



UNIwersytet  
PRZYRODNICZY  
WE WROCLAWIU

WYDZIAŁ PRZYRODNICZO - TECHNOLOGICZNY

## Załącznik 3

# AUTOREFERAT

**z uwzględnieniem osiągnięcia naukowego oraz  
innej działalności naukowej, dydaktycznej,  
organizacyjnej oraz popularyzującej naukę**

**Wrocław 2023**

## Autoreferat

1. Imię i nazwisko: *Jakub Adam Bekier*
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:
  - **Inżynier Ochrony Środowiska:** 26.02.2001, Akademia Rolnicza we Wrocławiu
  - **Magister Inżynier Ochrony Środowiska:** 21.06.2002, Akademia Rolnicza we Wrocławiu;
  - **Doktor Nauk Rolniczych, Agronomia:** 03.04.2007, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, tytuł rozprawy: „*Transformacja i recykling materii organicznej oraz składników mineralnych podczas kompostowania odpadów komunalnych*”.  
Promotor: prof. dr hab. Jerzy Drozd,  
Recenzenci: prof. dr hab. Stanisław Baran  
prof. dr hab. Michał Licznar.
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych:
  - 01.10.2002 – 30.09.2006: doktorant w Instytucie Gleboznawstwa i Ochrony Środowiska/Instytucie Nauk o Glebie i Ochrony Środowiska, Akademia Rolnicza we Wrocławiu/Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu;
  - Od 15.10.2008: adiunkt w Instytucie Nauk o Glebie i Ochrony Środowiska/ Instytut Nauk o Glebie, Żywnienia Rośli i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

**Podstawowe dane naukometryczne habilitanta:**

- Cytowania Web of Science (wrzesień 2023): ogółem 177; autocytowania: 43; źródło: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/citation-report/aa99ec44-f7e7-4eba-882e-4d48c6c103a2-75478c3d>
- Cytowania Scopus (wrzesień 2023): ogółem 215; autocytowania: 41; źródło: [https://www.scopus.com/cto2/main.uri?ctoId=CTODS\\_1609236702&authors=55654421900&origin=AuthorNamesList](https://www.scopus.com/cto2/main.uri?ctoId=CTODS_1609236702&authors=55654421900&origin=AuthorNamesList)
- Indeks Hirscha (wrzesień 2023): Web of Science: HI = 6; Scopus: HI = 7
- Sumaryczny Impact Factor (wrzesień 2023): 45,901; źródło: <https://bazawiedzy.upwr.edu.pl/info.seam?tab=&enttype=author&id=UPWr51b970e370f24b26aebc54dc5a9f7ed7&lang=pl>

**Tytuł osiągnięcia naukowego:**

***" Biogeneza i dynamika zmian substancji humusowych podczas biologicznego przetwarzania biomasy organicznej w warunkach stymulacji czynnikami antropogenicznymi"***

Osiągnięcie naukowe stanowi cykl siedmiu oryginalnych artykułów naukowych (Załączniki 3.1 - 3.7) publikowanych w latach 2009 - 2022 o łącznej liczbie punktów według Ministra Właściwego ds. szkolnictwa wyższego 385 i łącznym IF = 10,211, obowiązujących w roku ukazania się publikacji (obecnie: 570 pkt MNiSW, IF = 15,39):

1. Bekier J., Drozd J., Walenczak K. 2009. Transformation of selected hydrophobic substances during composting of municipal solid wastes. *Soil Sci. Ann.* 2009, 60,3, 5-11.
2. Bekier J., Drozd J., Licznar, M. 2011. Nitrogen transformations in composts produced from municipal solid wastes. *Ecol. Chem. Eng. A* 2011, 18,4, 497-506.
3. Bekier J., Drozd J., Jamroz E., Jarosz B., Kocowicz A., Walenczak K., Weber J. 2014. Changes in selected hydrophobic components during composting of municipal solid wastes. *J. Soils Sediments* 2014, 14, 2, 305-311, DOI:10.1007/s11368-013-0696-0.

4. **Kaluża-Haladyn A., Jamroz E., Bekier J., 2018. The dynamics of some physical and physico-chemical properties during composting of municipal solid wastes and biomass of energetic plants. Soil Sci. Ann. 2018, 69 (3), pp. 155 – 159.**
5. **Kaluża-Haladyn A., Jamroz E., Bekier J. 2019. Humic substances of differently matured composts produced from municipal solid wastes and biomass of energetic plants. Soil Sci. Ann. 2019, 70 (4), pp. 292 – 297.**
6. **Bekier J., Jamroz E., Dębicka M., Ćwielał-Piasecka I., Kocowicz A., 2022a. Quantitative Carbon Changes of Selected Organic Fractions during the Aerobic Biological Recycling of Biodegradable Municipal Solid Waste (MSW) as a Potential Soil Environment Improving Amendment - A Case Study, Agriculture 2022, 12, 12, 1-14, DOI:10.3390/agriculture12122058.**
7. **Bekier J., Jamroz E., Sowiński J., Adamczewska-Sowińska K., Kaluża-Haladyn A., 2022b. Effect of Differently Matured Composts from Willow on Growth and Development of Lettuce, Agronomy 2022, 12, 1, 1-11, DOI:10.3390/agronomy12010175.**

