentowanymi w literaturze. Kompost w postaci odpadów kuchennych z kompostownika przydomowego może zastąpić stosowanie nawozów chemicznych i zapewnić roślinom stały

dostęp do składników odżywczych oraz zwiększyć zawartość materii organicznej gleby (Kang J. i in., 2022). Jego stosowanie ma jednak pewne ograniczenia związane z wysokim pH kompostownika przydomowego. Kompostowanie tlenowe kompostownika domowego recyklingowi zawartej w nim materii organicznej. W efekcie dochodzi do przekształcenia związków organicznych, w bezpieczne dla środowiska i wartościowe nawozy organiczne (Kang J. i in., 2022). Jednym z największych wyzwań związanych z kompostowaniem jest utrata azotu w wyniku jego emisji do atmosfery w postaci amoniaku i tlenku azotu (N_2O). Podobnie Kodeks dobrej praktyki rolniczej - reguluje kwestię nawożenia gleb, nawozami naturalnymi (czyli organicznymi), mając na uwadze emisję azotu do atmosfery, ale także wpływ na zanieczyszczenie wód powierzchniowych oraz podziemnych (Kodeks dobrej praktyki rolniczej, 2019). Cykl azotowy, w którym wyróżnia się takie procesy jak amonifikację, nityfikację, denityfikację, a także proces tzw. anammoksu (*anaerobic ammonia oxidation*) jest on ściśle związany z aktywnością drobnoustrojów. Przekształcają one azot zawarty w związkach organicznych w formę, która jest łatwo przyswajalna dla roślin, czyli azot amonowy i azot azotanowy. W wyniku obecności w kompoście np. detergentów liczebność bakterii ulega zmianom, co bezpośrednio wpływa na intensywność poszczególnych procesów przemian związków azotu (Kang J., i in. 2022). Otrzymane wyniki nie wskazują jednak na wpływ ewentualnych detergentów lub innych substancji o działaniu przeciwbakteryjnym na zawartość azotu w kompoście, gdyż zarówno w kompoście przydomowym, jak i kompoście – polepszaczu glebowym po MBP i stabilizacji rezultaty były zbliżone. Jedynie w przypadku kompostowanej trawy stwierdzono mniejszą zawartość azotu, ale nieznacznie. Nie można stwierdzić, że było to spowodowane obecnością chemikaliów. Różnice w zawartości azotu mogą być spowodowane intensyfikacją nityfikacji, która lepiej przebiega w zakresie pH 7–8,5 (właśnie takim odczynem charakteryzują się badane komposty). Analizę azotu przeprowadzono metodą Kjeldahla, przez co uzyskane wyniki określają zawartość azotu organicznego i amonowego. Nie dają informacji o zawartości azotu azotanowego. W początkowej fazie kompostowania azot organiczny został przekształcony w azot amonowy, w wyniku czego stężenie $N-NH_4^+$ wzrastało w początkowej fazie. Następnie stężenie azotu amonowego stopniowo malało, ponieważ jego część ulotniła się lub została przekształcona w azot azotanowy w wyniku zajścia nityfikacji (Kang J. i in. 2022). Możliwe było również, że

napowietrzanie kompostu przez gospodarza poprzez przerzucania przyczyniło się do zaistnienia korzystniejszych warunków do zajścia nityfikacji. W przypadku zawartości fosforu w poszczególnych kompostach najmniejszą jego zawartość stwierdzono w kompostowanej trawie, lecz w pozostałych rodzajach kompostu wartości były tak samo zbliżone. W porównaniu z azotem fosfor jest pierwiastkiem dużo mniej mobilnym w glebie. Zastosowana technika analityczna pozwala określić sumaryczną zawartość fosforu organicznego i nieorganicznego w kompoście, bez określenia jego formy dostępnej dla roślin. Uzyskane rezultaty pokrywają się z danymi literaturowymi dotyczącymi analizy kompostów organicznych pochodzenia roślinnego i zwierzęcego (Zhan Y. i in., 2021). Zbliżone zawartości fosforu w kompostach z odpadów komunalnych i kompostu przydomowego, uznawanego przez autorów za próbę odniesienia, przemawiają za możliwością ich stosowania w celu poprawy parametrów gleby. Ewentualne zwiększone stężenia fosforu w próbkach kompostów mogą świadczyć o obecności detergentów i środków czystości w odpadach, które poddano kompostowaniu.

Kompost wytwarzany z odpadów komunalnych, aby był wysokiej jakości to istotnym elementem w procesie jego powstawania jest rodzaj wsadu oraz właściwe prowadzenie procesu technologicznego. Gotowy produkt uznany za kompost, musi spełniać wysokie standardy i wymagania jakościowe. W tabelach 5.12 i 5.13 zaprezentowano wybrane parametry, jakie stawiane są nawozom organicznym i kompostom, w odniesieniu do tych właściwości fizyczno-chemicznych, które są istotne w nawożeniu i rekultywacji (Boruszko D., 2011).

Tabela 5.12 Minimalna zawartość wybranych składników w nawozach organicznych

Wybrany wskaźnik	Nawozy organiczne występujące w postaci stałej	Nawozy organiczne występujące w postaci płynnej
N [m/m]	ok. 0,3%	0,08%
P ₂ O ₅ [m/m]	ok. 0,2%	0,05%
K ₂ O [m/m]	ok. 0,2%	0,12 %
Zawartość substancji organicznych [% s.m.]	ok. 30%	ok. 30%

Opracowane na podstawie Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 sierpnia 2024 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu, Dz.U. 2024 poz. 1261)

Według Rozporządzenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 sierpnia 2024 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. 2024 poz. 1261) kompost w postaci stałej powinien charakteryzować się minimalną zawartością azotu ok. 0,3% masowych oraz minimalną zawartością fosforu ok. 0,2%. Komposty zbadane w tej pracy warunek ten spełniają.

Możliwości wykorzystania kompostu zależą od jego właściwości, które określa norma branżowa BN-89/9103-09. Norma charakteryzuje kompost pod względem cech organoleptycznych (barwa, zapach, struktura) oraz parametrów fizykochemicznych. Pod względem parametrów fizykochemicznych zgodnie z normą wyróżnia się 3 klasy kompostów (BN-89/9103-090):

- pierwsza klasa kompostu - stosowana do celów rolniczych,
- druga klasa kompostu - do urządzania terenów zieleni miejskiej,
- trzecia klasa kompostu - do rekultywacji terenów zdegradowanych.

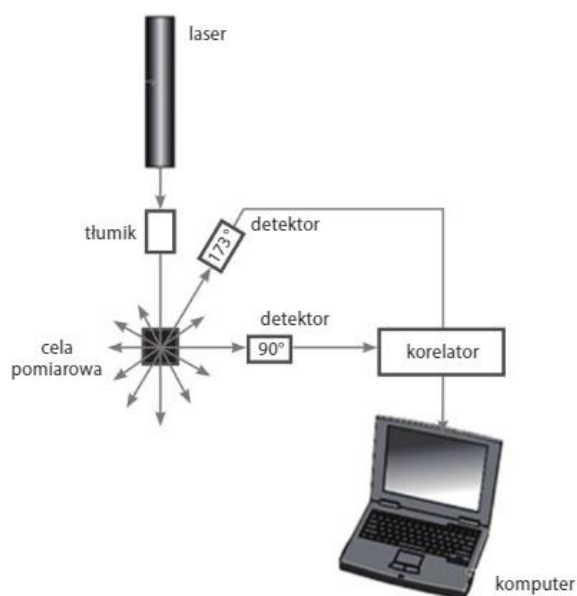
Tabela 5.13 Klasy kompostów wytwarzanych z odpadów komunalnych

<i>Poszczególne parametry</i>	<i>Klasa I</i>		<i>Klasa II</i>		<i>Klasa III</i>
	<i>kompost drobny</i>	<i>kompost gruby</i>	<i>kompost drobny</i>	<i>Kompost gruby</i>	—
<i>pH w H₂O</i>	od 6,5 do 8	od 6 do 8	od 6,5 do 8	od 6,5 do 8	od 6 do 9
<i>Wielkość cząstek [mm]</i>	od 0 do 15	od 15 do 25	od 0 do 15	15+25	od 0 do 40
<i>Wilgotność [%]</i>	od 25 do 40	od 25 do 40	od 25 do 40	od 2 do 40	50
<i>Substancja organ. [%]</i>	Więcej niż 40	więcej jak 40	od 30 do 40	od 30 do 40	>20
<i>Węgiel organiczny C</i>	Więcej niż 18	więcej jak 18	od 13 do 18	od 13 do 18	>8
<i>Azot organiczny N [%]</i>	Więcej niż 0,8	więcej jak 0,8	od 0,6 do 0,8	od 0,6 do 0,8	>0,3
<i>P₂O₅ [%]</i>	Więcej niż 0,6	więcej jak 0,6	od 0,4 do 0,6	od 0,4 do 0,6	>0,3
<i>K₂O [%]</i>	Więcej niż 0,2	więcej jak 0,2	od 0,1 do 0,2	od 0,1 do 0,2	>0,1

Opracowane na podstawie Unieszkodliwianie odpadów miejskich. Kompost z odpadów miejskich. BN-89/9103-090.

5.3 Badania DLS (*dynamic light scattering*) – identyfikacja materiału pod kątem wielkości cząstek

Metoda DLS (ang. *Dynamic Light Scattering*) jest metodą analityczną polegającą na dynamicznym rozpraszaniu światła. Pozwala ona na pomiar cząstek w zakresie 0,5 – 10000 nm. Wiązka lasera padająca na próbkę oddziałuje z nią i wytwarza promieniowanie rozproszone zbierane następnie przez detektor (rys. 5.11). Pomiary tą metodą nie powodują zniszczenia próbki, ani zmian strukturalnych w próbce. Najczęściej metodę DLS stosuje się do pomiaru wielkości cząstek w fazie ciekłej, stąd każdą z prób trzeba było odpowiednio przygotować. Oznaczenie rozkładu wielkości cząstek wykonano za pomocą analizatora DLS Zetasizer Nano ZS firmy Malvern (rys. 5.12).



Rysunek 5.11 Schemat obrazujący system pomiarowy - Zetasizer

(źródło: Świdarska-Środa A., Łojkowski W., Lewandowska M., Kurzydłowski K. I., *Świat nanocząstek*, Warszawa 2016)



Rysunek 5.12 Analizator wielkości cząstek - Zetasizer Nano ZS Malvern znajdujący się w Filii KUL w Stalowej Woli (fot. autor)

Dla każdego materiału badawczego przeprowadzono analizę na 30 próbkach, a każdy pomiar był mierzony w 10 powtórzeniach. Pomiary przeprowadzono w temperaturze 25°C, stosując wodę destylowaną - jako fazę rozpraszającą, wiązka lasera ustawiona była pod kątem 173°, przy długości fali 633 nm. Inne parametry pomiaru to lepkość 0,887 cP oraz współczynnik załamania światła RI=1,330. Próbkę o objętości 0,9 ml umieszczono w kuwecie jednorazowej polistyrenowej DTS0012 Malvern (Grąż K., Kwaśny J., 2021).

5.3.1 Przygotowanie próbki do analizy

W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych każdy roztwór został wykonany tuż przed analizą, co pozwala na najdokładniejsze odzwierciedlenie zawartości próbek.

5.3.1.1 Ujednolicenie materiału

Pierwszym etapem przygotowania próbki do pomiaru było mieszanie homogenizacyjne w celu ujednolicenia materiału. Zastosowano Homogenizator wirnikowy CatUnidrive 1000D (rys. 5.13-5.14).



Rysunek 5.13 Homogenizer wirnikowy CatUnidrive 1000D zlokalizowany w Filii KUL w Stalowej Woli (fot. autor)

Cały zestaw ustawiony został na około 30 000 obrotów na minutę. Mieszanie przeprowadzone zostało w roztworze wodnym. Próbkę badanego materiału rozcieńczono z wodą destylowaną. Do każdej próbki odważono po 10 g materiału (odpowiedniego kompostu) na 100 g wody destylowanej.



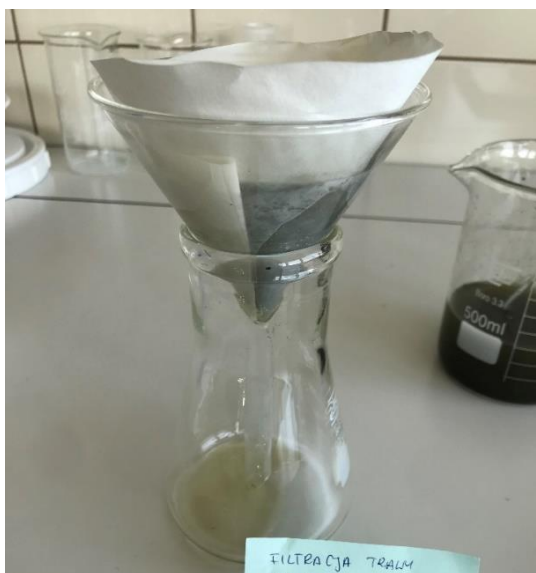
Rysunek 5.14 Homogenizacja przykładowych próbek – obroty ok. 30000, czas około 1 min (fot. autor)

W taki sam sposób postąpiono z każdą próbką materiału.

5.3.1.2 Sączenie i filtracja

Po zhomogenizowaniu badanych próbek poddano je sączeniu. Do filtracji zastosowano sączki firmy Sartorius o granulacji oczek 390. Typowy zestaw do sączenia (rys. 5.15) składa się z lejka szklanego, na który nałożony jest filtr bibułkowy. Lejek umieszczonego w zlewce podstawionej. Miało to na celu pozbycie się widocznego osadu i przygotowania klarownej próbki do pomiarów wielkości cząstek. Materiał badawczy zaprezentowany jest kolejno na zdjęciach w podpunktach od a do d (rys. 5.15-5.19).

a) trawa kompostowana



Rysunek 5.15 Sączenie skompostowanej trawy (fot. autor)



Rysunek 5.16 Powstały przesącz skompostowanej trawy (fot. autor)

b) kompost przydomowy



Rysunek 5.17 Sączenie kompostu przydomowego (fot. autor)

c) polepszacz glebowy



Rysunek 5.18 Sączenie polepszacza glebowego (fot. autor)

d) stabilizat



Rysunek 5.19 Stabilizat – przesącz (fot. autor)

Tak uzyskane przesącze poddano analizie dynamicznego rozpraszania światła DLS (zgodnie z parametrami przedstawionymi w podrozdziale 5.3). Badanie pozwoliło określić rozkład wielkości cząstek fazy zdyspergowanej w wodzie, a tym samym zbadać rozmiar cząstek mikroplastików w badanej próbce.

5.4 Badania FT-IR (spektrofotometr w podczerwieni) – identyfikacja materiału pod kątem obecności mikroplastików

W kolejnym etapie w oparciu o badanie FT-IR - spektroskopię w podczerwieni określono, jakie materiały i związki znajdują się badanych próbkach. Miało to na celu identyfikację związków obecnych w badanych kompostach. Przed przystąpieniem do analiz składu w celu ujednolicenia próbek, wcześniej je zmielono. Widma FT-IR-ATR pobranych próbek kompostów wykonano za pomocą spektrometru Thermo Fisher Scientific Nicolet w zakresie $4000\text{--}525\text{ cm}^{-1}$, 32 skany, rozdzielczość 4 cm^{-1} (rys. 5.20).

Spektroskopia w podczerwieni bada absorpcję promieniowania podczerwonego przez cząsteczki związków chemicznych i dostarcza informacji o badanym materiale w postaci widma, czyli wykresu zależności wielkości absorpcji od energii promieniowania wyrażonej liczbą falową [cm^{-1}]. Absorpcja promieniowania podczerwonego przez większość znanych

cząsteczek powoduje ich wzbudzenia (przejścia) na wyższe poziomy oscylacyjne. Każda cząsteczka ma swój unikalny zestaw poziomów energetycznych, a porównanie widma badanej substancji z biblioteką widm pozwala na jej identyfikację.

Do badań naukowych wykorzystano spektrofotometr Thermo Scientific Nicolet iS5 z przystawką iD5 ATR z oknem diamentowym. Parametry w czasie pomiaru: 32 liczba skanów, rozdzielczość 4, detektor DTGSKBr, rozdzielacz wiązki: KBr.



Rysunek 5.20 Spektrometr FT-IR ATR znajdujący się w Filii KUL w Stalowej Woli (fot. autor)

5.4.1 Mielenie materiału

Wyniki z badania morfologii kompostów wykazały, że próbki są bardzo niejednorodne, dlatego przed przystąpieniem do analiz składu (w celu ujednolicenia próbek) wcześniej je zmielono.

5.4.1.1 Młyn tnący

Pierwszym etapem prac było rozdrobnienie materiału w młynie tnącym Merzet Fritsch Pulverisette 15 (rys. 5.21) w celu ujednolicenia próbek czyli rozdrobnienie zgromadzonego materiału do możliwie jak najmniejszych form przy udziale młyna nożowego. Mechanizm działania młyna nożowego polega na cięciu materiału na mniejsze kawałki, przy pomocy zamocowanych ostrzy. Ostrza te posiadają przeciwostrze, które blokuje materiał pozwalając na rozdrobnienie. Metoda ta pozwala na osiągnięcie obiektów na poziomie kilku mikrometrów, jednakże brak szczelności pojemnika zbiorczego powoduje powstanie chmury cząsteczkowej w pomieszczeniu i duże zapylenie powietrza.

Na zdjęciach poniżej rys. 5.22-5.25 przedstawiony jest materiał badawczy uzyskany w wyniku procesu mielenia w młynie tnącym.



Rysunek 5.21 Młyn tnący znajdujący się w Filii KUL w Stalowej Woli (fot. autor)

a) trawa kompostowana



Rysunek 5.22 Kompostowana trawa zmielona w młynie tnącym (fot. autor)

b) kompost przydomowy



Rysunek 5.23 Kompost przydomowy zmielony w młynie tnącym (fot. autor)

c) polepszacz glebowy



Rysunek 5.24 Polepszacz glebowy zmielony w młynie tnącym (fot. autor)

d) stabilizat



Rysunek 5.25 Stabilizat zmielony młyn tnący (fot. autor)

5.4.1.2 Młyn planetarno – kulowy

Kolejnym etapem rozdrabniania struktur było mielenie w młynie planetarno-kulowym Merazet Fritsch Pulverisette 6 (rys. 5.26). Zasada działania młyna planetarno-kulowego opiera się na ruchu kołowym i sile odśrodkowej działającej wewnątrz misy mielącej. Misa wykonana została ze stali, tak jak i 15 kulek mielących o średnicy 20 mm. Materiał końcowy z młyna tnącego przeniesiono w postaci suchej do misy mielącej. Mielenie trwało minutę przy obrotach 300 obr/min. Otrzymane cząstki przeniesiono do szczelnych probówek z korkiem przy pomocy szpatułki. Rysunki 5.28, 5.30-5.32 przedstawiają próbki analizowanego materiału po użyciu młyna kulowego.



Rysunek 5.26 Młyn planetarno-kulowy znajdujący się Filii KUL w Stalowej Woli (fot. autor)

a) Trawa kompostowana



Rysunek 5.27 Kompostowana trawa w misie stalowej przed mieleniem (fot. autor)



Rysunek 5.28 Kompostowana trawa zmielona w młynie planetarno-kulowym (fot. autor)

b) Kompost przydomowy

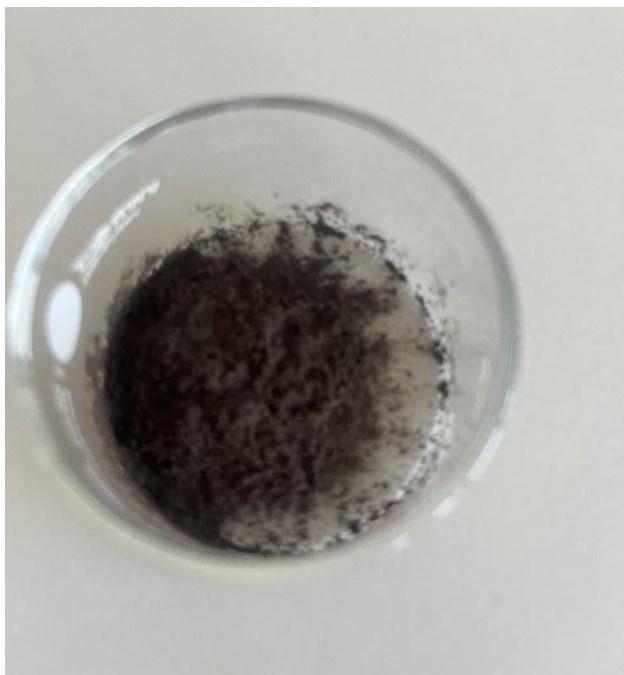


Rysunek 5.29 Kompost przydomowy gotowy do mielenia w misie od młyna planetarno-kulowego (fot. autor)



Rysunek 5.30 Kompost przydomowy zmielony w młynie kulowym (fot. autor)

c) Polepszacz glebowy



Rysunek 5.31 Polepszacz glebowy zmielony w młynie planetarno-kulowym (fot. autor)

d) Stabilizat



Rysunek 5.32 Stabilizat zmielony – młyn planetarno - kulowy (fot. autor)

5.5 Wyniki badań

W podrozdziale tym przedstawiono wyniki badań wielkości cząstek obecnych w analizowanych kompostach (DLS) oraz analizę FT-IR pozwalającą określić zawartość tworzyw sztucznych. Kolejne podrozdziały przedstawiają rodzaj badanego kompostu wraz z analizą nano- i mikrocząstek polimerów obecnych w próbkach.

5.5.1 Analiza skoszona kompostowana trawa

5.5.1.1 Analiza DLS – trawa kompostowana

Zbadano 30 próbek pod kątem wielkości cząstek. Wielkość cząstek w kompostowanej trawie została przedstawiona w tabeli poniżej (tab.5.14). Każdy wiersz w tabeli to średnia z 3 pomiarów, co łącznie daje wynik z 30 przeanalizowanych próbek. Próbki zostały przeanalizowane pod kątem podziału na trzy wielkości cząstek (pik 1, pik 2, pik 3) w zależności od intensywności, czyli udziału danej wielkości cząstek w procencie całej powierzchni próbki (tab. 5.14), więc pomiary z kolei dostarczają nam informacji jaki procent próbki w danym przedziale wielkości stanowi dana wielkość cząstek i tak kolejno:

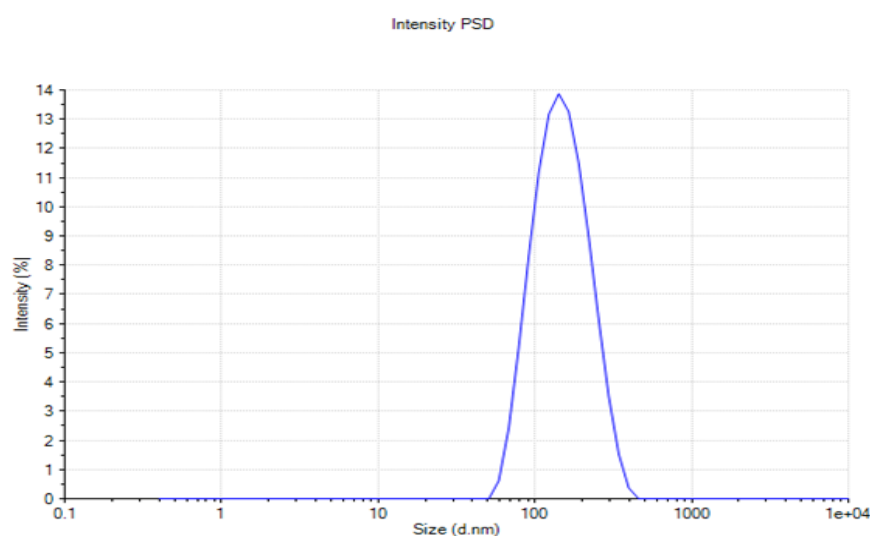
Tabela 5.14 Wyniki analizy wielkości cząstek kompostowanej trawy

Trawa kompostowana						
Próbka nr	Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
1-3	264,5	82,9	49,47	17,1	0,0	0,0
4-6	270,0	83,6	51,59	16,4	0,0	0,0
7-9	201,7	95,6	3291,0	4,4	0,0	0,0
10-12	224,5	81,0	47,78	19,0	0,0	0,0
13-15	268,8	84,4	46,23	15,6	0,0	0,0
16-18	164,9	93,2	3904,0	6,8	0,0	0,0
19-21	182,1	89,7	26,07	5,8	4389,0	4,5
22-24	198,1	95,6	1960	4,4	0,0	0,0
25-27	223,5	91,3	33,98	6,8	4587,0	1,9
28-30	222,4	88,5	36,37	8,0	4638,0	3,5
Średnia	222,5					

Źródło: opracowanie własne

Wynik 1 - 82,9% próbki to cząstki o wielkości 264,5 nm, natomiast 17,1% próbki to cząstki o wielkości 49,47 nm. Wynik 2 - ok. 84 % próbki to cząstki o wielkości 270 nm, a ok. 16% to cząstki o wielkości ok. 52 nm. Wynik 3 – 95,6 % próbki składa się z cząstek o wielkości 201,7 nm, a 4,4 % próbki to cząstki 3291,0 nm. Wynik 4 – 81% próbki to cząstki o wielkości 224,5 nm, a 19% próbki stanowią cząstki 47,78 nm. Wynik 5 – 84,4% próbki to cząstki o wielkości 268,8 nm, a 15,6 % to cząstki o wielkości 46,23 nm. Wynik 6 – 93,2% próbki to cząstki o wielkości 164,9 nm, a tylko 6,8 % to cząstki o wielkości 3904,0 nm, co może wskazywać na tworzenie się aglomeratów i połączeń kilku lub nawet kilkunastu cząstek w jeden aglomerat. Wynik 7 – 89,7 % cząstek ma rozmiar 182,1 nm, a 5,8% ma rozmiar 26,07 nm oraz pojawiają się pik 3 gdzie 4,5 % cząstek jest wielkości 4389 nm – co świadczyć może o pojawieniu się aglomeratów. Wynik 8 – 95,6% cząstek ma wielkość 198,1 nm, 4,4% to cząstki o wielkości 1960 nm (prawdopodobnie aglomeraty). Wynik 9 – 91,3% próbki to cząstki o wielkości 223,5 nm, 6,8% to cząstki o wielkości 33,98 nm, a 1,9 % to cząstki o wielkości 4587,0 nm. Wynik 10 – 88,5 % próbki to 222,4 nm, a 8% to 36,37 nm i również pojawiają się pik 3 o wielkości cząstek 4638 nm stanowiące 3,5 % badanych próbek. Na podstawie przeprowadzonych badań można

stwierdzić, że analizowane próbki kompostowanej trawy zawierają mikroplastik o średnim rozmiarze 222,5 nm. W analizowanych próbkach można zauważyć obecność wielu mniejszych pojedynczych cząstek, nawet o wielkości około 46 nm. Ponadto w kompostowanej trawie zanotowano pojedyncze cząstki ok. 4640 nm, mogące świadczyć o powstałych aglomeratach, czyli połączeniach cząstek mniejszych w większe. Rysunek 5.33 przedstawia rozkład wielkości cząstek po natężeniu mikroplastków przebadany w próbce kompostowanej trawy. Średnia wielkość cząstek z piku nr 1, która wynosi 222,5 nm.



Rysunek 5.33 Średnia wielkość cząstek trawy kompostowanej podana w nanometrach (opracowanie własne)

Następnie przebadano wielkość cząstek w powstałym przesączu z kompostowanej trawy (przesącz widoczny na rys. 5.16).

Tabela poniżej (tab. 5.15) przedstawia wyniki z pomiarów 30 próbek przesączu kompostowanej trawy, z tym, że jeden wers jest to średnia z 3 pomiarów.

Tabela 5.15 Wyniki analizy DLS skoszonej trawy kompostowanej pod względem wielkości cząstek – przesącz

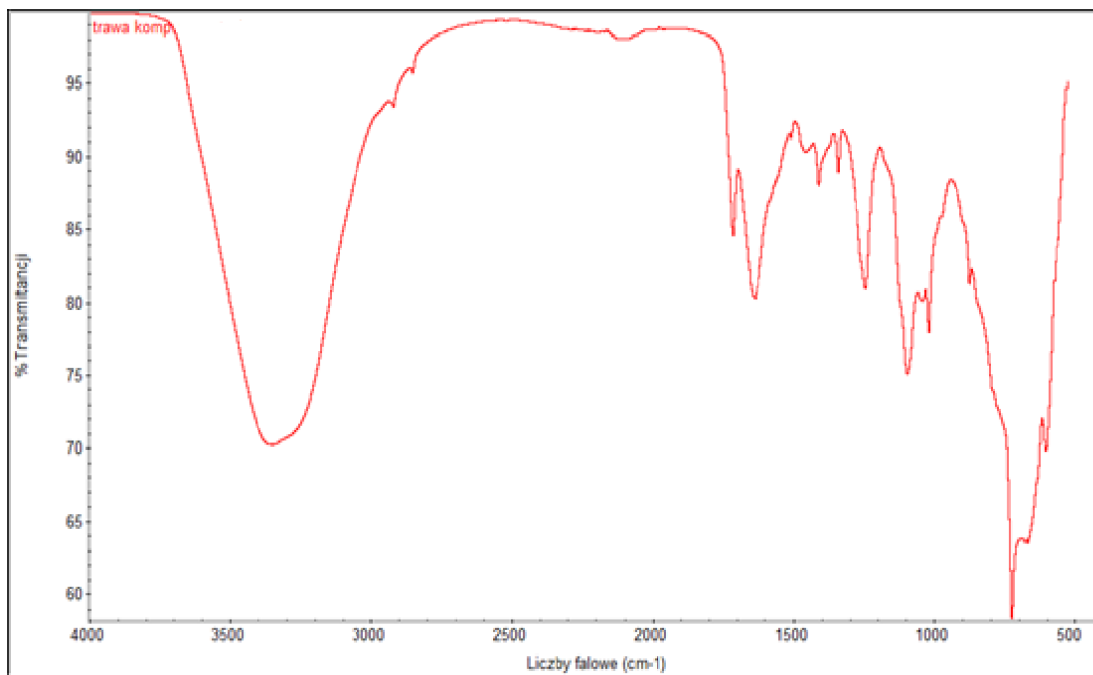
Trawa kompostowana - przesącz						
Próbka nr	Pik 1	% powierzchni 1	Pik 2	% powierzchni 2	Pik 3	% powierzchni 3
1-3	142,7	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-6	144,5	98,9	4952	1,1	0,0	0,0
7-9	149,9	93,1	25,52	6,9	0,0	0,0
10-12	268,8	84,4	46,23	15,6	0,0	0,0
13-15	264,5	82,9	49,47	17,1	0,0	0,0
16-18	270,0	98,6	51,59	16,4	0,0	0,0
19-21	223,5	91,3	33,98	6,8	4587,0	1,9
22-24	222,4	88,5	36,37	8,0	4638,0	3,5
25-27	167,5	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28-30	157,2	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia	201,1					

Źródło: opracowanie własne

W wyniku przeprowadzonej analizy na DLS, otrzymano nano- i mikrocząstki skompostowanej trawy z jej przesączu średniej wielkości 201,1 nm (tab. 5.15). W próbkach tych zanotowano też pojedyncze cząstki wielkości nawet 25,5 nm (jako wartość najmniejszą) oraz duże aglomeraty około 4638 nm (jako wartość największą).

5.5.1.2 Wyniki FT-IR - trawa kompostowana

Po zbadaniu wielkości cząstek, przystąpiono do badania zawartości próbki pod kątem obecności polimerów. Poniższy wykres przedstawia otrzymane widmo próbki kompostowanej trawy zanalizowanej na spektrofotometrze w podczerwieni. Widmo przedstawia próbkę kompostowanej trawy, analizowaną w podczerwieni (FT-IR). Na osi poziomej mamy liczbę falową (cm^{-1}), a na pionowej - transmitancję (%).



Rysunek 5.34 Widmo FT-IR trawy zmielonej kompostowanej tydzień (opracowanie własne)

Poniżej tabela 5.16 przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC (oprogramowanie do przeprowadzenia pomiaru i analizy składu materiału), które porównują otrzymane widmo z daną biblioteką.

Tabela 5.16 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla kompostowanej trawy (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	42,41	Polietylen	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
2	33,89	Opium powder in KBR	<i>Georgia State Crime Lab Sample Library</i>
3	33,15	Polyvinyl acohol, cristaline	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
4	31,20	Mannitol	<i>Georgia State Crime Lab Sample Library</i>
5	29,86	Poliester	<i>Hummel Polymer Sample Library</i>

Widmo FT-IR (rys. 5.34) analizowanej próbki wykazuje obecność zarówno składników organicznych typowych dla materii roślinnej, jak i charakterystycznych pasm związanych z tworzywem sztucznym. Poniżej znajduje się szczegółowy opis kluczowych pasm: ~3340 (cm⁻¹) – szerokie pasmo drgań rozciągających grupy O–H - intensywne i szerokie pasmo

świadczy o obecności grup hydroksylowych (-OH), charakterystycznych dla: wody, alkoholi, kwasów karboksylowych, ligniny i celulozy pochodzącej z roślin. Pasmo ~ 2915 i ~ 2850 (cm^{-1}) - to pasma rozciągające C-H (wiązania alifatyczne), sygnały te wskazują na obecność grup metylowych i metylowych ($\text{-CH}_2\text{-}$, -CH_3) w alifatycznych łańcuchach węglowych, typowych dla: lipidów roślinnych, jak i fragmentów łańcucha etylenowego w tworzywach sztucznych głównie w PET. W zakresie tym pasmo ~ 2915 i 2845 cm^{-1} - C-H alifatyczne obecne w polietylenie. Pasmo ~ 1715 (cm^{-1}) - silne pasmo rozciągające wiązania C=O (karbonylowe), to najważniejszy sygnał identyfikacyjny mikroplastików, takich jak PET - odpowiada drganiom estrowych grup karbonylowych. Nie występuje w czystej materii roślinnej, więc jego obecność jednoznacznie potwierdza obecność tworzyw sztucznych w próbce. Liczna falowa ~ 1240 (cm^{-1}) - to wiązanie estrowe rozciąganie C-O-C , charakterystyczne dla estrów aromatycznych, które są obecnych w tworzywach sztucznych w tym w PET. W połączeniu z pasmem 1715 (cm^{-1}) tworzy sygnaturę poliestru. Ponadto pasmo ~ 1465 i 720 (cm^{-1}) - deformacje C-H jest pasmem charakterystycznym dla polietylenu. Pasmo ~ 1100 (cm^{-1}) - drgania C-O i C-C , występują w zarówno związkach organicznych (np. celuloza, hemicelulozy), jak i w PET. Nakładają się na siebie, ale ich intensywność wskazuje na udział PET. Pasmo ~ 870 (cm^{-1}) - drgania poza płaszczyznę aromatycznego C-H , to pasmo jest typowe dla układu benzenowego obecnego w PET. Nie pochodzi z materii organicznej, co czyni je istotnym dowodem obecności tworzywa sztucznego. Pasmo $\sim 730\text{--}720$ (cm^{-1}) - deformacyjne drgania C-H (wagging) aromatycznych pierścieni, również charakterystyczne dla tworzyw sztucznych. Te sygnały są wskaźnikiem aromatycznego szkieletu tego tworzywa sztucznego (PET).

Wnioski:

Widmo FT-IR jednoznacznie wskazuje na obecność tworzyw sztucznych w próbce kompostowanej trawy, poprzez: silne pasmo karbonylowe (C=O) przy 1715 (cm^{-1}), obecność estrowych drgań C-O-C , aromatyczne sygnały z pierścienia benzenowego PET - $730\text{--}870$ (cm^{-1}). Jednocześnie zachowane są pasma typowe dla naturalnej biomasy (O-H , alifatyczne C-H), co świadczy o mieszanym charakterze próbki (organika i tworzywa sztuczne).

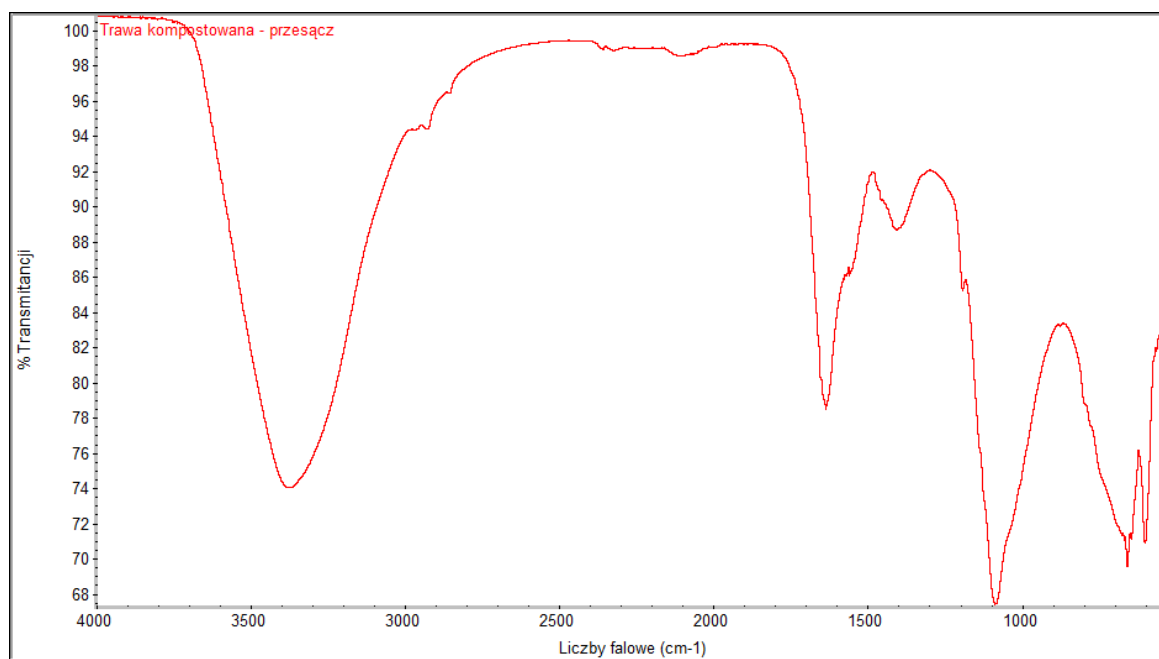
Następnie zaprezentowano wyniki z FT-IR z przesączu z kompostowanej trawy.

Tabela poniżej (tab. 5.17) przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC, które porównują otrzymane widmo z daną biblioteką.

Tabela 5.17 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla otrzymanego przesączu z kompostowanej trawy (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	48,15	Opium powder in KBR	<i>Georgia State Crime Lab Sample Library</i>
2	45,55	Magnesium sulfate (siarczan magnezu)	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
3	41,53	Streptomycin sulfate (siarczan streptomycyny)	<i>Sigma Biological Sample Library</i>
4	40,86	Formaldehyde – aquwous solution (formaldehyd – roztwór wodny)	<i>Hummel Polymer Sample Library</i>
5	40,55	cellophan (celofan)	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>

Analizując dane zebrane w tabeli widać, że w próbce znajdują się cząstki tworzyw sztucznych w programie zanalizowane jako celofan ze współczynnikiem dopasowania 40,55.



Rysunek 5.35 Widmo FT-IR trawy zmielonej kompostowanej – przesącz (opracowanie własne)

Ponadto dokonując szerszej analizy (rys. 5.35) poszczególnych pasm w zakresie liczby falowej: 4000–600 (cm⁻¹), możemy wyszczególnić pasmo 3300–3400 (cm⁻¹) tj. jako szerokie pasmo,

rozciągające drgania grup –OH (hydroksylowych), prawdopodobnie pochodzących od wody, alkoholi, kwasów karboksylowych, świadczące o dużej zawartości związków hydrofilowych (obecność wody), kwasów organicznych (np. kwas octowy, mlekowy – produkty fermentacji). Pasmo 2900–2850 (cm^{-1}) tj. słabe pasmo, rozciągające drgania C–H (wiązania alifatyczne: $-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$), obecność niskocząsteczkowych związków organicznych. Pasmo ~ 1720 (cm^{-1}) jako brak wyraźnego piku, to pasmo (dla grupy karbonylowej $\text{C}=\text{O}$) nie jest bardzo wyraźne, co może oznaczać niską zawartość estrów lub kwasów karboksylowych, ewentualnie ich obecność w formie zjonizowanej (soli), świadcząc o braku dominującej ilości estrów/aldehydów – bardziej wodny charakter próbki. Pasmo 1600–1550 (cm^{-1}) to drgania deformacyjne $\text{C}=\text{C}$ w układach aromatycznych lub drgania asymetryczne COO^- (soli kwasów karboksylowych), obecność związków fenolowych lub rozkładu ligniny, co może być charakterystyczne dla rozkładającej się trawy. Pasmo 1400–1350 (cm^{-1}), drgania deformacyjne C–H, grup metylowych/metylenowych, rozpad makrocząsteczek (np. węglowodorów roślinnych) do mniejszych składników. Pasmo 1200–900 (cm^{-1}) to silne, złożone pasmo C–O, C–C i C–OH – charakterystyczne dla alkoholi, estrów, cukrów i kwasów organicznych, świadczące o obecności polisacharydów, kwasów huminowych, a także kwasów organicznych.

Wnioski:

Widmo przesącza z kompostowanej trawy wskazuje na obecność dużej ilości wody i związków polarowych (hydroksylowych i karboksylowych). Obecność związków niskocząsteczkowych (np. kwasów organicznych) – produkty fermentacji i rozkładu materii organicznej. Obecne pasma celulozowe i polisacharydowe w rejonie 1200–900 cm^{-1} . Brak wyraźnych sygnałów typowych dla tworzyw sztucznych, co sugeruje brak PET w tej frakcji (jest to logiczne – PET jest nierozpuszczalny i zostałby w osadzie). Organiczne składniki kompostu (np. lignina, celuloza, kwasy humusowe, tłuszcze) są widoczne w postaci pasm –OH, $\text{C}=\text{O}$ oraz C–H. Obecność pasm w zakresie 1735 (cm^{-1}) oraz 1100–1000 (cm^{-1}) sugeruje, że w próbce znajdują się śladowe ilości PET (politereftalan etylenu). Pasma przy ~ 1450 , ~ 1375 i ~ 720 (cm^{-1}) wskazują na możliwą obecność poliolefin (PP, PE). Pasma ~ 1600 i ~ 750 (cm^{-1}) mogą wskazywać na pierścienie aromatyczne – charakterystyczne zarówno dla PS (polistyrenu), jak i substancji humusowych. Reasumując powyższe to widmo FT-IR dla trawy kompostowanej – przesącza przedstawia charakterystyczne pasma odpowiadające obecności związków organicznych pochodzenia roślinnego, typowych dla procesu kompostowania materii roślinnej

(trawy). Widmo zawiera również sygnały, które mogą wskazywać na obecność pozostałości tworzyw sztucznych (np. PET, PP, PS), co wskazuje na zanieczyszczenie kompostu materiałami polimerowymi.

5.5.2 Kompost przydomowy

5.5.2.1 Analiza DLS kompostu przydomowego

Zbadano 30 próbek kompostu przydomowego pod kątem wielkości cząstek.

Tabela 5.18 Wyniki analizy kompostu przydomowego pod względem wielkości cząstek

Kompostownik przydomowy						
Próbka nr	Pik 1	% powierzchni 1	Pik 2	% powierzchni 2	Pik 3	% powierzchni 3
1-3	1060,0	87,5	197,1	12,5	0	0
4-6	996,5	93,1	151,1	6,9	0	0
7-9	831,3	100,0	0,000	0,0	0	0
10-12	3484	61,9	529,1	38,7	0	0
13-15	265,9	92,6	155,8	7,4	0	0
16-18	741,0	96,7	5560	3,3	0	0
19-21	1312	86,5	193,60	13,5	0	0
22-24	1051	72,4	5015	21,4	135,3	6,1
25-27	864,1	67,5	4708	26,7	152,3	5,8
28-30	2420	73,9	359,6	26,1	0	0
Średnia	1302,6					

Źródło: opracowanie własne

Wielkość cząstek w kompoście przydomowym została przedstawiona w tabeli powyżej (tab. 5.18). Każdy wers w tabeli to średnia z 3 pomiarów, co łącznie daje wynik z 30 przeanalizowanych próbek. Próbkę została przeanalizowane pod kątem podziału na trzy wielkości cząstek, w zależności od intensywności, czyli udziału danej wielkości cząstek w procencie całej powierzchni próbki (tab. 5.18), więc pomiary dostarczają nam informacji, jaki procent próbki w danym przedziale wielkości stanowi dana wielkość cząstek i tak kolejno:

Wynik 1 - 87,5% próbki to cząstki o wielkości 1060 nm, natomiast 12,5% próbki to cząstki o wielkości 197,1 nm. Wynik 2 - ok. 93% próbki to cząstki o wielkości 996,5 nm, a ok. 7% to cząstki o wielkości 151 nm. Wynik 3 - 100% próbki składa się z cząstek o długości 831,3 nm. Pomiar 4 - 61,9% próbki to cząstki o wielkości 3484 nm, a 38,7% próbki to cząstki o wielkości 529,1 nm. Wynik 5 - 92,6% próbki to cząstki o wielkości 265,9 nm, a 7,4% to

cząstki o wielkości 155,8 nm. Wynik 6 - 96,7% próbki to cząstki o wielkości 741 nm, a tylko 3,3% to cząstki o wielkości 5560 nm, co może wskazywać na tworzenie się aglomeratów i połączeń kilku lub nawet kilkunastu cząstek w jeden aglomerat. Wynik 7 - 86,5% cząstek ma rozmiar 1312 nm, a 13,5% ma rozmiar 193,5 nm. Wynik 8 - 72,4% cząstek ma wielkość 1051 nm, 21,4% to cząstki o wielkości 5051 (prawdopodobnie aglomeraty) i pojawia się pik 3: 6,1% próbki to cząstki o wielkości 135 nm. Wynik 9 - 67,5% próbki to cząstki o wielkości 864,1 nm, 26,7% to cząstki rozmiarze 4708 nm, a 5,8% to cząstki o wielkości 152,3 nm. Wynik 10 - 73,9% próbki to wielkość cząstek 2420 nm, a 26,1% to rozmiar 359,6 nm. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że analizowane próbki kompostu domowego zawierają mikroplastik o średnim rozmiarze 1302 nm. Aby cząstka była zaliczona do wielkości mikro musi być mniejsza bądź równa 5000 nm. W analizowanych próbkach można zauważyć obecność wielu mniejszych pojedynczych cząstek, nawet o wielkości około 135-150 nm. Tabela z danymi (tab. 5.18) przedstawia rozkład wielkości cząstek mikroplastiku obecnego w próbce kompostu z gospodarstwa domowego od natężenia (% udział danego rozmiaru w próbce). Można zauważyć, że w próbce kompostu znajdują się mikroplastiki o średniej wielkości około 1300 nm, a także mniejsze około 130 nm. Jest to najprawdopodobniej wynik zanieczyszczenia frakcji organicznej odpadami komunalnymi kierowanymi do procesu kompostowania i może stanowić istotne ograniczenie możliwości wykorzystania kompostu jako materiału rekultywacyjnego.

Zbadano też powstały przesącz z kompostu przydomowego widoczny na rysunku (rys. 5.17)

Tabela poniżej (tab. 5.19) przedstawia otrzymane wielkości cząstek badanych próbek.

Tabela 5.19 Wyniki analizy przesączu z kompostu przydomowego pod względem wielkości cząstek

Przesącz z kompostu przydomowego						
Próbka nr	Pik 1	% powierzchni 1	Pik 2	% powierzchni 2	Pik 3	% powierzchni 3
1-3	154,1	84,1	41,41	15,9	0	0
4-6	120,1	91,5	26,54	4,5	5223	4
7-9	147,0	94,2	30,35	5,8	0	0
10-12	119,9	96,4	5019	3,6	0	0
13-15	132,4	89,3	27,62	6,3	4629	4,4
16-18	154,3	71,2	49,88	22,9	5115	0
19-21	149,6	100	0,00	0,0	0	0
22-24	120,5	92,2	3776	7,8	0	6,1
25-27	122,0	85,8	1671	14,2	0	5,8
28-30	183,4	80,9	48,52	19,1	0	0
Średnia	140,3					

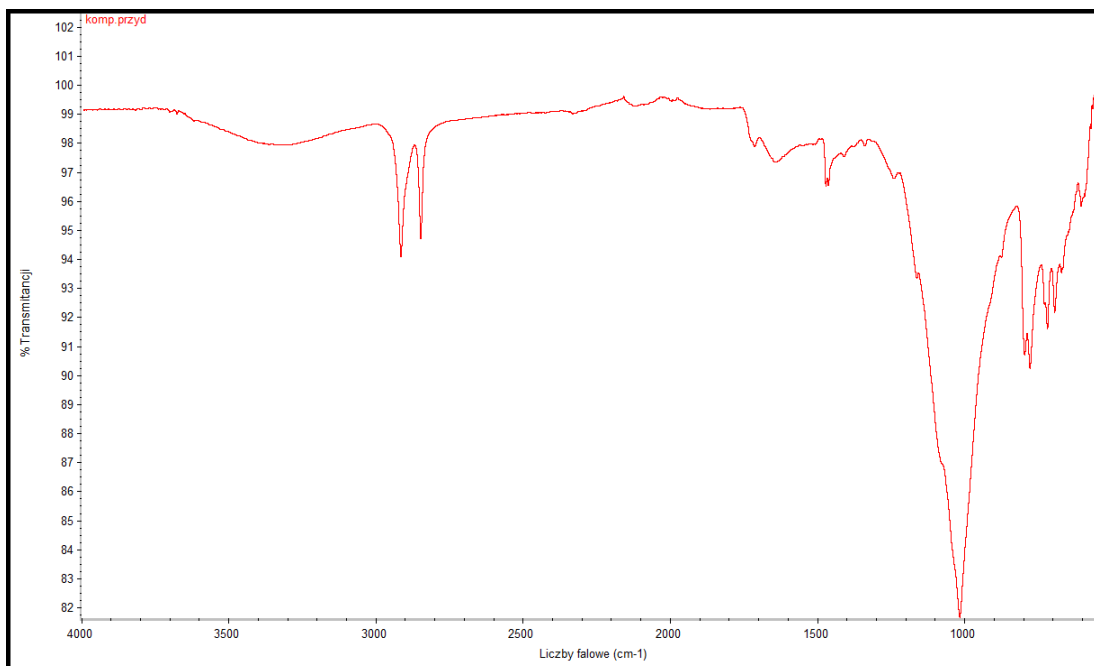
Źródło: opracowanie własne

W wyniku przeprowadzonych badań udało się otrzymać mikrocząstki z przesączu z kompostu przydomowego średniej wielkości 140,3 nm, ale widoczne są też pojedyncze cząstki wielkości nawet 26,54 nm oraz cząstki duże np. 5223 nm - może świadczyć o tworzeniu się aglomeratów. Cząstki wielkości poniżej 100 nm uznawane są za nanocząstki.

5.5.2.2 Analiza FT-IR kompostu przydomowego

Po zbadania wielkości cząstek, przystąpiono do badania zawartości próbki pod kątem obecności polimerów. Poniższy wykres przedstawia otrzymane widmo próbki kompostowanej trawy zanalizowanej na spektrofotometrze w podczerwieni. Widmo przedstawia próbkę kompostu przydomowego analizowaną w podczerwieni (FT-IR). Na osi poziomej mamy liczbę falową (cm^{-1}), a na pionowej - transmitancję (%).

Poniższy wykres (rys. 5.36) przedstawia otrzymane widmo próbki kompostu przydomowego analizowanego na spektrofotometrze w podczerwieni.



Rysunek 5.36 Widmo FT-IR kompostu przydomowego 1 (opracowanie własne)

Tabela poniżej (tab. 5.20) przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC (oprogramowanie do przeprowadzenia pomiaru i analizy składu materiału) wgrane z bibliotek, które porównują otrzymane widmo z daną biblioteką.

Tabela 5.20 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla kompostu przydomowego 1 (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	52,31	polietylen	<i>HR NICOLET Sampler Library</i>
2	49,91	naturalne woski roślinne	<i>HR NICOLET Sampler Library</i>
3	49,46	utleniony polietylen	<i>HR NICOLET Sampler Library</i>
4	49,35	naturalne woski roślinne	<i>HR NICOLET Sampler Library</i>
5	49,15	polietylen o niskiej gęstości	<i>Aldrich Condensed Phase Sample Library</i>

Analizując dane zebrane w tabeli można potwierdzić obecność polietylenu (tworzywa sztucznego) w analizowanych kompoście przydomowym, ze współczynnikiem dopasowania 52,31. Wyszczególniono jeszcze ze względu na pochodzenie próbki (obierki kuchenne

z warzyw i owoców) naturalne woski roślinne. Ponadto dokonując szerszej analizy poszczególnych pasm widocznych w materiale możemy także stwierdzić obecność tworzyw sztucznych. W przedstawionym widmie kompostu przydomowego możemy zauważyć następujący zakres widm – liczba falowa (cm^{-1}), odpowiadający poszczególnym grupom funkcyjnym świadczącym o obecności poszczególnych związków. I tak analizując kolejno możemy wyróżnić następujące grupy funkcyjne.

Liczna falowa $\sim 2950\text{--}2840$ (cm^{-1}) – przypisuje pasmo C–H (rozciągające) jest pasmem wyraźnym i charakterystycznym zarówno dla polipropylenu (PP) jak i PS, które mają wiązania alifatyczne $-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$, mogące świadczyć o polimerowych naklejkach na warzywach czy owocach, które były też widoczne w kompoście przy badaniu jego składu morfologicznego.

Liczba falowa $\sim 1720\text{--}1710$ (cm^{-1}), odpowiada za pasmo C=O (karbonylowe), wskazujące na obecność politeraftalany etyleny (PET), posiadającego grupy estrowe.

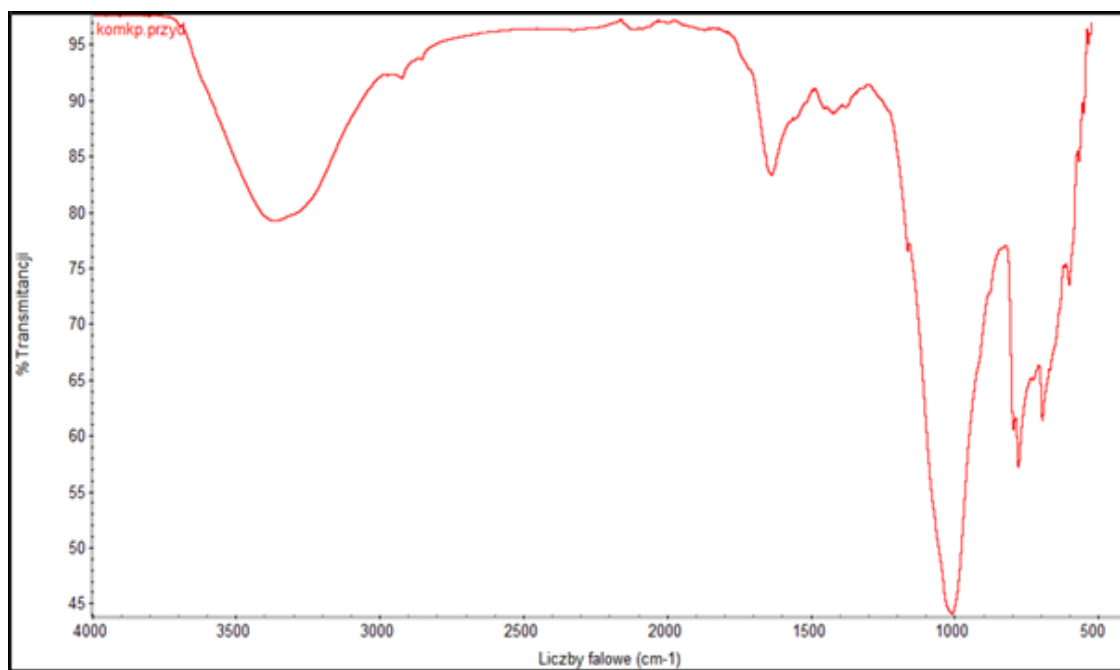
Pasmo $\sim 1600\text{--}1500$ (cm^{-1}), charakterystyczne dla wiązania aromatycznego C=C, które jest typowe dla polistyrenu (PS) i częściowo dla PET.

Pasmo $\sim 1250\text{--}1000$ (cm^{-1}), C–O, C–C, C–H to obszar bardzo złożony – wpływ polimerów (PET) i matrycy organicznej (np. celulozy, resztek roślin), co jest zrozumiałe dla próbki kompostu z resztek obierków kuchennych.

Pasmo $\sim 750\text{--}700$ (cm^{-1}), aromatyczne „out-of-plane”- wskazywać może na obecność pierścieni benzenowych – obecnych w PS.

Otrzymany wynik potwierdza obecność mikroplastików w kompostowniku przydomowym.

Kolejnym przykładem badanej próbki jest poniższy rysunek (rys. 5.37)



Rysunek 5.37 Widmo FT-IR kompostu przydomowego 2 (opracowanie własne)

Tabela poniżej (tab. 5.21) przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC dopasowujące otrzymane widmo do danych z poszczególnych bibliotek.

Tabela 5.21 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla kompostu przydomowego 2 (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	43,95	Celofan	<i>Hummel Polymer Sample Library</i>
2	42,00	Opium	<i>Georgia State Crime Lab Sample Library</i>
3	39,25	Formaldehyd	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
4	37,38	Laktoza	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
5	32,04	Dekstroza	<i>Aldrich Condensed Phase Sample Library</i>
6	30,98	Celofan	<i>Hummel Polymer Sample Library</i>

Analizując dane zebrane w tabeli można potwierdzić obecność celofanu (tworzywa sztucznego) w analizowanych kompoście przydomowym, ze współczynnikiem dopasowania 43,95.

Interpretując widma FT-IR (rys. 5. 37) w zakresie 3600–3000 (cm^{-1}), czyli tak zwane pasma szerokie, wyróżniamy:

Liczba falowa $\sim 3400\text{--}3300\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ to intensywne, szerokie pasmo występujące jako drgania rozciągające --OH (grupy hydroksylowe) — charakterystyczne dla: wody, kwasów humusowych, alkoholi, fenoli, kwasów karboksylowych z materii organicznej zawartej w kompoście. Analizując zakres $3000\text{--}2800\text{ (cm}^{-1}\text{)}$, a dokładnie liczba falowa $\sim 2920\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ i $2850\text{ (cm}^{-1}\text{)}$, to wiązania rozciąganie C--H (grupy CH_2 i CH_3) — obecne w węglowodorowych łańcuchach alifatycznych (pochodzących np. z PP, PE), pozostałościach tłuszczów, czy olejów organicznych — co również potwierdzałoby obecność polimerów pochodzących z naklejek na owocach, warzywach, czy innych zanieczyszczeń kompostu plastikiem, tak samo jak zawartość tłuszczu z odpadów kuchennych np. ze smażenia. Zakres z przedziału $1750\text{--}1650\text{ (cm}^{-1}\text{)}$, a dokładnie $\sim 1715\text{--}1735\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ to drgania rozciągające C=O — grupa karbonylowa, mogą świadczyć o obecności PET (politereftalan etylenu) oraz kwasy karboksylowe znajdujące się w materii organicznej, np. kwasy humusowe, co również potwierdza organiczny charakter próbki. Zakres $1600\text{--}1500\text{ (cm}^{-1}\text{)}$, a konkretnie $\sim 1600\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ to pasmo związane z drganiami C=C w pierścieniu aromatycznym — może pochodzić z PS (polistyrenu), substancji humusowych (związki aromatyczne w kompoście). Zakres $1450\text{--}1375\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ to tzw. pasma deformacyjne C--H z CH_2/CH_3 — typowe dla polipropylenu (PP) oraz resztek biologicznych (lipidy, woski roślinne). Analizując kolejne pasmo z zakresu $1250\text{--}1000\text{ (cm}^{-1}\text{)}$, a dokładnie intensywność pasma w okolicy $1100\text{--}1000\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ świadczące o obecności drgania C--O--C (eterowe i estrowe) obecne zarówno w politereftalanie etylenu (PET) jak i w substancjach organicznych (np. celuloza, hemicelulozy, ligniny). Zakres $900\text{--}650\text{ (cm}^{-1}\text{)}$, a dokładnie zakres $\sim 730\text{--}720\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ tzw. wagging CH_2 — to pasmo typowe dla polietylenu (PE) i polipropylenu (PP). Widoczny także przedział $\sim 750\text{--}700\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ jako pasma „out-of-plane” dla C--H w pierścieniach aromatycznych — PS lub substancje humusowe.

Wniosek:

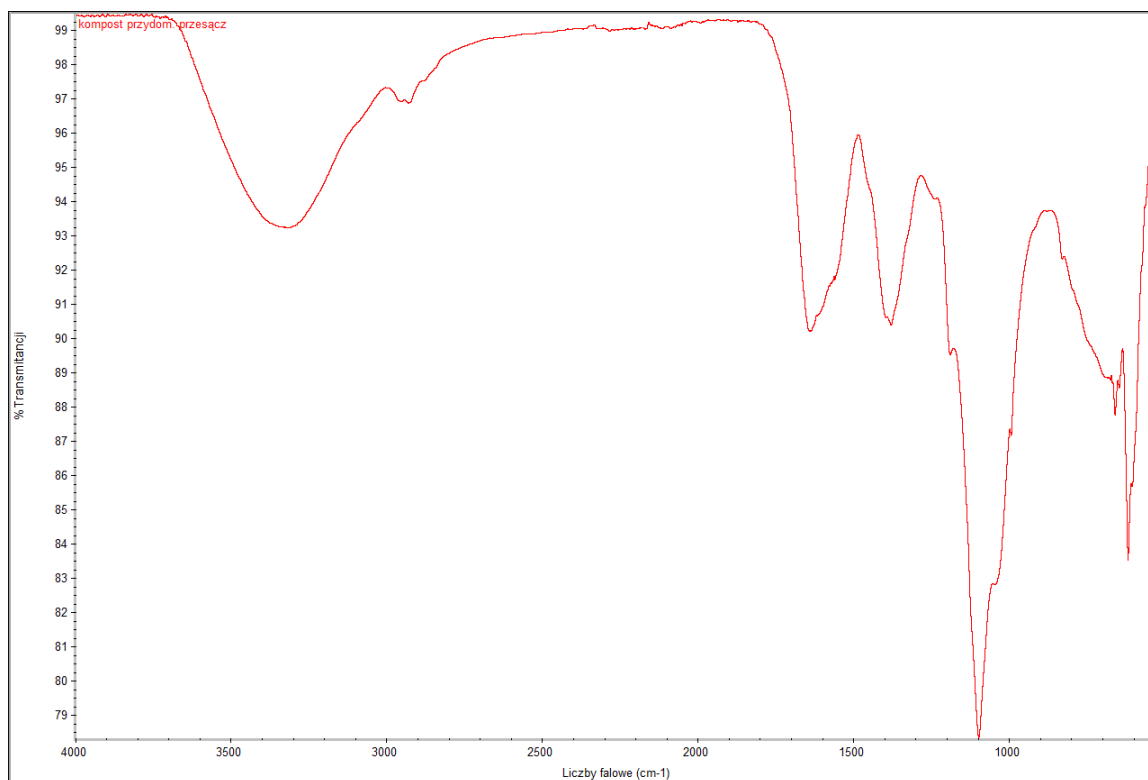
Widmo potwierdza obecność materii organicznej charakterystycznej dla kompostu przydomowego (grupy --OH , C=O , C--O), jak i tworzyw sztucznych:

PET — widoczne pasma karbonylowe ($\text{C=O} \sim 1720\text{ cm}^{-1}$), ($\text{C--O--C} \sim 1100\text{ cm}^{-1}$),

PP i PE — pasma CH_2/CH_3 , wagging $\text{CH}_2 \sim 720\text{ (cm}^{-1}\text{)}$,

PS — obecność pasm aromatycznych ~ 1600 i $\sim 750\text{ (cm}^{-1}\text{)}$.

Kolejnym przykładem badanego materiału jest rysunek poniżej (rys. 5.38) obrazujący widmo FT-IR dla przesączu powstałego z sączenia i filtracji próbki kompostu przydomowego.



Rysunek 5.38 Widmo FT-IR otrzymanego przesączu z kompostu przydomowego (opracowanie własne)

Tabela poniżej (tab. 5.22) przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC dopasowujące otrzymane widmo do danych z poszczególnych bibliotek.

