



Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Wydział Leśny i Technologii Drewna

mgr inż. Magdalena Komorowicz

Modelowanie efektywnej technologii wytwarzania biokompostów z odpadów drzewnych

Modeling an efficient technology of bio-compost production from wood waste

Rozprawa doktorska w dziedzinie nauk rolniczych,
w dyscyplinie nauki leśne
Doctoral dissertation in the field of agricultural sciences,
in the discipline of forestry sciences

Promotor:

Prof. dr hab. Kinga Stuper-Szablewska
Katedra Chemii, UPP

Promotor pomocniczy:

Dr inż. Anna Przybylska-Balcerek
Katedra Chemii, UPP

Opiekun pomocniczy:

Dr hab. inż. Dominika Janiszewska-Latterini
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański
Instytut Technologiczny

Poznań, 2025

Rozprawa doktorska została przygotowana w ramach V edycji programu Doktorat

Wdrożeniowy w latach 2021-2025 w oparciu o umowę nr PW/3/2022

(DWD/5/0395/2021, NCN)

Spis treści	
Stosowane skróty.....	5
Streszczenie	6
Summary	7
1. Wstęp.....	8
2. Przegląd piśmiennictwa.....	11
2.1 Gospodarka Cyrkularna i jej aspekty	11
2.2 Drewno, a chemiczne środki ochrony.....	17
2.2.1 Pentachlorofenol.....	21
2.2.2 Lindan.....	22
2.2.3 Kreozot i związki z grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA)	23
2.3 Metody dezaktywacji i usuwania chemicznych zanieczyszczeń z odpadów drzewnych.....	26
2.4 Proces kompostowania i jego charakterystyka	30
2.5 Rola mikroorganizmów w procesie kompostowania	39
2.6 Zastosowanie kompostu jako produktu i jego znaczenie dla ochrony środowiska i przyrody, aspekty nawozowe.....	47
3. Materiały i metody badawcze.....	54
3.1 Metodologia badań.....	55
3.1.1. Opis procesu kompostowania odpadów drzewnych.....	56
3.1.2. Etapy przygotowania szczepionki grzybowej i jej składniki	58
3.1.3. Badania podstawowych składników chemicznych odpadów drzewnych i kompostów	60
3.1.4. Metodyka oznaczenia zanieczyszczeń (PCP, Lindan, WWA) w odpadach drzewnych i kompostach.....	60
3.1.5. Metodyka oznaczeń mikrobiologicznych.....	62
3.1.6. Metodyka oznaczeń genetycznych.....	64
3.1.7. Testowanie uzyskanych kompostów w uprawie jastrunia wielkiego (<i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon')	66
3.1.8. Analiza statystyczna	67
4. Wyniki badań.....	68
4.1 Doświadczenia modelowe oraz właściwości masy kompostowej w reaktorach w trakcie procesu kompostowania	68
4.2 Właściwości chemiczne kompostu po procesie kompostowania	71
4.3 Poziom zanieczyszczeń chemicznych w odpadach drzewnych i w kompostach w trakcie kompostowania.....	77
4.4 Zmiana właściwości mikrobiologicznych i genetycznych w czasie procesu kompostowania	83
4.5 Uzyskane komposty w świetle przepisów nawozowych	90
4.6 Wyniki pomiarów roślin uprawianych w podłożach z udziałem kompostów.....	92

4.7	Wyniki badań chemicznych podłoży z udziałem kompostów – przed uprawą i po uprawie <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	99
5.	Podsumowanie.....	113
6.	Literatura	120
7.	Wykaz tabel i rycin.....	124
8.	Załączniki	128

Stosowane skróty

C – ang. carbon, węgiel

CLB – całkowita liczba bakterii

C/N – stosunek węgla do azotu

GOZ – gospodarka o obiegu zamkniętym

HCH – heksachlorocykloheksan (HCH), którego izomer gamma-HCH (γ -HCH) potocznie nazywany jest lindanem

LD₅₀ (z ang. *lethal dose 50*) - dawka śmiertelna dla 50% populacji

N – ang. nitrogen, azot, N_{og} - azot ogólny

PCB - polichlorowane bifenyle

PCP – pentachlorofenol (ang. *pentachlorophenol*; *2,3,4,5,6-pentachlorophenol*),

s.m. – sucha masa

św. m. – świeża masa

WWA – wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne

SPAD- z ang. Soil Plant Analysis Development - rozwój analizy glebowo-roślinnej, używane określenie dla pomiaru indeksu zazielenienia liści

Streszczenie

Proces odzysku odpadów drzewnych następuje wielu problemów począwszy od rozpoznania poszczególnych sortymentów na podstawie oceny wizualnej, poprzez skomplikowane badania analityczne, także instrumentalne określające stężenie zanieczyszczeń. Odpady drzewne i produktów drewnopochodnych nie powinny być wyłączone z gospodarki o obiegu zamkniętym z powodu trudności technologicznych, lecz powinno się znajdować ich zastosowanie, tak aby maksymalizować ich czas przydatności i ponownego wykorzystania. W ramach rozprawy doktorskiej przeprowadzono badania pozwalające na zastosowanie odpadów drzewnych jako materiału wejściowego w procesie kompostowania. W obliczu trudności zagospodarowania odpadów drzewnych obciążonych substancjami chemicznymi zastosowano szczepionkę biologiczną zawierającą szczepy grzybów białego rozkładu drewna. Przeprowadzone prace eksperymentalne w ramach doktoratu dowiodły zasadności poddawania odpadów drzewnych procesom technologicznym pozwalającym nadać im „drugie życie”. Opracowano wytyczne do procesu kompostowania odpadów drzewnych, także z odpadów zanieczyszczonych przez wybrane substancje niebezpieczne. Do procesu kompostowania jako dodatek wspomagający rozkład masy kompostowej i zanieczyszczeń zastosowano szczepionkę zawierającą grzyby rozkładu białego drewna. Wyniki badań stanowią metodyczną podstawę do dalszych działań metodycznych, projektowych i komercyjnych w ramach Łukasiewicz-Poznański Instytut Technologiczny. Proces kompostowania przyczynił się do wytworzenia kompostów jako produktów nawozowych. Podłoża wytworzone z udziałem kompostów zastosowano z powodzeniem w uprawie rośliny ozdobnej *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'.

Słowa kluczowe: grzyby rozkładu białego drewna, kompost, kompostowanie odpadów drzewnych, odpady drzewne, odzysk, produkty nawozowe

Summary

The process of wood waste recovery poses many problems, starting from the recognition of individual assortments on the basis of visual assessment, through complex analytical tests, including instrumental tests determining the concentration of pollutants. Wood waste and wood-based products should not be excluded from the circular economy due to technological difficulties, but should be used to maximize their life cycle and reuse. As part of the doctoral dissertation, research was carried out allowing the use of wood waste as an input material in the composting process. In the face of difficulties in managing wood waste containing with chemicals, a biological inoculum containing strains of fungi of white wood decomposition was used. The experimental work carried out as part of the doctoral thesis proved the legitimacy of subjecting wood waste to technological processes that allow it to be given a "second life". Guidelines for the process of composting wood waste, including waste contaminated with selected hazardous substances, have been developed. A inoculum containing white rot fungi was used for the composting process as an additive to support the decomposition of the compost mass and impurities. The results of the research are the methodological basis for further methodological, design and commercial activities within the Łukasiewicz-Poznań Institute of Technology. The composting process has contributed to the production of composts as fertilizer products. Substrates made with the participation of composts have been successfully used in the cultivation of the ornamental plant *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'.

Keywords: whitewood decay fungi, compost, composting of wood waste, wood waste, recovery, fertilizer products

1. Wstęp

W związku z postępem technologicznym prowadzącym do licznych zmian w obrębie ekosystemów, wyczerpywaniem się zasobów naturalnych i zachodzących dynamicznych zmian klimatycznych, społeczeństwa zauważają potrzebę efektywnego gospodarowania surowcami i powstającymi w różnorodnych procesach produkcyjnych odpadami. Szczególnego znaczenia nabiera przejście z gospodarki linearnej na Gospodarkę o Obiegu Zamkniętym (GOZ), zawarte w Agendzie Unii Europejskiej (European Commission, 2015). Wspomniane aspekty efektywnego gospodarowania zasobami nie powinny omijać także sektora drzewnego.

Zagospodarowanie odpadów drzewnych i biomasy lignocelulozowej powinno odbywać się w procesach odzysku, z zyskiem dla wytwórców tych odpadów, a także dla środowiska. Zgodnie z zapisami europejskimi powstawanie odpadów powinno być zminimalizowane, a jeśli już odpady powstaną istnieje potrzeba przekształcania ich w kolejne produkty. Poszukiwanie kolejnych etapów wykorzystania odpadów powinno przyczynić się do wydłużania drogi ich użytkowania, z modelu liniowego wykorzystania zasobów należy dążyć do ich obiegu cykularnego.

Jednym z fundamentalnych aspektów zrównoważonego rozwoju przemysłu drzewnego jest kaskadowe wykorzystanie drewna i jego odpadów. Priorytetowo odpady drzewne powinny zostać wykorzystane materiałowo, a stosowanie drewna i odpadów drzewnych do produkcji energii stanowić powinno alternatywę przed ich unieszkodliwieniem i składowaniem (Vis, Mantau i Allen, 2016).

Zagospodarowanie problematycznych odpadów drzewnych w kierunku innym niż wykorzystanie energetyczne jest przedmiotem badań o charakterze interdyscyplinarnym i priorytetowym w gospodarce odpadami drzewnymi w aspektach Gospodarki o Obiegu Zamkniętym. Znane są metody waloryzacji odpadów drewnianych, które nie zostały przetworzone w procesach technologicznych. Zastosowanie takich odpadów w zależności od charakterystyki odpadów powinno przebiegać na wiele sposobów i dając produkty o nowych funkcjach czy zastosowaniu. Znane do tej pory rozwiązania nie wykorzystują jednak w pełni całego spektrum odpadów leśnych, poprodukcyjnych i poużytkowych (komunalnych). W obecnych czasach nadmiernej konsumpcji wytwarzane ogromne ilości odpadów są w głównej mierze nadal spalane i składowane.

Odpady drzewne powstające w różnych miejscach, różnorodnych procesach produkcyjnych, a nawet powstające z produktów wycofywanych z użycia charakteryzują

się niejednokrotnie zróżnicowanym składem substancji dodatkowych, które zostały dodane w procesach obróbczych. W tej sytuacji znalezienie odpowiedniej ścieżki eksploatacji odpadów drzewnych i drewna użytkowego może być znacznie trudniejsze. Odpady drzewne i odpady z tworzyw drewnopochodnych mogą zawierać materiały uszlachetniające i wykończeniowe jak żywice, kleje, lakiery, folie, laminaty i środki konserwujące, które są stosowane w procesach produkcji i różnorodnych produktów o szerokim ich zastosowaniu.

Drewno w celu zabezpieczenia przed działaniem czynników degradujących biotycznych i abiotycznych jest także zabezpieczane środkami konserwującymi. Substancje te stanowią niejednokrotnie warstwę barierową na drewnie zabezpieczając przed owadami, insektami, grzybami, bakteriami. Do niepożądanych substancji o działaniu toksycznym w odpadach drewnopochodnych możemy zaliczyć: pentachlorofenol (PCP), lindan (γ -heksachlorofenol) i kreozot, który zawiera między innymi wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA).

Obecność toksycznych dla środowiska związków w odpadach drzewnych stanowi ogromne wyzwanie dla ścieżki ewentualnego zagospodarowania tych odpadów, innego niż cele energetyczne. Poszukiwanie metod zagospodarowania tych odpadów, w sposób jak najbardziej ekonomiczny i nie powodujący szkód dla środowiska naturalnego jest pożądane i sprzyja zrównoważonemu gospodarowaniu zasobami w obliczu niedoboru surowca drzewnego. Opracowanie różnorodnych technologii zastosowania odpadów drzewnych po obróbce technologicznej lub zakończonym cyklu życia tych odpadów w dużej mierze zależy od charakterystyki materiału, jego składu chemicznego i wytrzymałości. Im mniejszy sposób przetworzenia surowca drzewnego tym łatwiej o jego ponowne zastosowanie lub przekierowanie do innej ścieżki technologicznej. Najczęściej stosowane do ponownego użycia są odpady drzewne spełniające wysokie wymagania jakościowe, jak drewno niepoddane obróbce chemicznej lub niezawierające niebezpiecznych substancji. W odróżnieniu od odpadów drzewnych niepoddanych obróbce chemicznej zastosowanie drewna odpadowego pochodzącego z produktów po zakończonym cyklu życia, z elementów budynków lub elementów konstrukcyjnych następcza wielu trudności technologicznych i ekologicznych. Różnorodność strumienia odpadów, szerokie spektrum zastosowanych substancji i materiałów wykończeniowych, a także potencjalna obecność związków niebezpiecznych wymusza stosowanie optymalnych metod utylizacji. Rozpoznanie składników chemicznych obciążających materię drzewną pozwala łatwiej odnaleźć ścieżki zagospodarowania tychże odpadów, ograniczyć koszty przetworzenia i wykorzystać ponownie odpady, które mogą podlegać odzyskowi i recyklingowi.

Włączanie odpadów drzewnych do dalszych procesów technologicznych mogłoby dać szansę uwzględnienia powyższych odpadów drzewnych w ramach założeń Gospodarki Cyrkularnej. Z uwagi jednak na zanieczyszczenia często nie jest to możliwe. Dlatego jedną z alternatywnych metod zagospodarowania odpadów drzewnych jest kompostowanie. Zastosowanie odpadów drzewnych jako surowca do wytwarzania kompostów w praktyce dotyczy wyłącznie odpadów drewna pochodzącego z lasów, z pielęgnacji terenów zielonych oraz drewna bez substancji chemicznych. Obecność chemicznych zanieczyszczeń w odpadach drzewnych, które po procesie kompostowania wraz z gotowym produktem mogą trafić do obiegu materii w środowisku naturalnym może stanowić niebezpieczeństwo wprowadzenia zanieczyszczenia niepożądanymi substancjami. W związku z powyższym najważniejszym celem procesu kompostowania odpadów drzewnych zanieczyszczonych toksycznymi substancjami chemicznymi jest opracowanie parametrów kompostowania w taki sposób, aby zminimalizować obecność niepożądanych substancji w gotowym produkcie jakim jest kompost.

2. Przegląd piśmiennictwa

2.1 Gospodarka Cyrkularna i jej aspekty

Wraz z rozwojem technologicznym obserwujemy wzrost poziomu stopy życiowej społeczeństw co dalej skutkuje motywacją do wytwarzania coraz to lepszych produktów służących człowiekowi. Wzrasta również ilość produkowanych produktów, a co za tym idzie także ilość tych wycofywanych po zakończonym cyklu życia. Dobrobyt towarzyszący człowiekowi na każdym etapie jego życia i każdej jego działalności nie pozostaje obojętny dla środowiska naturalnego. Obserwowane zmiany klimatyczne i intensywne wyczerpywanie zasobów naturalnych wymuszają podejmowanie prac nad regulacjami prawnymi dotyczącymi zrównoważonego rozwoju. Pojęcie zrównoważonego rozwoju dotyczy pojmowania całego środowiska naturalnego i ma na celu efektywne wykorzystywanie zasobów z jednoczesnym dbaniem o dobrobyt przyszłych pokoleń. Powstrzymanie się od działań wyniszczających środowisko naturalne jest obecnie przedmiotem wielu aktualnie wprowadzanych regulacji (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/2413; Europejski Zielony Ład - rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/1119, 11 grudnia 2019 r.). Tematyka związana z zagospodarowaniem odpadów i ich przekształcaniem w surowce z zyskiem dla gospodarki dotyczy wielu branż i kierunków rozwoju.

Działania podejmowane w ramach zapobiegania powstawaniu odpadów powinny polegać na co najmniej promowaniu i wspieraniu zrównoważonych modeli produkcji i konsumpcji; zachęcaniu do projektowania i wytwarzania oraz korzystania z produktów, które są zasobooszczędne i trwałe. Wytwarzane produkty powinny nadawać się do naprawy oraz ponownego użycia czy modernizacji. Nie powinny charakteryzować się cechami, które sztucznie wpływają na skrócenie ich cyklu życia. Do zapobiegania powstawaniu odpadów przyczynią się także działania polegające na zachęcaniu do ponownego używania produktów i tworzenia systemów promujących ich naprawę i ponowne użycie. Dotyczy to nie tylko sprzętu elektrycznego i elektronicznego, ale także tekstyliów, mebli, opakowań oraz materiałów i produktów budowlanych. Ważnym elementem systemu zapobiegania powstawaniu odpadów jest na przykład wspieranie dostępności części zamiennych i innych elementów pozwalających na naprawę i ponowne użycie produktów bez szkody dla ich jakości i bezpieczeństwa. Do ważnych zadań należy zmniejszanie powstawania odpadów

w procesach związanych z produkcją przemysłową, budową i rozbiórką, z wykorzystaniem najlepszych dostępnych technik.

W pierwszej kolejności należy położyć nacisk na zapobieganie powstawaniu odpadów, a zapewnienie ponownego ich użycia oraz recykling odpadów powinny być traktowane priorytetowo (Dyrektywa UE 2023/2413). Dążenie do efektywnego wykorzystania odpadów nadających się do recyklingu stoi wyżej w hierarchii postępowania niż spalanie odpadów i biomasy do celów energetycznych.

Warto tu wspomnieć, że przyjęta definicja mianem recyklingu określa *„odzysk, w ramach którego odpady są ponownie przetwarzane na produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w pierwotnym celu lub innych celach; obejmuje to ponowne przetwarzanie materiału organicznego (recykling organiczny), ale nie obejmuje odzysku energii i ponownego przetwarzania na materiały, które mają być wykorzystane jako paliwa lub do prac ziemnych;”* (def. za USTAWA z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach - Dz.U.2023.1587 t.j.).

A z kolei odzysk materiałów *„to każdy odzysk inny niż odzysk energii i ponowne przetwarzanie na materiały, które mogą zostać wykorzystane jako paliwa lub inne środki wytwarzania energii; odzysk materiałów obejmuje w szczególności przygotowanie do ponownego użycia, recykling i prace ziemne;”* (def. za USTAWA z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach Dz.U.2023.1587 t.j.).

Powyższe działania dotyczą także gospodarowania surowcem drzewnym, działań szeroko rozumianego przemysłu drzewnego, a także zagospodarowania odpadami z wycofanych z użycia produktów drewnopochodnych. Wykorzystanie strumieni różnorodnych odpadów i potencjalnych możliwości ich zastosowania jako surowców wtórnych leży u podstaw gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) i jest odmienne od przebiegu materiałów w gospodarce linearnej, w której odpady są ostatnim etapem cyklu życia. Rosnące zapotrzebowanie na surowiec drzewny, a także konkurowanie o drewno odbiorców pochodzących z różnych sektorów gospodarki, w tym także z sektora energetycznego, wskazuje na konieczność potraktowania odpadów drzewnych jako istotne uzupełniające źródło surowca (dodatkowy zasób), alternatywne wobec źródeł pierwotnych (Ratajczak i in., 2018).

W ramach kaskadowego wykorzystania biomasa drzewna powinna być stosowana zgodnie z zachowaniem jej najwyższej ekonomicznej i środowiskowej wartości dodanej (Vis i in., 2016). Działania na rzecz zapobiegania powstawaniu odpadów wskazują także

hierarchię priorytetów stosowania biomasy drzewnej: optymalne wytwarzanie produktów drewnopochodnych, przedłużanie cyklu życia produktów drewnopochodnych, ponowne użycie, recykling, bioenergia i trwałe składowanie.

Wykorzystanie odpadów drzewnych pochodzących z różnych źródeł podczas ich odzysku i recyklingu wiąże się z ryzykiem obecności substancji zanieczyszczających pochodzących z procesów obróbki, stosowanych materiałów dekoracyjnych i wykończeniowych czy innych materiałów nie drzewnych wchodzących w skład produktów.

W ramach obowiązujących regulacji i właściwego zarządzania wszelkimi odpadami funkcjonuje system numeracji (Kod odpadu) właściwymi dla odpadu zgodnie z miejscem ich wytworzenia i ich charakterystyką. Identyfikuje się między innymi odpady drzewne w grupach:

- 02 - Odpady z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności,
- 03 - Odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury,
- 15 - Odpady opakowaniowe,
- 17 - Odpady z budowy, remontów i demontaży obiektów budowlanych oraz infrastruktury drogowej (włączając glebę i ziemię z terenów zanieczyszczonych).

Ponadto odpady drzewne użytkowe, w celu ich jak najlepszego wykorzystania do dalszego przerobu odpady drzewne według Ratajczak i in. (2003) można sklasyfikować do czterech grup w zależności od sposobu ich przetwarzania i obciążenia substancjami chemicznymi, a przyporządkowana grupa odpadów drzewnych określać może ich potencjalne zastosowanie.

Według Ratajczak i in. (2023) możemy wyróżnić:

- Grupa 1 - obejmuje przetworzone odpady drzewne użytkowe nie obciążone środkami zabezpieczającymi drewno, bez innych materiałów nie drzewnych (drewno lite, odpady opakowaniowe z drewna, obrzeża lub ścinki drewna niepoddane żadnej obróbce chemicznej),
- Grupa 2 – obejmuje odpady drzewne w przetworzonego litego drewna, częściowo i w niewielkim stopniu obciążone środkami zabezpieczającymi drewno i

malarskimi tj. farby, lakiery, lepiszcza (elementy konstrukcji budynków, elementy wystroju wnętrz, meble z litego drewna, materiały podłogowe lite),

- Grupa 3 - obejmuje odpady drewna "przetworzonego" lub drewno poddane działaniu chemikaliów tj. farby, lakiery, lepiszcza, odpady z płyt drewnopochodnych, odpady drzewne niezabezpieczone środkami ochrony drewna,

- Grupa 4 - obejmuje odpady drewniane zawierające substancje niebezpieczne, odpady drzewne zabezpieczone środkami ochrony drewna.

Do grupy 4 mogą być zaliczane odpady, które zabezpieczone zostały substancjami jak pentachlorofenol (PCP), wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) czy polichlorowane bifenyle (PCB). Ta grupa odpadów drzewnych przeznaczona jest do utylizacji w drodze spalania.

Celem zminimalizowania ryzyka zastosowania niebezpiecznych odpadów w niektórych krajach zostały opracowane wytyczne określające maksymalne poziomy substancji zanieczyszczających w odpadach czy w produktach wyprodukowanych z udziałem surowców z recyklingu, jak zawartość pentachlorofenulu (PCP), krezotolu, czy zawartości metali ciężkich (Tabela 1). Wymagane dopuszczalne wartości zanieczyszczeń w odpadach drzewnych są dużo niższe niż wymagane w produktach nawozowych. Odpady drzewne w procesach recyklingu często charakteryzują się często dużo niższym poziomem zanieczyszczeń niż wymagania, a mimo to uważane są za niebezpieczne i są kierowane do spalania aniżeli do procesów odzysku.

Obciążenie odpadów drzewnych zanieczyszczeniami i środkami ochrony określone jest w trakcie badań analitycznych z zastosowaniem technik instrumentalnych w laboratoriach i ośrodkach naukowych. Badania te są długotrwałe i kosztowne. Brak natomiast szybkich rozwiązań analitycznych, które mogłyby być powszechnie stosowane w zakładach zagospodarowania odpadów (ZZO) czy przedsiębiorstwach zajmujących się recyklingiem odpadów drzewnych, co może spowodować niewłaściwe sklasyfikowanie odpadów drzewnych lub zastosowanie odpadów obciążonych środkami ochrony drewna w procesach technologicznych, np. podczas kompostowania czy produkcji płyt wiórowych.

Wydaje się, że z powodu dużej różnorodności odpadów drzewnych i małej świadomości pracowników zakładów ZZO, wielu niejasności w rozpoznawaniu typów materiałów drewnopochodnych, problemów technologicznych i prawnych często odpady drzewne są traktowane jako odpady niebezpieczne i są kierowane do utylizacji w drodze spalania.

Trudności w zagospodarowaniu odpadów drzewnych w procesach recyklingu dotyczą także niektórych frakcji odpadów drzewnych, a zwłaszcza dla odpadów włóknistych z odpadów płyt pilśniowych płyt suchoformowanych (MDF, HDF i LDF). Prognozowany wzrost ilości odpadów drzewnych zawierających płyty MDF z mebli i produktów o krótkim cyklu życia wymusza poszukiwanie różnorodnych ścieżek zastosowania tych odpadów, także w procesach biologicznych (Irlle, 2019).

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2020, poz. 10) odpady ulegające biodegradacji inne niż komunalne należą głównie do:

1) grupy 02 – odpady z rolnictwa, ogrodnictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności;

2) grupy 03 – odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury;

3) grupy 19 – odpady z instalacji i urządzeń służących zagospodarowaniu odpadów, z oczyszczalni ścieków oraz z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych

Zatem różnorodne odpady drzewne niosące dużą ilość materii organicznej powinny być włączane do biologicznych procesów odzysku, a pozyskanie energii z odpadów drzewnych powinno dotyczyć tylko takich materiałów dla których wyczerpano wszystkie możliwe sposoby zastosowania i już dalej nie podlegają żadnemu recyklingowi.

Odpady drzewne w sposób naturalny wpisują się obieg cyklu materii w przyrodzie, a przy zastosowaniu biologicznych procesów przetwarzania, jak kompostowanie, odpady stają się produktem nawozowym i glebotwórczym (Siuta i Wasiak, 2000).

Kompostowanie odpadów powinno stać wyżej w hierarchii zagospodarowania i może stanowić alternatywę do wykorzystywania energetycznego odpadów drewna.

Tabela 1. Dopuszczalne poziomy zanieczyszczeń chemicznych w odpadach drzewnych i opakowaniach oraz w produktach nawozowych

(opracowanie własne na podstawie: Wytyczne European Panel Federation (EPF) Standard for Delivery Conditions of Recycled Wood, 2018), w odpadach drzewnych do recyklingu wg Altholz V (2002, zm.19.06.2020), w opakowaniach kierowanych do odzysku przez kompostowanie wg EN 13432, w nawozach/polepszaczach organicznych (wymagania wg Rozp. Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009)

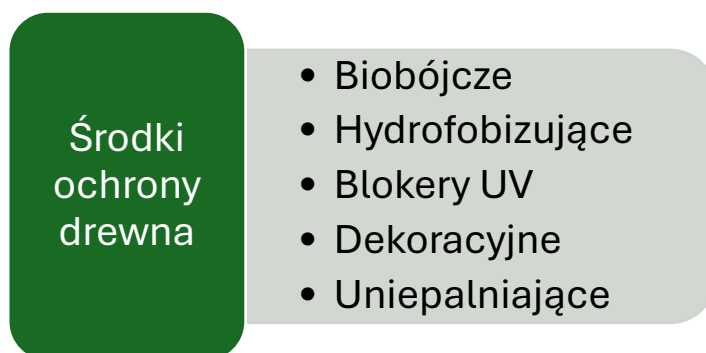
	EPF (2018)	Altholz V (2002, zm.19.06.2020)	Opakowania, w tym drewniane palety i skrzynie (EN 13432)	Nawóz organiczny PFC 1(A) / Polepszacz organiczny gleby PFC3(A) (Rozp. 2019/1009)
	mg/kg s.m.			
Cynk (Zn)	-	-	150	800
Arsen (As)	25	2	5	40 (nieorganiczny)
Kadm (Cd)	50	2	0,5	1,5
Chrom (Cr)	40	30	50	2 (CrVI)
Miedź (Cu)	40	20	50	300
Ołów (Pb)	90	30	50	120
Nikiel (Ni)	-	-	25	50
Rtęć (Hg)	25	0,4	0,5	1
Fluor (F)	100	100	100	-
Chlor (Cl)	1000	600	-	-
Pentachlorofenol (PCP)	5	3	-	-
Kreozot (Benzo(a)pyren)	0,5	-	-	-
Polichlorowane bifenyle (PCB)	-	5	-	-

2.2 Drewno, a chemiczne środki ochrony

Drewno jako materiał pochodzenia naturalnego, jest podatne na działanie wielu czynników zewnętrznych biotycznych i abiotycznych powodujących naruszenie jego struktury lub rozkład, czego konsekwencją jest obniżenie wytrzymałości i trwałości drewna.

Użycie powłok zabezpieczających zawierających różnorodne środki chemiczne może spowodować spowolnienie działania czynników zewnętrznych, co gwarantuje dłuższy czas stosowania elementów drewnianych. Rodzaj zastosowanych substancji zależy od wielu czynników, stopnia narażenia na czynniki degradujące i końcowego zastosowania wytwarzanych produktów.

Mechanizm działania substancji konserwujących drewno polega na toksycznym działaniu na organizmy obecne na powierzchni lub wewnątrz drewna, ale niestety także na organizmy w najbliższym otoczeniu. Zabiegi te niestety powodują zakłócenie składu chemicznego drewna.



Ryc. 1. Podział środków ochrony drewna – kryterium celu stosowania (opracowanie własne na podstawie Krajewski i Witomski, 2005).

Kluczowym kryterium jest cel użycia środka ochrony czy przeznaczenie obiektu zabezpieczanego (Krajewski i Witomski, 2005) (Ryc. 1). Aby środki te wykazywały działanie ochronne muszą zawierać w swoim składzie substancje chemiczne odpowiedzialne za działanie toksyczne w stosunku do organizmów. I tak w skład środków ochrony drewna ze względu na zakres ich stosowania wchodzi substancje chemiczne działające przeciwko grzybom (fungicydy), przeciw bakteriom (bakteriocydy), przeciwko

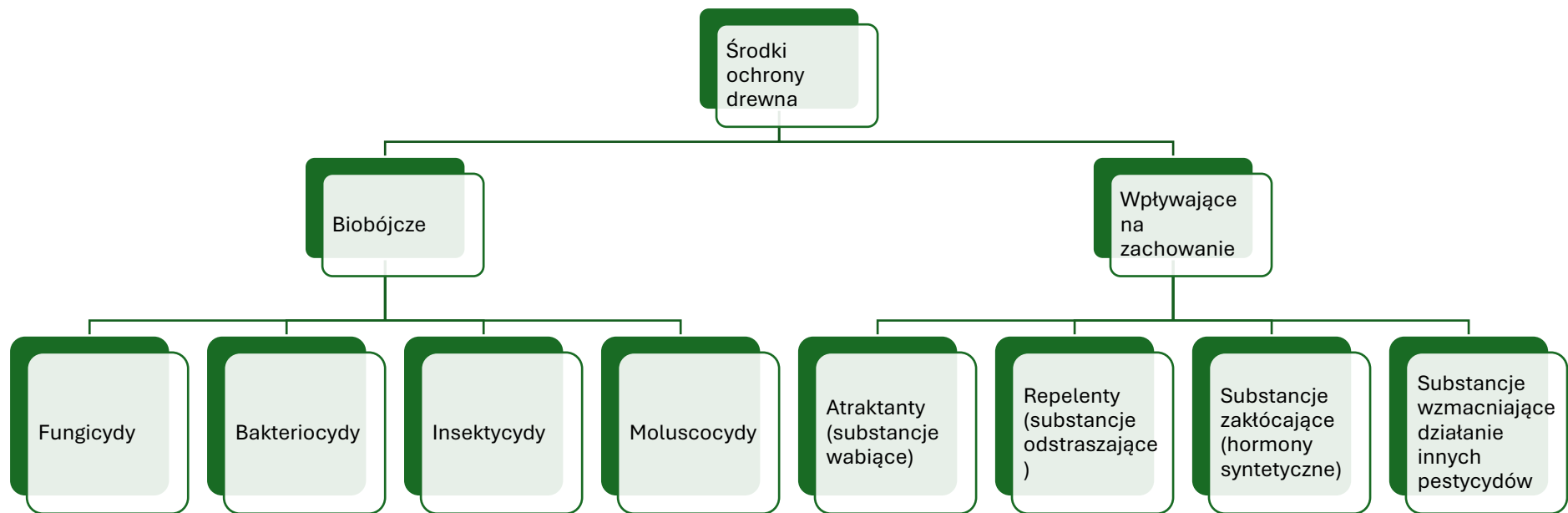
insektom (insektocydy) i mięczakom (moluscocydy) (Ryc. 2). Oprócz działania biobójczego zawartość innych substancji zawartych w preparatach ochronnych może wpływać na zachowanie owadów (atraktanty – substancje wabiące; repelenty – substancje odstraszające; hormony syntetyczne – działanie zakłócające; synergetyki – substancje wzmacniające działanie innych pestycydów).

Ze względu na stan skupienia środka ochrony drewna są w postaci ciał stałych, cieczy lub gazów, przy czym te stałe i tak wprowadzane są w momencie impregnacji jako preparaty ciekłe. Impregnaty ciekłe prowadzą do zabezpieczenia drewna w masie lub głębokich warstwach, emulsje wodne mogą zabezpieczać korę i drewno powierzchniowo lub wnikać w nie płytko, środki powłokotwórcze tworzą powłoki zabezpieczające materiał. Impregnaty stosowane są na materiale w stanie finalnym lub w ciągu obróbki (Krajewski i Witomski, 2005).

Do najbardziej pożądanых cech środków ochrony drewna możemy zaliczyć: skuteczne działanie wobec pożądanых grup organizmów, brak negatywnego oddziaływania na inne materiały, brak szkodliwego działania na organizmy stałocieplne, zwłaszcza człowieka, brak kumulacji w organizmach, brak działania mutagennego i kancerogennego, brak szkodliwego działania na środowisko (Krajewski i Witomski, 2005).

Szkodliwe działanie środków ochrony drewna podlega ocenie, wyznacza się toksyczność ostrą doustną i toksyczność ostrą kontaktową przez skórę. Określa się dawki letalne LD₅₀ (ang. *lethal dose 50*) jako ilość środka która zabija 50% zwierząt grupy badanej. Krajewski i Witomski (2005) opisują iż dla środków ochrony drewna na podstawie uzyskanych wartości LD₅₀ wyznaczonych na szczurach przeliczonych na mg/kg ciała określa się wartości szkodliwe dla człowieka. Te z kolei można sklasyfikować w 4 klasy toksyczności:

- środki bardzo toksyczne - I klasa toksyczności, do 25 mg/kg masy ciała,
- środki toksyczne - II klasa toksyczności, od 25 mg/kg do 200 mg/kg masy ciała,
- środki szkodliwe - III klasa toksyczności, od 200 do 2000 mg/kg masy ciała,
- środki mało szkodliwe - IV klasa toksyczności, powyżej 2000 mg/kg masy ciała.



Ryc. 2. Podział środków ochrony drewna – kryterium działanie środka na organizmy żywe (opracowanie własne na podstawie Krajewski i Witomski, 2005).

Obecnie stosowane biocydy należą do środków o małej szkodliwości dla ludzi. Krajewski i Witomski (2005) podają dawki letalne LD₅₀ dla organizmów stałocieplnych obecnie stosowanych biocydów, takich jak tebuconazol (4000 mg/kg), propiconazol (1500 mg/kg), nieorganiczne sole zawierające miedź (około 1500 mg/kg), fungicydy zawierające czwartorzędowe związki amoniowe (1200 mg/kg i wyżej), kompleksowe związki miedziorganiczne (około 860 mg/kg).

Współczesne ciekłe środki ochrony drewna znajdują zastosowanie jako impregnaty do nasycania drewna, preparaty dekoracyjno-ochronne, produkty powłokotwórcze wykazujące działanie uniepalniające, czy emulsje wodne do powierzchniowego zabezpieczania drewna. Działanie preparatów częściej ma na celu komplementarne zabezpieczenie przed owadami i grzybami i obniżenie palności (Krajewski i Witomski, 2005).

Wzrastająca świadomość ekologiczna społeczeństw stawia przed tym przemysłem wyzwanie w kontekście poszukiwań substancji skutecznych, ale o działaniu mało toksycznym dla człowieka i zwierząt domowych. Odchodzenie od substancji toksycznych wiąże się po pierwsze z poszukiwaniem związków alternatywnych, po drugie z niebezpiecznymi pozostałościami tychże związków w postaciach handlowych, a także w odpadach drewna z elementów wycofywanych z użycia.

Monitorowanie poziomów przekroczeń tych związków staje się elementem polityki pro-środowiskowej, aby zapobiegać niekorzystnym sytuacjom wprowadzenia niebezpiecznych substancji do środowiska. Odpady drewna zawierające niekorzystne związki ze środków ochrony drewna podlegają gospodarowaniu według aktualnych przepisów prawa, jak np.: Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 02.01.2020 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2020, poz.10). Zagospodarowanie odpadów drzewnych w procesach recyklingu objęte jest wytycznymi co do dopuszczalnych poziomów zanieczyszczeń chemicznych w tych odpadach drzewnych (Tabela 1).

Do jednych z najbardziej niebezpiecznych substancji stosowanych do ochrony elementów drewnianych narażonych na działanie czynników zewnętrznych należą związki organiczne: pentachlorofenol (PCP), lindan i olej kreozotowy. Rozpoznane działanie toksyczne tych związków na środowisko, zwierzęta i człowieka, jest powodem wycofywania z użycia tych związków i restrykcji w wielu krajach.

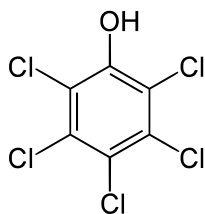
Postępowanie z substancjami niebezpiecznymi podczas ich produkcji i etapów konserwacji drewna wymaga szczególnej ostrożności. Należy zapobiegać skażeniu środowiska i minimalizować ryzyko narażenia pracowników. Nadzorowi podlegają procesy

obróbki elementów drewnianych i ich montażu, natomiast po upływie czasu użytkowania usuwanie tych elementów drewnianych wymaga odpowiednich metod utylizacji celem zminimalizowania ryzyka skażenia środowiska. Należy pamiętać, że substancje szkodliwe mogą być uwalniane podczas obróbki, demontażu i składowania w drodze emisji i wymywania. Niekontrolowane użytkowanie drewna zawierającego substancje szkodliwe może wpływać na zdrowie ludzi. Elementy drewniane zawierające substancje toksyczne powinny być unieszkodliwiane w sposób kontrolowany.

2.2.1 Pentachlorofenol

Pentachlorofenol (PCP) (2,3,4,5,6-pentachlorophenol) (Ryc. 3) produkowany był od lat 30-tych XIX wieku jako **środek zabezpieczający drewniane elementy przed rozkładem**. Miał służyć jako **środek bakteriobójczy, grzybobójczy, chwastobójczy**, przeciw algom, insektom i mięczakom (McAllister i in., 1996). Właściwości PCP zostały zastosowane w **przemśle konserwacji i obróbki drewna, w szczególności do ochrony słupów energetycznych, ogrodzeń i podkładów kolejowych** (McAllister i in., 1996). PCP był stosowany **jako środek do zanurzenia świeżo ściętej tarcicy, aby zapobiec plamom i sinieniu drewna** (McAllister i in., 1996). Obecność pentachlorofenolu jest wysoce toksyczna dla organizmów zasiedlających środowisko wodne, natomiast wykazuje działanie mało toksyczne dla ptaków i zwierząt hodowlanych. Z kolei jego obecność w wodzie lub glebie prowadzi do zahamowania vegetacji i obumierania roślin (Szewczyk i Długoński, 2009). Dla ludzi pentachlorofenol jest wyjątkowo toksyczny w przypadku spożycia lub narażenia inhalacyjnego. Toksyczność ostra spowodowana drogą wziewną objawia się m.in. zwięzieniem komór nosowych, chrypą, łzawieniem, zaczerwienieniem skóry lub wysypką, uszkodzeniem rogówki. PCP w formie pyłu w stężeniu ponad $0,3 \text{ mg/m}^3$ wywołuje ból i łzawienie oczu, kaszel. W stężeniu 1 mg/m^3 występuje duszność, niewydolność oddechowa. Skażenie skóry pyłem i roztworem (2%) wywołuje jej zaczerwienie, ból oraz szybko narastające objawy zatrucia: mdłości, wymioty, ból brzucha, duszności, zawroty głowy, poty, biegunkę, zapaść, drgawki, a w konsekwencji zgon nawet po kilku dniach od skażenia skóry. Przebieg zatrucia przez skórę zależy od rozpuszczalnika. PCP przyjęty drogą pokarmową wywołuje podobne objawy jak w zatruciu przez skórę. Powoduje zaburzenia metabolizmu, zmiany w układzie krążenia, wątrobie i nerkach.

Najmniejsza dawka śmiertelna dla człowieka to dostarczone do organizmu drogą pokarmową: 400 mg PCP /kg masy ciała, czyli około 28 g, LD 50 drogą wziewną 355 mg/m³, LD 50 skóra 96 mg/kg. Według EPA pentachlorofenol należy do grupy B2 substancji, czyli wykazuje prawdopodobne działanie rakotwórcze u ludzi (EPA, 2016).



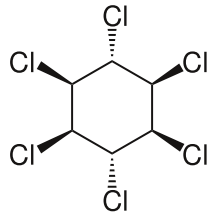
Ryc. 3. Wzór strukturalny pentachlorofenolu

2.2.2 Lindan

Lindan (Ryc. 4) jest jednym z izomerów heksachlorocycloheksanu (HCH), których nazwy zależne są od pozycji atomów wodoru w strukturze chemicznej. Tylko izomer gamma-HCH (γ -HCH), potocznie nazywany lindanem, posiada właściwości owadobójcze. Ma postać białego, krystalicznego ciała stałego. **Wykorzystywany jako środek owadobójczy na owocach, warzywach i uprawach leśnych oraz zwierzętach i pomieszczeniach dla zwierząt.** Oprócz zastosowania owadobójczego stosowany jest również jako lek na receptę (balsam, krem lub szampon) do leczenia i/lub kontroli świerzbu (roztoczy) i wszy u ludzi. Technicznej czystości HCH to mieszanina kilku izomerów, używany dawniej jako insektycyd w Stanach Zjednoczonych, obecnie nie jest produkowany w USA wg raportu (Toxicological Profile for Hexachlorocyclohexane (HCH), 2024).

HCH charakteryzuje się umiarkowaną toksycznością ostrą, a wartości LD₅₀ wynoszą dla różnych gatunków zwierząt od około 60 do ponad 3700 mg/kg masy ciała, od 900 do > 8000 mg/kg m.c. (narażenie dermalne) i 690 mg/m³ (narażenie drogą oddechową) (Struciński, 2009). Skutkiem toksycznego działania HCH u zwierząt są objawy neurotoksyczne (drgawki, trudności w oddychaniu oraz porażenie łap), zwiększenie względnej i bezwzględnej masy narządów (wątroby i nerek), zmiany w obrębie wątroby, nerek i jąder oraz zmiany aktywności enzymów i profilu białek osocza świadczące o funkcjonalnym uszkodzeniu wątroby. Omawiana substancja w postaci mieszaniny izomerów nie wykazuje działania mutagennego i genotoksycznego. Pojedyncze izomery działają kancerogennie, a Struciński (2009) wskazuje, że izomerem o największej

aktywności kancerogennej jest izomer α . **Lindan jest pestycydem o średniej toksyczności i nie wywołuje alergii.** Z drugiej jednak strony istotna jest długoterminowa ekspozycja na lindan powodująca chroniczny efekt zdrowotny, co najczęściej związane jest z toksycznością zawodową – przewlekłe inhalacje.



Ryc. 4. Wzór strukturalny lindanu

2.2.3 Kreozot i związki z grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA)

Kreozot od połowy XIX wieku był używany jako **środek do konserwacji drewna**. Obecnie kreozot jest stosowany **jedynie w certyfikowanych zakładach konserwacji drewna przy użyciu sprzętu wysokociśnieniowego**. Zgodnie z wytycznymi (EPA, 2024) ze względu na toksyczność kreozotu zaleca się stosować alternatywy dla drewna poddanego obróbce kreozotem.

Kreozot jest znany jako **środek konserwujący do ochrony drewna przed grzybami, owadami i organizmami morskimi**. Jego główne zastosowanie jako środka ochrony drewna to **konserwacja elementów drewna na lądzie i w wodzie**. Służył do **zabezpieczania metodą ciśnieniową drewna słupów energetycznych, poprzecznicy i podkładów kolejowych, ogrodzeń, słupków ogrodzeniowych**. Zabezpieczano nim **belki fundamentowe, belki, tarcicę i pale**. Zaimpregnowane kreozotem drewno mogło być wyłącznie przeznaczone **do użytku zewnętrznego**. Szacuje się, że w USA prawie wszystkie tory kolejowe, zwrotnice i belki mostowe, a także około 15% wszystkich słupów energetycznych jest poddana działaniu kreozotu (EPA, 2008).

Kreozot to nazwa, która została nadana mieszaninie kilku olejów wyodrębnionych ze smoły. Zgodnie z jego składem mówimy o kreozotach typu A, B, C. Wszystkie one zawierają ponad 80% wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA). To właśnie WWA są grupą związków o silnym działaniu toksycznym, stanowią liczną grupę

związków o budowie pierścieniowej (Ryc. 5). Słabo rozpuszczają się w wodzie. Powstają w procesie pirolizy substancji organicznych, a także niepełnego spalania.

Kreozot może zawierać w swoim składzie ponad 30 różnych związków z grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA), których łączne stężenie może osiągnąć 85% produktu. WWA obecne w mieszaninie kreozotu możemy podzielić na 3 odrębne grupy:

- związki z dwoma skondensowanymi pierścieniami aromatycznymi,
- związki z trzema skondensowanymi pierścieniami aromatycznymi,
- związki z czterema i pięcioma skondensowanymi pierścieniami aromatycznymi

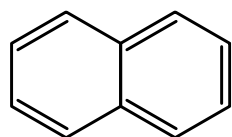
(EPA, 2008).

Związki z grupy WWA posiadają właściwości kancerogenne, a obecność kreozotu powoduje zagrożenie nowotworem dla konsumentów z powodu obecności benzo(a)pirenu (BaP) (DYREKTYWA KOMISJI 2001/90/WE).

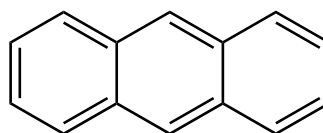
Zgodnie z przepisami europejskimi (Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i rady (EU) Nr 528/2012 z dnia 22 maja 2012 roku w sprawie udostępniania na rynku i stosowania produktów biobójczych) **kreozot stosowany do impregnacji podkładów kolejowych uznano za bezprogowy czynnik rakotwórczy i sklasyfikowano go jako substancję rakotwórczą kategorii 1B, a niektóre z WWA uznano za trwale, zdolne do akumulacji i toksyczne.**

Najczęstszymi drogami zatruć jest bezpośrednia droga pokarmowa, inhalacyjna oraz przez skórę. Do krótkoterminowych objawów należy zaliczyć podrażnienie oczu, nudności, wymioty, biegunkę. Objawy długoterminowe to: zaćmy, uszkodzenia nerek i wątroby oraz żółtaczkę. Do najważniejszych chorób należy zaliczyć wysokie ryzyko zachorowania na raka płuc i innych narządów wewnętrznych. WWA wykazują również właściwości genotoksyczne i mutagenne. Wskaźnikiem zanieczyszczenia np. powietrza jest stężenie benzo(a)pirenu. W Polsce od 1995 roku ustalono wartość najwyższego dopuszczalnego stężenia (NDS) tego związku na poziomie $2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, w 1998 roku wprowadzono NDS dla dibenzo(a, h)antracenu na poziomie $4\mu\text{g}/\text{m}^3$.