Oświadczenia złożone przez habilitanta oraz współautorów wskazujące na ich merytoryczny wkład w powstanie każdej wymienionej pracy znajdują się w załącznikach (Załączniki 4.1 – 4.7).

### **Wprowadzenie i cel badań**

W ostatnich dziesięcioleciach obserwuje się znaczny spadek zawartości substancji humusowych (HS) w ekosystemach lądowych w wyniku zwiększonej mineralizacji materii organicznej (Becher i in. 2021, 2022, Resolution IUSS 2002, Weber i in. 2014, Weber i in. 2018). Zjawisko zachodzi głównie w intensywnie użytkowanych agroekosystemach oraz glebach przekształcanych antropogenicznie (Bekier i in. 2023, Doichinova i in. 2006, Lal 2007). Konsekwencją tych niekorzystnych zmian jest szybkie pogarszanie parametrów gleb, powodujące ogólny spadek wartości użytkowej oraz ekologicznej ekosystemów lądowych (Komatsuzaki i Ohta 2007, Lazcano i in. 2009). Wielu autorów (Becher i in. 2022, Kwiatkowska-Malina 2018a, Pouyat i in. 2002, Żukowska i in. 2020) wskazuje, że jednymi z najbardziej rozpoznawalnych objawów antropopresji w glebach są zmiany jakościowe i ilościowe w składzie glebowej materii organicznej (ang. SOM: Soil Organic Matter). Należy jednak zauważyć, że wiedza na temat tych zmian i interakcji z frakcjami mineralnymi

### Załącznik 3

jest niedostatecznie rozpoznana i brak jest szczegółowych opracowań dotyczących tych zagadnień.

Blisko 70% zasobów SOM występuje w formie substancji humusowych (Loffredo i Senesi 2006, Żukowska i in. 2020), które podlegają ciągłym przemianom. W procesach ich powstawania biorą udział liczne mikroorganizmy, a także szereg związków chemicznych, stanowiących bezpośrednio substraty lub pośrednie produkty humifikacji. Do najważniejszych z nich należą zdefiniowane jakościowo i ilościowo (Ciavatta i in. 2022, Komilis i Ham 2003, Ryckeboyer i in 2003) następujące komponenty organiczne: lignina, węglowodany (celuloza, inne cukry), komponent proteinowy (białka, aminokwasy), komponent hydrofobowy (tłuszcze, kwasy tłuszczowe, woski, żywice) oraz związki mineralne: sole, minerały ilaste i pozostałe mineralne składniki środowiska w różnym stopniu rozpuszczalne i podatne na procesy biotransformacji. Ze względu na niejednorodny i bardzo złożony charakter HS oraz jeszcze nierozpoznany mechanizm powstawania, tworzą one w środowisku układ heterogenicznej mieszaniny złożonej z materiałów w różnym stopniu rozkładu i transformacji (IHSS 2007). Związki humusowe są niezwykle istotne dla jakości gleby, zdolności do wsparcia zdrowego wzrostu roślin oraz stabilności ekosystemów glebowych. Ich obecność wpływa na wiele procesów biologicznych i chemicznych, co ma kluczowe znaczenie dla zrównoważonego zarządzania zasobami glebowymi ze szczególnym uwzględnieniem aspektu ochrony środowiska (Diacono i Montemuro 2010, Resolution IUSS 2002).

W celu identyfikacji związków próchnicznych, najczęściej stosuje się metodę rekomendowaną przez International Humic Substances Society (Swift 1996), umożliwiającą charakterystykę ilościową i jakościową poszczególnych grup i frakcji w oparciu o podatność na ekstrakcję i izolację przy zastosowaniu różnych ekstrahentów (Hayes i Swift 2020, Kononova 1966, Swift 1996, Weber i in. 2022). Na tej podstawie wydziela się trzy główne frakcje: 1) kwasy humusowe (ang. HA: humic acids); 2) kwasy fulwowe (ang. FA: fulvic acids); 3) huminy (ang. HU: humins). HA i FA są ekstrahowane z gleby i innych źródeł fazy stałej przy użyciu alkaliów (najczęściej NaOH lub KOH). Kwasy fulwowe są rozpuszczalne w pełnym zakresie pH, kwasy huminowe koagulują w niskim pH (separacja poprzez zakwaszenie roztworu alkalicznego), natomiast huminy są nierozpuszczalne zarówno w kwasach, jak i w zasadach.