Tabela 5.22 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla przesączu z kompostu przydomowego (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	52,42	Ammonium sulfate (siarczan amonu)	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
2	45,96	Magnesium sulfate (siarczan magnezu)	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
3	42,82	Aluminium ammonium sulfate (siarczan glinowo-amonowy)	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
4	41,47	Streptomycin sulfate (siarczan streptomycyny)	<i>Sigma Biological Sample Library</i>
5	40,42	Cesium sulfate (siarczan cezu)	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>

Analizując dane zebrane w tabeli nie można potwierdzić obecności celofanu czy innego polimeru w powstałym przesączu z kompostu przydomowego w analizowanych próbkach. Znajdują się inne związki charakteryzujące organiczny charakter kompostu.

Przedstawione na rysunku 5.38 widmo FT-IR w zakresie 4000–400 (cm^{-1}). Na osi poziomej zaznaczono liczbę falową (w cm^{-1}), a na osi pionowej - transmitancję (%). Jest to spektrum próbki z badania przesączu z kompost przydomowego. Analiza kluczowych pasm:- zakres 3700–3000 (cm^{-1}). Pasma ~3400 (cm^{-1}) to szerokie pasmo - odpowiada rozciąganiu wiązań O–H (grupy hydroksylowe, woda, alkohole, kwasy karboksylowe). Obecność szerokiego pasma sugeruje wodę lub grupy hydrofilowe (np. celuloza, lignina). Zakres 3000–2800 (cm^{-1}) tu brak wyraźnych pików w tym przedziale wskazuje na niską zawartość węglowodorów alifatycznych (C–H rozciągające dla CH_3 i CH_2). Zakres 1750–1500 (cm^{-1}); ~1650 (cm^{-1}) - pasmo charakterystyczne dla wiązania C=O (rozciąganie karbonylu); może pochodzić od kwasów karboksylowych, amidów, związków humusowych. Analizując pasmo ~1550 (cm^{-1}) i 1400 (cm^{-1}) - mogą odpowiadać drganiom deformacyjnym N–H i/lub C–N oraz grup karboksylowych COO^- . Zakres 1300–1000 (cm^{-1}), a dokładnie ~1240–1020 (cm^{-1}) to intensywne pasma w tym zakresie są typowe dla: C–O (alkohole, estry, kwasy karboksylowe) oraz grupy fenolowe jak i węglowodany (celuloza, hemiceluloza). Zakres 900–700 (cm^{-1}), to mniejsze pasma - mogą odpowiadać drganiom poza płaszczyzną wiązań C–H w aromatach lub strukturach pierścieniowych.

Wniosek:

Widmo sugeruje obecność: wody i grup hydroksylowych (szerokie pasmo O–H), związków organicznych zawierających C=O i C–O (kwasy karboksylowe, estry, węglowodany), materii humusowej (pochodne ligniny i celulozy), możliwa obecność amin lub amidów, gdyż pasma w okolicy 1550 (cm^{-1}) są silne. Jak widać, w powstałym przesączu nie ma pasm świadczących o obecności polimerów, więc wnioskować możemy że proces filtracji i sączenia zatrzymał mikrocząstki polimerów. W surowym materiale są obecne, zaś w przesączu ich brak.

5.5.3 Polepszacz glebowy (kompost z odpadów zielonych)

5.5.3.1 Analiza DLS polepszacza glebowego

Analizowane próbki polepszacza glebowego zostały zbadane 30 krotnie na analizatorze wielkości cząstek. Każdy wers w tabeli poniżej tab. 5.23 przedstawia średnią z 3 pomiarów, co łącznie daje dane dla 30 próbek (10 wersów).

Tabela 5.23 Wyniki analizy wielkości cząstek obecnych w polepszaczu glebowym

Polepszacz glebowy						
Próbka nr	Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
1-3	1556,0	63,8	312,4	36,2	0,0	0,0
4-6	473,6	93,1	5216,0	6,9	0,0	0,0
7-9	403,7	58,5	2477	41,5	0,0	0,0
10-12	393,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13-15	1035,0	72,5	256,7	23,3	4627,0	4,1
16-18	546,6	90,2	4928,0	9,8	0,0	0,0
19-21	962,3	75,3	207,1	23,6	5436,0	1,2
22-24	632,7	80,80	156,8	19,2	0,0	0,0
25-27	791,8	81,9	185,7	15,2	4943,0	2,9
28-30	666,5	68,9	187,4	16,9	4533,0	15,2
Średnia	746,4					

Źródło: opracowanie własne

Analizując kolejno tabelę 5.23 mamy uzyskane następujące wyniki:

Wynik 1 – 63,8% próbki to cząstki o wielkości 1556,0 nm, natomiast 36,2% próbki to cząstki o wielkości 36,2 nm. Wynik 2 - ok. 93% próbki to cząstki o wielkości 473,6 nm, Wynik 3 – 58,5% próbki składa się z cząstek o wielkości 403,7 nm, zaś 41,5% próbki stanowią cząstki wielkości 2477 nm. Wynik 4 - 100% próbki to cząstki o wielkości 393,1 nm, Wynik 5 - 72,5% próbki to cząstki o wielkości 1035,0 nm, a 23,3% to cząstki o wielkości 256,7 nm. Pojawiają się tu duże cząstki wielkości 4627 nm stanowiące 4,1% próbki. Pomiar 6 - 90,2% próbki to cząstki o wielkości 546,6 nm, a tylko 9,8% to cząstki o wielkości 4928 nm, co może wskazywać na tworzenie się aglomeratów i połączeń kilku cząstek w jedną większą. Wynik 7 - 75,3% cząstek ma rozmiar 962,3 nm, a 23,6 % ma rozmiar 207,1 nm, i tutaj pojawiają się również w pik 3 cząstki większe, średnia z 3 pomiarów 5436,0 nm stanowiące tylko 1,2% próbki. Wynik 8 – 80,8% cząstek ma wielkość 632,7 nm, 19,2% to cząstki o wielkości 156,8 nm. Wynik 9 - 81,9% próbki to cząstki o wielkości 791,8 nm, 15,2% to cząstki o wielkości 185,7 nm, a 2,9% to cząstki o wielkości 4943,0 nm - pojawiające się jako pik 3. Wynik 10 – 68,9% próbki

to cząstki wielkości 666,5 nm, 16,9% to 187,4 nm, a 15,2% to cząstki wielkości 4533 nm. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że analizowane próbki polepszacza glebowego zawierają mikroplastik o średnim rozmiarze 746,4 nm. Aby cząstka była zaliczona do wielkości mikro musi być mniejsza bądź równa 5000 nm. W analizowanych próbkach można zauważyć obecność wielu mniejszych pojedynczych cząstek, nawet o wielkości około 150 nm. Tabela z danymi (tab. 5.23) przedstawia rozkład wielkości cząstek mikroplastiku obecnego w próbce polepszacza glebowego od natężenia (% udział danego rozmiaru w próbce). Podsumowując zbadano, że w próbce kompostu pochodzącego z MBP odpadów zielonych tzw. polepszacza glebowego znajdują się mikroplastiki o średniej wielkości około 746 nm, a także mniejsze około 150 nm. Jest to najprawdopodobniej wynik zanieczyszczenia frakcji organicznej odpadami komunalnymi z tworzywami sztucznymi kierowanymi do procesu kompostowania i może stanowić istotne ograniczenie możliwości wykorzystania kompostu jako materiału rekultywacyjnego.

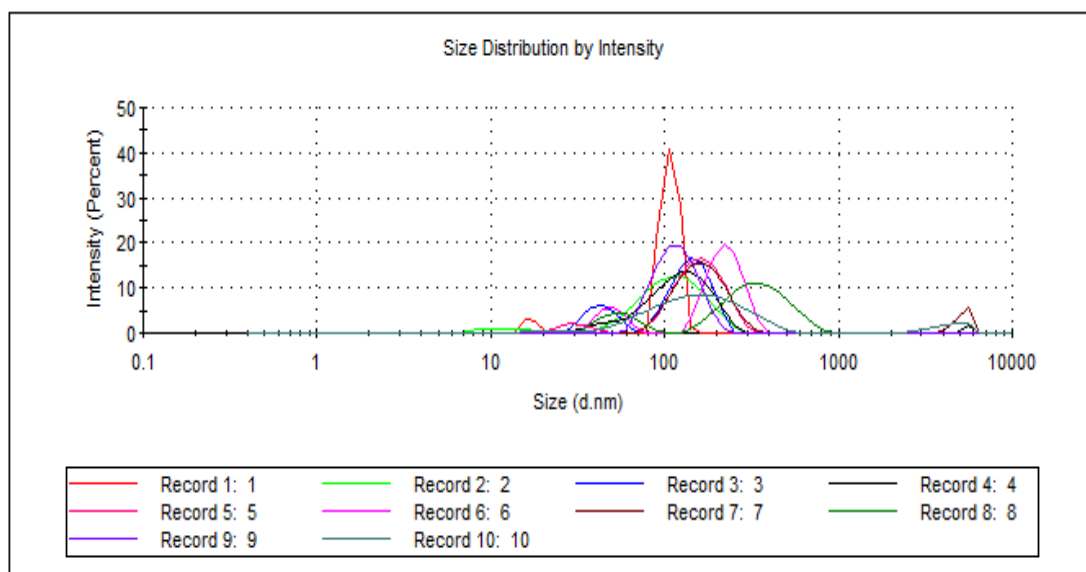
Następnie dokonano analizy wielkości cząstek dla polepszacza glebowy, ale powstałego przesączu. Wyniki zawarte są w tabeli poniżej (tab. 5.24)

Tabela 5.24 Wyniki wielkości cząstek obecnych w analizowanym przesączu powstałym z polepszacza glebowego

Polepszacz glebowy – przesącz						
Próbka nr	Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
1-3	107,6	94,1	16,65	5,9	0,0	0,0
4-6	118,2	92,0	12,43	6,0	5560,0	1,9
7-9	143,4	76,0	43,76	24,0	0,0	0,0
10-12	124,3	98,4	5560,0	1,6	0,0	0,0
13-15	164,5	92,3	30,54	7,7	0,0	0,0
16-18	226,3	80,8	49,62	19,2	0,0	0,0
19-21	165,9	90,1	5156,0	9,9	0,0	0,0
22-24	261,6	79,4	56,01	20,6	0,0	0,0
25-27	119,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28-30	174,0	89,0	4342,0	9,0	21,22	2,0
Średnia	170,5					

Źródło: opracowanie własne

W wyniku przeprowadzonych analiz i homogenizacji udało się otrzymać mikrocząstki z przesączu z polepszacza glebowego średniej wielkości 170,5 nm. Zmierzono także pojedyncze cząstki wielkości nawet 21,54 nm oraz cząstki duże np. 5560 nm - może świadczyć o tworzeniu się aglomeratów. Cząstki wielkości poniżej 100 nm uznawane są za nanocząstki. Poniższy rysunek (rys. 5.39) przedstawia średnie piki widoczne z 30 analizowanych próbek z uśrednieniem do 10 prezentowanych pomiarów.

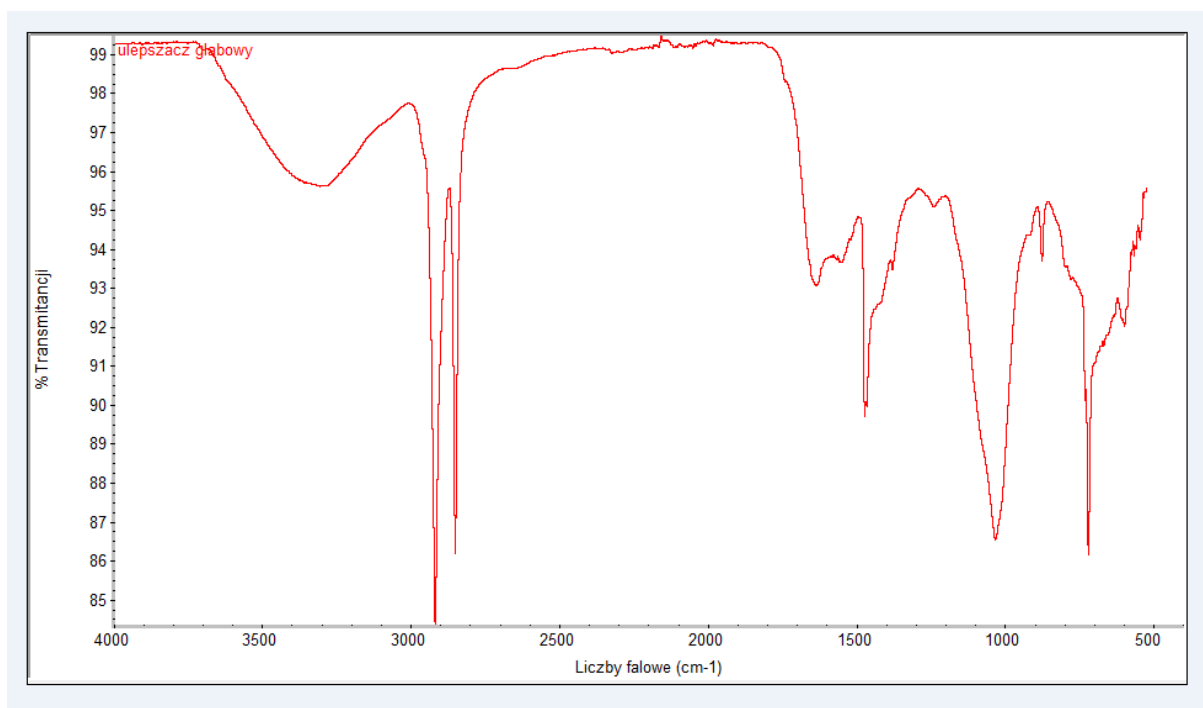


Rysunek 5.39 Średnie wartości wielkości cząstek polepszacza glebowego - przesącz (opracowanie własne)

5.5.3.2 Analiza FT-IR polepszacza glebowego

Po określeniu wielkości cząstek w polepszaczu glebowym przystąpiono do badania zawartości próbek pod kątem obecności tworzyw sztucznych.

Poniższy rysunek (rys. 5.40) przedstawia otrzymane widmo próbki polepszacza glebowego analizowanego na spektrofotometrze w podczerwieni.



Rysunek 5.40 Widmo FT-IR analizowanego polepszacza glebowego 1 (opracowanie własne)

Tabela poniżej (tab. 5.25) przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC, które porównują otrzymane widmo polepszacza glebowego z daną biblioteką.

Tabela 5.25 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla polepszacza glebowego 1 (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	74,21	Poly(etylenne;propylene;diene) Polietylen /polipropylen	<i>Hummel polimer Sample Library</i>
2	71,00	Poly(ethylene) Polietylen	<i>Hummel polimer Sample Library</i>
3	55,92	Poly(ethylene;propylene) Polietylen /polipropylen	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
4	43,25	Nylon II (Art. Corrected) Nylon	<i>User Sample Library</i>
5	42,94	Polietylene film Polietylen	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>

Analizując dane zebrane w tabeli powyżej można potwierdzić jednoznacznie, że w badanej próbce polepszacza glebowego znajdują się cząstki tworzyw sztucznych. Współczynnik dopasowanie 74,21 wskazuje na obecność polietylenu i 71,00 - polipropylenu wg danych z biblioteki *Hummel Polymer Sample Library*.

Przedstawione widmo na rysunku 5.40 to widmo, które przedstawia spektrum FT-IR zależności procent transmitancji (% Transmitancji) w funkcji liczby falowej (cm^{-1}). Interpretacja najważniejszych pasm w widmie: około $3400\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ (szerokie pasmo) to rozciągające drgania grupy -OH (hydroksylowej), charakterystyczne dla alkoholi lub kwasów karboksylowych, szerokie pasmo może świadczyć o obecności wiązań wodorowych. Około $2950\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ to kilka wąskich pasm, jako drgania rozciągające wiązań C-H w grupach CH_3 i CH_2 , typowe dla alkanów, obecność tych pasm wskazuje na obecność łańcuchów węglowodorowych. Pasmo około 1700 cm^{-1} to silne, ostre pasmo, to drgania rozciągające wiązania C=O (karbonylowe) wskazuje na obecność ketonów, aldehydów, kwasów karboksylowych lub estrów. Pasmo około $1600\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ to drgania deformacyjne wiązań C=C w pierścieniach aromatycznych lub grup karbonylowych, może sugerować obecność pierścieni aromatycznych. Pasmo około $1300\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ to kilka pasm jako drgania C-O (rozciągające), typowe dla alkoholi, estrów i kwasów karboksylowych, może także świadczyć o obecności związków zawierających tlen (np. estrów, alkoholi).

W analizowanych widmie FT-IR istnieją pasma świadczące o obecności polimerów w polepszaczu glebowym: zakres $3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ to silne, ostre pasma wokół 2950 , 2915 i 2850 cm^{-1} – typowe dla drgań rozciągających C-H w grupach alkilowych (CH_2 , CH_3). Są one powszechne w strukturach łańcuchów polimerowych, takich jak polietylen (PE), polipropylen (PP), polistyren (PS) itp.

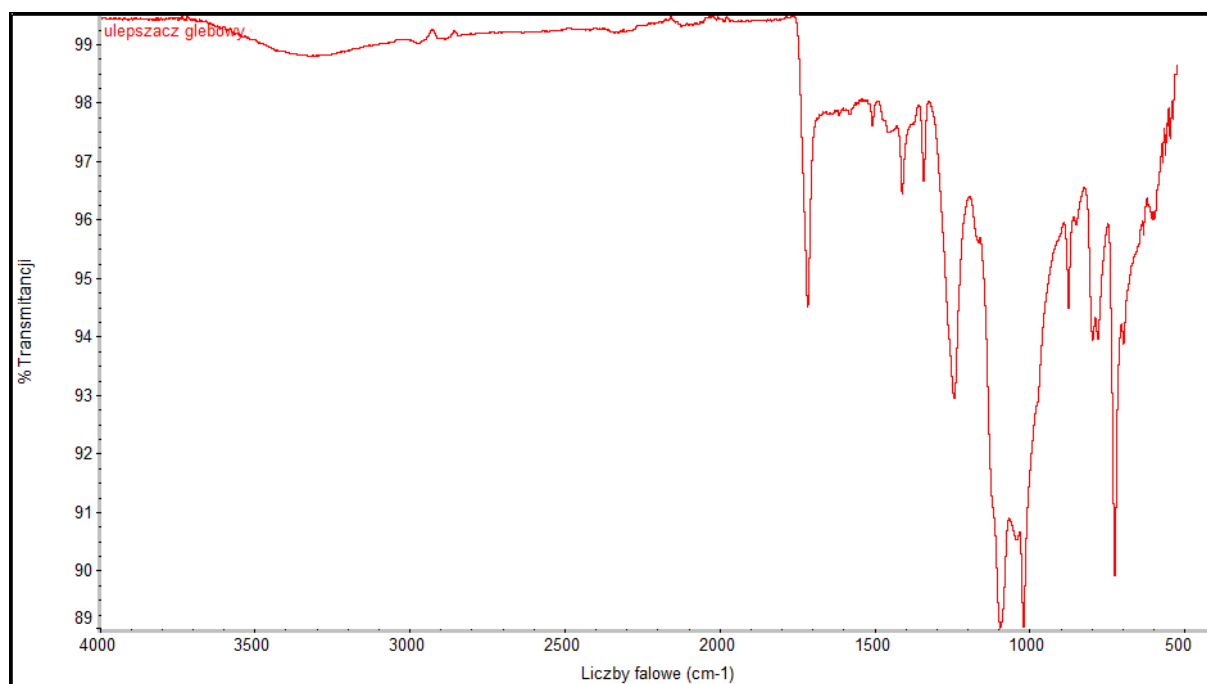
Zakres $1750\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$, to pasmo w okolicach 1700 cm^{-1} – może wskazywać na obecność grup karbonylowych (C=O), które są charakterystyczne np. dla poliestrów (PET), poliuretanów lub poliamidów. Zakres $1600\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$, to pasma w tym obszarze mogą wskazywać na drgania deformacyjne wiązań C=C (aromatycznych), co sugeruje obecność pierścieni benzenowych – typowe np. dla polistyrenu. Zakres $1300\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$, to silne pasma w tej strefie mogą pochodzić od drgań rozciągających C-O lub C-C . Są charakterystyczne dla wielu polimerów zawierających estry, etery lub inne grupy heteroatomowe (np. PET, PMMA, PC).

Zakres $800\text{--}600\text{ cm}^{-1}$ to pasma poniżej 1000 cm^{-1} mogą wskazywać na drgania poza płaszczyznę wiązań C-H (aromatycznych) lub wiązania C-Cl . Pasmo w okolicy $700\text{--}750\text{ cm}^{-1}$ bywa charakterystyczne dla styrenu.

Wnioski:

Widmo zawiera charakterystyczne pasma dla polimerów, takie jak: drgania C–H (alkilowe), drgania C=O (karbonylowe), obecność grup aromatycznych, pasma C–O/C–C. Wnioskować można jednoznacznie, że próbka zawiera materiał polimerowy zarówno z grupami estrowymi lub aromatycznymi. Porównując widmo z polietylenem wskazanym w tabeli z bibliotek widnieje związek z wiązaniami charakterystycznymi dla tego polimeru, a mianowicie pasmo ~ 2915 (cm^{-1}) drgania C–H rozciągające (asymetryczne) - obecne w próbce. Pasmo ~ 2849 cm^{-1} , C–H rozciągające (symetryczne) - obecne w próbce. Pasmo ~ 1472 (cm^{-1}) - C–H deformacyjne (asymetryczne), także obecne w próbce. Pasmo ~ 1463 – 1465 (cm^{-1}), C–H deformacyjne (symetryczne) również obecne w próbce. Reasumując obszar 2950 – 2850 (cm^{-1}) – silne pasma typowe dla drgań C–H w grupach CH_2/CH_3 – zgodne z PE oraz pasma ok. 1470 (cm^{-1}) i 720 (cm^{-1}) – również dobrze widoczne – także zgodne z PE.

Kolejny rysunek (rys. 5.41) przedstawia widmo polepszacza glebowego 2.



Rysunek 5.41 Widmo FT-IR analizowanego polepszacza glebowego 2 (opracowanie własne)

Tabela poniżej (tab. 5.26) przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC, które porównują otrzymane widmo polepszacza glebowego 2 z daną biblioteką.

Tabela 5.26 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla polepszacza glebowego 2 (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	56,99	Poly(ethylene terephthalate) politereftalan etylenu - PET	<i>HR NICOLET Sampler Library</i>
2	42,54	Polyester, there&iso-phthalate politereftalan etylenu - PET	<i>Hummel polimer Sampler Library</i>
3	42,05	Poliester, therephthalate	<i>Hummel polimer Sampler Library</i>
4	38,96	Poly(trimetelltamide imide)	<i>Hummel polimer Sampler Library</i>
5	38,66	Poly(diallyl isophalate)	<i>HR NICOLET Sampler Library</i>

Analizując dane zebrane w tabeli powyżej można potwierdzić jednoznacznie, że w badanej próbce polepszacza glebowego 2 znajdują się cząstki tworzyw sztucznych. Współczynnik dopasowanie 56,99 wskazuje na obecność PET wg danych z biblioteki *Hummel Polymer Sampler Library*.

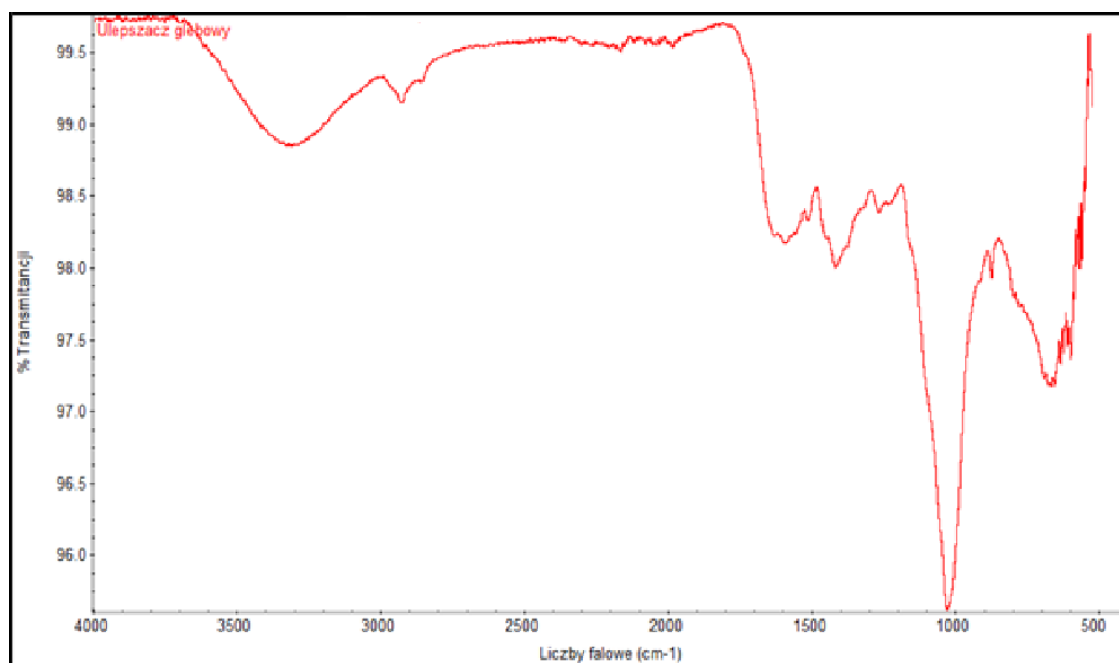
Przedstawione widmo na rysunku 5.41 to widmo, które przedstawia spektrum FT-IR zależności procent transmitancji (% Transmitancji) w funkcji liczby falowej (cm^{-1}) dla badanej próbki polepszacza glebowego. Interpretacja najważniejszych pasm w widmie: pasmo $\sim 3300\text{--}3400$ (cm^{-1}), charakterystyczne dla grupy funkcyjnej - O-H, to rozciągające drgania hydroksylowe z wody, alkoholi, kwasów. Pasmo ~ 2920 (cm^{-1}), to grupa funkcyjna - C-H, wiązanie alifatyczne $\text{CH}_2 / \text{CH}_3$ – charakterystyczne dla takich składników jak lignina bądź składniki lipidowe. Pasmo $\sim 1620\text{--}1650$ (cm^{-1}), to grupy funkcyjne C=O / C=C, więc grupy karbonylowe i aromatyczne z substancji humusowych, a taki charakter ma badana próbka polepszacza glebowego. Pasmo z zakresu $\sim 1000\text{--}1050$ (cm^{-1}) to grupa funkcyjna C-O, charakterystyczna dla węglowodorów, celulozy oraz ligniny. Powołując się na dane z bibliotek w tabeli 5.26, możemy zauważyć dopasowanie widma do politereftalanu etylenu (PET). Następujące widoczne piki również potwierdzają to dopasowanie: pasmo $\sim 1715\text{--}1735$ (cm^{-1}) to C=O (estrowy) jako silne i ostre pasmo, jednoznacznie wskazuje na PET. Pasmo $\sim 1240\text{--}1100$ (cm^{-1}), wiązanie C-O-C, charakterystyczne dla aromatyczne estrów obecne w PET. Pasmo ~ 720 (cm^{-1}), aromatyczne grupy funkcyjne C-H, tzw. drgania pierścienia benzenowego – specyficzne dla PET.

Wnioski:

Wyraźne pasmo C=O w okolicach 1715 (cm^{-1}) wskazuje na obecność PET.

Pasma C–O–C ok. 1100–1250 (cm^{-1}) potwierdzają struktury estrowe z PET. Pasmo ~ 720 (cm^{-1}) – również obecne, które jest charakterystyczne dla aromatycznych pierścieni PET. Pasma szerokie w zakresie 3400–1000 (cm^{-1}) typowe dla kompostu. Widmo potwierdza obecność domieszki PET w polepszaczu glebowym. Sygnały estrowe (C=O i C–O–C) oraz pasmo aromatyczne ~ 720 (cm^{-1}) są charakterystyczne i nie występują w czystym kompoście. Widzimy zatem mieszankę: kompostu organicznego (substancje humusowe, lignina, woda, celuloza), oraz tworzywo sztuczne PET (zanieczyszczenie mikroplastikami w kompoście). Widmo przedstawione na rysunku 5.41 zawiera cechy zarówno materii organicznej, jak i tworzywa PET (politereftalan etylenu).

Kolejnym przykładem analizy polepszacza glebowego jest jego widmo z badania powstałego przesączu. Rysunek poniżej (rys. 5.42) przedstawia widmo przesączu powstałego z polepszacza glebowego otrzymanego w procesie filtracji i sączenia w celu przygotowania próbek do DLS (przesącz widoczny na rys. 5.18)



Rysunek 5.42 Widmo FT-IR analizowanego polepszacza glebowego – przesącz (opracowanie własne)

Tabela poniżej (tab. 5.27) przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC, które porównują otrzymane widmo polepszacza glebowego z daną biblioteką.

Tabela 5.27 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla polepszacza glebowego – przesącz (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	50,99	Cellophan Celofan	<i>HummelPolimer Sample Library</i>
2	48,51	Opium powder Opium	<i>Georgio State Crime Lab Sample Library</i>
3	41,02	Cellophan Celofan	<i>Hummel Polimer Sample Library</i>
4	38,35	Lactose powder (hydrous) Laktoza	<i>Georgio State Crime Lab Sample Library</i>
5	37,01	Chondroitin sulfate grade III sod Siarczan chondoityny sodowy	<i>Sigma Biologiocal Sample Library</i>

Analizując dane zebrane w tabeli powyżej można potwierdzić, że w badanej próbce polepszacza glebowego – przesączu znajdują się cząstki tworzyw sztucznych. Współczynnik dopasowanie 50,99 wskazuje na obecność celofanu - wg danych z biblioteki *Hummel Polymer Sample Library*.

Przedstawione widmo na rysunku 5.42 to widmo, które przedstawia spektrum FT-IR zależności procent transmitancji (% Transmitancji) w funkcji liczby falowej (cm^{-1}). Analizując poszczególne pasma przesączu z kompostu z tzw. polepszacza glebowego można wyszczególnić charakterystyczne pasma zarówno dla próbek z materii organicznej jak i pasma wskazujące na obecność tworzyw sztucznych, co potwierdza poniższa analiza.

Zakres $3700\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ to szerokie pasmo z maksimum ok. $3300\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$, które odpowiada drganiom rozciągającym O–H, typowym dla wody, kwasów humusowych, alkoholi, fenoli, i karboksylowych grup organicznych. To jest typowe dla substancji organicznych pochodzenia roślinnego. Zakres $2950\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ to bardzo słabe bądź słabo zaznaczone pasma, które sugerują niską zawartość grup alkilowych (C–H) – co jest typowe dla materiałów naturalnych, ale mocniej obecne w polimerach. Jeśli pojawią się jako wyraźne piki, może to sugerować obecność tworzyw sztucznych. Zakres $1750\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ to pasmo ok. $1620\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ tzw. drgania rozciągające C=O (karbonyłowe) lub C=C w strukturach aromatycznych lub nienasyconych – mogą pochodzić od kwasów humusowych, ligniny, czy białek. Zakres $1400\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ to złożony układ pasm. Piki ok. $1030\text{--}1050\text{ cm}^{-1}$ to drgania

rozciągające C–O, często obserwowane w celulozie, hemicelulozach, ligninie. Pasma w okolicach 875–1000 (cm^{-1}) może wskazywać obecność krzemianów lub polisacharydów. W kontekście kompostu, szczególnie z odpadów komunalnych, można spodziewać się mikroplastików lub domieszek polimerowych. Charakterystyczne ślady sugerujące obecność polimerów to pasmo ~ 2915 i 2849 (cm^{-1}) to widoczne – mogą pochodzić od polietylenu, polipropylenu lub polistyrenu. Pasma ~ 1470 i 720 (cm^{-1}) tu brak wyraźnych pików – sugeruje, że udział polimerów (PE, PP) jest niski lub ich obecność jest zamaskowana przez organiczną matrycę. Pasma ~ 1100 – 1000 (cm^{-1}) to bardzo intensywne – w przypadku polimerów mogłoby to wskazywać np. na PC, PET, PMMA.

Wnioski:

Cechy organiczne wynikające z organicznego charakteru próbki to wskazania na obecne wyraźne pasma typowe dla materii organicznej (grupy OH, COOH, C–O, C=O). Widmo dobrze odpowiada substancjom humusowym, ligninie, celulozie i innym składnikom roślinnego pochodzenia. Domieszki polimerów są dość słabe, ale możliwe ślady obecności polietylenu (PE) lub polipropylenu (PP): ~ 2915 , ~ 2850 (cm^{-1}) - jako (C–H). Brak silnych pasm typowych dla aromatycznych tworzyw (jak PS, PET) – co może wskazywać na ich niewielką ilość. Złożoność widma oraz intensywność pasm w zakresie 1000 – 1100 (cm^{-1}) nie wyklucza obecności kopolimerów lub biodegradowalnych polimerów (np. PLA, PHA).

5.5.4 Stabilizat

5.5.4.1 Wyniki analizy stabilizatu - DLS

Tabela poniżej (tab. 5.28) przedstawia wyniki wielkości cząstek badanego stabilizatu. Analizowane próbki stabilizatu zostały zbadane 30rotnie na analizatorze wielkości cząstek. Każdy wers w tabeli poniżej (tab.5.28) przedstawia średnią z 3 pomiarów, co łącznie daje dane dla 30 próbek (10 wersji).

Tabela 5.28 Wyniki analizy wielkości cząstek obecnych w stabilizacie

Stabilizat						
Pomiar nr	Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
1-3	481,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-6	821,6	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7-9	630,2	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10-12	383,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13-15	758,5	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16-18	834,5	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19-21	850,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22-24	652,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25-27	505,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28-30	578,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia	649,4					

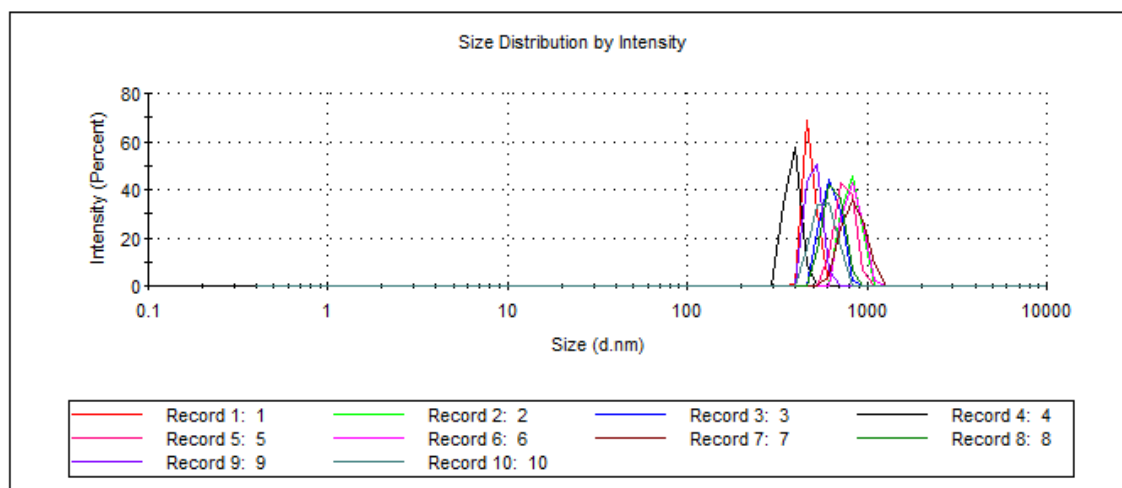
Źródło: opracowanie własne

Analizując kolejno tabelę 5.28 mamy uzyskane następujące wyniki:

Wynik 1 - 100% próbek to cząstki o wielkości 481,1 nm, Wynik 2 – 100% próbek to cząstki o wielkości 821,6 nm, Wynik 3 - 100% próbek składa się z cząstek o wielkości 630,2 nm, Wynik 4 - 100% próbki to cząstki o wielkości 383,3 nm. Wynik 5 - 100% próbek to cząstki o wielkości 758,5 nm, Pomiar 6 - 100% próbki to cząstki o wielkości 834,5 nm, Wynik 7 - 100% cząstek ma rozmiar 850,1 nm. Wynik 8 - 100% cząstek ma wielkość 652,0 nm, Wynik 9 - 100% próbki to cząstki o wielkości 505,1 nm, Wynik 10 - 100% próbki to cząstki wielkości 578,40m nm.

Cząstka zaliczona do wielkości mikro musi być mniejsza bądź równa 5000 nm. W analizowanych próbkach otrzymano wszystkie mniejsze wartości wielkości cząstek. Najmniejsza wartość cząstek zbadanych w stabilizacie wynosi 383,3 nm, a największe cząstki to cząstki 850,1 nm. Poniższy rysunek (rys. 5.43) przedstawia rozkład wielkości cząstek mikroplastików obecnych w próbce stabilizatu od intensywności (natężenia). Podsumowując zbadano, że w próbce kompostu pochodzącego z MBP tzw. stabilizatu znajdują się

mikroplastiki o średniej wielkości około 649,4 nm. Jest to jednoznaczne z występowaniem mikroplastików w stabilizacie, który jest deponowany na składowiskach odpadów.



Rysunek 5.43 Średnie wartości wielkości cząstek w stabilizacie prezentowane dla 30 analizowanych próbek z uśrednieniem do 10 pomiarów (opracowanie własne)

Następnie zbadano wielkość cząstek w otrzymanym przesączu z badanego stabilizatu.

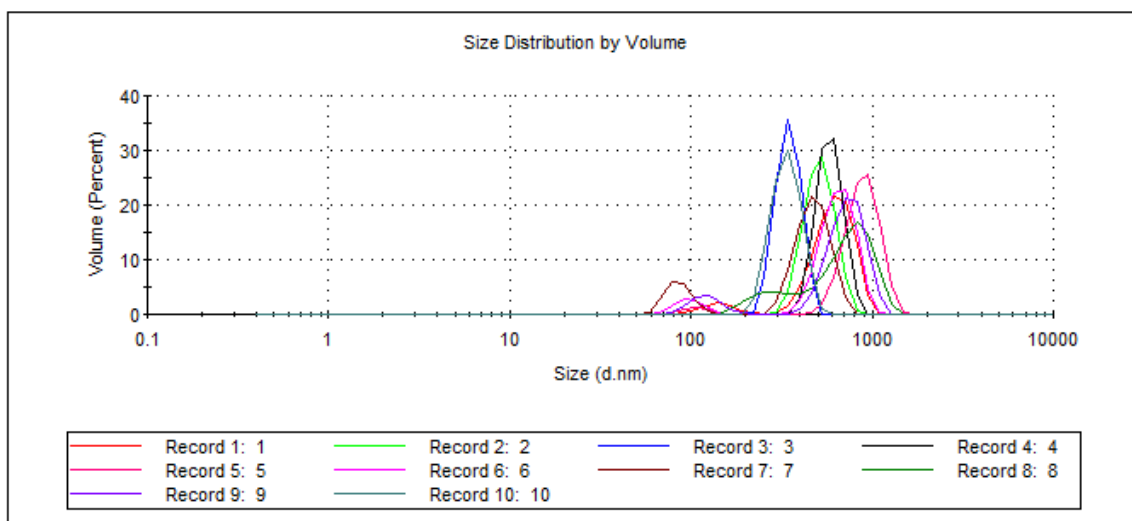
Tabela poniżej (tab. 5.29) przedstawia wyniki wielkości cząstek badanego przesączu ze stabilizatu. Analizowane próbki stabilizatu zostały zbadane 30 krotnie na analizatorze wielkości cząstek. Każdy wiersz w tabeli poniżej (tab. 5.29) przedstawia średnią z 3 pomiarów, co łącznie daje dane dla 30 próbek (10 wierszy).

Tabela 5.29 Wyniki analizy wielkości cząstek obecnych w przesączu ze stabilizatu

Stabilizat - przesącz						
Próbka nr	Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
1-3	581,3	87,8	146,4	12,2	0,0	0,0
4-6	499,9	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7-9	342,9	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10-12	567,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13-15	825,7	91,8	107,7	8,2	0,0	0,0
16-18	612,8	91,1	100,8	8,9	0,0	0,0
19-21	462,3	90,2	88,7	9,8	0,0	0,0
22-24	664,1	58,4	281,0	41,6	0,0	0,0
25-27	674,9	78,5	125,1	21,5	0,0	0,0
28-30	334,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia	556,5					

Źródło: opracowanie własne

Wynik 1 – 87,8 % próbek to cząstki o wielkości 581,31 nm, a 12,2 % próbek stanowią cząstki wielkości 146,4nm. Wynik 2 – 100% próbek to cząstki o wielkości 499,9 nm. Wynik 3 - 100% próbek składa się z cząstek o wielkości 342,9 nm. Wynik 4 - 100% próbki to cząstki o wielkości 567,0 nm. Wynik 5 - 91,8% próbek to cząstki o wielkości 825,7 nm, a 8,2 % próbek stanowią cząstki wielkości 107,7 nm. Pomiar 6 – 91,1% próbki to cząstki o wielkości 612,8 nm, a 8,9% stanowią cząstki 100,8 nm. Wynik 7 – 90,2% cząstek ma rozmiar 462,3 nm, 9,8 % to cząstki 88,7 nm. Wynik 8 - 58.4 % cząstek ma wielkość 664,1 nm, a 41,6 % stanowią cząstki 281 nm. Wynik 9 – 78,5% próbki to cząstki o wielkości 674,9 nm, a 21,5 % stanowią cząstki 125,1 nm. Wynik 10 - 100% próbki to cząstki wielkości 334 nm. Najmniejsza wartość cząstek zbadanych w przesączu ze stabilizatu wynosi 88,7 nm, a największe cząstki to cząstki wielkości 825,7 nm. Poniższy rysunek (rys. 5.44) przedstawia rozkład wielkości cząstek mikroplastików obecnego w próbkach przesączu ze stabilizatu od intensywności. Podsumowując zbadano, że w próbkach kompostu pochodzącego z MBP tzw. stabilizatu - przesączu - znajdują się Mikroplastiki o średniej wielkości 556,5 nm,. Wyniki wskazują jednoznacznie, iż mikroplastiki są obecne w powstałym przesączu, a nawet cząstki nano.

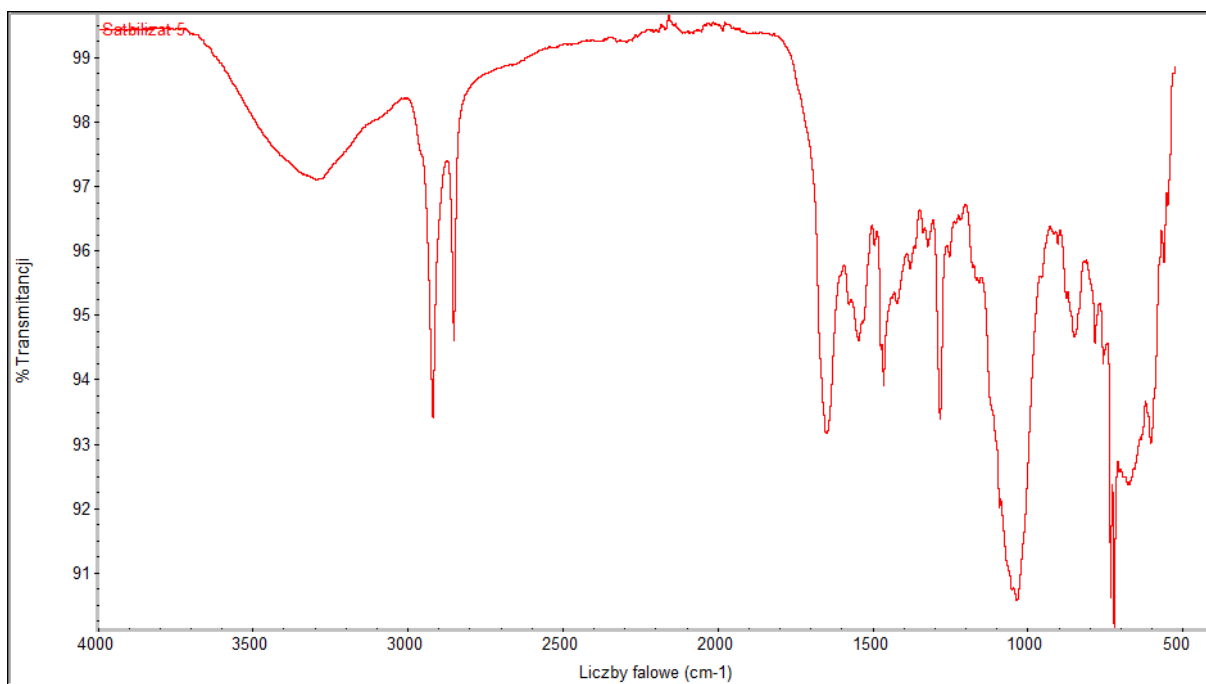


Rysunek 5.44 Średnie wartości wielkości cząstek stabilizatu – przesącz -prezentowane dla 30 analizowanych próbek z uśrednieniem do 10 pomiarów (opracowanie własne)

5.5.4.2 Wyniki analizy stabilizatu - FT-IR

Przebadano kolejno 50 próbek stabilizatu na spektrofotometrze FT-IR pod kątem obecności polimerów, a dokładnie mikroplastików. W załącznikach niniejszej rozprawy doktorskiej znajdują się kolejno otrzymane widma z pomiarów FT-IR od 1 do 50, a także zestawienie zbadanych próbek stabilizatu z podziałem na poszczególne związki (które polimery wg danych bibliotek z największym współczynnikiem dopasowania dla danego polimeru przypisano do odpowiednich numerów badanych prób z załączników rys. 13.47–13.64).

Dokonując badań stabilizatu na FT-IR uzyskano następujące przykładowe wyniki:



Rysunek 5.45 Widmo FT-IR analizowanego stabilizatu 5 (opracowanie własne)

Tabela poniżej (tab. 5.30) przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC, które porównują otrzymane widmo stabilizatu 5 z daną biblioteką.

Tabela 5.30 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla stabilizatu 5 (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	62,73	Oxidized polyethylene Polietylen utleniony	<i>HR Nicolet Sampler Library</i>
2	61,12	Natural vegetable wax from Brazilian palm trees Naturalny воск roślinny z trawy brazylijskiej	<i>HR Nicolet Sampler Library</i>
3	60,50	Natural vegetable wax from Mexican shrub Naturalny воск roślinny z krzewu meksykańskiego	<i>HR Nicolet Sampler Library</i>
4	57,24	Triacotane, 99%	<i>Aldrich Condensed Phase Sample Library</i>
5	57,06	Polyethylene Polietylen	<i>HR Nicolet Sampler Library</i>

Analizując dane zebrane w tabeli powyżej można potwierdzić jednoznacznie, że w badanej próbce stabilizatu 5 znajdują się cząstki tworzyw sztucznych. Współczynnik dopasowania 62,73 oraz 57,06 wskazuje na obecność polietylenu wg danych z biblioteki *HR Nicolet Sampler Library*.

Przedstawione widmo na rysunku 5.45 to widmo, które przedstawia spektrum FT-IR zależności procent transmitancji (% Transmitancji) w funkcji liczby falowej (cm^{-1}) dla badanej próbki stabilizatu nr 5. Analizując poszczególne pasma stabilizatu można wyszczególnić charakterystyczne pasma wskazujące na obecność tworzyw sztucznych, co potwierdza poniższa analiza.

Zakres 3000–2800 (cm^{-1}), to wyraźne, wąskie pasma ~ 2950 , 2915 i 2848 (cm^{-1}), które odpowiadają drganiom rozciągającym C–H w grupach CH_3 i CH_2 - są to typowe sygnały dla polimerów alifatycznych, np. polietylenu (PE), polipropylenu (PP).

Zakres 1750–1700 (cm^{-1}), to widoczne ok. 1720 (cm^{-1}), które jest charakterystyczne dla grup estrowych C=O – typowych dla politereftalan etylenu (PET) lub tworzyw poliestrowych. Zakres 1500–1300 (cm^{-1}), to liczne, mniejsze pasma w tym obszarze, mogą odpowiadać deformacyjnym drganiom C–H, wiązaniom aromatycznym lub amidowym grupom N–H, sugeruje obecność złożonych materiałów organicznych – zarówno naturalnych (pochodzących z kompostu), jak i syntetycznych (np. PS, PET, poliamidy -PA).

Zakres 1300–1000 (cm^{-1}) to złożony układ intensywnych pasm: typowych dla C–O, C–C i C–O–C – mogą pochodzić zarówno od polisacharydów (materia organiczna), jak i poliesterów, poliuretanów, PMMA oraz PET. Ich obecność wskazuje na mieszany skład – kompost z domieszkami polimerowymi. Zakres 750–700 (cm^{-1}), a dokładnie pasmo ~ 720 (cm^{-1}), to typowe dla oscylacji CH_2 z długich łańcuchów alifatycznych – szczególnie dla polietylenu, co potwierdza się z dopasowaniem widma do bibliotek według danych w tabeli 5.30.

Podsumowując to widmo, zawiera ono pasma charakterystyczne dla polimerów obecnych w próbce stabilizatu takie jak :

polietylen (PE) - 2950, 2915, 2848, 720 (cm^{-1}),

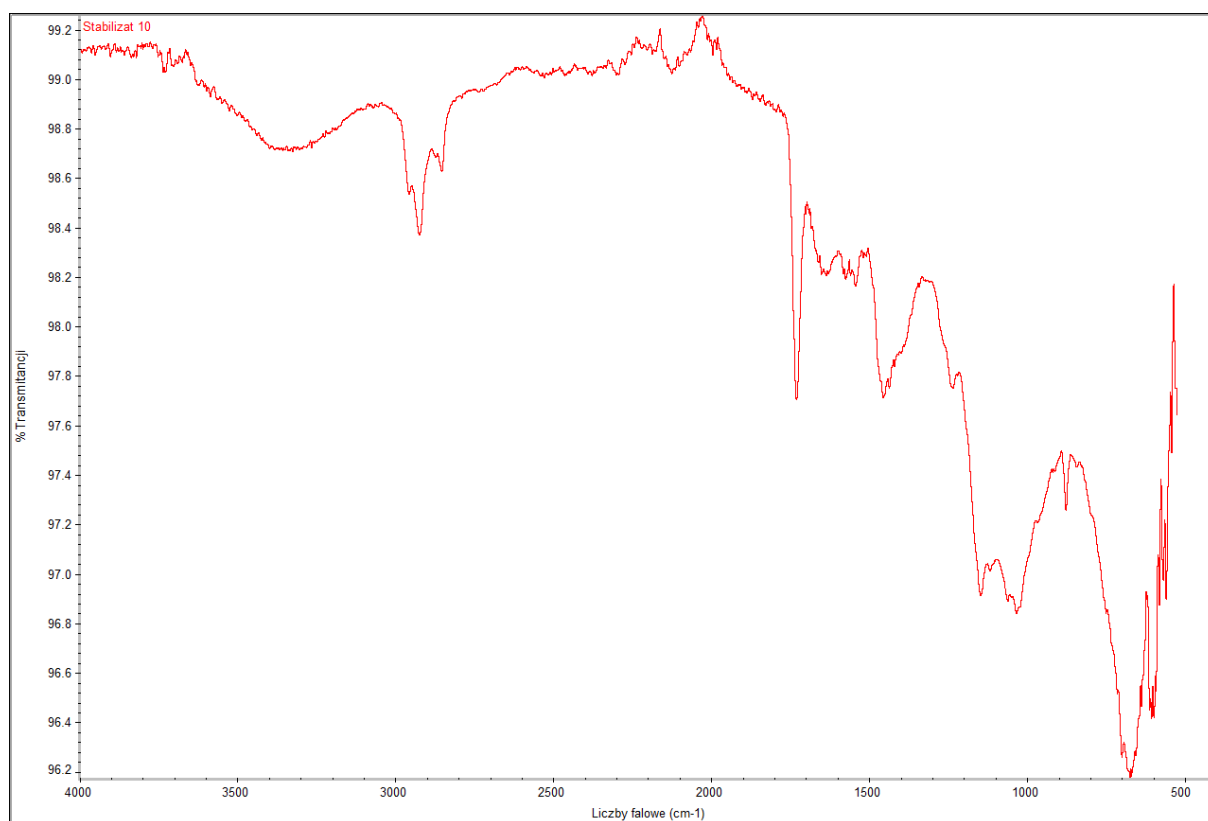
polipropylen (PP) - 2950, 2870, 1455, 1375 (cm^{-1}),

PET - 1720 (cm^{-1}) jako (C=O), jak i 1240 (cm^{-1}) jako (C–O–C) oraz 720 (cm^{-1}).

Wnioski:

Widmo FT-IR stabilizatu 5 wykazuje obecność: polimerów syntetycznych (PE, PET, PP) oraz składników organicznych, charakterystycznych dla pozostałości organicznych (wynikających z charakteru próbki - materia roślinna, kompost), a także zanieczyszczeń komunalnych (typowe dla frakcji stabilizowanej z MBP). Potwierdza to wielofazowy i heterogeniczny charakter stabilizatu, zawierającego zarówno pozostałości organiczne, jak i trudno rozkładalne tworzywa sztuczne.

Kolejny rysunek poniżej przedstawia widmo kolejnej próbki stabilizatu 10 – przebadane na FT-IR (rys. 5.46).



Rysunek 5.46 Widmo FT-IR analizowanego stabilizatu 10 (opracowanie własne)

W tabeli poniżej (tab. 5.31) przedstawiono otrzymane dane z programu OMNIC, które porównują otrzymane widmo stabilizatu 10 z daną biblioteką.

Tabela 5.31 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla stabilizatu 10 (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	57,85	Poly(methacrylate),W/OH Groups Polimetakrylan (PMMA)	<i>Hummel Polimer Sample Library</i>
2	54,52	Nonyl aldehyde. 98%	<i>Aldrich Condensed Phase sample Library</i>
3	53,48	Poly(ethylacrylate;st;acrylamide)	<i>Hummel Polimer Sample Library</i>
4	50,80	Poly(buatdiene;MMA)	<i>Hummel Polimer Sample Library</i>
5	50,22	Poly(vinyl chloride:MMA) Polichlorek winylu	<i>Hummel Polimer Sample Library</i>

Analizując dane zebrane w tabeli powyżej można potwierdzić jednoznacznie, że w badanej próbce stabilizatu 10 znajdują się cząstki tworzyw sztucznych. Współczynnik dopasowanie 57,85 wskazuje na obecność polimetakrylanu PMMA wg danych z biblioteki *Hummel Polimer Sample Library*

Analizowane widmo na rysunku 5.46 przedstawia spektrum FT-IR zależności procent transmitancji (% Transmitancji) w funkcji liczby falowej (cm^{-1}) dla badanej próbki stabilizatu nr 10. Analizując poszczególne pasma stabilizatu można wyszczególnić charakterystyczne pasma wskazujące na obecność tworzyw sztucznych, co potwierdza poniższa analiza.

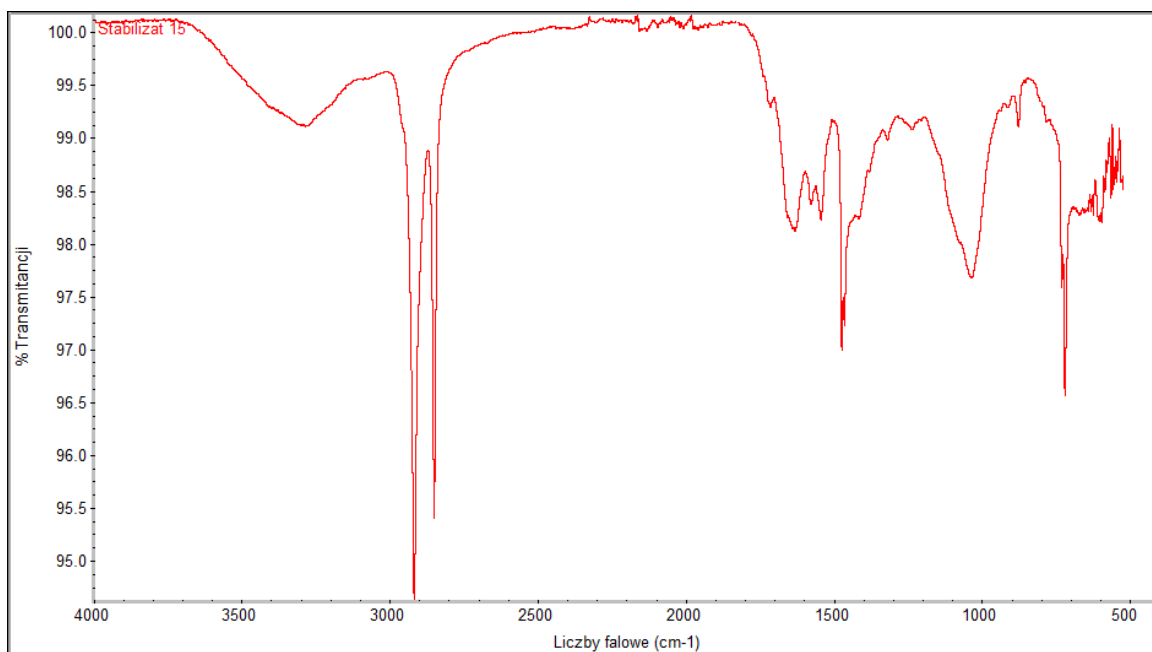
Zakres analizy: 4000–500 (cm^{-1}) to widmo wykazuje cechy, które są typowe zarówno dla materii organicznej jak i syntetycznych polimerów, co jest charakterystyczne dla kompostów tzw. stabilizatów pochodzących z frakcji oczyszczania mechaniczno – biologicznego powstałego z odpadów komunalnych. Pasma w zakresie 3000–2800 (cm^{-1}), a dokładnie widoczne 2 pasma ok. 2915 (cm^{-1}) i 2848 (cm^{-1}), które odpowiadają drganiom rozciągającym C–H w grupach CH_2/CH_3 . Są typowe dla polietylenu (PE) i polipropylenu (PP) świadczące o obecność polimerów alifatycznych. Pasma w zakresie ~1730–1715 (cm^{-1}) to wyraźne, umiarkowane pasmo w tej strefie, charakterystyczne dla grup estrowych C=O, które może pochodzić od politereftalanu etylenu (PET), biodegradowalnych poliestrów (PLA) bądź dodatków funkcyjnych – wskazuje ono na obecność materiałów estrowych. Zakres 1500–1300 (cm^{-1}) to złożone pasma (zawierające liczne drobne piki), odpowiadające za drgania deformacyjne C–H, C–N, N–H, które są typowe dla komponentów organicznych (np. białka, lignina, humus), ale także obecne w poliamidach, kopolimerach oraz poliuretanach. Zakres 1300–1000 (cm^{-1}), to wyraźne, intensywne pasma, które są typowe dla wiązań C–O–C i C–O

występujących w polisacharydach i estrach, ale obecne w PET, PLA, PMMA oraz substancjach organicznych. Możliwe jest, że w tym miejscu nakładają się pasma z kompostu i tworzyw sztucznych. Pasma ok. 720 cm^{-1} to widoczne pasmo w tym obszarze, które jest typowe dla drgań CH_2 (wagging) – charakterystyczna dla polietylenu.

Wnioski:

Podsumowując powyższe w analizowanym widmie możemy wyszczególnić następujące pasma. Pasma C-H w zakresach $2915, 2848\text{ cm}^{-1}$, charakterystyczne dla PE, PP (poliolefiny). Pasma C=O w zakresie $\sim 1730\text{ cm}^{-1}$ charakterystyczne dla PET bądź poliestrów. Pasma $\sim 720\text{ cm}^{-1}$ charakterystyczne dla - PE – drgania CH_2 . Złożone pasma $\sim 1300\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ świadczące o mieszanke kompostu i tworzyw sztucznych. Analizowany stabilizat zawiera materię organiczną (pochodzenia roślinnego, kompostowego) ale także polimery: polietylen (PE) – wyraźne sygnały śladowe ilości PET lub PLA – na podstawie pasma estrowego C=O , ale także pasma charakterystyczne dla PMMA. Pasma $\sim 1730\text{ cm}^{-1}$, widoczne, które pasuje do C=O estrów będące jako zgodne z PMMA. Pasma $1260\text{--}1140\text{ cm}^{-1}$ to obecne, silne pasma C-O-C , które jest zgodne z PMMA (a także i PET). Pasma $\sim 2995\text{--}2848\text{ cm}^{-1}$, wiązania (C-H) obecne, które pasują do alifatycznych fragmentów PMMA, co potwierdza dane z tabeli powyżej (tab. 5.31) z największym współczynnikiem dopasowania badanego widma do PMMA. Reasumując powyższe w widmie są widoczne pasma C=O ($\sim 1730\text{ cm}^{-1}$), C-O-C ($1140\text{--}1260\text{ cm}^{-1}$), C-H alifatyczne występujące w PMMA, ale także w PET i PLA.

Kolejną badaną próbką stabilizatu jest stabilizat pod numerem 15 (rys. 5.47)



Rysunek 5.47 Widmo FT-IR analizowanego stabilizatu 15 (opracowanie własne)

W tabeli poniżej (tab. 5.32) przedstawiono otrzymane dane z programu OMNIC, które porównują otrzymane widmo stabilizatu 15 z daną biblioteką.

Tabela 5.32 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla stabilizatu 15 (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	86,27	Polyetylene polietylen	<i>HR Nicolet Sampler Library</i>
2	85,25	Poly(etylene) low density Polietylen niskiej gęstości	<i>Aldrich Condensed Phase Sample Library</i>
3	83,36	Triacotane, 99%	<i>Aldrich Condensed Phase sample Library</i>
4	82,14	Oxisized polyethylene Polietylen utleniony	<i>HR Nicolet Sampler Library</i>
5	81,22	Natural vegetable wax from Maxican shrub Naturalny воск roślinny z krzewu meksykańskiego	<i>HR Nicolet Sampler Library</i>

Analizując dane zebrane w tabeli powyżej (tab. 5.32) można potwierdzić jednoznacznie, że w badanej próbce stabilizatu 15 znajdują się cząstki tworzyw sztucznych. Współczynnik

dopasowanie 86,27 wskazuje na obecność polietylenu wg danych z biblioteki *HR Nicolet Sampler Library* oraz 85,25 z innej biblioteki tj. *Aldrich Condensed Phase Sample Library*.

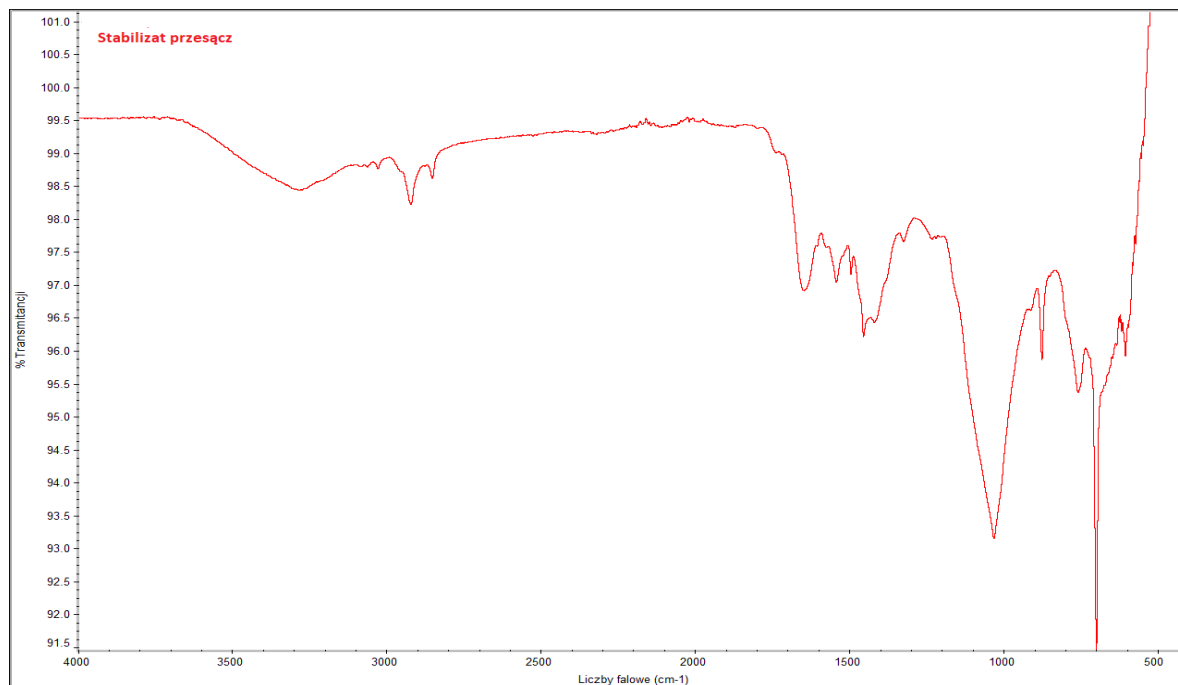
Przedstawione widmo na rysunku 5.47 obrazuje spektrum FT-IR zależności procent transmitancji (% Transmitancji) w funkcji liczby falowej (cm^{-1}) dla badanej próbki stabilizatu nr 15. Analizując poszczególne pasma stabilizatu można wyszczególnić charakterystyczne pasma wskazujące na obecność tworzyw sztucznych, co potwierdza poniższa analiza.