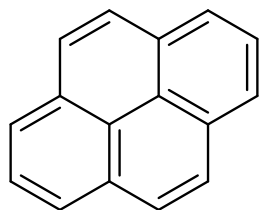
Zgodnie z zapisami dyrektywy Komisji 2001/90/WE ze względu na zagrożenie jakie powoduje obecność kreozotu, **drewno po takiej obróbce nie może być używane w produkcji elementów konstrukcyjnych, zabawek, mebli, pojemników ogrodowych, opakowań.**



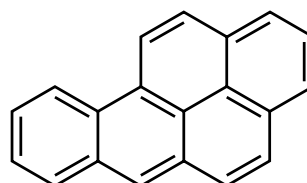
Naftalen



Antracen



Piren



Benzo(a)piren

Ryc. 5. Przykładowe wzory wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych

2.3 Metody dezaktywacji i usuwania chemicznych zanieczyszczeń z odpadów drzewnych

Ze względu na toksyczne działanie substancji wykorzystywanych do zabezpieczania drewna, podejmowany jest szereg działań zmierzających do minimalizowania ich obecności i szkodliwości dla środowiska naturalnego. Poszukuje się sposobów neutralizacji obciążonych odpadów, toksyczne substancje zastępowane są substancjami pochodzenia biologicznego lub substancjami cechującymi się mniejszą toksycznością względem środowiska. Najpowszechniejszym sposobem utylizacji odpadów zawierających substancje niebezpieczne jest ich spalanie. Takie postępowanie wymaga zapewnienia warunków wysokotemperaturowego spalania w instalacjach termicznego przekształcania odpadów, ograniczenia emisji i pyłów odprowadzanych do atmosfery. Utylizacja odpadów drzewnych zawierających niebezpieczne substancje nie powinna się wliczać w procesy odzysku, ale w procesy unieszkodliwiania, mimo iż także powstaje wówczas energia cieplna.

Potencjalna obecność środków ochrony drewna w odpadach drzewnych i w środowisku skłania do prac związanych z poszukiwaniem metod ich biodegradacji czy dezaktywacji.

W związku z udowodnioną skutecznością działania grzybów z grup podstawczaków (*Basidiomycota*) i workowców (*Ascomycota*) w procesach konwersji biomasy zwłaszcza grzybów białej zgnilizny (ang. WRF - white-rot fungi), takich jak *Strobilurus ohshimae*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus*, *Bjerkandera adusta*, *Clonostachys rosea*, *Pycnoporus cinnabarinus* (Sanchez, 2009). Grzyby te wytwarzają szereg zewnątrzkomórkowych enzymów lignolitycznych do których głównie należy peroksydaza ligninowa (LiP), peroksydaza manganowa (MnP), lakkazy i ksylanazy. Zdolności grzybów białego rozkładu rozpatrywano już od lat 90-tych XX w. pod kątem ich zastosowania we wstępnej selektywnej delignifikacji i bielenia mas włóknistych, zmian struktury drewna a także zwiększania podatności na nasycalność drewna (Wróblewska, 1995). Badania wielu ośrodków skupiały się na zastosowaniu mikroorganizmów, zwłaszcza grzybów i enzymów do przerobu pełnowartościowego surowca drzewnego i utylizacji jego odpadów. Prace te wówczas realizowano na potrzeby technologiczne poszczególnych etapów obróbki, niejednokrotnie odnotowując oszczędności energetyczne, obniżenie kosztów produkcji czy obniżenie ilości zanieczyszczeń w ściekach (Wróblewska, 1995).

Odnutowano w publikacjach traktowanie lub kompostowanie biomasy najczęściej rolniczej, słomy, obornika inokulantami zawierającymi w swoim składzie szeroki wachlarz

organizmów jak na przykład: *Aspergillus awamori*, *Aspergillus nidulans*, *Trichoderma viride*, *Phanerochaete chrysosporium*, (Gaiand i in., 2009).

Obecnie prowadzonych jest także wiele prac dotyczących zastosowania grzybów do celów przetwarzania biomasy, do wytwarzania materiałów biodegradowalnych do zastosowania w budownictwie i meblarstwie.

W naturze szczepy grzybów stanowią cenny element środowiska wyspecjalizowany do rozkładu biomasy i wspierający obieg materii w przyrodzie. Ze względów środowiskowych poszukuje się szczepy grzybów wytwarzające enzymy efektywnie degradujące substancje ksenobiotyczne, a naukę o bioremediacji z użyciem grzybów określa się mianem mykoremediacji (Rhodes, 2014). Zdolność grzybów ze względu na powinowactwo do rozkładu ligniny, stanowi przyczynek do prac nad rozkładem odpadów obciążonych substancjami chloro-organicznymi, jak pentachlorofenol, heksachlorofenol (Bosso i Cristinzio, 2014; Xiao i Kondo, 2020a,b) czy związki z grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (Haritash i Kaushik, 2009).

Wiele prac dotyczy poszukiwań przede wszystkim metod biologicznych działania konsorcjów bakterii i grzybów na rozkład niebezpiecznych substancji w glebie i w ściekach. Skuteczność działania wyselekcjonowanych szczepów skupia się na skuteczności rozkładu zanieczyszczeń w badaniach modelowych, w kulturach z użyciem ciekłych pożywek czy w glebie sztucznie zanieczyszczone. Wspomagana mikrobiologicznie degradacja związków ksenobiotycznych jest uważana za najbardziej efektywne i korzystne podejście (Mishra i inni, 2021). Liczne doniesienia mówią o degradacji substancji antropogenicznych z użyciem bakterii, w przypadku rozkładu pentachlorofenolu skuteczne są *Pseudomonas* sp., *Sphingomonas* sp., *Arthrobacter* sp., *Mycobacterium* sp., *Flavobacterium* sp., *Serratia* sp. i *Bacillus* sp. oraz grzyby z grup jak *Trametes* sp., *Phanerochaete* sp., *Anthracoephyllum* sp., *Armillaria* sp., *Bjerkandera* sp., *Ganoderma* sp., *Lentinula* sp., *Penicillium* sp., *Trichoderma* sp., *Rhizopus* sp. i *Plerotus* sp. (Bosso i Cristinzio, 2014).

Jako organizmy zdolne do degradacji WWA wymienia się bakterie *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Mycobacterium* spp., *Haemophilus* spp., *Rhodococcus* spp., *Paenibacillus* spp., a także grzyby lignolityczne jak *Phanerochaete chrysosporium*, *Bjerkandera adusta*, *Pleurotus ostreatus* (Haritash i Kaushik, 2009). Autorzy identyfikują możliwość poszukiwań organizmów zdolnych do degradacji zanieczyszczeń, jak WWA, z gleb lub osadów charakteryzujących się zanieczyszczeniem. Innym sposobem poszukiwania szczepów zdolnych do remediacji zanieczyszczeń są badania screeningowe organizmów pobranych z środowiska naturalnego i sprawdzenie ich efektywności dla

rozkładu wybranych związków w warunkach laboratoryjnych (Haritash i Kaushik, 2009; Mishra i inni, 2021).

Grzyby (WRF) jak m.in. *Trametes versicolor*, *Bjerkandera adusta*, *Pleorotus ostreatus*, *Phanerochaete chrysosporium* są wymieniane jako grzyby efektywnie wytwarzające enzymy modyfikujące ligninę (Marco-Urrea i Reddy, 2012).

W wielu pozycjach literaturowych można odnotować proponowane szlaki metaboliczne substancji toksycznych z użyciem konkretnych szczepów bakterii i grzybów. Dla wybranych zanieczyszczeń (PCP, lindan, WWA) opracowano na podstawie analizy literatury proponowane szlaki metaboliczne w trakcie rozkładu z użyciem grzybów (Komorowicz i in., 2023).

Spośród pozycji literaturowych brak tych, które omawiałyby problem remediacji odpadów drzewnych, a tym bardziej odpadów drzewnych pochodzących z rzeczywistego strumienia odpadów. W dobie obecnych trendów zagospodarowania materiałowych odpadów drzewnych przed ich zastosowaniem energetycznym prowadzone są także prace nad tym jak najbardziej efektywnie wykorzystać wszelkie rodzaje odpadów drzewnych jako surowce w obiegu zamkniętym. Poszukiwanie organizmów, takich jak bakterie i grzyby, w celu biokonwersji, detoksyfikacji lub biotransformacji tych związków chemicznych jest wyzwaniem determinującym kierunek wykorzystania takich odpadów.

Nie odnotowano prac związanych z detoksykacją odpadów drzewnych pozwalającą na jednoczesne sprawdzenie skuteczności działania szczepionki grzybowej na usunięcie łącznie substancji takich jak np. PCP, lindan, WWA.

Przegląd literatury uwypuklił, że grzyby takie jak *Bjerkandera adusta*, *Phanerochaete chrysosporium* i *Trametes versicolor* mogą być składnikami konsorcjów biologicznych, które mogą być skutecznie stosowane w rozkładzie biomasy i w kompostowaniu odpadów drzewnych zawierających substancje, takie jak pentachlorofenol, lindan i wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA). Działanie łącznie tych grzybów w ramach konsorcjum inokulującego w celach biotransformacji lignocelulozy i substancji niebezpiecznych występującej w kompostowaniu nie zostało do tej pory zbadane.

Skuteczność rozkładu wybranych substancji (PCP, lindan, WWA) odnotowano dla grzybów *Bjerkandera adusta*, *Phanerochaete chrysosporium* i *Trametes versicolor*. Grzyby te także są znane ze względu na skuteczne działanie delignifikacyjne. Należą do grupy grzybów białej zgnilizny drzew.

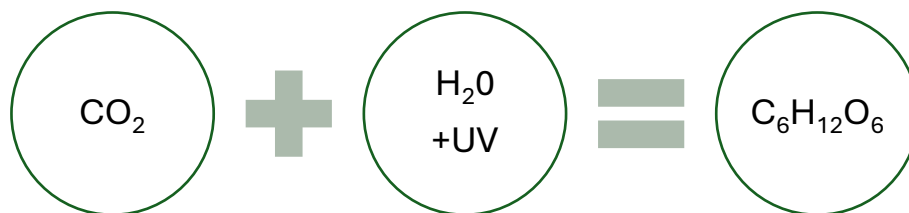
Bjerkandera adusta (Willd.) P. Karst. – szaroporka (bjerkandera, żagiew) podpalana, poraża osłabione i zamarłe drzewa liściaste (klony, wierzby, buki, kasztanowce, topole, lipy i inne), sporadycznie spotykana na jodłach, modrzewiach i świerkach. Owocniki jednoroczne, kapeluszowate, półkoliste, rozpostarte, pojawiają się pojedynczo lub w skupieniach, niekiedy ułożone dachówkowato. Występuje w lasach, parkach, w zadrzewieniach przydrożnych i wzdłuż brzegów rzek, na cmentarzach. Owocniki występują na pniach, opadłych gałęziach, pniakach (Grzywacz, 2023).

Phanerochaete chrysosporium Burdsall. – to jeden z modelowych organizmów w badaniach nad rozkładem drewna przez grzyby. Liczne doniesienia świadczą o jego skuteczności (<https://www.umcs.pl/pl/phanerochaete-chrysosporium,22686.htm>).

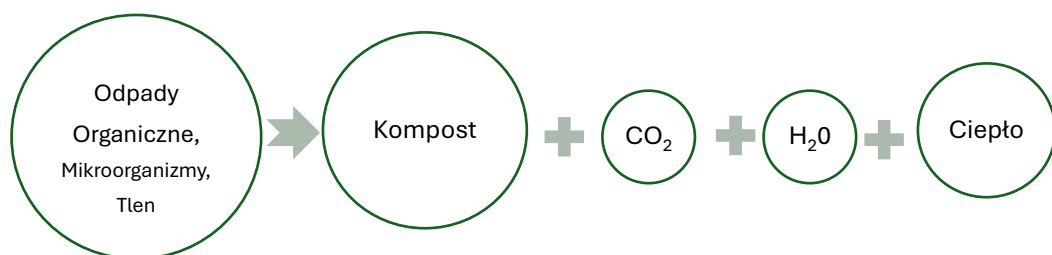
Trametes versicolor (L.) Lloyd – wrośniak różnobarwny, pospolicie poraża drewno liściaste, bardzo rzadko iglaste, najczęściej występuje na zamarłych, leżących pniach i gałęziach drzew, na pniakach, kolonizuje drewno użytkowe, na składnicach i różnego typu konstrukcjach drewnianych. Owocniki jednoroczne, wyrastają pojedynczo lub częściej w grupach (Grzywacz, 2023).

2.4 Proces kompostowania i jego charakterystyka

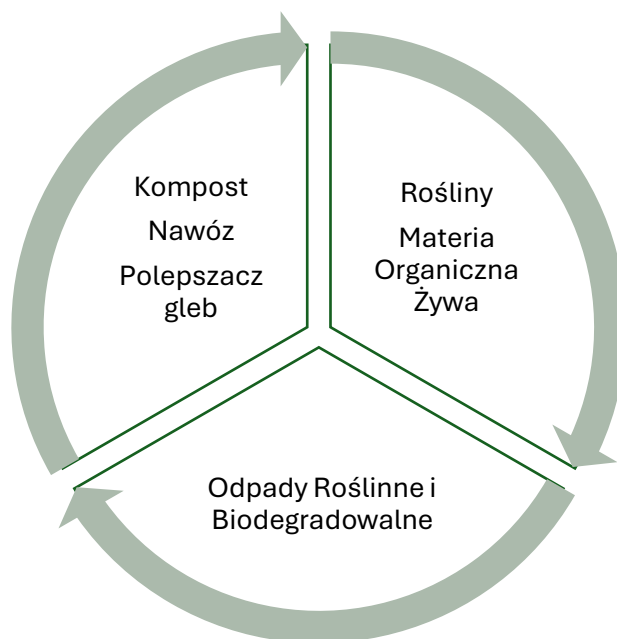
W środowisku naturalnym w procesie fotosyntezy organizmy posiadające umiejętność przekształcania energii świetlnej korzystając z wody i dwutlenku węgla wytwarzają materię organiczną. Przetwarzanie to umiejscowione jest w chloroplastach wszystkich części zielonych roślin (Urry i in, 2023). Fotosynteza pozwala przetworzyć energię światła w energię chemiczną zachowaną w postaci stałej i trwałej. Organizmy fotosyntetyzujące budują swoje cząsteczki samodzielnie, a materiał budulcowy roślinny jest także źródłem pożywienia dla organizmów heterotroficznych. Jest to początek obiegu materii organicznej w przyrodzie (Ryc. 6-8).



Ryc. 6. Ogólny zapis przebiegu procesu fotosyntezy



Ryc. 7. Ogólny zapis przebiegu procesu rozkładu tlenowego materiałów organicznych na przykładzie procesu kompostowania



Ryc. 8. Ogólny schemat wykorzystania biomasy roślinnej i odpadów ulegających biodegradacji celem uzyskania kompostu i produktów nawozowych

Biomasa roślinna jest źródłem składników pokarmowych dla wielu organizmów i podlega różnym procesom i przemianom. Do heterotrofów - organizmów żywiących się pozostałościami martwych organizmów, odpadkami organicznymi i opadłymi liśćmi, należy większość grzybów i wiele grup prokariotów. W naturalny sposób masa organiczna w środowisku rozkładana jest poprzez wiele organizmów żywych jak grzyby, bakterie i promieniowce i przy współudziale organizmów zwierzęcych. Biologiczny rozkład biomasy, czyli kompostowanie w przyrodzie jest procesem odwrotnym do procesu fotosyntezy (Ryc. 6, 7). Materia budulcowa roślin rozkładana jest do dwutlenku węgla i wody z wydzieleniem energii cieplnej, a powstały kompost może być życiodajnym składnikiem wzbogacającym dla gleb (Azim i inni, 2018; Siuta i Wasiak, 2000) (Ryc. 7, 8).

Składniki odżywcze pozostające w materii organicznej po procesie kompostowania charakteryzują się wysoką biodostępnością pokarmową dla roślin. Komposty przygotowane z różnych odpadów organicznych różnią się jakością i stabilnością w zależności od surowców użytych do produkcji kompostu (Azim i inni, 2018).

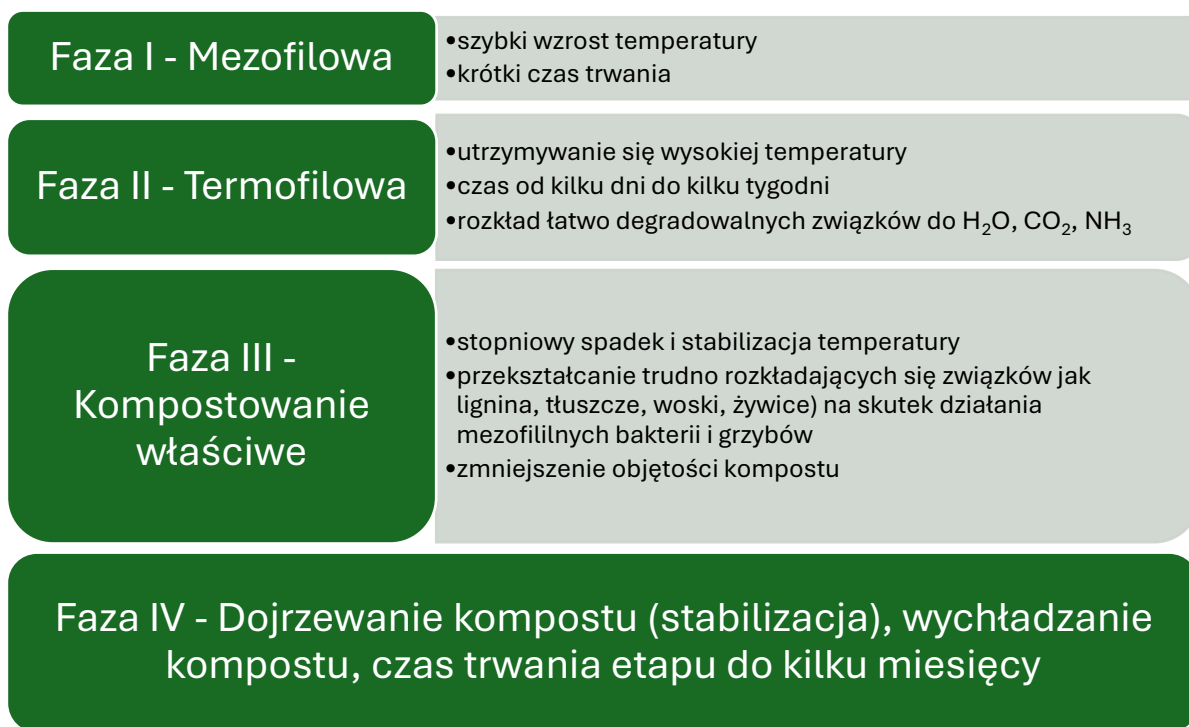
W ostatnich latach znaczenia nabierają aspekty związane z odzyskiwaniem odpadów i dążeniem do ich jak najbardziej korzystnego zastosowania. Nie inaczej jest w przypadku odpadów, które mogłyby stanowić surowce do wytwarzania produktów nawozowych (Łabętowicz i Stępień, Koncepcja gospodarki obiegu zamkniętego -

przyrodniczy recykling odpadowych składników mineralnych, 2020; Szara, 2020). Odnalezienie tych odpadów może korzystnie wpłynąć na zmniejszenie zużycia nawozów mineralnych i dalej ograniczenie wydobycia kopalin. W aspektach gospodarki o obiegu zamkniętym nie tylko przekształcone z korzyścią dla środowiska byłyby odpady, ale także zachowano by zasoby naturalne (Szara, 2020). Identyfikowane w ten sposób nawozy można podzielić na te do bezpośredniej aplikacji do gruntu lub częściej nawozy powstające w procesach recyklingu biologicznego – podczas kompostowania lub fermentacji metanowej (Szara, 2020). Uzyskane produkty nawozowe mogą zostać zastosowane na powierzchni ziemi, a ich działanie ma na celu przynosić korzyści dla rolnictwa lub poprawę stanu środowiska przy zastosowaniu odpowiednich przepisów prawa i zapewnieniu bezpieczeństwa dla gleb, wód i środowiska.

Kompostowanie pozwala zachować materię organiczną i przekształcić ją w produkt cenny przyrodniczo ze względu na jego właściwości poprawiające właściwości gleb, pozwala zachować materię organiczną w postaci stałej dłużej niż ma to miejsce w procesie spalania. **Kompostowanie to proces, w którym materia organiczna rozkładana jest przez mikroorganizmy w obecności tlenu i wilgoci. Proces kompostowania przebiega w kilku fazach, od fazy wstępnego kompostowania, poprzez fazę intensywnego kompostowania, kompostowanie właściwe do fazy dojrzewania kompostu.** Prawidłowy przebieg kompostowania zależy od mikroorganizmów (bakterie, grzyby, promieniowce), stężenia tlenu, stopnia rozdrobnienia odpadów, wilgotności, temperatury i odczynu środowiska (Jędrzszak, 2007).

Ogólnie znane metody kompostowania, w tym także odpadów drzewnych mogą przebiegać w formie pryzm otwartych lub w reaktorach, a faza stabilizacji kompostu (dojrzewania) w formie pryzm, także w warunkach naturalnych.

W procesie kompostowania wyróżnia się zasadniczo cztery fazy kompostowania przedstawione na Ryc. 9 (Jędrzszak, 2007).



Ryc. 9. Fazy kompostowania i ich najważniejsze aspekty (opracowanie własne na podstawie (Jędrzak, 2007)). (Wysokość wierszy 1-3 odwzorowuje długość poszczególnych etapów)

Najszybciej degradacji ulegają: białka, węglowodany i tłuszcze, trudniej natomiast celuloza i hemicelulozy (polisacharydy). Do związków opornych na rozkład w procesie kompostowania należą lignina, niskocząsteczkowe związki alifatyczne i związki aromatyczne (Jędrzak, 2007).

Wytworzony kompost, aby mógł znajdować zastosowanie przyrodnicze musi spełniać odpowiednie kryteria jakościowe i nie zagrażać środowisku. Kompost powinien zawierać przynajmniej 30% substancji organicznej i posiadać w składzie przynajmniej jeden ze składników pokarmowych, jak azot, fosfor czy potas w odpowiedniej ilości.

Rozkład materii organicznej jest zjawiskiem powszechnie występującym w naturze. Kompostowanie stanowi przyspieszoną metodę biologicznej transformacji materii organicznej prowadząc do powstania substancji humusowych i stabilnego produktu jakim jest kompost (Azim i inni, 2018).

Znane są także w praktyce metody kompostowania kory i odpadów drewna z gospodarki leśnej i drzewnej, jak trociny wióry, odpady z tartaku. Jednakże w ramach poszukiwań zastosowania materiałowego w postaci kompostu z odpadów drzewnych poprodukcyjnych i pochodzących ze strumienia odpadów komunalnych powinno się wziąć pod uwagę odmienną charakterystykę odpadów (obecność środków chemicznych

stosowanych w procesach produkcyjnych), a także możliwość zastosowania dodatków do procesu kompostowania jakimi mogą być grzyby wspomagających rozkład substancji lignocelulozowych i detoksykację odpadów poprzez degradację tychże substancji.

Dopasowanie szeregu parametrów technologicznych procesu kompostowania może stanowić wyzwanie, które warto ponieść celem zagospodarowania licznych odpadów drzewnych z wielu miejsc ich powstawania i przetwórstwa. Nawozowe wykorzystanie tej ilości biomasy może przyczynić się do korzyści dla środowiska naturalnego i ograniczenia emisji dwutlenku węgla z procesów spalania odpadów drzewnych.

Dopasowanie warunków procesu wymaga krótkiego omówienia czynników wpływających na przebieg kompostowania. Z danych literaturowych wynika, iż do znaczących parametrów możemy zaliczyć temperaturę, wilgotność, stosunek C/N oraz rodzaj odpadów.

Przemiany poszczególnych faz kompostowania charakteryzują się różnymi temperaturami co ma związek także z odmiennymi mikroorganizmami rozkładającymi materię organiczną. Początkowo temperatura sięgać może około 40°C, w kolejnej fazie wzrasta od około 50 do 60°C, lub nawet 70°C. Inne organizmy działają w trakcie fazy mezofilowej ustępując miejsca innym bardziej charakterystycznym dla fazy termofilowej, które kolejno w momencie chłodzenia kompostu zastępowane są ponownie organizmami mezofilnymi (Azim i inni, 2018).

Przemiany poszczególnych faz kompostowania charakteryzują się różnymi temperaturami co ma związek także z odmiennymi mikroorganizmami rozkładającymi materię organiczną.

Równowagę odżywczą dla organizmów można wyrazić jako stosunek węgla do azotu (C/N). Początkowy poziom tej wartości ma szczególne znaczenie dla procesu kompostowania, jak i dla uzyskanego kompostu.

Wartości typowe C/N dla zapoczątkowania procesu kompostowania do 30 do 25 (Jędrzak, 2007). Węgiel stanowi źródło energii i składnik pierwiastkowy organizmów, azot z kolei jest niezbędny do syntezy aminokwasów, białek i kwasów nukleinowych (Azim i inni, 2018). Podczas aktywnych faz kompostowania mikroorganizmy zużywają 15 do 30 razy więcej węgla niż azotu, a czas kompostowania wydłuża się wraz ze wzrostem C/N.

Odpady drzewne nie posiadają w swoim składzie azotu, charakteryzują się C/N na poziomie około 300 (Jędrzak, 2007). Dodatek azotu do procesu kompostowania obniży początkową jego wartość C/N. Dla drewna C/N może być bilansowany przez dodatek innych odpadów bogatych w azot, a z kolei wymagających dodatku węgla albo

w ostateczności przez dodatek nawozów mineralnych. Z drugiej strony trudnością przy zastosowaniu drzewnych materiałów może być ich długotrwały rozkład ze względu na zawartość ligniny i celulozy, z drugiej zaś strony nierozłożone kawałki drzewne mogłyby z powodzeniem być zawracane kilkakrotnie do procesu kompostowania po odsianiu co obniżyłoby by koszty zakupu materiału strukturalnego.

Początkowo spada ze względu na wydzielanie się kwasów organicznych z węglowodanów i lipidów zdegradowanych przez mikroorganizmy (Azim i inni, 2018). W miarę wzrostu temperatury wśród organizmów zwiększa się udział grzybów termofilowych, pH wzrasta na skutek destrukcji białek i uwalniania amoniaku.

Metodami biologicznymi można przetwarzać cały szereg odpadów roślinnych i zwierzęcych. Charakterystyka i struktura odpadu wpływa znacząco na drogę jego przetwarzania. Do kompostowania kierowane są odpady wpływające na natlenienie masy kompostowej, o wilgotności od 50% do 60% (jak np. odpady ogrodowe i zielone). Natomiast odpady o dużej wilgotności, pozbawione struktury (jak bioodpady, trawy, osady ściekowe) znajdują zastosowanie raczej w procesach fermentacji ze względu na ryzyko tworzenia stref beztlenowych w procesie kompostowania (Jędrzak, 2007).

Do biologicznych procesów mogą zostać kierowane następujące odpady:

- odpady z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa
- odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury, przemysłu skórzanego, futrzarskiego i tekstylnego
- odpady ulegające biodegradacji z przemysłu spożywczego (roślinne i zwierzęce)
- organiczne ulegające biodegradacji odpady komunalne
- osady ściekowe.

Podane odpady zgodnie z przepisami przynależą do grup i podgrup odpadów zgodnie z kodami zamieszczonymi w katalogu odpadów (Tabela 2).

Przygotowanie odpadów rolniczych po ich zbiorze polega głównie na ich rozdrobnieniu, natomiast odpadów z przemysłu drzewnego zależy od ich postaci. W szerokim wachlarzu odpadów drzewnych są odpady w formie trocin, wiórów, zrębków czy kawałków lub nawet ich mieszanin pochodzących z ciągów produkcyjnych. Ponadto postać odpadów drzewnych i drewnopochodnych zależy od etapów technologicznych, w których

powstają. Odmienne mogą być formy odpadów drzewnych pochodzących z odpadów budowlanych i rozbiórkowych czy z odpadów wielkogabarytowych. Poszczególne sortymenty mogą różnie wpływać na strukturę masy kompostowej i jej natlenienie.

Ze względu na wysoką zawartość celulozy i ligniny odpady z przemysłu drzewnego, celulozowo-papierniczego i włókienniczego powinny być stosowane do procesu kompostowania niż fermentacji. Także duże ilości gałęzi i kory w bioodpadach poprzez wysoką zawartość ligniny wpływają negatywnie na podatność tych odpadów do fermentacji (Jędrzak, 2007).

Do zagospodarowania w procesie kompostowania można także kierować odpady zielone pochodzące z pielęgnacji terenów publicznych, odpady zielone z gospodarki leśnej ogrodów przydomowych. W zależności od miejsca ich pochodzenia mogą to być ścięta trawa, ścinki drzew i krzewów, ścięta zieleń przydrożna, sortowane odpady z cementarzy, czy pochodzące z gospodarki leśnej odpady z przycinki, wiatrołomów i kora (Jędrzak, 2007).

Całkiem odmiennym materiałem kierowanym do kompostowania mogą być osady ściekowe. Ze względu na pochodzenie z różnego typu instalacji osady ściekowe oprócz substancji organicznych i biogennych charakteryzować się mogą różnym poziomem zawartości metali ciężkich, substancji zanieczyszczających oraz organizmy chorobotwórcze. Ze względu na zawartość organizmów chorobotwórczych ich zagospodarowanie wymaga sanitacji czyli procesów redukujących obecność i liczebność pasożytów. Osady ściekowe bogate są w azot (od 0,1-9,5% s.m.) i charakteryzują się niskim ilorazem C:N = 10-13 (Jędrzak, 2007). Niestety ze względu na ich strukturę wymagają kompostowania wspólnie z materiałem strukturotwórczym i bogatym w węgiel. Jędrzak (2007) podaje, że optymalna proporcja wsadowa tych materiałów to ok. 1:3.

Do materiałów bogatych w węgiel i charakteryzujących się dobrymi parametrami strukturotwórczymi należą rozmaite odpady drzewne, raczej nie włókniste, jak zrębki, ścinki, zrżyny. Osady ściekowe bogate w azot mogą stanowić dodatek do kompostowania odpadów drzewnych charakteryzujących się niedoborem tego pierwiastka. Połączenie tych materiałów o odmiennych strukturach mogłoby stanowić rozwiązanie efektywne w zagospodarowaniu odpadów.

Zmiany związane z gospodarką cyrkularną i prowadzące do poszerzenia bazy surowcowej z odpadów mogących wchodzić w skład masy kompostowej wymagają kompleksowego podejścia w przypadku zapewnienia jakości zarówno materiałów wsadowych, jak i wysokiej jakości produktu końcowego. Wprowadzanie nieodpowiednich

mas odpadów jako surowców może stwarzać ryzyko nie tylko dla zachowania odpowiednich parametrów procesu technologicznego, jak i właściwości kompostu.

Ryzyko zwiększa się w przypadku stosowania odpadów niesegregowanych, o nieznanym pochodzeniu. Strumień odpadów powstających i zbieranych u źródła gwarantują większą kontrolę nad ich składem i powtarzalnością.

Zastosowanie odpadów potencjalnie zawierających niepożądane składniki wymaga uprzednich badań zawartości substancji zgodnie z obowiązującym prawodawstwem i normami do tych celów powołanymi. Obecnie obowiązujące przepisy stanowią o odpowiednich kodach odpadów w zależności od pochodzenia i składu chemicznego odpadów czy ich właściwości. Badania charakteryzujące odpady pod właściwym kodem odpadu pozwalają dalej poszukiwać drogi ich wykorzystania lub możliwe ścieżki ich zagospodarowania.

Jak podaje literatura (Tabela 2) odpady z leśnictwa, rolnictwa i przetwórstwa drewna mogą znajdować potencjalne zastosowanie przyrodnicze (Jędrszak, 2007; Łabętowicz i Stępień, 2020; Załącznik nr1. Katalog odpadów).

Tabela 2. Wybrane odpady organiczne wskazywane jako nadające się do biologicznego przetwarzania z grup odpadów z leśnictwa i przetwórstwa drewna oraz produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury (opracowanie własne na podstawie Jędrczak, 2007, s. 26; Łabętowicz i Stępień, 2020; Załącznik nr1. Katalog odpadów)

Kod odpadu	Grupy i podgrupy odpadów	Biologiczne przetwarzanie	Potencjalne wykorzystanie przyrodnicze
		(Jędrczak, 2007)	(Łabętowicz i Stępień, 2020; Załącznik nr1. Katalog odpadów)
02	Odpady z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności		
02 01	Odpady z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, leśnictwa, łowiectwa i rybołówstwa	√	√
03	Odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury		
03 01	Odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli	√	√
03 03	Odpady z produkcji oraz z przetwórstwa masy celulozowej, papieru i tektury	√	√
15	Odpady opakowaniowe		
15 01 03	Opakowania z drewna		√
17	Odpady z budowy, remontów i demontaży obiektów budowlanych oraz infrastruktury drogowej (włączając glebę i ziemię z terenów zanieczyszczonych)		
17 02 01	Drewno		√
20	Odpady komunalne łącznie z frakcjami gromadzonymi selektywnie		
20 02	Odpady z ogrodów i parków (w tym z cmentarzy)	√	

2.5 Rola mikroorganizmów w procesie kompostowania

Oprócz właściwych parametrów procesu kompostowania na rozkład materii organicznej wpływa działanie mikroorganizmów. Mieszanka materiałów kompostowanych może zostać zaszczerpiona lub zostać samoistnie zasiedlona w przypadku przyzmu w warunkach naturalnych. Obecnie przy prowadzeniu procesów częściej w kompostowniach, reaktorach czy instalacjach można dodać mikroorganizmów wprowadzić do materii lub zastosować kompost dojrzały lub frakcję nadsitową.

Dla drewna proces kompostowania jest wydłużony w stosunku do odpadków żywności i produktów nietrwałych, związane jest to z obecnością celulozy i ligniny w drewnie. W przypadku drewna duże znaczenie w procesie rozkładu mają grzyby, które są zdolne rozkładać poszczególne typy substancji lignocelulozowych. Właściwości enzymatyczne niektórych organizmów zdolnych do rozkładu celulozy, a zwłaszcza ligniny powodują, że rozkładowi drewna towarzyszy ich całkowita lub częściowa detoksykacja (Kirk, 1993).

Kolejne etapy rozkładu podczas kompostowania wyrażone są poprzez obserwowane zmiany temperatury panującej wewnątrz masy kompostowanej. Początkowo działanie organizmów mezofilnych powoduje wzrost temperatury, a osiągnięcie temperatury powyżej 45°C skutkuje zamianą mezofilów na bakterie termofilne. Dalej działanie termofilów powoduje wzrost temperatury do 55°C i wyżej. Wówczas bakterie mezofilne obumierają lub stają się nieaktywne i oczekują na spadek temperatury. Wydzielane ciepło działa na kompost dezynfekująco, zabijając patogeny i nasiona chwastów. W wyższych temperaturach następuje szybszy rozkład białek, tłuszczów i złożonych węglowodanów, jak celuloza i hemicelulozy. Termofilne bakterie prowadzą kompostowanie tak długo dopóki zasób substancji organicznych łatwo ulegających biodegradacji jest obfity. Gdy wyczerpią zasoby, spada temperatura, a ponownie zaczynają działać organizmy mezofilne, aż do wyczerpania łatwo dostępnych substancji. W fazie dojrzewania dochodzi do masowego rozwoju promieniowców, ich obecność może być sygnałem że kompost jest dojrzały (Jędrzak 2007).

Mikroorganizmy niezbędne do zapoczątkowania procesu kompostowania są najczęściej naturalnie obecne w odpadach organicznych jak liście, ścięta trawa lub odpady kuchenne. W zależności od odpadów możemy mieć sytuację, że do procesu kompostowania kierowane są odpady pozbawione odpowiedniej ilości mikroorganizmów zdolnych do

kompostowania. Liczebność organizmów wpływa na szybkość zapoczątkowania fazy wstępnej procesu kompostowania. W przypadku niedoboru mikroorganizmów masę kompostową można suplementować preparatami mikrobiologicznymi (szczepienie chwilowe) lub mieszać z odpadami, które naturalnie są bogate w organizmy zdolne je zasiedlić (szczepienie masowe) (Jędrzak, 2007).

Bakterie stanowią dominującą frakcję wśród mikroorganizmów, wytwarzają szereg enzymów do rozkładu różnych związków organicznych, są odpowiedzialne za wytwarzanie ciepła. W fazie wstępnej aktywne są bakterie mezofilne, które można także znaleźć w glebie. Spośród bakterii termofilowych możemy wyróżnić bakterie z rodzaju *Bacillus*. Początkowa duża różnorodność maleje wraz ze wzrostem temperatury powyżej 60°C, Niekorzystne warunki temperaturowe, żywieniowe i wilgocni są w stanie przetrwać formy przetrwalnikowe jak endospory laseczek (*Bacillus*), kondidia promieniowców (*Actinomycelates*) i akinety sinic (Jędrzak, 2007). Obecność bakterii w temperaturach powyżej 75°C jest znikoma a rozkład praktycznie zahamowany. Po ochłodzeniu masy znów działania rozpoczynają bakterie mezofilne, a ich skład zależy od początkowych warunków kompostowania (zawartość form przetrwalnikowych i pozostających w kompoście) oraz od mikroflory w otoczeniu (Jędrzak, 2007).

Masa kompostowa, w tym drewno i substancje lignocelulozowe w procesie kompostowania podlegają także działaniu grzybów. Znaczenie grzybów w procesie kompostowania jest wielowymiarowe: są to organizmy wyspecjalizowane w rozkładzie złożonych substancji jak celuloza, lignina i hemicelulozy. Dzięki zdolności do wydzielania enzymów o szerokim spektrum działania pełnią kluczową funkcję w przekształcaniu resztek roślinnych w stabilne kwasy humusowe. Ich liczebność i aktywność zależy od fazy kompostowania i warunków środowiskowych, w szczególności od wilgotności, napowietrzania i temperatury. W fazie mezofilowej grzyby saprofityczne szybko kolonizują świeży materiał, wykorzystując cukry proste i skrobię. W fazie termofilowej dominują grzyby termofilne, zdolne do wzrostu z temp. >50°C, które rozkładają celulozy i hemicelulozy. W fazie dojrzewania następuje ponowny wzrost różnorodności grzybów, co sprzyja humifikacji i stabilizacji kompostu. Grzyby pełnią różne funkcje metaboliczne, wśród których można wyróżnić:

- Rozkład złożonych polimerów – grzyby biosynteżują m.in. celulazy, ksylanazy, ligninazy i lakazy, umożliwiając mineralizację lignocelulozy,

- Syntezę związków humusowych – metabolity wtórne grzybów biorą udział w dalszych przemianach produktów rozkładu, co przyspiesza powstawanie humusu.
- Stabilizacja struktury kompostu – grzybnia oplatając cząstki materiału poprawia agregację i napowietrzanie,
- Konkurencja i kontrola mikrobiologiczna - niektóre grzyby wydzielają antybiotyki i metabolity hamujące rozwój patogenów przyczyniając się do higienizacji materiału.

Obecność aktywnych populacji grzybów w kompoście zwiększa efektywność rozkładu trudnych frakcji materiału roślinnego, skraca czas potrzebny do uzyskania dojrzałego kompostu, poprawia jakość nawozową kompostu, wspiera biokontrolę chorób glebowych po dodaniu kompostu do gleb. W literaturze wskazuje się, że wzbogacenie kompostu w wyselekcjonowane szczepy grzybów lignolitycznych (np. *Trichoderma* spp.) może znacząco zwiększyć tempo humifikacji i ograniczyć straty azotu (.

Grzyby stanowią ważny element środowiska naturalnego. W zależności od mechanizmu rozkładu materii drzewnej, grzyby dzielimy na trzy typy: 1) grzyby rozkładu brunatnego (ang. *brown-rot*), 2) grzyby rozkładu białego (ang. *white-rot*), 3) grzyby rozkładu szarego (ang. *soft-rot*). Grzyby te ze względu na preferowanie poszczególnych substancji wykazują odmienne działanie co do rozkładu substancji lignocelulozowych i innym spektrum wydzielanych przez grzyby enzymów. Grzyby rozkładu brunatnego wydzielają enzymy celulolityczne pozwalające rozkładać celulozę. Preferując polisacharydy pozostawiają drewno o barwie brunatnej zawierające głównie ligninę (stąd nazwa). Grzyby rozkładu białego rozkładają jednocześnie ligninę i celulozę, jednakże pozostająca po degradacji substancja zawiera głównie białą celulozę (całkowity rozkład ligniny prowadzi do pozostawienia celulozy jako białej substancji). Natomiast rozkład szary charakteryzuje się rozkładem wszystkich składników (celulozy i ligniny), jest najmniej niebezpieczny dla drewna i występuje głównie w środowisku o bardzo wysokiej wilgotności. Drewno po degradacji tego typu charakteryzuje się szarą barwą i zmianą powierzchniową (Fengel i Wegener, 1989; Krajewski i Witomski, 2005).

Grzyby rozkładu białego wykazują potencjał jako organizmy rozkładające głównie ligninę i w mniejszym stopniu celulozę. Ze względu na zdolność rozkładu skomplikowanej aromatycznej struktury ligniny grzyby te wykazują także powinowactwo do rozkładu pierścieni aromatycznych. Są zdolne rozkładać zanieczyszczenia chemiczne do prostszych postaci (Komorowicz et al., 2023). Wydzielając spektrum enzymów rozkładających ligninę

(peroksydaza ligninowa, peroksydaza manganowa i lakaza – ang. *lignin peroxide*, *manganese peroxidase*, *laccase*) stanowią cenne źródło organizmów o dużym potencjale użytkowym (od biologicznego/ biotechnologicznego zastosowania aż do enzymatycznego traktowania biomasy lignocelulozowej, czy do detoksykacji zanieczyszczeń).

Znane są doniesienia na temat możliwości wykorzystania niektórych gatunków tych grzybów do detoksykacji środowiska (Komorowicz i in., 2023).

Rozkład biologiczny polega na wykorzystywaniu substancji przez mikroorganizmy jako źródło węgla w procesach metabolicznych (katabolizm) oraz w procesach służących syntezie komórek (anabolizm). Biotransformacje związków odbywają się pod działaniem enzymów. Wielkocząsteczkowe substancje zanim zostaną włączone w szlaki metaboliczne podlegają wieloetapowym przemianom. Rozkład związków, takich jak chloroorganiczne lub wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, może być prowadzony z użyciem bakterii i grzybów mających zdolność do metabolizowania tych związków (Włodarczyk-Makuła & Wierzbicka, 2013).

Mikroorganizmy stosowane w procesie bioaugmentacji powinny charakteryzować się odpowiednimi właściwościami metabolomicznymi. W ostatnim czasie powszechne są badania nad możliwościami zastosowania do bioaugmentacji grzybów. Wykazano, że są one zdolne do biodegradacji wielu toksycznych związków. Grzyby w porównaniu z bakteriami wykazują cechy dzięki którym bioremediacja będzie bardziej skuteczna i mniej kosztowna, ze względu na:

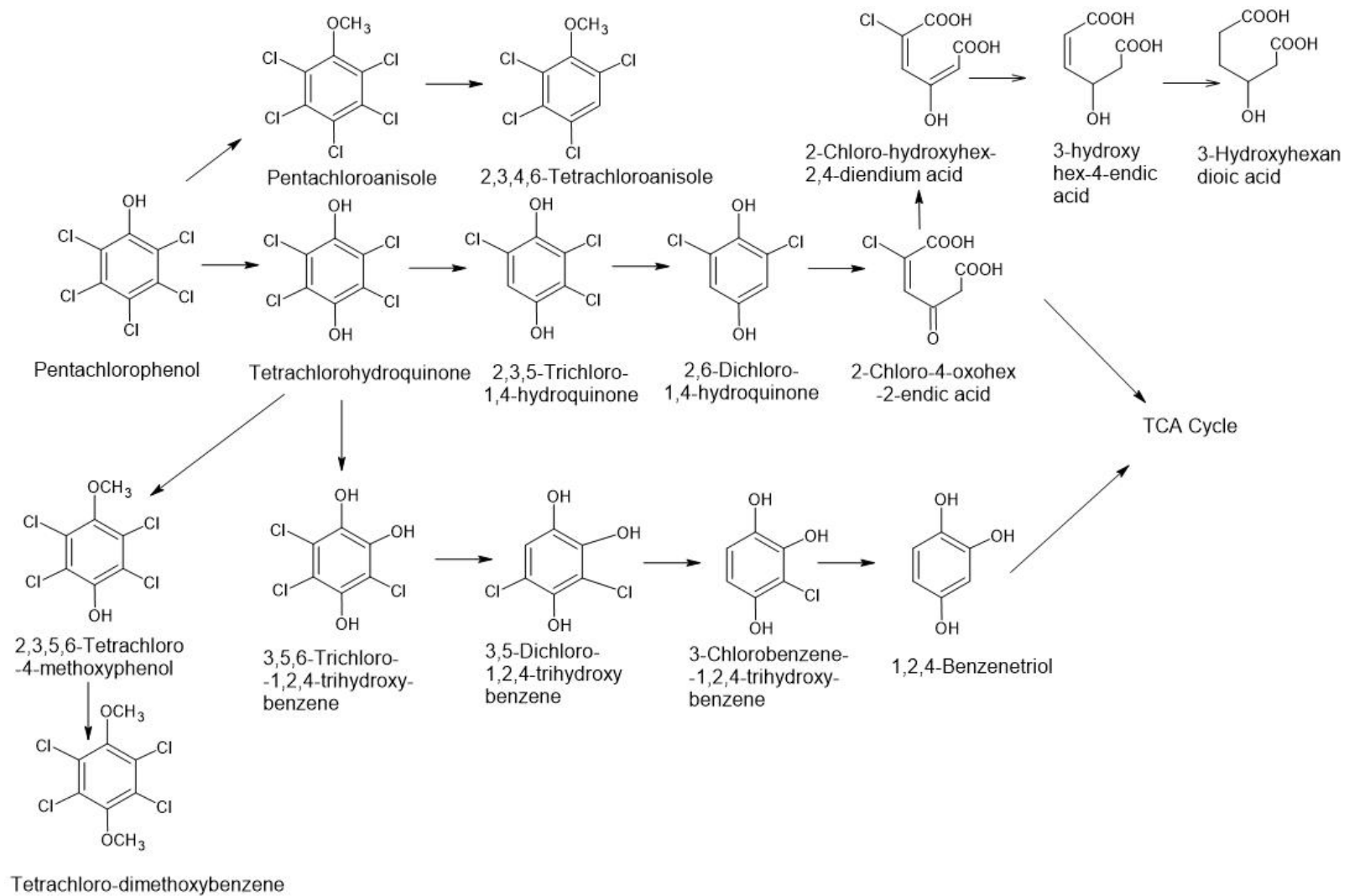
- mniejszą wrażliwość na toksyczne działanie zanieczyszczeń,
- zdolność do przeżycia w warunkach niedoboru składników odżywczych,
- małą wrażliwość na działanie czynników środowiskowych, takich jak: temperatura, pH, czy wilgotność.