Związki humusowe charakteryzują się odmiennymi właściwościami, a zwłaszcza zdolnością tworzenia kompleksów z mineralnymi składnikami środowiska (Ciavatta i in. 2022, Gonet i Dębska 1998). Bardzo duże powinowactwo do tworzenia połączeń wykazują

### Załącznik 3

kwasy fulwowe, których cząsteczki posiadają prostszą budowę od kwasów huminowych, mniej skondensowany rdzeń, większy udział łańcuchów bocznych. Charakteryzują się one także większą rozpuszczalnością i mobilnością, a tym samym większą podatnością na procesy transformacji, wymywania i mineralizacji. Dzięki swojej reaktywności, decydują o dostępności i przemieszczaniu składników pokarmowych - głównie kationów - dla roślin oraz bardzo intensywnie modyfikują populacje mikroorganizmów zasiedlających dany ekosystem (Becher i in. 2022, Gonet i Dębska 1998, Kwiatkowska-Malina 2018 a i b). Ich działanie jest bardzo intensywne, krótkotrwałe i zależne od pH środowiska. Bardziej stabilne frakcje substancji humusowych reprezentowane są przez kwasy huminowe. Jest to warunkowane wyższym stopniem polimeryzacji i kondensacji rdzenia aromatycznego, niższym udziałem struktur alifatycznych oraz słabszą podatnością na utlenianie i degradację. Posiadają większą masę cząsteczkową i tworzą trwalsze połączenia z kationami wielowartościowymi, a ponadto wykazują zdolności do przyłączania anionów oraz wielu związków organicznych (Ćwieliąg-Piasecka i in. 2018, Ćwieliąg-Piasecka 2023, Dębicka i in. 2023). Należy także zauważyć, że wiązania występujące w KH mają nie tylko charakter chemiczny, ale są także warunkowane specyficznymi oddziaływaniami molekularnymi, w dużo mniejszym stopniu zależnymi od warunków środowiska, takich jak odczyn i zasolenie. Natomiast najbardziej stabilną frakcją związków humusowych są huminy. Wysoka odporność na procesy fizykochemiczne i biologiczne, warunkowana jest bardzo skomplikowaną i zaawansowaną budową oraz zdolności do tworzenia trwałych połączeń mineralno-ilasto-organicznych. Brak rozpuszczalności i stabilna chemicznie natura tej frakcji sprawiają, że jest ona przedmiotem wielu badań (Hayes i Swift 2020, Hayes i in. 2017, Weber i in. 2022), a uzyskiwane wyniki są zazwyczaj trudne do interpretacji i wzbudzają wiele dyskusji.

Aktualne trendy i wytyczne związane z funkcjonowaniem i zrównoważonym użytkowaniem powierzchni gleb (Bekier i in. 2023, De Nobili i in. 2020, Głina i in. 2019, Lutzow i in. 2006, Schnitzer i Monreal 2011), wskazują na konieczność podjęcia radykalnych działań w celu ograniczenia negatywnych skutków zmian środowiskowych, podniesienia jakości gleb oraz zwiększenia zawartości glebowej materii organicznej. Najbardziej racjonalnymi rozwiązaniami (Abbott i Murphy 2007, Dębska i in. 2016, 2022, Diacono i Montemuro 2010, Kwiatkowska-Malina 2018a i b, Komatsuzaki i Ohta 2007, Resolution IUSS 2002) wydają się być te sugerujące:

### Załącznik 3

- zrównoważone gospodarowanie zasobami związków próchnicznych, szczególnie intensywnie użytkowanych i/lub przekształcanych (tereny uprawne bądź silnie zantropogenizowane),
- optymalizację zawartości związków próchnicznych poprzez stosowanie odpowiedniej jakości komponentów i/lub produktów wytwarzanych z egzogennej materii organicznej (ang. EOM: Exogenous Organic Matter), powstałych najczęściej w wyniku kompostowania biomasy
- kształtowanie jakości i sposobu optymalnego i racjonalnego wykorzystania związków humusowych w oparciu o kompleksowe, zintegrowane zarządzanie długoterminowe.