Zakres 3000–2800 (cm^{-1}), to 2 bardzo wyraźne, głębokie pasma ok. 2915 i 2848 (cm^{-1}), charakterystyczne dla drgań rozciągających C–H z grup CH_2 (symetryczne i asymetryczne), charakterystyczne dla nasyconych węglowodorów, które są typowe dla polietylenu (PE) – wskazujące za silną obecność polietylenu (PE). Kolejny analizowany zakres ~ 1470 i ~ 720 (cm^{-1}), to wyraźne pasmo ok. 1470 (cm^{-1}) tzw. (deformacja C–H). Jako silne pasmo ~ 720 (cm^{-1}) możemy uznać tzw. „wagging” grup CH_2 w długich łańcuchach. Oba pasma są bardzo charakterystyczne dla PE o dużej masie cząsteczkowej. Zakres ~ 1730 – 1700 (cm^{-1}), to brak wyraźnego pasma C=O (charakterystycznego dla estrów i PET), co sugeruje o braku PET lub PMMA w znaczącej ilości w próbce. Zakres 1300–1000 cm^{-1} to złożone, umiarkowane pasma C–O, C–C, świadczące o możliwości nakładanie się sygnałów zarówno z substancji organicznych (kompostu, ligniny) oraz polimerów, jako pasmo niezbyt intensywne – wskazują raczej na obecność bardziej naturalnych składników niż tworzyw takich jak np. PET.

Wnioski:

Widmo stabilizat 15 wykazuje bardzo wyraźne sygnały charakterystyczne dla polietylenu (PE), co możemy także potwierdzić z dopasowaniem otrzymanego widma do danych z bibliotek zgodnie z tabelą 5.32. Świadczą o tym także następujące pasma. Pasmo ~ 2915 , ~ 2848 (cm^{-1}), C–H (CH_2) – polietylen (PE) – rozciąganie. Pasmo ~ 1470 (cm^{-1}) tj. C–H (deformacja) – polietylen (PE). Pasmo ~ 720 (cm^{-1}) tj. CH_2 - wagging – które jest bardzo charakterystyczne dla polietylenu (PE). Brak pasma ~ 1730 (cm^{-1}), a tym samym brak C=O, więc można stwierdzić brak politeraftalanu etylenu (PET) bądź polimetakrylanu metylu (PMMA). Analizowana próbka - stabilizat 15 - zawiera znaczące ilości polietylenu (PE), prawdopodobnie pochodzącego z opakowań foliowych, reklamówek jak i fragmentów folii stretch itp. Z kolei brak sygnałów estrowych mogących sugerować brak domieszek PET lub PMMA w badanej próbce.

Kolejnym przykładem analizy stabilizatu jest otrzymane widmo z badania powstałego przesączu. Rysunek poniżej (rys 5.48) przedstawia widmo przesączu powstałego ze stabilizatu otrzymanego w procesie filtracji i sączenia w celu przygotowania próbek do DLS (rys. 5.19).



Rysunek 5.48 Widmo FT-IR analizowanego przesączu powstałego ze stabilizatu (opracowanie własne)

W tabeli poniżej (tab. 5.33) przedstawiono otrzymane dane z programu OMNIC, które porównują otrzymane widmo stabilizatu - przesącz z daną biblioteką.

Tabela 5.33 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla otrzymanego przesączu ze stabilizatu (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	60,44	Polistyrene film Polistyren(PS)	<i>Hummel Polimer Sample Library</i>
2	58,07	Polistyrene;vinylidene chloride Polistyren; polichlorek winylu (PS;PVC)	<i>Hummel Polimer Sample Library</i>
3	56,29	Polistyrene Polistyren (PS)	<i>Hummel Polimer Sample Library</i>
4	55,20	Styrene butadiene block polimer Polimer blokowy styren-butadien (SBS)	<i>HR Nicolet Sampler Library</i>
5	52,90	3-phenyl-1-propanol 3-fenyl-1-propanol	<i>HR Nicolet Sampler Library</i>

Analizując dane zebrane w tabeli powyżej można potwierdzić jednoznacznie, że w badanej próbce przesączu ze stabilizatu znajdują się cząstki tworzyw sztucznych. Współczynnik

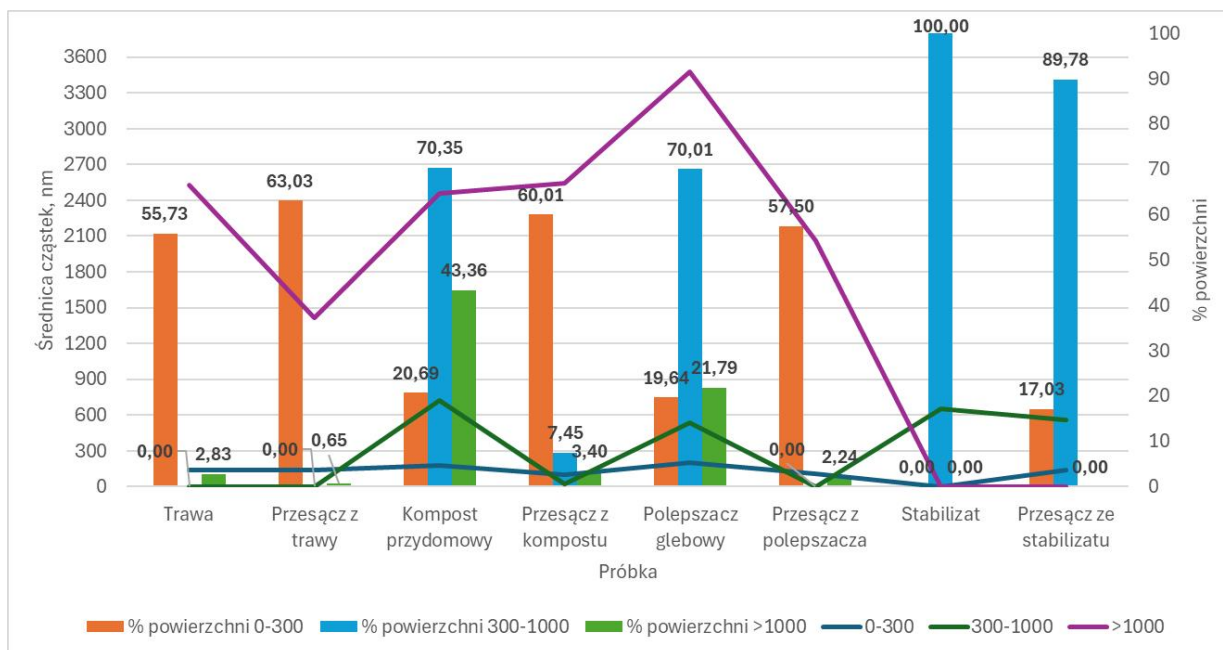
dopasowanie 60,44 oraz 58,07 wskazuje na obecność polistyrenu (PS) wg danych z biblioteki *Hummel Polymer Sample Library*. Współczynnik dopasowania 58,07 - wskazuje na obecność polichlorku winylu – dane z tej samej biblioteki jak poprzednio. Współczynnik dopasowania 55,20 to wskazanie na obecność polimer blokowego styren-butadien wg biblioteki *HR Nicolet Sampler Library*.

Analizując otrzymane widmo w zakresie 3700–3000 (cm^{-1}) to pasmo szerokie O–H oraz N–H możemy zauważyć szerokie pasmo w okolicach 3400 (cm^{-1}) tj. pasmo charakterystyczne dla drgań rozciągających grup O–H oraz N–H, które wskazuje na obecność wody, kwasów karboksylowych, alkoholi, a także i amin (materia organiczna, produkty biodegradacji). Zakres 3000–2800 (cm^{-1}) to pasma C–H alifatyczne wyraźne, ostre pasma przy: ~ 2915 (cm^{-1}) jako asymetryczne rozciąganie C–H (CH_2) oraz ~ 2848 (cm^{-1}) – jako symetryczne rozciąganie C–H (CH_2) to typowe pasma dla alifatycznych węglowodorów, które świadczą o możliwej obecności rozpuszczonych lipidów, kwasów tłuszczowych oraz obecności polietylenu (PE). Zakres 1750–1650 (cm^{-1}) to pasmo karbonylowe C=O. W próbce widoczne niewielkie pasmo ~ 1715 – 1720 (cm^{-1}) jako drgania C=O, które może pochodzić od kwasów karboksylowych oraz estrów (np. z rozkładu PET, tłuszczów)- co potwierdza obecność związków karbonylowych. Kolejny zakres 1650–1500 (cm^{-1}) to pasma aromatyczne, amidowe. Delikatne pasma przy: ~ 1600 (cm^{-1}) oraz ~ 1510 (cm^{-1}) - jako możliwe do zinterpretowania źródła: drgania C=C (aromatyczne) - pochodzące od humusu, ligniny oraz amidy (np. białka jako typowe dla substancji organicznych).

Zakres 1450–1375 (cm^{-1}) to deformacje C–H i COO^- , jako pasma: ~ 1450 (cm^{-1}) – CH_2/CH_3 deformacja, ~ 1380 (cm^{-1}) - obecność COO^- (aniony kwasów tłuszczowych), wskazują na produkty fermentacji / degradacji materii organicznej. Kolejny zakres 1300–1000 (cm^{-1}) – pasma C–O / C–C / C–N to szeroki złożony układ pasm: ~ 1150 – 1050 (cm^{-1}) jako – rozciąganie C–O i C–C. W próbce obecne także pasmo ~ 1030 (cm^{-1}), które jest typowe dla alkoholi, cukrów, celulozy. Intensywność wskazuje na obecność dużej ilości substancji organicznych – np. humus, kwasy, alkohole. Zakres 1000–650 cm^{-1} – charakterystyczny region dla konkretnych związków. W próbce obecne pasma dla pików charakterystycznych dla polimerów aromatycznych (~ 750 – 700 cm^{-1}). Obecne pasmo ~ 880 – 900 cm^{-1} – może wskazywać na związki z pojedynczymi wiązaniami C–H (np. niektóre węglowodory).

5.5.5 Zestawienie zbiorcze wyników DLS

Na poniższym rysunku (rys. 5.49) przedstawiono w sposób graficzny otrzymane wyniki z podrozdziałów 5.5.1 - 5.5.4 dla pomiarów wielkości cząstek.



Rysunek 5.49 Zestawienie wyników analizy DLS dla trzech zakresów rozmiarów cząstek (opracowanie własne)

Poniższa tabela (tab. 5.34) przedstawia charakterystykę granulometryczną w zakresie nano- i mikrometryczną dla wszystkich badanych próbek.

Tabela 5.34 Charakterystyka granulometryczna w zakresie nano i mikrometrycznym dla badanych próbek (opracowanie własne)

Zakres [nm]	0-300		300-1000		>1000	
Cząstki Próbka	Średnia średnica cząstek	% powierzchni	Średnia średnica cząstek	% powierzchni	Średnia średnica cząstek	% powierzchni
Trawa	140,47	55,73	0,00	0,00	2529,89	2,83
Przesącz z trawy	140,89	63,03	0,00	0,00	1417,70	0,65
Kompost przydomowy	178,73	20,69	720,27	70,35	2461,00	43,36
Przesącz z kompostu	101,73	60,01	22,43	7,45	2543,30	3,40
Polepszacz glebowy	198,74	19,64	536,84	70,01	3475,1	21,79
Przesącz z polepszacza	107,95	57,50	0,00	0,00	2061,80	2,24
Stabilizat	0,00	0,00	649,44	100,00	0,00	0,00
Przesącz ze stabilizatu	141,62	17,03	556,49	89,78	0,00	0,00

Szczegółowe omówienie powyższej tabeli (tab. 5.34) oraz powyższego rysunku (rys. 5.49) znajduje się w rozdziale 6.

5.5.6 Zestawienie zbiorcze wyników FT-IR

Poniżej w tabeli 5.35 przedstawiono otrzymane polimery w badanych próbkach, które zaprezentowano w pracy.

Tabela 5.35 . Zestawienie wyników analizy FT-IR polimerów w próbkach badanych (opracowanie własne)

LP.	Material badany	Potencjalny polimer wg biblioteki FT-IR
1	Trawa i przesącz z wyciągu wodnego	PE, poliester, celofan
2	Kompost przydomowy	PE, celofan
3	Polepszacz glebowy i przesącz z wyciągu wodnego	PET, PE, PP
4	Stabilizat i przesącz z wyciągu wodnego	PE, PMMA, PVC

Szczegółowe omówienie powyższej tabeli (tab. 5.35) znajduje się w rozdziale 6.

5.6 Nasadzenia roślin na wybranych typach kompostów z mikroplastikami

W celu zbadania wpływu dodatku do podłoża w postaci mikroplastiku na wzrost i kondycje roślin użyto wymienione poniżej podłoża, polimery oraz nasiona roślin.

Do badania wykorzystano jako podłoże:

- ✓ ziemia uniwersalna
- ✓ ziemia uniwersalna plus zmielone polimery (politereftalen etylenu (PET), polipropylen (PP), polistyren (PS))
- ✓ kompost przydomowy
- ✓ kompost przydomowy plus zmielone polimery (tj. PET, PP, PS)
- ✓ polepszacz glebowy z zakładu mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych
- ✓ polepszacz glebowy plus zmielone polimery (tj. PET, PP, PS)
- ✓ stabilizat z zakładu mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych
- ✓ stabilizat plus zmielone polimery (tj. PET, PP, PS)

Ziemia uniwersalna wykorzystana do nasadzeń to gotowa ziemia firmy Planta zakupiona w sklepie ogrodniczym. Kompost przydomowy to ten sam kompost użyty do wcześniejszych

analiz. Polepszacz glebowy oraz stabilizat pobrano z zakładu mechaniczno- biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych, to te same próbki, które zostały wcześniej poddane analizom, w tym przebadane na DLS i na FT-IR .

Roślinami użytymi do eksperymentu były:

- ✓ owies
- ✓ pszenica
- ✓ nasiona papryki
- ✓ nasiona pomidora

Rośliny posadzono w wydmuszkach, poprzednio wykorzystanych do przechowywania jajek. Nasadzenia zobrazowane są na rysunku poniżej (rys. 5.50). W celu zadbania o recykling oraz postępowanie zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, a także w myśl gospodarki o obiegu zamkniętym - wykorzystano właśnie zużyte wydmuszki. Łącznie 64 sztuki.

Posadzono po dwadzieścia nasion/ziarenek każdej z roślin, po 2 w każdym miejscu po jajku w wydmuszce. Wydmuszki użyte do badania składały się z 10 punktów do nasadzenia roślin. I tak każdy rodzaj nasadzenia powtórzono dwukrotnie. Łącznie 40 nasion każdej z roślin na danym typie podłoża. Każda roślina była posadzona kolejno osobno na wyżej wymienionym typie podłoża. Polimery użyte do eksperymentu zostały zmieszane ze sobą po równo, po 33,3 g PET; 33,3 g PP; 33,3 g PS. Tak przygotowaną mieszankę mieszało kolejno z każdym typem podłoża w stosunku 1 część polimerów, 15 części podłoża (1:15), osobno dla każdej z roślin.

Aby zbadać wpływ obecności mikroplastików w podłożu na wzrost i kwitnienie u roślin, każdą z czterech roślin posadzono na czystym podłożu i potem kolejno na tym samym podłożu, ale już pomieszanym z grupą wspomnianych tworzyw sztucznych.

Rośliny posadzono w dniu 17 października 2023 r. i monitorowano wraz z podlewaniem przez kolejne 28 dni tj. do 14 listopada 2023 r.. Następnie rośliny (część nadziemną) oraz korzenie (część podziemną) dokładnie zmierzono za pomocą linijki. Wyniki podano w dokładności do 1 mm i przedstawiono w tabelach poniżej (tab. 5.36- 5.39).

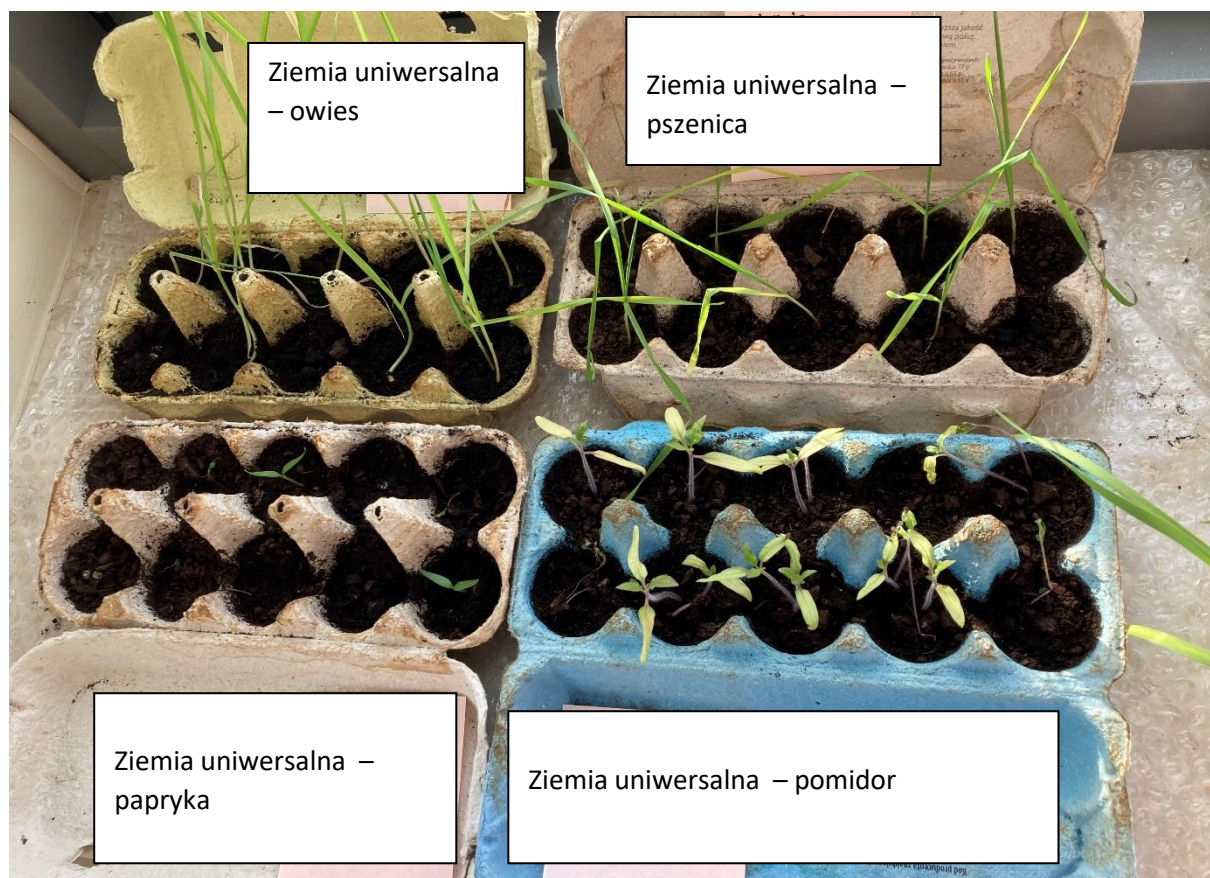
Warunki prowadzonych badań:

- ✓ wilgotność powietrza 30-40%,
- ✓ temperatura 22 (+/- 1) °C,
- ✓ czas ekspozycji na słońce około 12 godz. na dobę,
- ✓ czas prowadzenia badań: 28 dni.



Rysunek 5.50 Nasadzonych roślin na różnych podłożach - świeżo posiane (fot. autor)

5.6.1 Podłoże: ziemia uniwersalna (Planta), nasadzenie: owies, pszenica, papryka, pomidor
Ziemię uniwersalaną firmy Planta wsypano do 10 części w czterech wydmyśkach. W każdej z 10 miejsc zasadzono kolejno: do pierwszej wydmyśki wsadzono łącznie dwadzieścia ziarenek owsa, po dwa w każdy punkt. Do drugiej wydmyśki wsadzono ziarna pszenicy, następnie do trzeciej wydmyśki zasadzono nasiona papryki, a do czwartej nasiona pomidora (rys. 5.51). Postępowano dla każdej próby w sposób analogiczny. Wszystko zasadzono dwukrotnie (łącznie zasadzono po 40 nasion każdej rośliny).

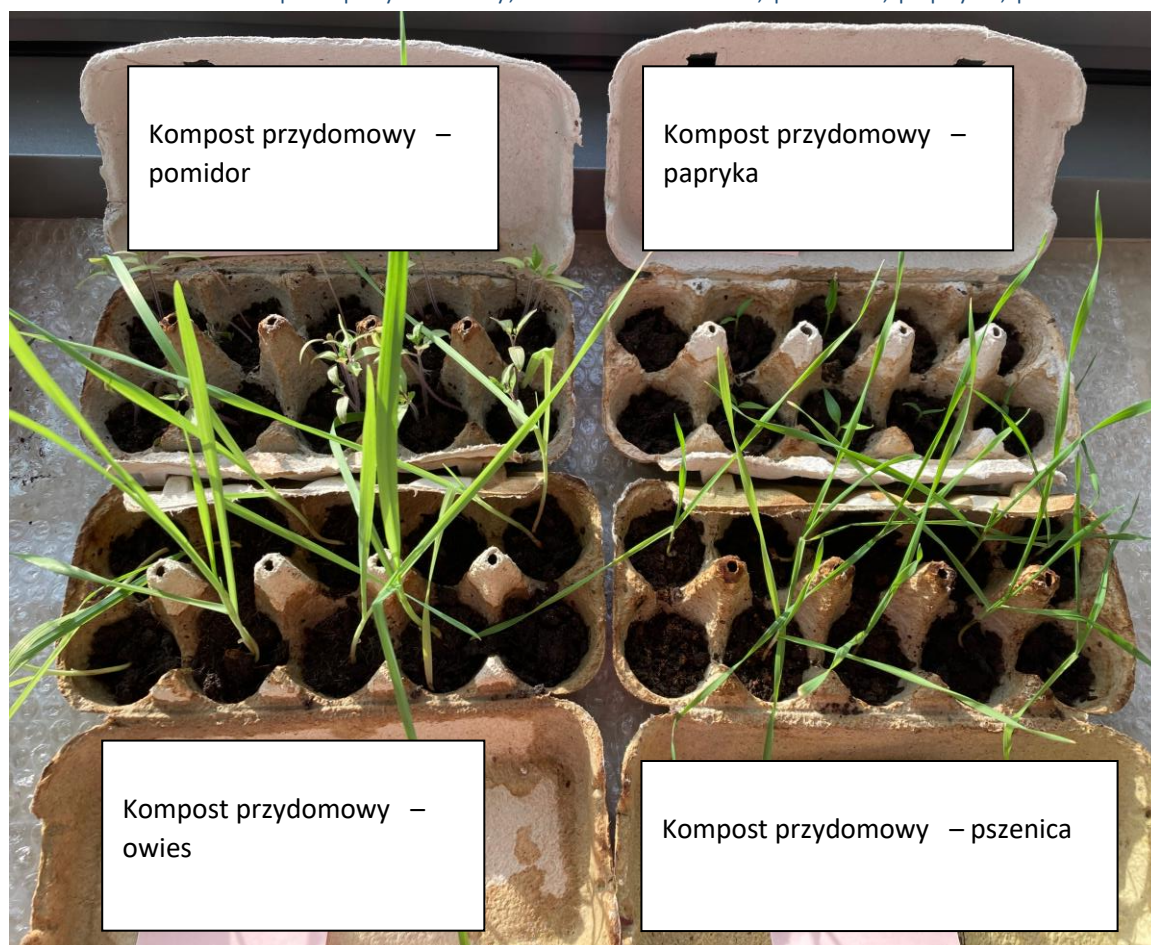


Rysunek 5.51 Podłoże: ziemia uniwersalna (Planta); rośliny: owies, pszenica, papryka i pomidor) – stan nasadzenia po 28 dniach (fot. autor)

5.6.2 Podłoże: ziemia uniwersalna (Planta) plus polimery, nasadzenie: owies, pszenica, papryka, pomidor

Kolejnym nasadzeniem było podłoże przygotowane z ziemią uniwersalną Planta, zmieszane z mieszanką przygotowanych wcześniej polimerów w sposób opisany powyżej (podrozdział 5.6). Tak samo w czterech wyduszkach z podłożem wsadzono kolejno po dwadzieścia ziarenek owsa, pszenicy i nasion papryki oraz pomidora. Wszystko powtórzono dwukrotnie.

5.6.3 Podłoże: kompost przydomowy, nasadzenie: owies, pszenica, papryka, pomidor

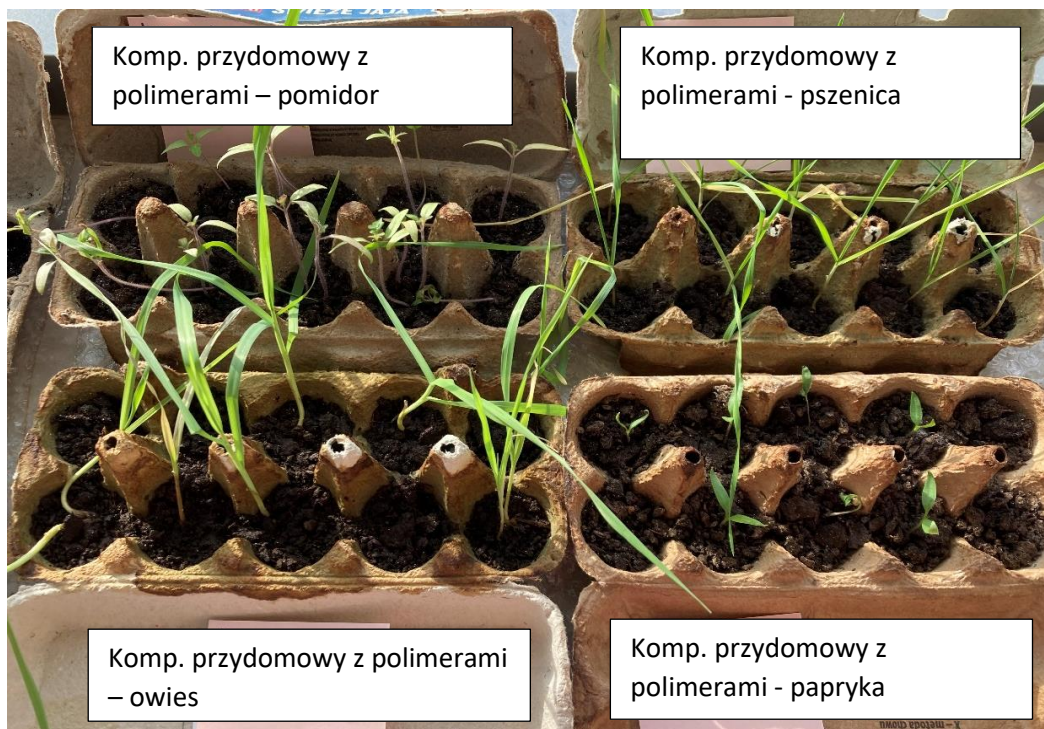


Rysunek 5.52 Podłoże: kompost przydomowy; rośliny: (owies, pszenica, papryka i pomidor) - stan nasadzenia po 28 dniach (fot. autor)

Następnym nasadzeniem było podłoże przygotowane z kompostu przydomowego. Tak samo w 4 wyduszkach z podłożem wsadzono kolejno po dwadzieścia ziarenek owsa, pszenicy i nasion papryki oraz pomidora (rys. 5.52). Nasadzeń dokonano dwukrotnie.

5.6.4 Kompost przydomowy plus polimery, nasadzenie: owies, pszenica, papryka, pomidor

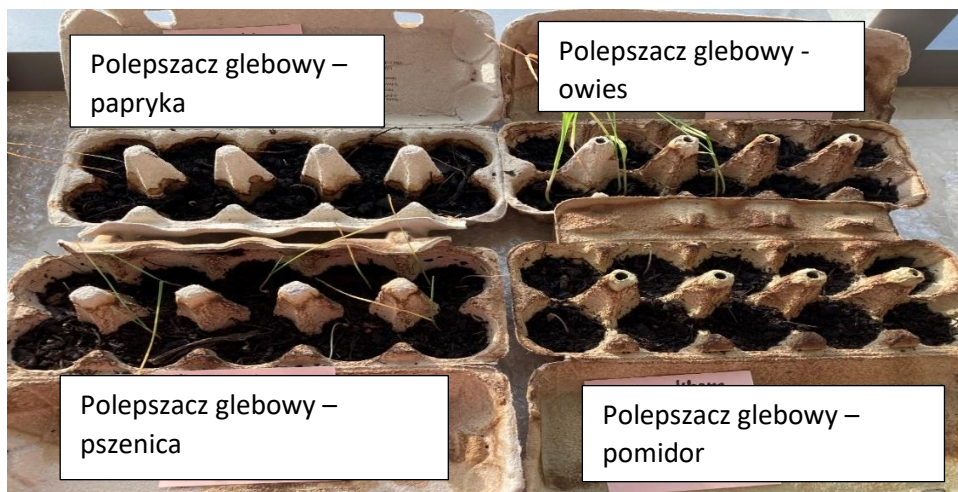
Kolejną próbą przygotowanych nasadzeń był kompost przydomowy, ale wymieszany z mieszkanką przygotowanych uprzednio polimerów. Tak samo w czterech wyduszkach z podłożem wsadzono kolejno po dwadzieścia ziarenek owsa, pszenicy i nasion papryki oraz pomidora (rys. 5.53). Nasadzeń dokonano dwukrotnie, łącznie zasadzono po 40 ziaren każdej rośliny.



Rysunek 5.53 Podłoże: kompost przydomowy plus polimery, rośliny: owies, pszenica, papryka i pomidor - stan nasadzenia po 28 dniach (fot. autor)

5.6.5 Polepszacz glebowy, nasadzenie: owies, pszenica, papryka, pomidor

Kolejnym rodzajem podłoża użytym do nasadzeń był polepszacz glebowy, pochodzący z odpadów zielonych z zakładu mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych. Postępując w sposób analogiczny do poprzednich prób, w 4 wydmyśkach z podłożem wsadzono kolejno po dwadzieścia ziarenek owsa, pszenicy i nasion papryki oraz pomidora. Czynność powtórzono dwukrotnie – łącznie zasadzono 40 ziaren. Uzyskano plony widoczne na zdjęciu poniżej - (rys. 5.54).



Rysunek 5.54 Podłoże: polepszacz glebowy (owies, pszenica, papryka i pomidor) - stan nasadzenia po 28 dniach (fot. autor)

5.6.6 Polepszacz glebowy plus polimery, nasadzenie: owies, pszenica, papryka, pomidor

Kolejny rodzaj podłoża - polepszacza glebowy pochodzący z zakładu mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych zmieszany z polimerami analogicznie jak inne wcześniej wymienione podłoża. Postępując w ten sam sposób do poprzednich prób, w 4 wydmuszkach z podłożem wsadzono kolejno po dwadzieścia ziarenek owsa, pszenicy i nasion papryki oraz pomidora. Wszystko zasadzono podwójnie, łącznie zasadzono 40 nasion każdej rośliny. Uzyskano plony widoczne na zdjęciu poniżej (rys. 5.55).



Rysunek 5.55 Podłoże: polepszacz plus polimery – nasadzony owies, pszenica, papryka i pomidor - stan nasadzenia po 28 dniach (fot. autor)

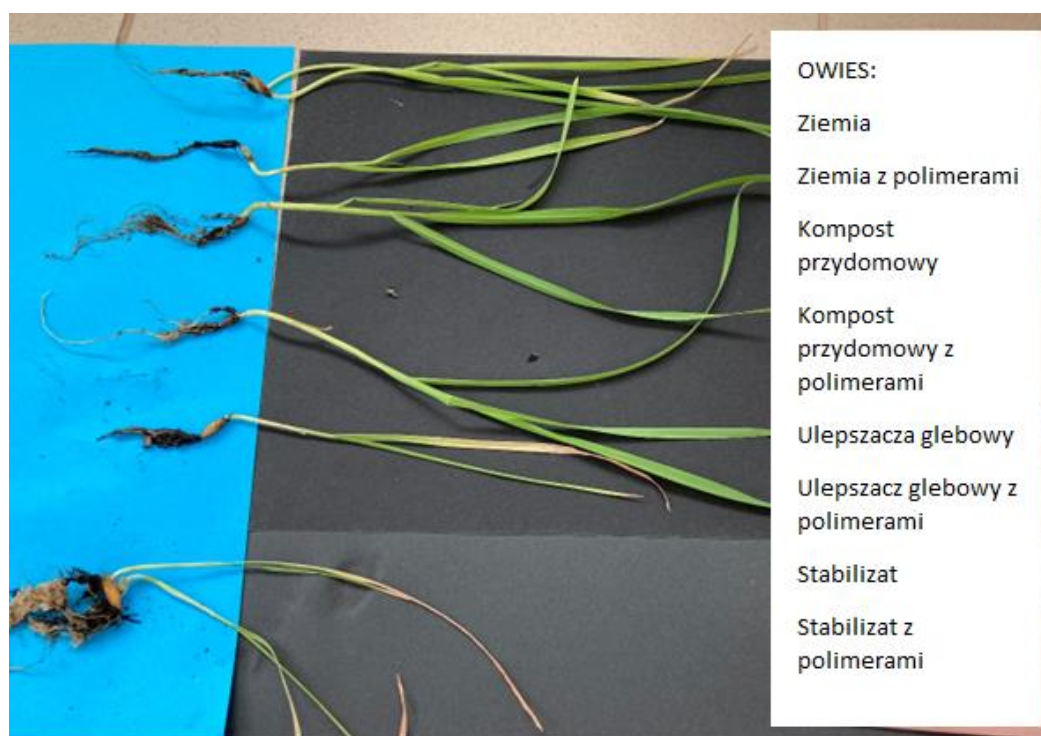
5.6.7 Stabilizat i stabilizat zmieszany z polimerami

Ostatnim użytym podłożem był stabilizat oraz stabilizat zmieszany z polimerami. Nasadzeń dokonano dokładnie w ten sam sposób jak w poprzednich próbach.

5.7 Zestawienie wyników wzrostu poszczególnych roślin w zależności od rodzaju użytego podłoża

Następnym krokiem po dokonaniu nasadzeń i upływie 28 dni było zmierzenie długości rośliny i korzeni. Rośliny ostrożnie wyjęto z podłoża i zmierzono długość części nadziemną, części podziemnej oraz przeliczono ile nasion z posadzonych 40 wykiełkowało. Wyniki przedstawiono w tabelach (tab. 5.36-5.39) oraz na rysunkach (rys. 5.56-5.59).

Pierwszą zanalizowaną rośliną pod względem wzrostu na poszczególnych typach podłoża był owies. Jak podaje Kawka i Achremowicz zainteresowanie owsem wzrosło znacząco w ostatnich latach, co ma przekład na dostrzeżenie jego walorów smakowych, dietetycznych, co także wiąże się ze wzrostem jego przetwórstwa i wykorzystania leczniczego. Uznawany jest za zboże prozdrowotne. W skali produkcji światowej to zboża stanowią blisko 50% produkcji roślinnej (Kawka A., Achremowicz B, 2014).



Rysunek 5.56 Przykładowe okazy owsa wyrosnięte na poszczególnych typach podłoża (fot. autor)

Na rysunku 5.56 przedstawiono przykładowe okazy owsa, które udało się wyhodować w czasie przeprowadzania eksperymentu. Dokładne wyniki wzrostu takie jak: ilość nasion, które

wykiełkowały oraz średnią długość rośliny i korzenia przedstawiono w tabeli poniżej (tab. 5.36).

Tabela 5.36 Owies – zestawienie wzrostu w zależności od użytego podłoża (opracowanie własne)

Rodzaj zastosowanego podłoża	Ilość nasion które wykiełkowała [szt.]	Ilość nasion owsa, które wykiełkowały [%]	Średnia długość rośliny [cm]	Średnia długość korzenia [cm]
Ziemia uniwersalna	26	65	29,0	9,3
Ziemia uniwersalna z domieszką polimerów	24	60	24,0	8,1
Kompost przydomowy	22	55	30,3	9,7
Kompost przydomowy z domieszką polimerów	22	55	28,8	10,4
Polepszacz glebowy	10	25	18,4	8,3
Polepszacz glebowy z domieszką polimerów	10	25	15,9	3,9
Stabilizat	4	10	8,2	1,2
Stabilizat z domieszką polimerów	0	0	0	0

Najwięcej nasion 65% (26 z 40) wykiełkowało na ziemi uniwersalnej - Planta - jako gotowym podłożu zakupionym w sklepie. Średnia długość rośliny wynosiła tu 29 cm, a średnia długość korzenia – 9,3 cm. Owies na ziemi z polimerami wykiełkował w 60% tj. 24 z 40 nasion. Tu średnia długość rośliny wynosiła 24 cm, a korzenia 8,1 cm. Owies zasadzony na kompostowniku przydomowym wykiełkował w 55% (22 ziarna z 40), przy czym osiągnął tu najwyższy wzrost długości rośliny tj. 30,3 cm, a korzenia 9,7 cm. Owies na kompoście z polimerami wykiełkował w takim samym stopniu (55%), przy czym średnio o 1,5 cm roślina była niższa niż na samym kompoście, ponieważ mierzyła 28,8 cm, zaś korzenie były dłuższe o 0,7 cm. Na polepszaczu glebowym wykiełkowało 25% ziaren (10 z 40), tak samo jak w przypadku tego podłoża z domieszką polimerów. Roślina wyrosła dłuższa o 2,5 cm na podłożu bez polimerów - tu liczyła średnio 18,4 cm długości, a z polimerami 15,9 cm. Podobnie było z korzeniami, na polepszaczu połączonym z polimerami były krótsze średnio o 4,4 cm polepszacz – 8,3 cm, a polepszacz z polimerami 3,9 cm. Owies na stabilizacie wykiełkował

w znikomej ilości tylko 10% (4 nasiona z 40). Rośliny były najmniejsze, bo tylko długości 8,2 cm, a korzenie 1,2 cm. Na stabilizacie z polimerami nie zanotowano żadnego zwrostu roślin.

Podsumowując, najdłuższe rośliny wyrosły na kompoście przydomowym (widac, że dodatek polimerów do tego podłoża ograniczył nieco wzrost rośliny, średnio mniej o 1,5 cm).

Analizując kolejno wyniki wzrostu roślin można stwierdzić, że dodatek polimerów do podłoża ograniczył długość wzrostu roślin oraz ilość nasion, które wykiełkowały. Rośliny rosły najgorzej na stabilizacie, gdyż jak wynika z wcześniejszych analiz morfologii tego rodzaju kompostu jest w nim najwięcej tworzyw sztucznych (mikroplastików).

Poniżej tabela 5.37 przedstawia wyniki wzrostu takie jak: ilość nasion, które wykiełkowały oraz średnią długość rośliny i korzenia oraz ilość nasion które wykiełkowały na danym podłożu wraz z analizą procentową dla kolejnej rośliny tj. pszenicy.

Tabela 5.37 Pszenica – zestawienie wzrostu w zależności od użytego podłoża (opracowanie własne)

Rodzaj zastosowanego podłoża	Ilość nasion które wykiełkowała [szt.]	Ilość nasion pszenicy, które wykiełkowały [%]	Średnia długość rośliny [cm]	Średnia długość korzenia [cm]
Ziemia uniwersalna	20	50	24,1	8,3
Ziemia z domieszką polimerów	16	40	19,0	6,1
Kompost przydomowy	20	50	19,7	7,5
Kompost przydomowy z domieszką polimerów	18	45	19,2	7,5
Polepszacz glebowy	18	45	14,1	2,9
Polepszacz glebowy z domieszką polimerów	14	35	11,1	2,7
Stabilizat	5	12,5	4,8	0,8
Stabilizat z domieszką polimerów	0	0	0	0

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że najwięcej wykiełkowanych nasion i najdłuższe rośliny oraz korzenie pszenicy otrzymano w podłożu z ziemią, tj. odpowiednio 50% (20 z 40 nasion) oraz 24,1 cm średnia długość rośliny, a korzenia to 8,3 cm. Pszenica na ziemi z domieszką polimerów rosła już słabiej – wykiełkowało mniej nasion od podłoża z czystą ziemią oraz rośliny i korzenie były krótsze. Na kompoście przydomowym wykiełkowała taka sama ilość roślin jak w podłożu z ziemią, ale były nieco krótsze – mierzyły 19,7 cm, a korzenie dłuższe o 0,2 cm (19,2 cm). Na kompoście przydomowym z domieszką polimerów wykiełkowało mniej roślin pszenicy niż na samym kompoście, ale więcej o 2 nasiona niż na ziemi z polimerami. Długość korzenia była taka sama w przypadku średniej wartości dla pszenicy z kompostownika przydomowego, jak i z domieszką tego kompostu z polimerami. Na polepszaczu glebowym wykiełkowało więcej o 4 ziarna pszenicy niż na tym kompoście zmieszanym z polimerami. Rośliny i korzenie również były dłuższe posadzone na samym polepszaczu glebowym niż z domieszką polimerów (odpowiednio 14,1 cm; 2,9 cm dla podłoża „czystego” i 11,1 cm i 2,7 cm dla podłoża ze wspomnianymi domieszkami polimerów). Pszenica na stabilizacie wykiełkowała tylko w ilości 5 ziaren z 40. Rośliny te były najmniejsze i korzenie także (odpowiednio 4,8 cm i 0,8 cm). Tak samo jak w przypadku owsa, pszenicy na stabilizacie z domieszką polimerów nie wyhodowano.



Rysunek 5.57 Przykładowe rośliny pszenicy wykiełkowane na poszczególnych typach podłoża (fot. autor)

Przykładowe rośliny wyhodowanej pszenicy przedstawiono na rysunku 5.57.

Kolejną rośliną, gdzie analizowany był jej wzrost na badanych typach podłoża była papryka.

W tabeli poniżej (tab. 5.38) zaprezentowano wzrost papryki.

Tabela 5.38 Papryka – zestawienie wzrostu w zależności od użytego podłoża (opracowanie własne)

Rodzaj zastosowanego podłoża	Ilość nasion które wykiełkowała [szt.]	Ilość nasion papryki, które wykiełkowały [%]	Średnia długość rośliny [cm]	Średnia długość korzenia [cm]
Ziemia uniwersalna	12	30	4,3	2,9
Ziemia z domieszką polimerów	10	25	4,0	2,9
Kompost przydomowy	14	35	4,8	3,3
Kompost przydomowy z domieszką polimerów	14	35	4,8	3,1
Polepszacz glebowy	6	15	2,4	0,8
Polepszacz glebowy z domieszką polimerów	4	10	1,9	0,7
Stabiliziat	0	0	0	0
Stabilizat z domieszka polimerów	0	0	0	0

Analizując kolejno otrzymane wyniki papryka rosła najlepiej na kompoście przydomowym. Wykiełkowało tutaj 35% nasion (14 z 40), taka sama liczba papryki wykiełkowała także na polepszaczu glebowym, ale zmieszonym z polimerami. Tak samo długość rośliny w obu przypadkach była jednakowa. Różnica polegała na tym, że na czystym kompoście przydomowym korzenie papryki były średnio dłuższe o 0,2 mm. Kolejnym rzędem wielkości wzrostu papryki była ziemia uniwersalna – 30% wykiełkowanych nasion (12 z 40) średniej długości 4,3 cm oraz korzenia 2,9 cm. Papryka na ziemi zmieszanej z polimerami wykiełkowała słabiej tj. 25% (10 z 40) nasion. Roślina krótsza średnio o 0,3 mm w porównaniu do czystej ziemi (liczyła tu 4,0 cm długości), średnia długość korzenia była taka sama i wynosiła 2,9 cm.

Analizując wzrost papryki na polepszaczu glebowym, to roślina rosła lepiej na czystym podłożu (15% wzrostu - 6 nasion z 40 wykiełkowało), a na podłożu zmieszanym z polimerami (10% wzrostu - 4 nasiona z 40 wykiełkowało). Papryka była też dłuższa na polepszaczu bez polimerów średnio o 0,5 cm, zaś korzenie były tylko minimalnie dłuższe o 0,1 cm. Papryka na stabilizacie i stabilizacie zmieszanym z polimerami nie wyrosła w ogóle.

Podsumowując wzrost papryki na badanych podłożach, to roślina ta rosła najlepiej na kompostowniku przydomowym - najwięcej ziaren tu wykiełkowało oraz średnia długość rośliny była największa. Słabo rosła na polepszaczu glebowym, zaś na stabilizacie nie wykiełkowało ani jedno ziarno papryki. Rysunek poniżej (rys. 5.58) przedstawia wybrane okazy papryki, które udało się wyhodować w zależności od różnych typów podłoża.



Rysunek 5.58 Przykładowe rośliny papryki wyrosnięte na poszczególnych typach podłoża (fot. autor)

Kolejną, czwartą i ostatnią analizowaną rośliną był pomidor. Poniżej tabela (tab. 5.39) przedstawia zestawienie wzrostu pomidora wysianego na badanych typach podłoża.

Tabela 5.39 Pomidor – zestawienie wzrostu w zależności od użytego podłoża (opracowanie własne)

Rodzaj zastosowanego podłoża	Ilość nasion które wykiełkowała [szt.]	Ilość nasion pomidora, które wykiełkowały [%]	Średnia długość rośliny [cm]	Średnia długość korzenia [cm]
Ziemia uniwersalna	24	60	6,9	2,1
Ziemia z domieszką polimerów	14	35	6,4	1,6
Kompost przydomowy	30	75	8	2,4
Kompost przydomowy z domieszką polimerów	28	70	7,4	2,1
Polepszacz glebowy	8	20	4,1	0,6
Polepszacz glebowy z domieszką polimerów	4	10	2,6	0,4
Stabilizat	1	2,5	1,2	0,2
Stabilizat zmieszany z polimerami	0	0	0	0

Dokonując analizy wzrostu pomidora na badanych typach podłoża, widać że pomidor także najlepiej wyrósł na kompoście przydomowym – 75% nasion wykiełkowało tj. 30 z 40. Podobnie i z wielkością rośliny – średnio pomidory były najwyższe (długość 8 cm) na „czystym” kompoście przydomowym, tak samo jak średnia wartość długości korzenia była największa 2,4 cm. Nieco mniejszy wzrost zanotowano na kompoście przydomowym z polimerami. Wykiełkowało tu o 2 nasiona mniej niż w kompoście bez domieszek, tak samo roślina i korzenie były stosunkowo mniejsze, kolejno - 7,4 cm, i 2,1 cm. Drugim podłożem na którym dobrze rosła roślina, była ziemia uniwersalna. Tu 60% nasion wykiełkowało (24 z 40). Średnia długość rośliny wynosiła 6,9 cm, a korzenia 2,1 cm. Znacząco nastąpił spadek wzrostu pomidora na ziemi z polimerami, tylko 35% wzrostu (14 nasion z 40 wykiełkowało). Pomidory mierzyły średnio kolejno dla rośliny i korzenia 6,4 cm i 1,6 cm. Analizując wzrost pomidora na polepszaczu glebowym widać, że roślina zdecydowanie lepiej rosła na tym podłożu bez dodatku polimerów. 20% nasion wykiełkowało (tj. 8 z 40) na samym polepszaczu, zaś tylko 10% (tj. 4 z 40) na polepszaczu z domieszkami polimerów. Podobnie z wielkościami wzrostu

rośliny i korzena na polepszaczu bez domieszek, pomidory były wyższe - średnio 4,1 cm, a korzenie dłuższe 0,6 cm niż wyrosnięte na polepszaczu z polimerami - tu kolejno 2,6 cm (roślina) i 0,4 cm (korzeń).

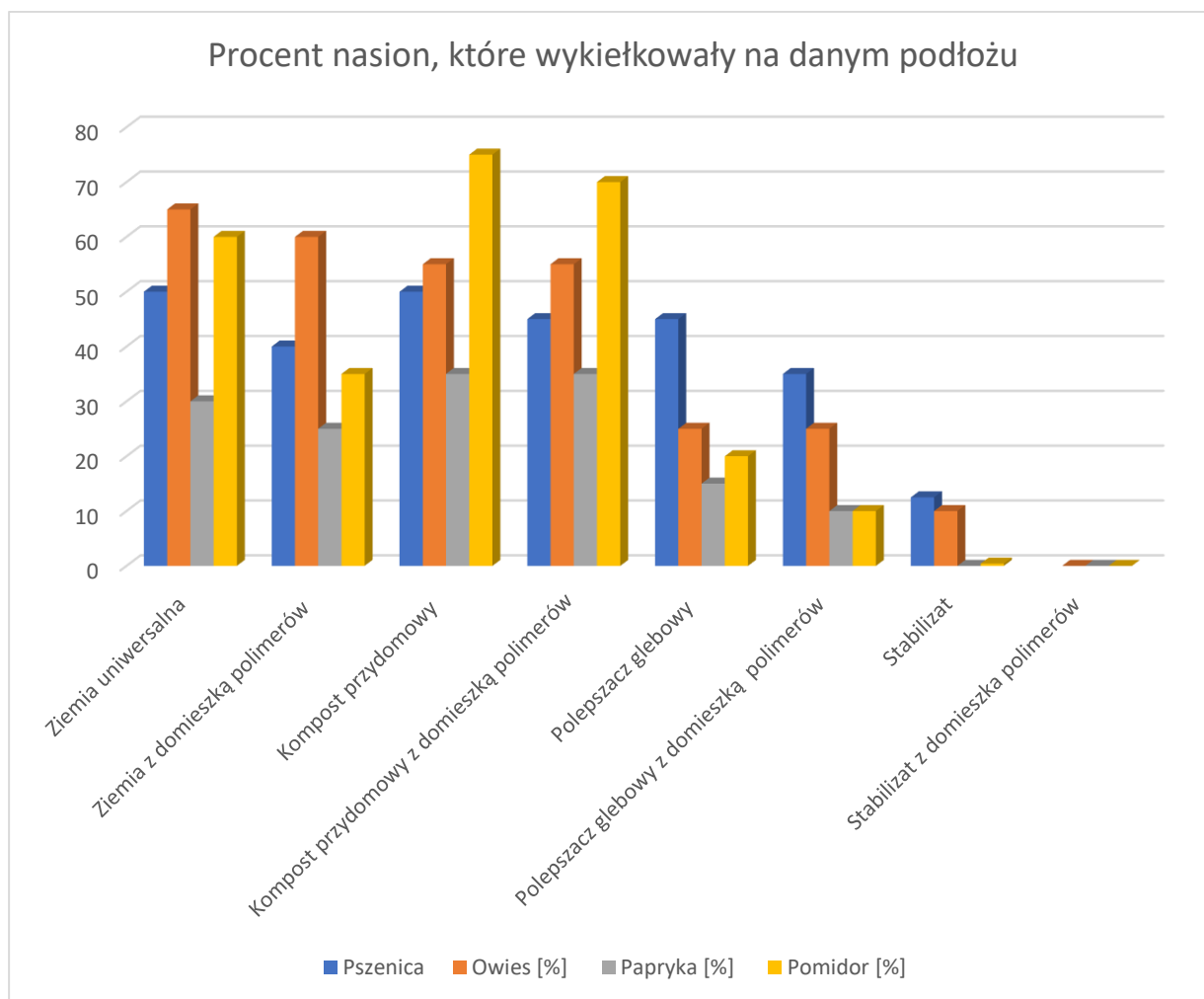
Na stabilizacji wyrósł tylko 1 pomidor (2,5%) o długości 1,2 cm i długości korzenia 0,2 cm. Przykładowe wyhodowane rośliny pomidora przedstawiono na rysunku 5.59.

Podsumowując, pomidor rósł najlepiej na kompoście przydomowym, a najgorzej na stabilizacji z domieszką polimerów. Zaobserwowano, że dodatek do podłoża polimerów wpływała na spowolnienie wzrostu u roślin.



Rysunek 5.59 Przykładowe rośliny pomidora wyrosnięte na poszczególnych typach podłoża (fot. autor)

Dokonano analizy ilości nasion z danego gatunku rośliny, które wykiełkowały na różnych typach podłoża (rys 5.60). Zaobserwowano, że w przypadku każdej z roślin (pszenicy, owsa, papryki i pomidora) dodatek polimerów do podłoża ograniczał ich wzrost. Na każdym podłożu z dodatkiem polimerów wykiełkowało mniej roślin niż na danym podłożu bez domieszek polimerów. Najlepiej rośliny rosły na kompoście przydomowym, a najgorzej na stabilizacji.

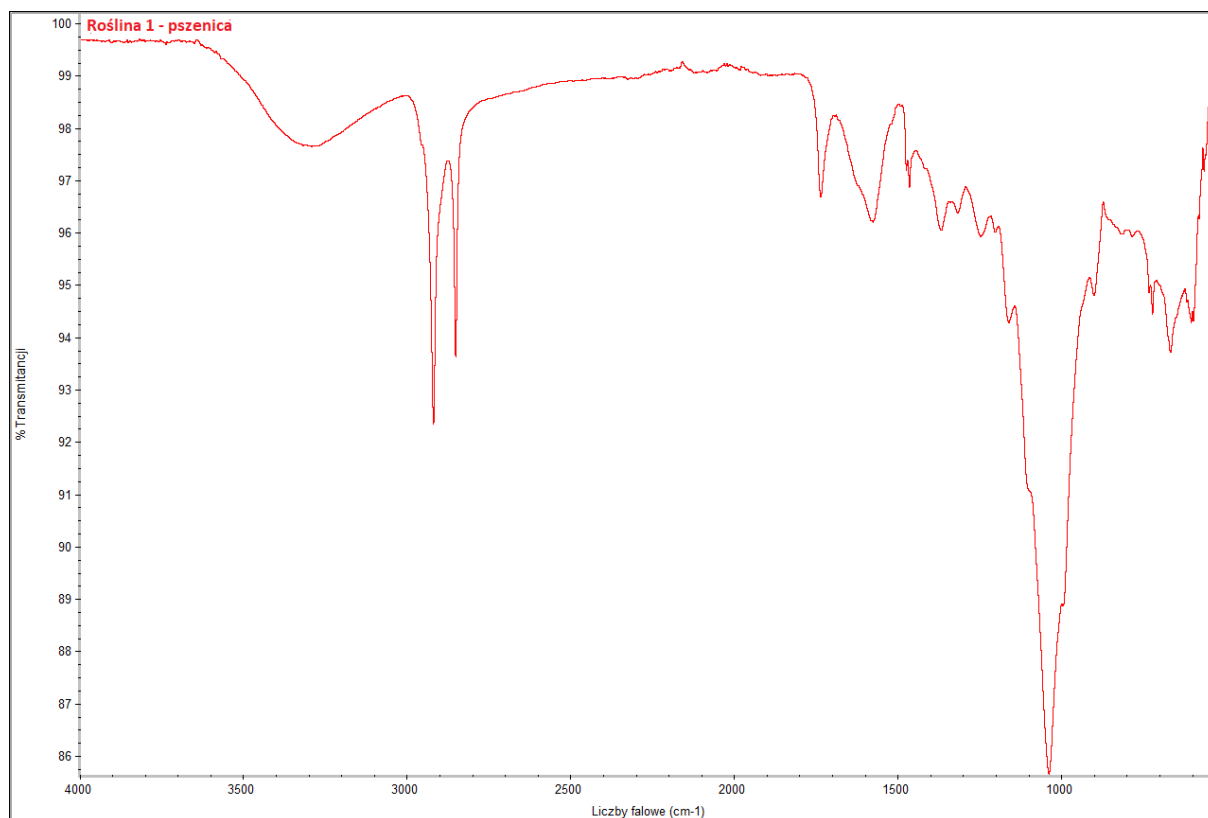


Rysunek 5.60 Zestawienie ilości wykiełkowanych nasion na poszczególnych typach podłoża (opracowanie własne)

5.8 Przechodzenie mikroplastików do roślin

Ostatnim etapem badań było sprawdzenie możliwości identyfikacji ewentualnej migracji mikroplastików do roślin. Dokonano pomiarów na FT-IR wyhodowanych roślin. Jako podłoże wybrano polepszacz glebowy do przeanalizowania roślin pod kątem obecności polimerów, ze względu na jego powszechność stosowania.

Poniższy rysunek (rys. 5.61) przedstawia otrzymane widmo próbki fragmentu z pszenicy (roślina 1) wyrosniętej na polepszaczu glebowym. Na osi poziomej mamy liczbę falową (cm^{-1}), a na pionowej - transmitancję (%).



Rysunek 5.61 Widmo FT-IR - pszenicy, która wyrosła na próbce kompostu (opracowanie własne)

Poniżej tabela 5.40 przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC, które porównują otrzymane widmo z daną biblioteką.

Tabela 5.40 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla fragmentu rośliny (pszenicy) wyrosniętej na próbce kompostu (opracowanie własne)

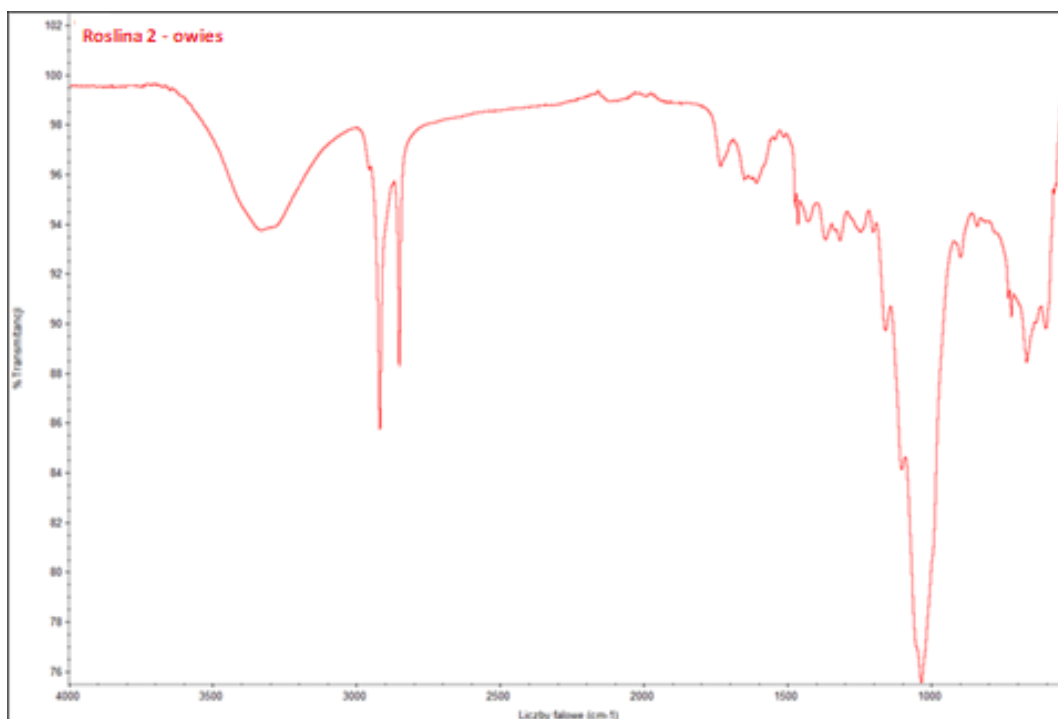
Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	72,86	Polyethylene Polietylen	<i>HR NICOLET Sampler</i> <i>Libraary</i>
2	68,98	Natural vegetable wax from Mexican Shrub Naturalny воск roślinny z meksykańskich krzewów	<i>HR NICOLET Sampler</i> <i>Libraary</i>
3	68,85	Natural vegetable wax from Brazilian palms trees Naturalny воск roślinny z brazylijskich palm	<i>HR NICOLET Sampler</i> <i>Libraary</i>
4	66,97	Mono and diglycerides from edible meat fat Nono- i diglicerydy z jadalnego tłuszczu mięsnego	<i>HR NICOLET Sampler</i> <i>Libraary</i>
5	65,95	Ethylene vinyl acetate polymers Polimery etyleny i octanu winylu	<i>HR NICOLET Sampler</i> <i>Libraary</i>

Widmo FT-IR (rys. 5.61) analizowanej próbki wykazuje obecność zarówno składników organicznych typowych dla materii roślinnej, jak i charakterystycznych pasm związanych z tworzywami sztucznym. Skupiając się na interpretacji wyników pod kątem obecności w strukturze rośliny (w tym przypadku roślina 1) wspomnianych tworzyw sztucznych, dla potwierdzenia współczynnika dopasowania z tabeli 5.40, zarejestrowano charakterystyczne pasma dla polietylenu (PE). Pasma w okolicy $2915\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ i $2849\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ są obecne i wskazują na występowanie grup $\text{--CH}_2\text{--}$, które są typowe dla poliolefin (czyli dla polietylenu oraz polipropylenu). Ponadto pasma w przedziale około $1470\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ i $1460\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ są również obecne, to zginające pasma C–H, obecne w PE. Zanotowano także silne pasma w rejonie 730 i $720\text{ (cm}^{-1}\text{)}$, które są mocno charakterystyczne dla polietylenu (tzw. wagging CH_2) występujące w długim, prostym łańcuchu alifatycznym. Brak wyraźnych sygnałów karbonylowych dla C=O przy ok. $1700\text{ (cm}^{-1}\text{)}$, co może sugerować na brak estrów czy kwasów karboksylowych, bądź poliestrów – co również potwierdza obecność PE w strukturach rośliny

Wniosek:

Na podstawie przedstawionego widma FT-IR (rys. 5.61), widoczne są charakterystyczne pasma dla polietylenu (PE). Szczególnie istotne są: rozciągające C–H przy ~ 2915 i $2849\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ oraz zginające C–H przy ~ 1470 i $1460\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ jak i wagging CH_2 przy ~ 730 i $720\text{ (cm}^{-1}\text{)}$. Pasma te mocno sugerują, iż badana próbka (roślina 1) zawiera polietylen w swojej strukturze, co potwierdza się z otrzymanymi danymi z bibliotek dla tej próbki.

Kolejną analizowaną rośliną był owies wyrosnięty na próbce kompostu, w pracy opisany jako roślina 2 (rys. 5.62) .



Rysunek 5.62 Widmo FT-IR - owsa, który wyrósł na próbce kompostu (opracowanie własne)

Poniżej tabela 5.41 przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC, które porównują otrzymane widmo z daną biblioteką.

Tabela 5.41 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla fragmentu rośliny (owsa) wyrosniętej na próbce kompostu (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	74,95	Polyethylene Polietylen	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
2	68,21	Natural vegetable wax from Mexican Shrub Naturalny воск roślinny z meksykańskich krzewów	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
3	67,71	Natural vegetable wax from Brazilian palms trees Naturalny воск roślinny z brazylijskich palm	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
4	66,32	Ethylene vinyl acetate polymers Polimery etyleny i octanu winylu	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
5	64,46	Mono and diglycerides from edible meat fat Nono- i diglicerydy z jadalnego tłuszczu mięsnego	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>

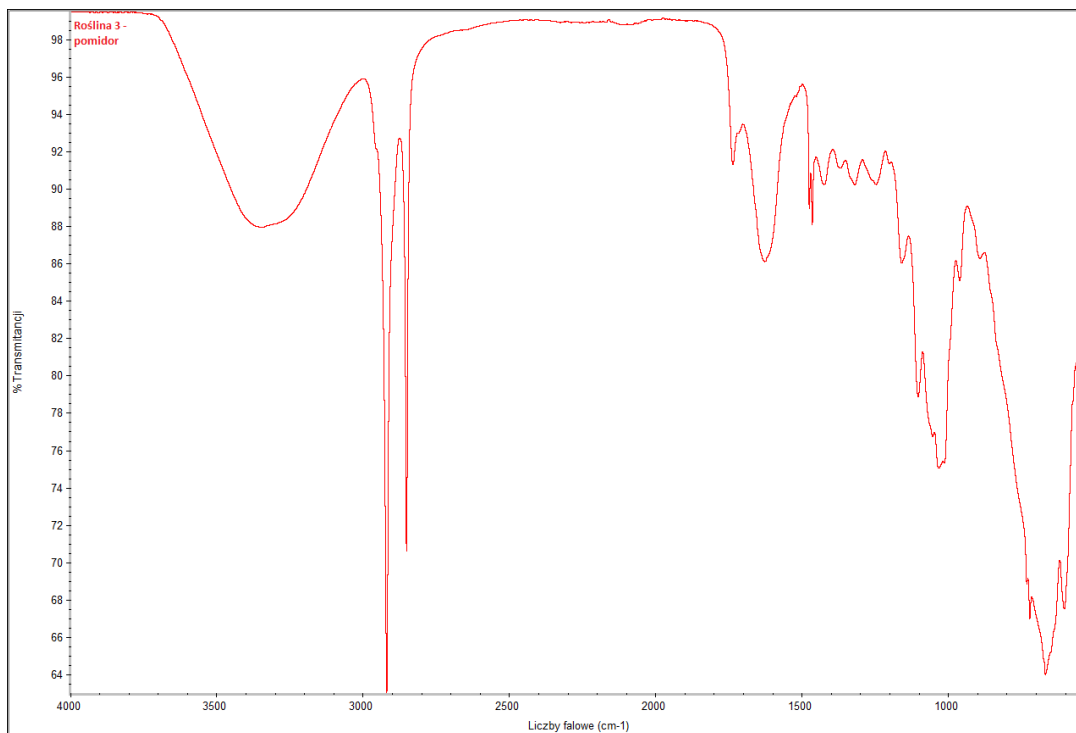
Analizując dane zebrane w tabeli powyżej (tab. 5.41) można potwierdzić jednoznacznie, że w badanej próbce fragmentu owsa tj. rośliny 2, znajdują się cząstki tworzyw sztucznych. Współczynnik 74,95 wskazuje na obecność polietylenu wg danych z biblioteki *HR NICOLET Sampler Library*.