Powyższe właściwości grzybów wynikają z ich budowy oraz przebiegu procesów metabolomicznych. Mykoremediacja znajduje zastosowanie przede wszystkim w przypadku szczególnie toksycznych, trwałych i trudno-degradowalnych zanieczyszczeń, które nie mogą być rozłożone przez inne mikroorganizmy a także związków o ograniczonej rozpuszczalności w wodzie. Przydatność mykoremediacji wynika z faktu, że grzyby zdolne są do równoczesnego rozkładu wielu związków chemicznych. Grzyby powodujące rozkład drewna (soft-rot, white-rot, brown-rot), podczas rozkładu działają tylko na specyficzne składniki substancji lignocelulozowych. Grzyby z grupy brunatnego rozkładu powodują

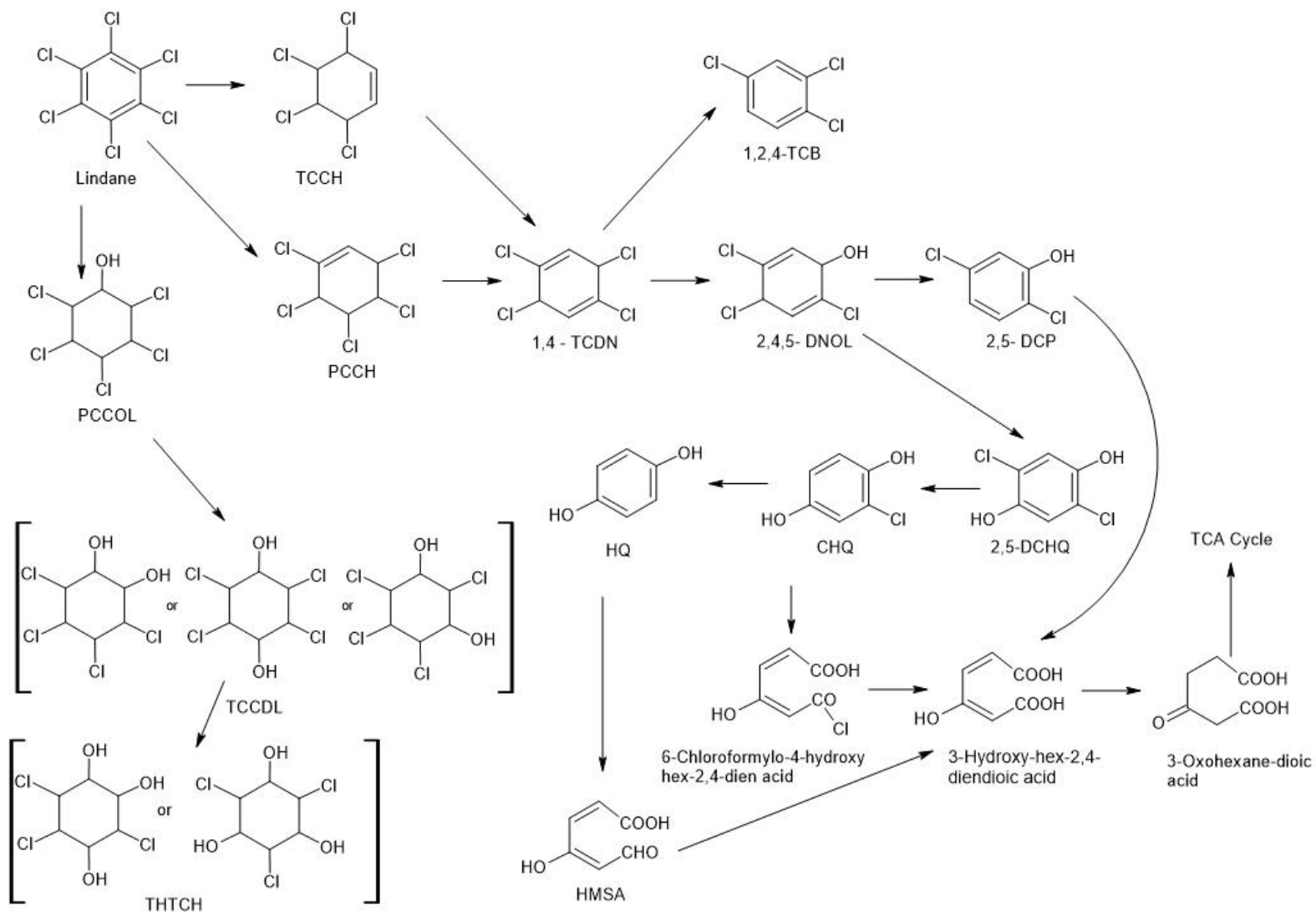
rozkład celulozy pozostawiając ligninę, podczas gdy grzyby rozkładu białego powodują rozkład ligniny. Grzyby rozkładu białego (white – rot fungi) rozkładają zarówno celulozę, jak i ligninę jednocześnie. Rozkład ten pozostawia drewno kruche i obniżonej wytrzymałości. Grzyby rozkładu drewna poprzez specyficzne działanie rozkładające występujących naturalnie w drewnie składników jak celuloza, lignina, hemicelulozy i inne związki terpenowe (olejki eteryczne), mogą znaleźć zastosowanie do rozkładu czy biotransformacji innych składników w tym zanieczyszczeń drewna o podobnej budowie zawierających pierścień aromatyczny.

Inicjacja procesu biodegradacji nie wymaga dodatkowego czasu adaptacji niezbędnego do uruchomienia syntezy enzymów degradacyjnych. Nie zachodzi u nich też blokowanie syntezy enzymów w sytuacji kiedy ilość substancji chemicznej jest zbyt mała. Hodowla grzybów nie jest kosztowna, gdyż wykorzystują one jako substrat pokarmowy substraty lignocelulozowe. W trakcie remediacji grzyby powodują całkowity lub częściową mineralizację zanieczyszczeń. Proponowane szlaki metaboliczne wybranych związków przedstawiono na Ryc. 10-12.

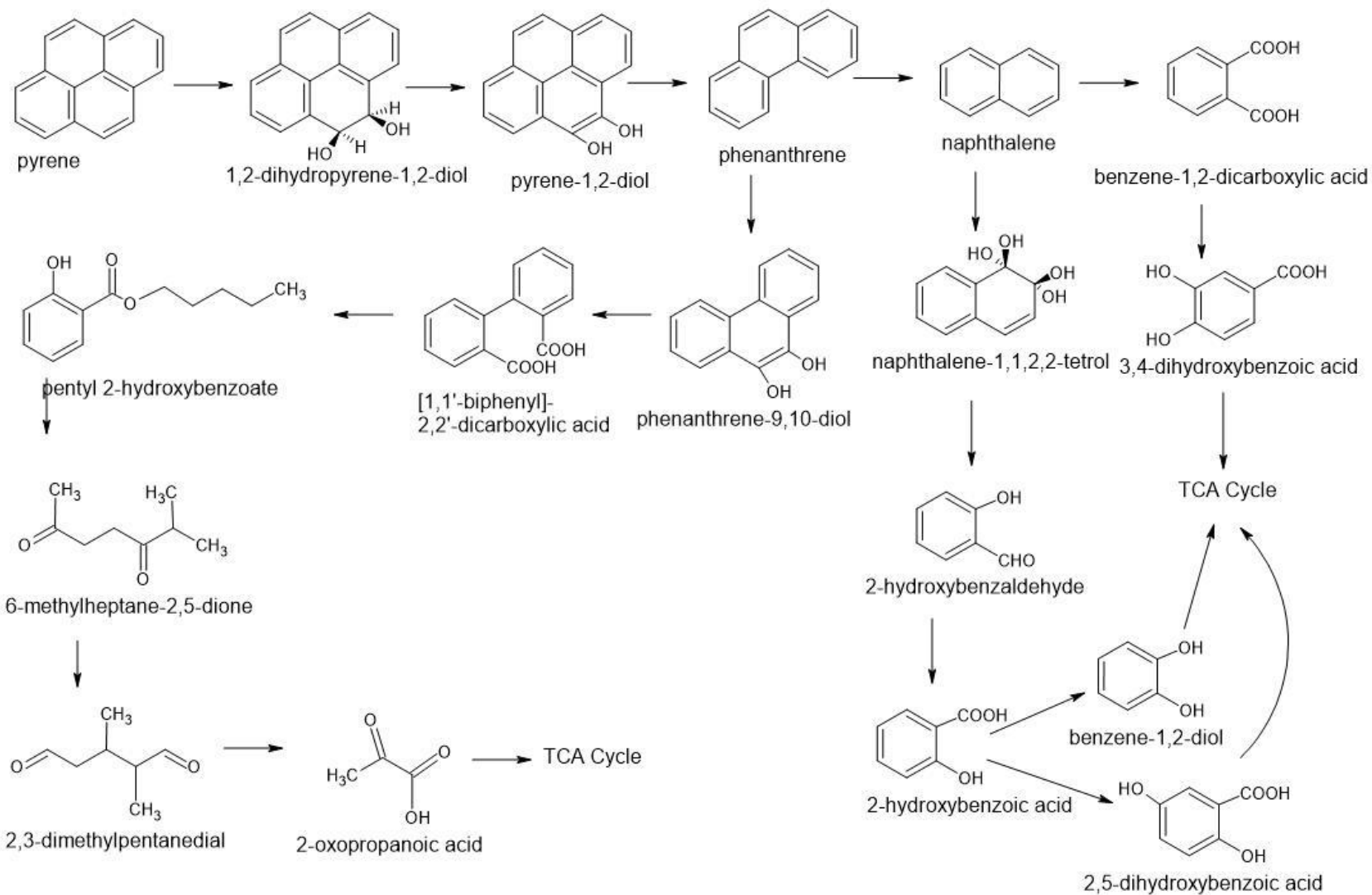
W ostatnim czasie obserwuje się wzrastające zainteresowanie grzybami rozkładającymi drewno: *Trametes versicolor*, *Trametes hirsuta*, *Bjerkandera adusta*, *Lentinula edodes*, *Pleurotus ostreatus*, *Cerrrena unicolor* oraz niektórymi gatunkami należącymi do workowców: *Myceliaophthora termophila* czy *Chaetomium termophilum*. Okazało się, że peroksydaza ligninowa i inne enzymy grzybowe biorące udział w rozkładzie ligniny wykazują niską specyficzność substratową i katalizują równie wiele różnorodnych strukturalnie związków będących zanieczyszczeniami środowiskowymi. Do takich substancji należą też takie uznane za odporne na biodegradację m.in. wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne i alifatyczne, chlorowane związki organiczne, pestycydy, barwniki czy pozostałości materiałów wybuchowych i leki.



Ryc. 10. Potencjalne ścieżki biodegradacji pentachlorofenolu z użyciem grzybów (opracowanie własne, opublikowane w Komorowicz i in., 2023)



Ryc. 11. Potencjalne ścieżki biodegradacji lindanu z użyciem grzybów (opracowanie własne, opublikowane w Komorowicz i in., 2023)



Ryc. 12. Potencjalne ścieżki biodegradacji pyrenu z użyciem grzybów jako przykład dla związków z grupy WWA (opracowanie własne, opublikowane w Komorowicz i in., 2023)

2.6 Zastosowanie kompostu jako produktu i jego znaczenie dla ochrony środowiska i przyrody, aspekty nawozowe

Kompost jako przetworzona w procesie tlenowego rozkładu biomasa posiada wartości odżywcze, nawozowe i próchnico-twórcze. Zawracana do środowiska materia organiczna w postaci kompostu uzyskanego w procesie kompostowania włączona ponownie do obiegu materii, co może wpłynąć korzystnie na właściwości gleby.

Zasilenie zerodowanych gleb kompostami lub nawozami organicznymi wpisuje się w tendencje zgodne z założeniami Gospodarki Cyrkularnej w aspekcie gleb jako zasobu naturalnego, a także nowej strategii ochrony gleb (Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe #EUGreenDeal; Healthy soils – new EU soil strategy in EU biodiversity strategy for 2030).

Celem zwiększenia wykorzystania do celów nawozowych produktów innych, niż te pochodzące ze składników wydobytych z ziemi lub wytwarzanych chemicznie materiałów nieorganicznych, powinno dopuszczać się możliwość zastosowania do celów nawożenia materiałów pochodzących z recyklingu lub materiałów organicznych. Zwiększanie udziału stosowania składników pokarmowych pochodzących z recyklingu wpłynąć może na dalszy rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym (Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009 z dnia 5 czerwca 2019 r. ustanawiające przepisy dotyczące udostępniania na rynku produktów nawozowych UE). Jako produktów nawozowe (PFC) wprowadzane na rynek UE wyróżnia się nawozy organiczne i organiczno-mineralne, a także nawozy nieorganiczne, środki wapnujące, organiczne i nieorganiczne polepszacze gleby, podłoża do upraw, inhibitory, biostymulatory, produkty mieszane z wyżej wymienionych. Nawóz zgodnie z definicją wg rozporządzenia (2019/1009) to produkt którego funkcja polega na dostarczaniu składników pokarmowych roślinom lub grzybom (Tabela 3). Z kolei polepszacz gleby jest produktem nawozowym, którego funkcja polega na utrzymaniu, poprawie lub ochronie właściwości fizycznych lub chemicznych, struktury lub aktywności biologicznej gleby, do której jest dodawany.

Produkt nawozowy może zawierać kompost otrzymany w wyniku kompostowania tlenowego. Kompost powinien być uzyskany m.in. z bioodpadów zbieranych u źródła, żywych lub martwych organizmów lub ich części oraz dodatków do kompostowania. Kompostowanie powinno się odbywać w zakładzie, w którym linie produkcyjne do przetwarzania materiałów wsadowych są wyraźnie oddzielone oraz w którym unika się

fizycznej styczności między materiałami wsadowymi i wyjściowymi, także podczas przechowywania.

Przepisy regulacji (2019/1009) określają także wymagania co do samego procesu kompostowania jako kontrolowanego rozkładu materiałów biodegradowalnych o charakterze głównie tlenowym, gdzie w wyniku biologicznie wytwarzanego ciepła umożliwiające jest powstawanie temperatur odpowiednich dla bakterii termofilnych. Wymagane jest, aby wszystkie części każdej partii były regularnie i dokładnie wzruszane i obracane, albo podlegały wymuszonej wentylacji w celu zapewnienia prawidłowych warunków sanitarnych i jednorodności materiału. Podczas procesu kompostowania wszystkie części jednej partii charakteryzują się jednym z wymienionych profili temperatury w czasie: 70 °C lub więcej przez co najmniej 3 dni, lub 65 °C lub więcej przez co najmniej 5 dni, 60 °C lub więcej przez co najmniej 7 dni, lub 55 °C lub więcej przez co najmniej 14 dni.

Kompost (CMC3) nie powinien zawierać więcej niż 6 mg/kg suchej masy WWA₁₆ (Suma 16 związków z grupy WWA: naftalenu, acenaftylenu, acenaftenu, fluorenu, fenantrenu, antracenu, fluorantenu, pirenu, benzo[a]antracenu, chryzenu, benzo[b]fluorantenu, benzo[k]fluorantenu, benzo[a]pirenu, indeno[1,2,3-cd]pirenu, dibenzo[a,h]antracenu oraz benzo[g,h,i]perylenu) (Rozp. (UE) 2019/1009).

Wytworzony kompost nie może zawierać więcej niż 3 g/kg suchej masy makroskopowych zanieczyszczeń większych niż 2 mm (to jest: szkła, metalu lub tworzyw sztucznych) oraz nie więcej niż 5 g/kg suchej masy sumy tych makroskopowych zanieczyszczeń (ogółem). Wymagania jakościowe produktów nawozowych i materiałów składowych tych produktów zawarte są w Rozporządzeniu (2019/1009) z dnia 5 czerwca 2019 r., a wymagania dotyczące środków polepszających właściwości gleb przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 3. Wymagania dla nawozów organicznych i organicznych polepszaczy gleb wspomagających uprawę roślin (Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009 i Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 sierpnia 2024 r. Dz.U. 2024 poz. 1261)

	Węgiel organiczny (C _{org})	Składnik [% m/m]			
		Azot Ogólny	P ₂ O ₅	K ₂ O	Suma
PFC 1(A)(I) Nawóz organiczny stały Minimum 95% materiału wyłącznie pochodzenia biologicznego	min. 15 % (m/m)	gdy stały nawóz organiczny zawiera tylko jeden deklarowany podstawowy składnik pokarmowy, zawartość tego składnika pokarmowego wynosi co najmniej:			
		2,5	2	2	-
		gdy stały nawóz organiczny zawiera więcej niż jeden deklarowany składnik pokarmowy, zawartość tych składników pokarmowych wynosi co najmniej:			
		1	1	1	4
PFC 3(A) Organiczny polepszacz gleby Minimum 95% materiału wyłącznie pochodzenia biologicznego	Min 7,5% (m/m) Sucha masa minimum 20% lub więcej	-	-	-	-
Dz.U. 2024 poz. 1261 Nawóz organiczny stały	Min 30% substancji organicznej w przeliczeniu na s.m.	Min 0,3 % m/m (Azot całkowity)	Min. 0,2% m/m	Min. 0,2% m/m	-

Tabela 4. Wartości dopuszczalne zanieczyszczeń dla nawozu organicznego PFC 1(A) i organicznego polepszacza gleb PFC 3(A)
(Opracowanie własne na podstawie Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009)

	Maksymalne dopuszczalne zanieczyszczenia i zawartości w nawozach organicznych i polepszaczach gleb (Rozp. 2019/1009)								
	Cd	Cr (VI wartościowy)	Hg	Ni	Pb	As (arsen nieorg.)	Biuret (C ₂ H ₅ N ₃ O ₂)	Cu	Zn
	mg/kg suchej masy								
PFC 1(A) – nawóz organiczny	1,5	2	1	50	120	40	zabroniony	300	800
PFC 3(A) – organiczny polepszacz gleby	2	2	1	50	120	40	Nie określono wymagań	300	800
Wymagania Dla: PFC 1(A) – nawóz organiczny, PFC 3(A) – organiczny polepszacz gleby	Dopuszczalny poziom patogenów: - <i>Salmonella</i> spp. nieobecne w 25 g lub 25 ml - <i>Escherichia coli</i> lub <i>Enterococcaceae</i> dopuszczalny poziom 1000 jtk w 1g lub 1ml								
Rozp. 2024	5	100 (chrom ogólnie)	2	60	140	-	-	-	-

Dla produktów nawozowych wprowadzanych do obrotu w zapisach Rozporządzenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 sierpnia 2024 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu powołane są dedykowane jednostki organizacyjne upoważnione do przeprowadzania badań nawozów i środków wspomagających uprawę roślin lub jednostki właściwe do wydawania opinii o tych produktach. Przywołany dokument precyzuje przepisy dotyczące udostępniania na rynku produktów nawozowych, inst. Opinie dopuszczające produkty nawozowe do stosowania

wydają czołowe instytuty badawcze o kompetencjach dotyczących określonego końcowego zastosowania (Dz. U. 2024 poz. 1261).

Do badań jakie należy wykonać w przypadku nawozów i środków wspomagających uprawę roślin należą:

1) **badania fizyczne, fizykochemiczne i chemiczne, które mają potwierdzić deklarowaną** zawartość składników pokarmowych i parametry fizyczne, fizykochemiczne i chemiczne oraz spełnianie wymagań jakościowych i wymagań w zakresie występowania dopuszczalnych rodzajów zanieczyszczeń i ich wartości,

2) **badania biologiczne, które mają potwierdzić stan sanitarny produktu,**

3) **badania rolnicze, które są przeprowadzane co najmniej przez jeden sezon lub cykl wegetacyjny i które mają potwierdzić**

a) przydatność nawozu do nawożenia roślin lub gleb lub do rekultywacji gleb,

b) korzystny wpływ stymulatorów wzrostu na rozwój roślin lub inne procesy życiowe roślin,

c) korzystny wpływ środka poprawiającego właściwości gleby na właściwości gleby lub na jej parametry chemiczne, fizyczne, fizykochemiczne lub biologiczne oraz potwierdzić przydatność środka poprawiającego właściwości gleby do rekultywacji gleb.

Zastosowanie do wytworzenia kompostu odpadów uzyskanych z frakcji organicznej zmieszanych odpadów komunalnych stanowiłoby alternatywną metodę zapobiegania ich składowaniu. W zapisach (Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska z 17.12.2021 r.) w sprawie szczegółowych warunków zaliczania masy odpadów opakowaniowych do poddanych recyklingowi umieszczone zostały następujące założenia dotyczące opakowań drewnianych i możliwości ich odzysku: iż do poziomu recyklingu odpadów opakowaniowych z drewna można zaliczyć masę odpadów opakowaniowych z drewna przygotowanych do ponownego użycia w procesach odzysku R3 lub R12, (odzysk R3 - to jest Recykling lub Odzysk substancji organicznych, które nie są stosowane jako rozpuszczalniki - w tym kompostowanie i inne biologiczne procesy przekształcania).

Masa odpadów opakowaniowych ulegających biodegradacji poddawanych obróbce tlenowej lub beztlenowej może zostać uznana za masę odpadów opakowaniowych poddanych recyklingowi, jeżeli w tych procesach powstanie kompost, materiał pofermentacyjny lub inny materiał wyjściowy, których masa odpowiada zgodnie z charakterystyką użytego procesu biodegradacji, masie poddanej recyklingowi, i mają one zostać wykorzystane jako produkt, materiał lub substancja z recyklingu. Jeżeli uznany materiał wyjściowy jest wykorzystywany na powierzchni ziemi, zalicza się go do

poddanego recyklingowi wyłącznie wtedy, gdy takie wykorzystanie przynosi korzyści rolnictwu lub prowadzi do poprawy stanu środowiska, w szczególności przez rekultywację.

Do poziomu recyklingu nie zalicza się masy odpadów opakowaniowych, które utraciły status odpadów, a które mają zostać użyte jako paliwa lub inne środki wytwarzania energii, spalane, użyte do prac ziemnych lub składowane.

Z kolei Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 roku w sprawie procesu odzysku R10 (Dz. U. 2015, poz. 132), określa warunki odzysku na powierzchni ziemi przynoszące korzyści dla rolnictwa lub poprawę stanu środowiska i określa rodzaje odpadów dopuszczonych do takiego odzysku. Odpady takie jak odpady z gospodarki leśnej (02 01 07), trociny, wiórki, ścinki, drewno, niepoddane obróbce chemicznej inne niż wymienione 03 01 04 (Ex 03 01 05), odpady z kory (Ex 03 03 01) mogą zostać poddane odzyskowi **tylko na terenach leśnych, terenach zieleni miejskiej oraz z ogrodach i parkach. Odpady muszą zostać rozdrobnione, odpady z gospodarki leśnej (02 01 07) należy poddać przyspieszonemu rozkładowi części stałych przy zastosowaniu bakterii, grzybów i mikroorganizmów, niepowodującemu zagrożeń dla zdrowia i życia człowieka i niestwarzającemu zagrożenia dla środowiska. Odpady powinny zostać zastosowane tak, aby nie spowodowały pogorszenia jakości gleby, ziemi oraz wód powierzchniowych i podziemnych zgodnie z przepisami prawa o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie.**

W myśl przepisów o odzysku R10 (Dz. U. 2015, poz. 132), posiadacz odpadów przed ich zastosowaniem dysponuje wynikami badań potwierdzającymi jakość odpadów i jakość gleb, na których odpady mają być stosowane. Wykonanie usługi tej przypisane jest uprawnionym podmiotom według zapisów ustawy. Odzysk R10 precyzuje także w kolejnej przywołanej grupie odpadów dopuszczonych do stosowania wymagania co do obróbki na powierzchni ziemi w przypadku kompostu nieodpowiadającego wymaganiom (nienadającego się wykorzystania), który został wytworzony z odpadów zielonych i innych bioodpadów zbieranych selektywnie. Wymagane jest m.in.. rozdrobnienie, badania zasobności gleby i oznaczenie dopuszczalnej dawki odpadu przed zastosowaniem, oznaczenie jakości odpadów i jakości gleb w laboratorium uprawnionym.

W przypadku kompostowania odpadów drzewnych ważnym elementem wspierającym rozkład materii organicznej lignocelulozowej jest celowy dodatek azotu dla polepszenia ilorazu C/N i mikroorganizmy, jak bakterie i grzyby. Kompleksowym dodatkiem w tej sytuacji wydaje się być osad ściekowy bogaty w azot, z drugiej zaś strony jako dodatek bogaty w aktywne mikroorganizmy, które powinny podlegać higienizacji.

Kompostowanie osadów ściekowych wraz z odpadami drzewnymi wydaje się dobrą drogą na odzysk obydwu strumieni odpadów z korzyścią dla środowiska naturalnego. Zastosowanie osadów ściekowych w celach ich odzysku regulują przepisy ustawy o odpadach (tekst opublikowany wg Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 7 lipca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o odpadach). Odzysk osadów ściekowych może służyć w rolnictwie, do uprawy wszystkich płodów rolnych wprowadzanych do obrotu handlowego, w tym do upraw przeznaczanych do produkcji pasz, do upraw roślin przeznaczonych do produkcji kompostu, do upraw roślin nieprzeznaczonych do spożycia i do produkcji pasz, a także do rekultywacji terenów, w tym gruntów na cele rolne. Dokładnie zostały określone wymagania dotyczące stosowania, przekazywania oraz obowiązki spoczywające na wytwórcy i władającego powierzchnią ziemi, na której mają być stosowane komunalne osady ściekowe. Stosowanie komunalnych osadów ściekowych jest możliwe po uprzednim ich ustabilizowaniu oraz przygotowaniu, na przykład poprzez poddanie ich obróbce biologicznej, chemicznej, termicznej lub innemu procesowi higienizacji. Przed użyciem osadów ściekowych bada się zarówno osady, jak i grunty na których osady te mają być zastosowane.

Dodatkowym argumentem przemawiającym za zastosowaniem kompostów w kontekście zagadnień dotyczących wykorzystywania kompostów w celach przyrodniczych, są regulacje związane z aspektami ochrony torfowisk jako zasobów wyczerpywalnych i ochrony bioróżnorodności. Poszukuje się sposobów na ochronę torfowisk, aby zapobiegać wyczerpywaniu zasobów torfu jako znaczącego czynnika biorącego udział w sekwestracji węgla, wpływającego na utrzymywanie zasobów wody (Ochrona naszych cennych torfowisk - Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej). W związku z tym wzrasta zainteresowanie substytutami torfu w ogrodnictwie i szkółkarstwie. Znaczenia nabierają surowce pochodzenia naturalnego jak słoma, kompost z odpadów rolniczych, włókno kokosowe (Zawadzińska i in., 2021; Zawadzińska i in., 2022).

3. Materiały i metody badawcze

Cele i hipotezy badawcze

Celem użytkowym pracy jest opracowanie efektywnej technologii wytwarzania biokompostów z odpadów zanieczyszczonych przez wybrane substancje niebezpieczne o działaniu toksycznym, z zastosowaniem szczepionki biologicznej zawierającej grzyby rozkładu białego drewna.

Celem poznawczym było zdobycie nowej wiedzy i dostarczenie know-how w zakresie procesu kompostowania, opracowania szczepionki grzybowej i doboru składników oraz grzybów do inokulacji, a także uzyskanie kompostów o obniżonej zawartości wybranych substancji o działaniu toksycznym i dalej uzyskanie kompostów spełniających wymagania przepisów nawozowych.

Postawiono następujące hipotezy badawcze:

1. Odpady drzewne zawierające substancje niebezpieczne, jak pentachlorofenol (PCP), lindan, związki z grupy WWA, można skutecznie zagospodarować w procesie kompostowania przy użyciu szczepionki biologicznej zawierającej grzyby rozkładu białego drewna.
2. Istnieje możliwość zastosowania szczepionki grzybowej w procesie kompostowania w celu obniżenia stężeń substancji niepożądanych w odpadach drzewnych.

3.1 Metodologia badań

Prowadzone prace można podzielić na zasadnicze 3 etapy badawcze (Ryc.13). W pierwszym etapie przeprowadzono dobór parametrów kompostowania dla odpadów drzewnych z uwzględnieniem doboru zanieczyszczeń środkami niebezpiecznymi pochodzącymi z odpadów drzewnych. W założeniach doświadczeń modelowych wzięto także pod uwagę dotychczasowe know-how przedsiębiorstwa w zakresie kompostowania odpadów drzewnych. Wytypowano do badań metodę kompostowania i składniki masy kompostowej. Zgodnie z aktualną wiedzą przedsiębiorstwa i w oparciu o najnowsze doniesienia literaturowe przystąpiono do opracowania metodyki przygotowania szczepionki grzybowej ciekłej zawierającej szczepy grzybów wspomagających degradację ksenobiotyków, które mogą występować w odpadach drzewnych.

Przeprowadzono modelowe doświadczenia w reaktorach z wymuszonym obiegiem powietrza i z oprzyrządowaniem koniecznym do kontrolowania przebiegu procesu kompostowania (temperatura, przepływ powietrza). W trakcie trwania procesu kompostowania wprowadzono wybrane dodatki do reaktorów celem sprawdzenia doboru parametrów technologicznych i ich stabilności ze względu na obecność czynników wpływu. Jako czynniki wpływające na proces kompostowania uwzględniono dodatek dedykowanej szczepionki grzybowej w postaci ciekłej oraz zanieczyszczenia (PCP, lindan, WWA) dodane w postaci ciekłej do odpadów drzewnych. W trakcie badań modelowych rejestrowano warunki procesu w identycznych reaktorach w tym samym czasie. Po obniżeniu temperatury (po pierwszej fazie kompostowania), masę kompostową wymieszano i jednocześnie dodano do reaktorów dodatek szczepionki grzybowej (Tabela 5). Jeden kompost I pozostawiono bez dodatku inokulum jako reaktor kontrolny (bez żadnych dodatków). W ramach prowadzonego etapu pierwszego wykonano próbkowanie masy kompostowej do oznaczenia właściwości chemicznych i mikrobiologicznych. Harmonogram pobierania zależał od przebiegu temperatury w trakcie procesu kompostowania, próbki pobrano z wszystkich reaktorów po 9, 15, 28 i 66 dniu od zapoczątkowania procesu kompostowania. Dodatkowo do oznaczeń parametrów początkowych chemicznych i mikrobiologicznych pobrano także surowce wejściowe.

W kolejnym etapie po zakończeniu procesu kompostowania oznaczono parametry wszystkich pobranych próbek pod względem zawartości zanieczyszczeń i właściwości

mikrobiologicznych. Komposty po okresie dojrzewania scharakteryzowano pod względem podstawowych właściwości nawozowych.

Uzyskane komposty posłużyły do przygotowania podłoży ogrodniczych oraz do uprawy rośliny ozdobnej (jastruń wielki *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'). Testowane podłoża ogrodnicze przed i po uprawie zbadano pod względem zawartości makroskładników, zasolenia, odczynu pH i ciężaru objętościowego (Ryc. 13).



Ryc. 13. Metodologia pracy z uwzględnieniem poszczególnych etapów i badań

3.1.1. Opis procesu kompostowania odpadów drzewnych

Celem przeprowadzania kontrolowanego procesu kompostowania do badań wykorzystano: świeże osady ściekowe pobrane z oczyszczalni ścieków w Szamotułach bezpośrednio przed rozpoczęciem doświadczenia kompostowania, słomę jęczmienną z Gospodarstwa Przybroda (UP Poznań), a także drewno sosnowe rozdrobnione do postaci wiórów. Wióry użyte do badań wariantów ze skażeniem zostało poddano uprzednio zanieczyszczeniu specjalnie przygotowanymi roztworami podczas procesu sztucznego zanieczyszczenia. Drewno potraktowano roztworami wybranych substancji rozcieńczonych w metanolu jako rozpuszczalniku (Pentachlorofenol, czystość 97,9% GC, producent SUPELCO; Lindan (czystość 98%, producent Sigma-Aldrich; Mieszanina wyselekcjonowanych związków WWA (czystość 98% GC, producent Sigma-Aldrich).

Zważoną ilość poszczególnych substancji rozpuszczono oddzielnie w metanolu (250 ml). Całkowita ilość roztworu zawierającego każdą substancję została rozpylona na drewno tuż przed procesem kompostowania. Natryskiwanie substancji na drewno odbywało się jednocześnie z dokładnym mieszaniem drewna w celu zapewnienia równomiernego rozprowadzenia substancji w próbce drewna. Sztucznie zanieczyszczone drewno pobrano w celu zbadania zawartości substancji w celu określenia wartości początkowej, a metodykę oznaczeń substancji zanieczyszczających podano w punkcie dotyczącym badań chemicznych.

W testach kontrolnych użyto czystego (identycznego) drewna bez substancji zanieczyszczających. Ze względu na wieloaspektowe badania i znaczącą ilość próbek i ich wariantów zastosowano podwójne oznaczenia w tabelach. Oznakowanie próbek i czynniki różniące zawarto w Tabeli 5. Kontrolne próbki kompostu stanowiły próbki bez dodanej szczepionki grzybowej płynnej (Kompost I - Kontrola 1), jak i z inokulum (Kompost II - Kontrola 2) (Tabela 5). Równoważne 5 powtórzeń masy kompostowej przygotowanej z osadów ściekowych, słomy i drewna przygotowano w następujących proporcjach (Tabela 5). Składniki połączono ze sobą w pojemniku roboczym i po starannej homogenizacji masy kompostowej całość umieszczono w komorze reaktora. Poszczególne warianty różniły się między sobą zastosowaniem szczepionki grzybowej lub wprowadzonych sztucznie zanieczyszczeń wytypowanych związków (PCP, Lindan, związki z grupy WWA) (Tabela 5).

Po pierwszym podgrzaniu masy kompostowej i ustabilizowaniu się temperatury poniżej lub około 50°C, ładunki reaktora wsypywano do naczynia roboczego w celu wymieszania całej masy, zważenia. Inokulum zawierające grzyby dodano do masy Kompostu II (Kontrola 2) i do masy w reaktorach ze sztucznie zanieczyszczonym drewnem (Tabela 5). Reaktory zostały ponownie zamknięte w celu dalszych obserwacji temperatury wewnątrz. Po ustabilizowaniu się temperatury w temperaturze pokojowej pobrano kompost, odcieki i kondensat do badań (ich ilość określono w celu zbilansowania procesu kompostowania).

Po okresie kompostowania w zamkniętych reaktorach komposty przeniesiono na otwarte tace i umieszczono w zacienionym miejscu w celu dojrzwania (na okres 1 miesiąca). Po tym okresie zbierano kompost do dalszych badań fizykochemicznych i biologicznych. Część kompostu przeznaczona była także do testowania z roślinami ozdobnymi (Ryc. 13).

Tabela 5. Składniki masy kompostowej w eksperymentach

Składnik	Udział składnika w masie	Kompost I	Kompost II	Kompost III	Kompost IV	Kompost V
	%	Kontrola 1	Kontrola 2	Kompost 1	Kompost 2	Kompost 3
		bez inokulum	z inokulum	PCP	Lindan	WWA
osad ściekowy	76	+	+	+	+	+
drewno	20	+	+	+	+	+
słoma	4	+	+	+	+	+
inokulum (po pierwszym mieszaniu)	440 ml homogenizatu		+	+	+	+
PCP				+		
Lindan					+	
WWA						+

3.1.2. Etapy przygotowania szczepionki grzybowej i jej składniki

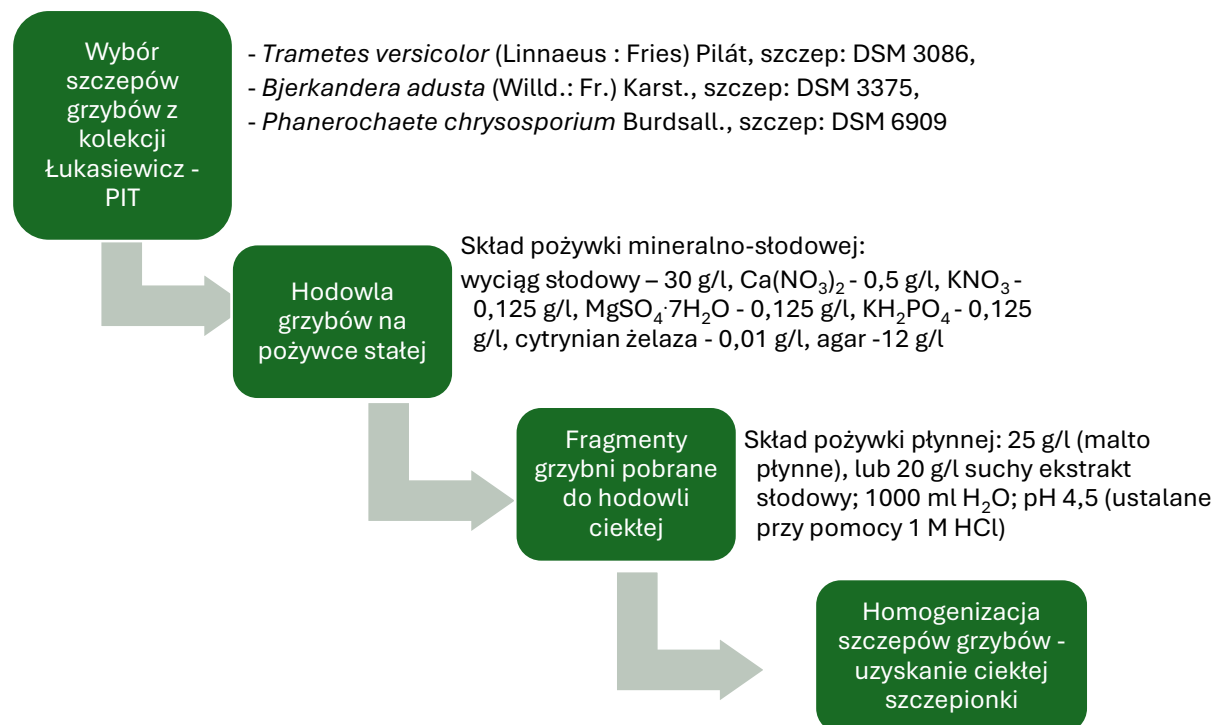
Do wytworzenia szczepionki grzybowej do zastosowania w procesie kompostowania wytypowano trzy grzyby rozkładu białego. Do doświadczenia wybrano szczepy grzybów białej zgnilizny pochodzące z kolekcji Łukasiewicz – Poznańskiego Instytutu Technologicznego:

- a) *Bjerkandera adusta* (Willd.: Fr.) Karst. - szczep: DSM 3375,
- b) *Trametes versicolor* (Linnaeus : Fries) Pilát - szczep: DSM 3086,
- c) *Phanerochaete chrysosporium* Burdsall. - szczep: DSM 6909.

Poszczególne etapy wytwarzania szczepionki grzybowej ilustruje schemat na ryc.14. W pierwszym etapie grzyby hodowano na podłożu mineralno-słodowym przez 14 dni (inkubacja w temp. 26±1°C). Następnie zebrano fragmenty grzybów (4 inokula o wymiarach 5 mm x 5 mm) i zawieszono je w płynnym podłożu (25 g/l płynu słodowego lub

20 g/l suchego ekstraktu słodowego, 1000 ml wody, pH 4,5 oznaczone 1M HCl). Kolby zawierające każdy grzyb oddzielnie przechowywano w temperaturze 25°C i wstrząsano na wytrząsarce laboratoryjnej (135 obr./min) (Ryc. 1).

Materiał grzybowy po 7 dniach wraz z płynną pożywką homogenizowano i zmieszano w celu uzyskania inokulum do inokulacji odpadów w procesie kompostowania. Uzyskaną ilość homogenizowanego inokulum dodano do masy kompostowej po okresie jej pierwszego podgrzania (Faza 1 procesu kompostowania). Opóźniona addycja miała na celu ochronę szczepu inokulum przed wysoką temperaturą, która w początkowym okresie dochodziła nawet do ponad 60°C w reaktorach kontrolnych.



Ryc. 14. Etapy wytwarzania szczepionki grzybowej

3.1.3. Badania podstawowych składników chemicznych odpadów drzewnych i kompostów

W rozdrobnionych powietrzno-suchych próbkach gotowych kompostów uzyskanych po procesie kompostowania oznaczono zawartość podstawowych składników lignocelulozowych. Oznaczono ligninę nierozpuszczalną w 72% kwasie siarkowym (metoda Tappi T 222) oraz zawartość ligniny rozpuszczalnej w 72% kwasie siarkowym spektrofotometrycznie przy długości fali UV 205 nm. Zawartość celulozy oznaczono metodą Seiferta (Browning, 1967). Zbadano zawartość rozpuszczalnych w 1% procentowym roztworze NaOH co stanowi głównie zawartość hemiceluloz (T 212). Oznaczono także substancje rozpuszczalne w zimnej i gorącej wodzie (T 207), ekstrahowane w etanolu (T 204). Badania zawartości składników lignocelulozowych wykonano także dla trocin sosnowych nieskażonych pobranych przed rozpoczęciem eksperymentu. Analizę zawartości substancji mineralnych wykonano w piecu muflowym w temperaturze 575±25°C (3 godziny). Zbadano wartość pH metodą Graya (1 g próbki zmieszano z 5 ml wody destylowanej, odczyn pH zmierzono po 20 minutach).

3.1.4. Metodyka oznaczenia zanieczyszczeń (PCP, Lindan, WWA) w odpadach drzewnych i kompostach

W odpadach drewna sztucznie zanieczyszczonego oraz w próbkach kompostów pobieranych w czasie prowadzonego procesu kompostowania oznaczono zawartość związków organicznych zanieczyszczających (pentachlorofenol, lindan, WWA).

Metoda oznaczania PCP i lindanu

Oznaczenie pentachlorofenolu i lindanu wykonano w oparciu o metodę opisaną w dokumencie CEN/TR 14823:2003. Próbki po kondycjonowaniu i wysuszeniu do stanu powietrzno-suchego rozdrobniono, a następnie wyekstrahowano metanolem (50 ml), a następnie ekstrakt poddano derywatywacji do lotnych pochodnych z użyciem bezwodnika octowego w obecności węgla potasu. Kolejno zastosowano ekstrakcję n-heksanem (czda). Gotowy ekstrakt analizowano z użyciem chromatografii gazowej i detektora wychwytu elektronów (ECD). Kalibrację wykonano stosując te same etapy ekstrakcji i acetylacji dla roztworów substancji wzorcowych pentachlorofenolu i lindanu (gamma-

heksachlorocykloheksan) oraz tribromofenolu, który był w metodzie stosowany jako wzorzec wewnętrzny (ISTD). Warunki metodyczne ekstrakcji i parametry metody chromatograficznej zostały zastosowane zgodnie z CEN/TR 14823:2003.

Metoda oznaczania sumy związków z grupy WWA

Próbki (10 g) ekstrahowano metodą Soxhleta przez 4 godziny z toluenem (p.d.a., Honeywell). Ekstrakty zagęszczono do 5 ml na wyparce obrotowej. Ekstrakty analizowano za pomocą systemu analitycznego Thermo Scientific HPLC Ultimate 3000 wyposażonego w pompę Model DGP-3600RS, odgazowywacz liniowy, autosampler Model WPS-3000TRS oraz detektor fluorescencji Model FLD-3400RS 2 PMT. Dane chromatograficzne uzyskano przy użyciu systemu zarządzania chromatografią Chromeleon (Dionex). Do rozdzielania substancji WWA użyto kolumny Hypersil Green WWA (wielkość cząstek 5 µm), średnica wewnętrzna 150 x 4,6 mm. Podczas elucji utrzymywano temperaturę 32°C i natężenie przepływu 1,2 ml min⁻¹. Faza ruchoma składała się z wody jako rozpuszczalnika A i metanolu jako rozpuszczalnika B (metanol Chromasolv do HPLC). Program elucji gradientowej rozpoczął się od 60% B, zwiększając się do 100% B przez 8 minut i pozostając na poziomie 100% B przez 13 minut, zmniejszając się z powrotem do 60% B w ciągu 2 minut i utrzymując się na poziomie 60% B przez 4,5 minuty, aby zrównoważyć kolumnę. Do wykrywania różnych WWA przy optymalnych długościach fal wzbudzenia/emisji (335/440 nm; 315/405 nm; 330/420 nm; 375/460 nm; 345/420 nm; 300/500 nm). Analizę ilościową 16 WWA przeprowadzono przy użyciu zewnętrznej kalibracji z użyciem referencyjnego roztworu wzorcowego w odpowiednich rozcieńczeniach (Wzorzec 16 składników, po 2000 µg/ml w dichlorometanie/benzenie (1:1) CRM, CPAchem LTD).

3.1.5. Metodyka oznaczeń mikrobiologicznych

Do badań mikrobiologicznych celem oznaczenia całkowitej liczby bakterii, liczby bakterii *Enterobacteriaceae*, liczby pleśni, pobrano próbki kompostów po zmieszaniu składników (dzień 0), w czasie trwania eksperymentu (w dniach 9, 15, 28), a także po zakończeniu dojrzwania kompostów.

Do badań genetycznych pobrano zarówno próbki materiałów wejściowych (osad, słoma, odpady drzewne bez zanieczyszczenia chemicznego), jak i próbki kompostów po kolejnym etapie kompostowania.

Metoda oznaczania całkowitej liczby bakterii

Aby określić całkowitą liczbę bakterii (TBC). Zostały one rozdrobnione i zaryzowane. Masa pojedynczej próbki do analizy wynosiła 10 g. Początkowo 10 g zmielonego materiału testowego z każdego testu zawieszono w 90 ml płynu rozcieńczającego (Merck KGaA, Darmstadt, Niemcy). Następnie wykonano dziesięciokrotne rozcieńczenia z przygotowanych zawiesin w płynie rozcieńczającym. Inokulacje wykonywano do 20 minut od przygotowania roztworów. W tym celu 1 ml zawiesiny z dwóch rozcieńczeń każdej próbki przeniesiono najpierw sterylną pipetą na sterylne szalki Petriego (po dwie na każde rozcieńczenie), a następnie zalano je 15 ml pożywki agarowej (agar odżywczy BTL, Merck KGaA, Darmstadt, Niemcy) w temperaturze 45°C. Tak przygotowane płytki inkubowano w warunkach tlenowych, umieszczono płasko w inkubatorze w temperaturze $30 \pm 1^\circ\text{C}$ przez 72 godziny. Wynik podano w jednostkach tworzących kolonie na 1 g badanego materiału (jtk/g).

Metoda oznaczania liczby *Enterobacteriaceae*

Ocenę liczby bakterii *Enterobacteriaceae* na 1 g próbki przeprowadzono zgodnie z procedurą badawczą, metodą standardowej płytki rozcieńczania. Zastosowano podłoże selektywne VRBG agar. Płytki inkubowano w temperaturze $37 \pm 1^\circ\text{C}$ przez 24 ± 2 h. Wynik podano w jednostkach tworzących kolonie na 1 g badanego materiału (jtk/g).

Metoda oznaczania liczby pleśni

Ocenę ilości pleśni na 1g próbki przeprowadzono zgodnie z procedurą badawczą z zastosowaniem standardowej metody płytki rozcieńczania dziesiętnego. Zastosowano metodę rozcieńczoną: 1 g próbki umieszczono w 10 ml sterylnej wody destylowanej i mieszano z mieszadłem magnetycznym przez 2 min. Następnie 1 ml zawiesiny przenoszono na pożywkę z agarem ziemniaczano-dekstrozowym (BTL, Łódź, Polska) na szalkach Petriego i rozprowadzano na powierzchni podłoża za pomocą sterylnego patyczka szklanego. Szalki Petriego inkubowano w temperaturze $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ przez 7 dni. Wynik podano w jednostkach tworzących kolonie na 1 g badanego materiału (jtk/g).