Należy pamiętać, że substraty EOM mogą zawierać zarówno substancje naturalne, jak i związki organiczne pochodzenia antropogenicznego (**Bekier i in. 2009, 2014, 2022a, 2023, Dębicka i in. 2023, Dębska i in. 2016, Kałuża-Haładyn i in. 2018, 2019**). Wyraźny postęp w produkcji i stosowaniu przetworzonej biologicznie egzogennej biomasy w celach rolniczych i pozarolniczych, wykazał konieczność weryfikacji dotychczasowych poglądów w zakresie procesów humifikacji oraz interpretacji zjawisk powstawania próchnicy w oparciu o ilościowe i jakościowe zmiany poszczególnych frakcji HS (Dębska 2016, 2022, Żukowska i in. 2020). Jednocześnie należy podkreślić, że stosowanie tego typu produktów w rolnictwie wymaga ostrożności i dostosowania do konkretnych warunków. Obecnie funkcjonuje oficjalny system oparty na przepisach prawnych, regulujących jakość substratu EOM, kontrolujących proces przetwarzania oraz umożliwiających certyfikację produktu finalnego do wykorzystania dla konkretnych celów (Dz.U. 2007 nr 147 poz. 1033 ze zm., Dz.U. 2009 nr 224 poz. 1804, Dz. U. 2013, poz. 21 ze zm.). Dodatkowo, w celu oceny stopnia dojrzałości produktu, kierunków oraz intensywności procesów tlenowej biotransformacji EOM, ilościowej charakterystyki powstających związków humusowych oraz efektywności zastosowanych rozwiązań technicznych i technologicznych, stosuje się chemiczne indeksy dojrzałości kompostów (**Bekier i in. 2011, 2022a, Ciavatta i in. 2022, Kałuża-Haładyn i in. 2019**). Do najważniejszych z nich należą:

- stosunek węgla organicznego ogółem do azotu ogółem – TOC/TN (ang. TOC – Total Organic Carbon; TN – Total Nitrogen) - parametr niezwykle istotny, oznaczany zarówno w substracie ( $TOC/TN = 30$  do  $40$ ) jak i w produkcie ( $TOC/TN \leq 12$ );
- indeks humifikacji  $HI = C_{AC}/CALK$  (ang. HI - Humification Index) - stosunek niskocząsteczkowych frakcji acidofilnych ( $C_{AC}$ ) do związków próchnicznych reprezentowanych przez frakcję alkaliczną (CALK);

### Załącznik 3

- wskaźnik humifikacji  $HR_1 = \text{CHA} / \text{CFA}$  (ang. HR – Humification Ratio, CHA - Carbon of Humic Acids, CFA – Carbon of Fulvic Acids) - wskazuje kierunek i intensywność procesu humifikacji, optymalna wartość  $HR_1 \geq 1$ ;
- wskaźnik humifikacji  $HR_2 = [(\text{C}_{\text{AC}} + \text{CALK}) / \text{TOC}] \cdot 100$  – procentowy udział sumy frakcji acidofilnych i związków próchnicznych w puli węgla organicznego.

Ze względu na to, że w przepisach prawnych pominięto aspekt ilościowych i jakościowych zmian związków humusowych, najbardziej racjonalnym rozwiązaniem przy ocenie i kwalifikowaniu produktów biotransformacji EOM wydaje się być system „hybrydowy”, uwzględniający wytyczne formalne uzupełnione dodatkowymi parametrami fizycznymi.

Niejednorodna i heteropolimeryczna budowa HS sprawiają, że opracowanie uniwersalnych schematów procesów humifikacji oraz przybliżonego modelu molekuł związków humusowych stanowi od wielu dekad poważne wyzwanie naukowe. Pomimo istnienia wielu koncepcji na ten temat (Waksman 1936, Hayes i Swift 2020, Kononova 1966, Stevenson 1994), wyniki dotyczące przemian materii organicznej w związki humusowe w warunkach naturalnych oraz stymulowanych czynnikami antropogenicznymi, nie są jednoznaczne i wzbudzają nadal wiele kontrowersji. Powyższe kwestie oraz wątpliwości były impulsem do podjęcia przeze mnie interdyscyplinarnych badań, obejmujących następujące zagadnienia:

1. Określenie, które ze zidentyfikowanych grup związków organicznych mają bezpośredni wpływ na powstające w czasie kompostowania substancje humusowe, a które uczestniczą pośrednio (**Bekier i in. 2009, 2014, 2022a, Kaluża-Haładyn i in. 2019**);
2. Jakościowa i ilościowa charakterystyka związków humusowych jako produktów tlenowej biokonwersji różnych substratów EOM wraz z określeniem najważniejszych parametrów decydujących o kierunku i intensywności procesu (**Bekier i in. 2011, 2022a, Kaluża-Haładyn i in. 2018, 2019**);
3. Zweryfikowanie poglądów dotyczących zależności między jakością użytych substratów EOM, metodami stymulacji procesów kompostowania w kontekście recyklingu i sekwestracji węgla a wartościami użytkowymi i przyrodniczymi uzyskanego produktu końcowego (**Bekier i in. 2011, 2022a, 2022b, Kaluża-Haładyn i in. 2018, 2019**).