Widmo FT-IR (rys. 5.62) analizowanej próbki wykazuje obecność zarówno składników organicznych typowych dla materii roślinnej, jak i charakterystycznych pasm związanych z tworzywami sztucznym. Zawężając interpretację wyników pod kątem obecności w strukturze owsa (w tym przypadku roślina 2) mikroplastików, dla potwierdzenia współczynnika dopasowania z tabeli 5.41 zarejestrowano charakterystyczne pasma dla polietylenu (PE). Pasma ~ 2915 i 2849 (cm^{-1}) – jest obecne i widoczne wyraźne pasma C–H, zgodne z polietylenem (PE). Następnie przy ~ 1470 – 1460 (cm^{-1}) to obecne lekkie zagięcie wskazujące na pasma zginania C–H, obecnego w polietylenie. Zarejestrowano także pasma w rejonie 730 i 720 (cm^{-1}), jako CH_2 , które są także charakterystyczne dla polietylenu.

Wniosek:

Na podstawie przedstawionego widma FT-IR (rys. 5.62), dla rośliny 2 tj. owsa wyhodowanego na kompoście, zarejestrowano pasma charakterystyczne dla polietylenu (PE), podobnie jak dla widma pszenicy.

Następną badaną rośliną był pomidor (roślina 3)



Rysunek 5.63 Widmo FT-IR - pomidora, który wyrósł na próbce kompostu (opracowanie własne)

Poniżej tabela 5.42 przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC, które porównują dane widmo z biblioteką.

Tabela 5.42 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla fragmentu rośliny (pomidora) wyrośniętej na próbce kompostu (opracowanie własne)

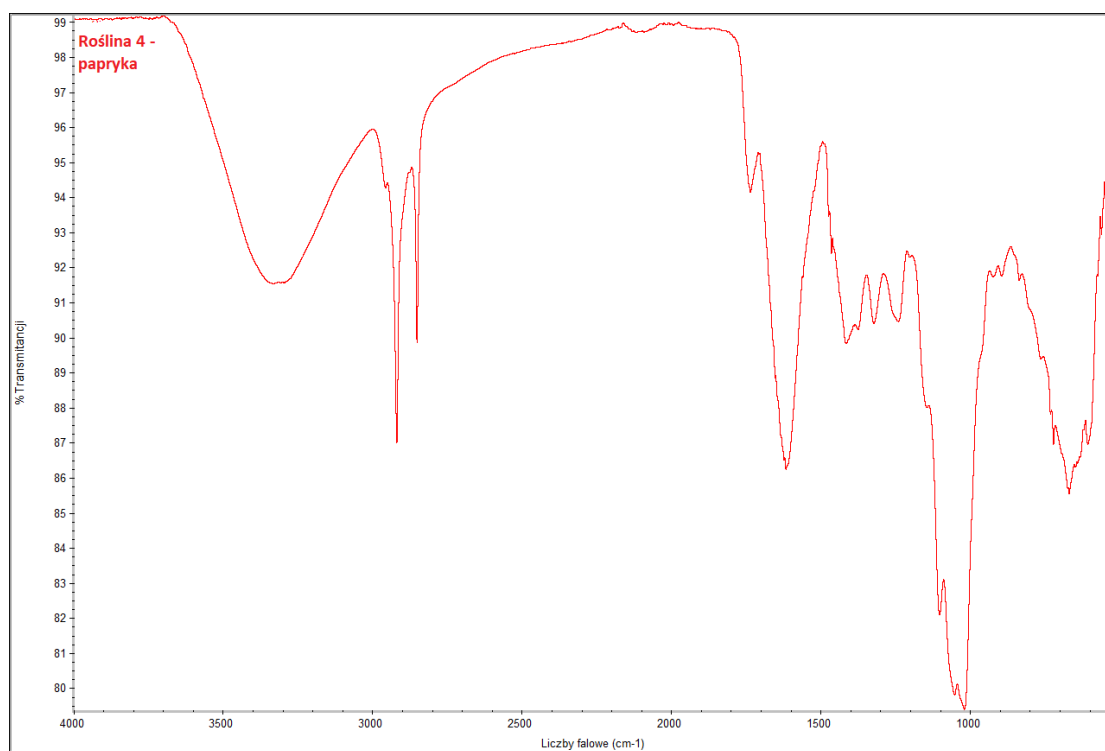
Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	86,22	Polyethylene Polietylen	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
2	80,14	Poly(ethylene), low density Polietylen o niskiej gęstości	<i>Aldrich Condensed Phase Sample Library</i>
3	76,50	Triacontane, 99%	<i>Aldrich Condensed Phase Sample Library</i>
4	75,70	Natural vegetable wax from Mexican Shrub Naturalny воск roślinny z meksykańskich krzewów	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
5	74,40	Ethylene vinyl acetate polymers Polimery etyleny i octanu winylu	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>

Analizując dane zebrane w tabeli powyżej (tab. 5.42) można potwierdzić jednoznacznie, że w badanej próbce fragmentu pomidora tj. rośliny 3, znajdują się cząstki tworzyw sztucznych. Współczynnik 86,22 oraz 74,40 wskazuje na obecność polietylenu wg danych

z biblioteki *HR NICOLET Sampler Library* oraz 80,14 według biblioteki *Aldrich Condensed Phase Sample Library*.

Analizując widmo przedstawione na rys. 5.63 – pomidor wyhodowany na kompoście, możemy również, jak w poprzednich próbkach roślin (pszenicy i owsa) stwierdzić obecność pasm charakterystycznych dla polietylenu tj. pasmo ~ 2915 i 2849 (cm^{-1}), które widoczne wyraźnie jako pasma C–H występujące w polietylenie (PE) oraz pasmo ~ 1470 – 1460 (cm^{-1}) jako – lekkie zagięcie, wskazujące na zginania C–H, występujące w polietylenie oraz pasma ~ 730 i 720 (cm^{-1}) jako CH_2 występujące w polietylenie.

Czwarta charakteryzowana roślina pod kątem obecności mikroplastików w swej strukturze to papryka.



Rysunek 5.64 Widmo FT-IR - papryki, który wyrósł na próbce kompostu (opracowanie własne)

Poniżej tabela 5.43 przedstawia otrzymane dane z programu OMNIC, które porównują dane widmo z biblioteką.

Tabela 5.43 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla fragmentu rośliny (papryka) wyrosniętej na próbce kompostu (opracowanie własne)

Lp.	Współczynnik dopasowania	Nazwa związku	Nazwa biblioteki
1	64,97	Polyethylene polietylen	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
2	58,62	Natural vegetable wax from Mexican Shrub Naturalny воск roślinny z meksykańskich krzewów	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
3	58,26	Natural vegetable wax from Brazilian palms trees Naturalny воск roślinny z brazylijskich palm	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
4	57,84	Ethylene vinyl acetate polymers Polimery etyleny i octanu winylu	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>
5	57,19	Mono and diglycerides from edible meat fat Nono- i diglicerydy z jadalnego tłuszczu mięsnego	<i>HR NICOLET Sampler Libraary</i>

Analizując dane zebrane w tabeli powyżej (tab. 5.43) można potwierdzić jednoznacznie, że w badanej próbce fragmentu papryki tj. rośliny 4, znajdują się cząstki tworzyw sztucznych. Współczynnik 64,97 oraz 57,84 wskazuje na obecność polietylenu wg danych z biblioteki *HR NICOLET Sampler Library*.

Analizując widmo przedstawione na rys. 5.64 – papryki wyhodowanej na kompoście, możemy również, jak w poprzednich próbkach roślin (pszenicy, owsa oraz pomidora) stwierdzić obecność pasm charakterystycznych dla polietylenu tj. pasmo ~ 2916 (cm^{-1}) asymetryczne rozciągające i 2848 (cm^{-1}) - symetryczne rozciągające, które jest widoczne wyraźnie jako pasma C–H występujące w polietylenie (PE) oraz pasmo ~ 1472 (cm^{-1}) zginanie CH_2 oraz pasmo ~ 1463 (cm^{-1}) - CH_2 , występujące w polietylenie oraz pasma ~ 730 i 720 (cm^{-1}) jako CH_2 także występujące w polietylenie.

6. Podsumowanie badań i dyskusja wyników

W dzisiejszym świecie zwiększająca się ilość odpadów - w tym odpadów z tworzyw sztucznych - będąca efektem gwałtownej industrializacji, dużego zurbanizowania, a także rozwoju miast i wzrostu poziomu konsumpcji, należy do jednych z największych i najważniejszych problemów cywilizacyjnych. Zgodnie z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE - składowanie odpadów jest najmniej pożądanym sposobem postępowania z odpadami. Wobec tego, należy poszukiwać rozwiązań, które umożliwiają ponowne wykorzystanie powstałych odpadów. Problem dotyczy się również odpadów z tworzyw sztucznych, a idąc dalej mikro- i nanoplastików, które powszechnie występują w obiegu w przyrodzie. Zanieczyszczenie mikroplastikiem to problem stanowiący globalne wyzwanie dla środowiska. Odpady z tworzyw sztucznych, tym samym mikroplastiki, wymagają zwiększenia uwagi ze względu na jego trwałość, wszechobecność i potencjalne ryzyko dla ekosystemów, a także dla zdrowia ludzkiego (Barai D.P. i in., 2025). W badaniach nad mikroplastikiem można wyszczególnić dwie drogi przedstawienia tego tematu. Jedna z nich koncentruje się na skutkach bieżących, druga perspektywa skupia się na możliwych konsekwencjach w przyszłości. Mikroplastik jest obecnie nowym, ale globalnym czynnikiem zmian, który wpływa m.in. na właściwości gleby, wydajność roślin i procesy zachodzące w środowisku.

W pracy tej przedstawiono problem zanieczyszczenia mikroplastikiem ekosystemów, poprzez wodę, także ścieki, powietrze oraz glebę. Dokonano analizy literaturowej w tym zakresie oraz wpływu na zdrowie człowieka jako globalnego już zanieczyszczenia mikroplastikami. W rozprawie skoncentrowano się na zanieczyszczeniach mikroplastikami kompostów jako potencjalnego źródła zanieczyszczenia gleb oraz ograniczenie recyklingu z odpadów biodegradowalnych jako zagrożenie dla gospodarki o obiegu zamkniętym.

W pracy tej przedstawiono opracowaną metodologię dla znalezienia mierzalnych wartości nano- i miktoplastików w kompostach pochodzących z przetwarzania odpadów biodegradowalnych.

Pierwszym etapem prac było zbadanie składu morfologicznego wybranych kompostów. Dokonano tego bazując na normie PN-93-Z-15006. Przebadano po 50 prób każdego rodzaju kompostów, łącznie przebadano po 100 kg każdego kompostu. W wyniku badań udało się

rozdzielić komposty na 7 frakcji tj.: odpady organiczne, tworzywa sztuczne, ceramika, papier i tektura, szkło, metal oraz tak zwane inne komponenty. Pozyskano w ten sposób informacje na temat wagi (ilości) zawartości poszczególnych komponentów w kompostach, tym samym zanieczyszczeń w postaci tworzyw sztucznych. Wnioskując powyższe, kompostowanie jest procesem czasochłonnym i bardzo ciężko jest uzyskać jednolity kompost, ze względu na niejednorodność w materiale wsadowym. Stwierdzono, że poszczególne próbki są bardzo niejednorodne, jest bardzo duża rozbieżność w wadze poszczególnych frakcji wyodrębnionych w analizowanych kompostach. Analizując 50 prób, tylko w niektórych udało się wyszczególnić poszczególne frakcje, co przełożyło się potem na wynik średni (np. w trawie w 13 próbkach były tworzywa sztuczne, w kompoście przydomowym w 9 próbkach, w polepszaczu glebowym w 30 próbkach, zaś w stabilizacie plastik był obecny w każdej z badanych prób. Najwięcej substancji organicznej znajdowało się w skoszonych kompostowanej trawie to jest średnio 1959,16 g na 2000 g próbki, a najmniej miał stabilizat to jest 706,8 g z 2000 g próbki. Najmniej tworzyw sztucznych znajdowało się w kompoście przydomowym tj. 0,17 g co stanowi jedynie 0,0085% próbki, a najwięcej w stabilizacie tj. 1234,39 g z 2000 g, co stanowi ok. 62% próbki. Poprzez zbadanie morfologii cel 2 pracy został po części osiągnięty i opisany jako mierzalne wartości ilość tworzyw sztucznych w kompostach. W celu określenia jakości kompostów, dokonano pomiarów podstawowych parametrów takich jak zawartość azotu (metoda Klejdaha), fosforu, pH, przewodnictwa (PN-Z-15011-3:2001). Uśredniając wyniki analiz na zawartość fosforu (P) i azotu (N) odnotowano najmniejszą średnią zawartość fosforu (2,2% mas.) dla stabilizatu. Najwyższą wartość wykazał kompost przydomowy głównie z odpadów kuchennych z gospodarstwa wiejskiego. W kompoście po MBP tzw. polepszaczu glebowym średnia zawartość fosforu wynosiła 2,6% mas., a w kompostowanej trawie wynosiła 2,4% mas. Najmniejszą średnią zawartość azotu (2,3% mas.) obserwowano w kompostowanej trawie, a największą średnią zawartość azotu w kompoście przydomowym (2,7% mas.). W kompoście po MBP tzw. polepszaczu glebowym zawartość azotu wyniosła 2,5% mas., a w stabilizacie 2,4% mas. Badania wykazały współzależność występowania fosforu i azotu w wybranych kompostach. Największą zawartość azotu i fosforu odnotowano w kompoście przydomowym, najmniejszą w kompoście tzw. stabilizacie. Najbardziej stabilnym kompostem pod względem powtarzalności wyników okazał się tzw. polepszacz glebowy z MBP, ale także kompost przydomowy oraz kompostowana trawa. Największa rozbieżność otrzymanych wyników wystąpiła dla stabilizatu pochodzącego z zakładu mechaniczno - biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych. Rozbieżność wyników w stabilizacie podkreśla zapewne

niehomogeniczność odpadów. Kolejnym etapem było zbadanie wielkości cząstek w kompostach, aby mówić o skali mikro, a nawet nano. Posłużono się do tego celu metodą badania DLS (dynamicznym rozproszeniem światła). Z analizowanych 30 próbek z każdego rodzaju kompostu przygotowano przesącz w celu sprawdzenia różnicy w wielkości cząstek próbki rzeczywistej i powstałego przesączu. Porównując pik 1, czyli główną ilość cząstek, stanowiącą największy procent powierzchni badanych próbek we wszystkich typach kompostów otrzymano następujące dane. W kompostowanej trawie otrzymano średnią wielkość cząstek wynoszącą 222,5 nm. Najmniejsze zmierzone cząstki mikroplastików to 164,9 nm, a największe 270 nm. Biorąc pod uwagę dwa kolejne piki, stanowiące niewielką część badanej próbki, zanotowano najmniejsze nanocząstki wielkości 26 nm, a największe to 4638 nm mogące świadczyć o powstałych aglomeratach, czyli połączeniach cząstek mniejszych w większe. Powstały przesącz z próbek kompostowanej trawy miał wielkość cząstek 201,1 nm. Tu najmniejsze cząstki 142,7 nm, a największe 270 nm. W pozostałej części próbek występowały także nanocząstki pojedyncze o wielkości 25,52 nm oraz cząstki największe o wielkości 4952 nm, będące zapewne aglomeratami powstałymi w wyniku połączenia kilku małych cząstek w jedną. W kompoście przydomowym średnia wielkość cząstek wynosiła 1302,6 nm. Najmniejsze cząstki to 265 nm, a największe 2420 nm. W pikach 2 i 3 największe cząstki to wielkość 5560 nm, a najmniejsze 135,3 nm. Przesącz z kompostu przydomowego to cząstki średniej wielkości 140,3 nm. Najmniejsze cząstki w tym pikach to 120,1 nm, a największe 154,3 nm. W pozostałej części próbek zanotowano także pojedyncze nanocząstki wielkości 26,54 nm, a największe to 5223 nm. Polepszacz glebowy to średnia wielkość cząstek 746,4 nm. Najmniejsze zanotowane mikrocząstki to 393,1 nm, a największe 1556 nm. Zmierzono także pojedyncze nanocząstki 156,8 nm oraz duże aglomeraty 5436 nm stanowiące tylko 1,2% badanych próbek. W przesączu z polepszacza glebowego średnia wielkość cząstek to 170,5 nm. Najmniejsze mikrocząstki to wielkość 107,6 nm, a największe 261,6 nm. Analizując kolejne dwa pozostałe piki uchwyciono nanocząstki wielkości 12,43 nm, a także większe aglomeraty 5560 nm. Ostatnim przebadanym rodzajem kompostów był stabiliziat. Średnia wielkość cząstek w stabilizacie 649,4 nm, gdzie najmniejsza wartość wynosi 383,3 nm, a największa 850,1 nm. W powstałym przesączu zanotowano mikrocząstki wielkości 556,5 nm oraz pojedyncze nanocząstki wielkości 88,7 nm.

Analiza DLS badanych próbek pozwoliła określić rozmiary cząstek drobin plastików znajdujących się w kompostach i ich wodnych wyciągach. W celu interpretacji wyników, która

pozwoiliaby wyciagnac ogolne wnioski uzyskane rozmiary czastek podzielono na trzy frakcje, tj. 0-300 nm, 300-1000 nm oraz powyzej 1000 nm. Uwzgledniajac % powierzchni ukazany w wynikach analizy DLS, co odpowiada procentowemu udzialowi czastek o okreslonych rozmiarach (srednicach) w probce badanej, mozliwe bylo wyciagniecie wnioskow na temat zawartosci mikroplastikow i nanoplastikow w probkach. Zestawienie przedstawiono na rysunku 5.49 w podrozdziale 5.5.5. Graficzne zestawienie (rys. 5.49) pozwala zauwazyc, ze w probkach trawy glowna frakcje zanieczyszczen stanowiły nano i mikroplastiki o srednicy ponizej 300 nm, frakcji o srednicy 300 – 1000 nm nie stwierdzono, natomiast czastki o srednicy powyzej 1000 nm stanowiły mniej niz 3%. Probki kompostu przydomowego charakteryzowały się najwieksza zawartoscia czastek o srednicy od 300 do 1000 nm, mniejsza czastek o srednicy powyzej 1000 nm i najmniejsza zawartoscia czastek o srednicy ponizej 300 nm, praktycznie o polowe mniejsza niz dla czastek powyzej 1000 nm. W przypadku przesaczu wyciagu wodnego z kompostu przydomowego najwiekszy udzial stwierdzono dla probek z najmniejszymi srednicami. Podobnie wyglada charakterystyka probek polepszacza glebowego, jednak w jego przypadku stwierdzono podobne zawartosci frakcji najmniejszej i najwiekszej czastek, natomiast frakcja srodkowa byla frakcja glowna. Przesacz z wyciagu wodnego z polepszacza glebowego charakteryzował się glowna zawartoscia frakcji ponizej 300 nm. Stabilizat zawierál tylko czastki o srednicach od 300 do 1000 nm, natomiast przesacz ze stabilizatu zawierál rowniez czastki o srednicy ponizej 300 nm. Dokladne wartosci srednich rozmiarow czastek w badanych probkach przedstawiono w tabeli 5.34. Uzyskane wyniki potwierdzaja obecnośc nano i mikroplastikow w badanych probkach. Wykonanie analiz przesaczy wodnych wyciagow pozwolilo potwierdzic zjawisko migracji tych zanieczyszczen do frakcji wodnej. Majac na uwadze powszechne zastosowanie badanych probek w kontekście nawozow i polepszaczy glebowych nalezy zauwazyc, ze to zjawisko migracji nano i mikroplastikow do frakcji cieklej jest niekorzystne. W przypadku probek trawy glowna grupa byla frakcja o srednicy ponizej 300 nm. Tego typu czastki moga migrowac do roslin poprzez system korzeniowy i byc transportowane w dalsze czesci, np. lodygi. Podobne wnioski mozna wysnuć analizujac wyniki dla probek przesaczy kompostu i polepszacza glebowego. Czyli w przypadku stosowania lub praktykowania nawozenia trawa, kompostem lub polepszaczem glebowym moze dochodzic do akumulacji w glebie nano- i mikroplastikow, ktore wraz z opadami deszczu i splywami powierzchniowymi lub wglębnymi do glębszych warstw gleby moga byc transportowane na dalsze odleglosci oraz sorbowane przez korzenie roslin. We wszystkich probkach stalych trawy, kompostu i polepszacza stwierdzono obecnośc

mikroplastików. Cząstki o rozmiarach od 300 do 1000 nm mogą charakteryzować się mniejszą skutecznością w przenikaniu do wnętrza roślin, ale będą gromadzić się na powierzchni systemu korzeniowego rośliny oraz będą miały wpływ na strukturę gleby i procesy zachodzące w glebie z udziałem mikroorganizmów. Największą zawartością zanieczyszczeń mikroplastikami z zakresu od 300 do 1000 nm charakteryzował się stabilizat. W wyciągu wodnym dodatkowo stwierdzono obecność frakcji mniejszej. Stabilizat nie zawierał najmniejszej frakcji mikroplastików, ale duża zawartość frakcji średniej wpływać będzie na właściwości fizykochemiczne gleby, poprzez wpływ na jej strukturę i żyzność, a w efekcie obniżenie jej jakości, dodatkowo frakcja większa może stanowić źródło mniejszych cząstek.

Reasumując powyższe pomiary z wielkości cząstek, we wszystkich badanych próbkach kompostów występują cząstki wielkości mikro - mikrocząstki. Filtracja sprawia że cząstki są mniejsze od próbek rzeczywistych w próbkach z przesączu. Najmniejsze cząstki są w kompostowanej trawie, kolejno w stabilizacie, polepszaczu glebowym, a największe w kompostowniku przydomowym. W głównym pikie z pomiaru DLS, wszystkie zanotowane cząstek w kompostach to wielkości mikro, czyli wartości poniżej 5000 nm, tak więc w wyniku przeprowadzonych pomiarów i badań laboratoryjnych zmierzono, że w każdej próbce występują wyłącznie mikrocząstki, niekiedy nawet nanocząstkami przy wartościach mniejszych niż 100 nm.

Mając dane dotyczące mikrocząstek, dokonano analizy spektrofotometrycznej na FT-IR w celu określenia związków zawartych w badanych próbkach. Analizowano każde otrzymane widmo pod kątem obecności mikroplastików. Wyniki analiz FT-IR pozwoliły określić rodzaj dominującego rodzaju polimeru znajdującego się w próbkach badanych. Zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 5.35.

W kompostowanej trawie po weryfikacji na FT-IR otrzymano polietylen oraz poliester, w przesączu otrzymano celofan. W kompoście przydomowym mikrocząstki zostały zakwalifikowane do polietylenu oraz celofanu, co pokrywa się z tym co uzyskano w badaniu morfologii - głównym źródłem zanieczyszczenia mikroplastikami będą naklejki foliowe z owoców czy warzyw (wykonane z PE). W przesączu z kompostu, nie stwierdzono obecności mikroplastików, co może świadczyć o tym, że cząstki duże 1400 nm to mikroplastik, a w przesączu gdzie średnia wartość cząstek wynosi 140 nm polimerów brak. Jak widać, w powstałym przesączu nie ma pasm świadczących o obecności polimerów, więc wnioskować

możemy ze proces filtracji i sączenia zatrzymał mikrocząstki polimerów. W surowym materiale są, zaś w przesączu ich brak. Badając polepszacz glebowy wykazał obecność mikrocząstek polietylenu, polipropylenu, nylonu oraz politereftalanu etylenu, a także poliestrów. W powstałym przesączu także wykryto mikrocząstki polimerów, głównie celofanu. Stabilizat okazał się być w największej mierze przepelniony mikroplastikami. Wykryto polietylen, polimetakrylan, polichlorek winylu. W przesączu także wykryto mikroplastiki takie jak polistyren, polichlorek winylu.

Udało się opracować metodologię przygotowania miarodajnej próbki do badania mikroplastików w kompostach w wyniku przeprowadzenia dużej ilości analiz (próby i różne konfiguracje zamieszczone są na rysunkach i tabelach w załącznikach). Z próbką postępowano dwutorowo. Najpierw mierzono wielkość cząstek, a później próbkę mielono w celu ujednolichenia i zhomogenizowania materiału. Mielenie odegrało istotną rolę w homogenizacji, bardzo niejednorodnego materiału, jakim jest kompost – co wynika z dokonanej morfologii odpadów. Plamka do pomiaru FT-IR jest bardzo małej wielkości (1,5 mm x 1,5 mm – okienko diamentowe). Przed mieleniem poszczególne frakcje kompostów mają często większe rozmiary, aby uniknąć przypadkowego pomiaru, ponieważ pewna część próbki nie zmieści się w oknie, więc niektóre związki poza okienkiem pomiarowym mogą być inne i niezmierzone. Aby zrobić dokładne mapowanie, potrzebny jest zautomatyzowany stolik, ale pomiar może być obarczony dużym błędem. W celu uniknięcia przypadkowego pomiaru, uniknięcia błędów pomiarowych zdecydowano się na ujednolicenie i zhomogenizowanie materiału poprzez mielenie. Jest to lepszym sposobem na ujednolicenie materiału, gdyż na oknie pomiarowym, na plamce zmieści się więcej materiału, który jednocześnie jest ujednolicony i mierzony – cel 1 i 2 pracy zostały w pełni osiągnięte - udało się opracować metodę badawczą definiującą wielkość i jakość zanieczyszczeń mikro- i nanoplastików w odpadach i produktach ich przetwarzania w procesach stabilizacji tlenowej oraz udało się zweryfikować możliwość kompostowania odpadów biodegradowalnych różnego pochodzenia, zanieczyszczonych w różnym stopniu mikro- i nanoplastikiem. Niewątpliwie zaproponowana metoda badania w oparciu o połączoną analizę DLS i FT-IR pozwoliła scharakteryzować mikroplastiki znajdujące się w próbkach badanych materiałów organicznych. Technika DLS dostarczyła informacji o rozmiarach cząstek mikroplastików i ich średniej zawartości w badanych próbkach. Natomiast spektroskopia FT-IR pozwoliła określić rodzaj mikroplastiku dominującego w analizowanym materiale.

W celu wykazania wpływu mikroplastików na wzrost roślin wykonano badania modelowe z zastosowaniem próbek badanych materiałów organicznych, kompostu, stabilizatu, polepszacza glebowego, ziemi uniwersalnej (jako próbka odniesienia) oraz ściśle określonych dodatków trzech rodzajów polimerów. Podsumowanie wyników tej części badań doskonale prezentuje rysunek 5.60, gdzie zilustrowano wpływ dodatków mikroplastików na zahamowanie procesu kiełkowania nasion czterech gatunków roślin (pszenicy, owsa, papryki i pomidora). Nasadzenia tych czterech roślin na wszystkich typach podłoży wykonano w pierwszej kolejności. Następnie do podłoży dodano sztucznie zmielone mikroplastiki, aby sprawdzić test wzrostu roślin na rzeczywistych podłożach i na dodatkowo zasilonych polimerami (mikroplastikiem). Na podstawie uzyskanych wyników wzrostu roślin można stwierdzić jednoznacznie, że dodatek polimerów do podłoża ograniczył długość wzrostu roślin oraz ilość nasion, które wykiełkowały. Najlepiej rośliny rosły na kompoście przydomowym, a najgorzej na stabilizacie. Rośliny rosły najgorzej na stabilizacie, gdyż jak wynika z wcześniejszych analiz morfologii tego rodzaju kompostu jest w nim najwięcej tworzyw sztucznych (mikroplastików). Najlepiej rośliny rosły na kompoście przydomowym, a najgorzej na stabilizacie – osiągnięty został cel 3 – weryfikacja możliwości wykorzystania produktów recyklingu organicznego do celów rolniczego wykorzystania.

Ostatnim etapem badań była weryfikacja obecności mikroplastików w strukturach roślin. Przeanalizowano rośliny z jednego typu podłoża, a mianowicie z polepszacza glebowego, bez sztucznie dodanych polimerów. Badane na FT-IR fragmenty następujących roślin: pszenicy, owsa, pomidora oraz papryki zawierały w swoim składzie polietylen, który również występował w badaniach tego typu podłoża - jako główny materiał polimerowy. Badanie to pokazało możliwość migracji mikroplastików z podłoża do roślin.

Jak podaje Aylaj (2023) i współautorzy kompostowanie jest powszechnie stosowane w gospodarce odpadami, a ocena jego jakości jest ważna dla pomyślnego zastosowania. Test kiełkowania nasion jest powszechnie stosowany ze względu na jego zdolność do badania poziomu toksyczności kompostu. Test nasion jest zwykle oceniany na produkcie końcowym, a wyniki mogą się różnić w zależności od różnych metod i rodzaju użytych nasion (Aylaj M., 2023).

Kompostowanie jest jedną z metod przetwarzania odpadów roślinnych, zwierzęcych i komunalnych. Wciąż jednak ilość odpadów poddawanych kompostowaniu jest mniejsza niż

ilość odpadów deponowanych na składowiskach. Przykładowo w 2018 r. 56,9% odpadów komunalnych poddano odzyskowi, z czego tylko 8,1% poddano kompostowaniu lub fermentacji. Unieszkodliwieniu poddano 43,1% odpadów komunalnych, z czego 41,6% poprzez składowanie (GUS, 2018). Z punktu widzenia ochrony środowiska konieczne jest zwiększenie udziału odzysku w gospodarce odpadowej kosztem ograniczenia składowania. Analizowane komposty z odpadów komunalnych, zielonych oraz kompost przydomowy charakteryzują się zbliżoną zawartością azotu i fosforu i nie odbiegają od danych literaturowych. Analizy wykazały małą zmienność zawartości fosforu i azotu w badanych próbkach. Na podstawie wyników zawartości P i N w badanych kompostach można stwierdzić, że pod tym kątem spełniają one wymogi określone w ustawie o nawozach i nawożeniu (Grąz K. i in., 2022). Parametry stężenia fosforu i azotu są podobne i właśnie to głównie w przeprowadzonym doświadczeniu obecność mikroplastików w podłożu może regulować wzrost u roślin. Istotne jest odpowiednie przygotowanie materiałów organicznych, aby proces kompostowania przebiegł prawidłowo. Ilość dostarczanego tlenu do przyzmy ma zasadnicze znaczenie dla procesu kompostowania, kompost przydomowy był systematycznie przerzucany przez właściciela i to na nim najlepiej rosły rośliny.

Największe cząstki zanotowano w kompoście przydomowym (średnia ok. 1400 nm), jak wynika z analiz, to one mają szkodliwość jak najmniejszą, widać że nie wnikają tak łatwo do roślin - rośliny rosły najlepiej na kompoście przydomowym.

Kolejnym co do wielkości cząstek podłoża zanotowano dla polepszacza glebowego (średnia ok. 746 nm) – rośliny rosły gorzej jak na kompoście przydomowym. Więc te rzędy wielkości cząstek już mogą bardziej przenikać do roślin i wpływać na ich wzrost.

Trzecim rodzajem podłoża co do wielkości cząstek był stabilizat – średnia wielkość cząstek ok. 649 nm i tu już nastąpił brak wzrostu roślin, ale z pewnością przyczyniła się do tego duża ilość plastików – co potwierdza przebadana struktura i skład podczas badania morfologii kompostów.

Vithangange i współautorzy (2021) podają, iż badania nad mikrodrobinami plastiku (MPs) koncentrują się głównie na ich obfitości w różnych ekosystemach, ekotoksykologii i aspektach zdrowotnych. Obecnie główny nacisk kładzie się na zmiany strukturalne i fizykochemiczne w glebie, ekotoksykologię i wpływ na wydajność wzrostu roślin. Kompost jest uważany za

jedno z głównych źródeł MP w środowiskach rolniczych, gdzie MP w kompoście mogą wpływać na cykl węglowy na wiele sposobów, takich jak procesy mikrobiologiczne w glebie, wzrost roślin lub rozkład ściółki (Vithanage M. i in., 2021). Mikrodrobiny plastiku (MPs) stanowią znane, niepożądane zanieczyszczenie ekosystemów. Zanieczyszczenia pochodzące z ładu są uważane za istotny czynnik przyczyniający się do ich powstawania, ale mikrodrobiny plastiku w środowisku łądowym pozostają w dużej mierze nieokreślone ilościowo. Podejrzewa się, że niektóre praktyki rolnicze, takie jak stosowanie plastikowej ściółki i kompostu, są głównymi źródłami mikrodrobin plastiku, ponieważ tworzywa sztuczne są narażone na działanie czynników atmosferycznych lub są obecne w nawozach organicznych (van Schothorst B. i in., 2021). Braun i współautorzy podają, że stosowanie kompostu jest powszechnie zalecaną praktyką rolniczą mającą na celu poprawę żyzności gleby. Jednak uważają, że prawie cały kompost jest prawdopodobnie zanieczyszczony plastikiem (Braun M. i in., 2023). Gui J. i współautorzy oraz Sun Y. i inni podają, że kompost z wiejskich odpadów komunalnych (RDW) jest szeroko stosowany w rolnictwie i ogrodnictwie, ale niewiele wiadomo na temat mikroplastików (MPs) w kompostowaniu RDW. W swoich badaniach wykryli poliestr, polipropylen (PP) i polietylen (PE) jako najczęściej występujące polimery (Gui J. i in., 2021; Sun Y. i in., 2021).

Song Y. i współpracownicy podają, iż wraz z wykryciem mikroplastików w odpadach organicznych/biomasie, ryzyko związane z wykorzystaniem technologii kompostowania tlenowego do przetwarzania odpadów było coraz bardziej rozpoznawane, ale wpływ mikroplastików na kompostowanie pozostaje w dużej mierze niezidentyfikowany. Celem ich badań było zbadanie wpływu popularnych mikroplastików - (polipropylenu (PP) i polietylenu (PE) podczas 55-dniowego kompostowania. W tym badaniu 0,5% PP i 0,5% PE dodano oddzielnie do mieszaniny obornika krowiego, słomy kukurydzianej i resztek fasoli. Traktowanie bez mikroplastików uznano za kontrolę (CK). Mikroplastiki znacząco zmniejszyły wartości wskaźnika kiełkowania nasion i zawartość odpowiednio o 32,40%-42,78% i 30,37%-37,04% (Song Y. i in., 2022).

7. Wnioski

Celem pracy było opracowanie metodyki badawczej definiującej ilość (wielkość) i jakość zanieczyszczeń mikro- i nanoplastikami odpadów biodegradowalnych i produktów ich przetwarzania w procesach stabilizacji tlenowej. Zdefiniowanie i możliwość weryfikacji mikro- i nanoplastików w odpadach pochodzenia organicznego z różnych źródeł pozwoli na zdefiniowanie zagrożeń dla środowiska wynikających z możliwości migracji zanieczyszczeń. Powoduje to ograniczenie możliwości stosowania produktów procesu kompostowania, czego do tej pory nie stosowano, gdyż mikro- i nanoplastiki nie były definiowane jako zagrożenie lub ograniczenie (cel 1 i 2).

Mikroplastiki obecne są w kompoście, który jest stosowany do nawożenia gleby. Konieczne jest scharakteryzowanie mikroplastików w celu ustalenia ich wpływu na ekosystem glebowy. Należy zauważyć, że potencjalny wpływ na funkcjonowanie ekosystemu glebowego, mogą wnikać w struktury roślinne, zakłócać pobieranie wody i składników odżywczych, a także wpływać na rozwój korzeni, łodyg i liści, dlatego konieczne jest wprowadzenie do badań odpadów weryfikacji zawartości ilości i jakości zanieczyszczeń w odpadach pochodzenia organicznego z różnych źródeł. Pozwoli to na możliwości wskazania kierunków wykorzystania odpadów, w zależności od stopnia ich zanieczyszczenia (cel 3).

W ramach prowadzonych badań opracowano metodykę badawczą pozwalającą na zdefiniowanie mikro- i nanoplastików w kompostach w ramach której zaproponowano:

- wybór 4 rodzajów kompostów tj. trawa kompostowana, kompost przydomowy, polepszacz glebowy oraz stabilizat;
- zbadanie morfologii kompostów (podział kompostów na 7 frakcji tj. odpady organiczne, tworzywa sztuczne, ceramika, papier i tektura, szkło, metal oraz tak zwane inne komponenty);
- badanie jakości kompostów (pomiar azotu, fosforu oraz pH);
- badania DLS tj. mierzenie wielkości cząstek występujących w kompostach i ich przesączach;
- mielenie materiału w celu ujednolicenia prób do badań FT-IR, gdzie określono rodzaje polimerów występujące w kompostach;
- nasadzenia roślin na kompostach i kompostach ze sztucznie dodanymi polimerami do podłoża, pomiary ilości wykiełkowanych nasion oraz wzrostu wyhodowanych roślin;

- badanie FT-IR polimerów w strukturach roślin w celu zbadania zjawiska migracji mikroplastików do struktur roślin. Przedstawiona powyżej metodyka pozwoliła na określenie zawartości / ilości zanieczyszczeń miko- i nanoplastików we wszystkich rodzajach odpadów biodegradowalnych pochodzących z różnych źródeł (cztery typy wybranych kompostów).

Uzyskane wyniki badań i ich analiza pozwoliły wysnuć następujące wnioski:

1. W przypadku spełnienia przez materiał nawozowy kryteriów dotyczących zawartości pierwiastków biogennych oraz innych norm jakościowych określonych dla nawozów w Rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 sierpnia 2024 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu, kluczowe znaczenie dla właściwości nawozowych ma obecność zanieczyszczeń z tworzyw sztucznych.

Tym samym można stwierdzić, że udało się potwierdzić trzecią tezę postawioną w ramach niniejszej pracy badawczej według której, zanieczyszczenie mikro- i nanoplastikami frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych jest realnym zagrożeniem dla realizacji procesów recyklingu organicznego i założeń gospodarki o obiegu zamkniętym.

2. Połączona analiza DLS i FT-IR przeprowadzona według opracowanej procedury pozwala znaleźć mierzalne wartości nano- i mikroplastików w kompostach z przetwarzania odpadów biodegradowalnych w procesach stabilizacji tlenowej.

Na podstawie analizy wyników badań własnych oraz sformułowanego powyżej wniosku można stwierdzić, że została wykazana prawdziwość dwóch tez, gdzie pierwsza teza stwierdza, że istnieje możliwość opracowania metodyki dla znalezienia mierzalnych wartości mikro- i nanoplastików w odpadach biodegradowalnych, kompostach i produktach pochodzących z przetwarzania odpadów biodegradowalnych w procesach stabilizacji tlenowej; a także teza druga stwierdzająca, że istnieje możliwość zdefiniowania mierzalnej wielkości zanieczyszczenia kompostu lub innego materiału pochodzącego z procesów recyklingu organicznego jako materiału nadającego się do wykorzystania w procesach rekultywacji w realizacji gospodarki o obiegu zamkniętym.

3. Obecność mikroplastików w podłożu ogranicza proces kiełkowania roślin nasiennych, a w niektórych przypadkach może doprowadzić do całkowitego zatrzymania wzrostu roślin.

W przypadku każdej z roślin dodatek polimerów do podłoża przyczyniał się do ograniczenia ich wzrostu. Na wszystkich badanych podłożach z dodatkiem polimerów wykiełkowało mniej roślin niż na danym podłożu bez domieszek polimerów. Najlepsze efekty wzrostu rośliny

osiągały na kompoście przydomowym, natomiast najniższą efektywność kiełkowania stwierdzono na stabilizacie.

4. Stabilizat, czyli odpad o kodzie odpadów 19 05 99 wykazuje najgorsze właściwości dla procesu kiełkowania roślin ze względu na stosunkowo wysoką zawartość zanieczyszczeń z tworzyw sztucznych, szkła, niską zawartość frakcji organicznej oraz najwyższą zawartość mikroplastików spośród badanych materiałów.

5. Nasadzenia roślin nasiennych w warunkach kontrolowanych oraz późniejsza analiza poszczególnych części roślin z zastosowaniem spektroskopii FT-IR pozwala potwierdzić zjawisko migracji nano/mikroplastików do struktur wewnętrznych roślin.

6. Warto podkreślić, że konieczna jest kontynuacja badań w obszarze zawartości zanieczyszczeń mikro- i nanoplastików w odpadach pochodzenia organicznego i wykorzystania produktów procesów stabilizacji w celu nawożenia.

7. Aktualnie obowiązujące rozporządzenia dotyczące nawozów organicznych i nawożenia nie uwzględniają zanieczyszczeń w postaci nano- i mikroplastików, dlatego konieczne jest zmodyfikowanie przepisów, co pozwoli ograniczyć migrację mikrozanieczyszczeń do gleby i do roślin.

Na podstawie analizy wyników badań własnych oraz sformułowanych powyżej najważniejszych wniosków szczegółowych można stwierdzić, że została wykazana **prawdziwość wszystkich trzech postawionych tez pracy.**

8. Streszczenie

Materia organiczna gleby odgrywa istotną rolę w chemicznych, mikrobiologicznych i fizycznych aspektach żyzności gleby. Odpady organiczne przekształcone w humifikowany materiał organiczny w procesie kompostowania można wykorzystać jako organiczne dodatki zwiększające zawartość materii organicznej i poprawiające żyzność i jakość gleby. Kompost musi być każdorazowo badany pod kątem jego jakości ponieważ parametry fizykochemiczne różnią się w zależności od rodzaju kompostowanych odpadów i technologii procesu kompostowania. Zgodnie z obowiązującymi przepisami jakość kompostu kontrolowana jest pod kątem zawartości substancji biogennej, substancji organicznych i metali ciężkich. To właśnie nadmierna obecność metali ciężkich stanowiła dotychczas główną barierę i ograniczenie w stosowaniu kompostów w procesach rekultywacji. Zmiany ilości i jakości odpadów, spowodowane komercyjnym życiem bogatych społeczeństw mogą również powodować konieczność rozszerzenia badań strumienia odpadów i zawartych w nich zanieczyszczeń. Do takich zanieczyszczeń należą m. in. miko- i nanoplastiki zawarte w odpadach biodegradowalnych. Wykazują one działanie toksyczne dla roślin, które wynika z ich zdolności do zakłócania procesów fizjologicznych, co prowadzi do stresu oksydacyjnego oraz uszkodzeń komórek. Mikroplastiki mogą wnikać w struktury roślinne, zakłócać pobieranie wody i składników odżywczych, a także wpływać na rozwój korzeni, łodyg i liści.

Celem pracy było opracowanie metodyki badawczej definiującej ilość (wielkość) i rodzaj mikro- i nanoplastików w odpadach biodegradowalnych i produktach ich przetwarzania w procesach stabilizacji tlenowej oraz weryfikacja możliwości kompostowania odpadów biodegradowalnych różnego pochodzenia, zanieczyszczonych w różnym stopniu mikro- i nanoplastikami, a także weryfikacja możliwości wykorzystania produktów recyklingu organicznego do celów rolniczego wykorzystania.

W pracy opracowano metodykę polegającą na określeniu wielkości cząstek tworzyw sztucznych występujących w kompostach. Materiał badawczy stanowiły 4 rodzaje kompostów: kompostowana trawa (odpady zielone), kompost przydomowy (odpady kuchenne), polepszacz glebowy (odpady zielone biodegradowalne pobrane z zakładu mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych) oraz stabilizat tj. kompost z odpadów komunalnych powstały w zakładzie mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych.

Jakość kompostów określono w aspekcie zawartości azotu, fosforu oraz pH. W celu określenia wielkości cząstek mikroplastików i nanoplastików we wszystkich badanych próbkach posłużono się techniką DLS. Identyfikację tworzyw sztucznych znajdujących się w badanym materiale wykonano w oparciu o analizę widm w podczerwieni na spektrometrze FT-IR. W dalszym etapie wykonano szereg badań eksperymentalnych polegających na przygotowaniu nasadzeń czterech wybranych roślin na kompostach i na kompostach z dodatkiem polimerów. Pozwoliło to uzyskać informację, czy dodatek polimerów do podłoża wpływa na wzrost i kondycję roślin. W celu sprawdzenia czy mikroplastik z podłoża migruje w struktury roślin, materiał roślinny przebadano na spektrometrze FT-IR. W ramach metodyki wykazano, że we wszystkich rodzajach kompostów występują mikroplastiki, które wpływają negatywnie na wzrost roślin oraz wnikają w głąb roślin, przez co stanowią realne zagrożenie dla środowiska i zdrowia człowieka.

9. Abstract

Soil organic matter plays a significant role in the chemical, microbiological, and physical aspects of soil fertility. Organic waste transformed into humified organic material during composting can be used as organic amendments to increase organic matter content and improve soil fertility and quality. Compost must be tested for its quality each time, as physicochemical parameters vary depending on the type of waste being composted and the composting technology. According to applicable regulations, compost quality is monitored for its content of nutrients, organic substances, and heavy metals. The excessive presence of heavy metals has previously been a major barrier and limitation to the use of compost in remediation processes. Changes in the quantity and quality of waste caused by the commercial lifestyle of affluent societies may also necessitate expanded research into waste streams and their contaminants. Such contaminants include microplastics and nanoplastics contained in biodegradable waste. These contaminants exhibit toxic effects on plants due to their ability to disrupt physiological processes, leading to oxidative stress and cell damage. Microplastics can penetrate plant structures, disrupt water and nutrient uptake, and affect the development of roots, stems and leaves.

The aim of the study was to develop a research methodology defining the amount (size) and type of micro- and nanoplastics in biodegradable waste and products of their processing in aerobic stabilization processes, as well as to verify the possibility of composting biodegradable waste of various origins, contaminated to varying degrees with micro- and nanoplastics, and to verify the possibility of using organic recycling products for agricultural purposes.

This study developed a methodology for determining the particle size of plastics found in composts. The research material consisted of four types of compost: composted grass (green waste), household compost (kitchen waste), soil improver (biodegradable green waste collected from a mechanical-biological municipal waste treatment plant), and stabilizer, i.e., compost from municipal waste produced at a mechanical-biological municipal waste treatment plant.

The quality of the composts was assessed in terms of nitrogen, phosphorus, and pH. DLS was used to determine the particle size of microplastics and nanoplastics in all tested samples. The identification of the type of plastics contained in the tested material was based on infrared

spectral analysis using an FT-IR spectrometer. Subsequently, a series of experimental studies was conducted involving the preparation of plantings of four selected plants in composts and in composts with added polymers. This determined whether the addition of polymers to the substrate affected the growth and health of the plants. To determine whether microplastics from the substrate migrated into plant structures, the plant material was tested using an FT-IR spectrometer. The methodology demonstrated that microplastics were present in all types of composts, which negatively impacted plant growth and penetrated deep into the plants, thus posing a real threat to the environment and human health.

10. Literatura

1. Accinelli, C., Abbas H., Bruno V., Khambhati V., Litte N., Bellaloui N., Shier W., 2022. Field studies on the deterioration of microplastic films from ultra-thin compostable bags in soil. *JEM.*, 305, 114407
2. Agapiou A., Vasileiou A., Stylianou M., Mikedi K., Zorpas A., 2020. Waste aroma profile in the framework of food waste management through household composting, *Journal of Cleaner Production*, Volume 257, 120340, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120340>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620303875>)
3. Anagnosti L., Varvaresou A., Pavlou P., Protopapa E., Carayanni V. 2021. Worldwide actions against plastic pollution from microbeads and microplastics in cosmetics focusing on European policies. Has the issue been handled effectively? *Mar. Pollut. Bull.*, 162, Article 111883
4. Arab M., Yu J., Nayebi B. 2024. Microplastics in sludges and soils: a comprehensive review on distribution, characteristics, and effects. *Chem Engineering.*, 8, 86. <https://doi.org/10.3390/chemengineering8050086>.
5. Aswathi V.P., Meera S., Maria C.G.A. et al. 2023. Green synthesis of nanoparticles from biodegradable waste extracts and their applications: a critical review. *Nanotechnol. Environ. Eng.* 8, 377–397. <https://doi.org/10.1007/s41204-022-00276-8>
6. Avidov R., Saadi, I., Krassnovsky, A., Hanan A., Medina S., Raviv M., Chen Y., Laor, Y. 2017. Composting municipal biosolids in polyethylene sleeves with forced aeration: Process control, air emissions, sanitary and agronomic aspects. *Waste Manag*, 67, 32–42 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.035>
7. Awasthi M. K., Pandey A.K., Khan J., Bundela p. S., Wong J.W, Selvam A., 2014. Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting, *Bioresource Technology*, Volume 168, Pages 214-221, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.048>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241400073X>)
8. Ayilara M. S., Olanrewaju O. S, Babalola O.O., Odeyemi O, 2020. Waste Management through Composting: Challenges and Potentials, *Sustainability*, 12(11), 4456; <https://doi.org/10.3390/su12114456>;
9. Aylaj M, Adani F., 2023. The Evolution of Compost Phytotoxicity during Municipal Waste and Poultry Manure Composting. *Journal of Ecological Engineering.* ;24(6):281-293. doi:10.12911/22998993/161822 DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/161822>
10. Bao Z., Lu W., 2023. Applicability of the environmental Kuznets curve to construction waste management: A panel analysis of 27 European economies, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 188, 106667, ISSN 0921-3449, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106667
11. Barai D. P, Gajbhiye S.L., Bhongade Y. M., Kanhere H. S., Kokare D. M., Raut N.A., Bhanvase B.A., Dhoble S.J. 2025. Performance evaluation of existing and advanced processes for remediation of microplastics: A comprehensive review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 13, Issue 3, 116194, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116194>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343725008905>)

12. Barceló D., Picó Y., Alfathan A.H., 2023, Microplastics: Detection in human samples, cell line studies, and health impacts, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 101:104204, doi: 10.1016/j.etap.2023.104204
13. Barrington S., Choinière D. , Trigui M. , Knight W., 2002. Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses, *Bioresour. Technol.*, 83(3), 189 [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00229-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00229-2)
14. Bashir S. M., Kimiko S. ,Mak C.-W., Fang J. K.-H., D. 2021. Gonçalves Personal care and cosmetic products as a potential source of environmental contamination by microplastics in a densely populated Asian city *Front. Mar. Sci.*, 8 Article 683482, 10.3389/fmars.2021.683482
15. Bhat M.A., Gaga, E.O. 2025. Unveiling the invisible: first discovery of micro- and nanoplastic sizesegregation in indoor commercial markets using a cascade impactor, *Air Quality, Atmosphere & Health* (2025)18, p. 1–13 <https://doi.org/10.1007/s11869-024-01624-0><https://doi.org/10.1007/s11869-024-01624-0>
16. Bhav P.P., Kulkarni B.N. 2019. Effect of active and passive aeration on composting of household biodegradable wastes: a decentralized approach. *Int J Recycl Org Waste Agricult* 8 (Suppl 1), 335–344. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-00306-7>
17. BN-89/9103-090.Unieszkodliwianie odpadów miejskich. Kompost z odpadów miejskich.
18. Borkowski M. 2023. "Metody zagospodarowania i koszty bioodpadów-studium przypadku wybranego magazynu." *Annals of the Polish Association of Agricultural & Agribusiness Economists* 25.3. DOI: 10.5604/01.3001.0053.8888
19. Boruszko D. 2011. Badania i ocena wartości nawozowej kompostów i wernikopstów, *Rocznik Ochrony Środowiska*, Tom 13, ISSN 1506-218X, 1417-1428
20. Bostan N., Ilyas N., Akhtar N., Mehmood S., Saman R.U., Sayyed R. Z., Shatid A.A., Alfaifi M. Y., Elbehairi S. E., Pandiaraj S., 2023. Toxicity assessment of microplastic (MPs); a threat to the ecosystem, *Environmental Research*, Volume 234, 116523, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116523>.
21. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935123013270>)
22. Braun M., Mail M., Krupp A. E., 2023. Wulf Amelung, Microplastic contamination of soil: Are input pathways by compost overridden by littering?, *Science of The Total Environment*, Volume 855, 158889, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158889>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722059885>)
23. Carpenter E.J. , Smith, K. L. Jr. 1972, Plastics on the Sargasso Sea Surface, *Science*, Vol 175, Issue 4027, pp. 1240-1241 DOI: 10.1126/science.175.4027.1240
24. Chai B, Li X, Liu H.,Lu G., Dang Z., Yin H., 2020. Bacterial communities on soil microplastic at Guiyu, an E-Waste dismantling zone of China, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 195, 110521, ISSN 0147-6513, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110521>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651320303602>)
25. Chamas A., Moon H., Zheng J., Qiu Y., Tabassum T., Jang J. H., Abu-Omar M., Scott S. L., Suh S., 2020. Degradation Rates of Plastics in the Environment, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 8, 9, 3494–3511, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
26. Chen Y. Y, Cheng X. T., Zeng Y.Q., 2023. The occurrence of microplastic in aquatic environment and toxic effects for organisms, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 20, pp. 10477-10490, 10.1007/s13762-023-04789-w

- (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343725008905>)
27. Corcoran, P.L. 2022. Degradation of Microplastics in the Environment. In: Rocha-Santos, T., Costa, M.F., Mouneyrac, C. (eds) Handbook of Microplastics in the Environment. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39041-9_10, Online ISBN 978-3-030-39041-9
 28. Cox K. D., Covernton G.A., Davies H.L., Dower J. F., Juanes F., Dudas S. E, 2019. Human Consumption of Microplastics, *Environ. Sci. Technol.*, 53, 12, 7068–7074, Publication Date: June 5, <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>
 29. de Souza L.C.G., Drumond M.A. 2022. Decentralized composting as a waste management tool connect with the new global trends: a systematic review. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19, 12679–12700, <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04504-1>
 30. Dede C., Ozer H., Dede O.H., Celebi A., Ozdemir S. 2023. Recycling Nutrient-Rich Municipal Wastes into Ready-to-Use Potting Soil: An Approach for the Sustainable Resource Circularity with Inorganic Porous Materials. *Horticulturae*, 9, 203. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020203>
 31. Dey U., Raj D., Mondal M., Roy P., Mukherjee A., Mondal N. K., Das K., 2023. Microplastics in groundwater: An overview of source, distribution, mobility constraints and potential health impacts during the anthropocene, *Groundwater for Sustainable Development*, Volume 23, 101036, ISSN 2352-801 <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101036>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352801X23001376>)
 32. Domingo J.L., Nadal M., 2009. Domestic waste composting facilities: A review of human health risks, *Environment International*, Volume 35, Issue 2, February 2009, Pages 382-389, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.004>;
 33. Dris R., Gasperi J., Saad M., Mirande C., Tassin B., 2016. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment?, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 104, Issues 1–2, p. 290-293, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X16300066>)
 34. Du F., Cai H., Zhang Q., Chen Q., Shi H., 2020, Microplastics in take-out food containers, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 399, 122969, ISSN 03043894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122969>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420309584>
 35. Dutta D., Rautela R., Lohit Kumar Srinivas Gujjala, Kundu D., Sharma P., Tembhare M., Kumar S.A. 2023. Review on recovery processes of metals from E-waste: A green perspective, *Science of The Total Environment*, Volume 859, Part 2, 160391, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160391>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722074939>)
 36. En-Nejmy, K. et al. 2024. Microplastics in soil: A comprehensive review of occurrence, sources, fate analytical techniques and potential impacts. *ECOTOX ENVIRON SAFE.*, 288, 117332
 37. Erdle L.M., Parto D.N., Sweetnam D., Rochman C.M, 2021. Washing machine filters reduce microfiber emissions: evidence from a community-scale pilot in Parry Sound Ontario, *Front. Mar. Sci.*, 8, Article 777865, 10.3389/fmars.2021.777865

38. Erfani, H., Swetanshu, Singh, P. et al. 2023. Evaluation of the performance of the compost plant for optimal operational evaluation. *Environ Monit Assess* 195, 1271. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11810-9>
39. Gąsior D., 2015, Determination of various waste fractions usefulness in terms of their application as alternative fuel, *Inżynieria Środowiska - Piece Przemysłowe & Kotły*, p.11-16,
40. Godswill A. C., Gospel A. C., Otuosorochi, A. I., Somtochukwu I. V. 2020. Industrial And Community Waste Management: Global Perspective. *American Journal of Physical Sciences*, 1(1), 1–16. <https://doi.org/10.47604/ajps.1043>
41. Gola, D., Tyagi, P. K., Arya, A., Chauhan, N., Agarwal, M., Singh, S. K., Gola, S. 2021. The impact of microplastics on marine environment: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, Volume 16, 2, 100552, ISSN 2215-153216, <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.10>
42. Golwala H., Zhang X, Iskander S. M., Smith A.L, 2020. Solid waste: An overlooked source of microplastics to the environment, *Science of The Total Environment*, Volume 769, 2021, 144581, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144581>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720381122>)
43. Goswami R.,K. , Agrawal K., Verma P., 2021. Multifaceted Role of Microalgae for Municipal Wastewater Treatment: A Futuristic Outlook toward Wastewater Management, *Clean Soil and water*, <https://doi.org/10.1002/clen.202100286>
44. Govarthan M., Liang Y.,Kamala-Kannan S., Kim W., 2022. Eco-friendly and sustainable green nano-technologies for the mitigation of emerging environmental pollutants,*Chemosphere*,Volume 287, Part 2,132234, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132234>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521027065>)
45. Grąż K., 2024. Qualitative Studies of Selected Types of Composts, *Rocznik Ochrony Środowiska* (ISSN:1506-218X), vol.26, pp.700-706, <https://doi.org/10.54740/ros.2024.061>
46. Grąż K., Gronba-Chyła A., Chyła K., 2023. Microplastics found in compost as a barrier to the circular economy (CE). *Przemysł chemiczny*, 102(4), 381—383. <https://doi.org/10.15199/62.2023.4.7>.
47. Grąż K., Gronba-Chyła A., Generowicz A., Kwaśny J., Kwaśnicki P., Ciula J., Łapiński J., Bajdur W., 2023. Microplastics from Plastic Waste as a Limitation of Sustainability of the Environment, *Rocznik Ochrony Środowiska*, Volume 25, pp.367-373, ISSN 2720-7501; <https://doi.org/10.54740/ros.2023.037>.
48. Grąż K., Kwaśny J., 2021. Microplastic in compost as a barrier to the development of circular economy *Architecture Civil Engineering Environment*, 4, p.137-144, DOI:10.21307/ACEE-2021-037
49. Grąż, K., Generowicz, A., Kwaśny, J. 2022. Nanoparticles in surface water, *Przemysł Chemiczny* 101(1). <https://doi.org/10.15199/62.2022.1.8>.
50. Grąż, K., Gronba-Chyła, A., Kwaśny, J. 2022. Zawartość fosforu i azotu w kompostach z odpadów pochodzących z różnych źródeł. *Przemysł Chemiczny*, 101(8). DOI:10.15199/62.2022.8.3
51. Gronba-Chyła A., Generowicz A., Alwaeli M., Mannheim V., Grąż K. , Kwaśnicki P., Kramek A. 2024., Municipal waste utilization as a substitute for natural aggregate in the

- light of the circular economy, *Journal of Cleaner Production*, Volume 440, 140907, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140907>.
52. Gui J., Sun Y., Wang J., Chen X., Zhang S., Wu D., 2021. Microplastics in composting of rural domestic waste: abundance, characteristics, and release from the surface of macroplastics, *Environmental Pollution*, Volume 274, 116553, ISSN0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116553>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749121001317>)
 53. Han W., Wang Z., Xie Q., Xi Chen, Su L., Xie H., Chen J., Fu Z., 2024. Plastic protective nets: A significant but neglected “reservoir” for priority chemicals as revealed by composition analysis, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 463, 132905, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132905>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389423021891>)
 54. He D. et al. 2018. Microplastics in soils: analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *Trends. Anal. Chem.*, 109, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.006>
 55. He S., Jia M., Xiang Y., Song B., Xiong W., Cao J., Peng H., Yang Y., Wang W., Yang Z., Zeng G., 2022. Biofilm on microplastics in aqueous environment: Physicochemical properties and environmental implications, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 424, Part B, 127286, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127286>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389421022548>)
 56. Hidalgo D., Martín-Marroquín J. M., Corona F., 2019. A multi-waste management concept as a basis towards a circular economy model, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 111, Pages 481-489, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.048>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119303612>)
 57. https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5484/12/1/1/ochrona_srodowiska_w_2018.pdf. (dostęp 21.05.2024) – GUS 2018
 58. [https://www.microtrac.pl/pl/produkty/dynamiczne-rozpraszanie-swiatla-\(DLS\)](https://www.microtrac.pl/pl/produkty/dynamiczne-rozpraszanie-swiatla-(DLS)) - dostęp 14.11. 2024r.
 59. Huang W., Deng J., Liang J., Xia X, 2023. Comparison of lead adsorption on the aged conventional microplastics, biodegradable microplastics and environmentally-relevant tire wear particles, *Chemical Engineering Journal*, Volume 460, 2023, 141838, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141838>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894723005697>)
 60. Hunt C.F, Lin W.H., Voulvoulis N., 2020. Evaluating alternatives to plastic microbeads in cosmetics *Nat. Sustain.*, 4, pp. 366-372, 10.1038/s41893-020-00651-w
 61. Hussain, N., Jaitley, V., Florence, A.T., 2001. Recent advances in the understanding of uptake of microparticulates across the gastrointestinal lymphatics. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 50 (1), 107e142. [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(01\)00152-1](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(01)00152-1)
 62. Iqbal, M.K., Nadeem, A., Sherazi, F. et al. 2015. Optimization of process parameters for kitchen waste composting by response surface methodology. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12, 1759–1768, <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0543-x>
 63. Jiang P., Zhang L., You S., Fan Y. F., Tan R.R., Klemeš J.J., You F., 2023. Blockchain technology applications in waste management: Overview, challenges and opportunities, *Journal of Cleaner Production*, Volume 421, 138466, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138466>.

64. Jung S., Cho S-H., Kim K-H, Kwon E. E, 2021. Progress in quantitative analysis of microplastics in the environment: A review, *Chemical Engineering Journal*, Volume 422,130154, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130154>.
65. Kalali E. N , Lotfian S., Shabestari M. E. , Khayatzadeh S., Zhao Ch,Nezhad H. Y., 2023. A critical review of the current progress of plastic waste recycling technology in structural materials, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Volume 40, 100763, ISSN 2452-2236 <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100763>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452223623000123>)
66. Kang J. ,Yin Z.,Pei F. ,Ye Z., Song G., Hongzhi Ling, Gao D.,Jiang X., Zhang Ch., Ge J., 2022. Aerobic composting of chicken manure with penicillin G: Community classification and quorum sensing mediating its contribution to humification, *Bioresource Technology*, Volume 352, 127097, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127097>.
67. Karimi, N., 2023. Assessing Global Waste Management: Alternatives to Landfilling in Different Waste Streams—A Scoping Review. *Sustainability*, 15, 13290. <https://doi.org/10.3390/su151813290>
68. Karnchanawong S., Suriyanon N., 2011, Household organic waste composting using bins with different types of passive aeration, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 55, Issue 5, Pages 548-553, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.01.006>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344911000085>)
69. Kawecki D., Scheed P.R.W., Nowack B., 2018. Probabilistic Material Flow Analysis of Seven Commodity Plastics in Europe, *Environ. Sci. Technol.*, 52, 17, 9874–9888 <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01513>
70. Kawka A., Achremowicz B. 2014. Owies- roślina Xxi wieku. Wykorzystanie żywieniowe i przemysłowe. *Nauka, przyroda, technika*, 8, 3, #41
71. Khalid N., Aqeel M, Noman A., Hashem M, Mostafa Y. S., Alhaithloul H.A.S., Alghanem S. M., 2021. Linking effects of microplastics to ecological impacts in marine environments, *Chemosphere*, Volume 264, Part 2,128541,ISSN 0045-6535,<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128541>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520327363>)
72. Khalid N., Aqeel M., Noman A., Khan S. M, Akhter N., 2021. Interactions and effects of microplastics with heavy metals in aquatic and terrestrial environments,*Environmental Pollution*,Volume 290, 118104,ISSN 0269-7491,<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118104>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749121016869>)
73. Kochanek A., Grąz K., Potok H., Gronba-Chyła A., Kwaśny J., Wiewiórska I., Ciula J., Basta E., Łapiński J., 2025. Micro-and Nanoplastics in the Environment: Current State of Research, Sources of Origin, Health Risks, and Regulations—A Comprehensive Review, *Toxics*, 13(7), 564; <https://doi.org/10.3390/toxics13070564>
74. Kodeks doradczy dobrej praktyki rolniczej w zakresie ograniczania amoniaku, 2019. Ministerstwo Rolnictwa i rozwoju wsi, <https://www.gov.pl/web/rolnictwo/kodeks-dobrej-praktyki-rolniczejw-zakresie-ograniczania-emisji-amoniaku>
75. Kostecka, J., Koc-Jurczyk J., Brudzisz K., 2014. Gospodarka odpadami w Polsce i Unii Europejskiej, *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, ISSN 1733-4381, vol. 16, issue 1, p. 1-10.