Analiza stężenia ergosterolu

Do analizy pobrano próby o masie ok. 10 g, z których po rozdrobnieniu do dalszych analiz pobrane zostały próbki o masie 0,1 g. Próbki umieszczono w zakręcanych probówkach do kultur o pojemności 17 cm^3 , w których przeprowadzono ekstrakcję ergosterolu z jednoczesnym zmydleniem. Procesy te przebiegały pod wpływem promieniowania mikrofalowego. W tym celu do probówek dodano metanol (2 cm^3) oraz 2 molowy wodny roztwór wodorotlenku sodu ($0,5\text{ cm}^3$). Szczelnie zamknięte probówki do kultur dla bezpieczeństwa umieszczono w plastikowych butelkach, które z kolei umieszczono w kuchence mikrofalowej (Whirlpool model AVM 401/1/WH, 2450 MHz, 900W). Próby poddano wpływowi promieniowania mikrofalowego o mocy 350W w dwóch sesjach po 20 sekund każda. Po schłodzeniu (ok. 15 min.) próby zubożniono za pomocą 1 molowego wodnego roztworu kwasu solnego (1 cm^3). Następnie po dodaniu 2 cm^3 metanolu przeprowadzono ekstrakcję ergosterolu za pomocą pentanu ($3 \times 4\text{ cm}^3$). Ekstrakty pentanowe zebrano i połączono w fiołce o pojemności 8 cm^3 i odparowano do sucha w strumieniu azotu. Przed analizą próbki rozpuszczono w 1 cm^3 metanolu. Analizę przeprowadzono za pomocą ultrasprawnego chromatografu cieczowego (Acquity UPLC, Waters) z absorbcyjometrycznym detektorem diodowym (Acquity PDA, Waters). Rozdział chromatograficzny odbywał się na kolumnie Acquity UPLC Shield RP 18 $1,7\text{ }\mu\text{m}$ $2,1 \times 150\text{ mm}$ w temperaturze 50°C ; jako fazę wymywającą zastosowano mieszaninę metanolu, acetonitrylu i wody w stosunku 85:10:5 (v/v) przy przepływie $0,5\text{ ml/min}$. Pomiar stężenia ergosterolu prowadzono przy długości fali $\lambda = 282\text{ nm}$. Identyfikacja związku odbywała się na podstawie porównania czasu retencji badanego piku z czasem retencji standardu.

3.1.6. Metodyka oznaczeń genetycznych

W próbkach surowców wejściowych (osad, słoma, odpady drzewne) i próbkach kompostów pobieranych w trakcie procesu kompostowania oznaczono jakościowo szczepy bakterii, grzybów i promieniowców.

Izolacja mikrobiologiczna

Grzyby i bakterie wyizolowano z zawiesiny uzyskanej przez dodanie 10 g świeżego materiału do 90 ml sterylnego roztworu soli fizjologicznej (0,9% NaCl w wodzie destylowanej). Zawiesinę wytrząsano (150 obr./min) w temperaturze pokojowej przez 30 min. Następnie wykonano metodę 10-krotnych rozcieńczeń seryjnych i 100 µl alikwotów każdego rozcieńczenia rozprowadzono w pięciu powtórzeniach na płytkach z podłożem PDA. Grzyby i bakterie pozostawiono do wzrostu przez odpowiednio 72 i 24 godziny w temperaturze 30°C± 1°C. Wszystkie zidentyfikowane mikroorganizmy wyizolowano i utrzymywano w tych samych warunkach jak powyżej, regularnie przenosząc na świeży agar.

Identyfikacja molekularna izolatów

Sekwencję regionów ITS i 16S wykorzystano odpowiednio do identyfikacji grzybów i bakterii. W przypadku grzybów, genomowe DNA wyekstrahowano z czystych kultur mikrobiologicznych, używając zestawu „NucleoSpin Plant II” (Macherey Nagel GmbH & Co. Düren, Niemcy), zgodnie z instrukcją producenta. W przypadku bakterii, amplifikację przeprowadzono bezpośrednio poprzez usunięcie pojedynczych kolonii. Reakcję amplifikacji przeprowadzono z użyciem starterów ITS1 (5'TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3')/ITS4 (5' -TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') dla grzybów oraz starterów genu 16s rRNA 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') i 1492R (5'-TACGGYTACCTTGTTACGACTT-3') dla bakterii. Na każdym etapie stosowano kontrole negatywne.

Mieszanina reakcyjna PCR składała się z 12,5 µl mieszanki GoTaq® Hot Start Master Mix (Promega, Madison, WI, USA), 1 µl na każdy starter, 1 µl albuminy surowicy bydlęcej (ThermoFisher Scientific, Waltham, MA, USA) oraz 1 µl matrycy, co dało całkowitą objętość 25 µl. W przypadku izolatów bakteryjnych nie dodawano mikrolitrów matrycy, ponieważ nie przeprowadzono ekstrakcji DNA. Obecność amplikonów określono poprzez elektroforezę w żelu z 1% agarozą i uwidoczniono poprzez barwienie barwnikiem

Gel Red (Biotium). Amplikony oczyszczono za pomocą zestawu NucleoSpin Gel and PCR Clean-up Reagent (Macherey–Nagel; Düren, Niemcy), zgodnie ze specyfikacją producenta, a następnie oznaczono ilościowo za pomocą testu „Quant-it Assays” (Invitrogen, Eugene, Oregon, USA). Odpowiednio przygotowane próbki wysłano do Eurofins Genomics (Luksemburg; <http://www.eurofins.com>) w celu sekwencjonowania metodą Sangera. Uzyskane sekwencje przeanalizowano za pomocą oprogramowania Bioedit Sequence Alignment Editor i porównano z sekwencjami znajdującymi się w bazie danych NCBI (National Center for Biotechnology Information) za pomocą funkcji NCBI Blast (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>).

Sekwencjonowanie wysokoprzepustowe

W celu analizy HTS wykonano dwa powtórzenia ekstrakcji DNA (po 0,5 g materiału) dla każdej próbki (zarówno dla grzybów, jak i bakterii). Całkowite DNA wyekstrahowano za pomocą zestawu „Nucleospin Soil” (Macherey–Nagel GmbH & Co. Düren, Niemcy) zgodnie z instrukcją producenta, a następnie połączono. Mieszanina reakcyjna PCR składała się z 12,5 µl odżywki GoTaq® Hot Start Master Mix (Promega, Madison, WI, USA), 1 µl dla każdego startera, 1 µl albuminy surowicy bydlęcej (ThermoFisher Scientific, Waltham, MA, USA) oraz 1 µl matrycy, co dało całkowitą objętość 25 µl. Multipleksową reakcję PCR przeprowadzono z użyciem zestawu starterów z kodem kreskowym i podwójnym starterem indeksującym, celującym w regiony ITS2-5.8S-ITS2 i 16S odpowiednio dla grzybów i bakterii. Przeprowadzono dwa powtórzenia PCR, a produkty połączono. Amplikony oczyszczono za pomocą urządzenia MagJET NGS Cleanup (ThermoFisher Scientific, Waltham, MA, USA), oznaczono ilościowo za pomocą zestawu Qubit dsDNA HS i połączono w równych stężeniach do sekwencjonowania. Sekwencjonowanie parzystych końców (2 × 300 pz) przeprowadzono na sekwenatorze Illumina MiSeq firmy Fastaris (Genesupport SA, Plan-les-Ouates, Szwajcaria).

Analiza bioinformatyczna

W celu zmniejszenia liczby fałszywych przypisań i zanieczyszczeń krzyżowych, a także przeprowadzenia filtracji jakościowej, przycinania, scalania, grupowania jednostek OTU i ich identyfikacji, wykorzystano metodę bioinformatyczną. Do analizy metaspółeczności o składzie „ANCOM” wykorzystano program Qiime2.

3.1.7. Testowanie uzyskanych kompostów w uprawie jastrunia wielkiego (*Leucanthemum x superbum* 'Macaroon')

Komposty z reaktorów po procesie dojrzewania rozdrobniono i pobrano do dalszych badań. W laboratorium akredytowanym Stacji Chemiczno-Rolniczej w Poznaniu oznaczono właściwości odżywcze kompostów w kontekście parametrów nawozowych.

Uzyskane komposty posłużyły do przygotowania podłoży ogrodniczych, zastosowano kompost jako dodatek 25%, 50%, 75% do podłoża torfowego. Wariantem kontrolnym były rośliny uprawiane w substracie torfowym TS1 (100%).

Przygotowane w powyższy sposób podłoża ogrodnicze oraz substrat torfowy przekazano do laboratorium Stacji Chemiczno-Rolniczej w Poznaniu, w celu wykonania badań zawartości makroskładników (N, P, K, Ca, Mg, Cl), odczynu pH, oraz mikropierwiastków, ciężaru objętościowego i zasolenia.

Do doświadczeń wybrano roślinę ozdobną – bylinę Jastruń wielki (*Leucanthemum x superbum* 'Macaroon') charakteryzujący się półpełnymi białymi kwiatami, z żółtymi kwiatami rurkowatymi. Rośliny dorastają do 35 cm wysokości. Mogą być wykorzystywane do sadzenia na rabatach lub w pojemnikach. Kwitną całe lato. Wymagają stanowisk słonecznych, gleb żyznych i umiarkowanie wilgotnych (Ryc. 15).



Ryc. 15. *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon' – kwiatostan

Ukorzenione sadzonki o wysokości około 10 cm (Ryc. 16) posadzono do doniczek o średnicy 14 cm i pojemności 1 dm³, po jednej sadzonce w doniczce. Założono na każdy wariant podłoża mieszanego z udziałem kompostu i substratu torfowego po 10 doniczek.

Uprawę prowadzono przez okres 16 tygodni w nieogrzewanym tunelu foliowym. Rośliny podlewano wodą wodociągową za pomocą linii kroplujących umieszczonych w każdej doniczce.

W dniu likwidacji doświadczenia wykonano pomiary biometryczne roślin polegające na określeniu wysokości roślin [cm], średnicy kwiatów [cm], liczby kwiatów, liczby pąków. Wykonano także pomiar indeksu zazielenienia liści aparatem N-Tester firmy YARA.

Po zakończeniu uprawy roślin pobrano podłoża ogrodnicze w celu wykonania analiz chemicznych w laboratorium Stacji Chemiczno-Rolniczej w Poznaniu. Ponownie wykonano badania pod względem zawartości makroskładników (N, P, K, Ca, Mg, Cl), odczynu pH, mikropierwiastków, ciężaru objętościowego i zasolenia.



Ryc. 16. Ukorzeniona sadzonka *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'

3.1.8. Analiza statystyczna

Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej przy użyciu analizy wariancji (ANOVA) w programie Statistica 12.0 (StatSoft, Polska). Istotność różnic pomiędzy średnimi wartościami zawartości poszczególnych składników w badanych wariantach kompostu oceniano za pomocą testu Tukeya przy poziomie istotności $p = 0,05$.

4. Wyniki badań

4.1 Doświadczenia modelowe oraz właściwości masy kompostowej w reaktorach w trakcie procesu kompostowania

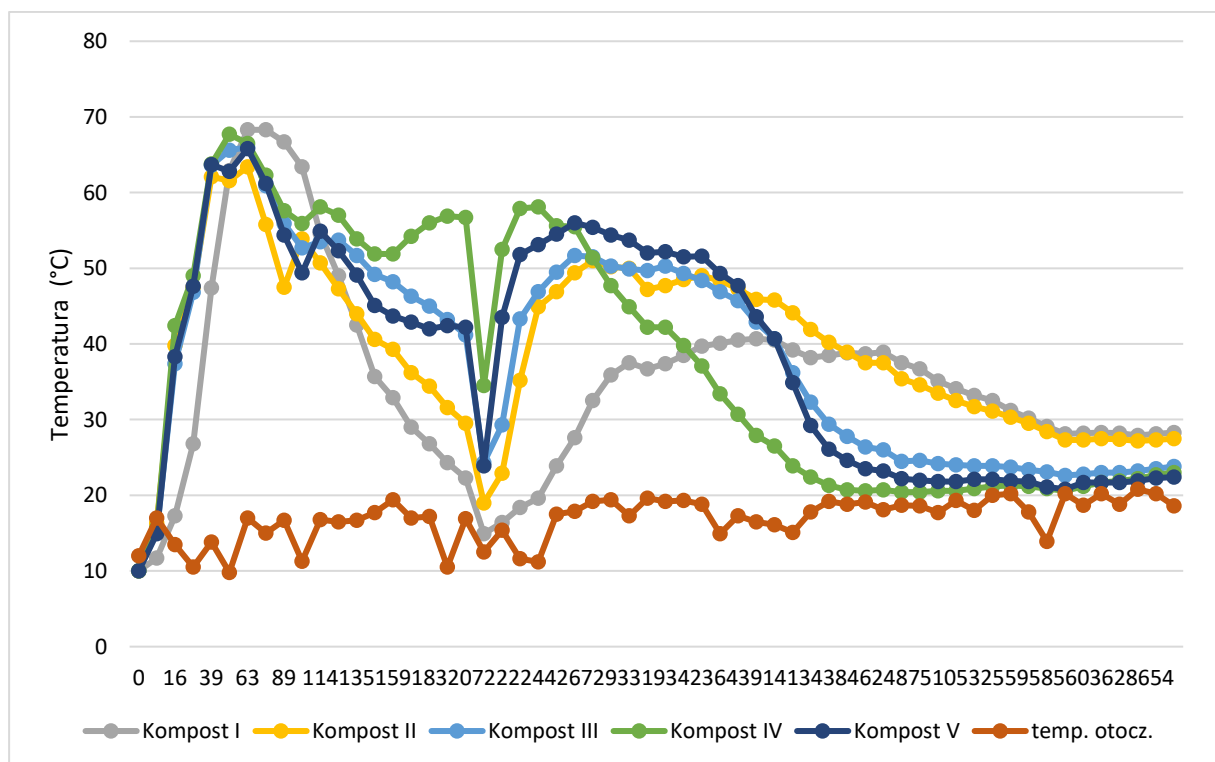
Podczas prowadzonego procesu kompostowania monitorowano warunki temperaturowe wewnątrz masy kompostowej i temperaturę otoczenia za pomocą sond temperaturowych. Zebrane dane w postaci graficznej przedstawiono na Ryc. 16. Celem zapewnienia wystarczającej ilości tlenu niezbędnego do procesu tlenowego kompostowania doprowadzono do reaktorów powietrze, a podane ilości regulowano w zależności od obserwowanych temperatur (Ryc. 17).

Zaobserwowane temperatury w I fazie kompostowania od 61,6°C do 67,7°C po 48 godzinach, od 63,4°C do 68,3°C po 63 godzinach od zapoczątkowania procesu. Tak wysokie temperatury są potwierdzeniem, że w masie kompostowej nastąpił rozkład biologiczny. Wydzielane ciepło w reaktorach i osiągnięte temperatury są właściwe dla bakterii termofilnych. Po osiągnięciu maksymalnych wartości temperatura kompostów w reaktorach zaczęła spadać. Najszybsze wychłodzenie (9 doba) zaobserwowano w reaktorach z masą kontrolną (drewno bez zanieczyszczeń). Komposty zawierające masę kompostową z drewnem zanieczyszczonym wykazywało nadal wyższą temperaturę. Celem dodatku szczepionki grzybowej do kompostów masę kompostową z reaktorów wymieszano, napowietrzono. Po dodaniu ciekłej szczepionki do kompostu II (kontrolnego nr 2) oraz do kompostów III-V, masę poszczególnych reaktorów ponownie wymieszano i umieszczono we właściwych reaktorach. Temperatura kompostów do których dodano ciekłą szczepionkę grzybową wzrosła intensywnie w krótkim czasie (około 8 godzin), najszybszy przyrost temperatur odnotowano dla mas kompostowych zawierających zanieczyszczenia. Spośród zanieczyszczeń najszybszy wzrost wystąpił w reaktorze z zanieczyszczeniem lindanem. Kompost kontrolny bez zanieczyszczeń i bez inokulacji charakteryzował się najwolniejszym tempem przyrostu temperatury, osiągnięcie temperatury bliskiej 40°C opóźniło się aż 5 dni w stosunku do masy kompostowej kontrolnej inokulowanej.

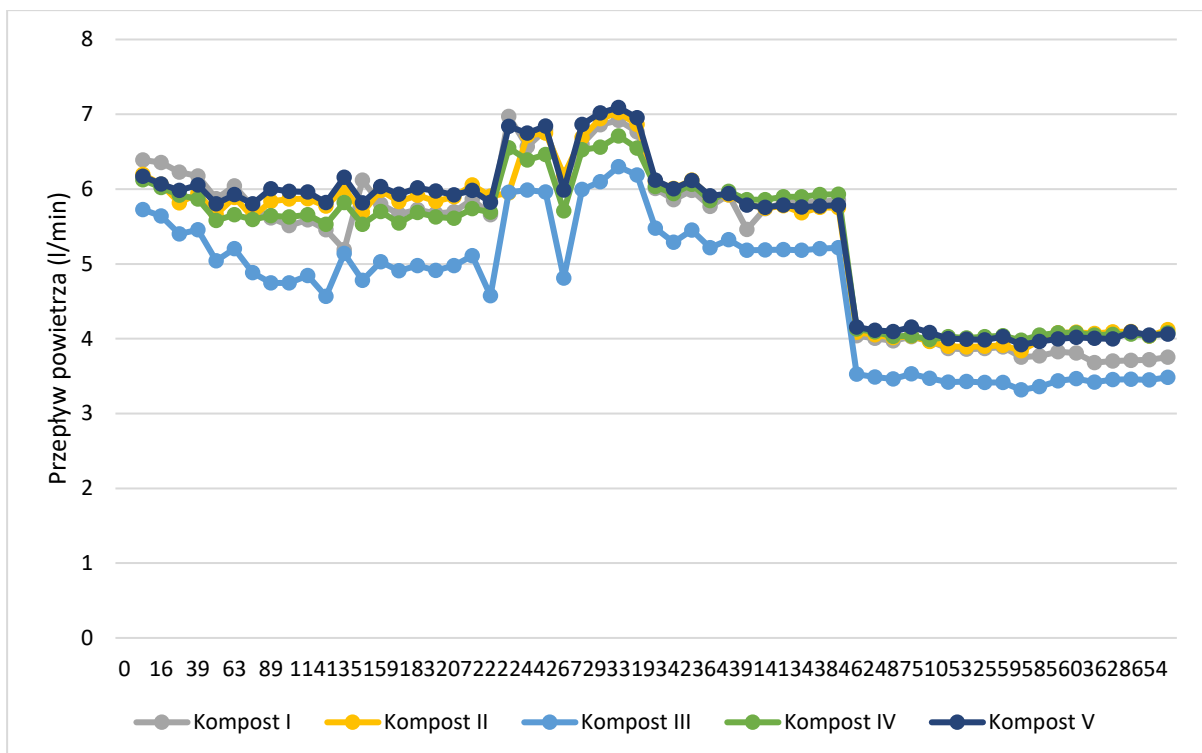
Przy zastosowaniu osadów ściekowych ważne jest osiągnięcie optymalnych warunków temperaturowych w celu zapewnienia prawidłowych warunków sanitarnych wytwarzanych kompostów. Dla prawidłowej higienizacji podczas procesu kompostowania

powinno osiągnąć się profile temperaturowe sięgające od 55°C (przez co najmniej 14 dni) do 70°C i więcej (przez co najmniej 3 dni). Podczas eksperymentu komposty zawierające zanieczyszczenia i inokulowane charakteryzowały się wyższymi wartościami temperatury, co może pozytywnie wpłynąć na ich higienizację.

Współkompostowanie odpadów drzewnych i osadów ściekowych wydaje się kompleksowym rozwiązaniem z korzyścią dla obu materiałów wsadowych, a stwarzających problemy technologiczne jakimi są niewłaściwe C/N obu strumieni odpadów. Osady ściekowe należy skorygować materiałem bogatym w węgiel (C) i materiałem strukturalnym. Zastosowanie odpadów drzewnych bogatych w węgiel jest korzystne dla stosunku C/N osadów ściekowych, a z kolei osady ściekowe bogate w azot są korzystne do zastosowania w kompostowaniu drewna ubogiego w azot. Ponadto odpady drzewne jako materiał strukturalny dla osadów ściekowych stanowią dobry materiał wspierający tworzenie przestrzeni porowatych i właściwe napowietrzenie masy kompostowej.



Ryc. 17. Profile temperaturowe obserwowane w reaktorach podczas procesu kompostowania



Ryc. 18. Przepływ powietrza w reaktorach podczas procesu kompostowania

Oznaczone wartości C/N różnią się znacznie, największe zmiany oznaczono dla kompostu kontrolnego nr 1, kompostowanego bez udziału grzybów. Wskazuje to na dużą niejednorodność próbki pobranej do oznaczenia. Natomiast pozostałe komposty z dodatkiem grzybów dodanych w 9 dniu trwania eksperymentu charakteryzują się niższym i bardziej wyrównanym stosunkiem C/N. Początkowe wartości C/N w reaktorach były oznaczone na zbliżonym poziomie od 17:1 do 25:1. Jak podają źródła literaturowe optymalny C/N na początku procesu kompostowania powinien wahać się w granicach 25:1-35:1, czyli uzyskane mieszaniny kompostowe na początku eksperymentu posiadały prawie optymalny skład dla zapoczątkowania procesu. Na zakończenie procesu kompostowania uzyskane wyniki C/N kształtowały się na poziomie od 21:1 do 33:1 w reaktorach z mieszaniną z dodatkiem szczepionki grzybowej, podczas gdy kompost kontrolny posiadał nadal posiadał wysoki stosunek C/N 61:1. Według (Jędrzak, 2007) wartości wyższe niż 50:1 mogą hamować właściwy przebieg kompostowania, czyli istnieją przesłanki, że proces kompostowania w reaktorze kontrolnym 1 uległ pewnym zmianom w porównaniu do pozostałych kompostów, skoro ta próbka dwukrotnie charakteryzowała się wysokim C/N (73:1 w 9 dniu i 61:1 po zakończeniu kompostowania).

Tabela 6. Oznaczone wartości ilorazu C/N w próbkach pobieranych podczas procesu kompostowania

Dzień procesu	Kompost I	Kompost II	Kompost III	Kompost IV	Kompost V
	Kontrola 1	Kontrola 2 (+inokulum)	Kompost 1 (PCP)	Kompost 2 (Lindan)	Kompost 3 (WWA)
Start (0 dzień)	17	23	25	17	22
Aeracja (9 dzień)	73	38	31	42	34
Koniec (28 dzień)	16	26	25	19	24
Po dojrzewaniu	61	22	21	24	33

4.2 Właściwości chemiczne kompostu po procesie kompostowania

Zbadano właściwości chemiczne uzyskanych kompostów, jak zawartość celulozy, ligniny oraz zawartość substancji ekstrahowanych wodą, etanolem i 1% roztworem NaOH. Wyniki uzyskane dla próbek kompostów zestawiono z charakterystyką tych parametrów uzyskanych dla próbki drewna wybranego do eksperymentu (bez zanieczyszczeń).

Uzyskane komposty nie różnią się znacząco pomiędzy sobą pod względem zbadanych parametrów, co stanowi potwierdzenie, że możliwe jest utrzymanie parametrów procesu kompostowania przy zastosowaniu odpadów drewna zanieczyszczonego i przy zastosowaniu szczepionki grzybowej w celu detoksykacji niepożądanych substancji.

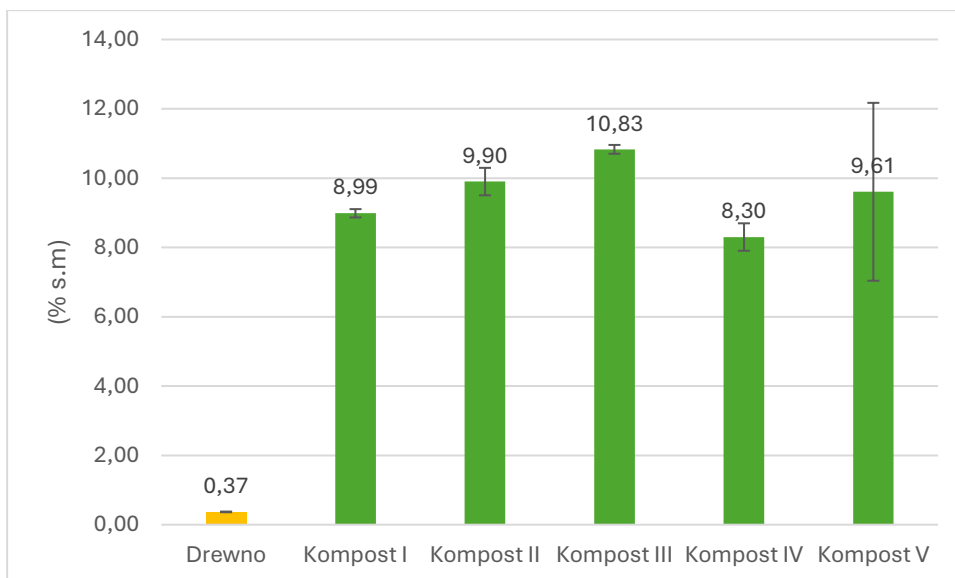
Na skutek dodanych do procesu kompostowania osadów ściekowych zmieniła się także ilość substancji mineralnych w kompostach, stwierdzono od 8,30% do 10,83% s.m. popiołu w próbkach kompostów, w drewnie oznaczona zawartość minerałów wynosiła jedynie 0,37% suchej masy próbki (Ryc. 19).

Znaczącą zmianę ilości ekstrahowanych substancji odnotowano dla substancji ekstrakcyjnych w wodzie zimnej i gorącej. Suma ekstrahowanych substancji po procesie kompostowania wynosiła od 10,97% s.m (kompost IV z lindanem) do 13,90% (kompost V WWA). Podczas gdy samo drewno zawierało tylko 3,77% sumy tych substancji (Ryc. 20).

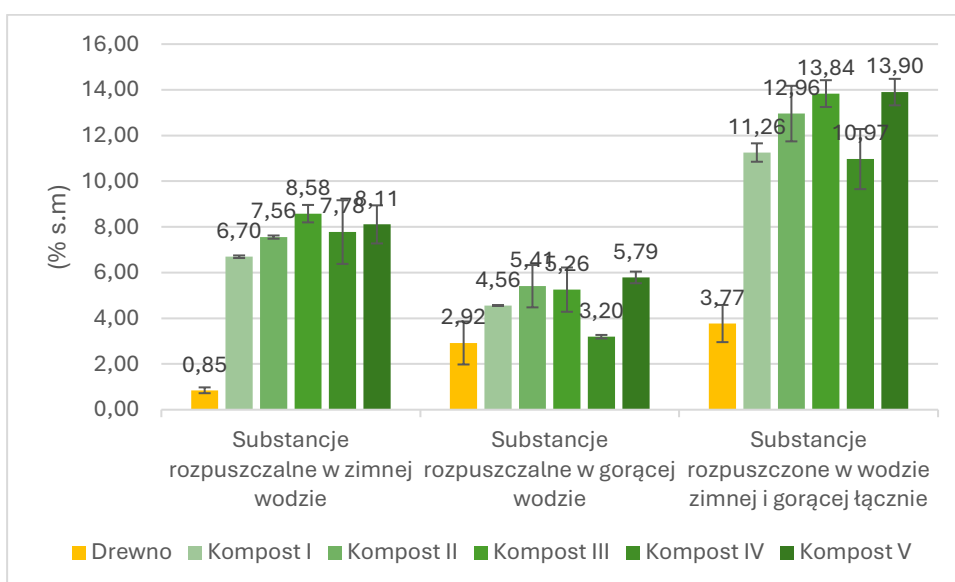
Krótkotrwały proces rozkładu z zastosowaniem szczepionki grzybowej wpłynął także znacząco na zawartość substancji ekstrahowanych w 1% roztworze wodorotlenku sodu. Z kompostów zanieczyszczonych substancjami chemicznymi wyekstrahowano 1% NaOH od 31,02% do 37,92%, podczas gdy kompost kontrolny bez użytej szczepionki zawierał tylko 27,39% substancji ekstrahowanych w 1% NaOH, a w samych odpadach drewna oznaczono przed doświadczeniem tylko 14,27% ekstraktu (Ryc.21).

Okazało się, że komposty pomimo prowadzonego procesu rozkładu w reaktorach charakteryzują się nadal wysoką zawartością celulozy od 43,15% do 46,47%, wobec 47,81% zawartości celulozy początkowej w odpadach drewna użytych do eksperymentu (Ryc. 22). Prowadzony proces kompostowania nie spowodował wysokich zmian zawartości ligniny nierozpuszczalnej (30,52% - 31,29%), podczas gdy samo drewno zawierało ligniny nierozpuszczalnej 27% (Ryc. 23). Zwiększony udział ligniny odnotowano dla ligniny rozpuszczalnej w kwasie siarkowym (stężenie - 72%), w drewnie zawartość była na poziomie 0,39% s.m., a w próbkach kompostów stwierdzono od 1,93% do 2,17% s.m. ligniny rozpuszczalnej (Ryc. 23-24).

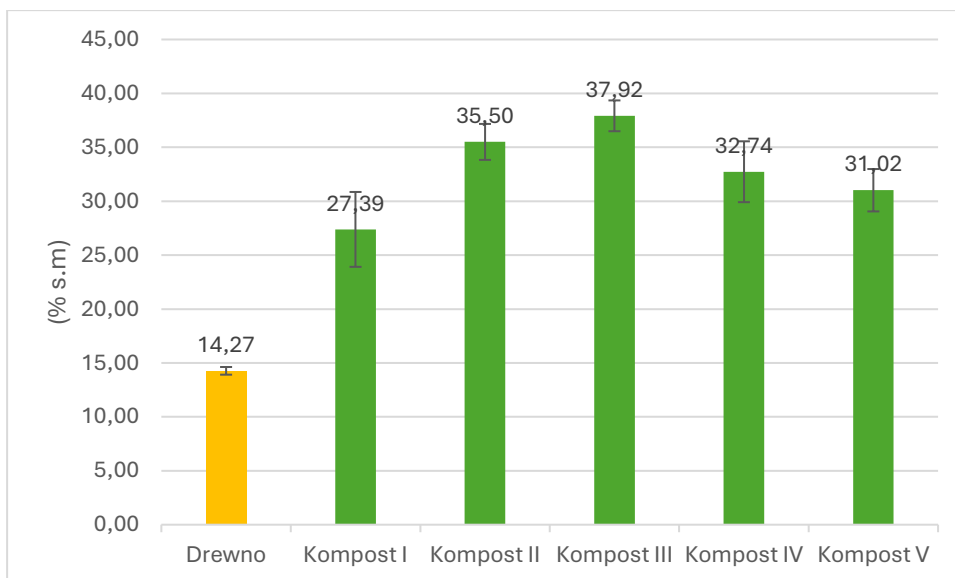
Zawartość substancji ekstrahowanych etanolem nie różniła się znacząco i mieściła się i w drewnie i w kompostach na poziomie około 3% suchej masy próbek (od 3,11% do 3,52%) (Ryc. 25).



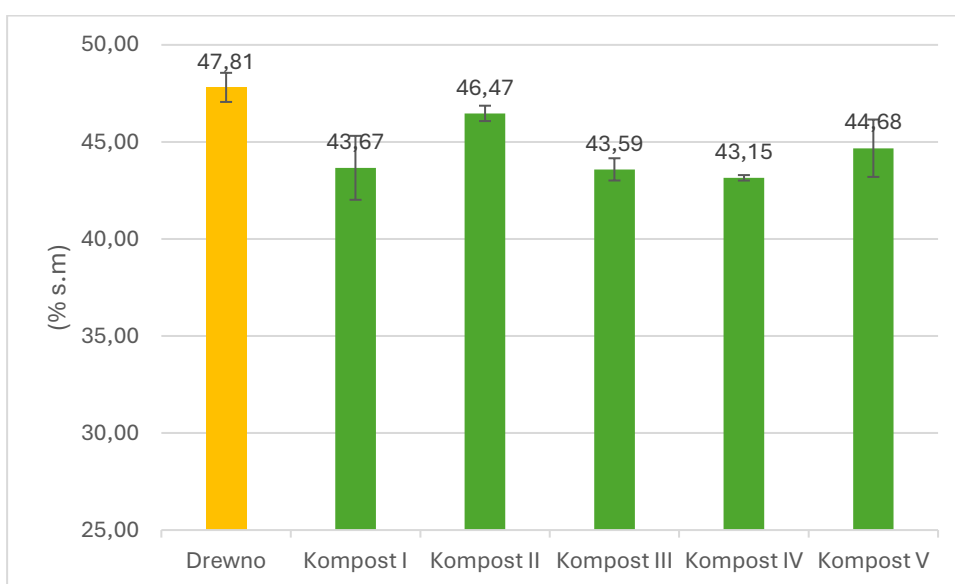
Ryc. 19. Zawartość substancji mineralnych (popiołu) w drewnie oraz w kompostach po procesie kompostowania



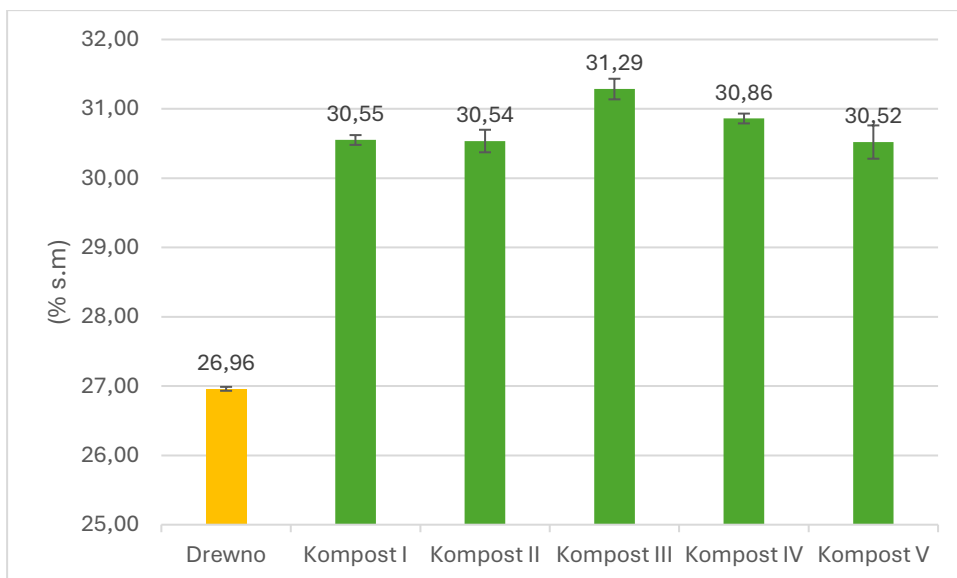
Ryc. 20. Zawartość substancji rozpuszczalnych w zimnej i w gorącej wodzie i ich suma oznaczona w próbkach drewna przed eksperymentem i w próbkach kompostu po procesie kompostowania



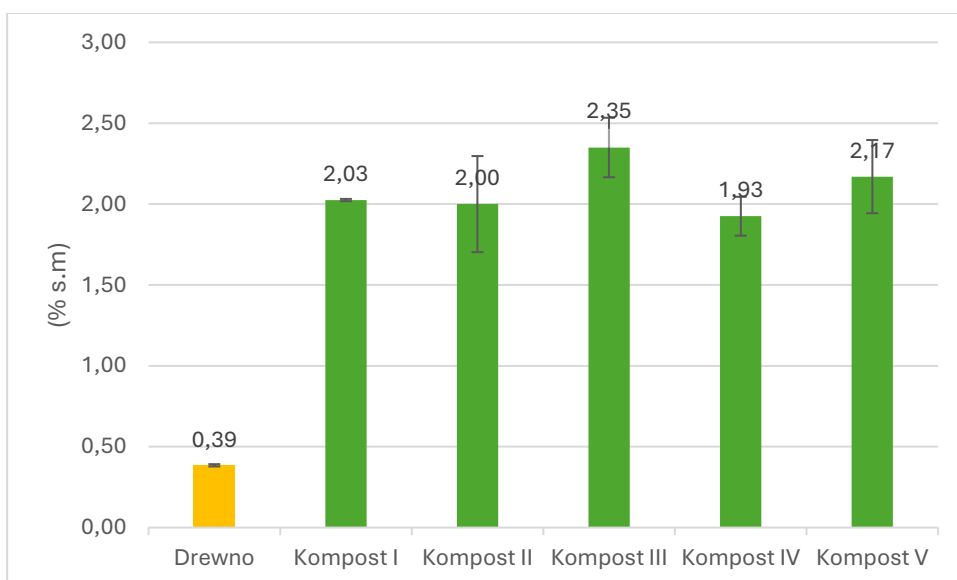
Ryc. 21. Zawartość substancji rozpuszczalnych w 1% NaOH oznaczona w w badanych próbkach (drewna i w kompostach po procesie kompostowania)



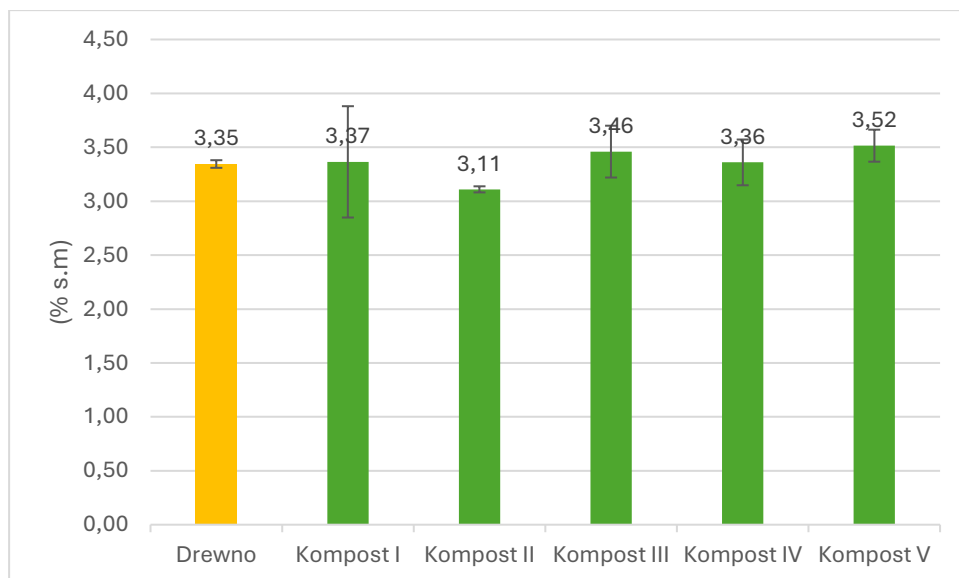
Ryc. 22. Zawartość celulozy w badanych próbkach (drewna i w kompostach po procesie kompostowania)



Ryc. 23. Zawartość ligniny nierozpuszczalnej w 72% H₂SO₄ w badanych próbkach (drewna i w kompostach po procesie kompostowania)



Ryc. 24. Zawartość ligniny rozpuszczalnej w 72% H₂SO₄ w badanych próbkach (drewna i w kompostach po procesie kompostowania)



Ryc. 25. Zawartość substancji ekstrahowanych w etanolu w badanych próbkach (drewna i w kompostach po procesie kompostowania)

4.3 Poziom zanieczyszczeń chemicznych w odpadach drzewnych i w kompostach w trakcie kompostowania

Oznaczone zawartości pentachlorofenolu, lindanu i sumy WWA przed eksperymentem i w uzyskanych kompostach potwierdziły możliwość zastosowania szczepionki grzybowej do procesu kompostowania celem obniżenia stężeń substancji niepożądanych w odpadach drzewnych. Wyniki poszczególnych oznaczeń zamieszczono dla zobrazowania skuteczności procesu i szczepionki na Ryc. 26-31.

Sztuczne zanieczyszczone drewno – stan początkowy

Drewno sosnowe przed procesem zanieczyszczenia wybranymi substancjami charakteryzowało się znikomą ilością pentachlorofenolu (1 mg/kg s.m.), obecności lindanu nie stwierdzono, a oznaczona suma związków WWA wynosiła 5,35 mg/kg s.m.

Poziom zanieczyszczeń w odpadach drzewnych „sztucznie” zanieczyszczonych pentachlorofenolem i lindanem wynosił odpowiednio 160 mg/kg s.m. i 51 mg/kg s.m. Odnotowane wartości znacząco przekraczały dopuszczalne wartości tych zanieczyszczeń w odpadach drzewnych według wytycznych, np. dla PCP - EPA (2018) - 5 mg/kg, czy Altholzverordnung V (2002) - 3 mg/kg suchej masy. Natomiast oznaczona zawartość zanieczyszczeń po zmieszaniu składników wynosiła 96 mg na kg suchej masy (PCP) oraz 34 mg/kg s.m. (lindan). Wartości te nie obniżyły się, a wyniki świadczą o tym, że stężenie zanieczyszczeń obniżyło się pozornie - ze względu na połączenie większej ilości składników masy kompostowej, w tym takich które zanieczyszczeń PCP i lindanem nie posiadały.

Zmiana stężenia zanieczyszczeń w kompostach w czasie procesu

Właściwy spadek stężenia zanieczyszczeń możemy zaobserwować dopiero w próbkach pobranych z reaktorów po upływie 9 dni od zapoczątkowania procesu kompostowania. Odnotowano spadek zawartości pentachlorofenolu do 75 mg/kg s.m., a lindanu aż do 11 mg/kg s.m. Podczas eksperymentu w 9 dniu dodano ciekłą szczepionkę grzybową do reaktorów z zanieczyszczeniami. W dalszym etapie zaobserwowano dalszy spadek zanieczyszczenia pentachlorofenolem, do 9,2 mg/kg s.m. co stanowiło aż 8-krotny spadek stężenia PCP. Oznaczone stężenie lindanu w próbce po 15 dniach eksperymentu wynosiło 7,6 mg/kg s.m. i stanowiło spadek o kolejne 30% zawartości zanieczyszczenia wobec zawartości z poprzedniego pobrania próbek. Na koniec fazy intensywnego

kompostowania w reaktorach oznaczono 14,5 mg PCP na kg suchej masy kompostu i 9,2 mg lindanu na kg suchej masy. Wartości są nieznacznie wyższe niż oznaczone po 15 dniach, co może wskazywać błąd w pobraniu próbki z reaktorów lub niejednorodność materiału wziętego do dalszych analiz instrumentalnych (Ryc. 26, 27).

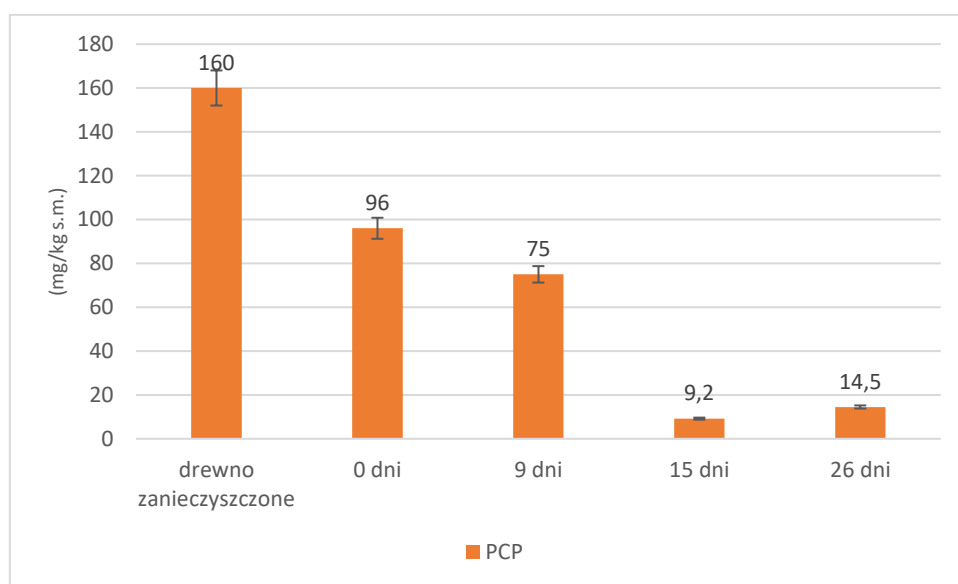
Jednakże odnotowany spadek stężenia zanieczyszczeń w porównaniu ze stężeniem początkowym jest znaczący, spadek z 96 mg/kg do 14,5 mg PCP/kg s.m. to rozkład blisko 85% początkowego zanieczyszczenia pentachlorofenolem (Ryc. 26). Obniżenie zawartości lindanu z 34 mg/kg suchej masy zmieszanego kompostu do 9,2 mg/kg stanowi o rozkładzie blisko 70% zawartości początkowej lindanu w zmieszanych składnikach (Ryc. 27).

Oznaczone stężenia poszczególnych związków WWA w czasie procesu kompostowania wykazywały się dużym zróżnicowaniem (Ryc. 28-31). W badanej próbce drewna zanieczyszczonego „sztucznie” oznaczono 189,99 mg/kg s.m. dla sumy WWA, podczas gdy próbka drewna przed procedurą zanieczyszczenia charakteryzowała się tylko 5,53 mg/kg WWA. Największe stężenie oznaczono dla fluorantenu (147,29 mg/kg), co stanowiło blisko 80% całej gamy tych związków. W zmieszanej masie kompostowej udział WWA wyniósł 94,21 mg/kg s.m., a sam fluoranten oznaczono na poziomie 75,20 mg/kg s.m.. Pozostałe substancje z grupy WWA mieściły się w granicach od ilości śladowych (0,14 mg/kg s.m. - antracen) do 12,90 mg/kg s.m. (stężenie początkowe naftalenu w odpadach zanieczyszczonych) (Ryc. 28-31).

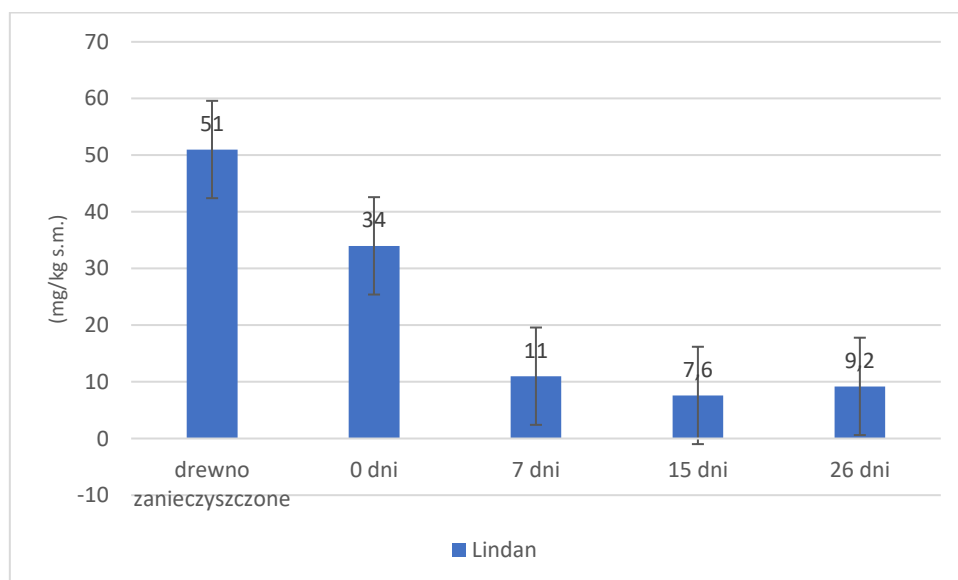
Suma WWA oznaczona w kompoście po 9 dniach od zapoczątkowania eksperymentu wynosiła 59,99 mg/kg suchej masy, a samego fluorantenu 50,45 mg/kg s.m. Po 15 dniach poziom zanieczyszczenia WWA spadł tylko do 55,89 mg/kg s.m., a fluorantenu było także nieznacznie mniej – 48,40 mg/kg s.m próbki (Ryc. 30, 31). Po 28 dniach kompostowania w kompoście oznaczono 33,14 mg sumy WWA na kg suchej masy kompostu. Fluoranten stanowił nadal znaczący udział tego zanieczyszczenia, aż 29,33 mg/kg wobec 33,14 mg sumy WWA/kg s.m. (Ryc. 30).

Na Ryc. 31 zobrazowano zmianę stężenia sumy WWA podczas procesu kompostowania. Zmiany zawartości pozostałych zanieczyszczeń z grupy WWA w próbkach kompostów pobieranych z reaktorów została przedstawiona graficznie z podziałem ze względu na poziom stężeń oznaczonych substancji (Ryc. 29-31). Zaobserwowano dla każdego związku obniżenie poziomu w stosunku do wartości początkowych w odpadach drzewnych. Niestety poziom sumy WWA nie obniżył się do śladowych ilości. Należy wziąć to pod uwagę przy dobieraniu materiałów wejściowych do procesu kompostowania i czasu trwania procesu kompostowania.