### Uproszczona charakterystyka obiektów badań

Wpływ czynników antropogenicznych na kierunek przemian materii organicznej badano monitorując proces kompostowania prowadzony zgodnie z wytycznymi dla recyklingu organicznego (Ciavatta i in. 2022, Dz. U. 2013, poz.21). W celu przedstawienia



### Załącznik 3

zależności między jakością EOM a wartościami użytkowymi i przyrodniczymi uzyskanego produktu, w badaniach wykorzystano komposty w różnej fazie dojrzałości wytworzone z substratów o odmiennych właściwościach fizykochemicznych:

- a) Komposty z odpadów miejskich zebranych nieselektywnie, przetwarzane według odmiennych technologii: KKO – 110 w Zielonej Górze oraz MUT-DANO w Katowicach (**Bekier i in. 2009, 2011, 2014, Kałuża-Haładyn 2018, 2019**);
- b) Komposty z biodegradowalnych odpadów miejskich zebranych selektywnie przetwarzanych metodą pryzmowa, semidynamiczną, otwartą według technologii kanadyjskiej (**Bekier i in. 2022a**);
- c) Komposty wytworzone ze zrębków wierzby wzbogaconych dodatkami naturalnymi: siano uzyskane z łąk użytkowanych ekstensywnie (**Bekier i in. 2022b, Kałuża-Haładyn i in. 2018, 2019**) oraz azotem mineralnym (azotan amonu 34% N).

#### Wykaz zastosowanych metod analitycznych i procedur badawczych

Opisywane badania miały charakter złożony, interdyscyplinarny (rolnictwo i ogrodnictwo, nauki o środowisku), dlatego też zastosowane metody analityczne podzielono na dwie grupy:

1. Badania podstawowe, niezbędne do uzyskania najważniejszych informacji o badanych zjawiskach, obejmujące: zawartość węgla organicznego (TOC), zawartość azotu ogółem (TN), odczyn (pH), popielność;
2. Badania specjalistyczne, obejmujące głównie kompleksową analizę materii organicznej i związków próchnicznych, kluczowe dla realizacji celów badawczych, z uwzględnieniem specyfiki badanych próbek:
  - a) wspólne dla kompostów: ekstrakcja związków humusowych według metodyki rekomendowanej przez International Humic Substances Society (Swift 1996) z oznaczeniem węgla kwasów fulowych (CFA), huminowych (CHA) oraz węgla w pozostałości (CR); obliczenie zmian chemicznych indeksów dojrzałości HI, HR<sub>1</sub> i HR<sub>2</sub> podczas kompostowania;
  - b) dla kompostów z odpadów: analiza frakcjonowana materii organicznej metodą według Stevensona i Adanego, analiza zawartości węgla związków hydrofobowych (HSC), określenie węgla kwasów tłuszczowych (FAC), zawartości kwasów tłuszczowych C<sub>8</sub> – C<sub>22</sub> metodą GC według procedury FAME;

### Załącznik 3

- c) dla kompostów z biomasy ligninowo-celulozowej: dwuetapowe doświadczenie wegetacyjne metodą bloków losowych: wpływ kompostu na kiełkowanie (etap 1) i wzrost (etap 2) rośliny testowej (sałata siewna *Lactuca sativa* L.).

Szczegółowe opisy wszystkich użytych procedur wraz z zastosowanymi analizatorami zostały opisane w publikacjach stanowiących prezentowane osiągnięcia naukowe.

### Omówienie wyników

#### Zmiany ilościowe określonych grup związków organicznych jako substratów substancji humusowych powstających podczas kompostowania odpadów.

Dotychczas przeprowadzone badania jednoznacznie wskazują, iż w trakcie kompostowania zdecydowana większość związków organicznych, zawartych w odpadach komunalnych, podlega procesom biotransformacji (Adani i in. 2006, **Bekier i in. 2022a**, Ciavatta i in. 2022). Przyjmuje się, że przeciętnie w materii organicznej odpadów komunalnych, celuloza i lignina stanowią 50% (a według Komilis i Ham 2003 i Ryckeboyer i in. 2003: nawet 60%), komponent proteinowy około 30%, związki hydrofobowe (głównie tłuszcze) około 15%, a pozostałe – do 20%. Wymienione związki/grupy związków sporadycznie występują w stanie wolnym, a najczęściej stanowią niejednorodny układ wchodzący w skład EOM, a ponadto mogą występować jako integralne składniki komórek komponentów substratu i mikroorganizmów występujących na różnych etapach kompostowania. Przyjmuje się, że uczestniczą w procesach zachodzących podczas biotransformacji, natomiast w kontekście humifikacji ich rola jest bardzo zróżnicowana i trudna do określenia.