76. Kumar M., Ambika S., Hassani A., Nidheesh P.V., 2023. Waste to catalyst: Role of agricultural waste in water and wastewater treatment, *Science of The Total Environment*, Volume 858, Part 1, 2023, 159762, ISSN 0048-9697 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159762>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722068620>)
77. Kurniawan T.A., Meidiana Ch., Othman M.H.D., Goh H.H., Chew K. W., 2023. Strengthening waste recycling industry in Malang (Indonesia): Lessons from waste management in the era of Industry 4.0, *Journal of Cleaner Production*, Volume 382, 135296, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135296>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622048703>)
78. Lamichhane, G., Acharya, A., Marahatha, R. et al. 2023. Microplastics in environment: global concern, challenges, and controlling measures. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 20, 4673–4694. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04261-1>
79. Larrañaga A., Lizundia E., 2019. A review on the thermomechanical properties and biodegradation behaviour of polyesters, *European Polymer Journal*, Volume 121, 109296, ISSN 00143057, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109296>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305719311978>)
80. Li R. et al. 2020 Effect of prothioconazole on the degradation of microplastics derived from mulching plastic film: Apparent change and interaction with heavy metals in soil. *Environ. Pollut.*, 260, 113988
81. Li S., Ding F., Flury M., Wang 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*, Volume 300, 2022, 118945, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118945>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749122001592>)
82. Lin Y-D, Huang P-H, Chen Y-W, Hsieh C-W, Tain Y-L, Lee B-H, Hou C-Y, Shih M-K. 2023. Sources, Degradation, Ingestion and Effects of Microplastics on Humans: A Review. *Toxics*. 11(9):747. <https://doi.org/10.3390/toxics11090747>
83. Liu K., Tan Q., Yu J., Wang M., 2023. A global perspective on e-waste recycling, *Circular Economy*, Volume 2, Issue 1, 2023, 100028, ISSN 2773-1677, <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100028>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773167723000055>)
84. Liu P., Zhan X., Wu X., Li J., Wang H., Gao S., 2020. Effect of weathering on environmental behavior of microplastics: Properties, sorption and potential risks, *Chemosphere*, Volume 242, 125193, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125193>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653519324336>)
85. Liu W., Zhang W.J., Liu H., Guo X., Zhang X., Yao X., Cao Z., Zhang T., 2021. A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: characteristics and mechanisms, *Environ. Int.*, 146, Article 106277, [10.1016/j.envint.2020.106277](https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106277)
86. Lv, L., Yan, X., Feng, L., Jiang, S., Lu, Z., Xie, H., Li, C. 2021. Challenge for the detection of microplastics in the environment. *Water Environment Research*, 93(1), 5-15. <https://doi.org/10.1002/wer.1281>
87. Ma H., Pu S., Liu S., Bai Y., Mandal S., Xing B., 2020. Microplastics in aquatic environments: Toxicity to trigger ecological consequences, *Environmental Pollution*,

- Volume 261, 114089, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114089>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749119353643>)
88. Ma R., Wang J., Liu Y., Wang G., Yang Y., Liu Y., Kong Y., Lin J., Li Q., Li G, Yuan J., 2023. Dynamics of antibiotic resistance genes and bacterial community during pig manure, kitchen waste, and sewage sludge composting, *Journal of Environmental Management*, Volume 345, 118651, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118651>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723014391>)
 89. Mahabeer J., Kumari U., Lokhat D., Milan Carsky, Bhim Charan Meikap, 2023. Implementation of microplastics derived from waste plastic for uptake of MB dye: Performance and LCA study, *Desalination*, Volume 546, 116214, ISSN 0011-9164, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116214>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916422006695>)
 90. Maier J., Geyer R., Steigerwald D. G., 2023. Curbside recycling increases household consumption, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 199, 107271, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107271>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344923004056>)
 91. Majdouline Ch., Khamar M., El Jalil M. H., Cherkaoui E., Zouahri A. 2023. Unlocking the potential of organic household waste: a comprehensive assessment of composting suitability in Salé City, Morocco, *International Journal of Environmental Studies*, DOI: 10.1080/00207233.2023.2231274
 92. Mammo F. K. ,Amoah, I. D. Gani K. M. ,Pillay L.,Ratha S. K., Bux F.,Kumari S., 2020. Microplastics in the environment: Interactions with microbes and chemical contaminants, *Science of The Total Environment*, Volume 743, 140518, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140518>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720340407>)
 93. Manu M. K. , Kumar R., Garg A., 2019. Decentralized composting of household wet biodegradable waste in plastic drums: Effect of waste turning, microbial inoculum and bulking agent on product quality, *Journal of Cleaner Production*, Volume 226, Pages 233-241,ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.350>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619310662>)
 94. Marhoon A., Hernandez M L.H., Billy R. G., Müller D. B., Francesca Verones, 2024, Mapping Plastic and Plastic Additive Cycles in Coastal Countries: A Norwegian Case Study, *Environ. Sci. Technol.*, 58, 19, 8336–8348,2024, <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09176>
 95. Matthias C. 2012 Rillig Microplastic in Terrestrial Ecosystems and the Soil?, *Environ. Sci. Technol.* 46, 12, 6453–6454, <https://doi.org/10.1021/es302011r>
 96. Meegoda J. N., Hettiarachchi N.M.C, 2023. A path to a reduction in micro and nanoplastics pollution, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 20, p. 5555, 10.3390/ijerph20085555
 97. Mo J., Xin L., Zhao Ch., Qin Y., Nan Q., Mei Q., Wu W., 2023. Reducing nitrogen loss during kitchen waste composting using a bioaugmented mechanical process with low pH and enhanced ammonia assimilation, *Bioresource Technology*, Volume 372, 128664, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128664>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852423000901>)

98. Nagalakshmaiah M., Afrin S., Malladi R. P., Elkoun D. S., Robert M., Ansari M. A., Svedberg A., Karim Z, 2019. Chapter 9 - Biocomposites: Present trends and challenges for the future, Editor(s): Georgios Koronis, Arlindo Silva, In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Green Composites for Automotive Applications, Woodhead Publishing, Pages 197-215, ISBN 9780081021774, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102177-4.00009-4>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081021774000094>)
99. Namieciński B. 2023. Zadania gminy w zakresie opłaty z tytułu gospodarowania odpadami komunalnymi. Prawo Budżetowe Państwa i Samorządu [online]. 30 września, T. 11, nr 1, s. 95–117. [udostępniono 16.11.2023]. DOI 10.12775/PBPS.2023.005.
100. Nordahl S. L., Preble Ch. V, Kirchstetter T.W., Corinne D., Scown C. D., 2023. Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions from Composting, Environmental Science & Technology, 57 (6), 2235-2247, DOI: 10.1021/acs.est.2c05846 <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05846>
101. Pabortsava K., Lampitt R.S., 2020. High concentrations of plastic hidden beneath the surface of the Atlantic Ocean. Nat Commun 11, 4073. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17932-9>.
102. Padervand, M., Lichtfouse, E., Robert, D. et al. 2020. Removal of microplastics from the environment. A review. Environ Chem Lett 18, 807–828. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00983-1>
103. Pawul M., Sobczyk W., 2011. Edukacja ekologiczna w zakresie gospodarki odpadami jako narzędzie realizacji zrównoważonego rozwoju, Problemy Ekorozwoju , Vol. 6, nr 2 , p.147-156, <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPL2-0028-0075>
104. Pires A., Martinho G., 2019. Waste hierarchy index for circular economy in waste management, Waste Management, Volume 95, Pages 298-305, ISSN 0956-053X <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.014>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X19303927>)
105. Piscicelli L., 2023. The sustainability impact of a digital circular economy, Current Opinion in Environmental Sustainability, Volume 61, 101251, ISSN 1877-3435, <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101251>.
106. PN-EN ISO 11269-1:2013-06 – Jakość gleby. Oznaczanie wpływu zanieczyszczeń na florę glebową. Część I: Metoda pomiaru hamowania wzrostu korzeni.
107. PN-Z-15011-1:1998, Kompost z odpadów komunalnych. Pobieranie próbek
108. PN-Z-15011-3:2001, Kompost z odpadów komunalnych. Oznaczanie: pH, zawartości substancji organicznej, węgla organicznego, azotu, fosforu i potasu
109. Prosenc F., Leban P., Šunta U., Bavcon Kralj M. 2021 Extraction and Identification of a Wide Range of Microplastic Polymers in Soil and Compost. Polymers, 13, 4069. <https://doi.org/10.3390/polym13234069>
110. Rafey A., Siddiqui Z. F., 2023. A review of plastic waste management in India – challenges and opportunities, International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 103:16, 3971-3987, DOI: 10.1080/03067319.2021.1917560
111. Raj, D., Maiti, S. K., 2023. Critical assessment of approach towards estimation of microplastics in environmental matrices. Land Degradation & Development, 34(10), 2735–2749. <https://doi.org/10.1002/ldr.4665>

112. Real L., Pimentel E.. 2022, *Plastics Statistics: Production, Recycling, and Market Data. Recycled Materials for Construction Applications: Plastic Products and Composites*. Cham: Springer International Publishing. 103-113.
113. Ren X., Zeng G., Tang L., Wang, J.; Wan, J.; Wang, J.; Deng, Y.; Liu, Y.; Peng, B., 2018. The potential impact on the biodegradation of organic pollutants from composting technology for soil remediation. *Waste Manag*, 72, 138–149. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.11.032
114. Ren Z., Gui, X., Xu X., Zhao, L., Qiu H., Cao X. 2021. Microplastics in the soil-groundwater environment: aging, migration, and co-transport of contaminants—a critical review. *J. Hazard. Mater.*, 419, 126455
115. Rizos V., Tuokko K., Behrens A. 2017. *The Circular Economy: A review of definitions, processes and impacts*. CEPS Papers, (12440).
116. Rodziejewicz A., Łaba W., Sobolczyk J., Grzelak A, Drozd J., 2009. Kompostowanie odpadów keratynowych przy udziale szczepionki bakteryjnej w bioreaktorze obrotowym, *Inżynieria i Aparatura chemiczna*, 48, nr 3, 95-97;
117. Rolsky Ch., Kelkar V., Driver E., Halden R.U. 2020, Municipal sewage sludge as a source of microplastics in the environment, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, Volume 14, pp. 16-22, ISSN 2468-5844, <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.12.001>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468584419300832>)
118. Romero-Hernández O., Sergio R., 2018. Maximizing the value of waste: From waste management to the circular economy. *Thunderbird International Business Review* 60.5, 757-764.
119. Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska 1 z dnia 28 grudnia 2022 r. w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania niesegregowanych (zmieszanych) odpadów komunalnych, Dz.U.2024.666
120. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 sierpnia 2024 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu, Dz.U. 2024 poz. 1261
121. Ryckeboer J., Cops, S., Coosemans J. 2002. The Fate of Plant Pathogens and Seeds During Backyard Composting of Vegetable, Fruit and Garden Wastes. In: Insam, H., Riddech, N., Klammer, S. (eds) *Microbiology of Composting*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-08724-4_44
122. Sadia M., Mahmood A., Ibrahim M., Irshad M.K, Quddusi A.H.A., Bokhari A., Mubashir M., Chuah L.F., Show P.L. 2022. Microplastics pollution from wastewater treatment plants: a critical review on challenges, detection, sustainable removal techniques and circular economy, *Environ. Technol. Innov.*, 28, Article 102946
123. Sajjad M. et al. 2022. Microplastics in the soil environment: A critical review. *ENVIRON TECHNOL INNO.*, 27, 102408
124. Samanta P., Dey S., Kund, D., Dutta, D., Jambulkar, R., Mishra, R., Ghosh, A. R., Kumar, S. 2022., An insight on sampling, identification, quantification and characteristics of microplastics in solid wastes, *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, Volume 36, e00181, ISSN 22141588, <https://doi.org/10.1016/j.teac.2022.e00181>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214158822000289>)
125. Sánchez Ó. J., Ospina D. A., Montoya, S. 2017. Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process, *Waste Management*, Volume 69, 2017, Pages 136-153, ISSN 0956- 053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>.

126. Schwarz A.E., Lensen S.M.C., Langeveld E., Parker L.A., Urbanus J.H., 2023. Plastics in the global environment assessed through material flow analysis, degradation and environmental transportation, *Science of The Total Environment*, Volume 875, 162644, ISSN 00489697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162644>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723012603>)
127. Scopetani, C. et al. 2022. Hazardous contaminants in plastics contained in compost and agricultural soil. *Chemosphere.*, 293, 133645
128. Sewak A., Kim J., Rundle-Thiele S., Deshpande S. 2021. Influencing household-level waste-sorting and composting behaviour: What works? A systematic review (1995–2020) of waste management interventions. *Waste Management & Research.*; 39(7):892-909. doi:10.1177/0734242X20985608
129. Shah S. A. R., Zhang Q., Abbas J., Tang H., Al-Sulaiti, K. I. , 2023. Waste management, quality of life and natural resources utilization matter for renewable electricity generation: The main and moderate role of environmental policy, *Utilities Policy*, Volume 82, 101584, ISSN 0957-1787, <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101584>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178723000966>)
130. Shen M., Xiong W., Song B., Zhou Ch., Zeng E.A.G., Yaxin Zhang, 2022 Microplastics in landfill and leachate: Occurrence, environmental behavior and removal strategies, *Chemosphere*, Volume 305, 135325, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135325>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522018185>)
131. Shim W. J. , Hong S. H., Eo S. E., 2017 Identification methods in microplastic analysis: a review, *Analytical Methods*, Issue 9 <https://doi.org/10.1039/C6AY02558G>
132. Sikorska W., Musioł M., Rydz J., Kowalczyk M., & Adamus G., 2021. Industrial composting as a waste management method of polyester materials obtained from renewable sources. *Polimery*, 64(nr11-12), 818-827. <https://doi.org/10.14314/polimery.2019.11.11>;
133. Silva A.B., Bastos A.S., Justino C.I.L., da Costa J. P., Duarte A. C, Rocha-Santos T. A.P., 2018. Microplastics in the environment: Challenges in analytical chemistry - A review, *Analytica Chimica Acta*, Volume 1017, p. 1-19, ISSN 0003-2670, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.02.043>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003267018302587>)
134. Sobieraj, K., Giez, K., Stegenta-Dąbrowska, S., Pawęska, K., & Białowiec, A. 2022. Composting of vegan kitchen waste: applicability assessment. *Detritus*, 19.
135. Sołtyk, P., Dziekański P., 2023. Wydatki publiczne samorządu gminnego na gospodarkę odpadami komunalnymi w Polsce. *Studia Ekonomiczne. Gospodarka, Społeczeństwo, Środowisko*, 11.1 p. 115-142. <https://open.icm.edu.pl/items/2523b5f5-d198-4c67-a7aa-9206016482a3>
136. Song Y., Wang Y., Li R., Hou Y., Chen G., Yan B., Mu L., 2022, Effects of common microplastics on aerobic composting of cow manure: Physiochemical characteristics, humification and microbial community, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 10, Issue 6, 108681, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108681>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343722015548>)
137. Sonu N., Rani G. M., Pathania D., Abhimany, N., Umapathi, R., Rustagi S., Huh, Y. S., Gupta V. K., Kaushik A., Chaudhary V. 2023. Agro-waste to sustainable energy: A green

- strategy of converting agricultural waste to nano-enabled energy applications, *Science of The Total Environment*, Volume 875, 2023, 162667, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162667>.
138. Sorensen R. M. , Boris Jovanović B., 2021. From nanoplastic to microplastic: A bibliometric analysis on the presence of plastic particles in the environment, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 163, 111926, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111926>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X20310456>)
 139. Sun Y, Ren X , Pan J., Zhang Z., Tsui T-H, Luo L., Wang Q., 2020. Effect of microplastics on greenhouse gas and ammonia emissions during aerobic composting, *Science of The Total Environment*, Volume 737, 139856, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139856>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720333763>)
 140. Sun Y., Ren X., Rene E.R., Wang Z., Zhou L., Zhang Z., Wang Q., The degradation performance of different microplastics and their effect on microbial community during composting process, *Bioresource Technology*, Volume 332, 2021, 125133, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125133>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852421004727>)
 141. Świdarska-Środa A., Łojkowski W., Lewandowska M., Kurzydłowski K. I., Świat nanocząstek, Warszawa 2016 (schemat DLS)
 142. Timilsina A., Adhikari K., Yadav A. K., Joshi P., Ramena G., Bohara K., 2023 Effects of microplastics and nanoplastics in shrimp: Mechanisms of plastic particle and contaminant distribution and subsequent effects after uptake, *Science of The Total Environment*, Volume 894, 164999, ISSN 0048-9697 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164999>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723036227>)
 143. Tognetti C., Laos F., Mazzarino M. J., Hernández M. T. 2005. Composting vs. Vermicomposting: A Comparison of End Product Quality, *Compost Science & Utilization*, 13:1, 6-13, DOI: 10.1080/1065657X.2005.10702212
 144. Tomić T., Schneider D. R., 2020. Circular economy in waste management – Socio-economic effect of changes in waste management system structure, *Journal of Environmental Management*, Volume 267, 110564, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110564>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720304977>)
 145. Tourinho P. S., Kočí V., Loureiro S., van Gestel C. A., 2019, Partitioning of chemical contaminants to microplastics: Sorption mechanisms, environmental distribution and effects on toxicity and bioaccumulation, *Environmental Pollution*, 252:1246–1256, doi: 10.1016/j.envpol.2019.06.030.
 146. Ustawy o nawozach i nawożeniu z dnia 02.12.2020 Dz.U.2021.76;
 147. van Schothorst B., Beriot N., Huerta Lwanga E., Geissen V., 2021. Sources of Light Density Microplastic Related to Two Agricultural Practices: The Use of Compost and Plastic Mulch. *Environments* 2021, 8, 36. <https://doi.org/10.3390/environments8040036>
 148. Varghese, S.A.; Pulikkalparambil, H.; Promhuad, K.; Srisa, A.; Laorenza, Y.; Jarupan, L.; Nampitch, T.; Chonhenchob, V.; Harnkarnsujarit, N., 2023. Renovation of Agro-Waste for Sustainable Food Packaging: A Review. *Polymers*, 15, no.3: 648. <https://doi.org/10.3390/polym15030648>

149. Vethaak A. D., Legler J., 2021. Microplastics and human health, *Science* 371, 672-67. DOI:10.1126/science.abe5041
150. Vithanage M., Ramanayaka S., Hasinthara S., Navaratne A., 2021, Compost as a carrier for microplastics and plastic-bound toxic metals into agroecosystems, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, Volume 24, 100297, ISSN 2468-5844, <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100297>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468584421000696>)
151. Vivekanand A. Ch., Mohapatra S., Tyagi V. K., 2021. Microplastics in aquatic environment: Challenges and perspectives, *Chemosphere*, Volume 282, 2021, 131151, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131151>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521016234>)
152. Waitt G., Rankin K., 2022. Towards household sustainability? Experimenting with composting food waste, *Geoforum*, Volume 129, Pages 98-106, ISSN 0016-7185, <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.01.006>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016718522000069>)
153. Waqas, M.; Hashim, S.; Humphries, U.W.; Ahmad, S.; Noor, R.; Shoaib, M.; Naseem, A.; Hlaing, P.T.; Lin, H.A. 2023. Composting Processes for Agricultural Waste Management: A Comprehensive Review. *Processes*, 11, 731. <https://doi.org/10.3390/pr1103073>
154. Weglarz C., Holsen L. K., Ribbons R.R., Hall D. J., 2018. Microbial diversity and nitrogen-metabolizing gene abundance in backyard food waste composting systems, *Journal of Applied Microbiology*, Volume 125, Issue 4, 1, Pages 1066–1075, <https://doi.org/10.1111/jam.13945>
155. Wei W., Huang Q-S, Sun J., Dai X., Ni B-J., 2019. Revealing the Mechanisms of Polyethylene Microplastics Affecting Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge, *Environ. Sci. Technol*, 53, 16, 9604–9613, B. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02971>
156. Weithmann N. et al., 2018. Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Sci. Adv.* 4, eaap8060, DOI:10.1126/sciadv.aap8060 DOI: 10.1126/sciadv.aap8060
157. Wu X., Pan J., Li M., Li Y., Bartlam M., Wang Y., 2019, Selective enrichment of bacterial pathogens by microplastic biofilm, *Water Research*, 165:114979, doi: 10.1016/j.watres.2019.114979.
158. Xu L.; Wang, Y.; Wei, F.; Dai, Z.; Zhang, M. 2024. Transport behavior of microplastics in soil-water environments and its dependence on soil components, *Environ. Pollut.*, 346, 123542
159. Ya H., Jiang B., Xing Y., Zhang T., Lv M., Wang X., 2021. Recent advances on ecological effects of microplastics on soil environment, *Science of The Total Environment*, Volume 798, 149338, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149338>
160. Ya H., Xing Y., Zhang T., Lv M., Jiang B., 2022. LDPE microplastics affect soil microbial community and form a unique plastisphere on microplastics, *Applied Soil Ecology*, Volume 180, 104623, ISSN 0929-1393, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104623>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139322002396>)
161. Yang H., Dong H., Huang Y., Chen G., Wang J., 2022, Interactions of microplastics and main pollutants and environmental behavior in soils, *Science of The Total Environment*,

- Volume 821,153511, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153511>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722006039>)
162. Yang, M., Chen, L., Wang, J. et al. 2023. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. *Environ Chem Lett* 21, 55–80, <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>
 163. Yang, X., Y. B. Man, M. H. Wong, R. B. Owen, and K. L. Chow. 2022. Environmental health impacts of microplastics exposure on structural organization levels in the human body. *The Science of the Total Environment* 825:154025. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154025.
 164. Yaseen A., Assad I., Sofi M.S., Hashmi M.Z., Bhat S.U., 2022. A global review of microplastics in wastewater treatment plants: Understanding their occurrence, fate and impact, *Environ. Res.*, 212, Article 113258, 10.1016/j.envres.2022.113258
 165. Yu F., Wu, Z., Wang J., Li Y., Chu R., Pei Y., Ma J., 2022. Effect of landfill age on the physical and chemical characteristics of waste plastics/microplastics in a waste landfill sites, *Environmental Pollution*, Volume 306,119366, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119366>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749122005802>)
 166. Yu Q., Hu X., Yang B., Zhang G., Wang J., Ling W., 2020. Distribution, abundance and risks of microplastics in the environment, *Chemosphere*, Volume 249,126059,ISSN 0045-6535,<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126059>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520302526>)
 167. Zhan Y., Zhang Z, Ma T., Zhang X., Wang R., Liu Y., Sun B., Xu T., Ding G., Wei Y., Li J., 2021. Phosphorus excess changes rock phosphate solubilization level and bacterial community mediating phosphorus fractions mobilization during composting, *Bioresource Technology*, Volume 337, 125433, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125433>.
 168. Zhang Q., Zhao Y., Fangni Du, Huiwen Cai, Gehui Wang, Huahong Shi, Microplastic Fallout in Different Indoor Environments, *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54, 11, 6530–6539, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00087>
 169. Zhao X, Korey M., Li K., Copenhaver K., Tekinalp H., Celik S., Kalaitzidou K., Ruan R., Ragauskas A., Ozcan J.S., 2022, Plastic waste upcycling toward a circular economy, *Chemical Engineering Journal*, Volume 428, 131928, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131928>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894721035087>)
 170. Zhou X., Yang J., Xu S., Wang J., Zhou Q., Li Y., Tong X., 2020. Rapid in-situ composting of household food waste, *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 141, 259-266, ISSN 0957-5820 <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.039>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582020302706>)
 171. Zurub R. E., Cariaco Y., Wade M. G., Bainbridge S. A., 2024, Microplastics exposure: Implications for human fertility, pregnancy and child health, *Frontiers in Endocrinology*, 14:1330396, doi: 10.3389/fendo.2023.1330396

11. Spis tabel

Tabela 5.1 Kompostowana trawa – skład morfologiczny (opracowanie własne)	44
Tabela 5.2 Kompost przydomowy – skład morfologiczny (opracowanie własne)	45
Tabela 5.3 Polepszacz glebowy – skład morfologiczny (opracowanie własne).....	46
Tabela 5.4 Stabilizat – skład morfologiczny (opracowanie własne).....	47
Tabela 5.5 Zbiorcze zestawienie zawartości poszczególnych frakcji w wybranych typach kompostów (opracowanie własne)	48
Tabela 5.6 Frakcje z kompostowanej trawy (opracowanie własne)	52
Tabela 5.7 Frakcje z przydomowego kompostownika (opracowanie własne).....	52
Tabela 5.8 Frakcje kompostu polepszacza glebowego z mechaniczno-biologicznej przeróbki odpadów (opracowanie własne)	52
Tabela 5.9 Frakcje stabilizatu z mechaniczno - biologicznej przeróbki odpadów komunalnych (opracowanie własne)	53
Tabela 5.10 Wyniki absorpcji dla kompostów i prób wzorcowych (opracowanie własne).....	55
Tabela 5.11 Wyniki odczynu pH i przewodności w badanych kompostach (opracowanie autor)	57
Tabela 5.12 Minimalna zawartość wybranych składników w nawozach organicznych	60
Tabela 5.13 Klasy kompostów wytwarzanych z odpadów komunalnych	61
Tabela 5.14 Wyniki analizy wielkości cząstek kompostowanej trawy.....	74
Tabela 5.15 Wyniki analizy DLS skoszonej trawy kompostowanej pod względem wielkości cząstek – przesącz	76
Tabela 5.16 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla kompostowanej trawy (opracowanie własne)	77
Tabela 5.17 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla otrzymanego przesączu z kompostowanej trawy (opracowanie własne).....	79
Tabela 5.18 Wyniki analizy kompostu przydomowego pod względem wielkości cząstek	81
Tabela 5.19 Wyniki analizy przesączu z kompostu przydomowego pod względem wielkości cząstek.	83
Tabela 5.20 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla kompostu przydomowego 1 (opracowanie własne)	84
Tabela 5.21 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla kompostu przydomowego 2 (opracowanie własne)	86
Tabela 5.22 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla przesączu z kompostu przydomowego (opracowanie własne).....	88
Tabela 5.23 Wyniki analizy wielkości cząstek obecnych w polepszaczu glebowym	90
Tabela 5.24 Wyniki wielkości cząstek obecnych w analizowanym przesączu powstałym z polepszacza glebowego	91
Tabela 5.25 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla polepszacza glebowego 1 (opracowanie własne)	93
Tabela 5.26 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla polepszacza glebowego 2 (opracowanie własne)	96
Tabela 5.27 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla polepszacza glebowego – przesącz (opracowanie własne).....	98
Tabela 5.28 Wyniki analizy wielkości cząstek obecnych w stabilizacie	100
Tabela 5.29 Wyniki analizy wielkości cząstek obecnych w przesączu ze stabilizatu	102
Tabela 5.30 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla stabilizatu 5 (opracowanie własne)	104

Tabela 5.31 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla stabilizatu 10 (opracowanie własne)	107
Tabela 5.32 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla stabilizatu 15 (opracowanie własne)	109
Tabela 5.33 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg poszczególnych bibliotek dla otrzymanego przesączu ze stabilizatu (opracowanie własne)	111
Tabela 5.34 Charakterystyka granulometryczna w zakresie nano i mikrometrycznym dla badanych próbek (opracowanie własne)	114
Tabela 5.35 . Zestawienie wyników analizy FT-IR polimerów w próbkach badanych (opracowanie własne)	115
Tabela 5.36 Owies – zestawienie wzrostu w zależności od użytego podłoża (opracowanie własne)	123
Tabela 5.37 Pszenica – zestawienie wzrostu w zależności od użytego podłoża (opracowanie własne)	124
Tabela 5.38 Papryka – zestawienie wzrostu w zależności od użytego podłoża (opracowanie własne)	126
Tabela 5.39 Pomidor – zestawienie wzrostu w zależności od użytego podłoża (opracowanie własne)	128
Tabela 5.40 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla fragmentu rośliny (pszenicy) wyrosniętej na próbce kompostu (opracowanie własne)	131
Tabela 5.41 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla fragmentu rośliny (owsa) wyrosniętej na próbce kompostu (opracowanie własne) ..	133
Tabela 5.42 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla fragmentu rośliny (pomidora) wyrosniętej na próbce kompostu (opracowanie własne)	135
Tabela 5.43 Zestawienie współczynnika dopasowania związku do przedstawionego widma wg danej biblioteki dla fragmentu rośliny (papryka) wyrosniętej na próbce kompostu (opracowanie własne)	137
Tabela 13.1 Zestawienie z badania morfologii trawy kompostowanej podział na frakcje – 50 próbek (opracowanie własne)	176
Tabela 13.2 Zestawienie z badania morfologii kompostu przydomowego - podział na frakcje – 50 próbek (opracowanie własne)	177
Tabela 13.3 Zestawienie z badania morfologii polepszacza glebowego - podział na frakcje – 50 próbek (opracowanie własne)	178
Tabela 13.4 Zestawienie z badania morfologii stabilizatu podział na frakcje – 50 próbek (opracowanie własne)	179
Tabela 13.5 Wyniki odczynu pH, przewodności oraz obecności związków chemicznych w kompostach (opracowanie własne)	181
Tabela 13.6 Wyniki analizy cząstek trawy zmielonej z PET (przesącz) pod względem wielkości cząstek (opracowanie własne)	184
Tabela 13.7 Polepszacz glebowy DLS– seria jesień 3 min. 400rp (opracowanie własne)	200
Tabela 13.8 Wyniki analizy polepszacza glebowego - przesącz - wielkość cząstek	201
Tabela 13.9 Wyniki analizy polepszacza glebowego - zmielonego - wielkość cząstek (opracowanie własne)	202
Tabela 13.10 Wyniki analizy polepszacza glebowego - zmielonego 2- wielkość cząstek (opracowanie własne)	204

Tabela 13.11 Wyniki analizy polepszacza glebowego - zmielonego – rozcieńczony - wielkość cząstek (opracowanie własne)	204
Tabela 13.12 Wyniki analizy polepszacza glebowego – ustany- wielkość cząstek (opracowanie własne)	205
Tabela 13.13 Polepszacza glebowy - po młynach jesienny II (opracowanie własne).....	206
Tabela 13.14 Polepszacz glebowy jesienny II spod sączka -2 min, 400 rpm (opracowanie własne)..	207
Tabela 13.15 Polepszacz z glebowy jesień II po młynach - spod sączka (opracowanie własne).....	208
Tabela 13.16 Badanie wielkości cząstek stabilizatu - seria 1 (opracowanie własne)	222
Tabela 13.17 Badanie wielkości cząstek stabilizatu -przesącz - seria 1 (opracowanie własne)	224
Tabela 13.18 Badanie wielkości cząstek stabilizatu - seria 2 (opracowanie własne)	226
Tabela 13.19 Wielkość cząstek stabilizatu – przesącz seria 2 (opracowanie własne).....	227
Tabela 13.20 Wielkość cząstek stabilizatu – seria 3 (opracowanie własne)	229
Tabela 13.21 Wielkość cząstek stabilizatu – przesącz - seria 3 (opracowanie własne).....	230

12. Spis rysunków

Rysunek 3.1 Schemat obrazujący zakres pracy badawczej - plan badań (opracowanie własne)	30
Rysunek 3.2 Schemat przygotowania próby miarodajnej do określenia ilości i jakości zanieczyszczeń mikro- i nanoplastików do dalszych badań (opracowanie własne).....	31
Rysunek 3.3 Schemat obrazujący migracje mikroplastików do roślin (opracowanie własne)	32
Rysunek 4.1 Miejsce posesji poboru próbek kompostowanej trawy (opracowanie własne)	33
Rysunek 4.2 Przekompostowana skoszona trawa pobrana do badań (fot. autor)	34
Rysunek 4.3 Miejsce poboru próbek z kompostownika przydomowego (opracowanie własne)	34
Rysunek 4.4 Kompostownik przydomowy, z którego pobierano próbki do badań (fot. autor).....	35
Rysunek 4.5 Próbkę kompostu przydomowy pobranego do badań (fot. autor).....	35
Rysunek 4.6 Polepszacz glebowy (fot. autor).....	36
Rysunek 4.7 Polepszacz glebowy (fot. autor).....	36
Rysunek 4.8 Stabilizat przeznaczony do składowania (fot. autor)	37
Rysunek 4.9 Stabilizat (fot. autor)	37
Rysunek 4.10 Stabilizat (fot. autor)	38
Rysunek 4.11 Stabilizat (fot. autor)	38
Rysunek 4.12 Stabilizat (fot. autor)	38
Rysunek 4.13 Stabilizat (fot. autor)	38
Rysunek 4.14 Stabilizat (fot. autor)	38
Rysunek 4.15 Schemat zastosowanych badań (opracowanie własne)	42
Rysunek 5.1 Udział frakcji w badanych próbkach (opracowanie własne).....	49
Rysunek 5.2 Próbkę kompostu nakładana do wytrząsarki lab. (fot. autor)	51
Rysunek 5.3 Próbkę analizowanego nawozu z MBP przygotowywana do analizy frakcyjnej (fot. autor)	51
Rysunek 5.4. Wytrząsarka laboratoryjna zlokalizowana na terenie Filii KUL w Stalowej Woli (fot. autor).....	51
Rysunek 5.5 Próbkę wzorcowe (fot. autor)	54
Rysunek 5.6 Próbkę z kompostami użyte do badań (fot. autor)	54
Rysunek 5.7 Spektrofotometr użyty do pomiaru zawartości fosforanów (fot. autor).....	55
Rysunek 5.8 Kuweta z próbką w celi pomiarowej spektrofotometru UV-VIS (fot. autor).....	55
Rysunek 5.9 Wykres krzywej kalibracyjnej zależności absorbancji od stężenia dla poszczególnych próbek wzorcowych stężenie fosforanów dla badanych kompostów (opracowanie własne)	56
Rysunek 5.10 Średnia zawartość fosforu i azotu w poszczególnych badanych kompostach (opracowanie własne)	58
Rysunek 5.11 Schemat obrazujący system pomiarowy - Zetasizer	62
Rysunek 5.12 Analizator wielkości cząstek - Zetasizer Nano ZS Malvern znajdujący się w Filii KUL w Stalowej Woli (fot. autor).....	63
Rysunek 5.13 Homogenizer wirnikowy CatUnidrive 1000D zlokalizowany w Filii KUL w Stalowej Woli (fot. autor)	64
Rysunek 5.14 Homogenizacja przykładowych próbek – obroty ok. 30000, czas około 1 min (fot. autor)	64
Rysunek 5.15 Sączenie skompostowanej trawy (fot. autor)	65
Rysunek 5.16 Powstały przesącz skompostowanej trawy (fot. autor).....	65
Rysunek 5.17 Sączenie kompostu przydomowego (fot. autor).....	66
Rysunek 5.18 Sączenie polepszacza glebowego (fot. autor).....	66
Rysunek 5.19 Stabilizat – przesącz (fot. autor).....	67

Rysunek 5.20 Spektrometr FT-IR ATR znajdujący się w Filii KUL w Stalowej Woli (fot. autor)	68
Rysunek 5.21 Młyn tnący znajdujący się w Filii KUL w Stalowej Woli (fot. autor)	69
Rysunek 5.22 Kompostowana trawa zmielona w młynie tnącym (fot. autor)	69
Rysunek 5.23 Kompost przydomowy zmielony w młynie tnącym (fot. autor)	69
Rysunek 5.24 Polepszacz glebowy zmielony w młynie tnącym (fot. autor)	70
Rysunek 5.25 Stabilizat zmielony młyn tnący (fot. autor)	70
Rysunek 5.26 Młyn planetarno-kulowy znajdujący się Filii KUL w Stalowej Woli (fot. autor)	71
Rysunek 5.27 Kompostowana trawa w misie stalowej przed mieleniem (fot. autor)	71
Rysunek 5.28 Kompostowana trawa zmielona w młynie planetarno-kulowym (fot. autor)	71
Rysunek 5.29 Kompost przydomowy gotowy do mielenia w misie od młyna planetarno-kulowego (fot. autor)	72
Rysunek 5.30 Kompost przydomowy zmielony w młynie kulowym	72
Rysunek 5.31 Polepszacz glebowy zmielony w młynie planetarno-kulowym (fot. autor)	72
Rysunek 5.32 Stabilizat zmielony – młyn planetarno - kulowy (fot. autor)	73
Rysunek 5.33 Średnia wielkość cząstek trawy kompostowanej podana w nanometrach (opracowanie własne)	75
Rysunek 5.34 Widmo FT-IR trawy zmielonej kompostowanej tydzień (opracowanie własne)	77
Rysunek 5.35 Widmo FT-IR trawy zmielonej kompostowanej – przesącz (opracowanie własne)	79
Rysunek 5.36 Widmo FT-IR kompostu przydomowego 1 (opracowanie własne)	84
Rysunek 5.37 Widmo FT-IR kompostu przydomowego 2 (opracowanie własne)	86
Rysunek 5.38 Widmo FT-IR otrzymanego przesączu z kompostu przydomowego (opracowanie własne)	88
Rysunek 5.39 Średnie wartości wielkości cząstek polepszacza glebowego - przesącz (opracowanie własne)	92
Rysunek 5.40 Widmo FT-IR analizowanego polepszacza glebowego 1 (opracowanie własne)	93
Rysunek 5.41 Widmo FT-IR analizowanego polepszacza glebowego 2 (opracowanie własne)	95
Rysunek 5.42 Widmo FT-IR analizowanego polepszacza glebowego – przesącz (opracowanie własne)	97
Rysunek 5.43 Średnie wartości wielkości cząstek w stabilizacie prezentowane dla 30 analizowanych próbek z uśrednieniem do 10 pomiarów (opracowanie własne)	101
Rysunek 5.44 Średnie wartości wielkości cząstek stabilizatu – przesącz -prezentowane dla 30 analizowanych próbek z uśrednieniem do 10 pomiarów (opracowanie własne)	103
Rysunek 5.45 Widmo FT-IR analizowanego stabilizatu 5 (opracowanie własne)	104
Rysunek 5.46 Widmo FT-IR analizowanego stabilizatu 10 (opracowanie własne)	106
Rysunek 5.47 Widmo FT-IR analizowanego stabilizatu 15 (opracowanie własne)	109
Rysunek 5.48 Widmo FT-IR analizowanego przesączu powstałego ze stabilizatu (opracowanie własne)	111
Rysunek 5.49 Zestawienie wyników analizy DLS dla trzech zakresów rozmiarów cząstek (opracowanie własne)	113
Rysunek 5.50 Nasadzonych roślin na różnych podłożach - świeżo posiane (fot. autor)	117
Rysunek 5.51 Podłoże: ziemia uniwersalna (Planta); rośliny: owies, pszenica, papryka i pomidor) – stan nasadzenia po 28 dniach (fot. autor)	118
Rysunek 5.52 Podłoże: kompost przydomowy; rośliny: (owies, pszenica, papryka i pomidor) - stan nasadzenia po 28 dniach (fot. autor)	119
Rysunek 5.53 Podłoże: kompost przydomowy plus polimery, rośliny: owies, pszenica, papryka i pomidor - stan nasadzenia po 28 dniach (fot. autor)	120

Rysunek 5.54 Podłoże: polepszacz glebowy (owies, pszenica, papryka i pomidor) - stan nasadzenia po 28 dniach (fot. autor)	121
Rysunek 5.55 Podłoże: polepszacz plus polimery – nasadzony owies, pszenica, papryka i pomidor - stan nasadzenia po 28 dniach (fot. autor).....	121
Rysunek 5.56 Przykładowe okazy owsa wyrosnięte na poszczególnych typach podłoża (fot. autor)	122
Rysunek 5.57 Przykładowe rośliny pszenicy wykiełkowane na poszczególnych typach podłoża (fot. autor).....	125
Rysunek 5.58 Przykładowe rośliny papryki wyrosnięte na poszczególnych typach podłoża (fot. autor)	127
Rysunek 5.59 Przykładowe rośliny pomidora wyrosnięte na poszczególnych typach podłoża (fot. autor).....	129
Rysunek 5.60 Zestawienie ilości wykiełkowanych nasion na poszczególnych typach podłoża (opracowanie własne)	130
Rysunek 5.61 Widmo FT-IR - pszenicy, która wyrosła na próbce kompostu (opracowanie własne) .	131
Rysunek 5.62 Widmo FT-IR - owsa, który wyrósł na próbce kompostu (opracowanie własne)	133
Rysunek 5.63 Widmo FT-IR - pomidora, który wyrósł na próbce kompostu (opracowanie własne) .	135
Rysunek 5.64 Widmo FT-IR - papryki, który wyrósł na próbce kompostu (opracowanie własne).....	136
Rysunek 13.1 Średnia zawartość fosforu w badanych kompostach (opracowanie własne)	180
Rysunek 13.2 Średnia zawartość azotu w badanych kompostach (opracowanie własne)	180
Rysunek 13.3 Dane z GUS – ilość odpadów komunalnych zebranych do procesu kompostowania czy fermentacji w Polsce w roku 2023 (stan na dzień 2025.03.20).....	181
Rysunek 13.4 Widma FT-IR trawa kompostowana z podpisanymi pikami (opracowanie własne)	182
Rysunek 13.5 Widma FT-IR trawa kompostowana – przesącz z podpisanymi pikami	182
Rysunek 13.6 Widma FT-IR trawa kompostowana – materiał pobrany z sącza i wysuszony w suszarce laboratoryjnej przesącz (opracowanie własne)	183
Rysunek 13.7 Widma FT-IR trawa kompostowana – materiał pobrany z sącza i wysuszony w suszarce laboratoryjnej przesącz - piki- (opracowanie własne)	183
Rysunek 13.8 Widma FT-IR trawa kompostowana zmielona, trawa zmieszana z polimerami, widmo pojedyncze PET , widmo celulozy	184
Rysunek 13.9 Zestawienie średniej wielkości cząstek trawy kompostowanej z analizy wielkości cząstek z DLS (opracowanie własne)	185
Rysunek 13.10 Średnia wielkość cząstek trawy kompostowanej tydzień (opracowanie własne)	185
Rysunek 13.11 Średnia wielkość cząstek przesącza z trawy kompostowanej tydzień zmieszanej zmielonej z PET (opracowanie własne)	186
Rysunek 13.12 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 1(opracowanie własne)....	186
Rysunek 13.13 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 2 (opracowanie własne)...	187
Rysunek 13.14 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 3 (opracowanie własne)...	187
Rysunek 13.15 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 4 (opracowanie własne)...	188
Rysunek 13.16 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 5 (opracowanie własne)...	188
Rysunek 13.17 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 6 (opracowanie własne)...	189
Rysunek 13.18 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 7 (opracowanie własne)...	189
Rysunek 13.19 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 8 - przykładowe okno z danymi (opracowanie własne)	190
Rysunek 13.20 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 9 (opracowanie własne)...	190
Rysunek 13.21 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 10 (opracowanie własne) .	191
Rysunek 13.22 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 11 (opracowanie własne) .	191
Rysunek 13.23 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 12 (opracowanie własne) .	192

Rysunek 13.24 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 13 (opracowanie własne).	192
Rysunek 13.25 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 13 (opracowanie własne).	193
Rysunek 13.26 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 1 (opracowanie własne).....	193
Rysunek 13.27 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 2 (opracowanie własne).....	194
Rysunek 13.28 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 3 (opracowanie własne).....	194
Rysunek 13.29 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 3 (opracowanie własne).....	195
Rysunek 13.30 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 4 (opracowanie własne).....	195
Rysunek 13.31 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 5 (opracowanie własne).....	196
Rysunek 13.32 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 6 (opracowanie własne).....	196
Rysunek 13.33 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 7 (opracowanie własne).....	197
Rysunek 13.34 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 8 (opracowanie własne).....	198
Rysunek 13.35 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 9 (opracowanie własne).....	198
Rysunek 13.36 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 10 (opracowanie własne)...	199
Rysunek 13.37 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 11 (opracowanie własne)...	199
Rysunek 13.38 Wyniki analizy polepszacza glebowego - wielkość cząstek (opracowanie własne)	200
Rysunek 13.39 Wyniki analizy polepszacza glebowego - wielkość cząstek (przesącz) (opracowanie własne)	201
Rysunek 13.40 Wyniki analizy polepszacza glebowego - zmielonego - wielkość cząstek	203
Rysunek 13.41 Wyniki analizy polepszacza glebowego - przesącz - wielkość cząstek (opracowanie własne)	203
Rysunek 13.42 Polepszacza glebowy - rozkład wielkości cząstek (opracowanie własne).....	206
Rysunek 13.43 Polepszacz z glebowy jesień II - DLS - spod sączka (opracowanie własne)	208
Rysunek 13.44 Analiza FT-IR worka biodegradowalnego (opracowanie własne)	209
Rysunek 13.45 Analiza FT-IR różnych polimerów (opracowanie własne)	209
Rysunek 13.46 Widmo FT-IR polepszacza glebowego z pasmem PET (opracowanie własne).....	210
Rysunek 13.47 Widma FT-IR próbek 1-5 stabilizatu (opracowanie własne)	210
Rysunek 13.48 Widma FT-IR próbek 6-10 stabilizatu (opracowanie własne)	211
Rysunek 13.49 Widma FT-IR próbek 11-15 stabilizatu (opracowanie własne)	211
Rysunek 13.50 Widma FT-IR próbek 16-20 stabilizatu (opracowanie własne)	212
Rysunek 13.51 Widma FT-IR próbek 21-25 stabilizatu (opracowanie własne)	213
Rysunek 13.52 Widma FT-IR próbek 26-30 stabilizatu (opracowanie własne)	214
Rysunek 13.53 Widma FT-IR próbek 31-35 stabilizatu (opracowanie własne)	215
Rysunek 13.54 Widma FT-IR próbek 36-40 stabilizatu (opracowanie własne)	216
Rysunek 13.55 Widma FT-IR próbek 41-45 stabilizatu (opracowanie własne)	216
Rysunek 13.56 Widma FT-IR próbek 45-50 stabilizatu (opracowanie własne)	217
Rysunek 13.57 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - celofan (opracowanie własne)	218
Rysunek 13.58 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - polichlorek winylu (opracowanie własne).....	218
Rysunek 13.59 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - poliester (opracowanie własne).....	219
Rysunek 13.60 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - polietylen (opracowanie własne)	219
Rysunek 13.61 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - polipropylen (opracowanie własne).....	220
Rysunek 13.62 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - polistyren (opracowanie własne)	220
Rysunek 13.63 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - wodzian chloru (opracowanie własne).....	221
Rysunek 13.64 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - inne (opracowanie własne)	221
Rysunek 13.65 Analiza DLS stabilizatu - seria 1 (opracowanie własne)	223
Rysunek 13.66 Pojedyncza analiza DLS stabilizatu - seria 1 (opracowanie własne)	223
Rysunek 13.67 Wielkość cząstek z pomiarów DLS stabilizatu przesączonego (opracowanie własne)	225

Rysunek 13.68 Pojedyncza analiza DLS stabilizatu - seria 2 (opracowanie własne)	225
Rysunek 13.69 Wielkość cząstek z pomiarów DLS stabilizatu - seria 2 (opracowanie własne).....	226
Rysunek 13.70 Pojedyncza analiza DLS stabilizatu - seria 2 (opracowanie własne)	227
Rysunek 13.71 Analiza DLS - stabilizat seria 2 przesącz (opracowanie własne).....	228
Rysunek 13.72 Pojedyncza analiza DLS stabilizatu – przesącz - seria 2 (opracowanie własne).....	228
Rysunek 13.73 Analiza DLS - stabilizat seria 3 (opracowanie własne)	229
Rysunek 13.74 Pojedyncza analiza DLS stabilizatu - seria 3 (opracowanie własne)	230
Rysunek 13.75 Analiza DLS - stabilizat -przesącz- seria 3 (opracowanie własne)	231
Rysunek 13.76 Zestawienie wzrostu -owies wysiany na wszystkich typach podłoża wymienionych w pracy cz.1 (fot. autor)	231
Rysunek 13.77 Zestawienie wzrostu -owies wysiany na wszystkich typach podłoża wymienionych w pracy cz.2 (fot. autor)	232
Rysunek 13.78 Zestawienie wzrostu - pszenica posiana na wszystkich typach podłoża (fot. autor). 232	
Rysunek 13.79 Zestawienie wzrostu - pszenica wysianego na wszystkich typach podłoża (fot. autor)	233
Rysunek 13.80 Zestawienie wzrostu – pomidor- cz.1 wysianego na wszystkich typach podłoża (fot. autor).....	233
Rysunek 13.81 Zestawienie wzrostu – pomidor- cz.2 wysianego na wszystkich typach podłoża (fot. autor).....	234
Rysunek 13.82 Zestawienie wzrostu – papryka- cz.1 wysianego na wszystkich typach podłoża (fot. autor).....	234
Rysunek 13.83 Zestawienie wzrostu – papryka- cz.2 wysianego na wszystkich typach podłoża (fot. autor)	234

13. Załączniki

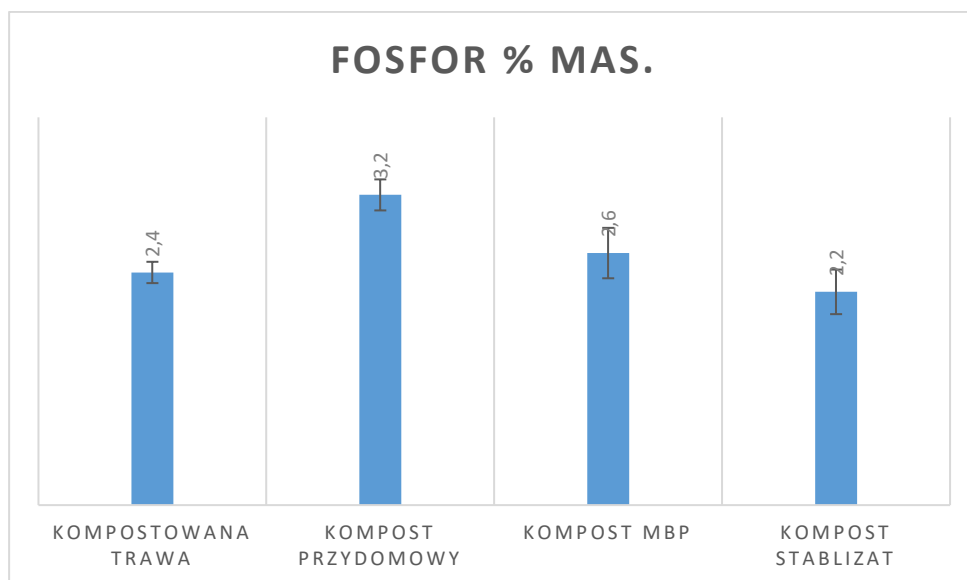
Tabela 13.1 Zestawienie z badania morfologii trawy kompostowanej podział na frakcje – 50 próbek (opracowanie własne)

każda próbka 2 kg tj. 2000g								
Trawa								
data	nr próbki	odpady organiczne	tworzywa sztuczne	ceramika	papier i tektura	szkło	metal	inne
13.06.2022	1	1995,02	0	0	4,98	0	0	0
13.06.2022	2	1996,23	0	0	2,57	1,2	0	0
13.06.2022	3	1997,66	2,34	0	0	0	0	0
13.06.2022	4	1994,96	0	0	0	0	5,04	0
13.06.2022	5	1845,96	0	154,04	0	0	0	0
13.06.2022	6	2000	0	0	0	0	0	0
13.06.2022	7	1963,96	36,04	0	0	0	0	0
13.06.2022	8	1985,74	0	0	8,3	5,96	0	0
13.06.2022	9	1923,09	6,91	70	0	0	0	0
13.06.2022	10	1995,02	0	0	0	0	0	4,98
14.06.2022	11	1943,75	49,25	0	0	7	0	0
14.06.2022	12	1820,95	0	179,05	0	0	0	0
14.06.2022	13	2000	0	0	0	0	0	0
14.06.2022	14	2000	0	0	0	0	0	0
14.06.2022	15	1991,04	0	0	0	0	6,96	2
14.06.2022	16	1943,59	56,41	0	0	0	0	0
14.06.2022	17	2000	0	0	0	0	0	0
14.06.2022	18	2000	0	0	0	0	0	0
14.06.2022	19	2000	0	0	0	0	0	0
14.06.2022	20	1962,38	29,78	0	0	0	0	7,84
15.06.2022	21	2000	0	0	0	0	0	0
15.06.2022	22	1973,96	0	26,04	0	0	0	0
15.06.2022	23	2000	0	0	0	0	0	0
15.06.2022	24	1938,91	0	59,05	0	0	0	2,04
15.06.2022	25	2000	0	0	0	0	0	0
15.06.2022	26	1888,57	98,45	0	0	12,98	0	0
15.06.2022	27	2000	0	0	0	0	0	0
15.06.2022	28	1851,96	0	148,04	0	0	0	0
15.06.2022	29	1720,6	0	279,4	0	0	0	0
15.06.2022	30	1972,62	12,58	0	0	0	14,8	0
17.06.2022	31	1998,2	0	0	1,8	0	0	0
17.06.2022	32	1983,7	0	0	0	0	0	16,3
17.06.2022	33	1910,76	89,24	0	0	0	0	0
17.06.2022	34	1939,53	0	60,47	0	0	0	0
17.06.2022	35	2000	0	0	0	0	0	0
17.06.2022	36	2000	0	0	0	0	0	0
17.06.2022	37	2000	0	0	0	0	0	0
17.06.2022	38	1998,64	0	0	1,36	0	0	0
17.06.2022	39	1936,26	63,74	0	0	0	0	0
17.06.2022	40	1996,79	0	0	0	3,21	0	0
20.06.2022	41	2000	0	0	0	0	0	0
20.06.2022	42	2000	0	0	0	0	0	0
20.06.2022	43	1910,71	0	0	0,25	0	89,04	0
20.06.2022	44	1972,11	27,89	0	0	0	0	0
20.06.2022	45	1737,84	0	257,36	0	0	0	4,8
20.06.2022	46	2000	0	0	0	0	0	0
20.06.2022	47	1954,31	45,69	0	0	0	0	0
20.06.2022	48	1936,29	0	59,08	4,63	0	0	0
20.06.2022	49	1976,96	23,04	0	0	0	0	0
20.06.2022	50	2000	0	0	0	0	0	0
		97958,07	541,36	1292,53	23,89	30,35	115,84	37,96
				głównie kamyczki ozobne				
	Średnia	1959,16	10,83	25,85	0,48	0,61	2,32	0,76
	Odchyl	64,1	23,35	64	1,52	2,22	12,61	2,66
	Wsp. Zm	3%	216%	248%	317%	364%	544%	350%

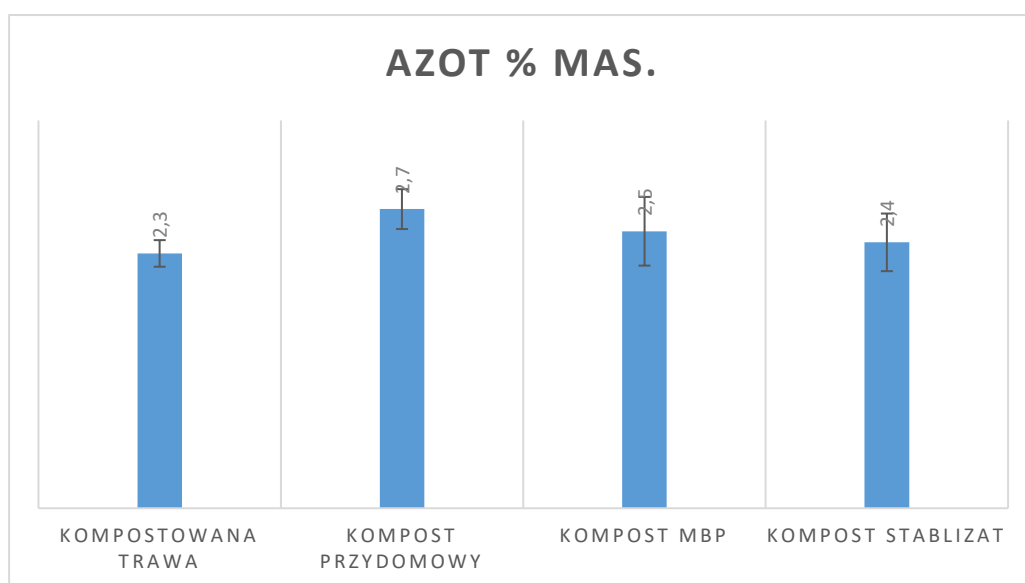
każda próbka 2 kg tj. 2000g										
	kompost przydomowy									
data	nr próbki	odpady organiczne	tworzywa sztuczne	ceramika	papier i tektura	szkło	metal	inne		
27.06.2022	1	2000	0	0	0	0	0	0	0	
27.06.2022	2	2000	0	0	0	0	0	0	0	
27.06.2022	3	1989,39	0,98	0	9,63	0	0	0	0	
27.06.2022	4	2000	0	0	0	0	0	0	0	
27.06.2022	5	1994,74	0	5,26	0	0	0	0	0	
27.06.2022	6	2000	0	0	0	0	0	0	0	
27.06.2022	7	2000	0	0	0	0	0	0	0	
27.06.2022	8	1997,19	2,81	0	0	0	0	0	0	
27.06.2022	9	1992,2	0	0	7,8	0	0	0	0	
27.06.2022	10	2000	0	0	0	0	0	0	0	
28.06.2022	11	2000	0	0	0	0	0	0	0	
28.06.2022	12	1999,78	0,22	0	0	0	0	0	0	
28.06.2022	13	2000	0	0	0	0	0	0	0	
28.06.2022	14	1990,37	0	9,63	0	0	0	0	0	
28.06.2022	15	2000	0	0	0	0	0	0	0	
28.06.2022	16	2000	0	0	0	0	0	0	0	
28.06.2022	17	1983,52	0,58	0	15,9	0	0	0	0	
28.06.2022	18	2000	0	0	0	0	0	0	0	
28.06.2022	19	2000	0	0	0	0	0	0	0	
28.06.2022	20	1984,02	0	0	15,98	0	0	0	0	
29.06.2022	21	2000	0	0	0	0	0	0	0	
29.06.2022	22	2000	0	0	0	0	0	0	0	
29.06.2022	23	2000	0	0	0	0	0	0	0	
29.06.2022	24	1999,76	0,24	0	0	0	0	0	0	
29.06.2022	25	2000	0	0	0	0	0	0	0	
29.06.2022	26	1995,02	0	4,98	0	0	0	0	0	
29.06.2022	27	2000	0	0	0	0	0	0	0	
29.06.2022	28	2000	0	0	0	0	0	0	0	
29.06.2022	29	2000	0	0	0	0	0	0	0	
29.06.2022	30	1998,44	1,56	0	0	0	0	0	0	
30.06.2022	31	1970,22	0	0	29,78	0	0	0	0	
30.06.2022	32	2000	0	0	0	0	0	0	0	
30.06.2022	33	2000	0	0	0	0	0	0	0	
30.06.2022	34	2000	0	0	0	0	0	0	0	
30.06.2022	35	1999,04	0,96	0	0	0	0	0	0	
30.06.2022	36	2000	0	0	0	0	0	0	0	
30.06.2022	37	2000	0	0	0	0	0	0	0	
30.06.2022	38	2000	0	0	0	0	0	0	0	
30.06.2022	39	2000	0	0	0	0	0	0	0	
30.06.2022	40	2000	0	0	0	0	0	0	0	
01.07.2022	41	2000	0	0	0	0	0	0	0	
01.07.2022	42	2000	0	0	0	0	0	0	0	
01.07.2022	43	2000	0	0	0	0	0	0	0	
01.07.2022	44	1996,73	0	3,27	0	0	0	0	0	
01.07.2022	45	2000	0	0	0	0	0	0	0	
01.07.2022	46	2000	0	0	0	0	0	0	0	
01.07.2022	47	2000	0	0	0	0	0	0	0	
01.07.2022	48	1892,91	1,4	0	105,69	0	0	0	0	
01.07.2022	49	2000	0	0	0	0	0	0	0	
01.07.2022	50	2000	0	0</						

każda próbka 2 kg tj. 2000g								
	Ulepszacz gelbowy (-glebowitka)							
data	nr próbki	odpady organiczne	tworzywa sztuczne	ceramika	papier i tektura	szkło	metal	inne
11.07.2022	1	1990,52	1,58	7,9	0	0	0	0
11.07.2022	2	1990,92	6,98	0	0	2,1	0	0
11.07.2022	3	1993,7	0	6,3	0	0	0	0
11.07.2022	4	1743,93	76,25	179,82	0	0	0	0
11.07.2022	5	1992,31	0	0	2,28	0	5,41	0
11.07.2022	6	1992,02	7,98	0	0	0	0	0
11.07.2022	7	1994,68	0	0	5,32	0	0	0
11.07.2022	8	1887,46	23,54	89	0	0	0	0
11.07.2022	9	1986,23	5,58	0	0	1,3	0	6,89
11.07.2022	10	1989,55	7,82	0	2,63	0	0	0
12.07.2022	11	1947,74	52,26	0	0	0	0	0
12.07.2022	12	1997,21	2,79	0	0	0	0	0
12.07.2022	13	1821,81	0	169,23	8,96	0	0	0
12.07.2022	14	1993,02	6,98	0	0	0	0	0
12.07.2022	15	1975,34	23,04	0	0	1,62	0	0
12.07.2022	16	2000	0	0	0	0	0	0
12.07.2022	17	1950,37	49,63	0	0	0	0	0
12.07.2022	18	2000	0	0	0	0	0	0
12.07.2022	19	1957,4	1,98	35,96	2,3	2,36	0	0
12.07.2022	20	1974,4	0	0	0	0	25,6	0
13.07.2022	21	1975,75	2,36	21,89	0	0	0	0
13.07.2022	22	1967,59	32,41	0	0	0	0	0
13.07.2022	23	2000	0	0	0	0	0	0
13.07.2022	24	1970,04	29,96	0	0	0	0	0
13.07.2022	25	2000	0	0	0	0	0	0
13.07.2022	26	1914,56	4,21	78,93	0	2,3	0	0
13.07.2022	27	1997,11	0	0	0	0	0	2,89
13.07.2022	28	1984,79	15,21	0	0	0	0	0
13.07.2022	29	2000	0	0	0	0	0	0
13.07.2022	30	1830,81	9,56	159,63	0	0	0	0
14.07.2022	31	1998,04	0	0	1,96	0	0	0
14.07.2022	32	1908,2	2,5	0	0	0	89,3	0
14.07.2022	33	1997,13	2,87	0	0	0	0	0
14.07.2022	34	1920,79	79,21		0	0	0	0
14.07.2022	35	2000	0	0	0	0	0	0
14.07.2022	36	1688,27	0	296,52	0	0	0	15,21
14.07.2022	37	1983,77	5,25	0	10,98	0	0	0
14.07.2022	38	2000	0	0	0	0	0	0
14.07.2022	39	1801,37	0	198,63	0	0	0	0
14.07.2022	40	1981,04	18,96	0	0	0	0	0
15.07.2022	41	2000	0	0	0	0	0	0
15.07.2022	42	1987,04	12,96	0	0	0	0	0
15.07.2022	43	1985,98	0	0	0	0	14,02	0
15.07.2022	44	1994,55	4,56	0	0,89	0	0	0
15.07.2022	45	1950,58	49,42	0	0	0	0	0
15.07.2022	46	1911,68	12,89	60,47	0	0	0	14,96
15.07.2022	47	1967,28	32,14	0	0	0,58	0	0
15.07.2022	48	2000	0	0	0	0	0	0
15.07.2022	49	1973,03	21,08	0	5,89	0	0	0
15.07.2022	50	1821,41	0	178,59	0	0	0	0
		97689,42	601,96	1482,87	41,21	10,26		

każda próbka 2 kg tj. 2000g									
	Stabilizat								
data	nr próbki	odpady organiczne	tworzywa sztuczne	ceramika	papier i tektura	szkło	metal	inne	
18.07.2022	1	1092,75	700,25	150,04	23	9,8	14,36	9,8	
18.07.2022	2	992,29	893,14	96,14	4,5	7,63	0	6,3	
18.07.2022	3	804,97	1112,89	74,25	0	7,89	0	0	
18.07.2022	4	582,82	1408,98	3,6	0	4,6	0	0	
18.07.2022	5	778,36	978,21	214,12	7,8	14,01	7,5	0	
19.07.2022	6	583,07	1297,31	100,05	4,3	14,23	1,04	0	
19.07.2022	7	988,95	963,14	36,01	1,36	0	10,54	0	
19.07.2022	8	623,52	1358,14	12,04	6,3	0	0	0	
19.07.2022	9	647,67	1259,23	8,98	52,12	32	0	0	
19.07.2022	10	985,43	975,24	14,21	4,96	4,2	15,96	0	
20.07.2022	11	1067,4	874,14	54,16	0	4,3	0	0	
20.07.2022	12	934,75	963,74	89,41	2,3	9,8	0	0	
20.07.2022	13	813,13	1114,23	63,14	0	7,2	2,3	0	
20.07.2022	14	1140,1	843,41	2,89	0	4,1	9,5	0	
20.07.2022	15	1031,07	954,23	4,56	4,78	5,36	0	0	
21.07.2022	16	1167,89	799,63	7,91	9,87	4,1	4,1	6,5	
21.07.2022	17	622,35	1365,1	3,41	0	9,14	0	0	
21.07.2022	18	945,41	1041,89	0	7,4	1,2	0	4,1	
21.07.2022	19	979,83	1000,87	0	9,6	9,7	0	0	
21.07.2022	20	593,06	1389,21	7,14	4,1	1,09	5,4	0	
22.07.2022	21	717,97	1256,23	9	0	7,1	0	9,7	
22.07.2022	22	763,88	1116,12	120	0	0	0	0	
22.07.2022	23	793,46	1178,14	15	5,9	0	7,5	0	
22.07.2022	24	710,86	1289,14	0	0	0	0	0	
22.07.2022	25	363,04	1598,14	24,04	14,78	0	0	0	
23.07.2022	26	662,73	1287,03	36	4,14	7,2	0	2,9	
23.07.2022	27	717,23	1273,54	0	9,23	0	0	0	
23.07.2022	28	625,5	1360,5	14	0	0	0	0	
23.07.2022	29	567,7	1405,67	17,23	0	9,4	0	0	
23.07.2022	30	596,59	1389,41	0	0	0	14	0	
23.07.2022	31	354,8	1400	240	5,2	0	0	0	
23.07.2022	32	634,61	1353,79	0	3,6	0	8	0	
23.07.2022	33	965,24	1009,76	0	4,1	12,4	0	8,5	
23.07.2022	34	850,34	1119,66	30	0	0	0	0	
23.07.2022	35	457,36	1479,64	48	0	0	15	0	
25.07.2022	36	864,08	1117,22	0	4,2	14,5	0	0	
25.07.2022	37	428,78	1563,02	0	8,2	0	0	0	
25.07.2022	38	273,2	1280,3	408	0	36	0	2,5	
25.07.2022	39	610,53	1380,47	9	0	0	0	0	
25.07.2022	40	428,86	1563,14	8	0	0	0	0	
26.07.2022	41	474,27	1503,01	4,52	1,2	0	17	0	
26.07.2022	42	379,06	1590	6,54	9,6	0	0	14,8	
26.07.2022	43	594,88	1380	3,47	7,4	14,25	0	0	
26.07.2022	44	846,87	1148,93	0	4,2	0	0	0	
26.07.2022	45	378,96	1470,54	120	8,5	0			