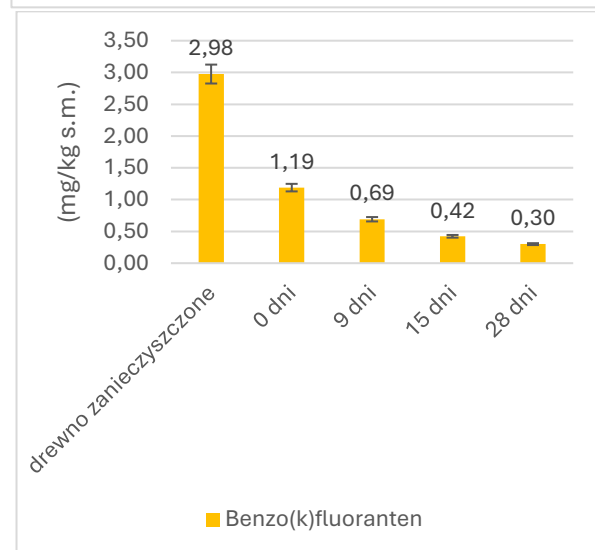
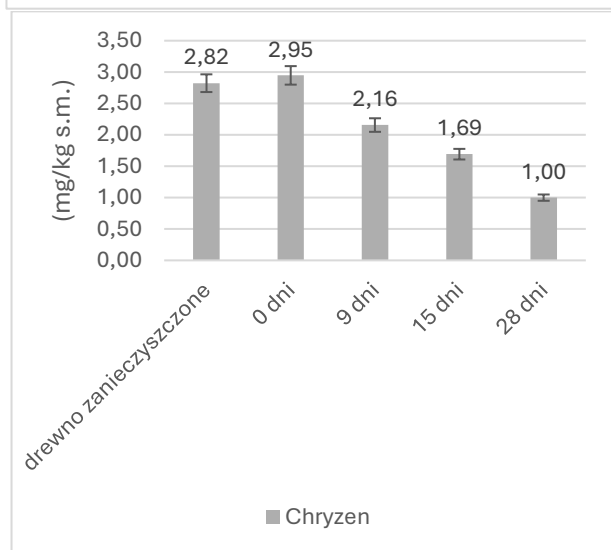
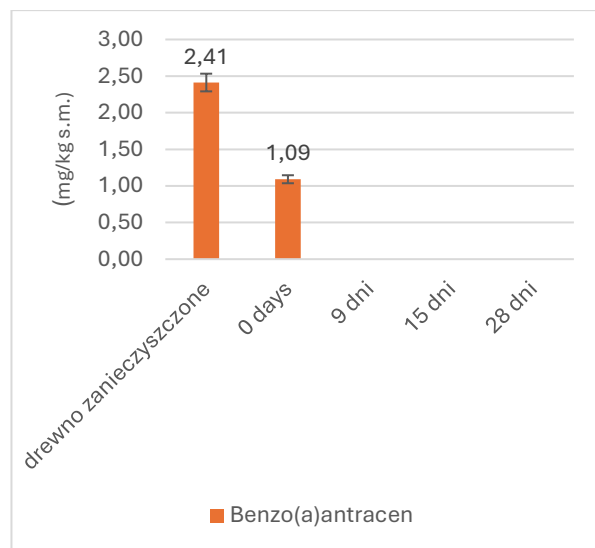
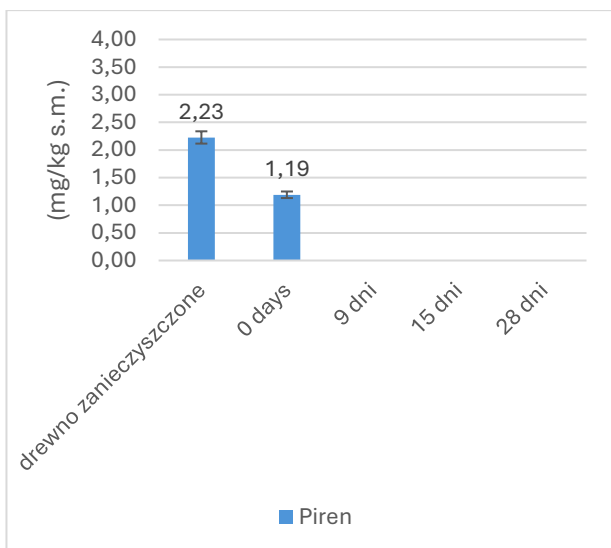
Zastosowanie szczepionki grzybowej i prowadzenie procesu kompostowania pozwoliło uzyskać znaczące obniżenie stężenia substancji zanieczyszczających wprowadzonych „sztucznie” do odpadów drewna w trakcie procesu kompostowania w dedykowanych reaktorach. Dynamikę zmian zawartości zanieczyszczeń w próbkach przedstawiono graficznie na rycinach (Ryc. 26-31).



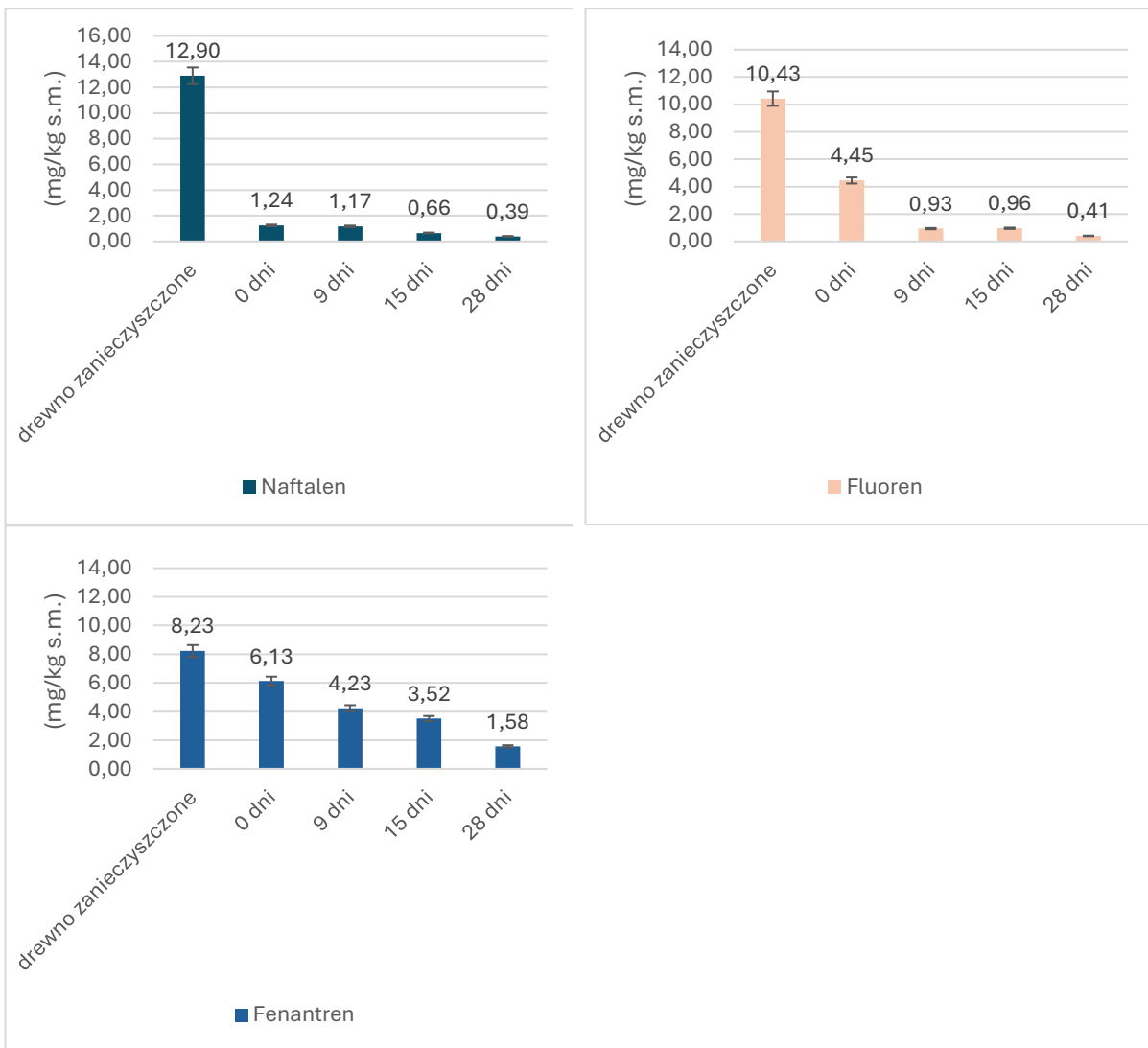
Ryc. 26. Zawartość pentachlorofenolu w badanych próbkach (drewna zanieczyszczonego i kompostów pobranych w trakcie procesu kompostowania)



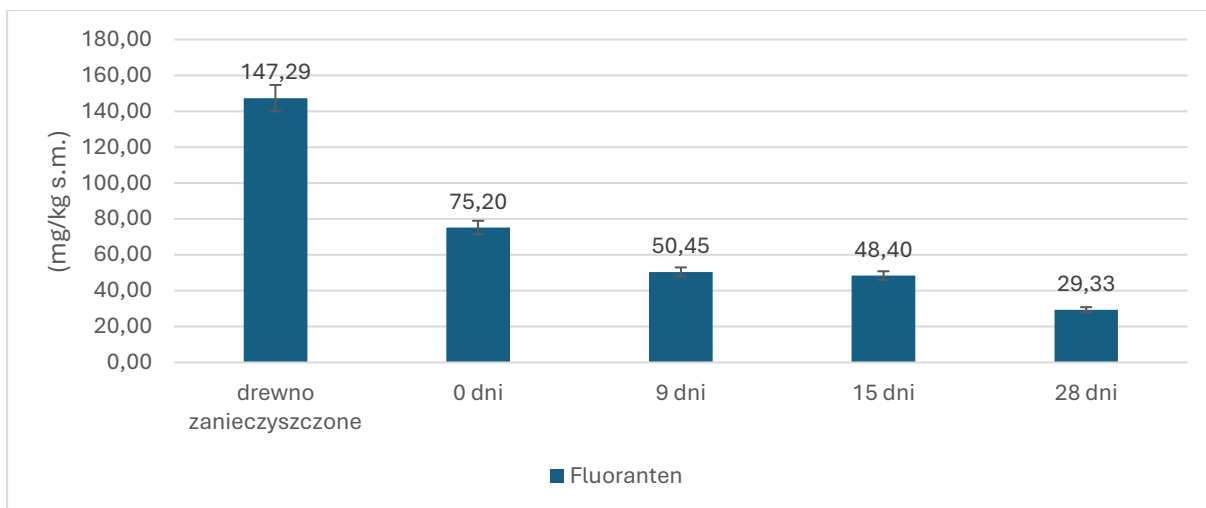
Ryc. 27. Zawartość lindanu w drewnie sztucznie zanieczyszczonym i w próbkach kompostów pobranych w trakcie procesu kompostowania



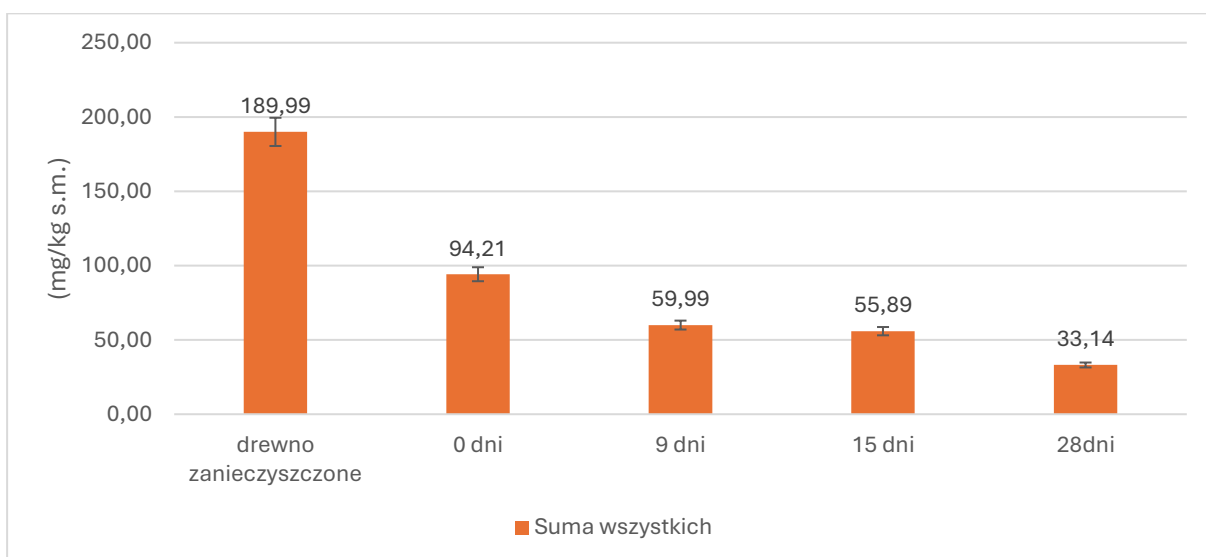
Ryc. 28. Zawartość WWA (pirenu, benzo(a)antracenu, chryzenu, benzo(k)fluorantenu) w drewnie sztucznie zanieczyszczonej i w próbkach kompostów pobranych w trakcie procesu kompostowania



Ryc. 29. Zawartość WWA (naftalenu, fluorenu, fenantrenu) w drewnie sztucznie zanieczyszczonym i w próbkach kompostów pobranych w trakcie procesu kompostowania



Ryc. 30. Zmiana stężenia fluorantenu w badanych próbkach (drewna zanieczyszczonego i kompostów pobranych w trakcie procesu kompostowania)



Ryc. 31. Suma WWA w badanych próbkach (drewna zanieczyszczonego i kompostów pobranych w trakcie procesu kompostowania)

4.4 Zmiana właściwości mikrobiologicznych i genetycznych w czasie procesu kompostowania

Zmiany mikrobiologiczne

Proces kompostowania badanych próbek wykazał znaczące zmiany w składzie mikroflory (OLB, enterobakterii, pleśni) w zależności od rodzaju zanieczyszczenia (Ryc. 32–34). Komposty (I i II, kontrolne) charakteryzowały się wyższą ogólną liczbą bakterii (OLB) oznaczoną dla próbek pobranych w trakcie procesu kompostowania, wartość ta była wyższa niż w kompostach zawierających zanieczyszczenia. Największy spadek OLB podczas kompostowania odnotowano dla próbek kompostu IV (z lindanem), a najmniejszy dla próbek kompostowanych w reaktorze I, czyli bez zanieczyszczeń i bez dodatku szczepionki grzybowej (Ryc. 32). Wartość ta dla wszystkich próbek malała wraz z dojrzewaniem kompostu, co jest typowe dla procesów stabilizacji materii organicznej.

Podobnie do liczby bakterii malała w trakcie procesu kompostowania liczba enterobakterii, odnotowano podobną zależność jak dla OLB, ilość enterobakterii malała w czasie kompostowania szybciej w kompostach z zanieczyszczeniami (Kompost III-V) niż w kompostach kontrolnych (Kompost I oraz II) (Ryc. 33).

Liczba pleśni pozostawała stabilna w przypadku kompostów I i III, natomiast dla kompostu IV (z lindanem) wykazano wzrost liczby pleśni w dniu 28 i liczba ta pozostała stabilna. W przypadku kompostów II i V liczba pleśni po 28 wzrosła znacznie i była podobna do poziomu pleśni w kompoście IV (Ryc. 34).

Analiza ergosterolu została zastosowana jako miara rozwoju grzybów w celu sprawdzenia jak całkowita mykobiota zachowuje się w czasie kompostowania – zarówno pleśnie, jak i grzyby pochodzące ze szczepionki mikrobiologicznej. Ilość ergosterolu w próbkach kształtowała się odmiennie dla poszczególnych próbek (Tabela 7, Ryc. 35). Udział ergosterolu wzrastał w czasie w przypadku kompostu II i IV, w kompoście kontrolnym odnotowano najpierw niewielki spadek zawartości ergosterolu, potem wartość ta pozostała na stabilnym poziomie. Z kolei ilość ergosterolu w kompoście z zanieczyszczeniami PCP i WWA charakteryzowały się niższą zawartością ergosterolu, wartość ta wzrosła i utrzymywała się na stabilnym poziomie po 28 dniu (Ryc. 35). Stężenie ergosterolu początkowo spadało, a następnie wzrastało do wartości wyższych niż w kontrolach, co świadczy o adaptacji grzybów pochodzących ze szczepionki mikrobiologicznej do warunków toksycznych.

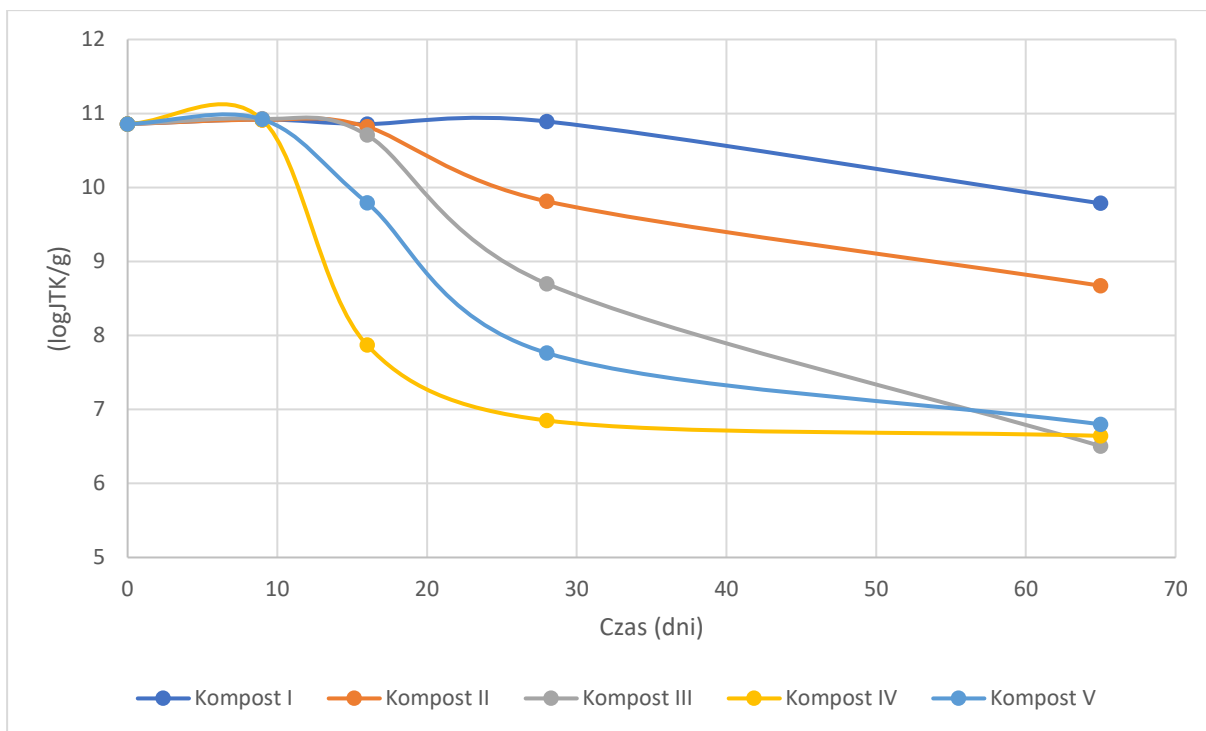
Badania genetyczne

Badania kompostów pod względem liczby zidentyfikowanych organizmów wykazały, iż w czasie kompostowania liczba organizmów spada wraz z czasem prowadzenia procesu. Początkowo zidentyfikowano 131 szczepów w kompoście I (podstawowy skład mieszaniny kompostowej był identyczny dla każdego reaktora). W kompostowanej mieszaninie podstawowej (kompost I) ilość szczepów spadała stopniowo, do 73 szczepów w kompoście dojrzałym (I). W kompoście II z inokulacją grzybową oznaczono w 9 dniu 104 szczepy bakterii i grzybów, wartość ta spadła do 75 szczepów po 28, była taka sama w kompoście dojrzałym (Tabela 8). Komposty z zanieczyszczeniami charakteryzowały się dużo niższą liczebnością organizmów w 9 dniu od rozpoczęcia procesu kompostowania (76 -kompost III-PCP, 54 – kompost IV-lindan, 59 – kompost z WWA) (Tabela 8). Komposty III-V charakteryzowały się o połowę niższą ilością organizmów niż komposty bez zanieczyszczeń, (35 -kompost III-PCP, 18 – kompost IV-lindan, 35 – kompost z WWA) (Tabela 8). Dla wszystkich próbek kompostów odnotowano tendencję spadkową dla ilości bakterii, z kolei w przypadku grzybów w próbkach kompostów kontrolnych ilość grzybów była na podobnym poziomie, a w kompostach z zanieczyszczeniami liczba zidentyfikowanych szczepów grzybów spadała w czasie, za to ich udział w całej grupie zidentyfikowanych szczepów wzrastał (Tabela 8). Udział procentowy grzybów wzrastał nawet do 67% (Kompost II-lindan po 9 dniach), mimo spadku liczby gatunków, co wskazuje na wysoką aktywność enzymatyczną przetrwałych gatunków.

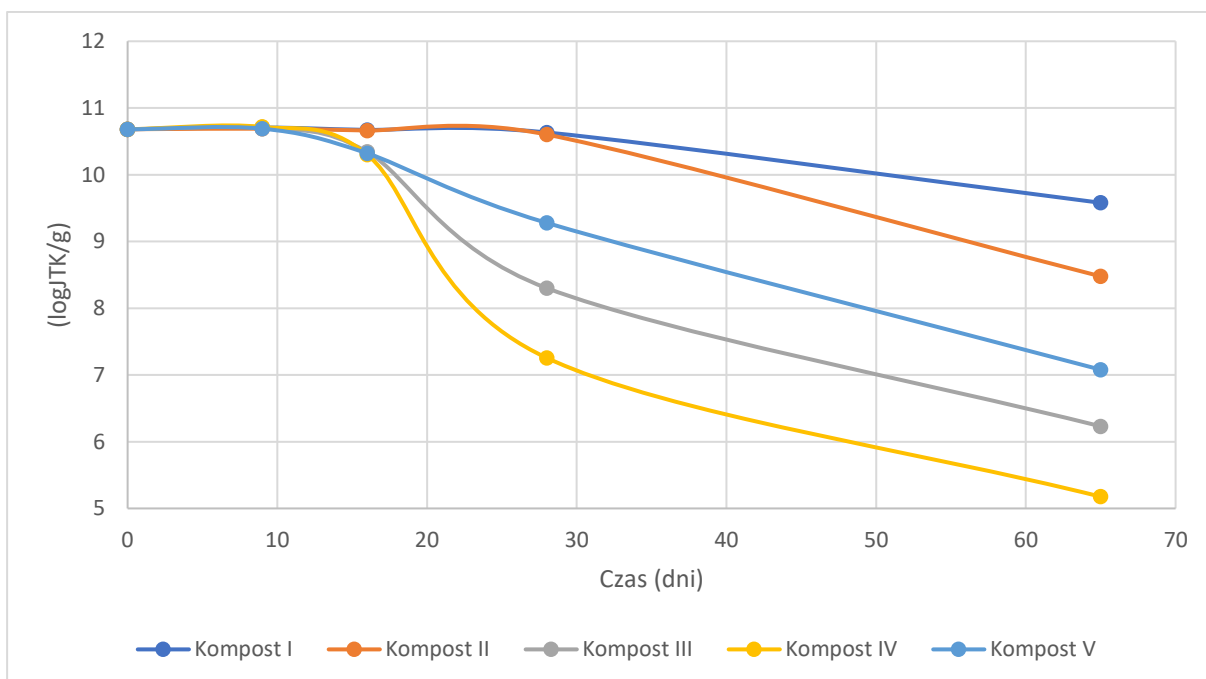
Zanieczyszczenia chemiczne (PCP, Lindan, WWA) wywołują selektywną presję na mikroflorę, eliminując wrażliwe bakterie i grzyby.

1. Przetrwałe gatunki odgrywają kluczową rolę w adaptacji i biodegradacji zanieczyszczeń.
2. Pomimo spadku różnorodności, wzrost udziału procentowego grzybów sprzyja efektywnej degradacji toksyn i powstawaniu bioaktywnych metabolitów.

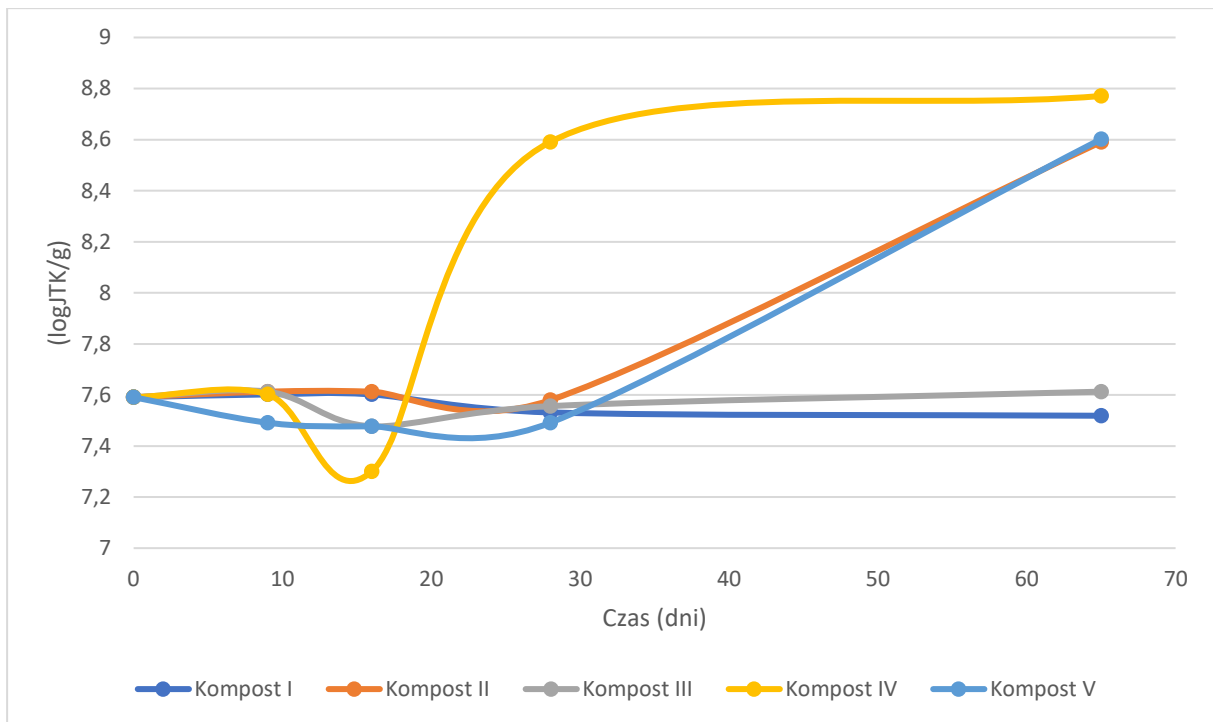
Wykonane badania mikrobiologiczne i genetyczne wskazują, że lindan wywołuje najsilniejszą selekcję mikroflory, podczas gdy PCP i WWA wykazują umiarkowane działanie toksyczne.



Ryc. 32. Zmiana ogólnej liczby bakterii (OLB) w trakcie procesu kompostowania w badanych próbkach zanieczyszczonych kompostów (log jtk/g)



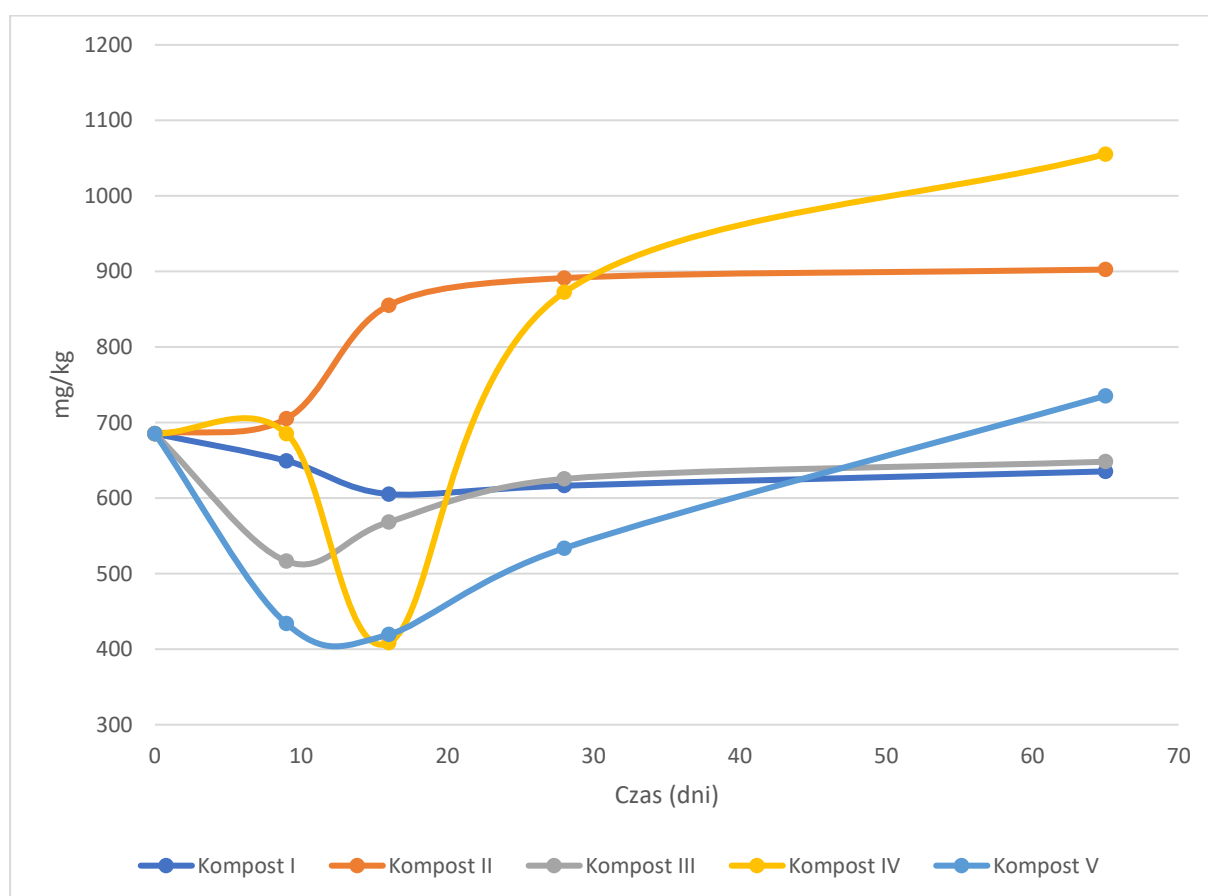
Ryc. 33. Zmiana liczebności enterobakterii (log jtk/g) w trakcie procesu kompostowania w badanych próbkach zanieczyszczonych kompostów



Ryc. 34. Zmiana liczby pleśni (log jtk/g) w trakcie procesu kompostowania w badanych próbkach zanieczyszczonych kompostów po procesie kompostowania

Tabela 7 Stężenie ergosterolu w badanych próbkach kompostów w trakcie procesu kompostowania

	Kompost I	Kompost II	Kompost III	Kompost IV	Kompost V
	Kontrola 1	Kontrola 2	Kompost 1 (PCP)	Kompost 2 (lindan)	Kompost 3 (WWA)
	[mg/kg]				
0	685,12	685,12	685,12	685,12	685,12
9 dzień	649,33	705,21	516,33	685,32	433,68
15 dzień	605,23	855,32	568,36	408,36	419,36
28 dzień	616,36	891,25	625,36	872,52	533,69
66 dzień	635,29	902,54	648,13	1055,26	735,29



Ryc. 35. Zmiana stężenia ergosterolu w trakcie procesu kompostowania w badanych próbkach zanieczyszczonych kompostów po procesie kompostowania

Tabela 8. Liczba zidentyfikowanych wszystkich organizmów (ogółem) w próbkach pobieranych w trakcie procesu kompostowania
 (szary kolor komórek oznacza brak wartości początkowej, jako początkową wartość dla wszystkich kompostów uwzględniono wartość dla kompostu I – przygotowano 5 równoważnych mieszanin kompostowych)

Dzień	Kompost I	Kompost II	Kompost III	Kompost IV	Kompost V
	Kontrola 1	Kontrola 2	Kompost 1 (PCP)	Kompost 2 (lindan)	Kompost 3 (WWA)
	Liczba gatunków	Liczba gatunków	Liczba gatunków	Liczba gatunków	Liczba gatunków
0	131				
9	109	104	76	54	59
16	103	81	46	22	45
28	89	75	35	18	35
65	73	75	35	18	35

Tabela 9. Liczba zidentyfikowanych organizmów w próbkach pobieranych w trakcie procesu kompostowania (szary kolor komórek oznacza brak wartości początkowej, jako początkową wartość dla wszystkich kompostów uwzględniono wartość dla kompostu I – przygotowano 5 równoważnych mieszanin kompostowych)

		Kompost I		Kompost II		Kompost III		Kompost IV		Kompost V	
		Kontrola 1		Kontrola 2		Kompost 1 (PCP)		Kompost 2 (lindan)		Kompost 3 (WWA)	
Dzień	Grupa	Liczba gatunków	Udział procentowy	Liczba gatunków	Udział procentowy	Liczba gatunków	Udział procentowy	Liczba gatunków	Udział procentowy	Liczba gatunków	Udział procentowy
0	bakterie	81	62								
	grzyby	48	59								
	promieniowce	2	4								
9	bakterie	59	54	54	52	33	43	16	30	24	41
	grzyby	48	44	48	46	41	54	36	67	33	56
	promieniowce	2	2	2	2	2	3	2	4	2	3
16	bakterie	53	51	42	52	24	52	13	59	17	38
	grzyby	48	47	37	46	20	43	7	32	26	58
	promieniowce	2	2	2	2	2	4	2	9	2	4
28	bakterie	39	44	39	52	13	37	11	61	17	49
	grzyby	48	54	34	45	20	57	5	28	16	46
	promieniowce	2	2	2	3	2	6	2	11	2	6
65	bakterie	29	40	39	52	13	37	11	61	17	49
	grzyby	42	58	34	45	20	57	5	28	16	46
	promieniowce	2	3	2	3	2	6	2	11	2	6

4.5 Uzyskane komposty w świetle przepisów nawozowych

Testowane komposty zawierały ponad 90% suchej masy. Tak wysoka zawartość wynikała z wcześniejszego kondycjonowania próbek do stanu powietrzno-suchego w warunkach laboratoryjnych, co było konieczne do przeprowadzenia wielu badań analitycznych.

Zawartość azotu w kompostach kształtowała się na poziomie od 1,79 do 1,93%. Zawartość fosforu obliczanego jako tlenek fosforu (V) była najniższa w kompoście I (kontrolnym podstawowym) – 1,34%, podczas gdy pozostałe komposty zawierały około 1,82% -1,90%. Komposty charakteryzowały się niższą zawartością potasu (K_2O), zawierały od 0,47% do 0,50% potasu w przeliczeniu na K_2O (Tabela 10). Zawartość azotu ogólnego i fosforu (oba pierwiastki $\sim 1,8\%$) w kompostach znacząco przewyższa minimalną wymaganą zawartość tych składników w nawozach organicznych (minimum 0,5% m/m dla azotu ogólnego – Nog.; minimum 0,3% m/m dla fosforu – P_2O_5). Zawartość potasu była dokładnie na poziomie wymaganym rozporządzeniem (Rozp. Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009). Ponadto komposty zawierały od 0,51% do 0,60 % m/m wapnia (w przeliczeniu na CaO) oraz od 0,17% do 0,22 % m/m magnezu (MgO). Dla tych pierwiastków przepisy nie ustanawiają wartości minimalnych (Tabela 10).

Uzyskane wyniki dla kompostów w aspekcie wartości nawozowych nie różniły się pomiędzy sobą. Nie odnotowano wpływu obecności zanieczyszczeń czy dodatku szczepionki grzybowej na wartości nawozowe (NPK, Ca, Mg) (Tabela 10).

Tabela 10. Charakterystyka uzyskanych kompostów pod względem wartości nawozowych (zawartość substancji N ogólnego, P, K, Ca, Mg w przeliczeniu na tlenki - badania wykonane dla kompostów jako środka wspomagającego uprawę roślin – parametry nawozu organicznego)

	Składnik	Sucha masa	N ogólny	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
	Kompost	[% m/m]	[% m/m] św. m.				
Kompost I	Kontrola 1	91,5±7,4	1,79±0,14	1,34±0,20	0,49±0,08	0,59±0,10	0,17±0,03
Kompost II	Kontrola 2	91,4±7,4	1,93±0,15	1,86±0,28	0,48±0,08	0,60±0,10	0,22±0,04
Kompost III	Kompost 1 (PCP)	91,4±7,4	1,82±0,14	1,90±0,28	0,50±0,08	0,52±0,09	0,22±0,04
Kompost IV	Kompost 2 (Lindan)	91,1±7,4	1,83±0,14	1,82±0,27	0,49±0,08	0,53±0,09	0,22±0,04
Kompost V	Kompost 3 (WWA)	91,4±7,4	1,91±0,15	1,85±0,28	0,47±0,08	0,51±0,08	0,20±0,04

4.6 Wyniki pomiarów roślin uprawianych w podłożach z udziałem kompostów

Wzrost i kwitnienie roślin jastrunia wielkiego 'Macaroon' zależała od zastosowanego kompostu, a także jego procentowego udziału w podłożu (Ryc. 36-38). Rośliny kontrolne uprawiane w substracie torfowym osiągnęły wysokość średnio 21,3 cm. Nie zaobserwowano istotnych różnic dla roślin uprawianych w podłożach z dodatkiem kompostu V (WWA) i z 75% dodatkiem kompostu III (PCP). Wysokość roślin dla wszystkich kombinacji kompostu V mieściła się w zakresie od 22,2 do 22,8 cm, z kolei wysokość roślin uprawianych w podłożach z 75 % dodatkiem kompostu III wynosiła średnio 20,8 cm (Ryc. 39).

Dodatek kompostów I oraz IV stymulował wzrost roślin. Osiągnęły one wysokość wyższą niż rośliny rosnące w podłożu kontrolnym (Ryc. 39). Wysokość roślin uprawianych w podłożu z udziałem kompostu I wynosiła od 23,0 cm (25% dodatek) do 24,6 cm (75% dodatek kompostu I). Nie różniły się te wartości znacząco od wysokości roślin uprawianych na podłożach z dodatkiem kompostu IV. Wysokość także wzrastała wraz z dodatkiem kompostu IV, od 23,2 cm (25% kompostu IV) do 24,6 (75% kompostu IV) (Ryc. 39).

Dodatek kompostu II (25-75%) oraz dodatek kompostu III (25%, 50%) do substratu torfowego działał hamująco na wysokość roślin. Rośliny były niższe niż rośliny kontrolne, ich wysokość wynosiła od 18,6 do 20,1 cm wobec wysokości roślin kontrolnych 21,3 cm uprawianych w samym substracie torfowym (Ryc. 39).

Najwyższe rośliny uzyskano w podłożach zawierających 75% kompostu I oraz z 75% dodatkiem kompostu IV (z lindanem i inokulacją), osiągnęły tą samą wysokość - średnio 24,6 cm (Ryc. 39).

Średnica kwiatów u badanych roślin była bardzo zbliżona od 6,8 do 7,2 cm. Nie odnotowano różnic średnicy kwiatów uprawianych w podłożach z dodatkiem kompostu I, z 50 i 75% dodatkiem kompostu IV (lindan) oraz z 75% dodatkiem kompostu V (WWA). Rośliny uprawiane w podłożach z dodatkiem kompostu II i III (25-75%) oraz z 50 i 75 % dodatkiem kompostu V (WWA) i 25% dodatkiem kompostu IV (lindan) tworzyły kwiaty o mniejszej średnicy (Ryc. 40).

W zależności od rodzaju podłoża, w chwili pomiarów rośliny miały wytworzone po 3-5 kwiatów, a średnica kwiatów różniła się nieznacznie pomiędzy poszczególnymi wariantami podłoża (Ryc. 40-41). Rośliny rosnące w podłożach z udziałem kompostu I (kontrolnego 1) i podłoża z 75% udziałem kompostu IV (2 z lindanem) kwitły obficie

w porównaniu z innymi roślinami. Niezależnie od zastosowanego kompostu rośliny rozwinęły większą liczbę pąków w stosunku do roślin kontrolnych (Ryc. 42).

Wykonane pomiary indeksu zazielenienia liści (*ang.* SPAD - Soil Plant Analysis Development) nie wykazały różnic w wartościach SPAD dla roślin uprawianych w substracie torfowym (średnio 53,5) oraz w przypadku roślin uprawianych we wszystkich podłożach z dodatkiem kompostów III – V (PCP, linden, WWA). Rośliny rosnące w podłożach z dodatkiem kompostu I charakteryzowały się wyższą wartością mierzonego parametru (SPAD od 55,7 do 57,9). Natomiast wartość SPAD dla roślin uprawianych na podłożach z dodatkiem kompostu II (tylko z inokulacją) była niższa od wartości roślin kontrolnych i mieściła się w zakresie od 42,8 do 47,5 (Ryc. 43).

Reasumując można stwierdzić, że najlepszą jakością charakteryzowały się rośliny uprawiane na podłożach z udziałem kompostu I (kontrolnego 1) oraz kompostu IV (kontrola 2 z lindenem i inokulacją).

Uzyskane w ramach badań komposty z odpadów drzewnych (kontrolne, zanieczyszczone, z inokulacją) pozwoliły uzyskać rośliny o bardzo podobnych do siebie cechach. Nie zaobserwowano niekorzystnego wpływu „sztucznie” wprowadzonych do procesu kompostowania zanieczyszczeń na badane cechy. Uzyskane komposty mogą z powodzeniem zostać zastosowane do upraw roślin ozdobnych.

Dalsze badania nad wykorzystaniem kompostów z odpadów drzewnych mogłyby zostać ukierunkowane na wykorzystanie kompostów do upraw roślin na potrzeby leśnictwa, w szkółkach i na potrzeby zakładów zieleni miejskich czy do nasadzeń w ramach rekultywacji.