W ramach prezentowanego osiągnięcia, przedstawiono dynamikę przemian poszczególnych związków oraz grup związków organicznych podczas kompostowania odpadów komunalnych (**Bekier i in. 2009, 2014, 2022a**). W badaniach kompostów miejskich zebranych selektywnie skoncentrowano się na określeniu zmian ilościowych węgla organicznego związków hydrofobowych (HSC), hydrofilnych (WEOC), acidofilnych (Cac), celulozy (CEEL), frakcji niehydrolizujących, tzw. węgla w pozostałości (CR) oraz węgla substancji próchnicznych frakcji stabilnej, tzw. core – HS (CALK). W kompostach z odpadów niesegregowanych wykonano szczegółową analizę zmian zawartości HSC, węgla kwasów tłuszczowych ogółem (FAC) oraz zidentyfikowano jakościowo i ilościowo

### Załącznik 3

kwasy tłuszczowe w poszczególnych etapach kompostowania (liczba atomów węgla w łańcuchu głównym 8 - 22).

Uzyskane rezultaty wykazały, iż najintensywniejsze zmiany ilościowe następowały w przypadku związków HSC, WEOC, CR oraz CALK, przy czym związki hydrofilne i hydrofobowe podlegały bardzo intensywnym przemianom w tych samych termicznych fazach kompostowania. Jednocześnie potwierdzono stabilność frakcji CCEL. W produkcie finalnym największy udział stanowił węgiel organiczny frakcji CR, następnie CCEL i CALK. Przeprowadzone badania nad zmianami ilościowymi i jakościowymi kwasów tłuszczowych wykazały, że zawartości kwasów tłuszczowych w kompostowanych odpadach komunalnych były najwyższe w materiale wyjściowym i zmniejszały się z upływem czasu, głównie w fazie termofilnej. Zaobserwowano, że spadek całkowitej zawartości węgla substancji hydrofobowych HSC jest około pięciokrotny, a kwasów tłuszczowych FAC nawet około dziesięciokrotny. Nienasycone kwasy tłuszczowe są intensywniej rozkładane podczas kompostowania, podczas gdy nasycone kwasy tłuszczowe wykazywały większą odporność na procesy biotransformacji. Ponadto zaobserwowano specyficzne związki o charakterze nasyconych kwasów tłuszczowych (C15:0 i C17:0), powstające najprawdopodobniej w wyniku działalności bakterii termofilnych jako produkty syntezy *de novo* lub produkty rozkładu związków lipidowych. Niezależnie od fazy kompostowania, ponad 70% FAC stanowił węgiel kwasów długołańcuchowych (ang. LCFA: Long Chain Fatty Acids): palmitynowego (C16:0), kwasu stearynowego (C18:0) i oleinowego (C18:1), natomiast kwasy krótkołańcuchowe występowały w ilościach śladowych.

Prezentowane wyniki umożliwiły zweryfikowanie niektórych koncepcji związanych z wpływem badanych grup związków organicznych na kierunek przemian i jakość produktu kompostowania EOM z odpadów komunalnych. Wykazano (Bekier i in. 2009, 2014, 2022a), iż większość związków WEOC i HSC, podlegała intensywnym przemianom w tej samej fazie kompostowania. Można zatem przypuszczać, że podatność na biotransformacje nie jest zależna od hydrofilności i/lub hydrofobowości danej substancji organicznej, lecz od stopnia skomplikowania struktury. Ponadto, związki WEOC i HSC są tak intensywnie wykorzystywane, że ich znaczenie jako substrat do powstawania substancji próchnicznych jest ograniczone i powinny być uznane za źródło energii dla mikroorganizmów odpowiedzialnych za powstawanie związków CALK. Uzyskane rezultaty (Bekier i in. 2022a) potwierdzają także znaczenie długołańcuchowych kwasów tłuszczowych (LCFA) w tworzeniu alifatycznych struktur (Hachicha i in. 2009, Spaccini i Piccolo 2009), warunkujących ograniczoną wodnorozpuszczalność niektórych frakcji HS, głównie kwasów

### Załącznik 3

huminowych oraz humin (CR). Należy także stwierdzić, iż stosowanie wyników jakościowych i ilościowych zmian kwasów tłuszczowych jako uniwersalnego chemicznego wskaźnika dojrzałości kompostów (Barje i in. 2008, Gea i in. 2007), jest nadal kontrowersyjne, gdyż nie rozpoznano wszystkich mechanizmów (biotycznych i abiotycznych) decydujących o ich uwalnianiu (głównie LCFA) z macierzystych związków glicerolipidowych. Natomiast przeprowadzone badania wydają się potwierdzać przydatność analiz zmian kwasów tłuszczowych jako bioindykatorów do oceny aktywności biologicznej.