Rysunek 13.1 Średnia zawartość fosforu w badanych kompostach (opracowanie własne)



Rysunek 13.2 Średnia zawartość azotu w badanych kompostach (opracowanie własne)

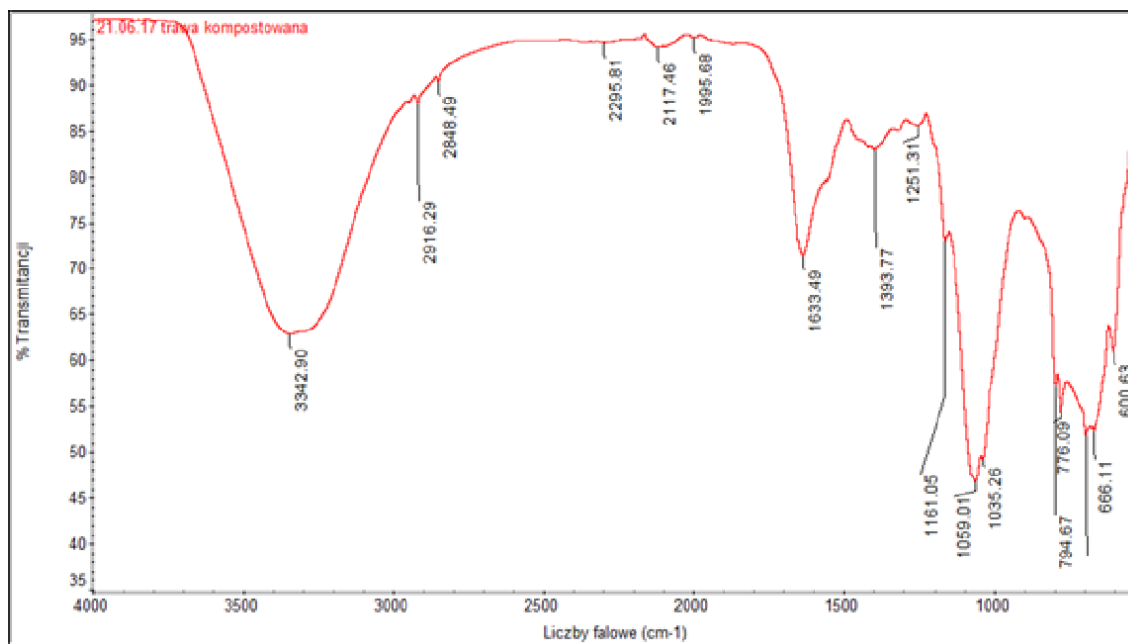
Tabela 13.5 Wyniki odczynu pH, przewodności oraz obecności związków chemicznych w kompostach (opracowanie własne)

Badane wartości	kompost przydomowy	Kompostowana trawa	kompost MBP	stabilizat
Odczyn pH	7,952	7,929	7,996	8,294
Przewodność mV	489,0 µS	337,9 µS	744,0 µS	566,0 µS
Badane wartości	Kompost przydomowy	Kompostowana trawa	Kompost MBP	Stabilizat
papierek pH	7,0	7,0	7,0	8,0
NO ₃ , NO ₂ , KH, pH, Cl ₂ GH,	NO ₃ =250 mg/l NO ₂ =0 mg/l GH<3 n KH=107 n pH=6,4 Cl ₂ =1,5 mg/l	NO ₃ =100 mg/l NO ₂ =0 mg/l GH>21 n KH=178 n pH=6,4 Cl ₂ =3,0 mg/l	NO ₃ =250 mg/l NO ₂ =0,5 mg/l GH>125 n KH=107 n pH=6,4 Cl ₂ =1,5 mg/l	NO ₃ =250 mg/l NO ₂ =2 mg/l GH>14 n KH=107 n pH=6,4 Cl ₂ =1,5 mg/l

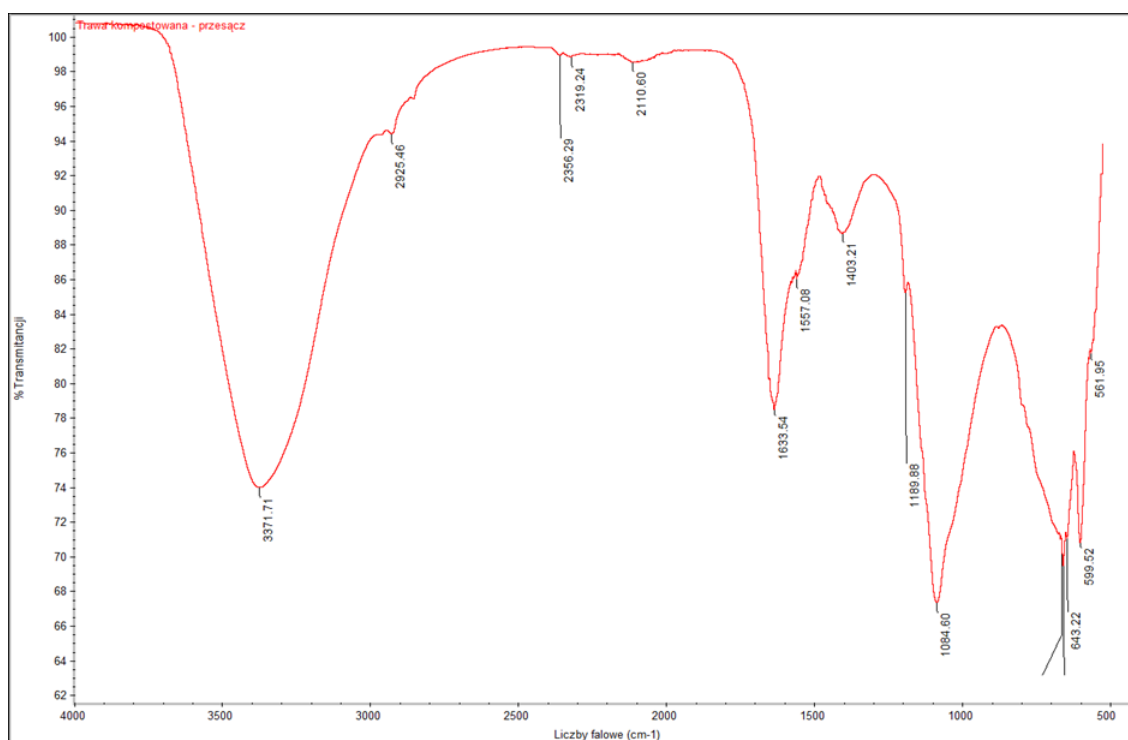


Rysunek 13.3 Dane z GUS – ilość odpadów komunalnych zebranych do procesu kompostowania czy fermentacji w Polsce w roku 2023 (stan na dzień 2025.03.20)

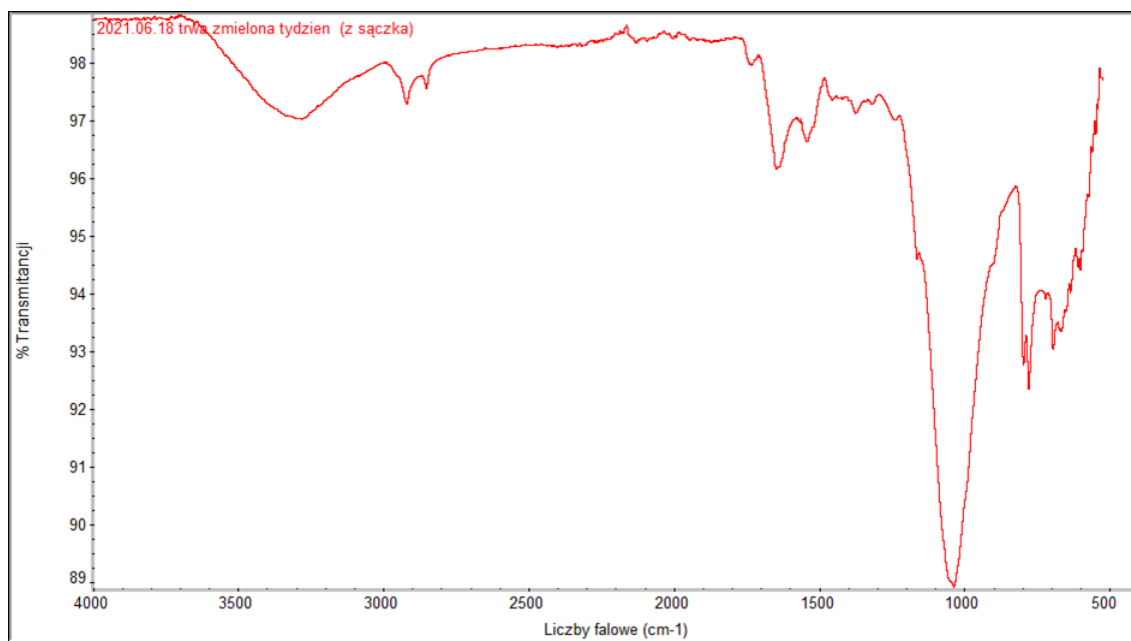
Trawa kompostowana :



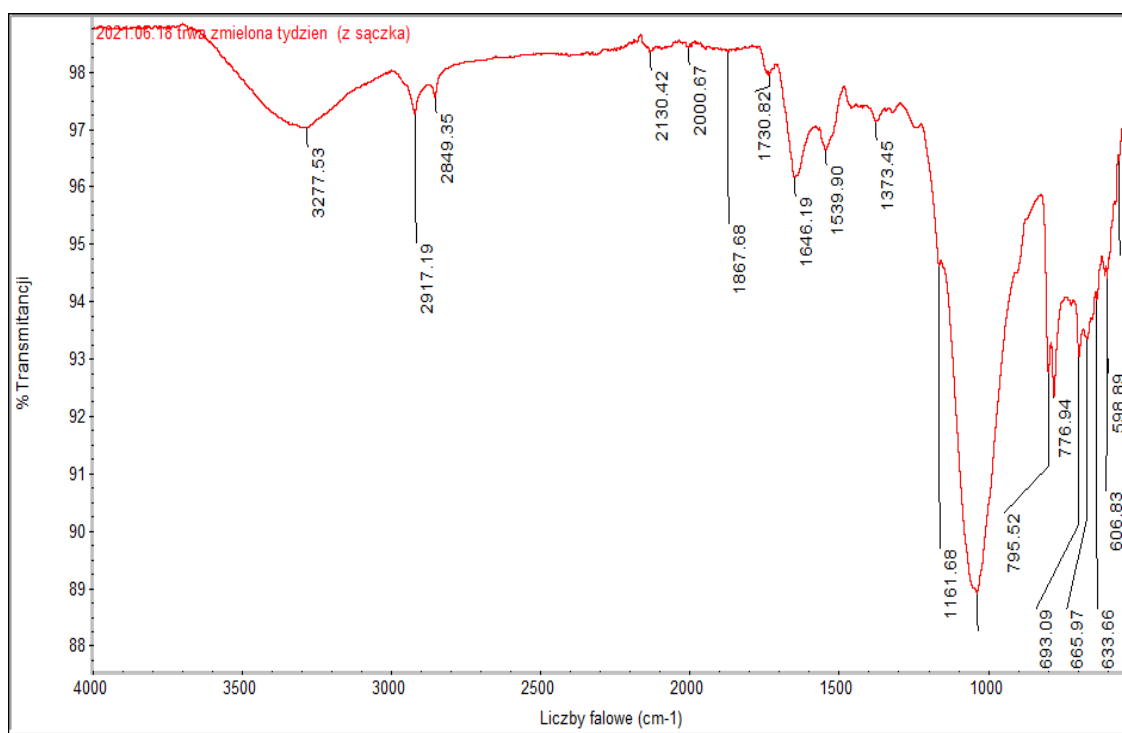
Rysunek 13.4 Widma FT-IR trawa kompostowana z podpisanymi pikami (opracowanie własne)



Rysunek 13.5 Widma FT-IR trawa kompostowana – przesącz z podpisanymi pikami (opracowanie własne)

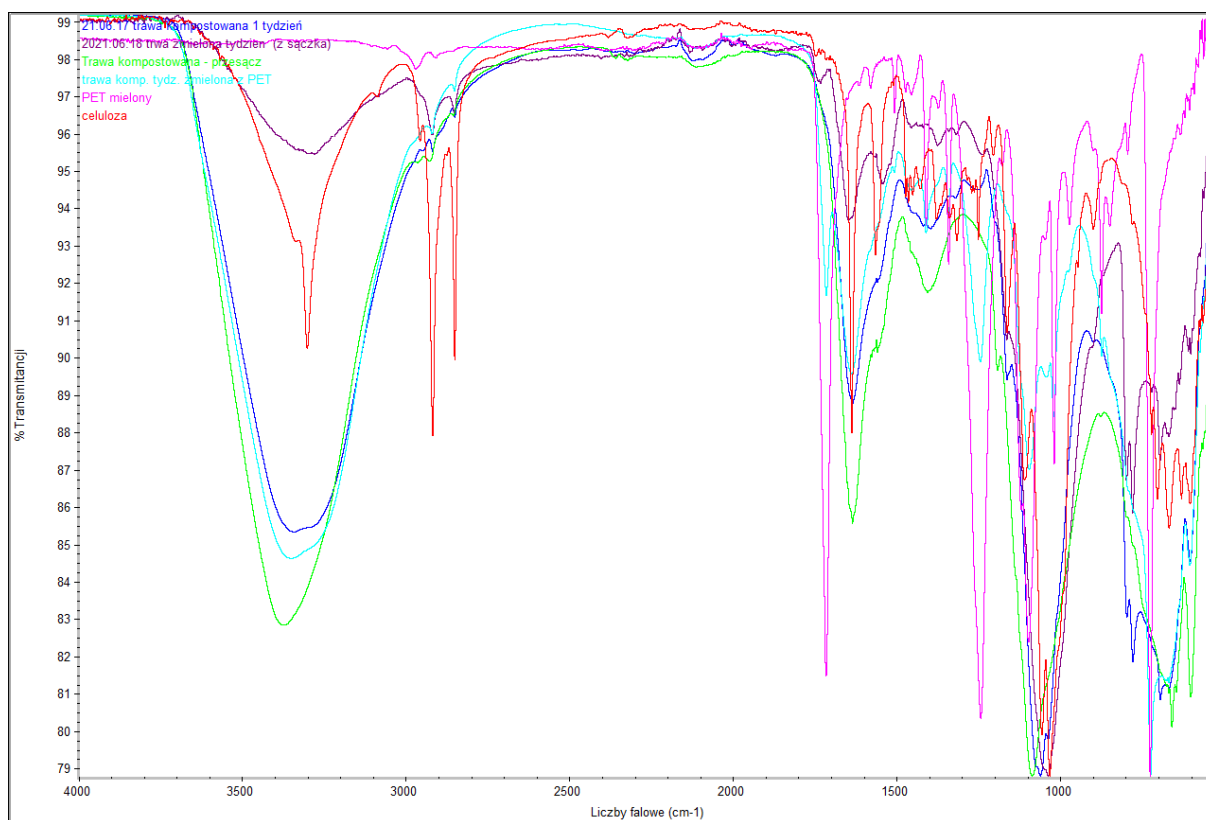


Rysunek 13.6 Widma FT-IR trawa kompostowana – materiał pobrany z sącza i wysuszony w suszarce laboratoryjnej przesącz (opracowanie własne)



Rysunek 13.7 Widma FT-IR trawa kompostowana – materiał pobrany z sącza i wysuszony w suszarce laboratoryjnej przesącz - piki- (opracowanie własne)

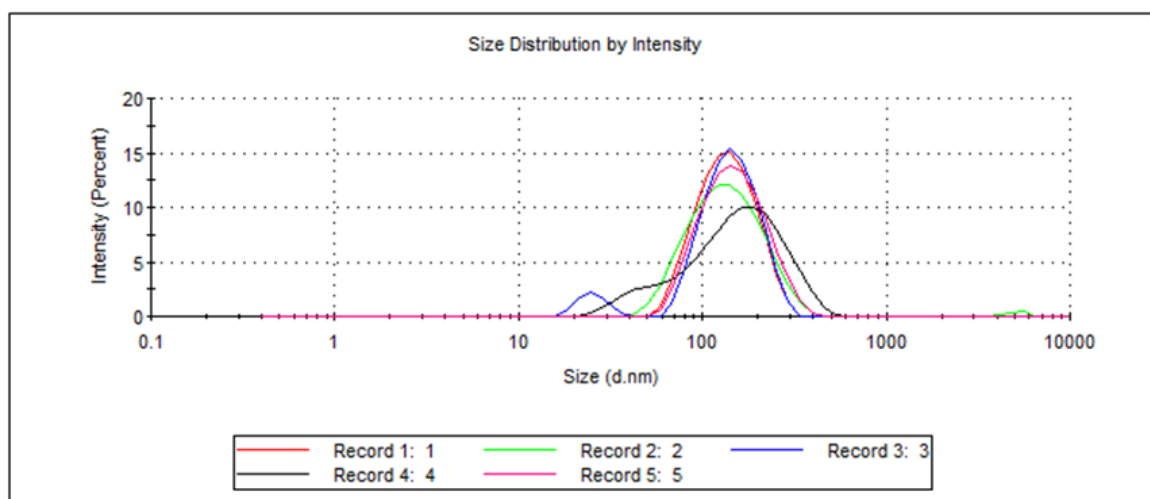
Wykres FT-IR trawa, trawa z polimerami, polimery, celuloza



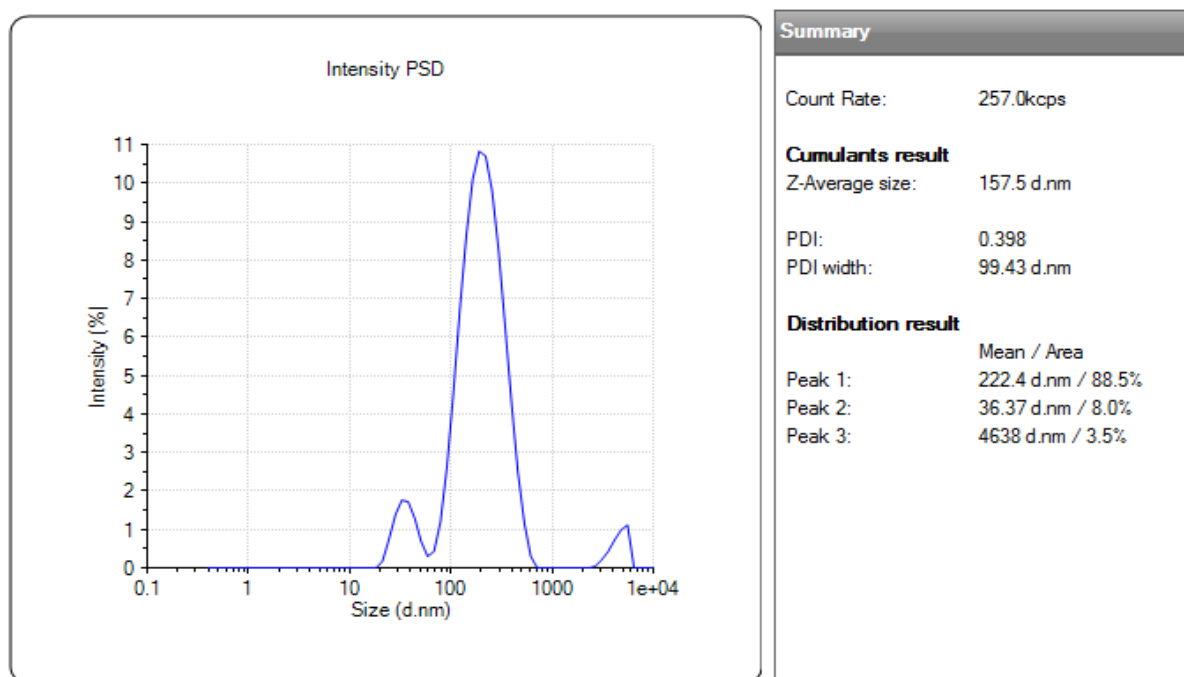
Rysunek 13.8 Widma FT-IR trawa kompostowana zmielona, trawa zmieszana z polimerami, widmo pojedyncze PET , widmo celulozy

Tabela 13.6 Wyniki analizy cząstek trawy zmielonej z PET (przesącz) pod względem wielkości cząstek (opracowanie własne)

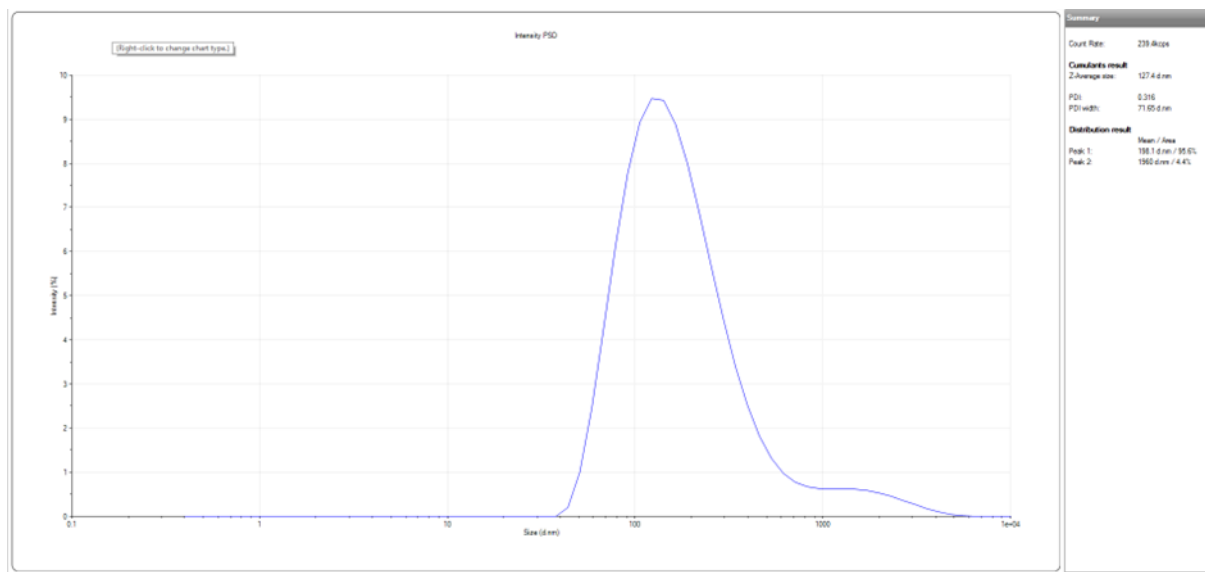
Trawa kompostowana zmielona z PET (przesącz)						
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3	
201,7	95,6	3291	4,4	0,0	0,0	
224,5	81,0	47,78	19,0	0,0	0,0	
182,1	89,7	26,07	5,8	4389	4,5	
164,9	93,2	3904	6,8	0,0	0,0	
198,1	95,6	1960	4,4	0,0	0,0	
Średnia	194,26					



Rysunek 13.9 Zestawienie średniej wielkości cząstek trawy kompostowanej z analizy wielkości cząstek z DLS (opracowanie własne)

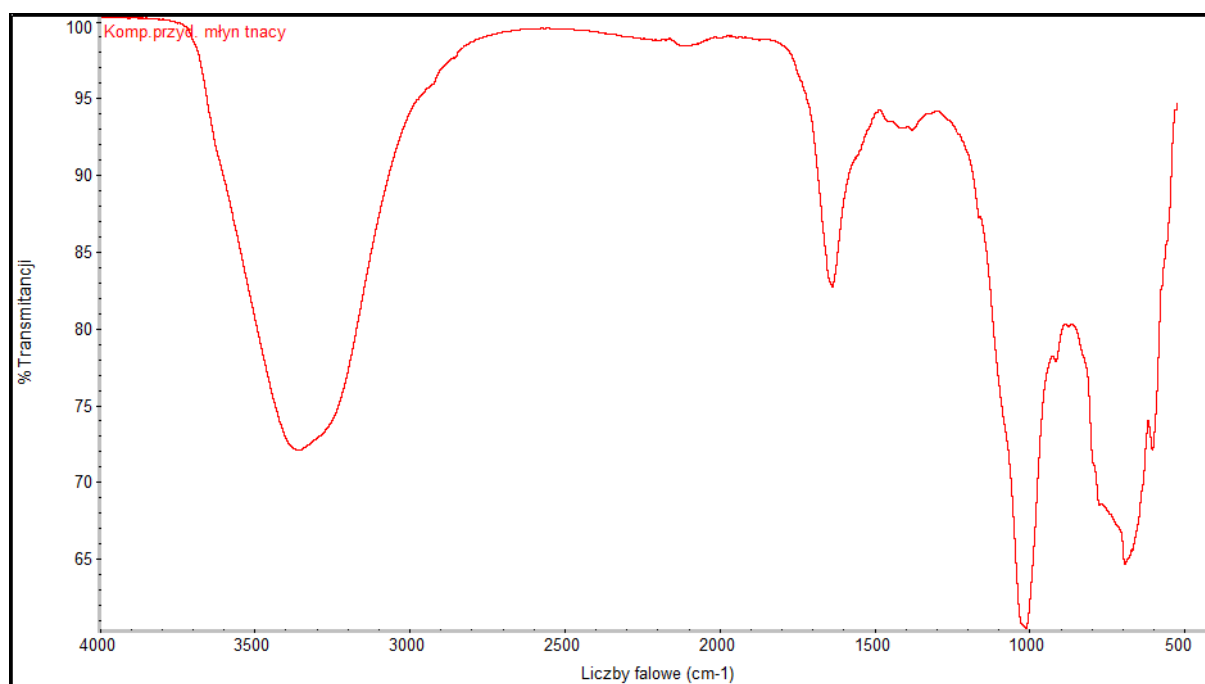


Rysunek 13.10 Średnia wielkość cząstek trawy kompostowanej tydzień (opracowanie własne)

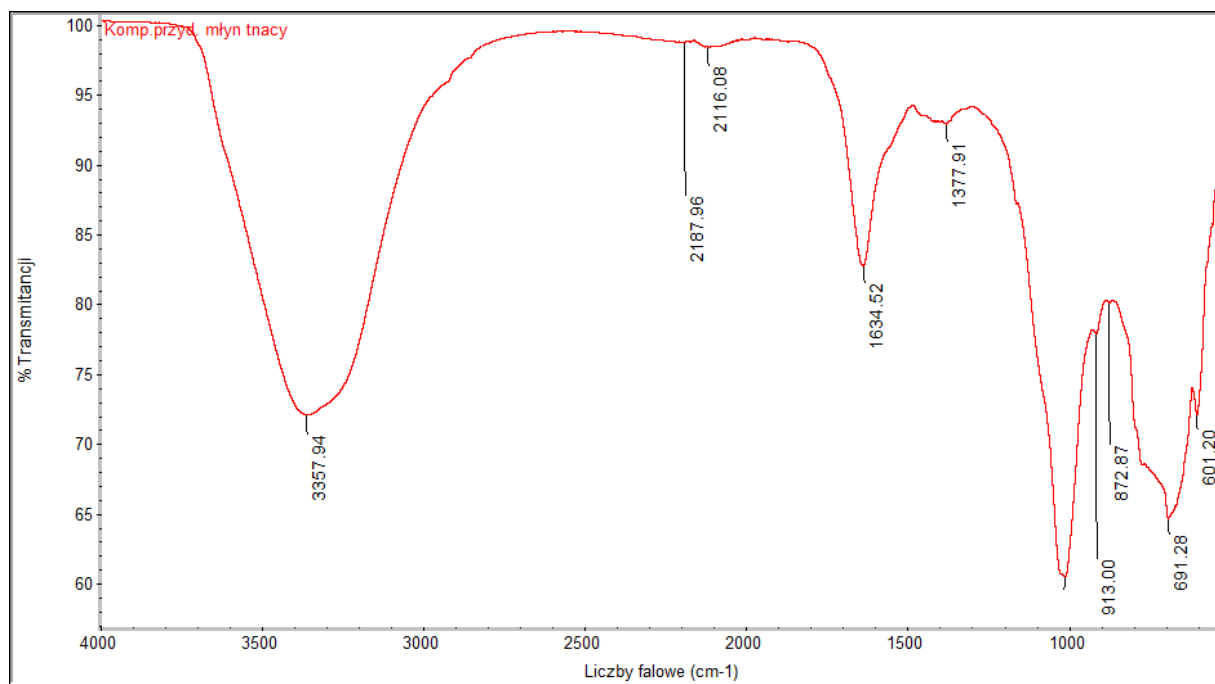


Rysunek 13.11 Średnia wielkość cząstek przesącza z trawy kompostowanej tydzień zmieszanej z PET (opracowanie własne)

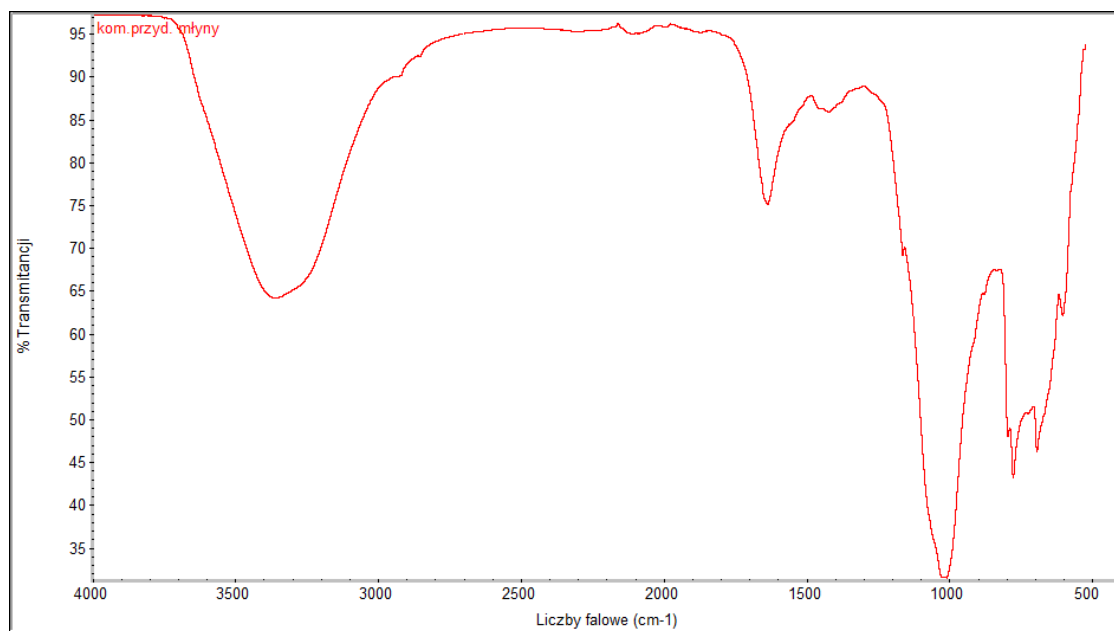
Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach



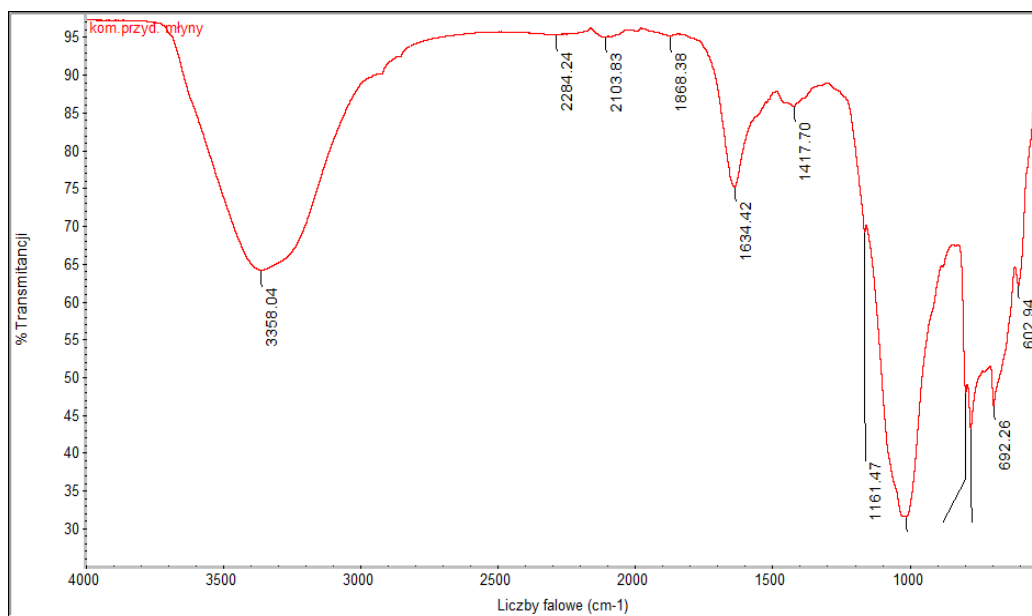
Rysunek 13.12 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 1(opracowanie własne)



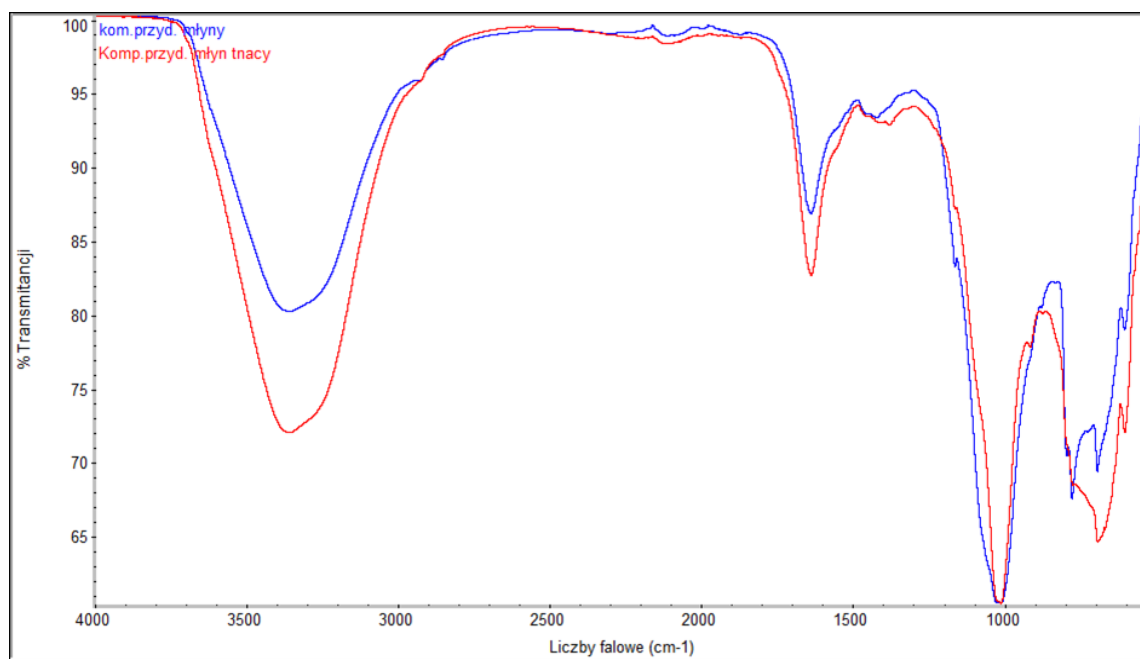
Rysunek 13.13 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 2 (opracowanie własne)



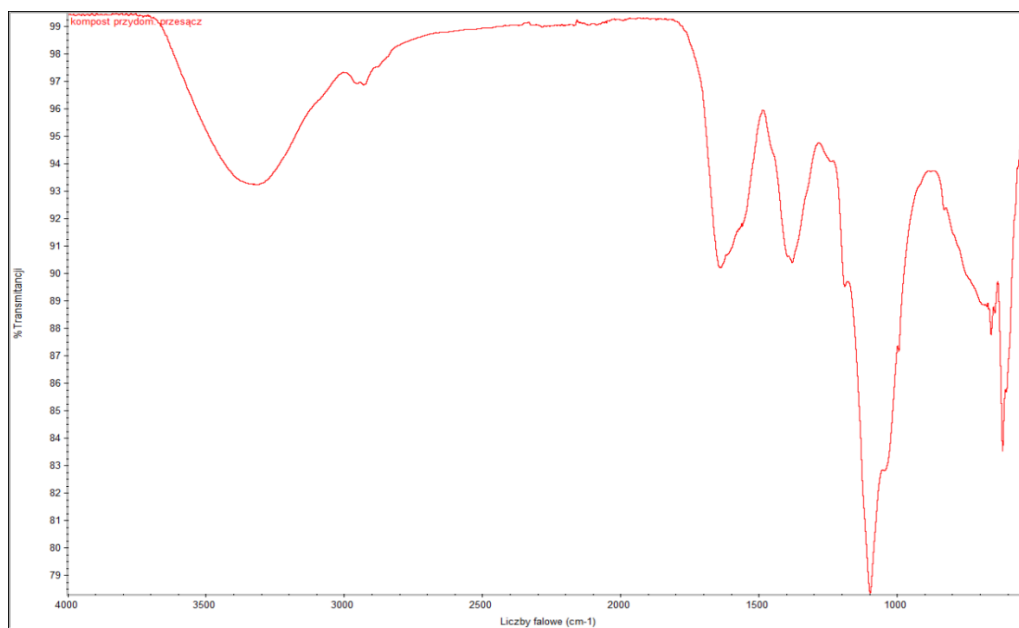
Rysunek 13.14 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 3 (opracowanie własne)



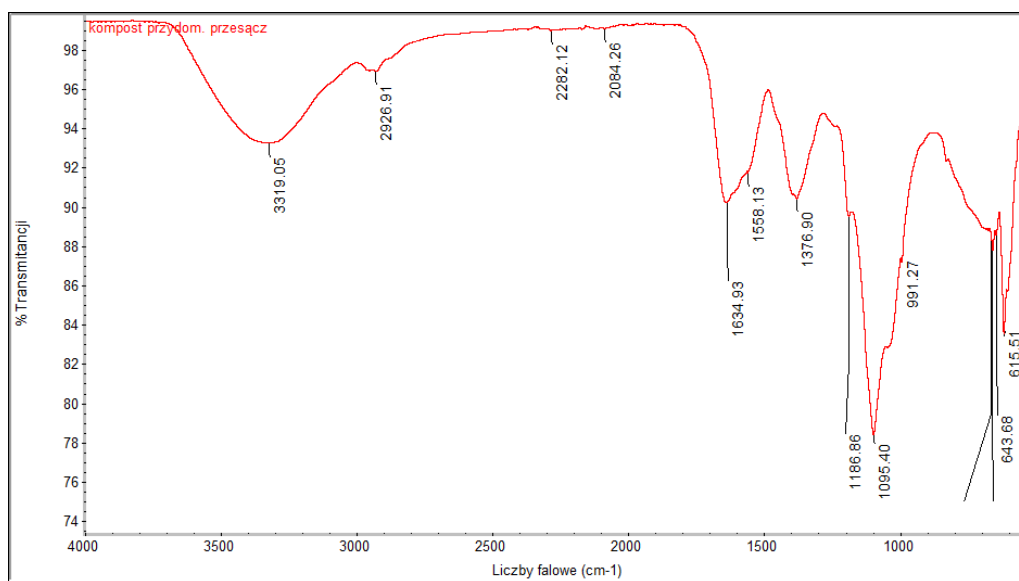
Rysunek 13.15 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 4 (opracowanie własne)



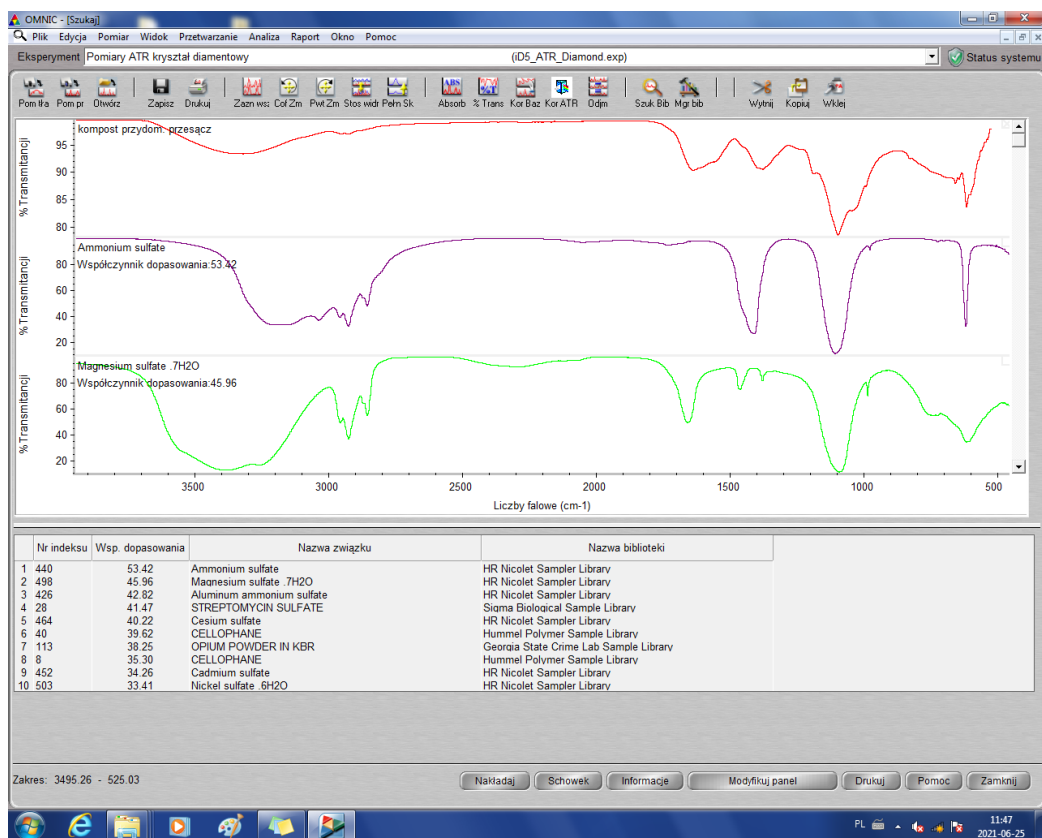
Rysunek 13.16 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 5 (opracowanie własne)



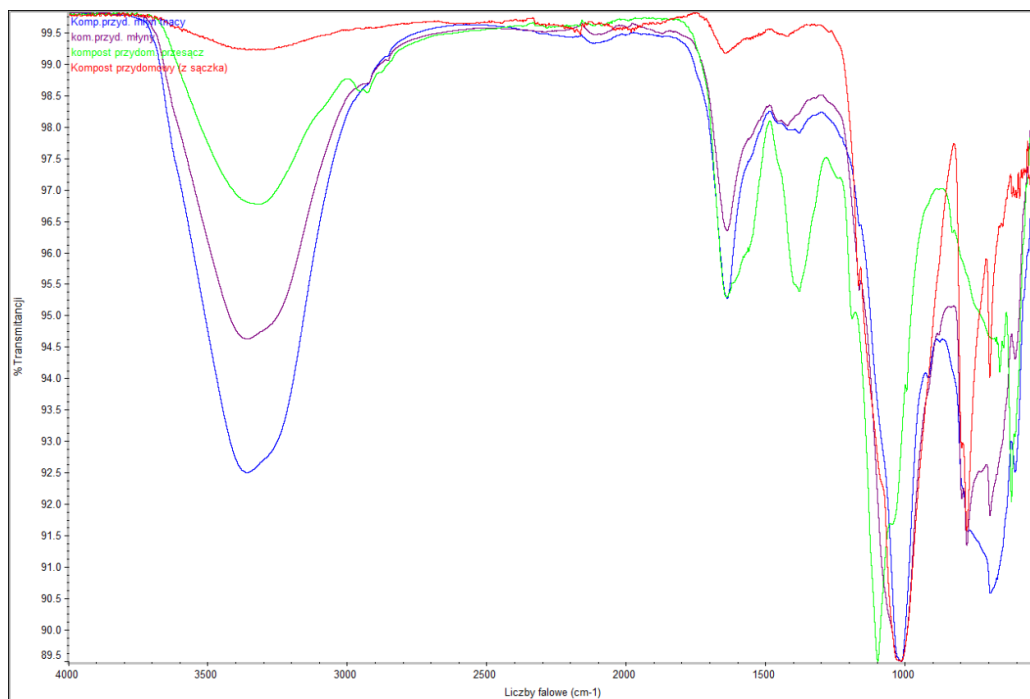
Rysunek 13.17 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 6 (opracowanie własne)



Rysunek 13.18 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 7 (opracowanie własne)



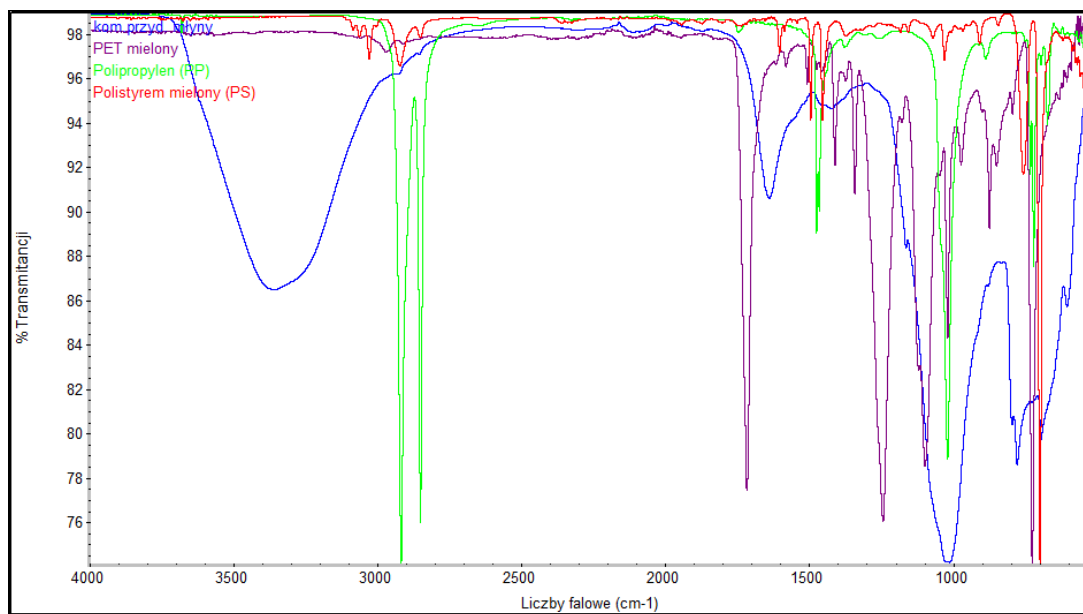
Rysunek 13.19 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 8 - przykładowe okno z danymi (opracowanie własne)



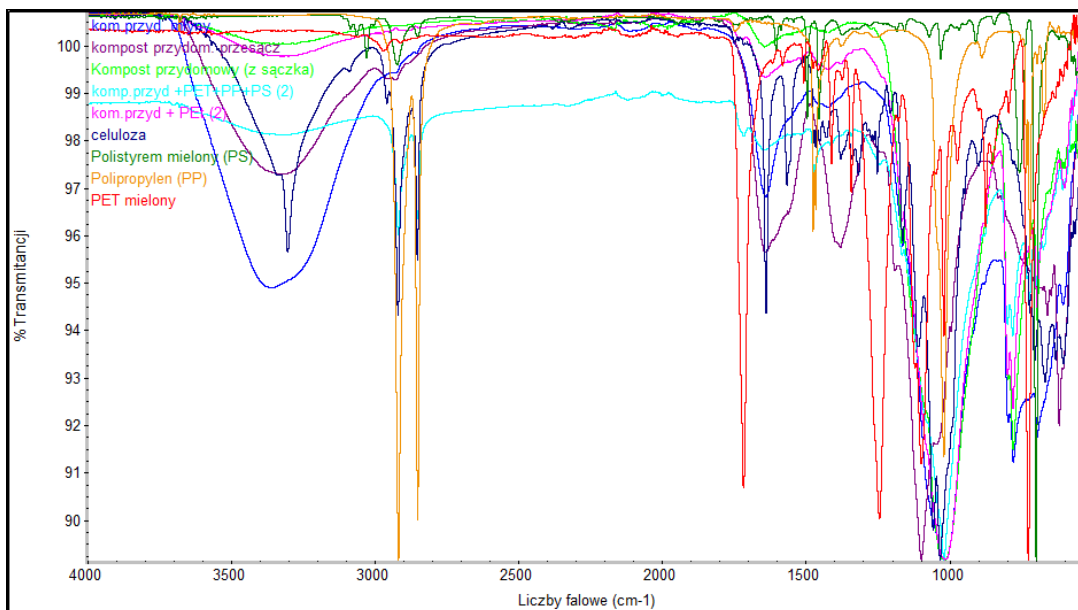
Rysunek 13.20 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 9 (opracowanie własne)



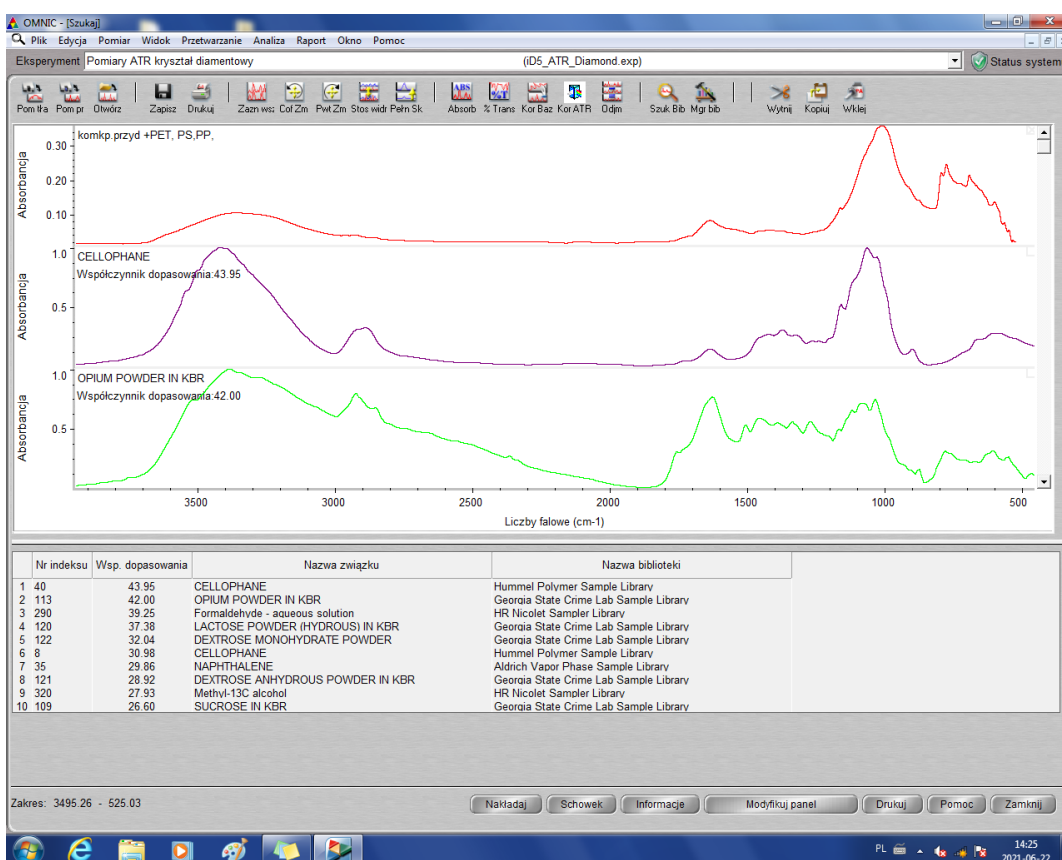
Rysunek 13.21 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 10 (opracowanie własne)



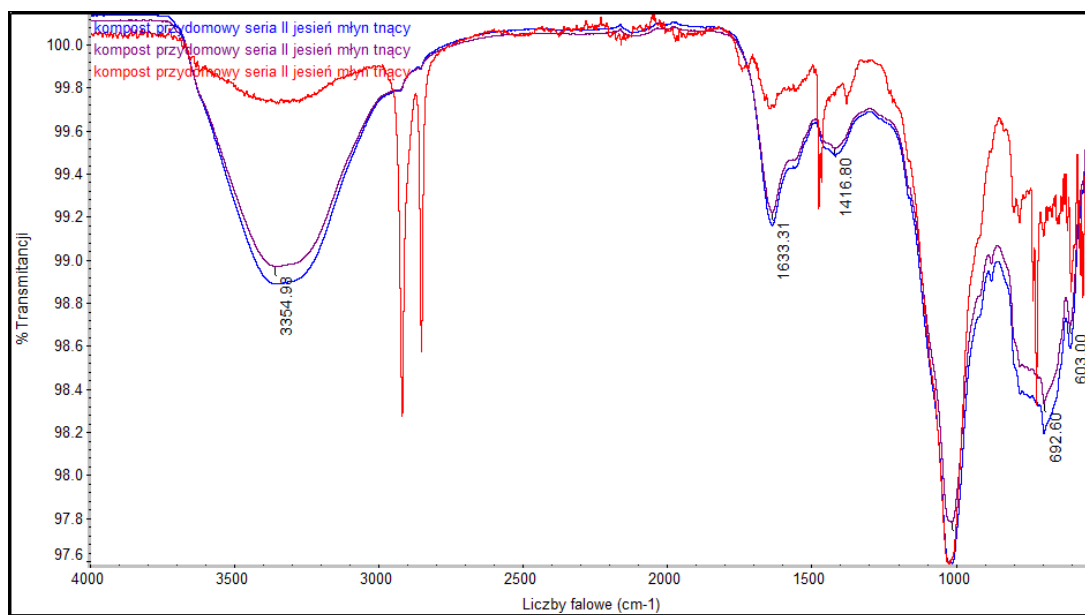
Rysunek 13.22 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 11 (opracowanie własne)



Rysunek 13.23 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 12 (opracowanie własne)

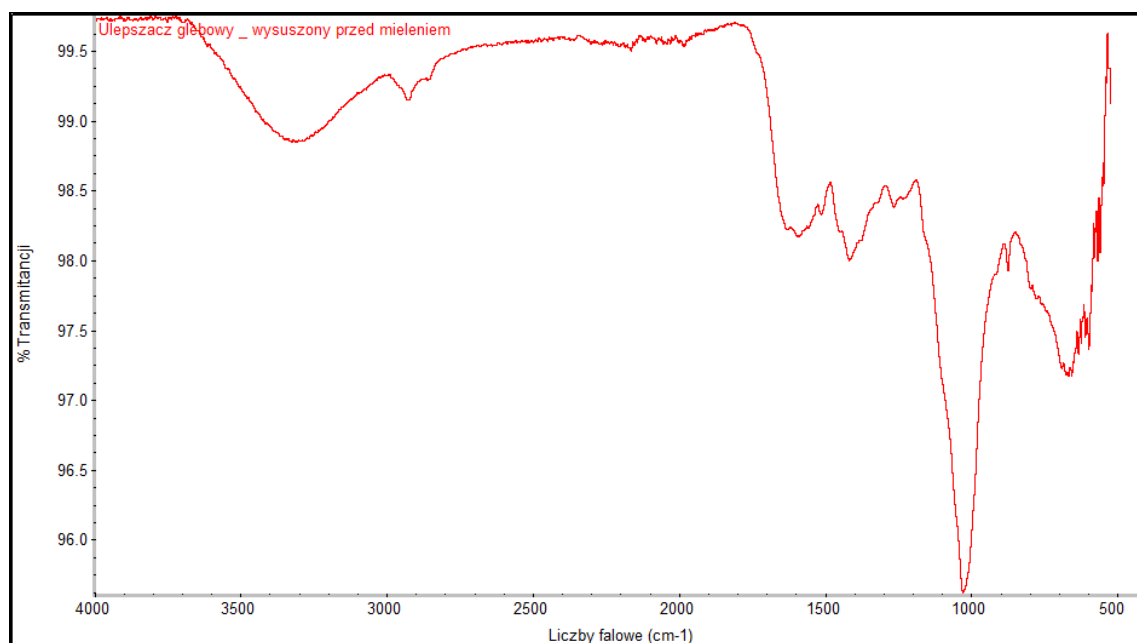


Rysunek 13.24 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 13 (opracowanie własne)

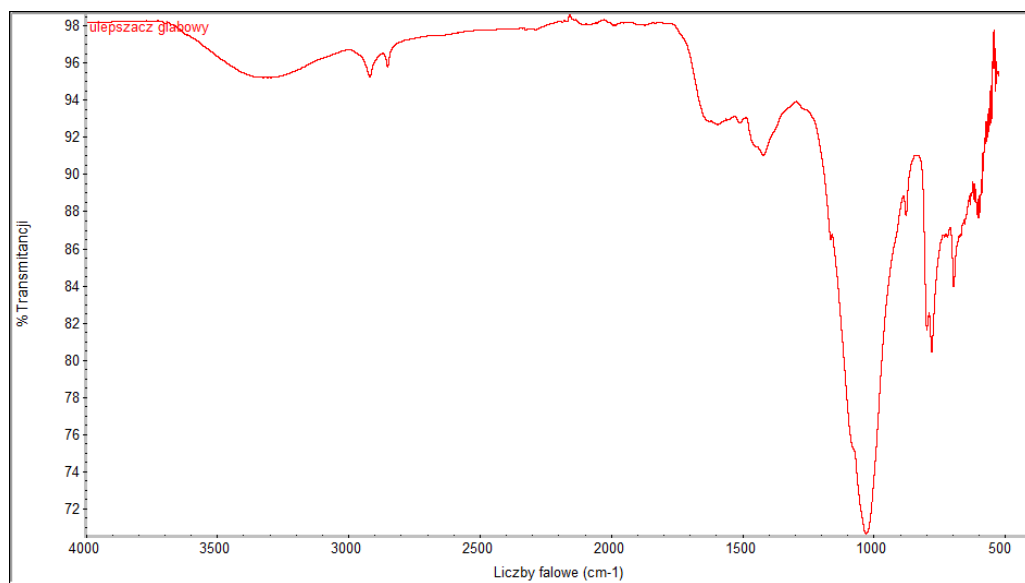


Rysunek 13.25 Kompost przydomowy FT-IR w różnych konfiguracjach 13 (opracowanie własne)

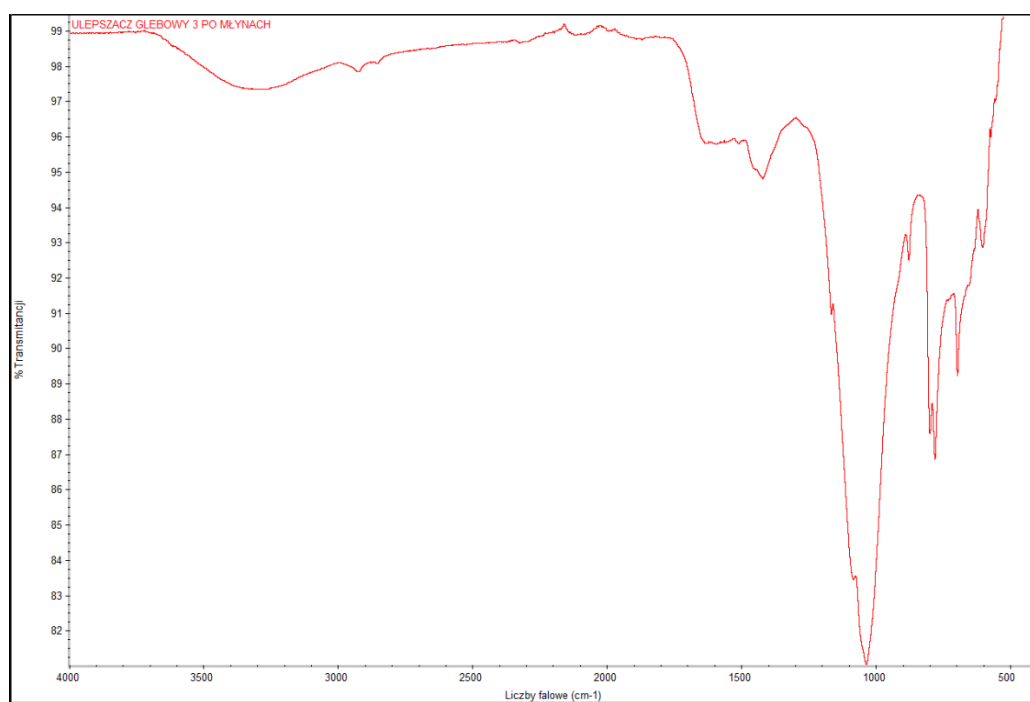
Polepszacz glebowy (kompost z odpadów zielonych):