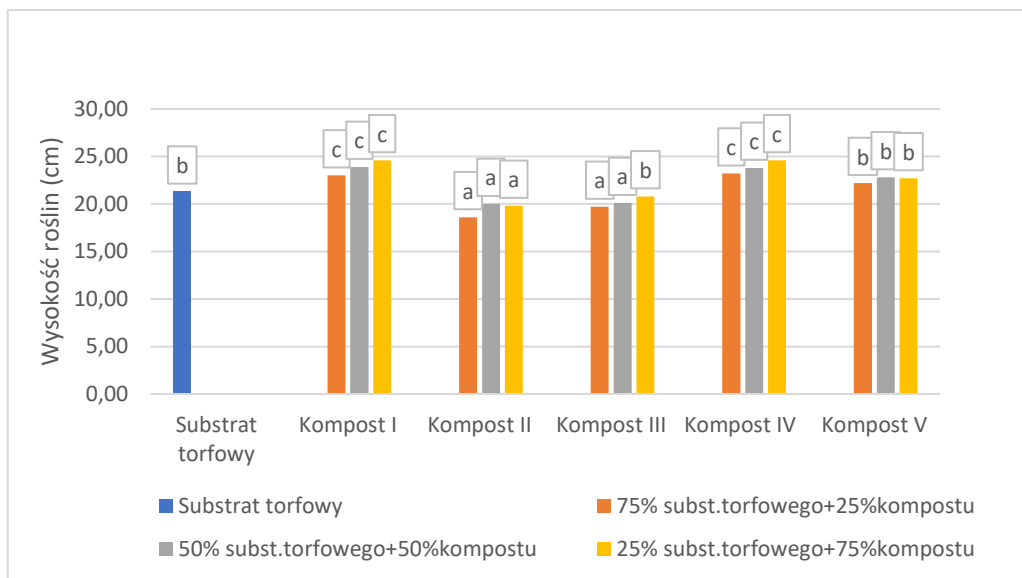
Ryc. 36. *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon' – rośliny po posadzeniu do doniczek



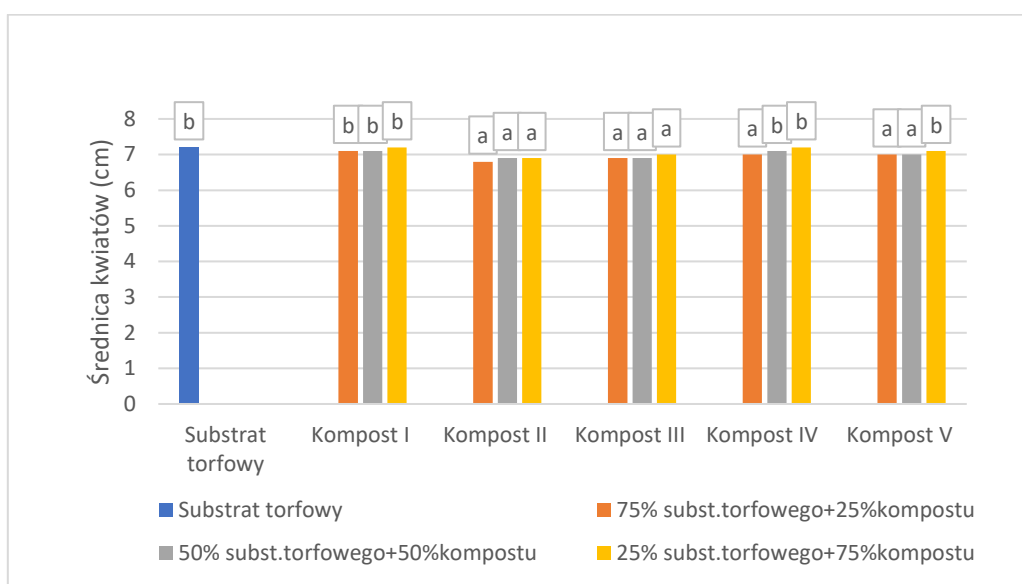
Ryc. 37. *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon' w fazie wegetatywnej



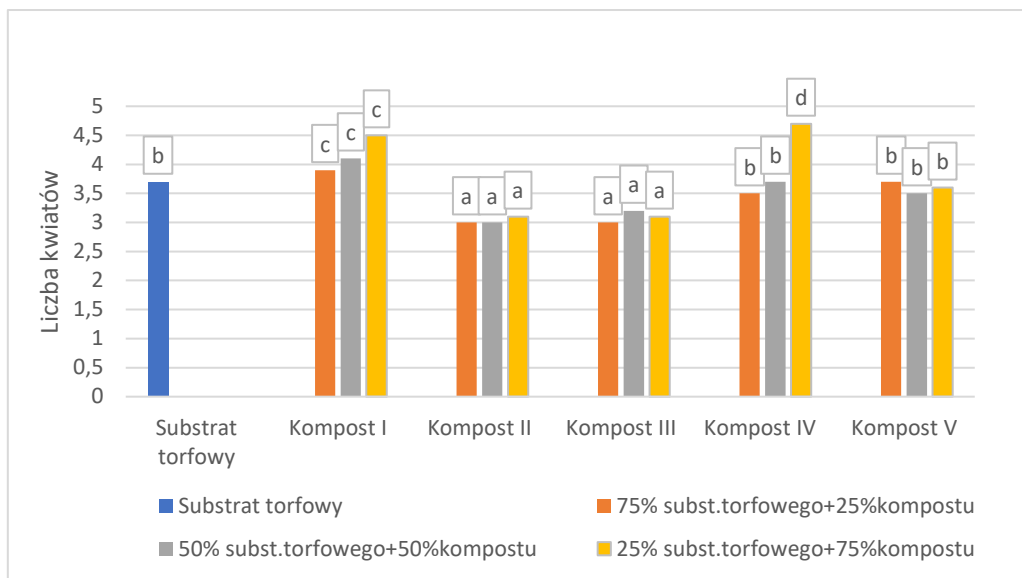
Ryc. 38. *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon' w trakcie kwitnienia



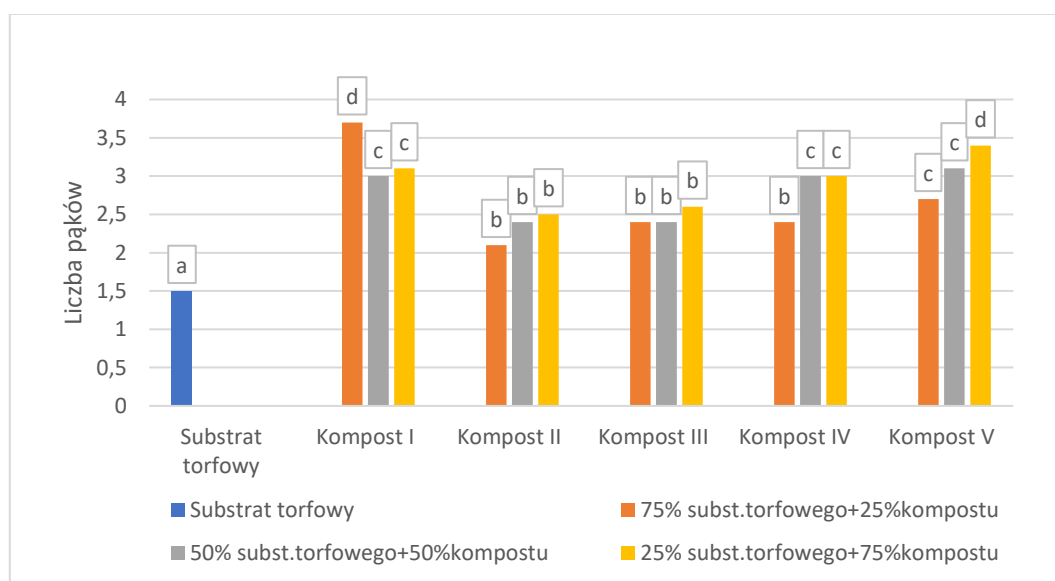
Ryc. 39. Wpływ kompostów na wysokość roślin *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon' (a, b, c – te same litery oznaczają brak istotnych różnic na poziomie ufności $p \leq 0,05$)



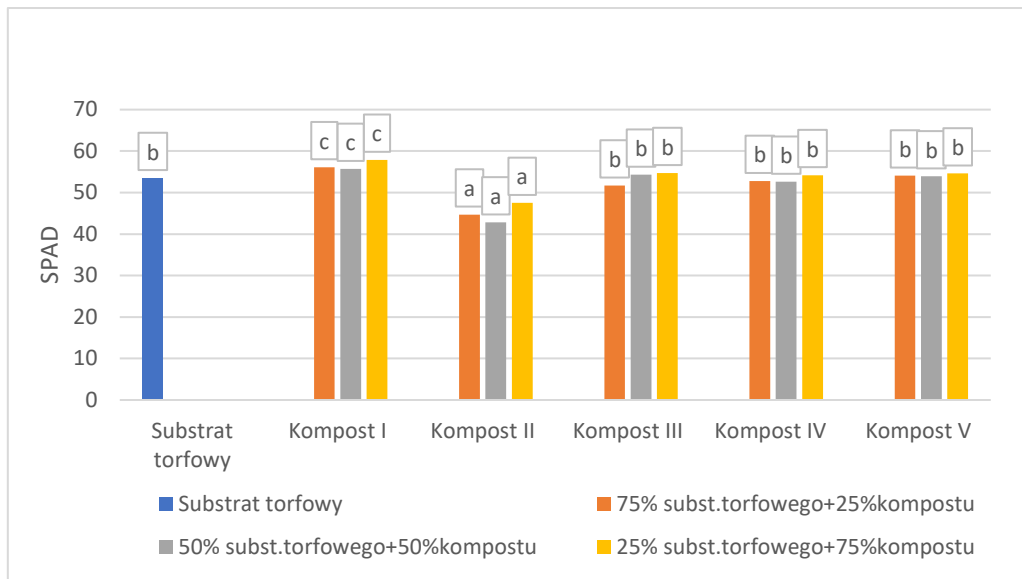
Ryc. 40. Wpływ kompostów na średnicę kwiatów *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon' (a, b, c – te same litery oznaczają brak istotnych różnic na poziomie ufności $p \leq 0,05$)



Ryc. 41. Wpływ kompostów na liczbę kwiatów *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon' (a, b, c – te same litery oznaczają brak istotnych różnic na poziomie ufności $p \leq 0,05$)



Ryc. 42. Wpływ kompostów na liczbę pąków *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon' (a, b, c – te same litery oznaczają brak istotnych różnic na poziomie ufności $p \leq 0,05$)



Ryc. 43. Wpływ kompostów na Indeks zazielenienia liści (SPAD) *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'
(a, b, c – te same litery oznaczają brak istotnych różnic na poziomie ufności $p \leq 0,05$)

4.7 Wyniki badań chemicznych podłoży z udziałem kompostów – przed uprawą i po uprawie *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'

Podłoża ogrodnicze z udziałem wytworzonych kompostów (25%, 50%, 75%) oraz substrat torfowy TS1 (100%) scharakteryzowano przed i po uprawie w laboratorium Stacji Chemiczno-Rolniczej w Poznaniu, pod względem zawartości makroskładników (N, P, K, Ca, Mg, Cl), zasolenia, odczynu pH, oraz mikropierwiastków, ciężaru objętościowego i zasolenia.

Oznaczone wartości składników podłoży zestawiono w Tabelach 10-11 oraz zilustrowano na rycinach (Ryc. 44-53). W podłożach przed uprawą zawartość azotu (N-NO₃) różniła się w zależności od zastosowanego kompostu i jego udziału procentowego. Najniższe wartości azotu odnotowano dla podłoży z udziałem kompostu III (PCP) i dla podłoży z kompostem II (kontrolnym 2 (z inokulacją)) (od 44 do 241 mg azotu N-NO₃ na dm³ podłoża). Najwyższą zawartość azotu (N-NO₃) stwierdzono w podłożach, w których zastosowano kompost I bez zanieczyszczeń i bez inokulacji (od 480 do 704 mg/dm³) oraz w podłożu z 50% udziałem kompostu V (WWA) (601 mg/dm³) (Ryc.44). Po uprawie roślin odnotowano znaczący spadek we wszystkich podłożach z udziałem kompostów. Zawartość azotu (N-NO₃) oznaczono na bardzo niskim poziomie od około 2 do 20 mg azotu, tylko w podłożu torfowym pozostała około 1/5 początkowej zawartości tego pierwiastka (151 mg z 680 mg/dm³) (Ryc. 44).

Spadek zawartości po uprawie odnotowano także dla fosforu we wszystkich próbkach podłoży, również w substracie torfowym. Zarówno zawartość fosforu w próbkach podłoży przed, jak i po uprawie była proporcjonalna do udziału kompostu (Ryc. 45). Przed uprawą w podłożach z udziałem 50% i 75% kompostów zawartość fosforu (od 575 mg/dm³ do 970 mg/dm³) była wyższa niż zawartość tego pierwiastka w substracie torfowym (353 mg/dm³). Po uprawie roślin w podłożach zaobserwowano spadek zawartości fosforu do około 50% wartości początkowej (Ryc. 45).

Zawartość kolejnego składnika (potasu) po uprawie roślin także różniła się w porównaniu z wartościami początkowymi. Największy udział odnotowano w substracie torfowym (100%) – 1188 mg/dm³, po uprawie stwierdzono tylko 119 mg/dm³. W podłożach z udziałem kompostów przed uprawą zawartość potasu kształtowała się na poziomie od 272 mg/dm³ do 968 mg/dm³ w zależności od udziału kompostu w podłożu. Zawartość

potasu po uprawie spadła do niskich wartości w przedziale (53 – 149 mg/dm³) (Ryc. 46), to spadek nawet 8-krotny wobec wartości początkowych.

Dla zawartości wapnia w podłożach wykazano odwrotną zależność. Podłoża po uprawie zawierały więcej wapnia niż podłoża wyjściowe (Ryc. 47). Spowodowane to może być podlewaniem wodą wodociągową.

Znaczących zmian nie odnotowano dla zawartości magnezu, którego ilość urzymywała się na podobnym poziomie zarówno przed i po uprawie (od 168 do 341 mg/dm³) (Ryc. 48). Dla zawartości chlorków po uprawie odnotowano spadek (Ryc. 49). Wraz ze wzrostem udziału kompostu w podłożach uzyskano wyższy poziom cynku (Ryc. 50). Zawartość miedzi po uprawie spadła o połowę w porównaniu do zawartości początkowej w podłożach (Ryc. 51). Z kolei zawartość manganu wzrosła z poziomu mg/dm³ do zawartości na poziomie od 10 do 20 mg/dm³ (Ryc. 52). Zawartość żelaza w podłożach przed uprawą roślin była bardzo zróżnicowana, a po uprawie roślin zawierały one do 100 mg/dm³, a ilość żelaza była wyższa im wyższy udział kompostu (Ryc. 53).

Wyjściowe zasolenie substratu torfowego oznaczono na poziomie 9,99 g NaCl/dm³. Podłoża testowe charakteryzowały się zasoleniem w zakresie od 2,24 g do 4,98 g NaCl/dm³. Natomiast po uprawie wartości zasolenia zmalały i wynosiły od 0,64 g do 1,19 g NaCl/dm³. Zasolenie substratu torfowego po uprawie pozostawało na wyższym poziomie od podłoży testowych (2,14 g NaCl/dm³) i stanowiło 21% wartości początkowej zasolenia substratu torfowego (100%) (Tabela 11, 12).

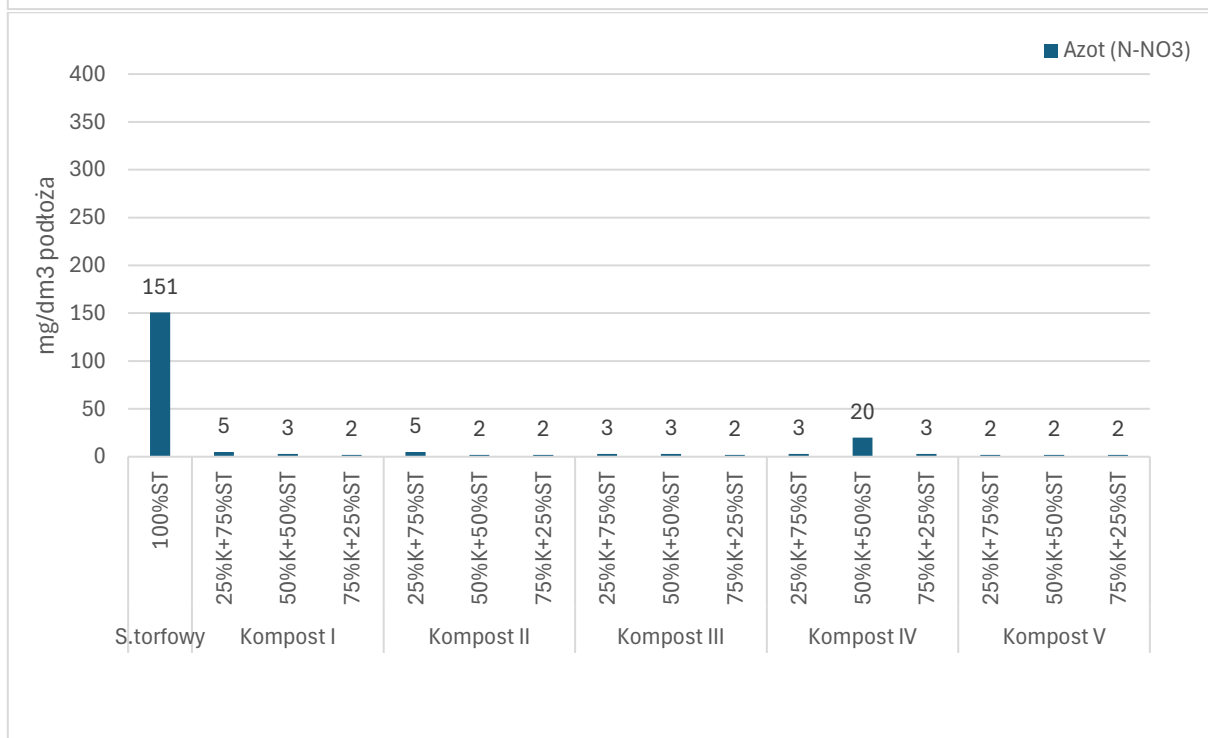
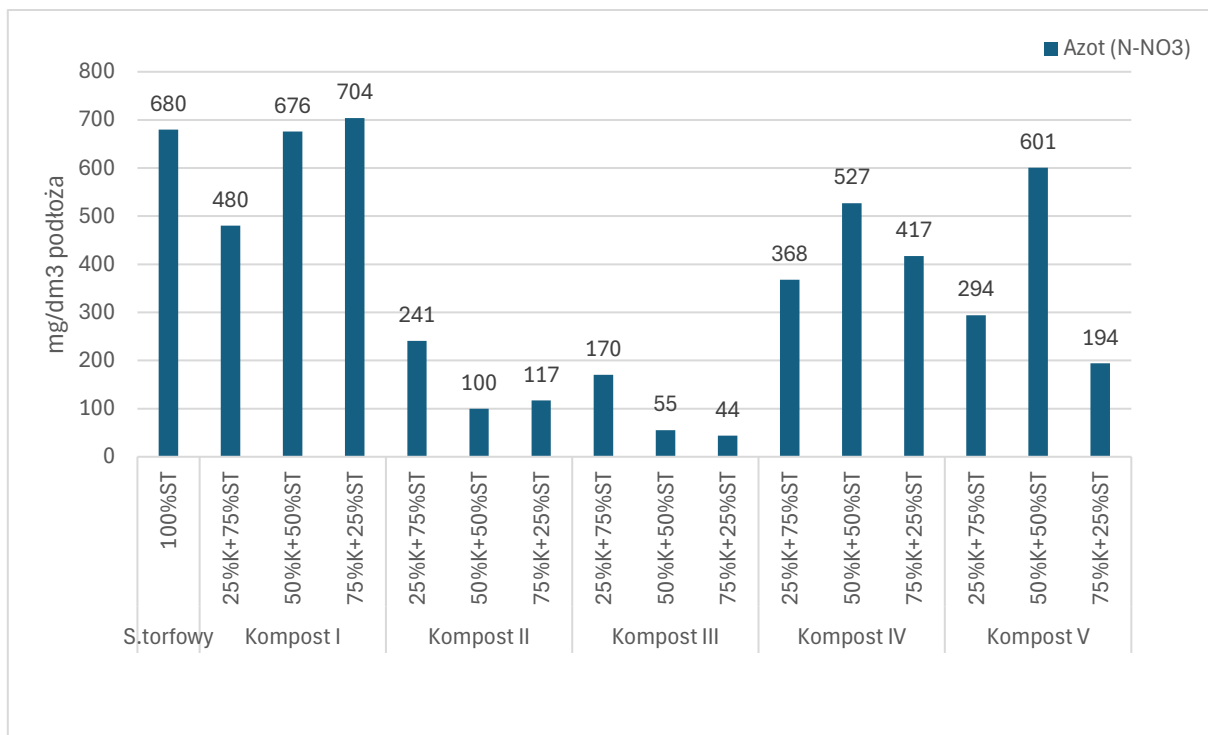
Uzyskane podłoża miały odczyn lekko kwaśny lub obojętny (od pH 5,1 do 7,1), podobnie jak pH substratu torfowego 5,3. Po uprawie odczyn podłoży wzrósł do wartości od 6,6 do 7,3, a substratu torfowego do odczynu pH 6,1 (Tabela 11, 12). Ciężar objętościowy podłoży przed i po uprawie mieścił się w zakresie od 280 do 330 g/dm³ (Tabela 11, 12).

Tabela 11. Zawartość makroskładników w podłożach przed uprawą

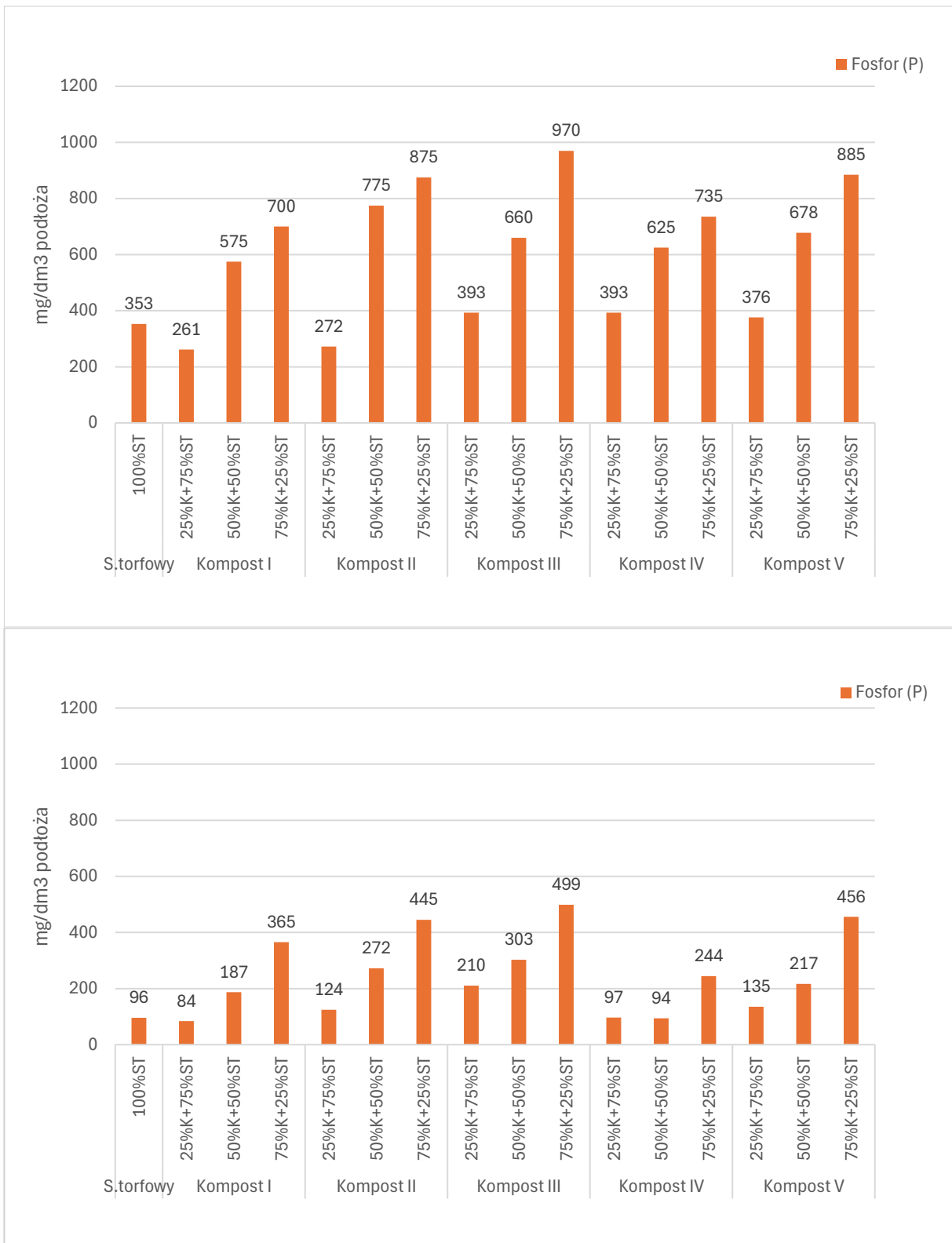
Kombinacja	Zasolenie g NaCl/dm ³	pH	Ciężar objętościowy
			g/dm ³
Kontrola - Substrat torfowy TS1 (100%)	9,99	5,3	290
Kompost I (Kontrola 1)			
25% kompost+ 75% substrat torfowy	2,87	5,7	330
50% kompost + 50% substrat torfowy	4,20	5,3	300
75% kompost + 25% substrat torfowy	4,98	5,1	320
Kompost II (Kontrola 2)			
25% kompost+ 75% substrat torfowy	2,24	5,8	290
50% kompost + 50% substrat torfowy	3,33	6,3	300
75% kompost + 25% substrat torfowy	3,81	6,4	310
Kompost III (Kompost 1 - PCP)			
25% kompost+ 75% substrat torfowy	2,38	6,1	300
50% kompost + 50% substrat torfowy	2,24	6,1	280
75% kompost + 25% substrat torfowy	4,02	7,1	290
Kompost IV (Kompost 2 - Lindan)			
25% kompost+ 75% substrat torfowy	2,97	5,6	290
50% kompost + 50% substrat torfowy	3,51	5,3	290
75% kompost + 25% substrat torfowy	4,02	5,8	290
Kompost V (Kompost 3 - WWA)			
25% kompost+ 75% substrat torfowy	2,45	5,5	300
50% kompost + 50% substrat torfowy	4,37	5,2	310
75% kompost + 25% substrat torfowy	3,03	5,9	310

Tabela 12. Zawartość makroskładników w podłożach po uprawie

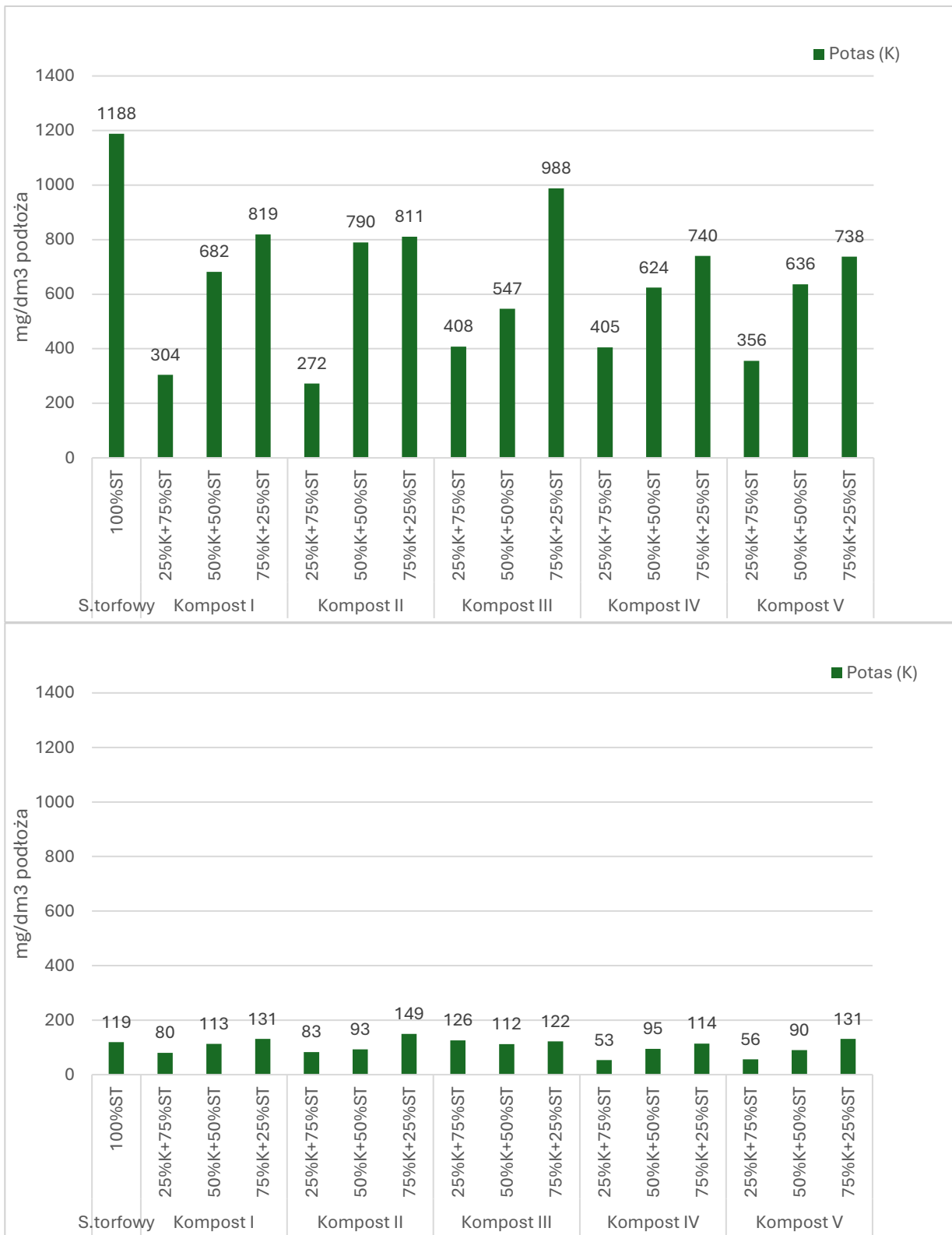
Kombinacja	Zasolenie	pH	Ciężar objętościowy
	g NaCl/ dm ³		g/dm ³
Kontrola - Substrat torfowy TS1 (100%)	2,14	6,1	280
Kompost I (Kontrola 1)			
25% kompost+ 75% substrat torfowy	1,19	6,9	300
50% kompost + 50% substrat torfowy	0,92	6,9	310
75% kompost + 25% substrat torfowy	1,01	6,7	310
Kompost II (Kontrola 2 (+ inokulum))			
25% kompost+ 75% substrat torfowy	0,70	7,0	300
50% kompost + 50% substrat torfowy	0,88	6,9	330
75% kompost + 25% substrat torfowy	0,89	6,8	310
Kompost III (Kompost 1 - PCP)			
25% kompost+ 75% substrat torfowy	1,07	6,6	300
50% kompost + 50% substrat torfowy	0,92	6,9	320
75% kompost + 25% substrat torfowy	0,64	7,3	320
Kompost IV (Kompost 2 - Lindan)			
25% kompost+ 75% substrat torfowy	0,71	7,1	310
50% kompost + 50% substrat torfowy	0,90	6,8	320
75% kompost + 25% substrat torfowy	0,89	6,9	300
Kompost V (Kompost 3 - WWA)			
25% kompost+ 75% substrat torfowy	0,96	6,8	320
50% kompost + 50% substrat torfowy	0,76	6,9	310
75% kompost + 25% substrat torfowy	0,80	6,8	300



Ryc. 44. Zawartość azotu (N-NO₃) w podłożach przed uprawą i po uprawie *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'



Ryc. 45. Zawartość fosforu w podłożach przed uprawą i po uprawie *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'



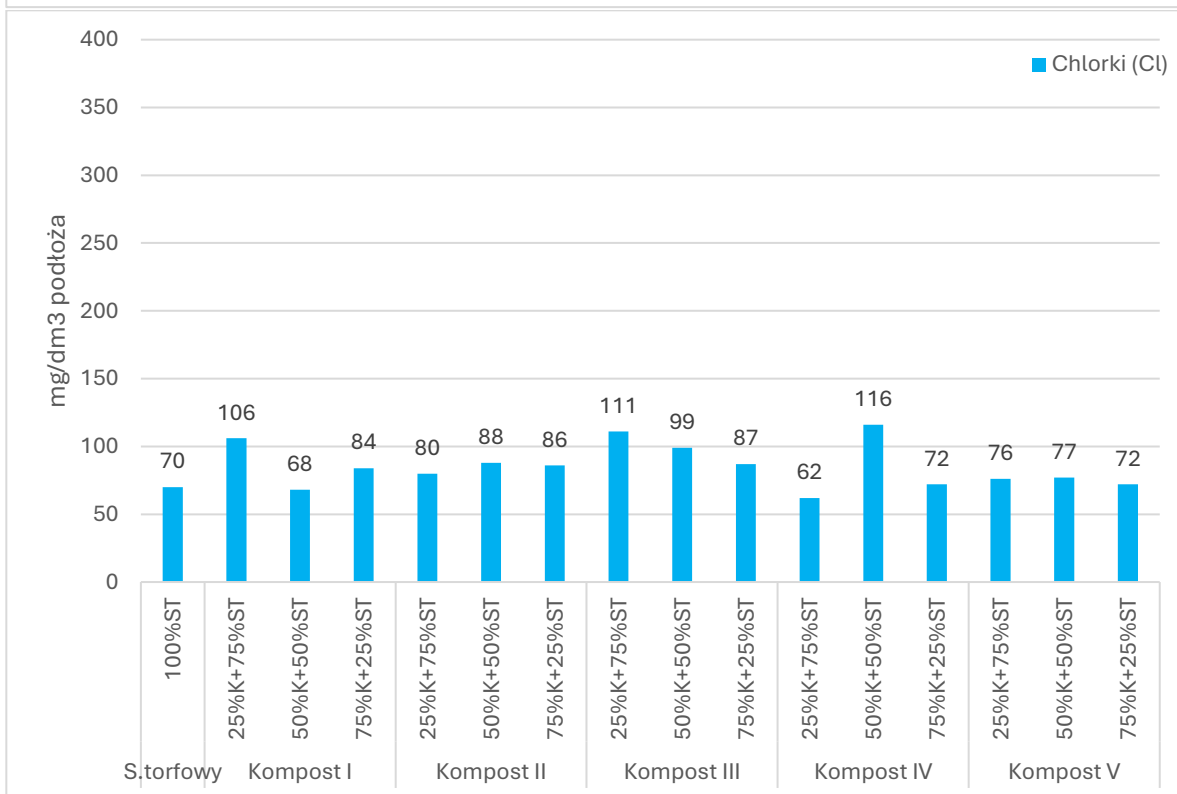
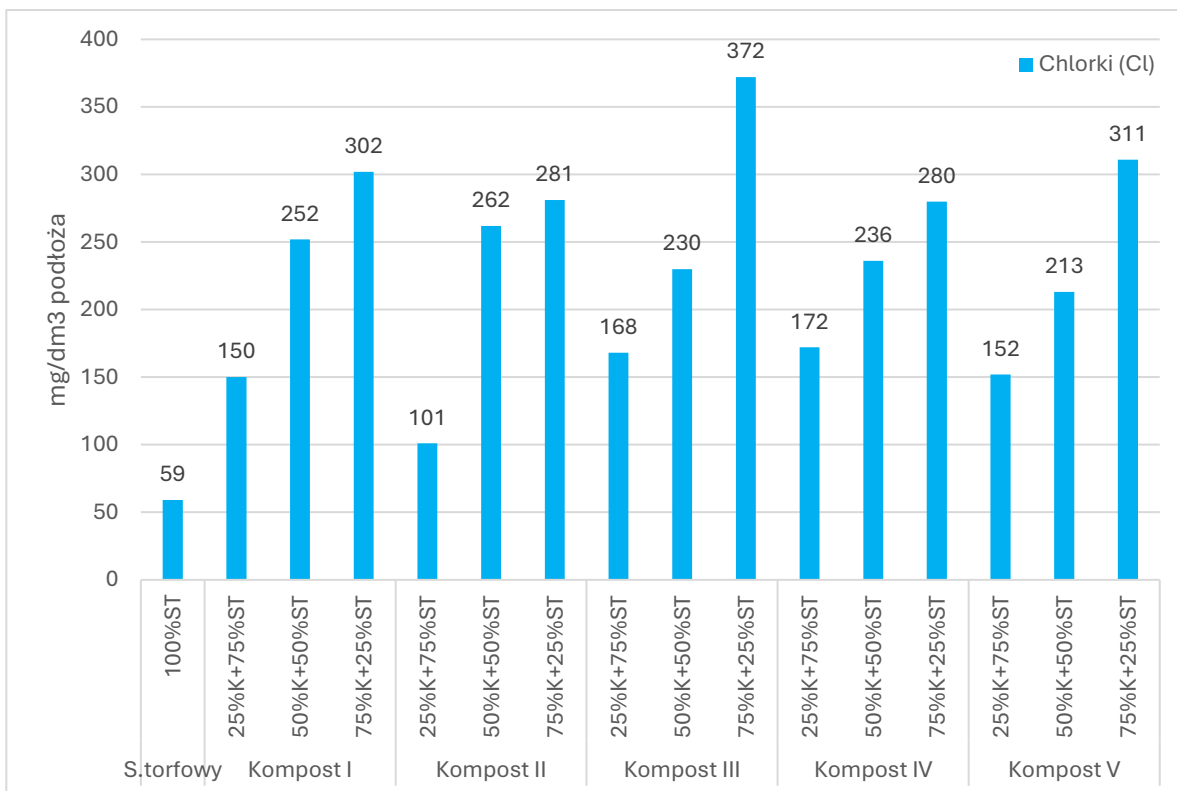
Ryc. 46. Zawartość potasu w podłożach przed uprawą i po uprawie *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'



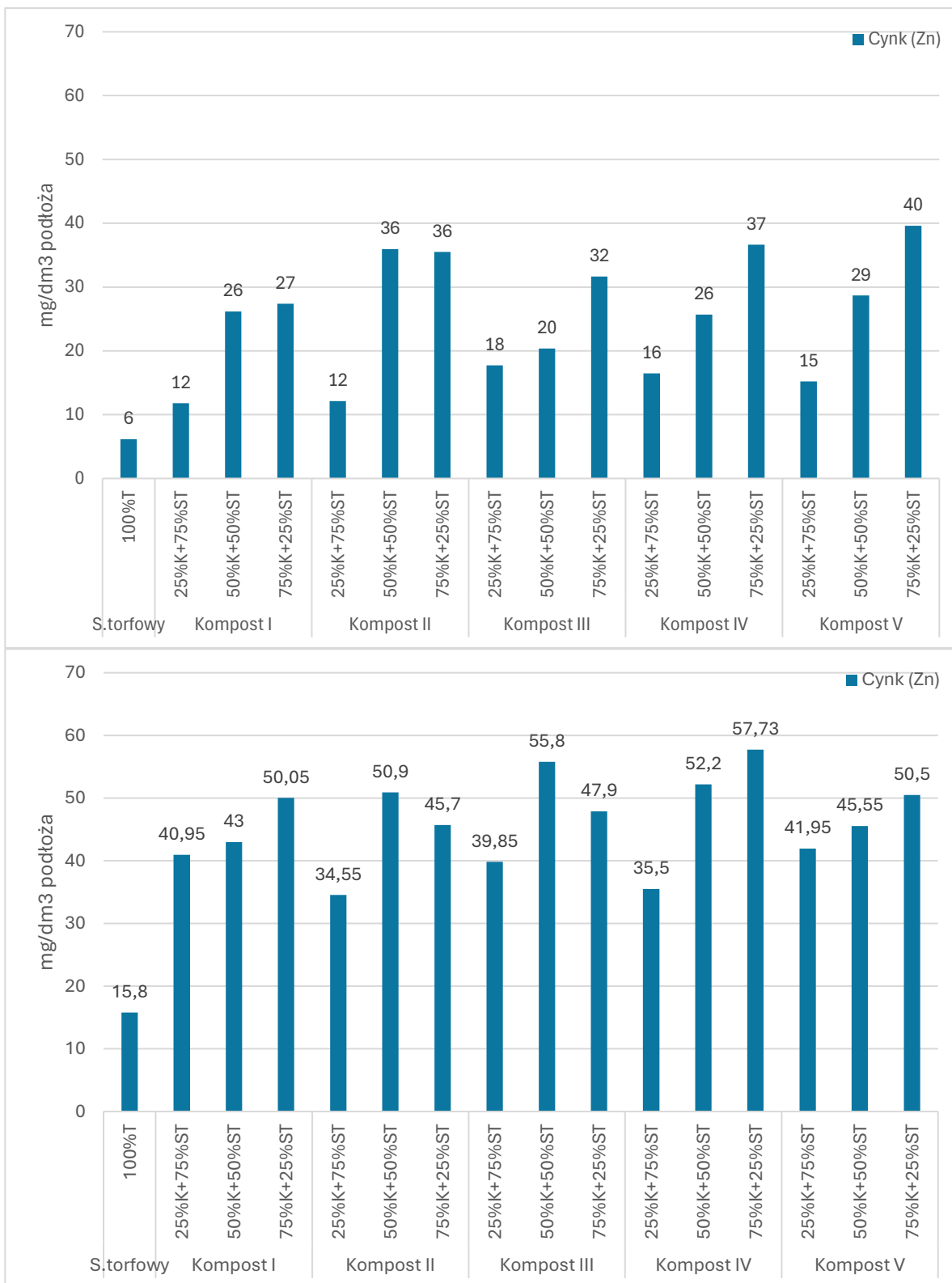
Ryc. 47. Zawartość wapnia w podłożach przed uprawą i po uprawie *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'



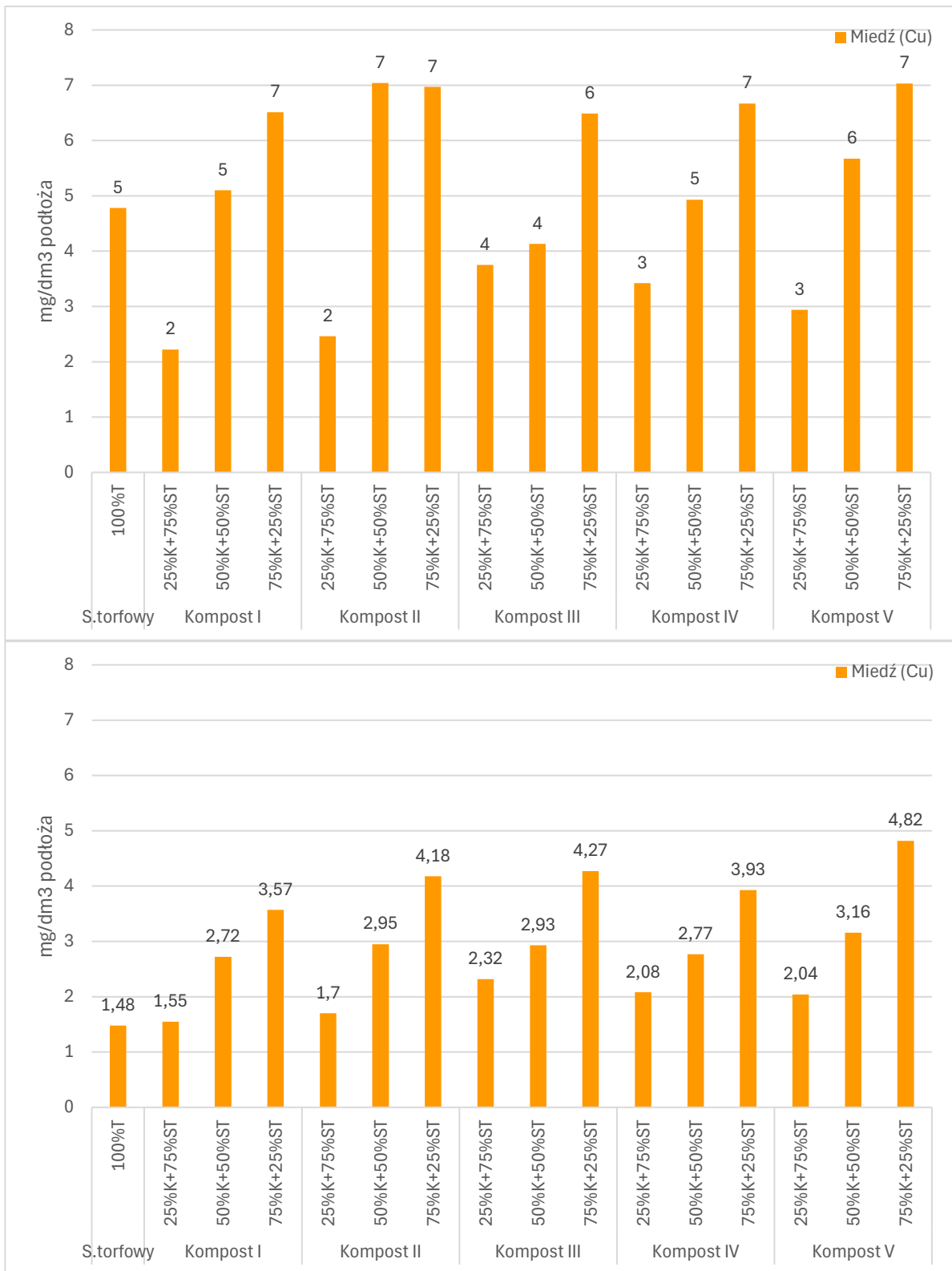
Ryc. 48. Zawartość magnezu w podłożach przed uprawą i po uprawie *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'



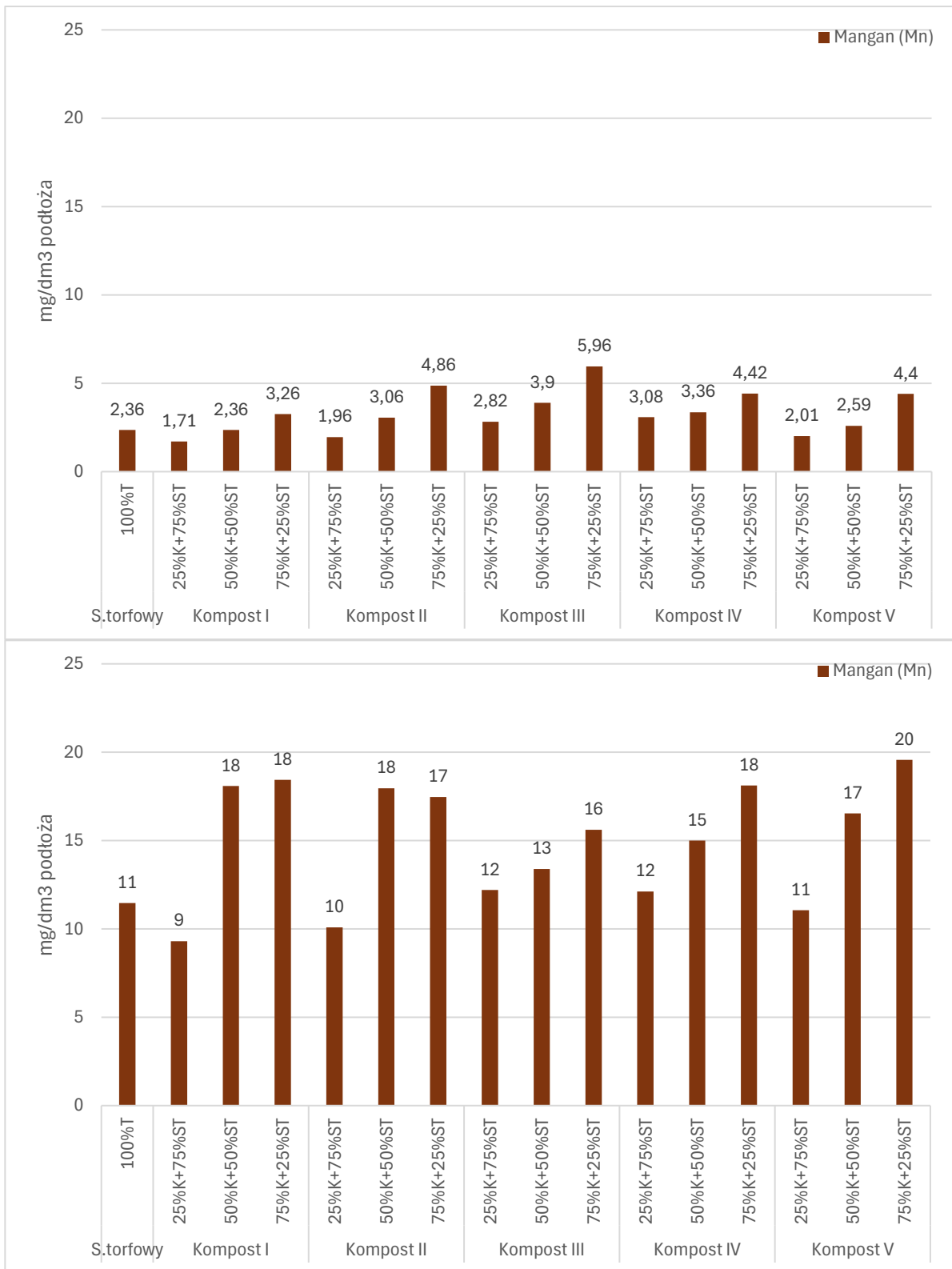
Ryc. 49. Zawartość chlorków w podłożach przed uprawą i po uprawie *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'



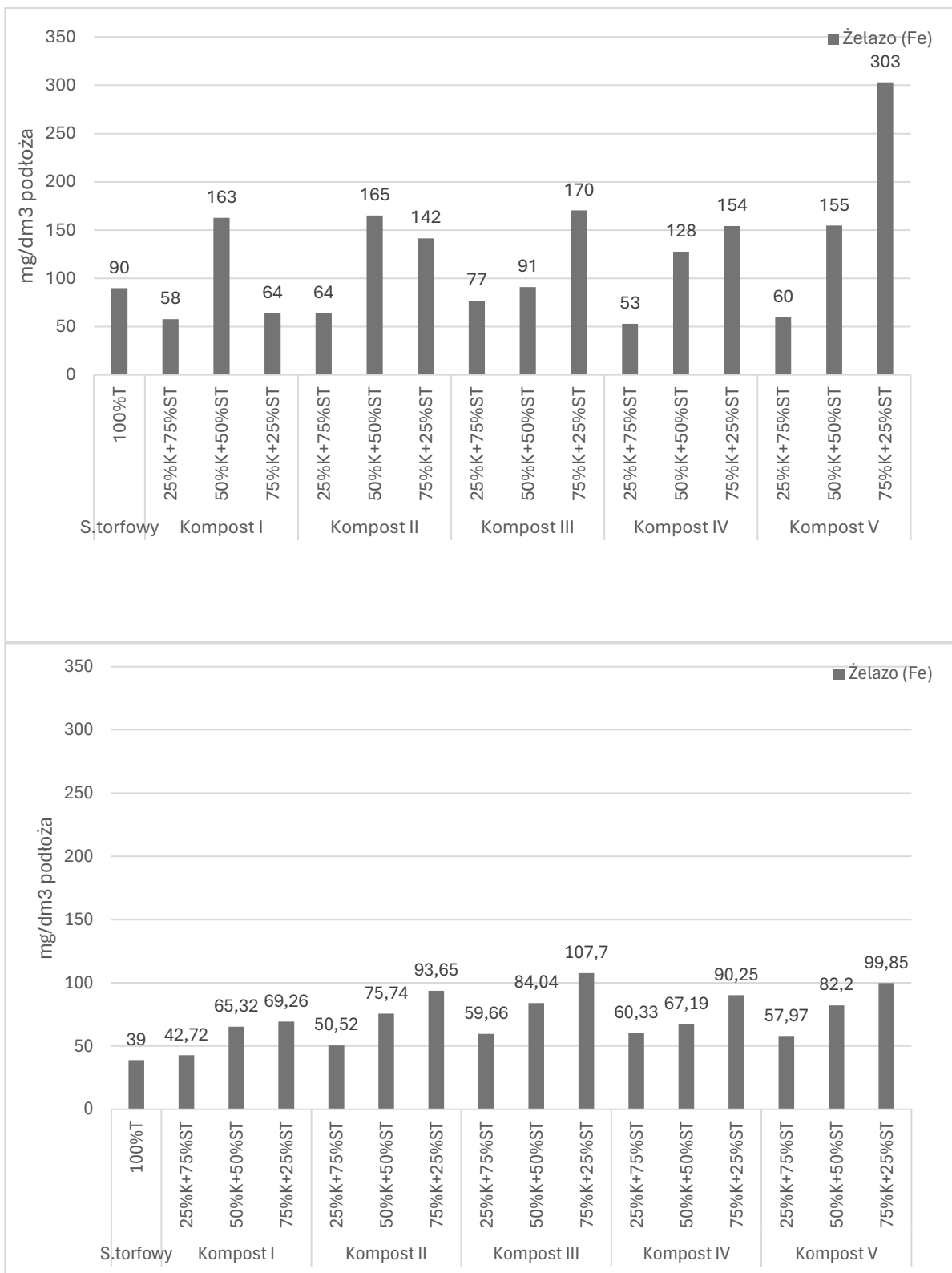
Ryc. 50. Zawartość cynku w podłożach przed uprawą i po uprawie *Leucantheum x superbum* 'Macaroon'



Ryc. 51. Zawartość miedzi w podłożach przed uprawą i po uprawie *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'



Ryc. 52. Zawartość manganu w podłożach przed uprawą i po uprawie *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'



Ryc. 53. Zawartość żelaza w podłożach przed uprawą i po uprawie *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon'

5. Podsumowanie

Niniejsza praca została zrealizowana w ramach V edycji programu „Doktorat wdrożeniowy”. Celem pracy było przeprowadzenie badań zmierzających do optymalizacji i otrzymania modelu technologii kompostowania drzewnych materiałów odpadowych, tak aby uzyskane komposty stanowiły produkty nawozowe i dodatek do podłoży ogrodniczych.