#### Zależność między jakością substratu EOM a wartością użytkowo – przyrodniczą uzyskanego kompostu.

Od czasu opracowania koncepcji wykorzystywania alternatywnych źródeł EOM do wytwarzania produktów optymalizujących zawartość SOM, naukowcy oraz organizacje o zasięgu międzynarodowym przystąpiły do szeroko zakrojonych projektów dotyczących zastosowania poszczególnych substratów z uwzględnieniem aspektów badawczych, technicznych oraz użytkowych (**Bekier i in. 2011, 2022a i b**, Ciavatta i in. 2022). Kwestie najbardziej dyskusyjne dotyczyły stosowania odpadów komunalnych, przetwarzanych metodami tlenowymi (kompostowanie) albo beztlenowymi (fermentacja), co wynikało ze specyficznych właściwości wpływających na skuteczność ich przetwarzania. Słusznie przyjęto, że należy działać w ramach zasad recyklingu organicznego (Dz.U. 2013 poz. 21 ze zm.), który jest dokładnie scharakteryzowany i zwalidowany w aspekcie formalno – prawnym oraz praktycznym.

W ramach prezentowanego osiągnięcia, przeprowadzono badania obejmujące określenie skuteczności recyklingu związków węgla i azotu jako najważniejszych wskaźników decydujących o wartości użytkowej kompostów produkowanych z miejskich odpadów niesegregowanych (**Bekier i in. 2011**), miejskich odpadów biodegradowalnych zebranych selektywnie (**Bekier i in. 2022a**) oraz biomasy wierzby z dodatkami (**Bekier i in. 2022b**). Substraty przetwarzano odmiennymi technologiami, spełniającymi wymogi najlepszej dostępnej techniki (BAT – ang. Best Available Technology) w zakresie stosowania procesów mechaniczno - biologicznych (MBT – ang. Mechanical-Biological Treatment).

W obu kompostach z odpadów niesegregowanych stwierdzono podobne zawartości TOC i TN, natomiast w odpadach zebranych selektywnie zawartości tych pierwiastków były znacząco wyższe w każdym etapie kompostowania, przy czym stosunek TOC/TN był na poziomie optymalnym (**Bekier i in. 2011, 2022a**), niezależnie od stopnia wysegregowania.

### Załącznik 3

W próbach z biomasą wierzbową, relacje węgla do azotu były wyraźnie zaburzone, co wymuszało konieczność stosowania dodatków w postaci siana oraz saletry amonowej. Dodatkowo, niezależnie od zastosowanej technologii, we wszystkich badanych próbkach obserwowano spadek zawartość TOC, wzrost zawartości TN oraz zawężanie TOC/TN, przy czym dynamika tych zmian była zależna od składu chemicznego substratów. Największe różnice były związane ze stratami węgla organicznego podczas kompostowania : 50 – 57% TOC w kompostach z odpadów (segregowanych i niesegregowanych) oraz 8 – 13% w kompostach z wierzby (w zależności od zastosowanych dodatków). Analizy ilościowe i jakościowe związków humusowych w badanych kompostach wykazały duże różnice. Przejawiało się to przede wszystkim odmiennym kierunkiem humifikacji. Kompostowanie mieszanki biomasy wierzby energetycznej i siana prowadziło do powstania HS o wyższym udziale frakcji niskocząsteczkowych (CAC), niższym udziałem kwasów huminowych (CHA) w całkowitym węglu organicznym (TOC) i wyraźnie zauważalną negatywną tendencją zmniejszania  $HR_1$  (spadek z 0,58 do 0,29), w porównaniu do procesów biotransformacji stałych odpadów komunalnych. Obserwowane zależności znalazły swoje potwierdzenie (**Bekier i in. 2022a, Kałuża-Haładyn i in. 2019**) w zmianach wartości chemicznych indeksów dojrzałości. Rezultaty uzyskane dla HI i  $HR_2$  wskazały, iż intensywność i kierunek procesu humifikacji zasobnej, eutroficznej EOM z odpadów komunalnych, sprzyjały powstawaniu kompostu o znacznym udziale core-HS, reprezentowanych przez frakcję CALK. Można zatem wnioskować, iż czynnikiem decydującym o intensywności mineralizacji TOC, a w konsekwencji o skuteczności recyklingu materii organicznej w badanych produktach EOM była zasobność substratu w makro- i mikroskładniki, a w szczególności w azot, z uwzględnieniem jego form mineralnych (**Bekier i in. 2011, 2022a i b, Kałuża-Haładyn i in. 2019**). Wykazano, że jakość związków humusowych, a także kierunek i intensywność procesów kompostowania/współkompostowania biomasy wierzby były uzależnione od zastosowanych dodatków organicznych i mineralnych. Potwierdzono hipotezę, że uzupełnienie składu substratu poprzez zastosowanie odpowiedniej ilości dodatków organicznych w postaci siana oraz optymalizacja stosunku TOC/TN do poziomu 30 do 35 dodatkiem azotanu amonu, wpłynie stymulująco na proces biotransformacji i jednocześnie poprawi właściwości uzyskanego produktu (**Bekier i in. 2022b, Kałuża-Haładyn i in. 2019**). Uzyskane wyniki składu chemicznego oraz doświadczeń wegetacyjnych wskazywały na możliwość stosowania tych kompostów jako substytutu torfu i alternatywnego dodatku organicznego w nawozach i podłożach ogrodniczych. Jednakże biorąc pod uwagę bardzo