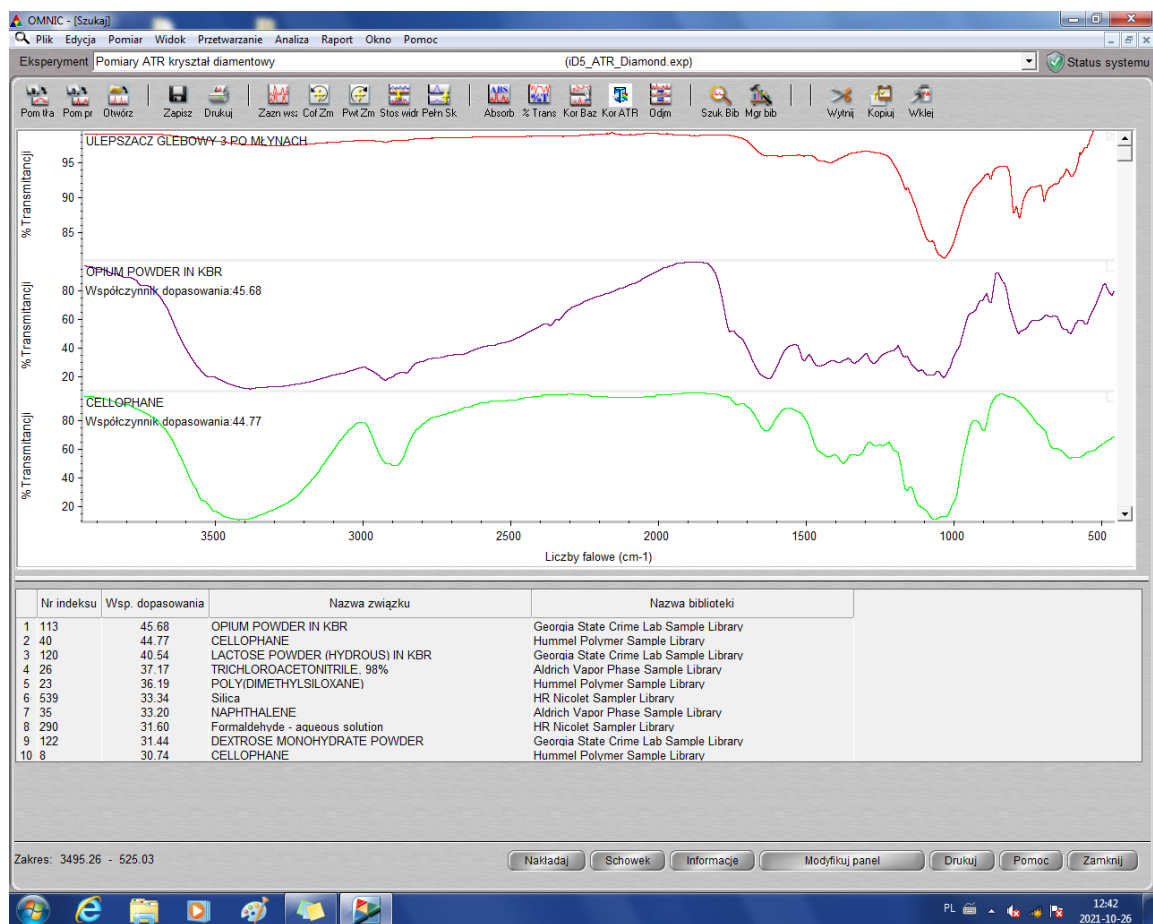
Rysunek 13.26 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 1 (opracowanie własne)



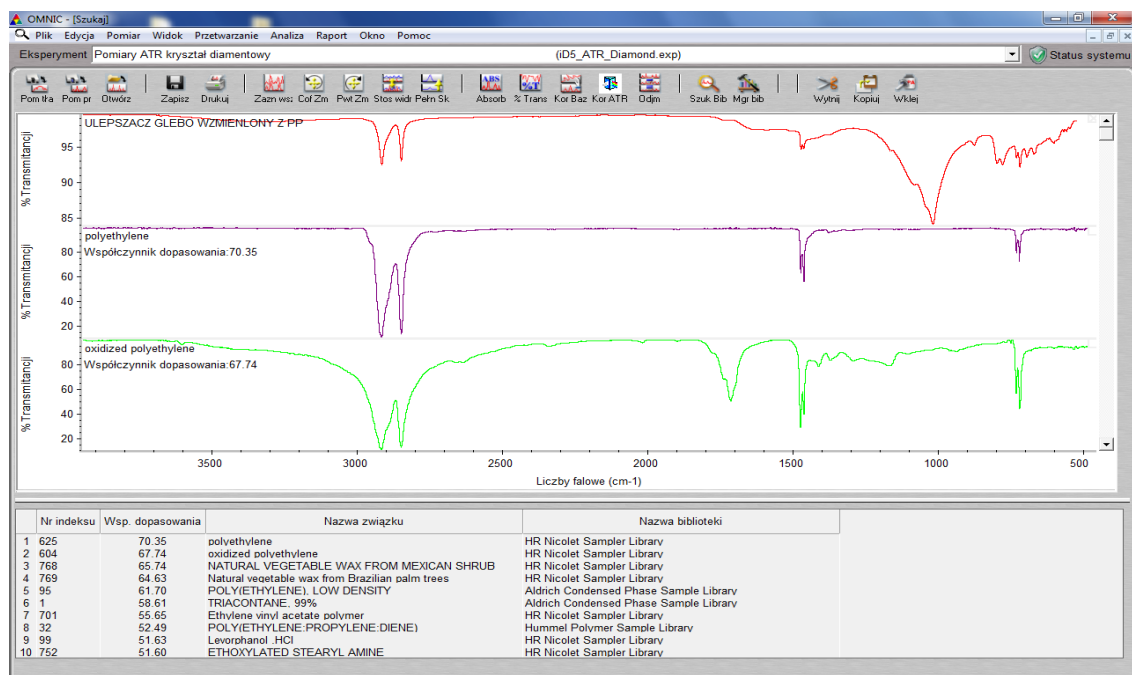
Rysunek 13.27 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 2 (opracowanie własne)



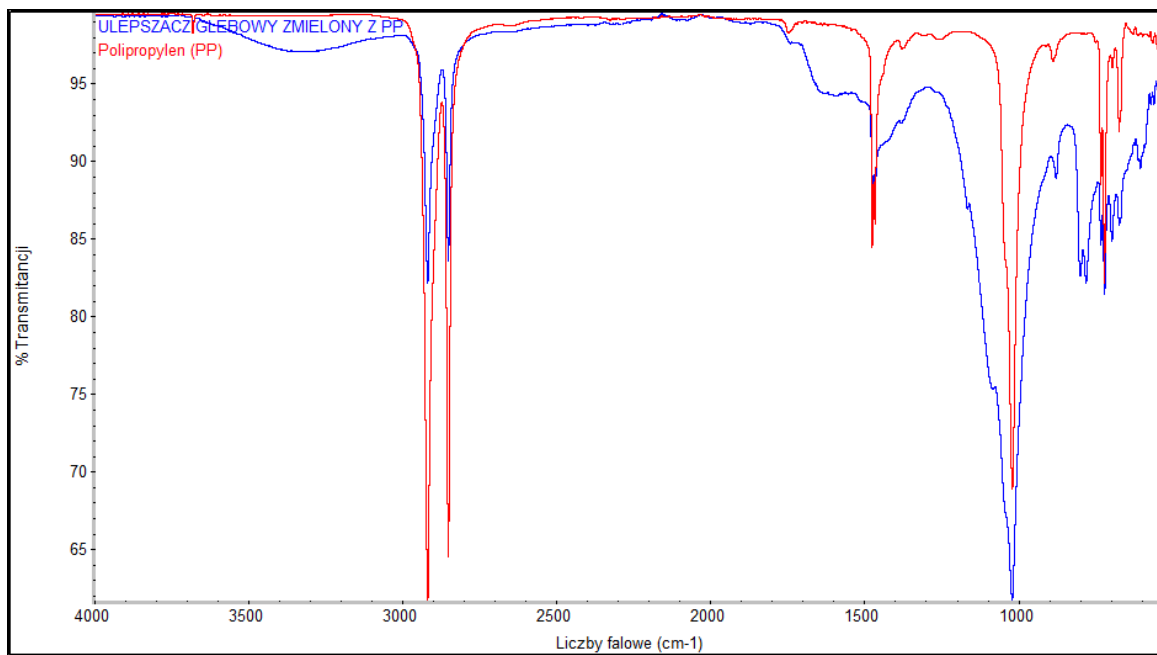
Rysunek 13.28 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 3 (opracowanie własne)



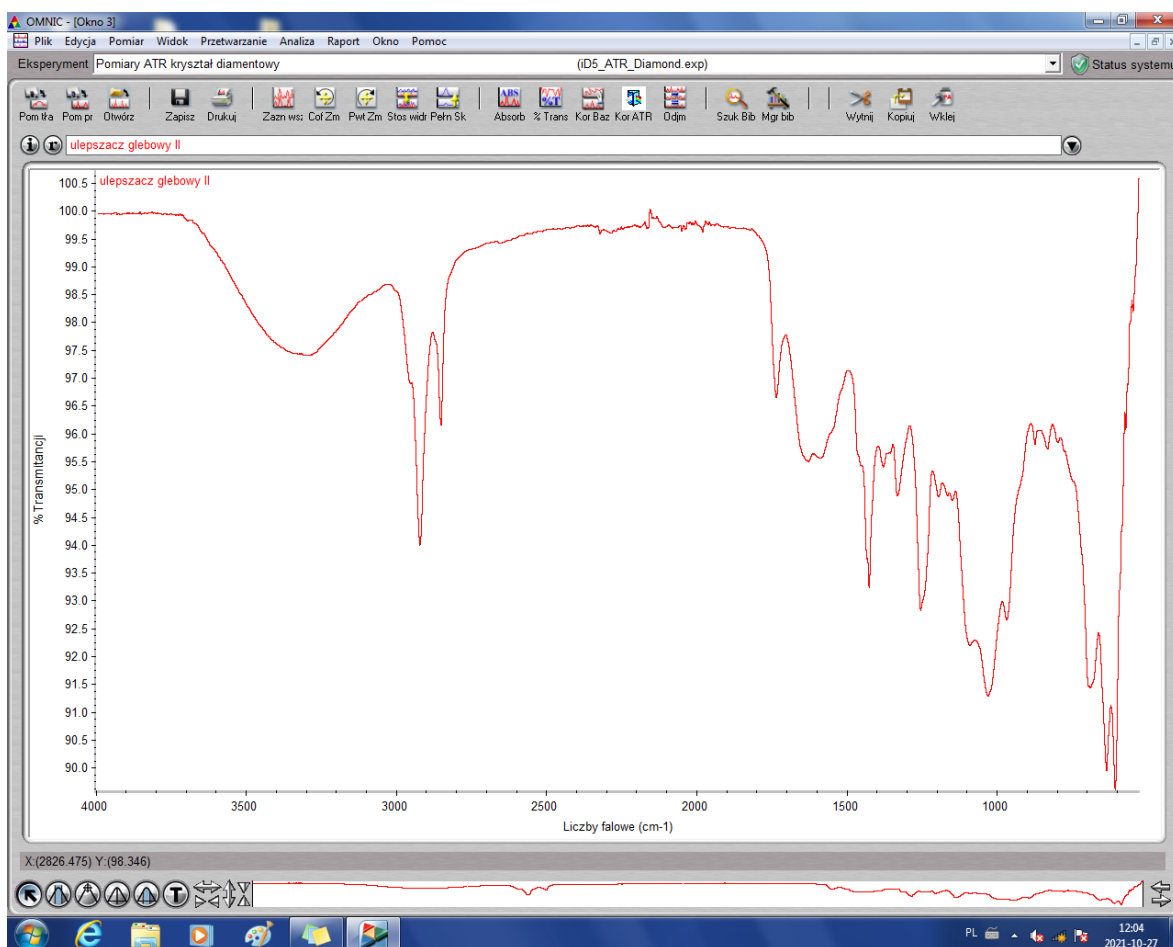
Rysunek 13.29 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 3 (opracowanie własne)



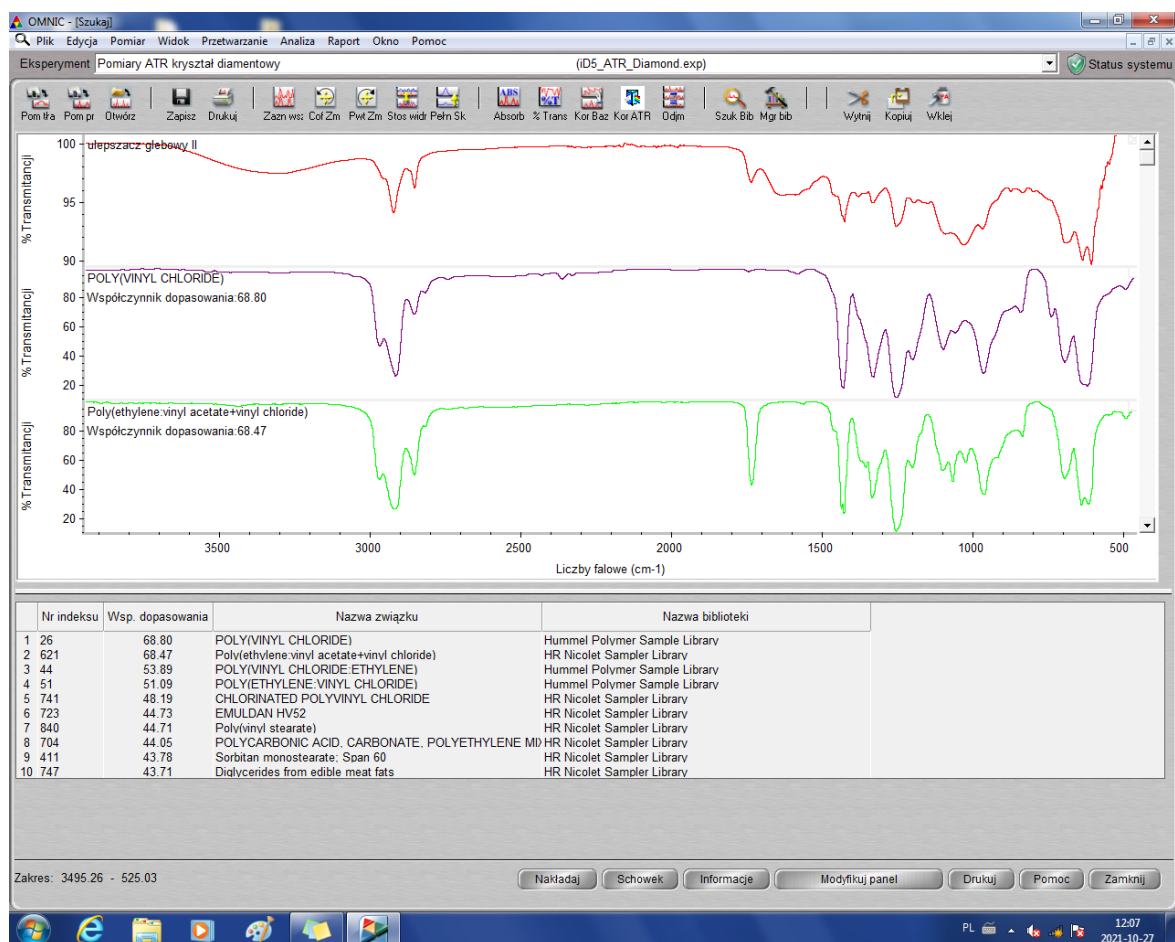
Rysunek 13.30 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 4 (opracowanie własne)



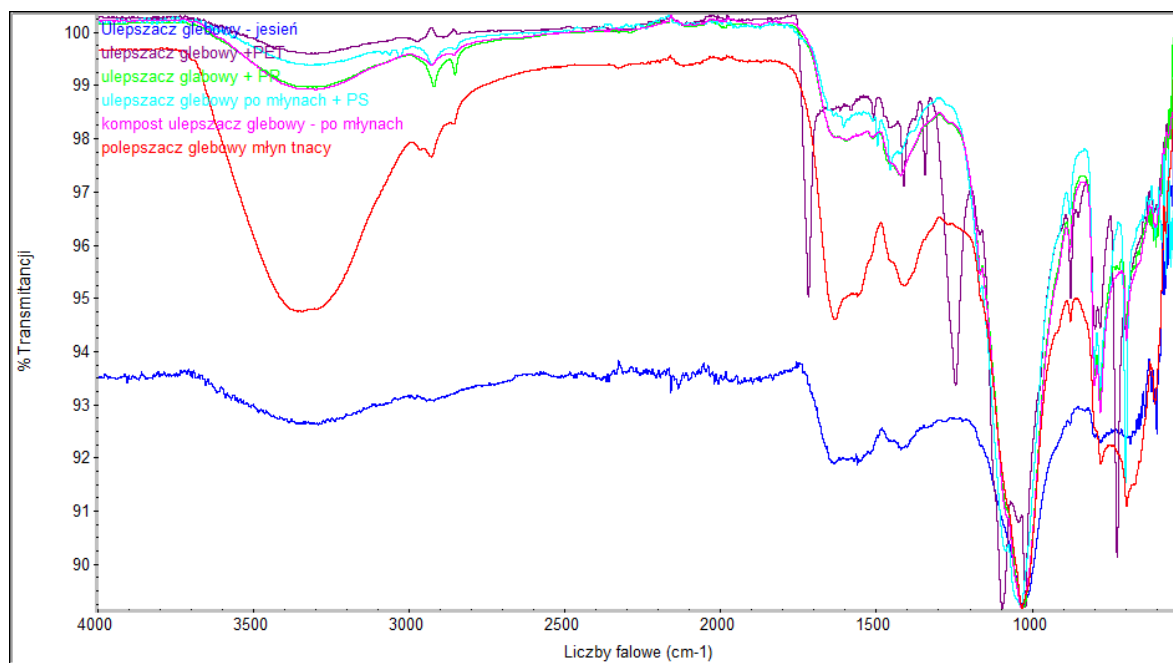
Rysunek 13.31 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 5 (opracowanie własne)



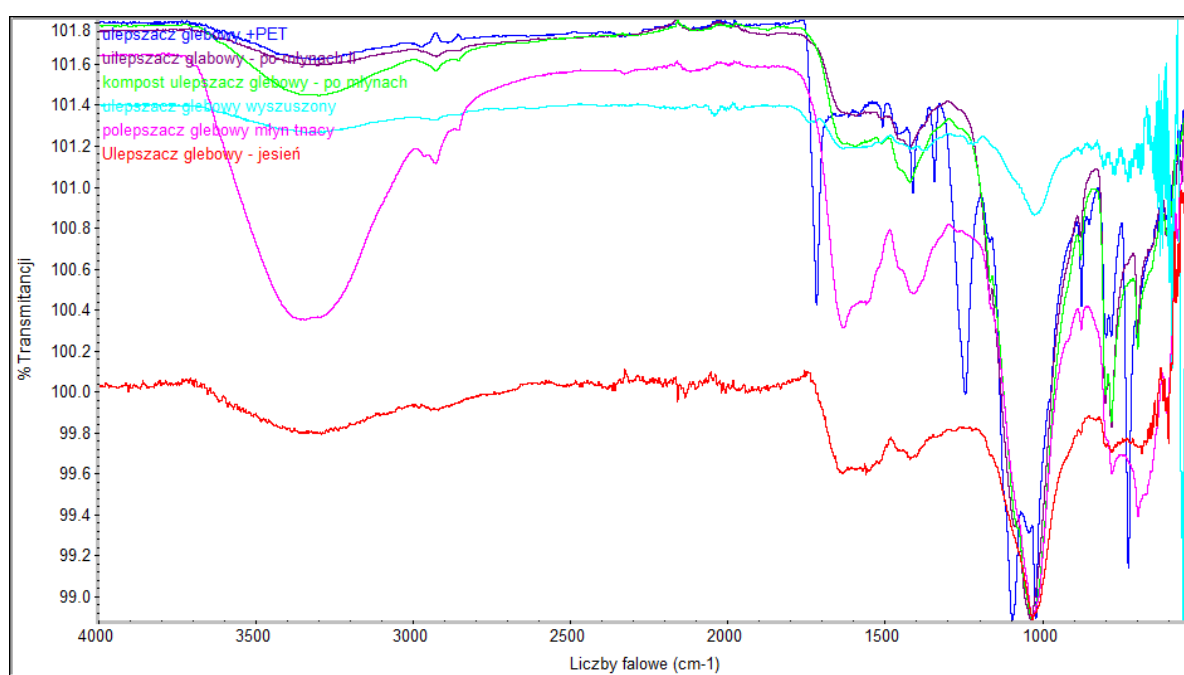
Rysunek 13.32 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 6 (opracowanie własne)



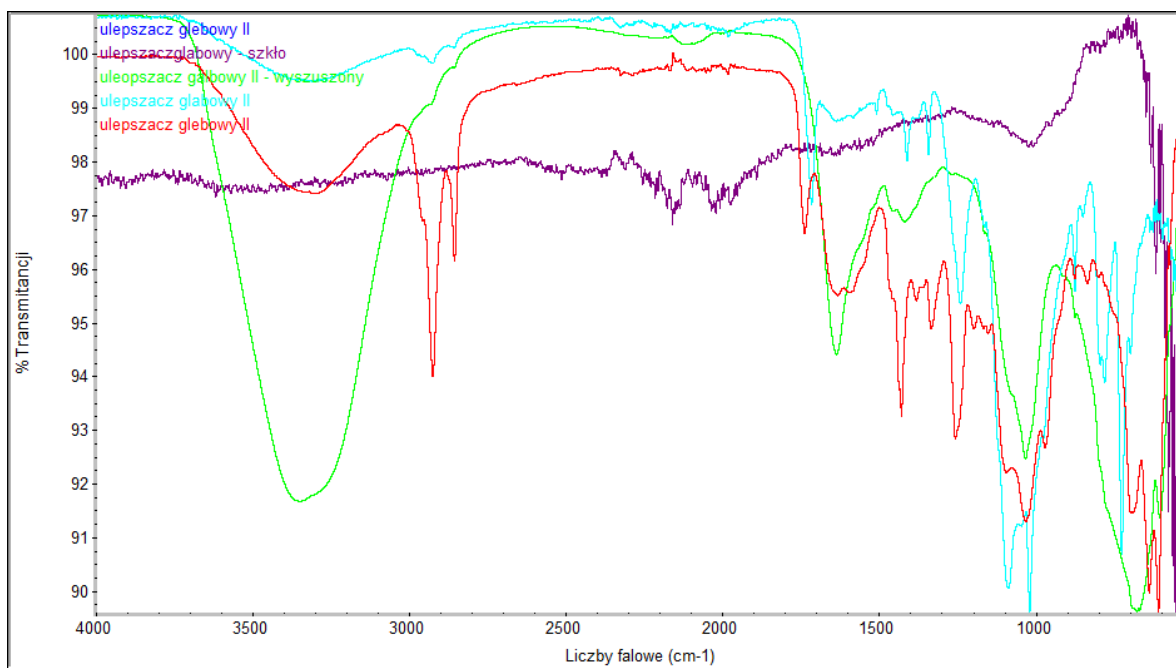
Rysunek 13.33 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 7 (opracowanie własne)



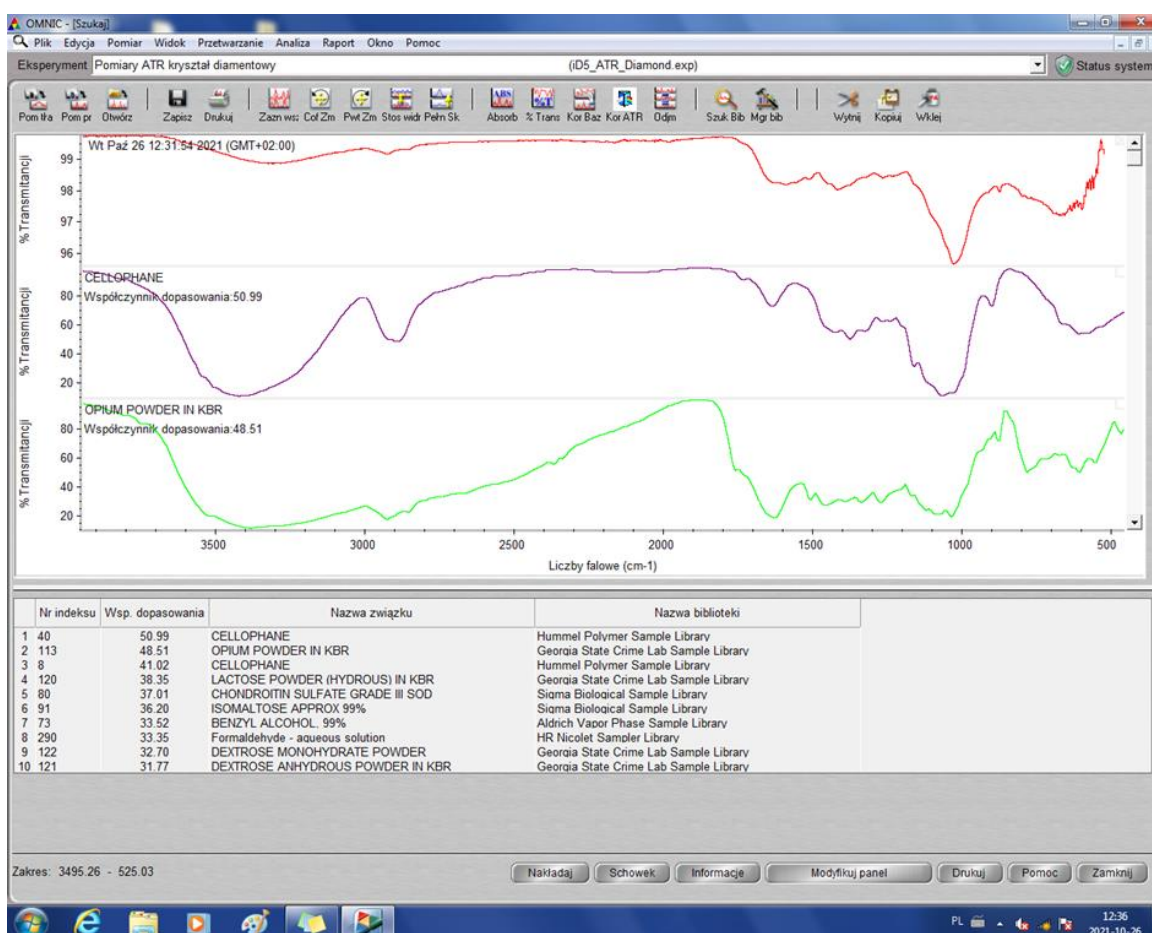
Rysunek 13.34 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 8 (opracowanie własne)



Rysunek 13.35 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 9 (opracowanie własne)



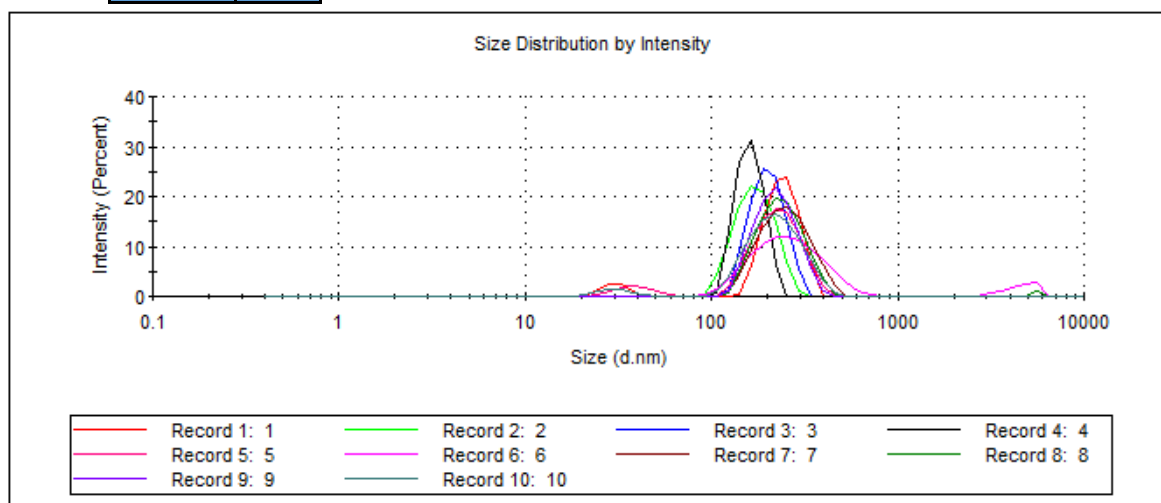
Rysunek 13.36 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 10 (opracowanie własne)



Rysunek 13.37 Polepszacz glebowy - FT-IR w różnych konfiguracjach 11 (opracowanie własne)

Tabela 13.7 Polepszacz glebowy DLS– seria jesień 3 min. 400rp (opracowanie własne)

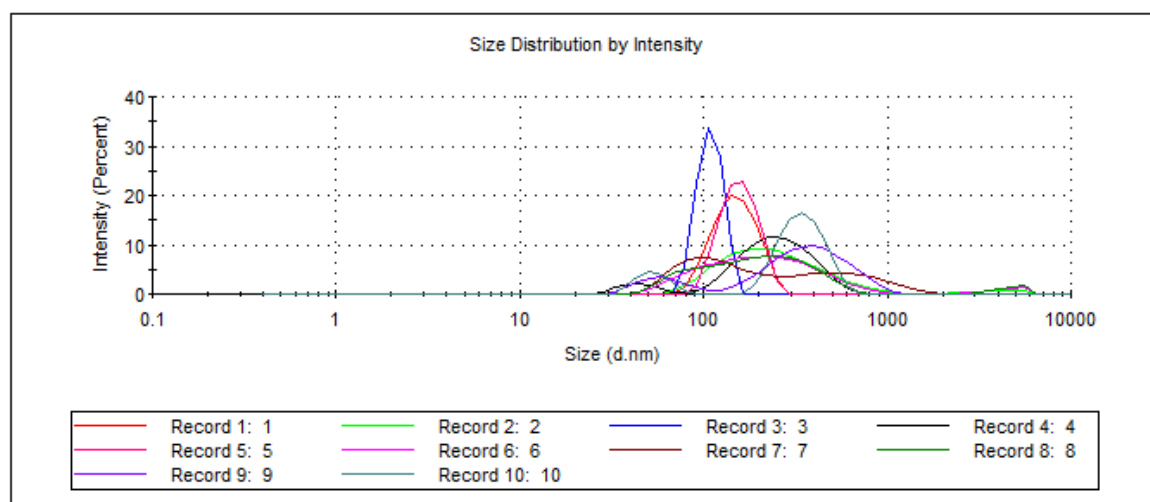
Ulepszacz glebowy - zmielony (jesień)					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
242,1	92,9	30,36	7,1	0,0	0,0
174,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
203,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
161,4	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
231,2	91,1	39,13	8,9	0,0	0,0
268,9	91,0	4592,0	9,0	0,0	0,0
254,7	98,8	5560,0	1,2	0,0	0,0
239,9	98,9	5560,0	1,1	0,0	0,0
225,6	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
227,6	94,9	30,57	5,1	0,0	0,0
Średnia	222,9				



Rysunek 13.38 Wyniki analizy polepszacza glebowego - wielkość cząstek (opracowanie własne)

Tabela 13.8 Wyniki analizy polepszacza glebowego - przesącz - wielkość cząstek

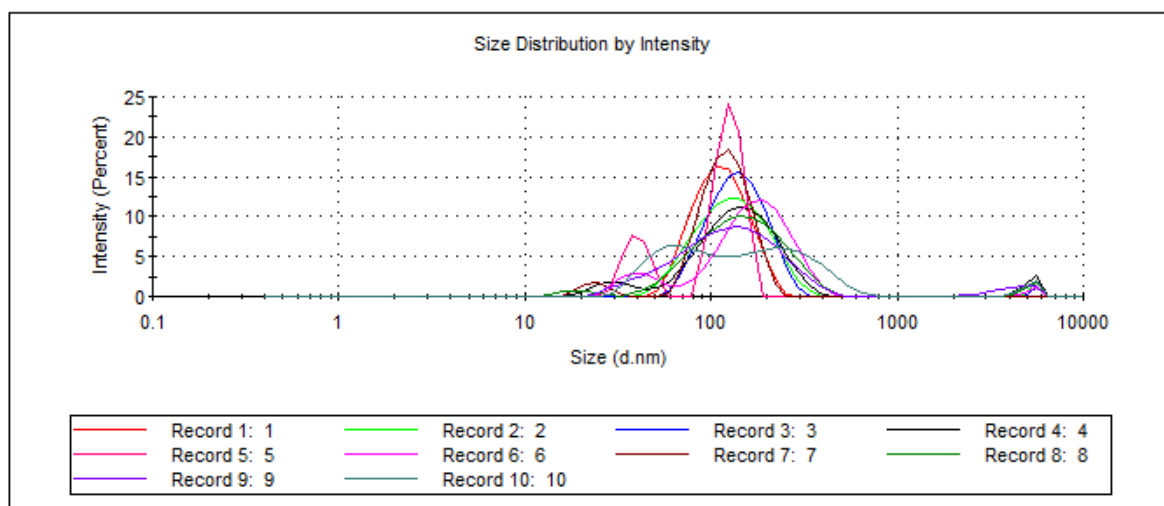
Ulepszacz glebowy – spod sączka					
Pik 1	% powierzchni 1	Pik 2	% powierzchni 2	Pik 3	% powierzchni 3
152,2	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
268,6	96,1	3972,0	3,9	0,0	0,0
109,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
267,3	91,0	45,24	9,0	0,0	0,0
158,5	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
237,7	95,4	4440	4,6	0,0	0,0
125,1	59,2	610,2	40,8	0,0	0,0
221,2	94,8	4669,0	5,2	0,0	0,0
410,7	81,1	63,4	18,9	0,0	0,0
351,7	83,2	53,36	16,8	0,0	0,0
Średnia	230,3				



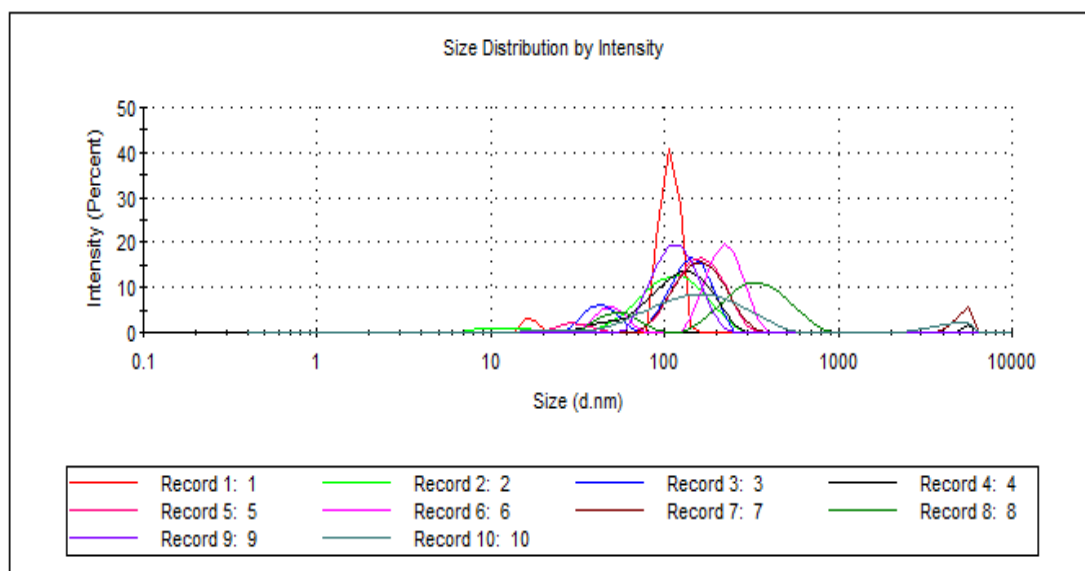
Rysunek 13.39 Wyniki analizy polepszacza glebowego - wielkość cząstek (przesącz)
(opracowanie własne)

Tabela 13.9 Wyniki analizy polepszacza glebowego - zmielonego - wielkość cząstek
(opracowanie własne)

Ulepszacz glebowy – zmielony					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
117,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
138,9	98,1	5448,0	1,9	0,0	0,0
144,7	98,8	5560,0	1,2	0,0	0,0
151,4	87,6	30,97	8,1	5178,0	4,4
126,2	76,4	39,83	23,6	0,0	0,0
187,7	84,5	43,69	14,0	5385,0	1,5
123,9	94,9	23,82	5,1	0,0	0,0
158,6	94,6	5212,0	2,8	19,58	2,6
141,1	94,4	4286,0	5,6	0,0	0,0
258,2	50,4	73,33	46,4	5157,0	3,2
Średnia	154,8				



Rysunek 13.40 Wyniki analizy polepszacza glebowego - zmielonego - wielkość cząstek



Rysunek 13.41 Wyniki analizy polepszacza glebowego - przesącz - wielkość cząstek (opracowanie własne)

Tabela 13.10 Wyniki analizy polepszacza glebowego - zmielonego 2- wielkość cząstek (opracowanie własne)

Ulepszacz glebowy – zmielony					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
258,6	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
419,9	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
395,5	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
429,8	65,3	114,0	14,7	5229,0	14,3
337,8	95,0	40,96	5,0	0,0	0,0
522,2	87,3	95,02	12,7	0,0	0,0
357,7	93,3	56,64	6,7	0,0	0,0
423,6	90,5	74,35	9,5	0,0	0,0
451,3	92,8	57,73	7,2	0,0	0,0
469,5	89,2	83,59	10,8	0,0	0,0
Średnia	406,6				

Tabela 13.11 Wyniki analizy polepszacza glebowego - zmielonego – rozcieńczony - wielkość cząstek (opracowanie własne)

Ulepszacz glebowy – zmielony rozcieńczony					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
706,1	57,4	126,2	38,0	4839,0	4,5
352,7	75,4	99,93	23,3	5533,0	1,3
183,8		1626,0	34,9	4598,0	7,4
193,1	46,7	1310,0	44,8	4524,0	7,1
395,9	62,4	112,1	27,6	4860,0	10,0
685,6	55,2	126,2	41,5	5366,0	3,2

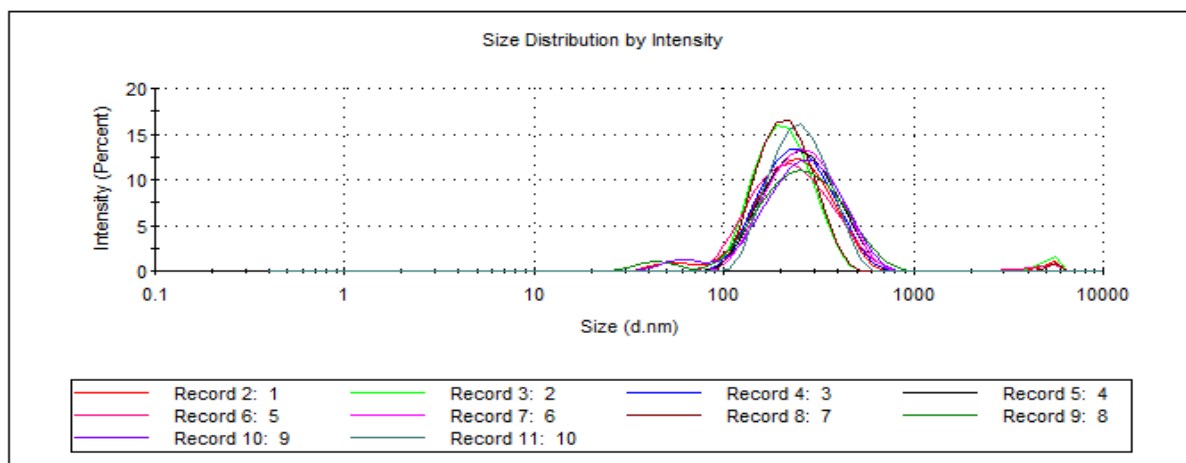
	198,9	63,3	732,3	28,4	4994,0	8,4
	583,5	56,1	118,74	41,6	5443,0	2,4
	310,7	95,2	5397,0	4,0	32,70	0,9
	327,9	79,5	79,5	16,7	5978,0	3,8
Średnia	393,8					

Tabela 13.12 Wyniki analizy polepszacza glebowego – ustany- wielkość cząstek (opracowanie własne)

Ulepszacz glebowy – ustany					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
1556,0	63,8	312,4	36,2	0,0	0,0
473,6	93,1	5216,0	6,9	0,0	0,0
403,7	58,5	2477	41,5	0,0	0,0
393,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1035,0	72,5	256,7	23,3	4627,0	4,1
546,6	90,2	4928,0	9,8	0,0	0,0
962,3	75,3	207,1	23,6	5436,0	1,2
632,7	80,80	156,8	19,2	0,0	0,0
791,8	81,9	185,7	15,2	4943,0	2,9
666,5	68,9	187,4	16,9	4533,0	15,2
Średnia	746,4				

Tabela 13.13 Polepszacz glebowy - po młynach jesienny II (opracowanie własne)

Ulepszacz glebowy – zmielony jesienny (mielony 2 min, 400 rpm)					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
129,9	90,1	34,71	9,9	0,0	0,0
98,52	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
107,9	96,3	4995,0	3,7	0,0	0,0
110,2	96,8	5152,0	3,2	0,0	0,0
127,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
118,8	91,1	1843,0	8,9	0,0	0,0
104,6	95,0	4429,0	5,0	0,0	0,0
100,4	85,8	2222,0	14,2	0,0	0,0
103,2	96,6	4827,0	3,4	0,0	0,0
101,0	96,3	4523,0	3,7	0,0	0,0
Średnia	110,2				



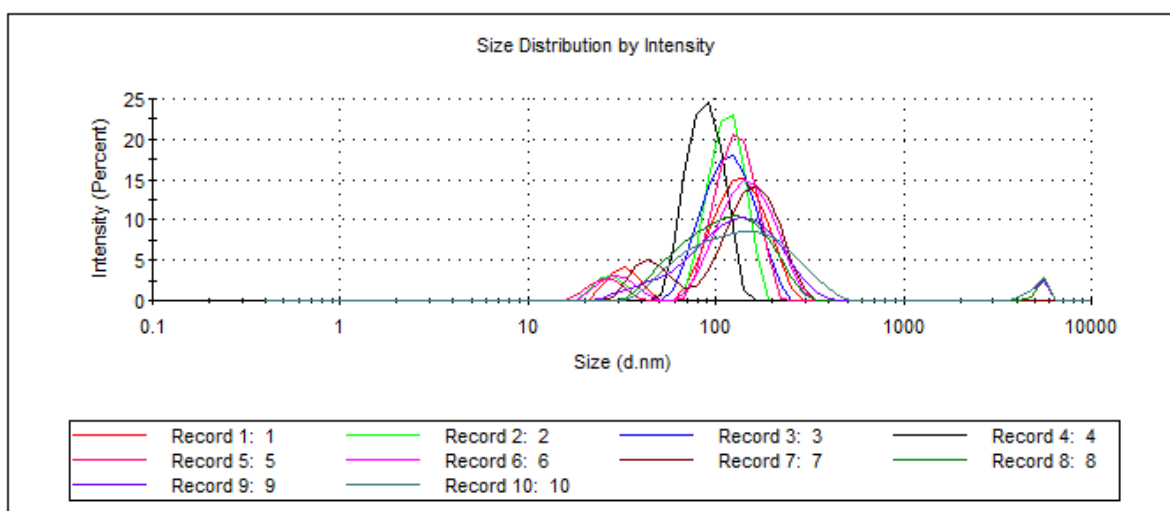
Rysunek 13.42 Polepszacz glebowy - rozkład wielkości cząstek (opracowanie własne)

Tabela 13.14 Polepszacz glebowy jesienny II spod sączka -2 min, 400 rpm (opracowanie własne)

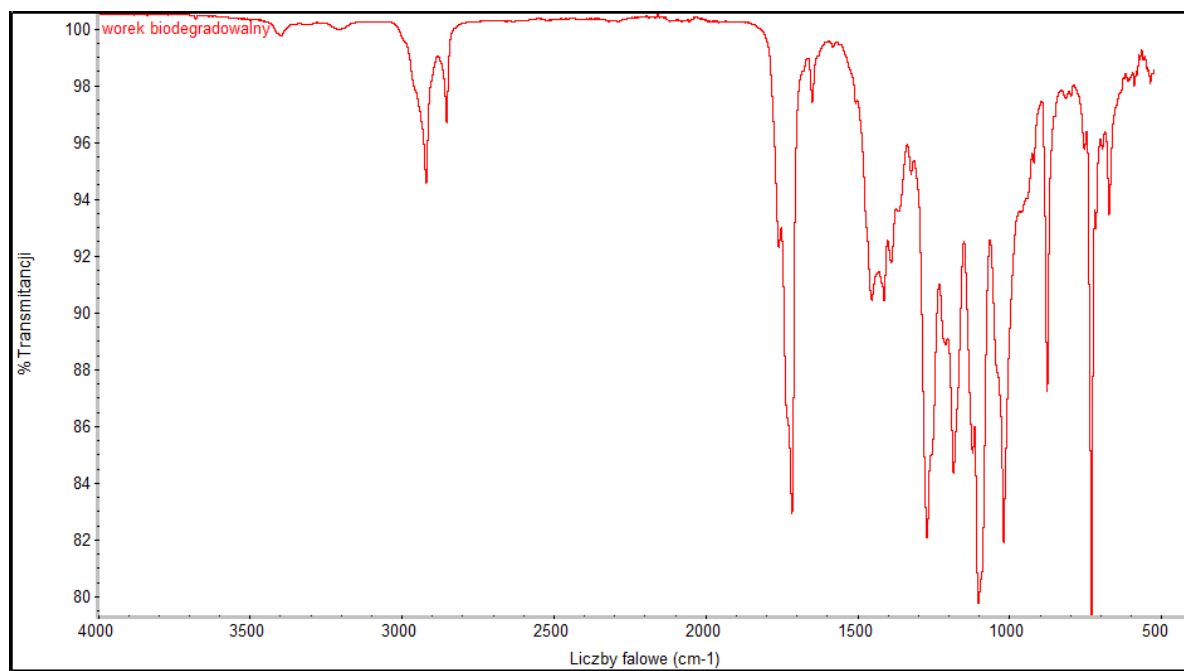
Ulepszacz glebowy – zmielony jesienny II przesącz spod sączka (mielony 2 min, 400 rpm)					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
252,5	84,8	53,41	3,6	5207,0	1,7
215,2	97,2	5172,0	2,8	0,0	0,0
260,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
273,6	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
251,4	98,1	4678,0	1,9	0,0	0,0
280,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
220,4	98,9	5386,0	1,1	0,0	0,0
284,5	95,8	45,17	4,2	0,0	0,0
285,0	94,8	60,59		5,2	0,0
261,5	100,0	0,0		0,0	0,0
Średnia	258,5				

Tabela 13.15 Polepszacz z glebowy jesień II po młynach - spod sączka (opracowanie własne)

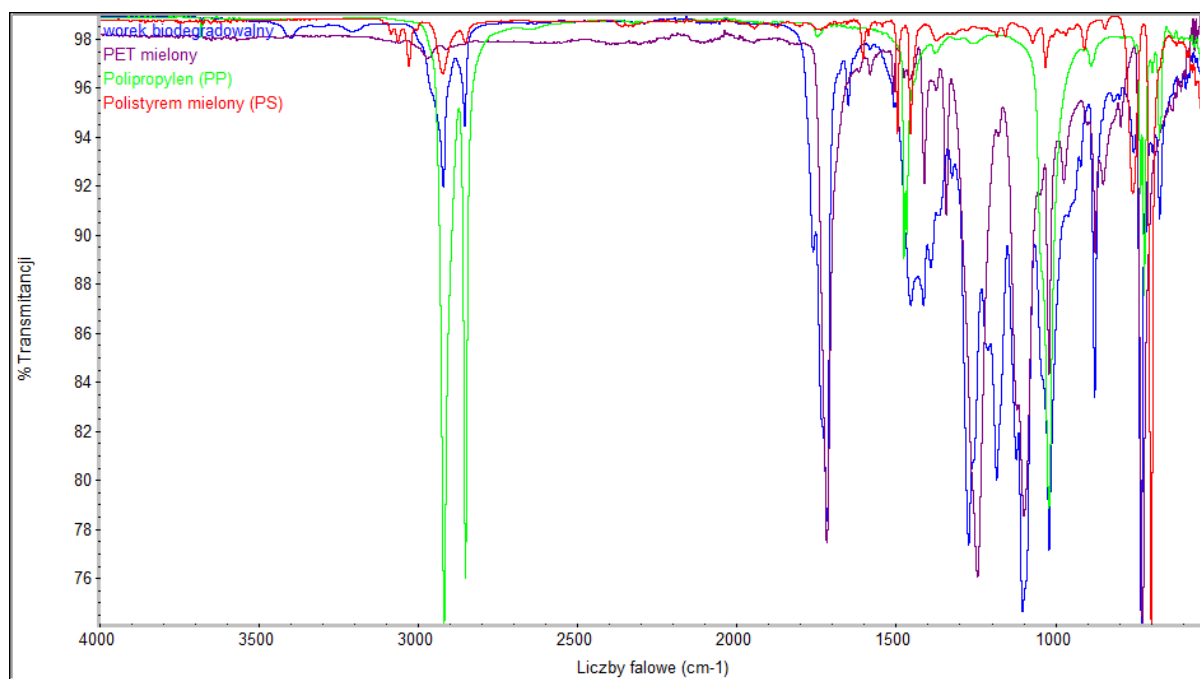
Ulepszacz glebowy – zmielony jesienny II spod sączka					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
139,4	86,1	32,60	13,9	0,0	0,0
116,0	90,5	27,47	9,5	0,0	0,0
121,6	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
88,76	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
129,5	90,0	26,36	10,0	0,0	0,0
151,8	88,2	29,97	11,8	0,0	0,0
161,5	79,4	45,83	20,6	0,0	0,0
121,6	96,9	5430,0	3,1	0,0	0,0
136,2	95,8	5196,0	4,2	0,0	0,0
151,9	95,5	5223,0	4,5	0,0	0,0
Średnia	131,8				



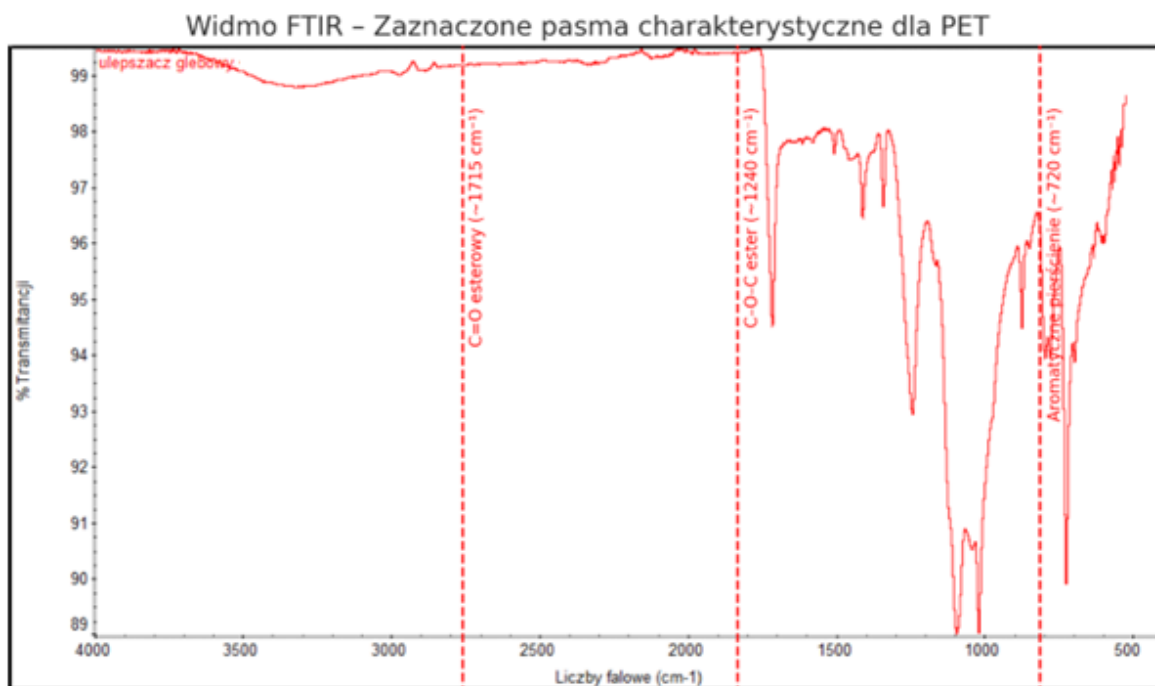
Rysunek 13.43 Polepszacz z glebowy jesień II - DLS - spod sączka (opracowanie własne)



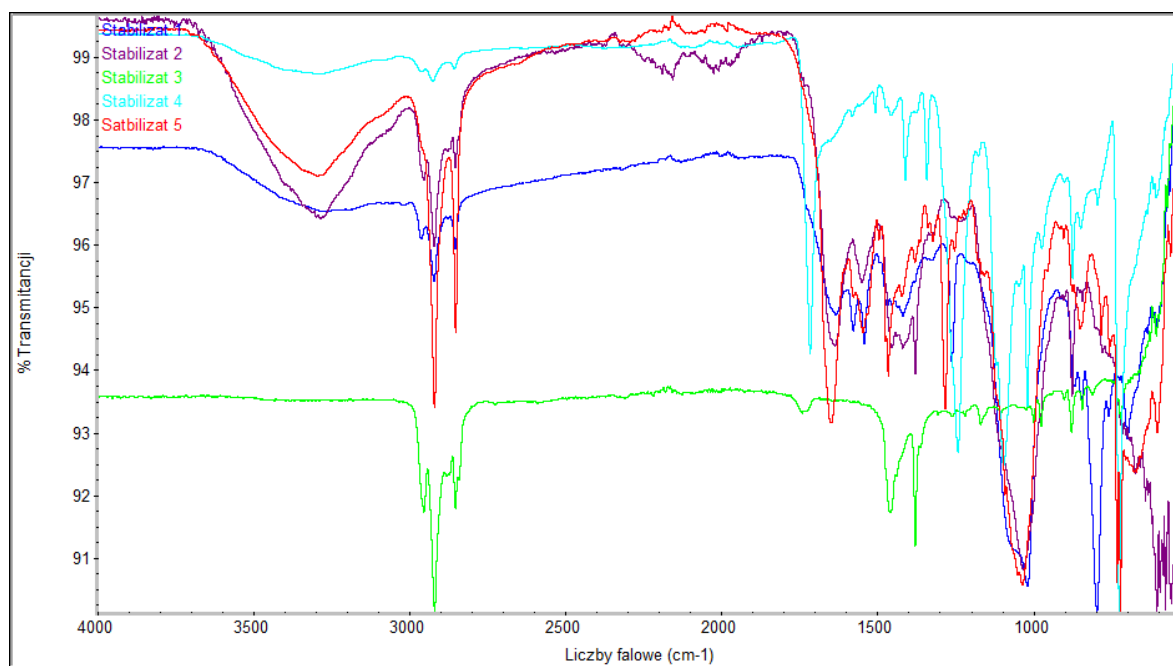
Rysunek 13.44 Analiza FT-IR worka biodegradowalnego (opracowanie własne)



Rysunek 13.45 Analiza FT-IR różnych polimerów (opracowanie własne)



Rysunek 13.46 Widmo FT-IR polepszacza glebowego z pasmem PET (opracowanie własne)



Rysunek 13.47 Widma FT-IR próbek 1-5 stabilizatu (opracowanie własne)

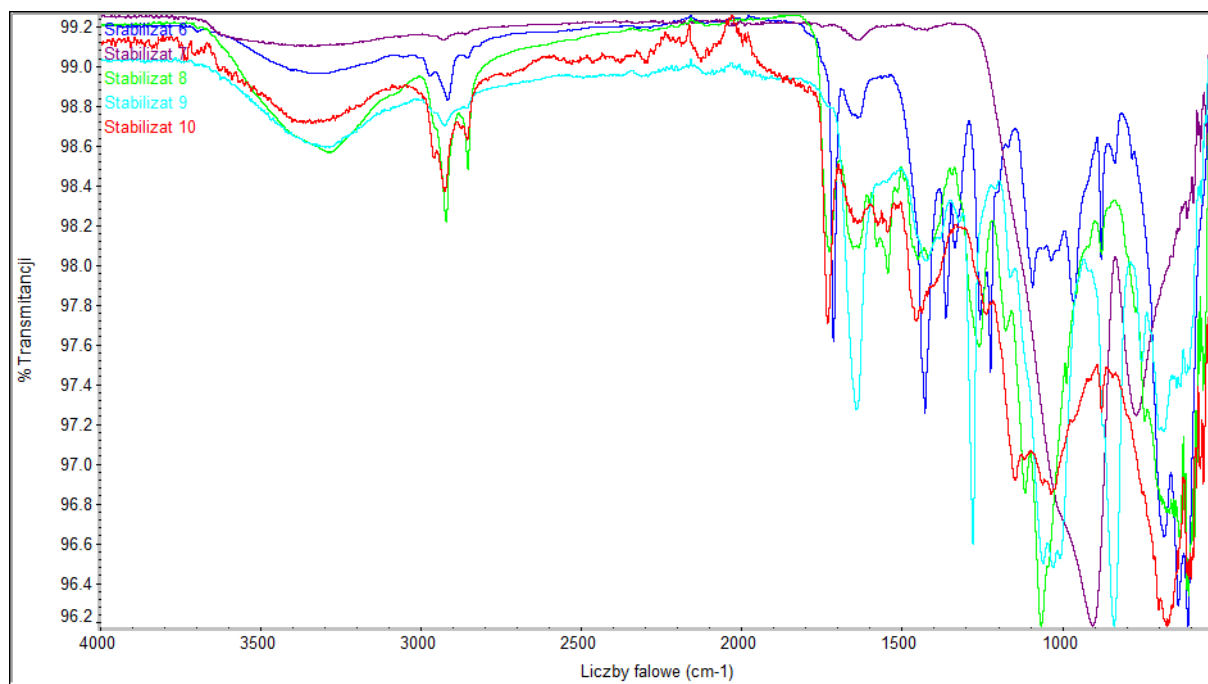
Stabilizator 1 - Silicone oil, poly(dimethylsiloxane)

Stabilizator 2 - Cellophane,

Stabilizator 3 - Polypropylen

Stabilizator 4 - Polietylene terephtalate

Stabilizator 5 - Polyethylene



Rysunek 13.48 Widma FT-IR próbek 6-10 stabilizatu (opracowanie własne)

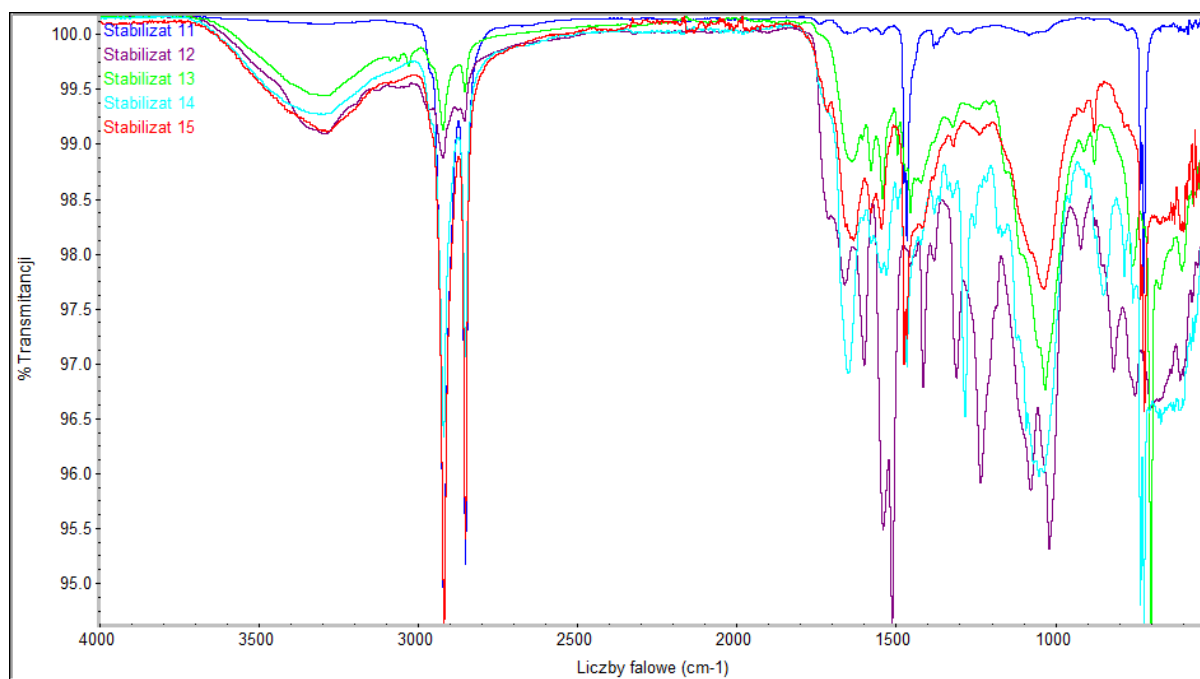
Stabilizat 6 – polichlorek winylu

Stabilizat 7 - chloral hydrate

Stabilizat 8 – alkyd resin, poliester

Stabilizat 9 – bromometanol

Stabilizat 10 – polimetakrylan, polichlorek winylu



Rysunek 13.49 Widma FT-IR próbek 11-15 stabilizatu (opracowanie własne)

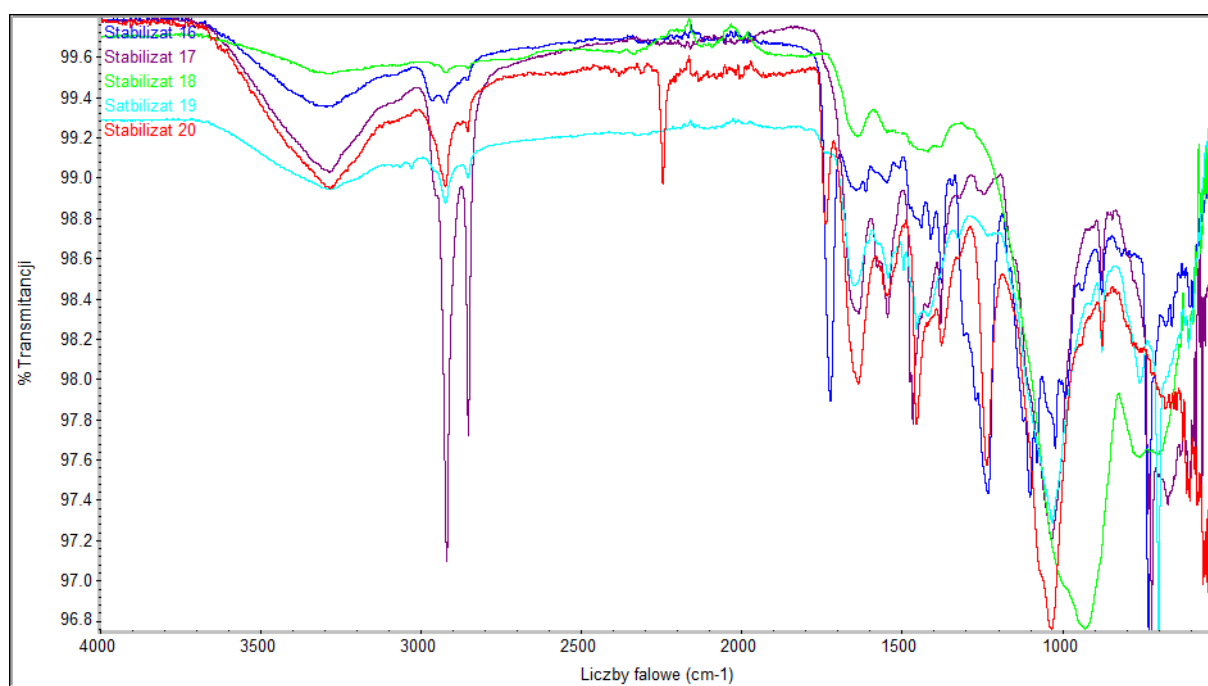
Stabilizat 11 – polietylen

Stabilizat 12 - polistyren

Stabilizat 13 – polietylen

Stabilizat 14 – polietylen

Stabilizat 15 – polietylen



Rysunek 13.50 Widma FT-IR próbek 16-20 stabilizatu (opracowanie własne)