W badaniach wykorzystano odpady drzewne w postaci trocin, które następnie sztucznie zanieczyszczono wybranymi substancjami (pentachlorofenolem, lindanem i związkami z grupy WWA) do celów modelowania parametrów procesu kompostowania. Opracowano wytyczne do określania przydatności odpadów drzewnych do procesu kompostowania i tok postępowania z odpadami, a także metodykę prowadzenia procesu kompostowania odpadów drzewnych. Adaptacja uzyskanego toku postępowania wymaga kroków wstępnych i charakterystyki technologicznej poszczególnych strumieni odpadów z różnorodnych zakładów i różnych procesów obróbczych.

W ramach pracy przygotowano procedurę otrzymywania szczepionki zawierającej szczepy grzybów rozkładu białego drewna, które są zdolne do biodegradacji wybranych zanieczyszczeń. Kompost został inokulowany shomogenizowanym preparatem ciekłym z grzybami rozkładu białego (*Trametes versicolor* (Linnaeus : Fries) Pilát, szczep: DSM 3086, *Bjerkandera adusta* (Willd.: Fr.) Karst., szczep: DSM 3375, *Phanerochaete chrysosporium* Burdsall., szczep: DSM 6909).

Po przeprowadzonym procesie kompostowania stwierdzono znaczne obniżenie poziomu zanieczyszczenia pentachlorofenolem, lindanem i kompostem WWA w uzyskanych w reaktorach kompostach, w porównaniu z ich początkowym poziomem w drewnie zanieczyszczonym i w mieszaninie kompostowej na początku doświadczenia (detoksyfikacja zanieczyszczeń w trakcie kompostowania). Zawartość podstawowych składników lignocelulozowych w próbkach kompostów nie uległa istotnym zmianom. Dla niektórych składników (hemicelulozy, lignina rozpuszczalna, zawartość substancji mineralnych) w próbkach kompostów w porównaniu z własnościami drewna przed eksperymentem uzyskano wartości wyższe. Dalsze badania nad składem chemicznym otrzymanych kompostów mogą przyczynić się do rozpoznania możliwości ich dalszego wykorzystania. Detoksykacja zanieczyszczeń z odpadów może być prowadzona poprzez kompostowanie i wspomagana przez dodawanie szczepionek biologicznych (osady ściekowe, szczepionki grzybowe). Wysoka zawartość celulozy i innych składników drzewnych w kompostach po procesie kompostowania może przyczynić się do

poszukiwania dalszych procesów obróbki czy frakcjonowania celem odzysku poszczególnych substancji lignocelulozowych (jak np. celuloza, hemicelulozy, lignina, substancje fenolowe).

Badania kompostów pod kątem właściwości nawozowych oraz badania z użyciem roślin ozdobnych wskazują na możliwość dalszego wykorzystania kompostów jako produktu poprawiającego właściwości gleby w postaci polepszacza gleby lub nawozu organicznego czy składnika podłoża ogrodniczych.

Pomimo znaczącej detoksykacji kompostów dalsze badania powinny również koncentrować się na produktach przemian substancji zanieczyszczających i metabolitach grzybów. W przypadku, gdy dodatkiem do masy kompostowej będą odpady drzewne zanieczyszczone pentachlorofenolem, lindanem i WWA istnieje szansa, że zanieczyszczenie tymi substancjami zostanie zminimalizowane.

Przeprowadzone prace w stosunku do bieżącego stanu wiedzy przedsiębiorstwa i w porównaniu z dotychczas uzyskanymi wynikami przyczyniły się do optymalizacji parametrów kompostowania, szczegółowej obserwacji zmian w wielu aspektach dotąd nie rozpatrywanych. Zoptymalizowanie procesu kompostowania, zastosowanie osadów ściekowych, opracowanie szczepionki do kompostowania było istotnym *nowum* pracy. Charakterystyka kompostów jako produktu gotowego, w kontekście uzyskania nawozu organicznego lub polepszaczy gleb, a także zwiększenie udziału kompostu do 75% w podłożach ogrodniczych do uprawy jastrunia stanowią potwierdzenie, że opracowany model kompostowania wpłynął pozytywnie na modyfikacje dotychczasowych rozwiązań instytutu w zakresie kompostowania i bioremediacji uciążliwych odpadów drzewnych.

Obserwacje i działania wynikające z prowadzonych prac przyczyniły się do zidentyfikowania wielu dodatkowych wątków. Obszar badań nie wyczerpuje wszystkich pytań badawczych jakie stawiano sobie podczas pracy. Podjęte zostały dodatkowe badania i projekty naukowe poszerzające prowadzoną tematykę badań, na wiele pytań uzyskanie odpowiedzi wymaga dalszych badań i działań badawczych w szerokich interdyscyplinarnych zespołach badawczych dysponujących zaawansowaną aparaturą. Poszerzenie dotychczasowego know-how przedsiębiorstwa w zakresie kompostowania i bioremediacji uciążliwych odpadów drzewnych motywuje do dalszych działań na rzecz rozwoju tej dziedziny z korzyścią zarówno dla środowiska, jak i dla gospodarki.

Wnioski:

- Przygotowana technologia umożliwia kompostowanie odpadów drzewnych, także tych które mogą zawierać zanieczyszczenia pochodzące ze wybranych środków ochrony, jak pentachlorofenol (PCP), lindan lub związki z grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA),
- Warunkiem koniecznym zastosowania odpadów drzewnych do procesu kompostowania jest ocena zawartości substancji niebezpiecznych, zawartości metali ciężkich lub innych substancji niewłaściwych dla kompostów,
- Uzyskane komposty spełniły wymagania pod względem zawartości składników nawozowych (NPK),
- Uzyskane komposty z powodzeniem zastosowano w postaci dodatków do podłoży ogrodniczych w uprawie rośliny ozdobnej *Leucanthemum x superbum* 'Macaroon', dodatek kompostu stanowił substytut torfu w podłożu ogrodniczym, co może wpłynąć na zminimalizowanie użycia torfu do produkcji podłoży ogrodniczych i ochronę zasobów torfu,
- Komposty z odpadów drzewnych uzyskane według zaproponowanej metody kompostowania powinny znaleźć przyrodnicze zastosowanie do zasilania gleby w substancje odżywcze (NPK) oraz makro i mikroelementy, wytworzone według tej metody komposty powinny znaleźć zastosowanie jako środki poprawiające właściwości gleb, a przed zastosowaniem jako produkty powinny uzyskać odpowiednie opinie i pozwolenia zgodnie z zapisami regulującymi wprowadzanie do obrotu nawozów i nawożenie,
- Przed zastosowaniem kompostu z odpadów drzewnych powinny zostać wykonane badania określające jego parametry końcowe, aby zminimalizować szkody dla środowiska naturalnego, a także badania gleby na której zostaną zastosowane,
- Uzyskany model technologiczny kompostowania może zostać adaptowany do kompostowania odpadów drzewnych pochodzących z różnych strumieni rzeczywistych (powstających u źródła), a także może przyczynić się do zminimalizowania ilości odpadów drzewnych składowanych na składowiskach czy utylizowanych poprzez spalanie (Ryc. 54).

Wytyczne technologiczne i założenia technologiczne dla kompostowania:

1. Badania fizyko-chemiczne i optymalizacja składu chemicznego surowców do kompostowania (oznaczenie zawartości substancji niebezpiecznych w odpadach drzewnych i drewnopochodnych, brak zanieczyszczenia metalami ciężkimi, oznaczony stosunek C:N na początku kompostowania, korekta C/N do wartości 25:1 do 35:1)
2. Przygotowanie odpadów do kompostowania – odpowiednie rozdrobnienie, nawilżenie, dodatek materiałów korygujących
3. Proces kompostowania i kontrola warunków kompostowania
 - Utrzymanie przyzmy kompostowej w odpowiednich warunkach nawilżenia i natlenienia (wilgotność od 40% do 65%),
 - Kontrola procesu kompostowania poprzez nadzorowanie poziomu wilgotności i temperatury zagrzania przyzmy (do 70°C), odczynu pH
 - Etap 1 – kompostowanie masy kompostowej, inoculacja z użyciem szczepionki grzybowej po fazie termofilowej, napowietrzanie zgodnie z profilem temperaturowym procesu,
 - Etap 2 - dojrzewanie kompostu
4. Badania jakości kompostu – badania chemiczne, fizyko-chemiczne i fizyczne kompostu oraz Ocena przydatności wytworzonego kompostu jako nawozu organicznego lub środka polepszającego właściwości gleb zgodnie z obowiązującymi przepisami o wprowadzeniu do obrotu (uzyskanie niezbędnych dokumentów, opinii i pozwoleń),
5. Przygotowanie kompostu do wprowadzenia na rynek, Przesiewanie i/lub konfekcjonowanie kompostu, Zawracanie frakcji nadsitowej do ponownego kompostowania.

Efekty wdrożeniowe dla Instytutu wynikające ze zrealizowanych badań

Zrealizowane w ramach doktoratu wdrożeniowego badania są odpowiedzią na obecne potrzeby przemysłu związane z poszukiwaniem metod waloryzacji trudno zagospodarowalnych odpadów z tworzyw drzewnych, w tym także odpadów MDF. Dla polskiego i europejskiego sektora drzewnego wypracowanie realnych rozwiązań umożliwiających recykling odpadów drzewnych oraz płyt MDF stanowi pilne wyzwanie o zarówno środowiskowych, jak i ekonomicznych konsekwencjach.

Otrzymane w ramach realizacji doktoratu wyniki mają wysoki potencjał wdrożeniowy. W ramach współpracy z przemysłem przetestowano możliwość zastosowania odpadów drzewnych poprodukcyjnych powstających u źródła w procesie kompostowania, z możliwością uzyskania produktów kompostu jako składnika produktów nawozowych, takich jak polepszacz gleb lub składnika podłoży ogrodniczych do zastosowania w uprawie roślin ozdobnych.

Korzyści wynikające z realizacji pracy doktorskiej i efekty o potencjale wdrożeniowym:

- modelowanie technologii kompostowania z uwzględnieniem obecności zanieczyszczeń pochodzących ze środków ochrony drewna oraz z dodatkiem szczepionki grzybowej z grzybami białego rozkładu drewna, uzyskanie kompostów do celów nawozowych, jako składników podłoży ogrodniczych,

- przeprowadzenie procesu kompostowania umożliwiającego przekształcenie realnego strumienia drzewnych odpadów poprodukcyjnych zawierających odpady MDF, stanowiącego materiał wsadowy do procesu kompostowania i uzyskanie wartościowego kompostu do zastosowań jako substrat podłoży ogrodniczych (zgłoszenie patentowe nr Zgłoszenie patentowe nr P.453153, data zgłoszenia w Urzędzie Patentowym RP: 05.09.2025 r.),

- opracowanie szczepionki grzybowej do procesu kompostowania zdolnej do redukcji poziomu zanieczyszczeń obecnych w drzewnych odpadach użytkowych (zgłoszenie patentowe nr P.453154, data zgłoszenia w Urzędzie Patentowym RP: 05.09.2025 r.)

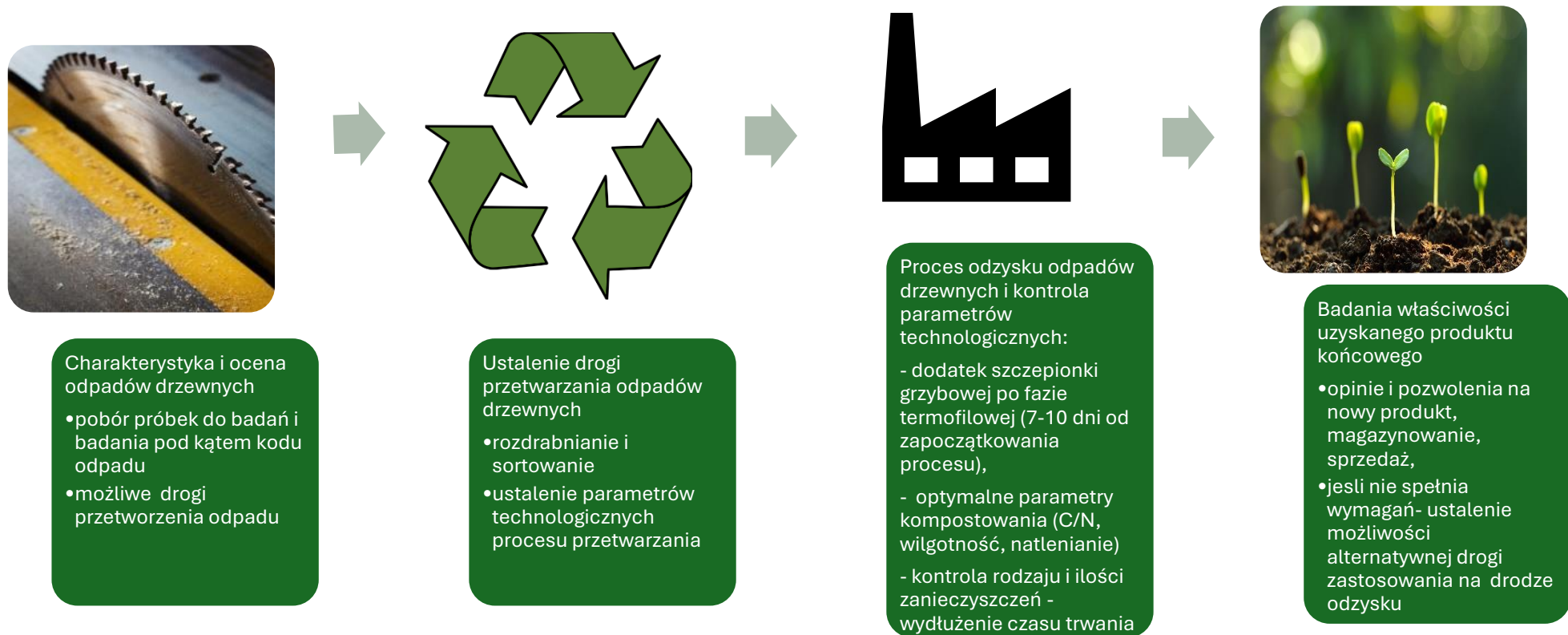
- poszerzenie know-how Instytutu na temat czynników i parametrów wpływających na proces kompostowania odpadów drzewnych, zanieczyszczonych substancjami niebezpiecznymi,

- poszerzenie oferty badawczo-komercjalizacyjnej Sieci Badawczej Łukasiewicz-Poznańskiego Instytutu Technologicznego o nowe zrównoważone technologie materiałowe

umożliwiające zagospodarowanie drzewnych odpadów poużytkowych i pozostałości poprodukcyjnych (zgodnie z ideą gospodarki cyrkularnej i kaskadowego zużycia drewna);

- kontynuacja badań nad kompostowaniem bazując na know-how wypracowanym w ramach przedmiotowego doktoratu wdrożeniowego w ramach projektu LIDER XIII (NCBR, kierownik projektu dr inż. Mateusz Sydow), tytuł projektu: „Utylizacja zużytych drewnianych podkładów kolejowych oraz innych elementów zabezpieczonych olejem kreozotowym z wykorzystaniem metod termicznych i biologicznych: selekcja technologii w oparciu o efektywność procesu i ocenę cyklu życia (LCA)”.

Przeprowadzone w ramach realizacji niniejszej pracy doktorskiej badania nie tylko umożliwiają bezpieczne przekształcenie uciążliwych i obciążonych substancjami niebezpiecznymi odpadów drzewnych w bezpieczne komposty, lecz także przyczyniają się do wydłużenia cyklu życia produktów drzewnych, zgodnie z ideą kaskadowego wykorzystania drewna.



Ryc. 54. Ogólny schemat postępowania z odpadami drzewnymi w aspektach gospodarki o obiegu zamkniętym – dla przykładu kończącego się wytworzeniem kompostu, nawozu lub polepszacza gleb (opracowanie własne, z wykorzystaniem zdjęć online CC Microsoft Office)

6. Literatura

- Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussos, S. i Thami Alami, I. (2018). Composting paremateres and compost quality: a literature review. *Org. Agr.*, strony 8:141-158.
- Bosso, L.; Cristinzio, G. (2014). A comprehensive overview of bacteria and fungi used for pentachlorophenol biodegradation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, strony 387-427. DOI:10.1007/s11157-014-9342-6.
- Braghiroli FL, P. L. (2020). Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities. *Current Forestry Reports* 6: 172–183. doi:DOI: 10.1007/s40725-020-00112-9
- Browning, B. (1967). *Methods of wood chemistry*. New York: Wiley.
- Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe #EUGreenDeal.*
- DYREKTYWA KOMISJI 2001/90/WE. (2001). Pobrano z lokalizacji <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001L0090&from=PL>
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/2413.
- Dziennik Ustaw 2024 poz. 1261 Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 sierpnia 2024 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu.* (brak daty). Pobrano z lokalizacji <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20240001261>
- Dz.U. 2020, poz.10: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20200000010>
- EPA. (2008, Września 25). Pobrano z lokalizacji https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/red_PC-025004_25-Sep-08.pdf
- EPA. (2016). Pobrano z lokalizacji <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-09/documents/pentachlorophenol.pdf>
- EPA. (2024). Pobrano z lokalizacji <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/creosote>
- EPF, 2018. EPF-Standard-for-recycled-wood-use. <https://europanel.org/wp-content/uploads/2018/09/EPF-Standard-for-recycled-wood-use.pdf>
- European Commision. (2015). *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Closing the loop - an EU action plan for the circular economy.* COM/2015/0614.
- Europejski Zielony Ład - rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/1119*, 11 grudnia 2019 r.

- Gaind, S., Nain, L. i Patel, V. (2009). Quality evaluation of co-composted wheat straw, poultry dropping and oil seed cakes. *Biodegradation*, strony 20:307-317.
- Grzywacz, A. (2023). Zgnilizny drewna. W M. Mańka, A. Grzywacz, *Fitopatologia leśna* (strony 559-608). Poznań: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.
- Haritash, A., Kaushik, C. (2009). Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review. *Journal of Hazardous Materials*, strony Volume 169, Issues 1–3, 30 September 2009, Pages 1-15.
- Healthy soils – new EU soil strategy in EU biodiversity strategy for 2030.* (brak daty). Pobrano z lokalizacji <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12634-New-EU-Soil-Strategy-healthy-soil-for-a-healthy-life>
- <https://www.umcs.pl/pl/phanerochaete-chrysosporium,22686.htm>. (dostęp: 27.09.2025).
- Irle, M. (2019). *Surfing the wave of MDF waste - Wood Based Panels*. Pobrano z lokalizacji <https://www.wbponline.com/features/surfing-the-wave-of-mdf-waste-7167612/>
- Jędrzcak, A. (2007). *Biologiczne Przetwarzanie Odpadów*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kirk, T. (1993). Basic research progress and applications in soil remediation and biopulping. W J. P. Kennedy, *Cellulosics: Pulp*,. New York, NY, USA: Ellis Horwood.
- Komorowicz, M., Janiszewska-Latterini, D., Przybylska-Balcerek, A. Stuper-Szablewska, K. (2023). Fungal Biotransformation of Hazardous Organic Compounds in Wood Waste. *Molecules* 28: 4823, strony DOI: 10.3390/molecules28124823.
- Krajewski, A., Witomski, P. (2005). Chemiczne środki ochrony drewna. W A. Krajewski i P. Witomski, *Ochrona drewna surowca i materiału* (strony 245-269). Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Łabętowicz, J., Stępień, W. (2020). Koncepcja gospodarki obiegu zamkniętego - przyrodniczy recykling odpadowych składników mineralnych. W J. Łabętowicz i W. Stępień, *Nawozy z odpadów jako źródło składników pokarmowych w nawożeniu roślin uprawnych. Rolnicze wykorzystanie odpadów i produktów ubocznych jako ogniwo gospodarki obiegu zamkniętego* (strony 13-27). Warszawa - Kielce: Wydawnictwo SGGW & Fundacja "Pro Civis".
- Marco-Urrea, E., Reddy, C. (2012). Degradation of Chloro-organic Pollutants by White Rot Fungi. W S. (. Singh, *Microbial Degradation of Xenobiotics. Environmental Science and Engineering* (strony Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23789-8_2).
- McAllister, K., Lee, H., Trevors, J. (1996, 7). Microbial degradation of pentachlorophenol. *Biodegradation*.
- Mishra, S., Lin, Z., Pang, S., Zhang, W., Bhatt, P., Chen, S. (2021). Recent Advanced Technologies for the Characterization of Xenobiotic-Degrading Microorganisms and Microbial Communities. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 9:632059., DOI: 10.3389/fbioe.2021.632059.

- Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 7 lipca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o odpadach.* (2023). Pobrano z lokalizacji r., Dz.U. 2023. poz. 1587: <https://api.sejm.gov.pl/eli/acts/DU/2023/1587/text.pdf>
- Ochrona naszych cennych torfowisk - Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.* (brak daty). Pobrano z lokalizacji <https://www.gov.pl/web/nfosigw/ochrona-naszyc-cenny-torfowisk>
- PN-EN 13432:2002 Opakowania - Wymagania dotyczące opakowań przydatnych do odzysku przez kompostowanie i biodegradację. Program badań i kryteria oceny do ostatecznej akceptacji opakowań
- Ratajczak, E., Szostak, A., Bidzińska, G. (2003). *Drewno użytkowe w Polsce*. Poznań: Wydawnictwo Instytutu Technologii Drewna.
- Ratajczak, E., Szostak, A., Bidzińska, G., Leszczyszyn, E. (2018, Vol. 61, No. 202). Market in wood by-products in Poland and their flows in the wood sector. *Wood*, strony DOI: 10.12841/wood.1644-3985.301.05.
- Rhodes, C. (2014, 26(3)). Mycoremediation (bioremediation with fungi) - growing mushrooms to clean the earth). *Chemical Speciation and Bioavailability*, strony 196-198.
- Rozporządzenie (MK), 2020: Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2020, poz. 10).*
- Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z 17.12.2021 r. w sprawie szczegółowych warunków zaliczania masy odpadów opakowaniowych do poddanych recyklingowi. (brak daty). str. <https://api.sejm.gov.pl/eli/acts/DU/2021/2365/text.pdf>.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10.* Pobrano z lokalizacji (Dz. U. 2015, poz. 132). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20150000132>
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i rady (EU) Nr 528/2012 z dnia 22 maja 2012 roku w sprawie udostępniania na rynku i stosowania produktów biobójczych.* (brak daty). Pobrano z lokalizacji <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0528>
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1009 z dnia 5 czerwca 2019 r. ustanawiające przepisy dotyczące udostępniania na rynku produktów nawozowych UE.* (2019). Pobrano z lokalizacji <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1009>
- Sanchez, C. (2009). Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnology Advances* 27, strony 185-194.
- Siuta, J., Wasiak, G. (2000). *Kompostowanie Odpadów I Użytkowanie Kompostu*. Warszawa: Monografia Instytutu Ochrony Środowiska.
- Struciński, P. (2009). 1,2,3,4,5,6-Heksachlorocykloheksan (techniczny). Dokumentacja dopuszczalnych wielkości narażenia zawodowego. *Podstawy I Metod. Oceny Sr. Pr.*, strony 3, 75-126.

- Szara, E. (2020). Potencjał nawozowy głównych odpadów w Polsce. W J. Łabętowicz i J. Stępień, *Nawozy z odpadów jako źródło składników pokarmowych w nawożeniu roślin uprawnych. Rolnicze wykorzystanie odpadów i produktów ubocznych jako ogniwo gospodarki obiegu zamkniętego*. (strony 29-69). Warszawa-Kielce: Wydawnictwo SGGW & Fundacja 'Pro Civis'.
- Szewczyk, R., Długoński, J. (2009, 63). Pentachlorophenol and spent engine oil degradation by *Mucor ramosissimus*. *International Biodeterioration and Biodegradation*, strony 123-129.
- Toxicological Profile for Hexachlorocyclohexane (HCH)*. (2024, Marzec). Pobrano z lokalizacji <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp43.pdf>
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., Orr, R. B. (2023). *Biologia Cambella*. Poznań: Dom Wydawniczy REBIS Sp. z o.o.
- USTAWA z dnia 17 listopada 2021 r. o zmianie ustawy o odpadach oraz niektórych innych ustaw, D. U.-r. (brak daty). *USTAWA z dnia 17 listopada 2021 r. o zmianie ustawy o odpadach oraz niektórych innych ustaw*. Pobrano z lokalizacji <https://www.infor.pl/akt-prawny/DZU.2021.330.0002151,ustawa-o-zmianie-ustawy-o-odpadach-oraz-niektorych-innych-ustaw.html>
- Vis, M., Mantau, U., Allen, B. (. (2016). *Study on the optimised cascading use of wood. No 394/PP/ENT/RCH/14/7689. Final report*. Brussels. DOI: [doi/10.2873/82710](https://doi.org/10.2873/82710)
- Wróblewska, H. (1995). Możliwości zastosowania biotechnologii w procesach przerobu drewna. *Prace Instytutu Technologii Drewna*, strony 70-80.
- Xiao, P., Kondo, R. (2019). Biodegradation and bioconversion of endrin by white rot fungi, *Phlebia acanthocystis* and *Phlebia brevispora*. *Mycoscience*, strony 255-261, DOI:10.1016/J.MYC.2019.04.004.
- Xiao, P., Kondo, R. (2020, 66:2). Biodegradation and biotransformation of pentachlorophenol by wood-decaying white rot fungus *Phlebia acanthocystis* TMIC34875. *Journal of Wood Science*.
- Xiao, P., Kondo, R. (2020). Potency of *Phlebia* species of white rot fungi for the aerobic degradation, transformation and mineralization of lindane. *Journal of Microbiology*, strony 395-404.
- Załącznik nr1. Katalog odpadów - Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. (Dz.U.2020, poz.10) w sprawie katalogu odpadów. (2020). W J. Łabętowicz i W. Stępień, *Nawozy z odpadów jako źródło składników pokarmowych w nawożeniu roślin uprawnych. Rolnicze wykorzystanie odpadów i produktów ubocznych jako ogniwo gospodarki obiegu zamkniętego* (strony 293-306). Warszawa - Kielce: Wydawnictwo SGGW & Fundacja "Pro Civis".
- Zawadzińska, A., Salachna, P., Nowak, J. S., Kowalczyk, W. (2021). Response of Interspecific Gerani-ums to Waste Wood Fiber Substrates and Additional Fertilization. *Agriculture*, str. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020119>.
- Zawadzińska, A., Salachna, P., Nowak, J. S., Kowalczyk, W., Piechocki, R., Łopusiewicz, Ł. i Pietrak, A. (2022). Compost Based on Pulp and PAPER Mill Sludge, Fruit-Vegetable

7. Wykaz tabel i rycin

Wykaz tabel

Tabela 1. Dopuszczalne poziomy zanieczyszczeń chemicznych w odpadach drzewnych i opakowaniach oraz w produktach nawozowych.....	16
Tabela 2. Wybrane odpady organiczne wskazywane jako nadające się do biologicznego przetwarzania	38
Tabela 3. Wymagania dla nawozów organicznych i organicznych polepszaczy gleb.....	49
Tabela 4. Wartości dopuszczalne zanieczyszczeń dla nawozu organicznego PFC 1(A) i organicznego polepszacza gleb PFC 3(A).....	50
Tabela 5. Składniki masy kompostowej w eksperymentach	58
Tabela 6. Oznaczone wartości ilorazu C/N w próbkach pobieranych podczas procesu kompostowania.....	71
Tabela 7. Stężenie ergosterolu w badanych próbkach kompostów w trakcie procesu kompostowania.....	87
Tabela 8. Liczba zidentyfikowanych wszystkich organizmów (ogółem) w próbkach pobieranych w trakcie procesu kompostowania.....	88
Tabela 9. Liczba zidentyfikowanych organizmów w próbkach pobieranych w trakcie procesu kompostowania.....	89
Tabela 10. Charakterystyka uzyskanych kompostów pod względem wartości nawozowych .	91
Tabela 11. Zawartość makroskładników w podłożach przed uprawą	101
Tabela 12. Zawartość makroskładników w podłożach po uprawie.....	102

Wykaz rycin

Ryc. 1. Podział środków ochrony drewna – kryterium cel stosowania (opracowanie własne na podstawie Krajewski i Witomski, 2005).	17
Ryc. 2. Podział środków ochrony drewna – kryterium działanie środka na organizmy żywe (opracowanie własne na podstawie Krajewski i Witomski, 2005).	19
Ryc. 3. Wzór strukturalny pentachlorofenolu	22
Ryc. 4. Wzór strukturalny lindanu	23
Ryc. 5. Przykładowe wzory wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych	25
Ryc. 6. Ogólny zapis przebiegu procesu fotosyntezy	30
Ryc. 7. Ogólny zapis przebiegu procesu rozkładu tlenowego materiałów organicznych na przykładzie procesu kompostowania	30
Ryc. 8. Ogólny schemat wykorzystania biomasy roślinnej i odpadów ulegających biodegradacji celem uzyskania kompostu i produktów nawozowych	31
Ryc. 9. Fazy kompostowania i ich najważniejsze aspekty (opracowanie własne na podstawie (Jędrzak, 2007). (Wysokość wierszy 1-3 odwzorowuje długość poszczególnych etapów) ...	33
Ryc. 10. Potencjalne ścieżki biodegradacji pentachlorofenolu z użyciem grzybów (opracowanie własne, opublikowane w Komorowicz i in., 2023)	44
Ryc. 11. Potencjalne ścieżki biodegradacji lindanu z użyciem grzybów (opracowanie własne, opublikowane w Komorowicz i in., 2023)	45
Ryc. 12. Potencjalne ścieżki biodegradacji pyrenu z użyciem grzybów jako przykład dla związków z grupy WWA (opracowanie własne, opublikowane w Komorowicz i in., 2023) ..	46
Ryc. 13. Metodologia pracy z uwzględnieniem poszczególnych etapów i badań	56
Ryc. 14. Etapy wytwarzania szczepionki grzybowej	59
Ryc. 15. <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon' – kwiatostan	66
Ryc. 16. Ukorzeniona sadzonka <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	67
Ryc. 17. Profile temperaturowe obserwowane w reaktorach podczas procesu kompostowania	69
Ryc. 18. Przepływ powietrza w reaktorach podczas procesu kompostowania	70
Ryc. 19. Zawartość substancji mineralnych (popiołu) w drewnie oraz w kompostach po procesie kompostowania	73
Ryc. 20. Zawartość substancji rozpuszczalnych w zimnej i w gorącej wodzie i ich suma oznaczona w próbkach drewna przed eksperymentem i w próbkach kompostu po procesie kompostowania	73
Ryc. 21. Zawartość substancji rozpuszczalnych w 1% NaOH oznaczona w w badanych próbkach (drewna i w kompostach po procesie kompostowania)	74
Ryc. 22. Zawartość celulozy w badanych próbkach (drewna i w kompostach po procesie kompostowania)	74
Ryc. 23. Zawartość ligniny nierozpuszczalnej w 72% H ₂ SO ₄ w badanych próbkach (drewna i w kompostach po procesie kompostowania)	75
Ryc. 24. Zawartość ligniny rozpuszczalnej w 72% H ₂ SO ₄ w badanych próbkach (drewna i w kompostach po procesie kompostowania)	75
Ryc. 25. Zawartość substancji ekstrahowanych w etanolu w badanych próbkach (drewna i w kompostach po procesie kompostowania)	76
Ryc. 26. Zawartość pentachlorofenolu w badanych próbkach (drewna znieczyszczonego i kompostów pobranych w trakcie procesu kompostowania)	79

Ryc. 27. Zawartość lindanu w drewnie sztucznie zanieczyszczonym i w próbkach kompostów pobranych w trakcie procesu kompostowania	79
Ryc. 28. Zawartość WWA (pirenu, benzo(a)antracenu, chryzenu, benzo(k)fluorantenu) w drewnie sztucznie zanieczyszczonym i w próbkach kompostów pobranych w trakcie procesu kompostowania.....	80
Ryc. 29. Zawartość WWA (naftalenu, fluorenu, fenantrenu) w drewnie sztucznie zanieczyszczonym i w próbkach kompostów pobranych w trakcie procesu kompostowania.	81
Ryc. 30. Zmiana stężenia fluorantenu w badanych próbkach (drewna zanieczyszczonego i kompostów pobranych w trakcie procesu kompostowania)	82
Ryc. 31. Suma WWA w badanych próbkach (drewna zanieczyszczonego i kompostów pobranych w trakcie procesu kompostowania)	82
Ryc. 32. Zmiana ogólnej liczby bakterii (OLB) w trakcie procesu kompostowania w badanych próbkach zanieczyszczonych kompostów (log jtk/g).....	85
Ryc. 33. Zmiana liczebności enterobakterii (log jtk/g) w trakcie procesu kompostowania w badanych próbkach zanieczyszczonych kompostów	85
Ryc. 34. Zmiana liczby pleśni (log jtk/g) w trakcie procesu kompostowania w badanych próbkach zanieczyszczonych kompostów po procesie kompostowania	86
Ryc. 35. Zmiana stężenia ergosterolu w trakcie procesu kompostowania w badanych próbkach zanieczyszczonych kompostów po procesie kompostowania	87
Ryc. 36. <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon' – rośliny po posadzeniu do doniczek	94
Ryc. 37. <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon' w fazie wegetatywnej	94
Ryc. 38. <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon' w trakcie kwitnienia	95
Ryc. 39. Wpływ kompostów na wysokość roślin <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon' ..	96
Ryc. 40. Wpływ kompostów na średnicę kwiatów <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	96
Ryc. 41. Wpływ kompostów na liczbę kwiatów <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	97
Ryc. 42. Wpływ kompostów na liczbę pąków <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	97
Ryc. 43. Wpływ kompostów na Indeks zazielenienia liści (SPAD) <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	98
Ryc. 44. Zawartość azotu (N-NO ₃) w podłożach przed uprawą i po uprawie <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	103
Ryc. 45. Zawartość fosforu w podłożach przed uprawą i po uprawie <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	104
Ryc. 46. Zawartość potasu w podłożach przed uprawą i po uprawie <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	105
Ryc. 47. Zawartość wapnia w podłożach przed uprawą i po uprawie <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	106
Ryc. 48. Zawartość magnezu w podłożach przed uprawą i po uprawie <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	107
Ryc. 49. Zawartość chlorków w podłożach przed uprawą i po uprawie <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	108
Ryc. 50. Zawartość cynku w podłożach przed uprawą i po uprawie <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	109
Ryc. 51. Zawartość miedzi w podłożach przed uprawą i po uprawie <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	110
Ryc. 52. Zawartość manganu w podłożach przed uprawą i po uprawie <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	111

Ryc. 53. Zawartość żelaza w podłożach przed uprawą i po uprawie <i>Leucanthemum x superbum</i> 'Macaroon'	112
Ryc. 54. Ogólny schemat postępowania z odpadami drzewnymi w aspektach gospodarki o obiegu zamkniętym –	119

8. Załączniki

Załącznik nr 1 - Tabele wyników badań genetycznych

Zidentyfikowane szczepy bakterii i grzybów w próbkach materiałów wykorzystanych do procesu kompostowania, w próbkach kompostów kontrolnych i w kompostach z zanieczyszczeniami w trakcie procesu kompostowania.

Załącznik nr 2 - Zgłoszenie patentowe 1

Zgłoszenie patentowe „Kompost na bazie odpadów poprodukcyjnych tworzyw drzewnych oraz sposób kompostowania odpadów drzewnych” w Urzędzie Patentowym RP.

Zgłoszenie patentowe nr P.453153, data zgłoszenia: 05.09.2025 r.

Załącznik nr 3 - Zgłoszenie patentowe 2

Zgłoszenie patentowe „Szczepionka grzybowa do kompostowania odpadów lignocelulozowych, sposób otrzymywania szczepionki grzybowej oraz zastosowanie szczepionki grzybowej do otrzymywania kompostu z obniżonym poziomem zanieczyszczeń” w Urzędzie Patentowym RP.

Zgłoszenie patentowe ma nadany nr P.453154, data zgłoszenia: 05.09.2025 r.

Załącznik nr 1

Szczegółowe wyniki badań genetycznych

Tabela Z1.1 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w osadzie ściekowym użytym do procesu kompostowania w reaktorach

Osad	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	5	6	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Micrococcaceae</i>	2	2	<i>Micrococcus</i> , <i>Arthrobacter</i>
	<i>Clostridiaceae</i>	5	6	<i>Clostridium botulinum</i> , <i>Clostridium perfringens</i> , <i>Clostridium difficile</i> , <i>Clostridium ghoni</i> , <i>Faecalibacterium prausnitzii</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	7	9	<i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas eutropha</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas mobilis</i> , <i>Nitrosomonas stercoris</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	1	<i>Azotobacter salinestrus</i>
	<i>Achromobacter</i>	2	2	<i>Alcaligenes faecalis</i> , <i>Achromobacter xylosoxidans</i> ,
	<i>Fusobacteriaceae</i>	1	1	<i>Fusobacterium nucleatum</i>
	<i>Streptococcaceae</i>	4	5	<i>Streptococcus pyogenes</i> , <i>Streptococcus agalactiae</i> , <i>Streptococcus pneumoniae</i> , <i>Streptococcus viridans</i>
	<i>Bacillus</i>	9	11	<i>Bacillus thermocatenulatus</i> , <i>Bacillus badius</i> , <i>Bacillus stearothermophilus</i> , <i>Bacillus caldoolyolyticus</i> , <i>Bacillus fusiformis</i> , <i>Bacillus thermoleovorans</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus pumilus</i> , <i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	2	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>

	<i>Enterobacteriaceae</i>	18	22	<i>Enterobacter, Escherichia (Escherichia coli), Klebsiella, Morganella, Citrobacter, Pantoea, Pectobacterium, Proteus, Salmonella (Salmonella typhi, Salmonella paratyphi), Serratia, Shigella, Xenorhabdus, Yersinia, Cronobacter, Edwardsiella, Erwinia, Providencia</i>
	<i>Lactobacillus</i>	4	5	<i>Lactobacillus panis, Lactobacillus confusus, Lactobacillus casei, Lactobacillus reuteri</i>
	<i>Clostridium</i>	1	1	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Microbispora</i>	1	1	<i>Microbispora bispora</i>
	<i>Streptomyces</i>	2	2	<i>Streptomyces nodosus, Streptomyces thermodiastaticus</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	2	2	<i>Staphylococcus epidermidis, Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	1	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Vibrionaceae</i>	2	2	<i>Vibrio cholerae, Vibrio vulnificus</i>
	<i>Bacteroidaceae</i>	1	1	<i>Bacteroides fragilis</i>
	<i>Legionellaceae</i>	1	1	<i>Legionella pneumophila</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	1	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Ruminococcaceae</i>	1	1	<i>Ruminococcus flavefaciens</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	7	9	<i>Nitrosomonas europaea, Nitrosomonas cryotolerans, Nitrosomonas eutropha, Nitrosomonas halophila, Nitrosomonas mobilis, Nitrosomonas stercoris, Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	1	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	81		
Grzyby	<i>Candida</i>	4	10	<i>Candida krusei, Candida tropicalis, Ca. promineofilum breve, Candida albicans</i>
	<i>Trichophyton</i>	4	10	<i>Trichophyton ajelloi, Trichophyton equinum, Trichophyton terrestre, Trichophyton verrucosum</i>
	<i>Microsporium</i>	3	8	<i>Microsporium audouinii, Microsporium boullardii, Microsporium fulvum</i>

	<i>Rhizopus</i>	3	8	<i>Rhizopus culmorum</i> , <i>Rhizopus lyococcus</i> , <i>Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	10	<i>Mucor flavus</i> , <i>Mucor fragilis</i> , <i>Mucor mucedo</i> , <i>Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	3	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	4	10	<i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus multicolor</i> , <i>Aspergillus niger</i> ,
	<i>Penicillium</i>	3	8	<i>Penicillium citrinum</i> , <i>Penicillium janczewskii</i> , <i>Penicillium oxalicum</i>
	<i>Geotrichum</i>	1	3	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	1	3	<i>Cladosporium werneckii</i>
	<i>Alternaria</i>	1	3	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	4	10	<i>Fusarium culmorum</i> , <i>Fusarium graminearum</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Fusarium oxysporum</i>
	<i>Stachybotrys</i>	2	5	<i>Stachybotrys atrus</i> , <i>Stachybotrys atrogriseus</i> Ellis & Everh,
	<i>Phialophora</i>	4	10	<i>Phialophora richardsiae</i> <i>Phialophora cinerescens</i> (Wollenw.) J,F,H, Beyma 1940 <i>Phialophora cyclaminis</i> J,F,H, Beyma 1942 <i>Phialophora verrucosa</i> Medlar 1915
	SUMA	39		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	122	%	
	bakterie	81	66,4	
	grzyby	39	32,0	
	promieniowce	2	1,6	

Tabela Z1.2 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce słomy użytej do procesu kompostowania w reaktorach

Słoma (Jęczmień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Grzyby	<i>Aspergillus</i>	6	33	<i>Aspergillus ochraceus, Aspergillus flavus, Aspergillus fumigatus, Aspergillus multicolor, Aspergillus niger, Aspergillus versicolor</i>
	<i>Penicillium</i>	5	28	<i>Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum, Penicillium janczewskii, Penicillium verrucosum, Penicillium italicum,</i>
	<i>Cladosporium</i>	3	17	<i>Cladosporium oxysporum, Cladosporium soldanellae, Cladosporium herbarum,</i>
	<i>Alternaria</i>	1	6	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	2	11	<i>Fusarium graminearum, Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	1	6	<i>Oospora chartarum (Ehrenb.) Wallr,</i>
	SUMA		18	

Tabela Z1.3 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce odpadów drzewnych użytych do procesu kompostowania w reaktorach

Odpady drzewne	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Grzyby	<i>Penicillium</i>	1	50	<i>Penicillium expansum</i>
	<i>Aspergillus</i>	1	50	<i>Aspergillus niger</i>

Tabela Z1.4 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce zmieszanych składników użytych do procesu kompostowania (stan początkowy)

Kompost (mix – stan początkowy)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	5	6	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Micrococcaceae</i>	2	2	<i>Micrococcus</i> , <i>Arthrobacter</i>
	<i>Clostridiaceae</i>	5	6	<i>Clostridium botulinum</i> , <i>Clostridium perfringens</i> , <i>Clostridium difficile</i> , <i>Clostridium ghoni</i> , <i>Faecalibacterium prausnitzii</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	7	9	<i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas eutropha</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas mobilis</i> , <i>Nitrosomonas stercoris</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	1	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Achromobacter</i>	2	2	<i>Alcaligenes faecalis</i> , <i>Achromobacter xylosoxidans</i> ,
	<i>Fusobacteriaceae</i>	1	1	<i>Fusobacterium nucleatum</i>
	<i>Streptococcaceae</i>	4	5	<i>Streptococcus pyogenes</i> , <i>Streptococcus agalactiae</i> , <i>Streptococcus pneumoniae</i> , <i>Streptococcus viridans</i>
	<i>Bacillus</i>	9	11	<i>Bacillus thermocatenulatus</i> , <i>Bacillus badius</i> , <i>Bacillus stearothermophilus</i> , <i>Bacillus caldoolyolyticus</i> , <i>Bacillus fusiformis</i> , <i>Bacillus thermoleovorans</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus pumilus</i> , <i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	2	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	18	22	<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia (Escherichia coli)</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Morganella</i> , <i>Citrobacter</i> , <i>Pantoea</i> , <i>Pectobacterium</i> , <i>Proteus</i> , <i>Salmonella (Salmonella typhi, Salmonella paratyphi)</i> , <i>Serratia</i> , <i>Shigella</i> , <i>Xenorhabdus</i> , <i>Yersinia</i> , <i>Cronobacter</i> , <i>Edwardsiella</i> , <i>Erwinia</i> , <i>Providencia</i>
	<i>Lactobacillus</i>	4	5	<i>Lactobacillus panis</i> , <i>Lactobacillus confusus</i> , <i>Lactobacillus casei</i> , <i>Lactobacillus reuteri</i>

	<i>Clostridium</i>	1	1	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Microbispora</i>	1	1	<i>Microbispora bispora</i>
	<i>Streptomyces</i>	2	2	<i>Streptomyces nodosus</i> , <i>Streptomyces thermodiastaticus</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	2	2	<i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	1	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Vibrionaceae</i>	2	2	<i>Vibrio cholerae</i> , <i>Vibrio vulnificus</i>
	<i>Bacteroidaceae</i>	1	1	<i>Bacteroides fragilis</i>
	<i>Legionellaceae</i>	1	1	<i>Legionella pneumophila</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	1	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Ruminococcaceae</i>	1	1	<i>Ruminococcus flavefaciens</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	7	9	<i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas eutropha</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas mobilis</i> , <i>Nitrosomonas stercoris</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	1	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	81		
Grzyby	<i>Candida</i>	4	8	<i>Candida krusei</i> , <i>Candida tropicalis</i> , <i>Ca. promineofilum breve</i> , <i>Candida albicans</i>
	<i>Trichophyton</i>	4	8	<i>Trichophyton ajelloi</i> , <i>Trichophyton equinum</i> , <i>Trichophyton terrestre</i> , <i>Trichophyton verrucosum</i>
	<i>Microsporium</i>	3	6	<i>Microsporium audouinii</i> , <i>Microsporium boullardii</i> , <i>Microsporium fulvum</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	6	<i>Rhizopus culmorum</i> , <i>Rhizopus lycococcus</i> , <i>Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	8	<i>Mucor flavus</i> , <i>Mucor fragilis</i> , <i>Mucor mucedo</i> , <i>Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	2	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	6	13	<i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus multicolor</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus versicolor</i>
	<i>Penicillium</i>	5	10	<i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium expansum</i> , <i>Penicillium janczewskii</i> , <i>Penicillium verrucosum</i> , <i>Penicillium italicum</i> ,
	<i>Geotrichum</i>	1	2	<i>Geotrichum candidum</i>
<i>Cladosporium</i>	4	8	<i>Cladosporium werneckii</i> , <i>Cladosporium oxysporum</i> , <i>Cladosporium soldanellae</i> , <i>Cladosporium herbarum</i> ,	