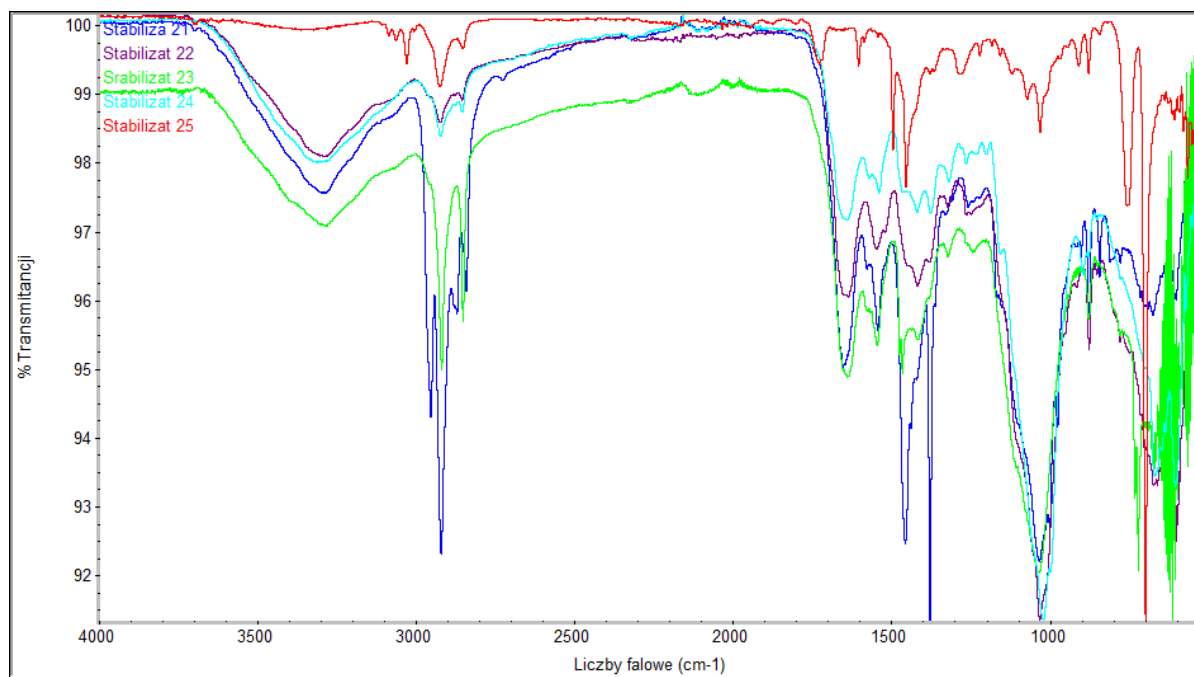
Stabilizat 16 – poly(2-etyl-2-methyl-1.3-propanedivl isophthalate)

Stabilizat 17 - polietylen

Stabilizat 18 – chloral hydrate

Stabilizat 19 – polistyren

Stabilizat 20 – polivinyacetate ethylene



Rysunek 13.51 Widma FT-IR próbek 21-25 stabilizatu (opracowanie własne)

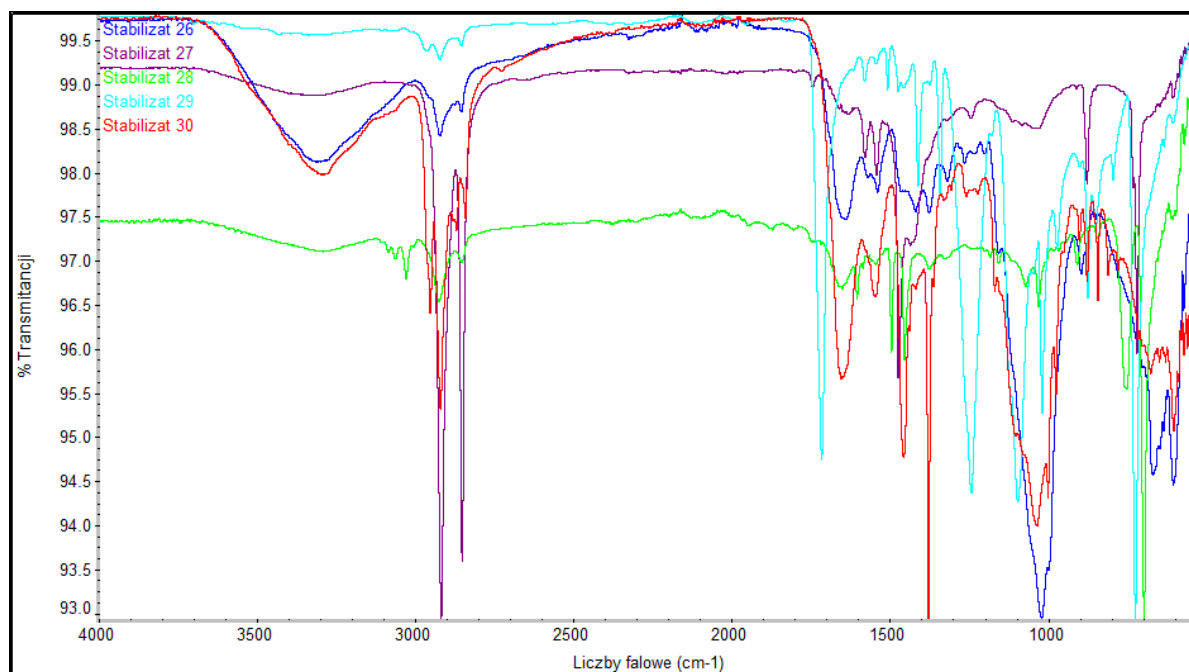
Stabilizator 21 - polipropylen

Stabilizator 22 - cellophan

Stabilizator 23 - polietylen

Stabilizator 24 - cellophan

Stabilizator 25 - polistyren



Rysunek 13.52 Widma FT-IR próbek 26-30 stabilizatu (opracowanie własne)

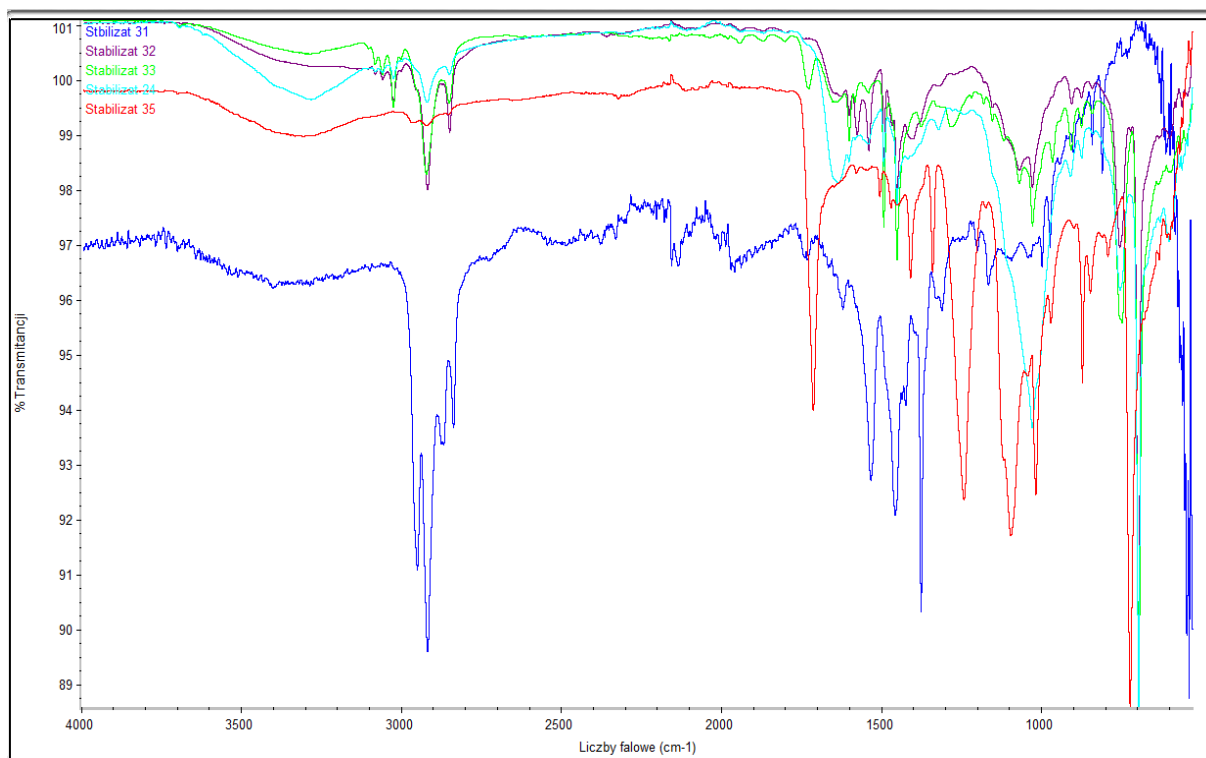
Stabilizat 26 – cellophane

Stabilizat 27- polietylen

Stabilizat 28– polistyren

Stabilizat 29 – politeraftalan etylenu, poliester

Stabilizat 30 – polipropylen



Rysunek 13.53 Widma FT-IR próbek 31-35 stabilizatu (opracowanie własne)

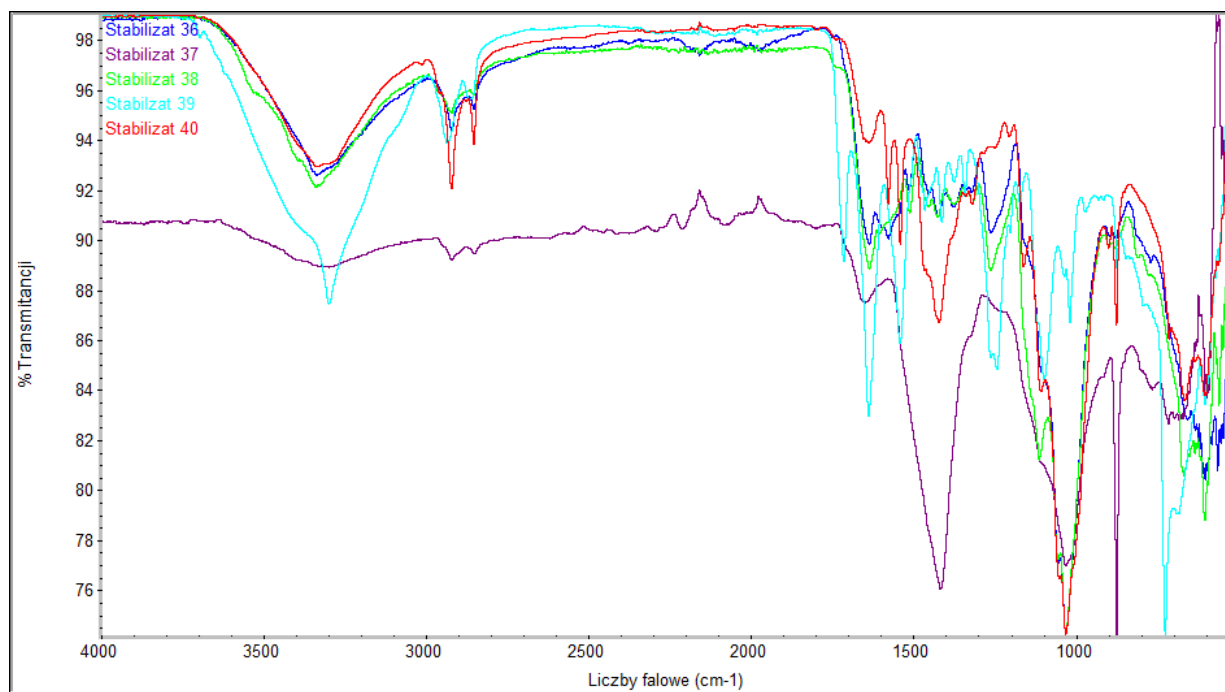
Stabilizator 31 – polipropylen

Stabilizator 32- polistyren

Stabilizator 33– polistyren

Stabilizator 34 – polistyren, poli(styren vinylidene chloride)

Stabilizator 35 – politereftalen etylenu, poliester



Rysunek 13.54 Widma FT-IR próbek 36-40 stabilizatu (opracowanie własne)

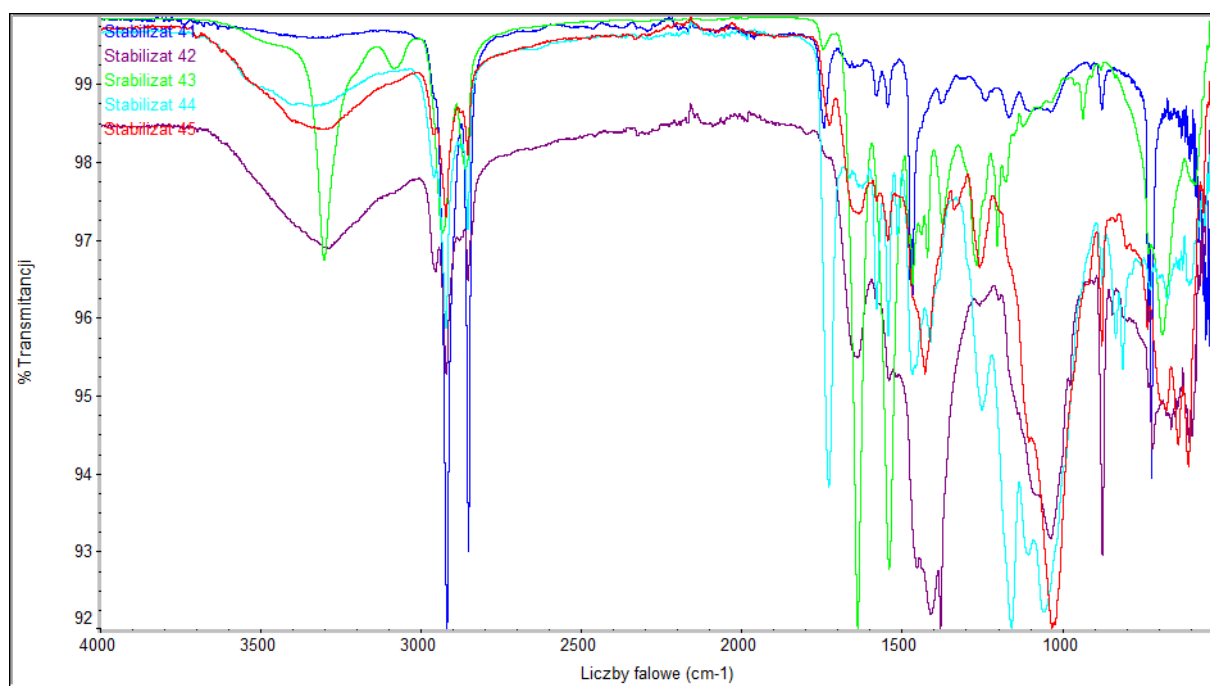
Stabilizat 36 - cellophane

Stabilizat 37- methylenecyclopentane

Stabilizat 38– poliamid, poliethylene terephthalate

Stabilizat 39 – poliamid, poliethylene terephthalate

Stabilizat 40 – cellophan, poliester



Rysunek 13.55 Widma FT-IR próbek 41-45 stabilizatu (opracowanie własne)

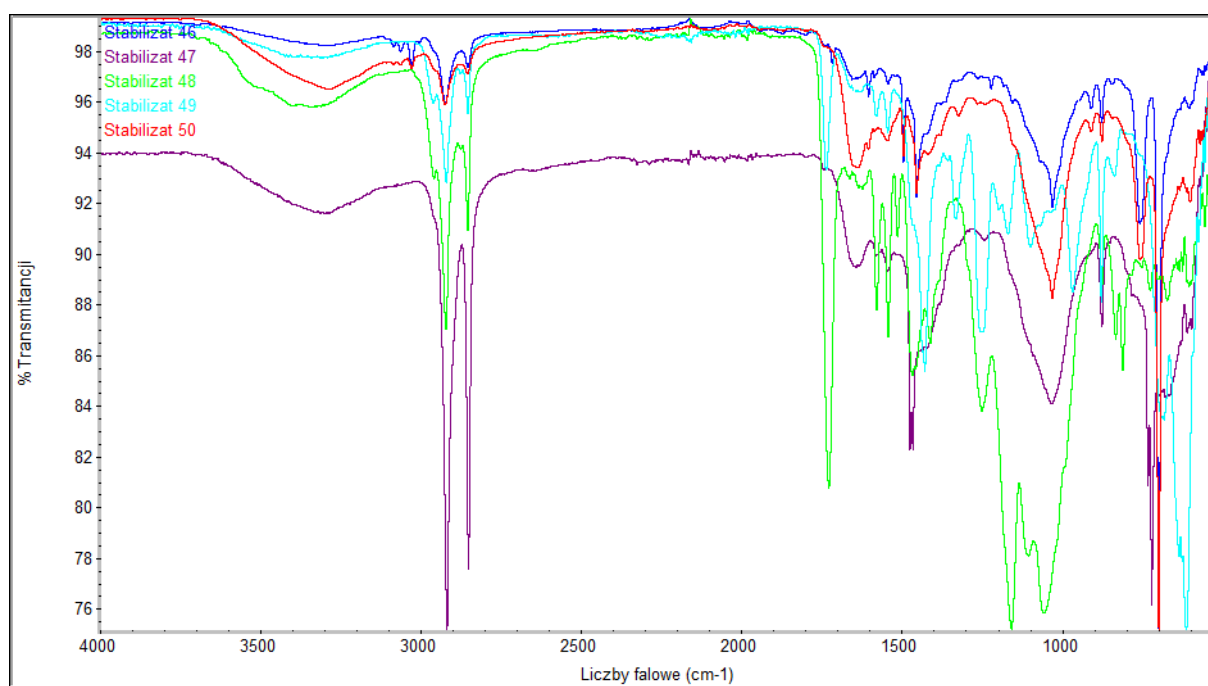
Stabilizat 41 – polietylen

Stabilizat 42- polipropylen

Stabilizat 43- poliamid

Stabilizat 44 – nonyl aldehyde, poliester resin, polimetakrylan

Stabilizat 45 – polichliotek winylu, cellophan



Rysunek 13.56 Widma FT-IR próbek 45-50 stabilizatu (opracowanie własne)

Stabilizat 46 – polistyren

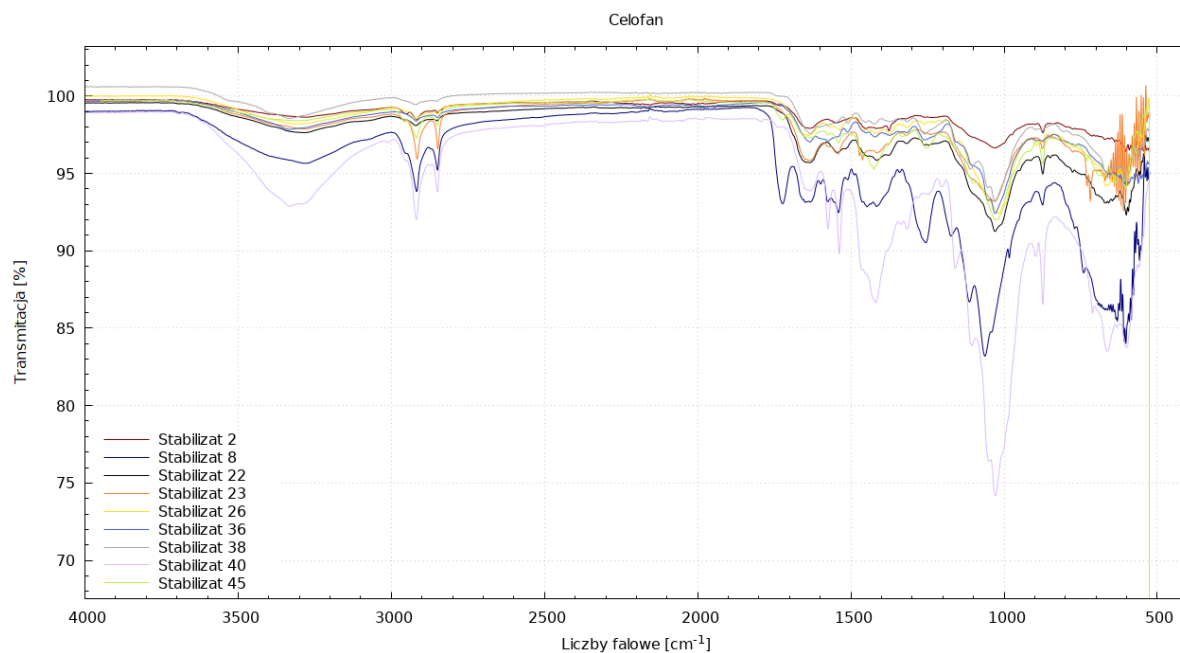
Stabilizat 47- polietylen

Stabilizat 48– polietylen

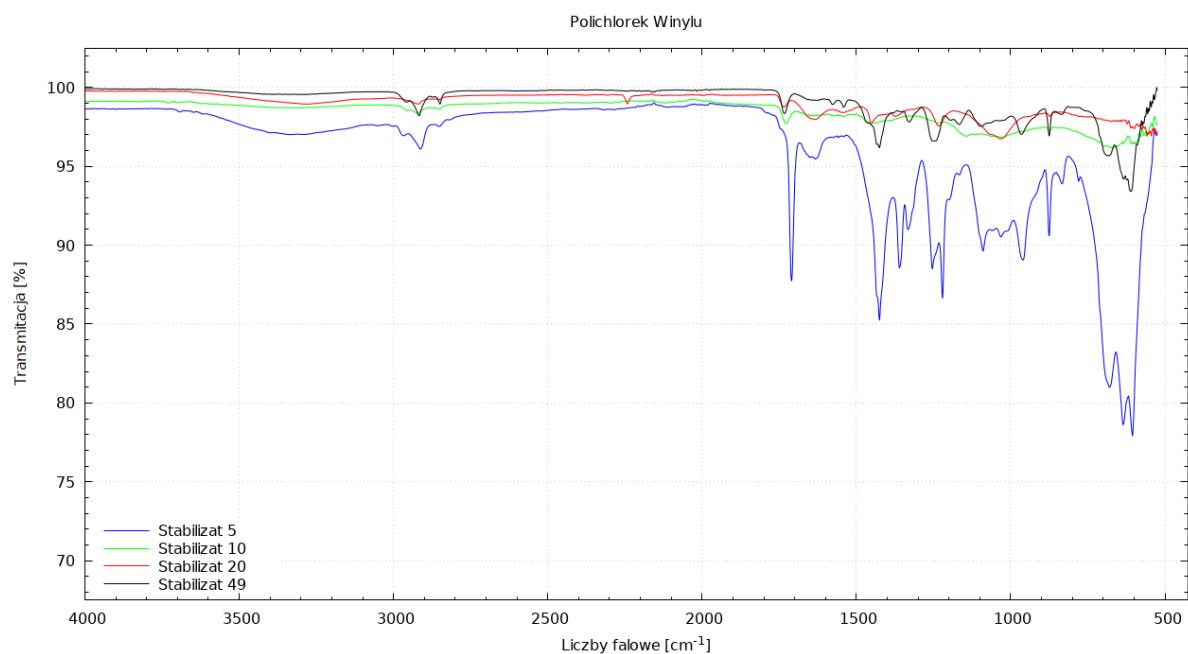
Stabilizat 49 – polichlorek winylu

Stabilizat 50 – polistyren

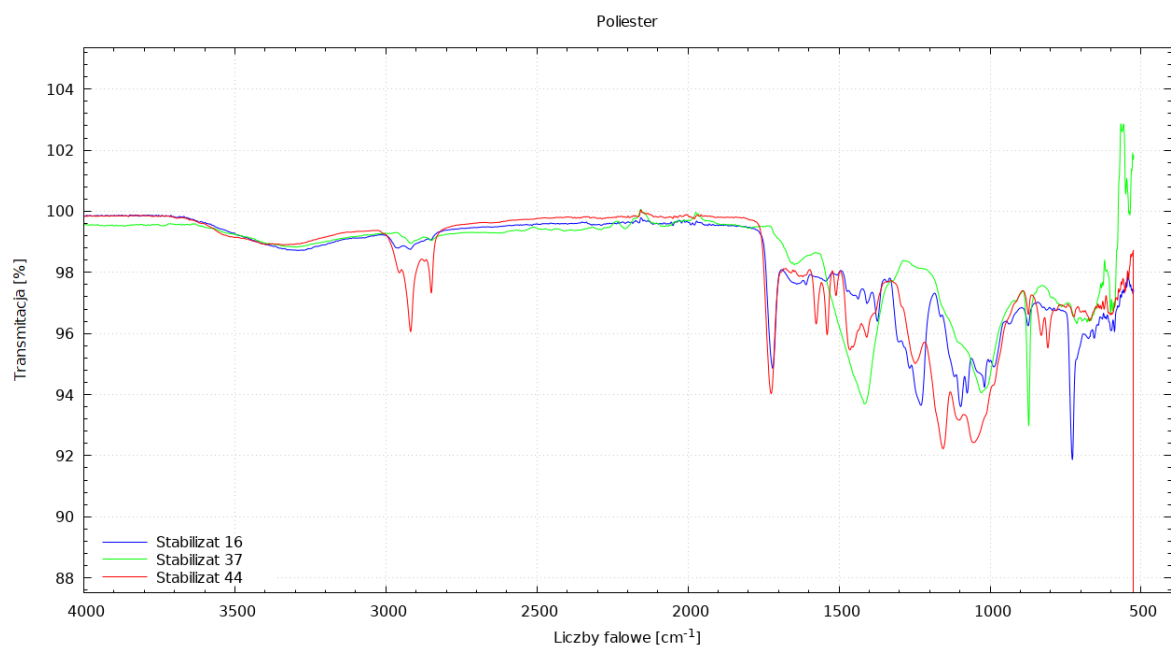
Wyniki stabilizatu (próbki 1-50) z FT-IR z podziałem na wyodrębnione polimery :



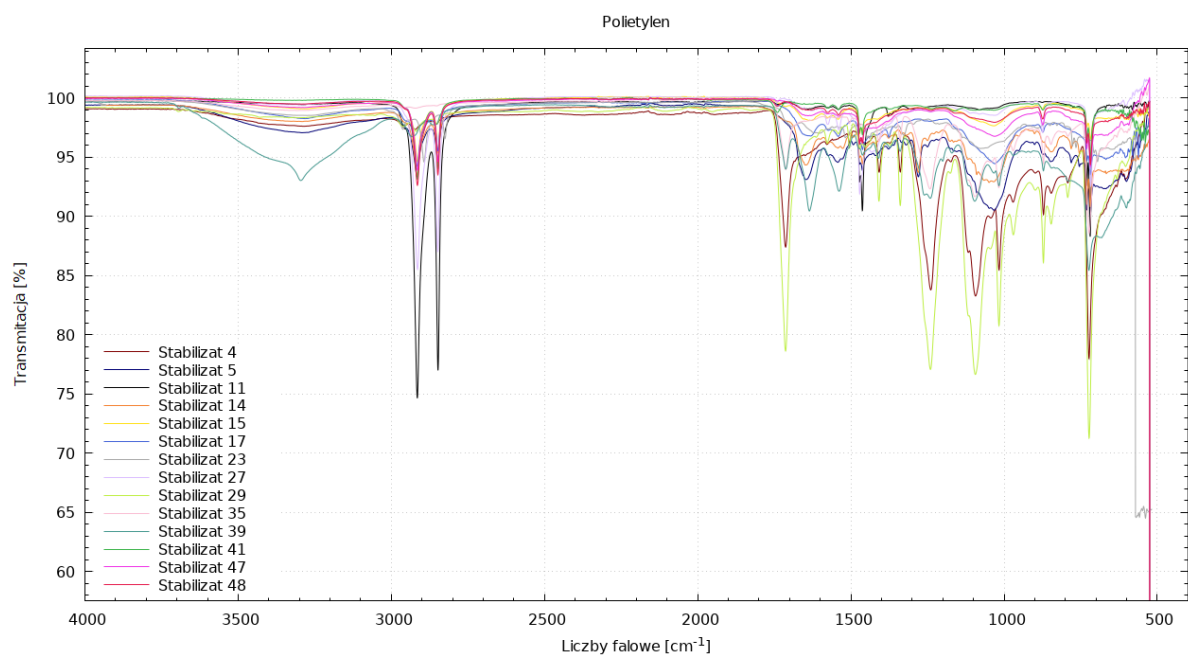
Rysunek 13.57 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - celofan (opracowanie własne)



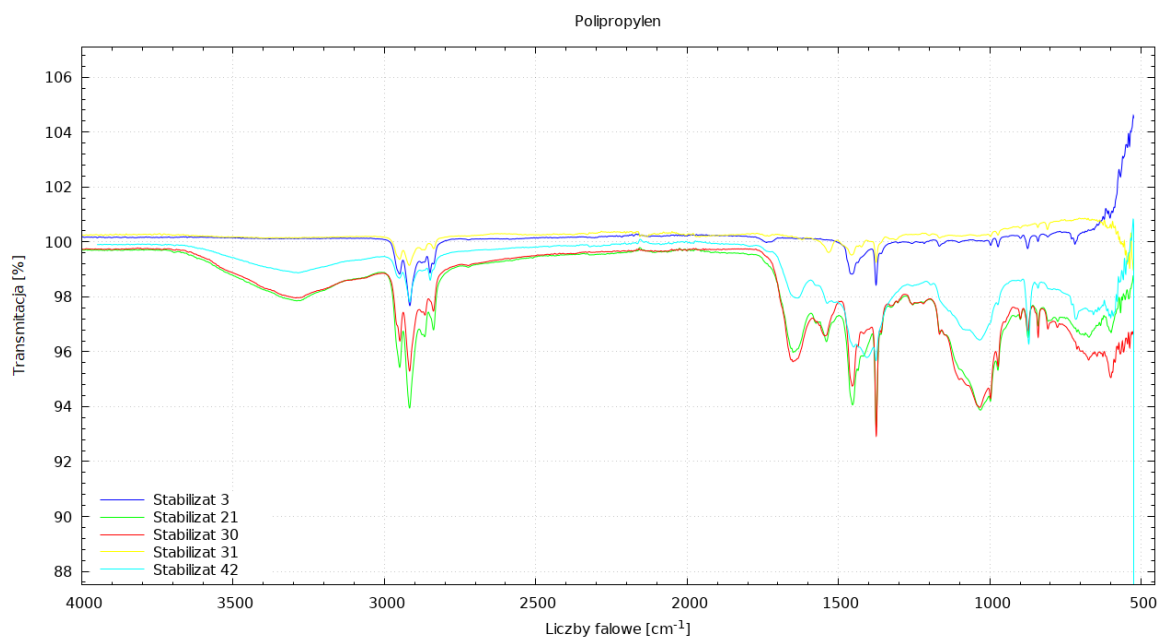
Rysunek 13.58 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - polichlorek winylu (opracowanie własne)



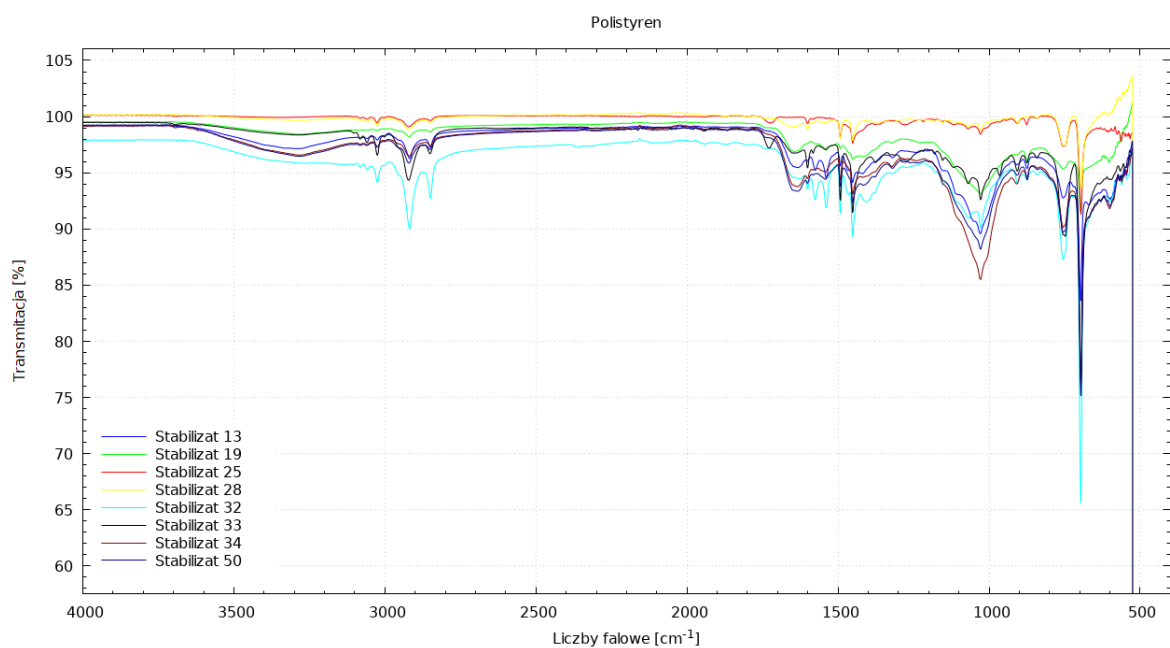
Rysunek 13.59 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - poliester (opracowanie własne)



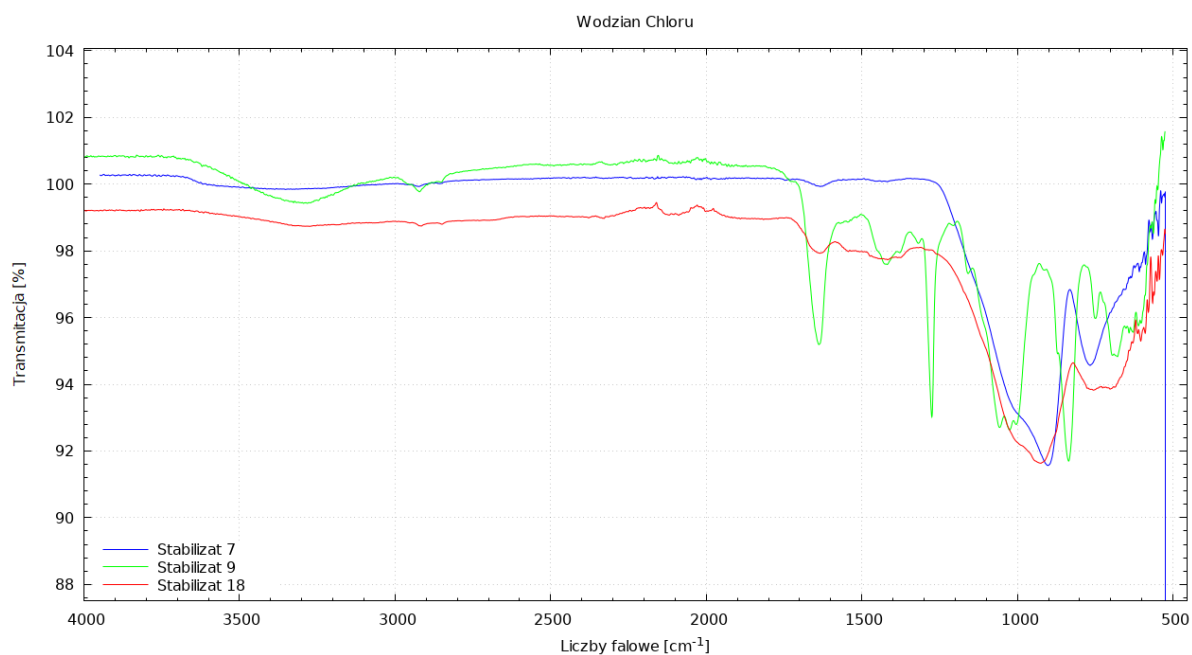
Rysunek 13.60 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - polietylen (opracowanie własne)



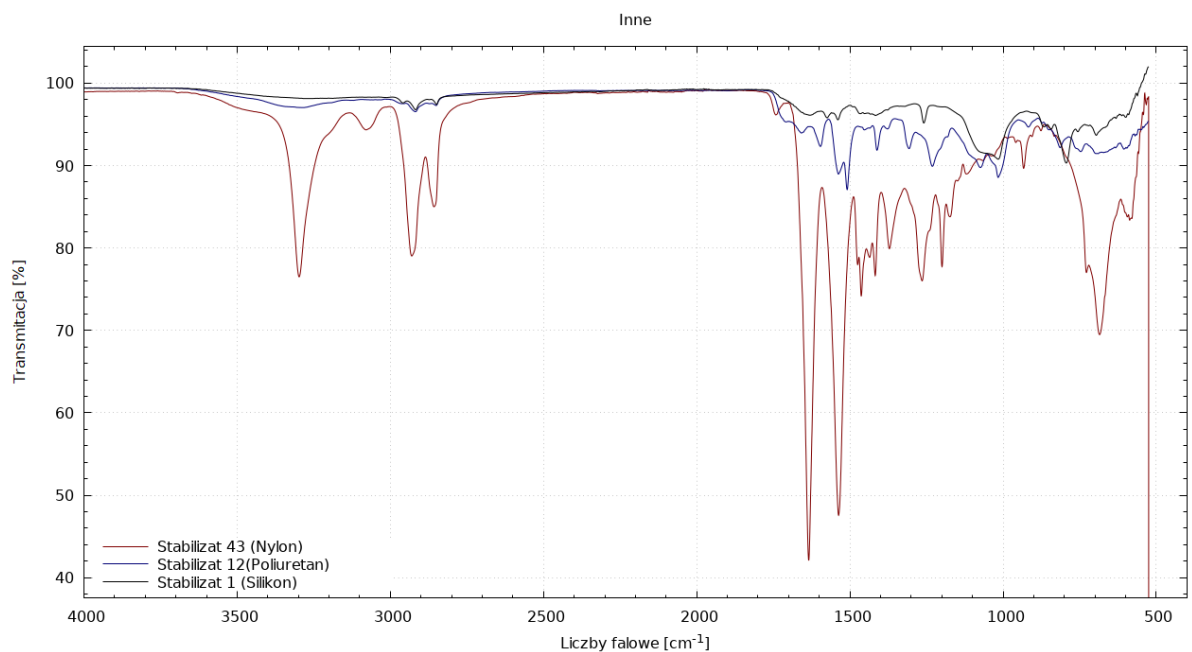
Rysunek 13.61 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - polipropylen (opracowanie własne)



Rysunek 13.62 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - polistyren (opracowanie własne)



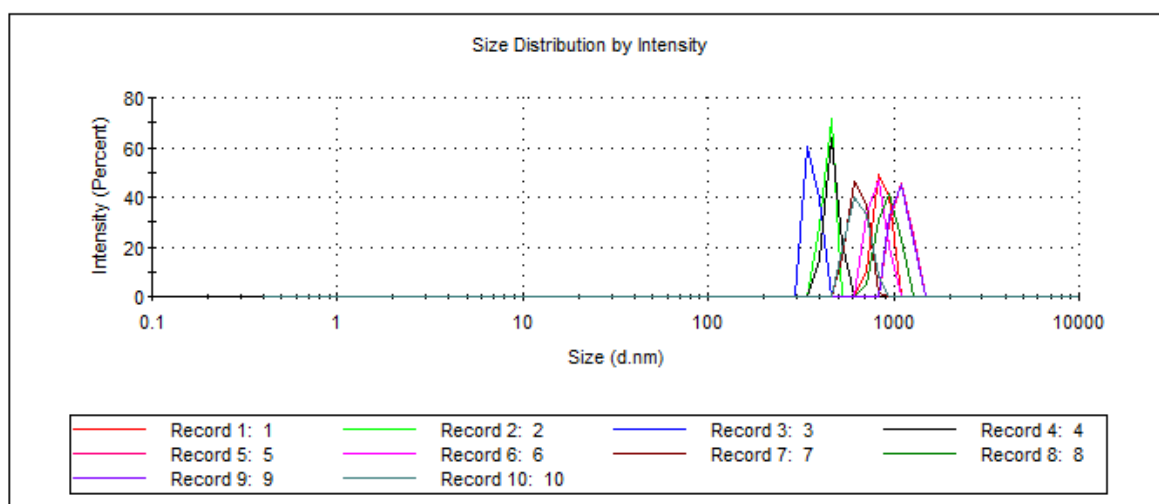
Rysunek 13.63 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - wodzian chloru (opracowanie własne)



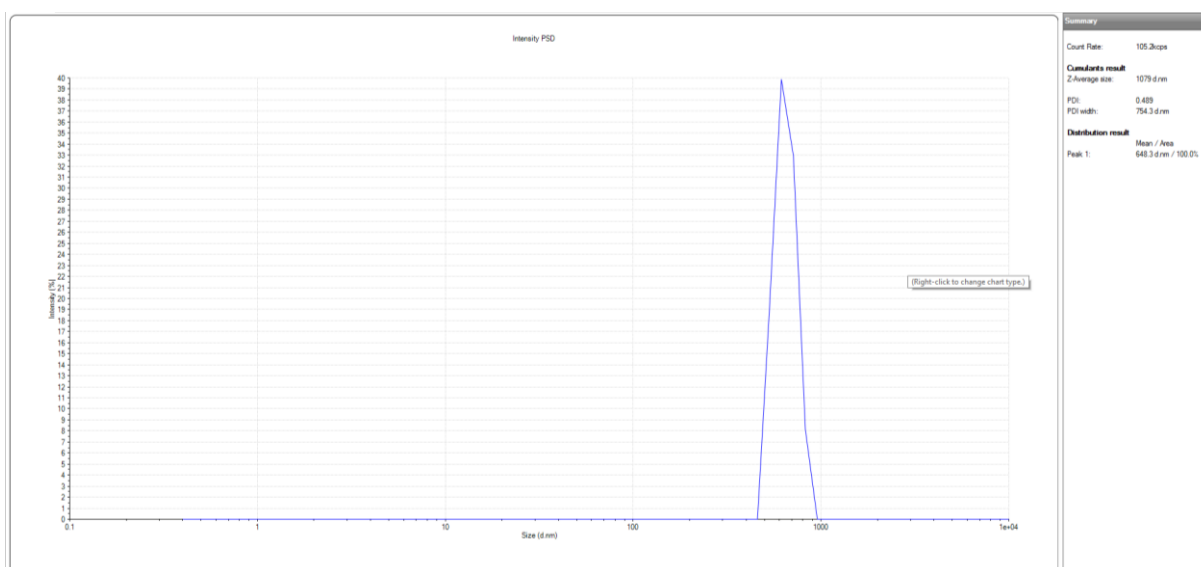
Rysunek 13.64 Analiza FT-IR próbek stabilizatu - inne (opracowanie własne)

Tabela 13.16 Badanie wielkości cząstek stabilizatu - seria 1 (opracowanie własne)

Stabilizat seria 1 - wielkość cząstek					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
966,2	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
441,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
363,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
465,4	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1106,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
814,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
640,7	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
938,7	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1097,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
648,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia	738,1				



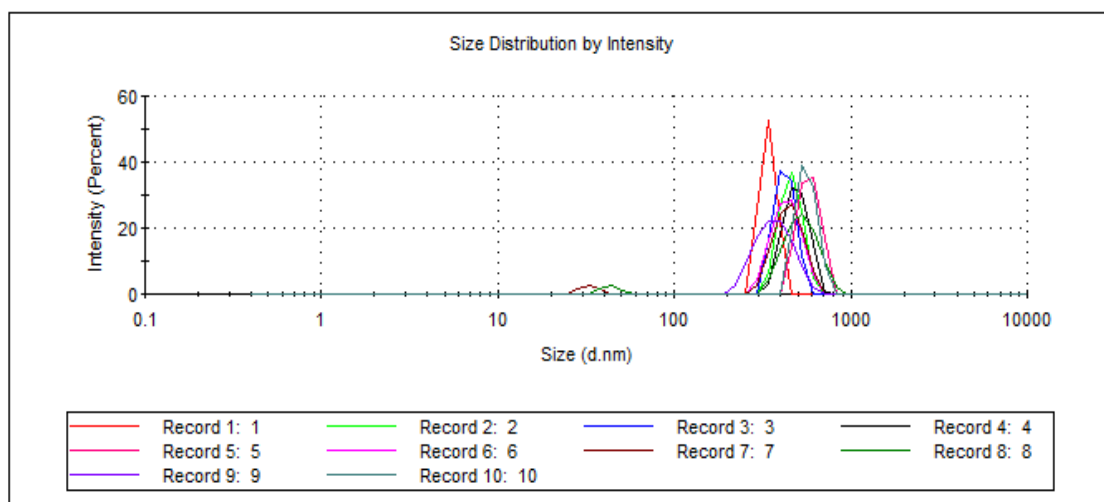
Rysunek 13.65 Analiza DLS stabilizatu - seria 1 (opracowanie własne)



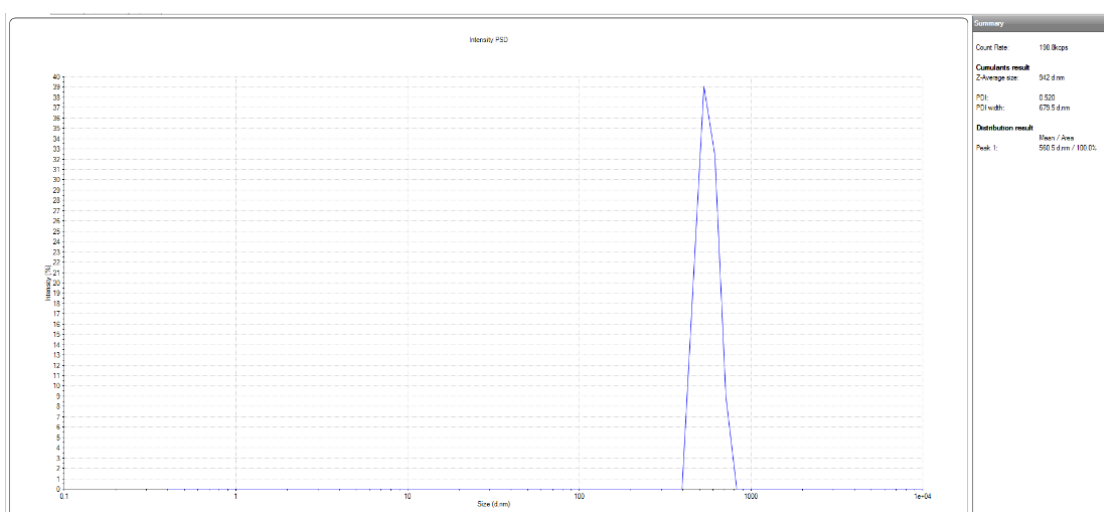
Rysunek 13.66 Pojedyncza analiza DLS stabilizatu - seria 1 (opracowanie własne)

Tabela 13.17 Badanie wielkości cząstek stabilizatu -przesącz - seria 1 (opracowanie własne)

Stabilizat seria 1 - przesącz - wielkość cząstek					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
342,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
460,7	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
424,2	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
491,5	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
581,2	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
437,8	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
448,9	94,7	32,96	5,3	0,0	0,0
530,4	94,8	43,55	5,2	0,0	0,0
375,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
560,5	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia	465,3				



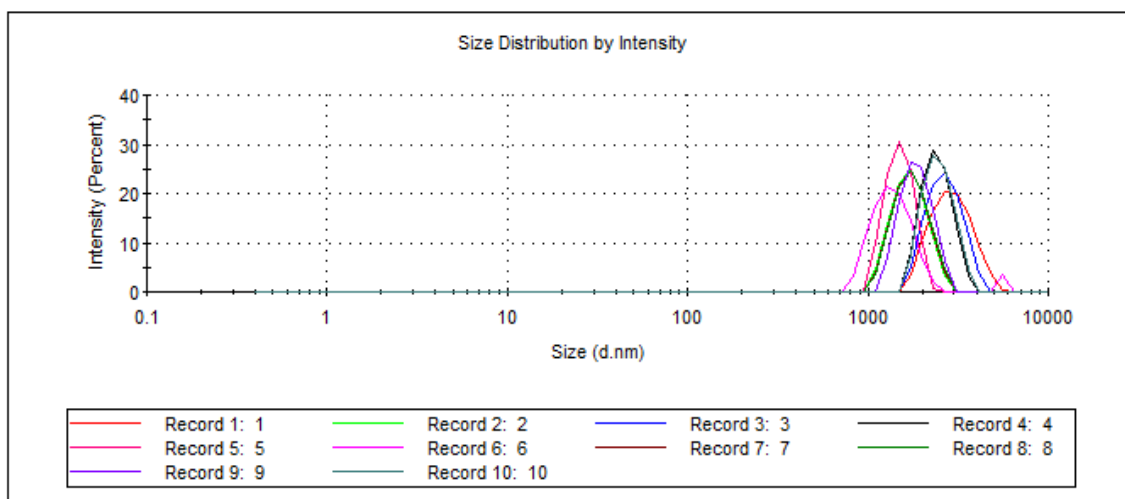
Rysunek 13.67 Wielkość cząstek z pomiarów DLS stabilizatu przesączonego (opracowanie własne)



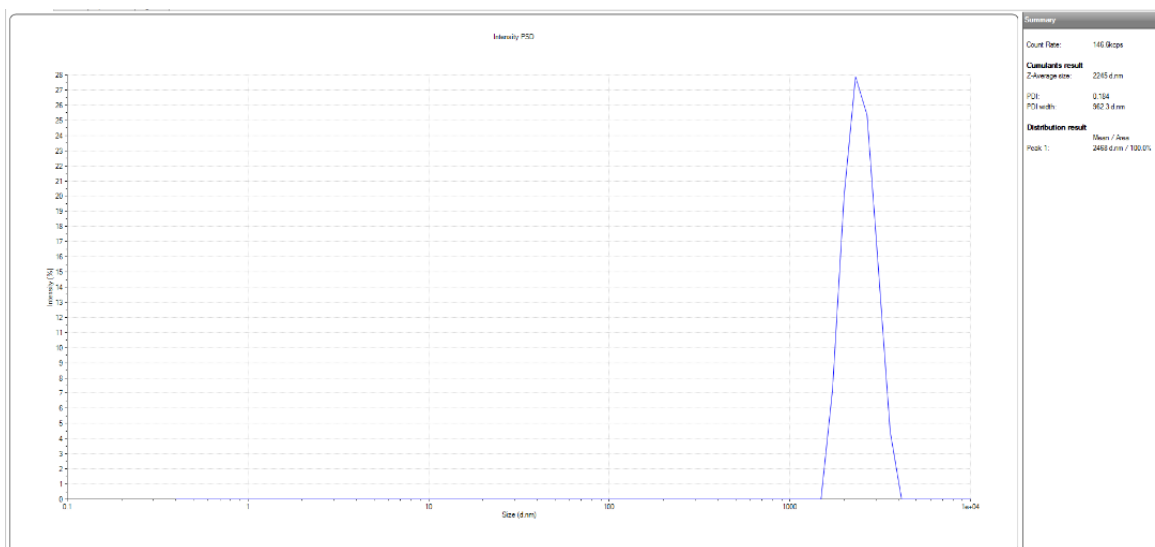
Rysunek 13.68 Pojedyncza analiza DLS stabilizatu - seria 2 (opracowanie własne)

Tabela 13.18 Badanie wielkości cząstek stabilizatu - seria 2 (opracowanie własne)

Stabilizat - seria 2 - wielkość cząstek					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
2969,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1727,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2692,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2424,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1517,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1384,0	96,5	5540,0	3,5	0,0	0,0
1750,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1764,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1869,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2468,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia	2056,0				



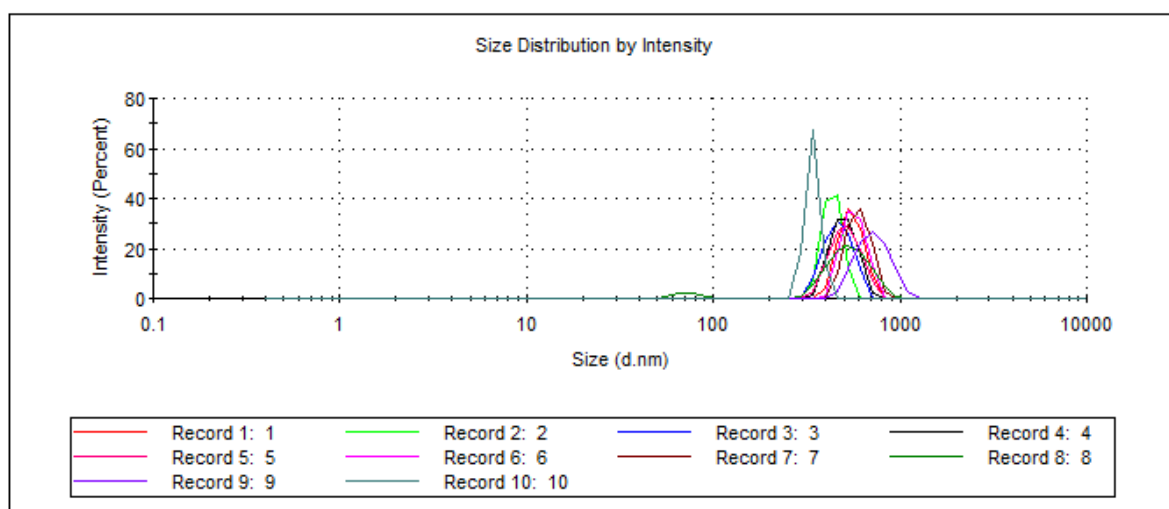
Rysunek 13.69 Wielkość cząstek z pomiarów DLS stabilizatu - seria 2 (opracowanie własne)



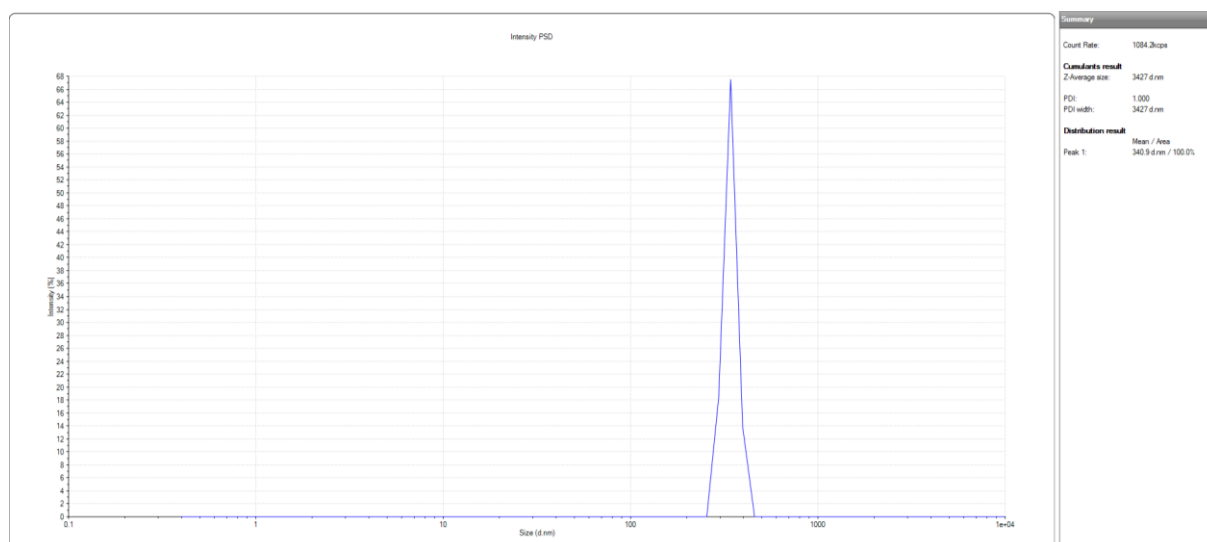
Rysunek 13.70 Pojedyncza analiza DLS stabilizatu - seria 2 (opracowanie własne)

Tabela 13.19 Wielkość cząstek stabilizatu – przesącz seria 2 (opracowanie własne)

Stabilizat - seria 2 – przesącz wielkość cząstek					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
548,4	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
435,6	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
472,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
504,9	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
516,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
567,8	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
602,5	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
542,2	93,9	72,17	6,1	0,0	0,0
726,4	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
340,9	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia	525,4				



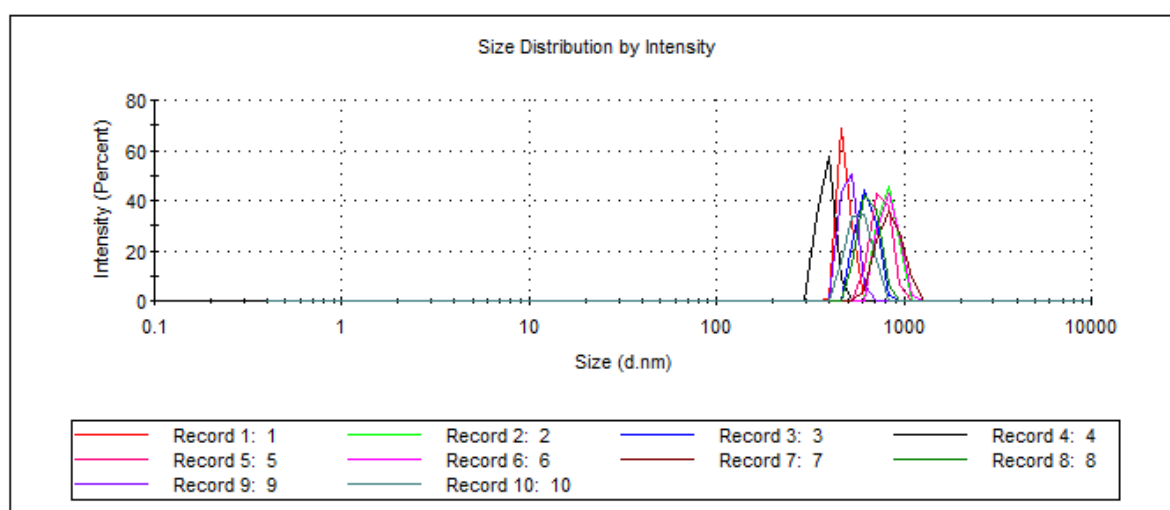
Rysunek 13.71 Analiza DLS - stabilizat seria 2 przesącz (opracowanie własne)



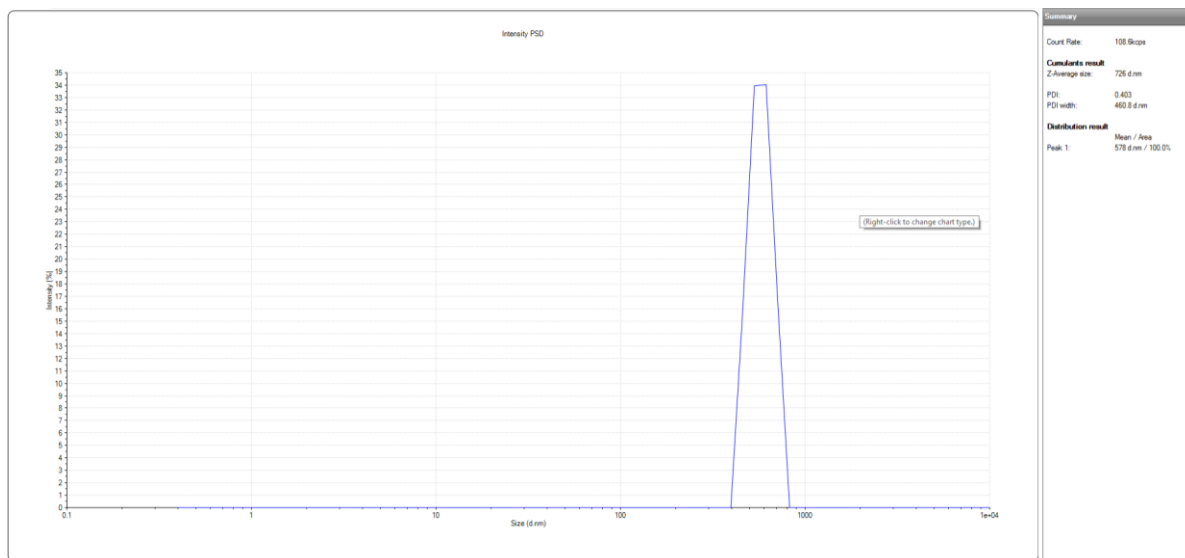
Rysunek 13.72 Pojedyncza analiza DLS stabilizatu – przesącz - seria 2 (opracowanie własne)

Tabela 13.20 Wielkość cząstek stabilizatu – seria 3 (opracowanie własne)

Stabilizat - seria 3 - wielkość cząstek					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
481,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
821,6	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
630,2	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
383,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
758,5	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
834,5	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
850,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
652,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
505,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
578,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia	649,4				



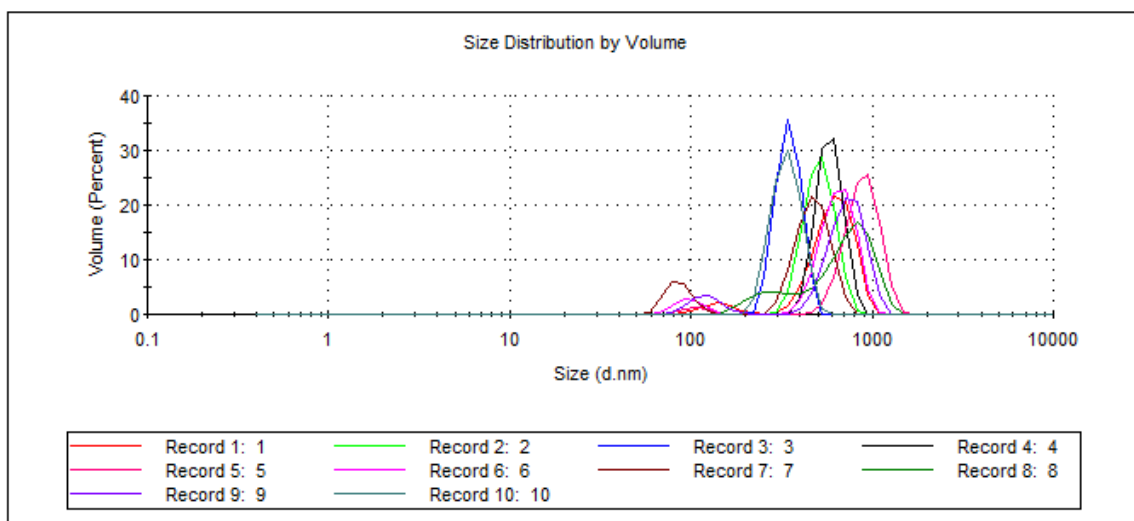
Rysunek 13.73 Analiza DLS - stabilizat seria 3 (opracowanie własne)



Rysunek 13.74 Pojedyncza analiza DLS stabilizatu - seria 3 (opracowanie własne)

Tabela 13.21 Wielkość cząstek stabilizatu – przesącz - seria 3 (opracowanie własne)

Stabilizat - seria 3 przesącz - wielkość cząstek					
Pik 1 [nm]	% powierzchni 1	Pik 2 [nm]	% powierzchni 2	Pik 3 [nm]	% powierzchni 3
581,3	87,8	146,4	12,2	0,0	0,0
499,9	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
342,9	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
567,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
825,7	91,8	107,7	8,2	0,0	0,0
612,8	91,1	100,8	8,9	0,0	0,0
462,3	90,2	88,17	9,8	0,0	0,0
664,1	58,4	281,0	41,6	0,0	0,0
674,9	78,5	125,1	21,5	0,0	0,0
334,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia	556,5				



Rysunek 13.75 Analiza DLS - stabilizat -przesącz- seria 3 (opracowanie własne)



Rysunek 13.76 Zestawienie wzrostu -owies wysiany na wszystkich typach podłoża wymienionych w pracy cz.1 (fot. autor)



Rysunek 13.77 Zestawienie wzrostu -owies wysiany na wszystkich typach podłoża wymienionych w pracy cz.2 (fot. autor)



Rysunek 13.78 Zestawienie wzrostu - pszenica posiana na wszystkich typach podłoża (fot. autor)



Rysunek 13.79 Zestawienie wzrostu - pszenica wysianego na wszystkich typach podłoża (fot. autor)



Rysunek 13.80 Zestawienie wzrostu – pomidor- cz.1 wysianego na wszystkich typach podłoża (fot. autor)



Rysunek 13.81 Zestawienie wzrostu – pomidor- cz.2 wysianego na wszystkich typach podłoża (fot. autor)



Rysunek 13.82 Zestawienie wzrostu – papryka- cz.1 wysianego na wszystkich typach podłoża (fot. autor)



Rysunek 13.83 Zestawienie wzrostu – papryka- cz.2 wysianego na wszystkich typach podłoża (fot. autor)