	<i>Alternaria</i>	1	2	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	10	<i>Fusarium culmorum</i> , <i>Fusarium graminearum</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	3	6	<i>Stachybotrys atrus</i> , <i>Stachybotrys atrogriseus</i> Ellis & Everh., <i>Oospora chartarum</i> (Ehrenb.) Wallr,
	<i>Phialophora</i>	4	8	<i>Phialophora richardsiae</i> , <i>Phialophora cinerescens</i> (Wollenw.) J,F,H, Beyma 1940, <i>Phialophora cyclaminis</i> J,F,H, Beyma 1942, <i>Phialophora verrucosa</i> Medlar 1915
	SUMA	48		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	131	%	
	bakterie	81	61,8	
	grzyby	48	59,3	
	promieniowce	2	4,2	

Tabela Z1.5 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu (kontrola 1) w 9 dniu kompostowania

Kontrola 1 (9 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowany ch gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	4	7	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Micrococcaceae</i>	2	3	<i>Micrococcus</i> , <i>Arthrobacter</i>
	<i>Clostridiaceae</i>	2	3	<i>Clostridium botulinum</i> , <i>Clostridium difficile</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	4	7	<i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	2	<i>Azotobacter salinestrus</i>
	<i>Achromobacter</i>	2	3	<i>Alcaligenes faecalis</i> , <i>Achromobacter xylosoxidans</i> ,
	<i>Streptococcaceae</i>	1	2	<i>Streptococcus agalactiae</i>
	<i>Bacillus</i>	7	12	<i>Bacillus thermocatenulatus</i> , <i>Bacillus badius</i> , <i>Bacillus</i> <i>stearothermophilus</i> , <i>Bacillus caldoxylolyticus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus pumilus</i> , <i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	3	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	18	31	<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia</i> (<i>Escherichia coli</i>), <i>Klebsiella</i> , <i>Morganella</i> , <i>Citrobacter</i> , <i>Pantoea</i> , <i>Pectobacterium</i> , <i>Proteus</i> , <i>Salmonella</i> (<i>Salmonella typhi</i> , <i>Salmonella paratyphi</i>), <i>Serratia</i> , <i>Shigella</i> , <i>Xenorhabdus</i> , <i>Yersinia</i> , <i>Cronobacter</i> , <i>Edwardsiella</i> , <i>Erwinia</i> , <i>Providencia</i>
	<i>Lactobacillus</i>	3	5	<i>Lactobacillus panis</i> , <i>Lactobacillus casei</i> , <i>Lactobacillus reuteri</i>
	<i>Clostridium</i>	1	2	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Streptomyces</i>	2	3	<i>Streptomyces nodosus</i> , <i>Streptomyces thermodiastaticus</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	2	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	2	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Vibrionaceae</i>	2	3	<i>Vibrio cholerae</i> , <i>Vibrio vulnificus</i>
<i>Bacteroidaceae</i>	1	2	<i>Bacteroides fragilis</i>	

	<i>Legionellaceae</i>	1	2	<i>Legionella pneumophila</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	2	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	2	3	<i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	2	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	59		
	<i>Candida</i>	4	8	<i>Candida krusei</i> , <i>Candida tropicalis</i> , <i>Ca. promineofilum breve</i> , <i>Candida albicans</i>
	<i>Trichophyton</i>	4	8	<i>Trichophyton ajelloi</i> , <i>Trichophyton equinum</i> , <i>Trichophyton terrestre</i> , <i>Trichophyton verrucosum</i>
	<i>Microsporium</i>	3	6	<i>Microsporium audouinii</i> , <i>Microsporium boullardii</i> , <i>Microsporium fulvum</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	6	<i>Rhizopus culmorum</i> , <i>Rhizopus lyococcus</i> , <i>Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	8	<i>Mucor flavus</i> , <i>Mucor fragilis</i> , <i>Mucor mucedo</i> , <i>Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	2	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	6	13	<i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus multicolor</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus versicolor</i>
	<i>Penicillium</i>	5	10	<i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium expansum</i> , <i>Penicillium janczewskii</i> , <i>Penicillium verrucosum</i> , <i>Penicillium italicum</i> ,
	<i>Geotrichum</i>	1	2	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	4	8	<i>Cladosporium werneckii</i> , <i>Cladosporium oxysporum</i> , <i>Cladosporium soldanellae</i> , <i>Cladosporium herbarum</i> ,
	<i>Alternaria</i>	1	2	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	10	<i>Fusarium culmorum</i> , <i>Fusarium graminearum</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	3	6	<i>Stachybotrys atrus</i> , <i>Stachybotrys atrogriseus</i> Ellis & Everh., <i>Oospora chartarum</i> (Ehrenb.) Wallr.
	<i>Phialophora</i>	4	8	<i>Phialophora richardsiae</i> <i>Phialophora cinerescens</i> (Wollenw.) J.F.H. Beyma 1940 <i>Phialophora cyclaminis</i> J.F.H. Beyma 1942 <i>Phialophora verrucosa</i> Medlar 1915
Grzyby	SUMA	48		

Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	109	%	
	bakterie	59	54,1	
	grzyby	48	44,0	
	promieniowce	2	1,8	

Tabela Z1.6 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu (kontrola 1) w 15 dniu kompostowania

Kontrola 1 (15 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	4	8	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Micrococcaceae</i>	2	4	<i>Micrococcus</i> , <i>Arthrobacter</i>
	<i>Clostridiaceae</i>	2	4	<i>Clostridium botulinum</i> , <i>Clostridium difficile</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	4	8	<i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	2	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Achromobacter</i>	1	2	<i>Alcaligenes faecalis</i>
	<i>Streptococcaceae</i>	1	2	<i>Streptococcus agalactiae</i>
	<i>Bacillus</i>	7	13	<i>Bacillus thermocatenulatus</i> , <i>Bacillus badius</i> , <i>Bacillus</i> <i>stearothermophilus</i> , <i>Bacillus caldoxylolyticus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus pumilus</i> , <i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	4	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	14	26	<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia</i> (<i>Escherichia coli</i>), <i>Pectobacterium</i> , <i>Proteus</i> , <i>Salmonella</i> (<i>Salmonella typhi</i> , <i>Salmonella paratyphi</i>), <i>Serratia</i> , <i>Shigella</i> , <i>Xenorhabdus</i> , <i>Yersinia</i> , <i>Cronobacter</i> , <i>Edwardsiella</i> , <i>Erwinia</i> , <i>Providencia</i>
	<i>Lactobacillus</i>	3	6	<i>Lactobacillus panis</i> , <i>Lactobacillus casei</i> , <i>Lactobacillus reuteri</i>
	<i>Clostridium</i>	1	2	<i>Clostridium thermolacticum</i>
		2	4	<i>Streptomyces nodosus</i> , <i>Streptomyces thermodiastaticus</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	2	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	2	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Vibrionaceae</i>	1	2	<i>Vibrio cholerae</i>
	<i>Bacteroidaceae</i>	1	2	<i>Bacteroides fragilis</i>
<i>Legionellaceae</i>	1	2	<i>Legionella pneumophila</i>	

	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	2	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	2	4	<i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	2	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	53		
Grzyby	<i>Candida</i>	4	8	<i>Candida krusei</i> , <i>Candida tropicalis</i> , <i>Ca. promineofilum breve</i> , <i>Candida albicans</i>
	<i>Trichophyton</i>	4	8	<i>Trichophyton ajelloi</i> , <i>Trichophyton equinum</i> , <i>Trichophyton terrestre</i> , <i>Trichophyton verrucosum</i>
	<i>Microsporium</i>	3	6	<i>Microsporium audouinii</i> , <i>Microsporium boullardii</i> , <i>Microsporium fulvum</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	6	<i>Rhizopus culmorum</i> , <i>Rhizopus lyococcus</i> , <i>Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	8	<i>Mucor flavus</i> , <i>Mucor fragilis</i> , <i>Mucor mucedo</i> , <i>Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	2	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	6	13	<i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus multicolor</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus versicolor</i>
	<i>Penicillium</i>	5	10	<i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium expansum</i> , <i>Penicillium janczewskii</i> , <i>Penicillium verrucosum</i> , <i>Penicillium italicum</i> ,
		1	2	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	4	8	<i>Cladosporium werneckii</i> , <i>Cladosporium oxysporum</i> , <i>Cladosporium soldanellae</i> , <i>Cladosporium herbarum</i> ,
	<i>Alternaria</i>	1	2	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	10	<i>Fusarium culmorum</i> , <i>Fusarium graminearum</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	3	6	<i>Stachybotrys atrus</i> , <i>Stachybotrys atrogriseus</i> Ellis & Everh., <i>Oospora chartarum</i> (Ehrenb.) Wallr.
			<i>Phialophora richardsiae</i> <i>Phialophora cinerescens</i> (Wollenw.) J.F.H. Beyma 1940 <i>Phialophora cyclaminis</i> J.F.H. Beyma 1942 <i>Phialophora verrucosa</i> Medlar 1915	
	SUMA	48		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	

	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	103	%	
	bakterie	53	51,5	
	grzyby	48	46,6	
	promieniowce	2	1,9	

Tabela Z1.7 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu (kontrola 1) w 28 dniu kompostowania

Kontrola 1 (28 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	4	10	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Micrococcaceae</i>	2	3	<i>Micrococcus</i> , <i>Arthrobacter</i>
	<i>Clostridiaceae</i>	2	3	<i>Clostridium botulinum</i> , <i>Clostridium difficile</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	4	7	<i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	2	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Achromobacter</i>	1	2	<i>Alcaligenes faecalis</i>
	<i>Streptococcaceae</i>	1	2	<i>Streptococcus agalactiae</i>
	<i>Bacillus</i>	7	12	<i>Bacillus thermocatenulatus</i> , <i>Bacillus badius</i> , <i>Bacillus</i> <i>stearothermophilus</i> , <i>Bacillus caldoxylyolyticus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus pumilus</i> , <i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	3	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	5	8	<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia</i> (<i>Escherichia coli</i>), <i>Pectobacterium</i> , <i>Salmonella</i> (<i>Salmonella typhi</i> , <i>Salmonella paratyphi</i>)
	<i>Lactobacillus</i>	3	5	<i>Lactobacillus panis</i> , <i>Lactobacillus casei</i> , <i>Lactobacillus reuteri</i>
	<i>Clostridium</i>	1	2	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	2	<i>Staphylococcus aureus</i>

	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	2	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Vibrionaceae</i>	1	2	<i>Vibrio cholerae</i>
	<i>Bacteroidaceae</i>	1	2	<i>Bacteroides fragilis</i>
	<i>Legionellaceae</i>	1	2	<i>Legionella pneumophila</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	2	<i>Helicobacter pylori</i>
	SUMA	39		
Grzyby	<i>Candida</i>	4	8	<i>Candida krusei</i> , <i>Candida tropicalis</i> , <i>Ca. promineofilum breve</i> , <i>Candida albicans</i>
	<i>Trichophyton</i>	4	8	<i>Trichophyton ajelloi</i> , <i>Trichophyton equinum</i> , <i>Trichophyton terrestre</i> , <i>Trichophyton verrucosum</i>
	<i>Microsporum</i>	3	6	<i>Microsporum audouinii</i> , <i>Microsporum boullardii</i> , <i>Microsporum fulvum</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	6	<i>Rhizopus culmorum</i> , <i>Rhizopus lycococcus</i> , <i>Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	8	<i>Mucor flavus</i> , <i>Mucor fragilis</i> , <i>Mucor mucedo</i> , <i>Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	2	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	6	13	<i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus multicolor</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus versicolor</i>
	<i>Penicillium</i>	5	10	<i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium expansum</i> , <i>Penicillium janczewskii</i> , <i>Penicillium verrucosum</i> , <i>Penicillium italicum</i> ,
	<i>Geotrichum</i>	1	2	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	4	8	<i>Cladosporium werneckii</i> , <i>Cladosporium oxysporum</i> , <i>Cladosporium soldanellae</i> , <i>Cladosporium herbarum</i> ,
	<i>Alternaria</i>	1	2	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	10	<i>Fusarium culmorum</i> , <i>Fusarium graminearum</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	3	6	<i>Stachybotrys atrus</i> , <i>Stachybotrys atrogriseus</i> Ellis & Everh., <i>Oospora chartarum</i> (Ehrenb.) Wallr.
<i>Phialophora</i>	4	8	<i>Phialophora richardsiae</i> <i>Phialophora cinerescens</i> (Wollenw.) J.F.H. Beyma 1940 <i>Phialophora cyclaminis</i> J.F.H. Beyma 1942 <i>Phialophora verrucosa</i> Medlar 1915	

	SUMA	48		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	89	%	
	bakterie	39	43,8	
	grzyby	48	53,9	
	promieniowce	2	2,2	

Tabela Z1.8 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu I (kontrola 1) po dojrzeniu

Kontrola I	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	4	2	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Micrococcaceae</i>	2	3	<i>Micrococcus</i> , <i>Arthrobacter</i>
	<i>Clostridiaceae</i>	2	3	<i>Clostridium botulinum</i> , <i>Clostridium difficile</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	4	7	<i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	2	<i>Azotobacter salinestrus</i>
	<i>Achromobacter</i>	1	2	<i>Alcaligenes faecalis</i>
	<i>Streptococcaceae</i>	1	2	<i>Streptococcus agalactiae</i>
	<i>Bacillus</i>	1	2	<i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	3	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	5	8	<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia (Escherichia coli)</i> , <i>Pectobacterium</i> , <i>Salmonella (Salmonella typhi, Salmonella paratyphi)</i>

	<i>Lactobacillus</i>	3	5	<i>Lactobacillus panis, Lactobacillus casei, Lactobacillus reuteri</i>
	<i>Clostridium</i>	1	2	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	2	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	2	<i>Campylobacter jejuni</i>
	SUMA	29		
Grzyby	<i>Candida</i>	4	7	<i>Candida krusei, Candida tropicalis, Ca. promineofilum breve, Candida albicans</i>
	<i>Trichophyton</i>	4	7	<i>Trichophyton ajelloi, Trichophyton equinum, Trichophyton terrestre, Trichophyton verrucosum</i>
	<i>Microsporum</i>	3	5	<i>Microsporum audouinii, Microsporum boullardii, Microsporum fulvum</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	5	<i>Rhizopus culmorum, Rhizopus lyococcus, Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	7	<i>Mucor flavus, Mucor fragilis, Mucor mucedo, Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	2	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	6	10	<i>Aspergillus ochraceus, Aspergillus flavus, Aspergillus fumigatus, Aspergillus multicolor, Aspergillus niger, Aspergillus versicolor</i>
	<i>Penicillium</i>	5	8	<i>Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum, Penicillium janczewskii, Penicillium verrucosum, Penicillium italicum,</i>
	<i>Geotrichum</i>	1	2	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	4	7	<i>Cladosporium werneckii, Cladosporium oxysporum, Cladosporium soldanellae, Cladosporium herbarum,</i>
	<i>Alternaria</i>	1	2	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	8	<i>Fusarium culmorum, Fusarium graminearum, Fusarium solani, Fusarium oxysporum, Fusarium langsethiae</i>
<i>Stachybotrys</i>	1	2	<i>Stachybotrys atrus</i>	
	SUMA	42		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	73	%	
	bakterie	29	39,7	

	grzyby	42	57,5	
	promieniowce	2	2,7	

Tabela Z1.9 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu (kontrola 2) w 9 dniu kompostowania

Kontrola 2 (9 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowany ch gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	4	7	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Micrococcaceae</i>	2	4	<i>Micrococcus</i> , <i>Arthrobacter</i>
	<i>Clostridiaceae</i>	2	4	<i>Clostridium botulinum</i> , <i>Clostridium difficile</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	4	7	<i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	2	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Achromobacter</i>	2	4	<i>Alcaligenes faecalis</i> , <i>Achromobacter xylosoxidans</i> ,
	<i>Streptococcaceae</i>	1	2	<i>Streptococcus agalactiae</i>
	<i>Bacillus</i>	6	11	<i>Bacillus thermocatenulatus</i> , <i>Bacillus stearothermophilus</i> , <i>Bacillus caldoolyolyticus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus pumilus</i> , <i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	4	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	14		<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia</i> (<i>Escherichia coli</i>), <i>Klebsiella</i> , <i>Morganella</i> , <i>Citrobacter</i> , <i>Pectobacterium</i> , <i>Proteus</i> , <i>Salmonella</i> (<i>Salmonella typhi</i> , <i>Salmonella paratyphi</i>), <i>Xenorhabdus</i> , <i>Yersinia</i> , <i>Cronobacter</i> , <i>Edwardsiella</i> , <i>Erwinia</i>
	<i>Lactobacillus</i>	3	6	<i>Lactobacillus panis</i> , <i>Lactobacillus casei</i> , <i>Lactobacillus reuteri</i>
	<i>Clostridium</i>	1	2	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Streptomyces</i>	2	4	<i>Streptomyces nodosus</i> , <i>Streptomyces thermodiastaticus</i>

	<i>Staphylococcaceae</i>	1	2	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	2	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Vibrionaceae</i>	2	4	<i>Vibrio cholerae, Vibrio vulnificus</i>
	<i>Bacteroidaceae</i>	1	2	<i>Bacteroides fragilis</i>
	<i>Legionellaceae</i>	1	2	<i>Legionella pneumophila</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	2	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	2	4	<i>Nitrosomonas europaea, Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	2	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	54		
Grzyby	<i>Candida</i>	4	8	<i>Candida krusei, Candida tropicalis, Ca. promineofilum breve, Candida albicans</i>
	<i>Trichophyton</i>	4	8	<i>Trichophyton ajelloi, Trichophyton equinum, Trichophyton terrestre, Trichophyton verrucosum</i>
	<i>Microsporium</i>	3	6	<i>Microsporium audouinii, Microsporium boullardii, Microsporium fulvum</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	6	<i>Rhizopus culmorum, Rhizopus lyococcus, Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	8	<i>Mucor flavus, Mucor fragilis, Mucor mucedo, Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	2	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	6	13	<i>Aspergillus ochraceus, Aspergillus flavus, Aspergillus fumigatus, Aspergillus multicolor, Aspergillus niger, Aspergillus versicolor</i>
	<i>Penicillium</i>	5	10	<i>Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum, Penicillium janczewskii, Penicillium verrucosum, Penicillium italicum,</i>
	<i>Geotrichum</i>	1	2	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	4	8	<i>Cladosporium werneckii, Cladosporium oxysporum, Cladosporium soldanellae, Cladosporium herbarum,</i>
	<i>Alternaria</i>	1	2	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	10	<i>Fusarium culmorum, Fusarium graminearum, Fusarium solani, Fusarium oxysporum, Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	3	6	<i>Stachybotrys atrus, Stachybotrys atrogriseus Ellis & Everh., Oospora chartarum (Ehrenb.) Wallr.</i>
	<i>Phialophora</i>	4	8	<i>Phialophora richardsiae</i>

				<i>Phialophora cinerescens</i> (Wollenw.) J.F.H. Beyma 1940 <i>Phialophora cyclaminis</i> J.F.H. Beyma 1942 <i>Phialophora verrucosa</i> Medlar 1915
	SUMA	48		
Promieniowce	Pseudonocardia	1	50	
	Rhodococcus	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	104	%	
	bakterie	54	51,9	
	grzyby	48	46,2	
	promieniowce	2	1,9	

Tabela Z1.10 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu (kontrola 2) w 15 dniu kompostowania

Kontrola 2 (15 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	2	5	<i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Micrococcaceae</i>	2	5	<i>Micrococcus</i> , <i>Arthrobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	4	10	<i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	2	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Streptococcaceae</i>	1	2	<i>Streptococcus agalactiae</i>
	<i>Bacillus</i>	6	14	<i>Bacillus thermocatenulatus</i> , <i>Bacillus stearothermophilus</i> , <i>Bacillus caldoolyolyticus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus pumilus</i> , <i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	5	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>

	<i>Enterobacteriaceae</i>	14	33	<i>Enterobacter, Escherichia (Escherichia coli), Klebsiella, Morganella, Citrobacter, Pectobacterium, Proteus, Salmonella (Salmonella typhi, Salmonella paratyphi), Xenorhabdus, Yersinia, Cronobacter, Edwardsiella, Erwinia</i>
	<i>Lactobacillus</i>	3	7	<i>Lactobacillus panis, Lactobacillus casei, Lactobacillus reuteri</i>
	<i>Clostridium</i>	1	2	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	2	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	2	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	2	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	2	5	<i>Nitrosomonas europaea, Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	2	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	42		
Grzyby	<i>Candida</i>	4	11	<i>Candida krusei, Candida tropicalis, Ca. promineofilum breve, Candida albicans</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	8	<i>Rhizopus culmorum, Rhizopus lycococcus, Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	11	<i>Mucor flavus, Mucor fragilis, Mucor mucedo, Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	3	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	6	16	<i>Aspergillus ochraceus, Aspergillus flavus, Aspergillus fumigatus, Aspergillus multicolor, Aspergillus niger, Aspergillus versicolor</i>
	<i>Penicillium</i>	5	14	<i>Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum, Penicillium janczewskii, Penicillium verrucosum, Penicillium italicum,</i>
	<i>Geotrichum</i>	1	3	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	4	11	<i>Cladosporium werneckii, Cladosporium oxysporum, Cladosporium soldanellae, Cladosporium herbarum,</i>
	<i>Alternaria</i>	1	3	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	14	<i>Fusarium culmorum, Fusarium graminearum, Fusarium solani, Fusarium oxysporum, Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	3	8	<i>Stachybotrys atrus, Stachybotrys atrogriseus Ellis & Everh., Oospora chartarum (Ehrenb.) Wallr.</i>
	SUMA	37		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	

	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	81	%	
	bakterie	42	52	
	grzyby	37	46	
	promieniowce	2	2	

Tabela Z1.11 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu (kontrola 2) w 28 dniu kompostowania

Kontrola 2 (28 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	2	5	<i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Micrococcaceae</i>	2	5	<i>Micrococcus</i> , <i>Arthrobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	4	10	<i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	3	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Streptococcaceae</i>	1	3	<i>Streptococcus agalactiae</i>
	<i>Bacillus</i>	3	8	<i>Bacillus stearothermophilus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	5	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	14	36	<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia</i> (<i>Escherichia coli</i>), <i>Klebsiella</i> , <i>Morganella</i> , <i>Citrobacter</i> , <i>Pectobacterium</i> , <i>Proteus</i> , <i>Salmonella</i> (<i>Salmonella typhi</i> , <i>Salmonella paratyphi</i>), <i>Xenorhabdus</i> , <i>Yersinia</i> , <i>Cronobacter</i> , <i>Edwardsiella</i> , <i>Erwinia</i>
	<i>Lactobacillus</i>	3	8	<i>Lactobacillus panis</i> , <i>Lactobacillus casei</i> , <i>Lactobacillus reuteri</i>
	<i>Clostridium</i>	1	3	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	3	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	3	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	3	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	2	5	<i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	3	<i>Nitrobacter flavu</i>	
	SUMA	39		
Grzyby	<i>Candida</i>	2	6	<i>Candida krusei</i> , <i>Candida albicans</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	9	<i>Rhizopus culmorum</i> , <i>Rhizopus lycococcus</i> , <i>Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	12	<i>Mucor flavus</i> , <i>Mucor fragilis</i> , <i>Mucor mucedo</i> , <i>Mucor racemosus</i>
	<i>Aspergillus</i>	6	18	<i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus multicolor</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus versicolor</i>

	<i>Penicillium</i>	5	15	<i>Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum, Penicillium janczewskii, Penicillium verrucosum, Penicillium italicum,</i>
	<i>Geotrichum</i>	1	3	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	4	12	<i>Cladosporium werneckii, Cladosporium oxysporum, Cladosporium soldanellae, Cladosporium herbarum,</i>
	<i>Alternaria</i>	1	3	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	15	<i>Fusarium culmorum, Fusarium graminearum, Fusarium solani, Fusarium oxysporum, Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	3	9	<i>Stachybotrys atrus, Stachybotrys atrogriseus Ellis & Everh., Oospora chartarum (Ehrenb.) Wallr.</i>
	SUMA	34		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia spp.</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus spp.</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	75	%	
	bakterie	39	52	
	grzyby	34	45	
	promieniowce	2	3	

Tabela Z1.12 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu (kontrola 2) po dojrzeniu

Kontrola 2	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	2	5	<i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Micrococcaceae</i>	2	5	<i>Micrococcus</i> , <i>Arthrobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	4	10	<i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	3	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Streptococcaceae</i>	1	3	<i>Streptococcus agalactiae</i>
	<i>Bacillus</i>	3	8	<i>Bacillus stearothermophilus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	5	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	14	36	<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia (Escherichia coli)</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Morganella</i> , <i>Citrobacter</i> , <i>Pectobacterium</i> , <i>Proteus</i> , <i>Salmonella (Salmonella typhi, Salmonella paratyphi)</i> , <i>Xenorhabdus</i> , <i>Yersinia</i> , <i>Cronobacter</i> , <i>Edwardsiella</i> , <i>Erwinia</i>
	<i>Lactobacillus</i>	3	8	<i>Lactobacillus panis</i> , <i>Lactobacillus casei</i> , <i>Lactobacillus reuteri</i>
	<i>Clostridium</i>	1	3	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	3	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	3	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	3	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	2	5	<i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	3	<i>Nitrobacter flavu</i>	
	SUMA	39		
Grzyby	<i>Candida</i>	2	6	<i>Candida krusei</i> , <i>Candida albicans</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	9	<i>Rhizopus culmorum</i> , <i>Rhizopus lycococcus</i> , <i>Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	12	<i>Mucor flavus</i> , <i>Mucor fragilis</i> , <i>Mucor mucedo</i> , <i>Mucor racemosus</i>

	<i>Aspergillus</i>	6	18	<i>Aspergillus ochraceus, Aspergillus flavus, Aspergillus fumigatus, Aspergillus multicolor, Aspergillus niger, Aspergillus versicolor</i>
	<i>Penicillium</i>	5	15	<i>Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum, Penicillium janczewskii, Penicillium verrucosum, Penicillium italicum,</i>
	<i>Geotrichum</i>	1	3	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	4	12	<i>Cladosporium werneckii, Cladosporium oxysporum, Cladosporium soldanellae, Cladosporium herbarum,</i>
	<i>Alternaria</i>	1	3	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	15	<i>Fusarium culmorum, Fusarium graminearum, Fusarium solani, Fusarium oxysporum, Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	3	9	<i>Stachybotrys atrus, Stachybotrys atrogriseus Ellis & Everh., Oospora chartarum (Ehrenb.) Wallr.</i>
	SUMA	34		
Promieniowce	Pseudonocardia spp.	1	50	
	Rhodococcus spp.	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	75	%	
	bakterie	39	52	
	grzyby	34	45	
	promieniowce	2	3	

Tabela Z1.13 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu 1(PCP) w 9 dniu kompostowania

Kompost 1 (PCP) (9 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	3	9	<i>Pseudomonas aeruginosa, Azotobacter, Rhizobacter</i>
	<i>Micrococcaceae</i>	1	3	<i>Micrococcus</i>
	<i>Clostridiaceae</i>	1	3	<i>Clostridium botulinum</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	4	12	<i>Nitrosomonas cryotolerans, Nitrosomonas europaea, Nitrosomonas halophila, Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	3	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Achromobacter</i>	1	3	<i>Alcaligenes faecalis</i>
	<i>Streptococcaceae</i>	1	3	<i>Streptococcus agalactiae</i>
	<i>Bacillus</i>	3	9	<i>Bacillus thermocatenulatus, Bacillus subtilis, Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	6	<i>Enterococcus faecalis, Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	6	18	<i>Enterobacter, Escherichia (Escherichia coli), Klebsiella, Pectobacterium, Xenorhabdus, Yersinia</i>
	<i>Lactobacillus</i>	1	3	<i>Lactobacillus casei</i>
	<i>Clostridium</i>	1	3	<i>Clostridium thermolacticum</i>
		1	3	<i>Streptomyces thermodiastaticus</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	3	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	3	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Bacteroidaceae</i>	1	3	<i>Bacteroides fragilis</i>
	<i>Legionellaceae</i>	1	3	<i>Legionella pneumophila</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	3	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	1	3	<i>Nitrosomonas ureae</i>
<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	3	<i>Nitrobacter flavu</i>	
	SUMA	33		
Grzyby	<i>Candida</i>	1	2	<i>Candida albicans</i>

	<i>Trichophyton</i>	4	10	<i>Trichophyton ajelloi, Trichophyton equinum, Trichophyton terrestre, Trichophyton verrucosum</i>
	<i>Microsporium</i>	3	7	<i>Microsporium audouinii, Microsporium boullardii, Microsporium fulvum</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	7	<i>Rhizopus culmorum, Rhizopus lyococcus, Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	10	<i>Mucor flavus, Mucor fragilis, Mucor mucedo, Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	2	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	6	15	<i>Aspergillus ochraceus, Aspergillus flavus, Aspergillus fumigatus, Aspergillus multicolor, Aspergillus niger, Aspergillus versicolor</i>
	<i>Penicillium</i>	6	15	<i>Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum, Penicillium janczewskii, Penicillium verrucosum, Penicillium italicum,</i>
	<i>Geotrichum</i>	1	2	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	4	10	<i>Cladosporium werneckii, Cladosporium oxysporum, Cladosporium soldanellae, Cladosporium herbarum,</i>
	<i>Alternaria</i>	1	2	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	12	<i>Fusarium culmorum, Fusarium graminearum, Fusarium solani, Fusarium oxysporum, Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	1	2	<i>Stachybotrys atrus</i>
	<i>Phialophora</i>	1	2	<i>Phialophora richardsiae</i>
	SUMA	41		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	76	%	
	bakterie	33	43,4	
	grzyby	41	53,9	
	promieniowce	2	2,6	

Tabela Z1.14 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu 1(PCP) w 15 dniu kompostowania

Kompost 1 (PCP) (15 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	3	13	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	4	17	<i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	4	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Bacillus</i>	3	13	<i>Bacillus thermocatenulatus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	8	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	6	25	<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia (Escherichia coli)</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Pectobacterium</i> , <i>Xenorhabdus</i> , <i>Yersinia</i>
	<i>Lactobacillus</i>	1	4	<i>Lactobacillus casei</i>
	<i>Clostridium</i>	1	4	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	4	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	1	4	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	4	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	24		
Grzyby	<i>Candida</i>	1	5	<i>Candida albicans</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	15	<i>Rhizopus culmorum</i> , <i>Rhizopus lyococcus</i> , <i>Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	20	<i>Mucor flavus</i> , <i>Mucor fragilis</i> , <i>Mucor mucedo</i> , <i>Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	5	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	4	20	<i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus niger</i>
	<i>Penicillium</i>	1	5	<i>Penicillium expansum</i>
		1	5	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	1	5	<i>Cladosporium oxysporum</i>

	<i>Alternaria</i>	1	5	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	1	5	<i>Fusarium culmorum</i>
	<i>Stachybotrys</i>	1	5	<i>Stachybotrys atrus</i>
	<i>Phialophora</i>	1	5	<i>Phialophora richardsiae</i>
	SUMA	20		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	46	%	
	bakterie	24	52,2	
	grzyby	20	43,5	
	promieniowce	2	4,3	

Tabela Z1.15 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu 1(PCP) w 28 dniu kompostowania

Kompost 1 (PCP) (28 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	2	15	<i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	1	8	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	8	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Bacillus</i>	1	8	<i>Bacillus thermocatenuatus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	15	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	2	15	<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia (Escherichia coli)</i>
	<i>Clostridium</i>	1	8	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	8	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	1	8	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	8	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	13		
Grzyby	<i>Candida</i>	1	5	<i>Candida albicans</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	15	<i>Rhizopus culmorum</i> , <i>Rhizopus lycococcus</i> , <i>Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	20	<i>Mucor flavus</i> , <i>Mucor fragilis</i> , <i>Mucor mucedo</i> , <i>Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	5	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	4	20	<i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus niger</i>
	<i>Penicillium</i>	1	5	<i>Penicillium expansum</i>
		1	5	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	1	5	<i>Cladosporium oxysporum</i>
	<i>Alternaria</i>	1	5	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	1	5	<i>Fusarium culmorum</i>
	<i>Stachybotrys</i>	1	5	<i>Stachybotrys atrus</i>
	<i>Phialophora</i>	1	5	<i>Phialophora richardsiae</i>

	SUMA	20		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	35	%	
	bakterie	13	37,1	
	grzyby	20	57,1	
	promieniowce	2	5,7	

Tabela Z1.16 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu 1(PCP) po dojrzewaniu kompostowania

Kompost 1 (PCP)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	2	15	<i>Azotobacter, Rhizobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	1	8	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	8	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Bacillus</i>	1	8	<i>Bacillus thermocatenulatus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	15	<i>Enterococcus faecalis, Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	2	15	<i>Enterobacter, Escherichia (Escherichia coli)</i>
	<i>Clostridium</i>	1	8	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	8	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	1	8	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	8	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	13		
Grzyby	<i>Candida</i>	1	5	<i>Candida albicans</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	15	<i>Rhizopus culmorum, Rhizopus lyococcus, Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	20	<i>Mucor flavus, Mucor fragilis, Mucor mucedo, Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	5	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	4	20	<i>Aspergillus ochraceus, Aspergillus flavus, Aspergillus fumigatus, Aspergillus niger</i>
	<i>Penicillium</i>	1	5	<i>Penicillium expansum</i>
		1	5	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	1	5	<i>Cladosporium oxysporum</i>
	<i>Alternaria</i>	1	5	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	1	5	<i>Fusarium culmorum</i>
	<i>Stachybotrys</i>	1	5	<i>Stachybotrys atrus</i>

	<i>Phialophora</i>	1	5	<i>Phialophora richardsiae</i>
	SUMA	20		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	35	%	
	bakterie	13	37,1	
	grzyby	20	57,1	
	promieniowce	2	5,7	

Tabela Z1.17 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu 2 (Lindan) w 9 dniu kompostowania

Kompost 2 (Lindan) (9 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	2	13	<i>Azotobacter, Rhizobacter</i>
	<i>Micrococcaceae</i>	1	6	<i>Micrococcus</i>
	<i>Clostridiaceae</i>	1	6	<i>Clostridium botulinum</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	1	6	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	6	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Bacillus</i>	2	13	<i>Bacillus subtilis, Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	13	<i>Enterococcus faecalis, Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	2	13	<i>Enterobacter, Escherichia (Escherichia coli)</i>
	<i>Clostridium</i>	1	6	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	2	13	<i>Nitrosomonas europaea, Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	6	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	16		
Grzyby	<i>Candida</i>	1	3	<i>Candida albicans</i>
	<i>Microsporium</i>	3	8	<i>Microsporium audouinii, Microsporium boullardii, Microsporium fulvum</i>
	<i>Rhizopus</i>	3	8	<i>Rhizopus culmorum, Rhizopus lyococcus, Rhizopus niveus</i>
	<i>Mucor</i>	4	11	<i>Mucor flavus, Mucor fragilis, Mucor mucedo, Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	3	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	5	14	<i>Aspergillus ochraceus, Aspergillus flavus, Aspergillus fumigatus, Aspergillus multicolor, Aspergillus niger</i>
	<i>Penicillium</i>	5	14	<i>Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum, Penicillium janczewskii, Penicillium verrucosum, Penicillium italicum,</i>
		1	3	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	4	11	<i>Cladosporium werneckii, Cladosporium oxysporum, Cladosporium soldanellae, Cladosporium herbarum,</i>
	<i>Alternaria</i>	1	3	<i>Alternaria alternata</i>

	<i>Fusarium</i>	5	14	<i>Fusarium culmorum</i> , <i>Fusarium graminearum</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	3	8	<i>Stachybotrys atrus</i> , <i>Stachybotrys atrogriseus</i> Ellis & Everh., <i>Oospora chartarum</i> (Ehrenb.) Wallr.
	SUMA	36		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	54	%	
	bakterie	16	29,6	
	grzyby	36	66,7	
	promieniowce	2	3,7	

Tabela Z1.18 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu 2 (Lindan) w 15 dniu kompostowania

Kompost 2 (Lindan) (15 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	2	15	<i>Azotobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	1	8	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	8	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Bacillus</i>	2	15	<i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	1	8	<i>Enterococcus faecalis</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	2	15	<i>Enterobacter, Escherichia (Escherichia coli)</i>
	<i>Clostridium</i>	1	8	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	2	15	<i>Nitrosomonas europaea, Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	8	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	13		
Grzyby	<i>Rhizopus</i>	1	14	<i>Rhizopus culmorum</i>
	<i>Mucor</i>	1	14	<i>Mucor mucedo</i>
	<i>Aspergillus</i>	1	14	<i>Aspergillus flavus</i>
	<i>Penicillium</i>	1	14	<i>Penicillium expansum</i>
	<i>Alternaria</i>	1	14	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	1	14	<i>Fusarium culmorum</i>
	<i>Stachybotrys</i>	1	14	<i>Stachybotrys atrus</i>
	SUMA	7		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	22	%	
	bakterie	13	59	
	grzyby	7	32	

	promieniowce	2	9	
--	--------------	---	---	--

Tabela Z1.19 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu 2 (Lindan) w 28 dniu kompostowania

Kompost 2 (Lindan) (28 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	1	9	<i>Azotobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	1	9	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	9	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Bacillus</i>	1	9	<i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	1	9	<i>Enterococcus faecalis</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	2	18	<i>Enterobacter, Escherichia (Escherichia coli)</i>
	<i>Clostridium</i>	1	9	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	2	18	<i>Nitrosomonas europaea, Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	9	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	11		
Grzyby	<i>Rhizopus</i>	1	20	<i>Rhizopus culmorum</i>
	<i>Mucor</i>	1	20	<i>Mucor mucedo</i>
	<i>Aspergillus</i>	1	20	<i>Aspergillus flavus</i>
	<i>Penicillium</i>	1	20	<i>Penicillium expansum</i>
	<i>Alternaria</i>	1	20	<i>Alternaria alternata</i>
	SUMA	5		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	18	%	

	bakterie	11	61	
	grzyby	5	28	
	promieniowce	2	11	

Tabela Z1.20 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu 2 (Lindan) po dojrzeniu kompostowania

Kompost 2 (Lindan)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	1	9	<i>Azotobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	1	9	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	9	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Bacillus</i>	1	9	<i>Bacillus cereus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	1	9	<i>Enterococcus faecalis</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	2	18	<i>Enterobacter, Escherichia (Escherichia coli)</i>
	<i>Clostridium</i>	1	9	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	2	18	<i>Nitrosomonas europaea, Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	9	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	11		
Grzyby	Rhizopus	1	20	<i>Rhizopus culmorum</i>
	Mucor	1	20	<i>Mucor mucedo</i>
	Aspergillus	1	20	<i>Aspergillus flavus</i>
	Penicillium	1	20	<i>Penicillium expansum</i>
	Alternaria	1	20	<i>Alternaria alternata</i>
	SUMA	5		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	

	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	18	%	
	bakterie	11	61	
	grzyby	5	28	
	promieniowce	2	11	

Tabela Z1.21 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu 3 (WWA) w 9 dniu kompostowania

Kompost 3 (WWA) (9 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	2	8	<i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	4	17	<i>Nitrosomonas cryotolerans</i> , <i>Nitrosomonas europaea</i> , <i>Nitrosomonas halophila</i> , <i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	4	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	8	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	6	25	<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia (Escherichia coli)</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Pectobacterium</i> , <i>Xenorhabdus</i> , <i>Yersinia</i>
	<i>Lactobacillus</i>	1	4	<i>Lactobacillus casei</i>
	<i>Clostridium</i>	1	4	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	4	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	4	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Bacteroidaceae</i>	1	4	<i>Bacteroides fragilis</i>
	<i>Legionellaceae</i>	1	4	<i>Legionella pneumophila</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	4	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	1	4	<i>Nitrosomonas ureae</i>
<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	4	<i>Nitrobacter flavu</i>	

	SUMA	24		
Grzyby	<i>Candida</i>	1	3	<i>Candida albicans</i>
	<i>Trichophyton</i>	2	6	<i>Trichophyton terrestre, Trichophyton verrucosum</i>
	<i>Microsporium</i>	3	9	<i>Microsporium audouinii, Microsporium boullardii, Microsporium fulvum</i>
	<i>Rhizopus</i>	1	3	<i>Rhizopus culmorum</i>
	<i>Mucor</i>	4	12	<i>Mucor flavus, Mucor fragilis, Mucor mucedo, Mucor racemosus</i>
	<i>Absidia</i>	1	3	<i>Absidia glauca</i>
	<i>Aspergillus</i>	6	18	<i>Aspergillus ochraceus, Aspergillus flavus, Aspergillus fumigatus, Aspergillus multicolor, Aspergillus niger, Aspergillus versicolor</i>
	<i>Penicillium</i>	5	15	<i>Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum, Penicillium janczewskii, Penicillium verrucosum, Penicillium italicum,</i>
		1	3	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Cladosporium</i>	1	3	<i>Cladosporium herbarum</i>
	<i>Alternaria</i>	1	3	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	15	<i>Fusarium culmorum, Fusarium graminearum, Fusarium solani, Fusarium oxysporum, Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	1	3	<i>Stachybotrys atrus</i>
	<i>Phialophora</i>	1	3	<i>Phialophora richardsiae</i>
	SUMA	33		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	59	%	
	bakterie	24	40,7	
	grzyby	33	55,9	
	promieniowce	2	3,4	

Tabela Z1.22 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu 3 (WWA) w 15 dniu kompostowania

Kompost 3 (WWA) (15 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	2	12	<i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	1	6	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	6	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	12	<i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	2	12	<i>Enterobacter</i> , <i>Escherichia (Escherichia coli)</i>
	<i>Lactobacillus</i>	1	6	<i>Lactobacillus casei</i>
	<i>Clostridium</i>	1	6	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	6	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	6	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Bacteroidaceae</i>	1	6	<i>Bacteroides fragilis</i>
	<i>Legionellaceae</i>	1	6	<i>Legionella pneumophila</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	6	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	1	6	<i>Nitrosomonas ureae</i>
<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	6	<i>Nitrobacter flavu</i>	
	SUMA	17		
Grzyby	<i>Candida</i>	1	4	<i>Candida albicans</i>
	<i>Trichophyton</i>	1	4	<i>Trichophyton terrestre</i>
	<i>Microsporium</i>	3	12	<i>Microsporium audouinii</i> , <i>Microsporium boullardii</i> , <i>Microsporium fulvum</i>
	<i>Rhizopus</i>	1	4	<i>Rhizopus culmorum</i>
	<i>Mucor</i>	4	15	<i>Mucor flavus</i> , <i>Mucor fragilis</i> , <i>Mucor mucedo</i> , <i>Mucor racemosus</i>
	<i>Aspergillus</i>	2	8	<i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus niger</i>
	<i>Penicillium</i>	5	19	<i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium expansum</i> , <i>Penicillium janczewskii</i> , <i>Penicillium verrucosum</i> , <i>Penicillium italicum</i> ,
<i>Cladosporium</i>	1	4	<i>Cladosporium herbarum</i>	

	<i>Alternaria</i>	1	4	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	19	<i>Fusarium culmorum, Fusarium graminearum, Fusarium solani, Fusarium oxysporum, Fusarium langsethiae</i>
	<i>Stachybotrys</i>	1	4	<i>Stachybotrys atrus</i>
	<i>Phialophora</i>	1	4	<i>Phialophora richardsiae</i>
	SUMA	26		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	45	%	
	bakterie	17	37,8	
	grzyby	26	57,8	
	promieniowce	2	4,4	

Tabela Z1.23 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu 3 (WWA) w 28 dniu kompostowania

Kompost 3 (WWA) (28 dzień)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	2	12	<i>Azotobacter, Rhizobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	1	6	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	6	<i>Azotobacter salinestrus</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	12	<i>Enterococcus faecalis, Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	2	12	<i>Enterobacter, Escherichia (Escherichia coli)</i>
	<i>Lactobacillus</i>	1	6	<i>Lactobacillus casei</i>
	<i>Clostridium</i>	1	6	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	6	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	6	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Bacteroidaceae</i>	1	6	<i>Bacteroides fragilis</i>
	<i>Legionellaceae</i>	1	6	<i>Legionella pneumophila</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	6	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	1	6	<i>Nitrosomonas ureae</i>
<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	6	<i>Nitrobacter flavu</i>	
	SUMA	17		
Grzyby	<i>Candida</i>	1	6	<i>Candida albicans</i>
	<i>Trichophyton</i>	1	6	<i>Trichophyton terrestre</i>
	<i>Rhizopus</i>	1	6	<i>Rhizopus culmorum</i>
	<i>Mucor</i>	1	6	<i>Mucor flavus</i>
	<i>Aspergillus</i>	2	13	<i>Aspergillus flavus, Aspergillus niger</i>
	<i>Penicillium</i>	2	13	<i>Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum</i>
	<i>Cladosporium</i>	1	6	<i>Cladosporium herbarum</i>
	<i>Alternaria</i>	1	6	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	31	<i>Fusarium culmorum, Fusarium graminearum, Fusarium solani, Fusarium oxysporum, Fusarium langsethiae</i>

	<i>Stachybotrys</i>	1	6	<i>Stachybotrys atrus</i>
	SUMA	16		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	35	%	
	bakterie	17	48,6	
	grzyby	16	45,7	
	promieniowce	2	5,7	

Tabela Z1.24 Zidentyfikowane szczepy mikroorganizmów w próbce kompostu 3 (WWA) po dojrzewaniu kompostowania

Kompost 3 (WWA)	Rodzaj	Ilość zidentyfikowanych gatunków w grupie	Udział procentowy w grupie [%]	Zidentyfikowane gatunki
Bakterie	<i>Pseudomonadaceae</i>	2	12	<i>Azotobacter, Rhizobacter</i>
	<i>Nitrosomonas</i>	1	6	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Azotobacter</i>	1	6	<i>Azotobacter salinestris</i>
	<i>Enterococcaceae</i>	2	12	<i>Enterococcus faecalis, Enterococcus faecium</i>
	<i>Enterobacteriaceae</i>	2	12	<i>Enterobacter, Escherichia (Escherichia coli)</i>
	<i>Lactobacillus</i>	1	6	<i>Lactobacillus casei</i>
	<i>Clostridium</i>	1	6	<i>Clostridium thermolacticum</i>
	<i>Staphylococcaceae</i>	1	6	<i>Staphylococcus aureus</i>
	<i>Campylobacteriaceae</i>	1	6	<i>Campylobacter jejuni</i>
	<i>Bacteroidaceae</i>	1	6	<i>Bacteroides fragilis</i>
	<i>Legionellaceae</i>	1	6	<i>Legionella pneumophila</i>
	<i>Helicobacteriaceae</i>	1	6	<i>Helicobacter pylori</i>
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	1	6	<i>Nitrosomonas ureae</i>
	<i>Nitrobacteriaceae</i>	1	6	<i>Nitrobacter flavu</i>
	SUMA	17		
Grzyby	<i>Candida</i>	1	6	<i>Candida albicans</i>
	<i>Trichophyton</i>	1	6	<i>Trichophyton terrestre</i>
	<i>Rhizopus</i>	1	6	<i>Rhizopus culmorum</i>
	<i>Mucor</i>	1	6	<i>Mucor flavus</i>
	<i>Aspergillus</i>	2	13	<i>Aspergillus flavus, Aspergillus niger</i>
	<i>Penicillium</i>	2	13	<i>Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum</i>
	<i>Cladosporium</i>	1	6	<i>Cladosporium herbarum</i>
	<i>Alternaria</i>	1	6	<i>Alternaria alternata</i>
	<i>Fusarium</i>	5	31	<i>Fusarium culmorum, Fusarium graminearum, Fusarium solani, Fusarium oxysporum, Fusarium langsethiae</i>

	<i>Stachybotrys</i>	1	6	<i>Stachybotrys atrus</i>
	SUMA	16		
Promieniowce	<i>Pseudonocardia</i>	1	50	
	<i>Rhodococcus</i>	1	50	
	SUMA	2		
	wszystkie szczepy	35	%	
	bakterie	17	48,6	
	grzyby	16	45,7	
	promieniowce	2	5,7	