### Załącznik 3

niską zasobność w makro- i mikroskładniki, dominujący udział frakcji CR oraz niekorzystną wartość  $HR_1$ , najbardziej rozsądne wydaje się być stosowanie uzyskanych produktów w połączeniu z nawożeniem uzupełniającym lub jako podłoża inertnego. Uwzględniając fakt, iż eksperyment oraz jakość uzyskanego produktu miały charakter innowacyjny, przeprowadzono postępowanie w Urzędzie Patentowym RP, zakończone decyzją z dnia 18.04.2023 (Załącznik 3.8) o objęciu ochroną patentową wynalazku pt.: „Komponent uprawowy, sposób jego wytwarzania, organiczne podłoże uprawowe oraz zastosowanie zrębków wierzby”.

Bardzo ważnym aspektem przeprowadzonych badań były kwestie związane z formalnym aspektem przetwarzania odpadów. Mimo dużej zasobności w makro- i mikroskładniki oraz bardzo korzystnych ilościowych i jakościowych parametrów związków humusowych w produktach powstałych z kompostowanych odpadów zmieszanych, ich zastosowanie jest bardzo mocno ograniczone. Wynika to z obowiązujących przepisów prawnych (Dz.U. 2007 nr 147 poz. 1033 ze zm., Dz.U. 2009 nr 224 poz. 1804, Dz. U. 2013, poz. 21 ze zm.) jednoznacznie wskazujących, iż produkty uzyskane w ramach MBT odpadów niesegregowanych należy uznać za odpady częściowo ustabilizowane – w tym przypadku ustabilizowane biologicznie. Stosowanie tego typu substancji oraz ewentualne wprowadzanie ich do środowiska podlega restrykcyjnym regulacjom formalno-prawnym i wymaga bardzo specyficznych rozwiązań praktycznych (Bekier i in. 2022a, Ciavatta i in. 2022).

Uwzględniając uzyskane wyniki, można wysnuć następujące wnioski: (1) jakość użytego substratu EOM, a w konsekwencji produktów MBT, zależały od stopnia wyselekcjonowania substancji biodegradowalnych, niezależnie od zastosowanych technologii; (2) badane produkty kompostowania odpadów niesegregowanych nie spełniają norm stawianych nawozom oraz środkom wspomagającym, co znacząco ogranicza ich stosowanie; (3) intensywność recyklingu organicznego metodami MBT wydaje się być zależna od zawartości azotu oraz optymalnych relacji TOC/TN na każdym etapie procesu; (4) zaobserwowane podczas kompostowania odpadów miejskich straty TOC sięgały ponad 50%, co w konsekwencji wpływało na wartość użytkową otrzymanych produktów; (5) komposty uzyskane w wyniku recyklingu odpadów biodegradowalnych zebranych selektywnie oraz biomasy wierzbowej, wykazują parametry produktów spełniających wymogi stawiane środkom wspomagającym; (6) wyniki analiz chemicznych i eksperymentów wegetacyjnych wskazują, iż bardziej uzasadnione jest stosowanie uzyskanych kompostów z biomasy wierzby w kombinacjach z innymi nawozami/dodatkami

### Załącznik 3

organicznymi i/lub mineralnymi; (7) uwzględniając wyraźny ubytek zawartość TOC, wskazywanie kompostowania jako metody sekwestracji węgla z materii organicznej zwartej w odpadach jest bardzo dyskusyjne.

Przedstawione wnioski wskazują, iż potrzebna jest zmiana podejścia do kwestii związanych zarówno z recyklingiem, jak i zjawiskiem sekwestracji węgla w wyniku stosowania MBT do różnych produktów EOM. Kluczowe wydaje się być rozgraniczenie między recyklingiem materii organicznej oraz sekwestracją węgla przy zastosowaniu kompostowania. Sekwestracja węgla jest procesem zmierzającym do wychwycenia i bezpiecznego, długotrwałego przechowania (ang. CCS - Carbon Capture and Storage) jak największej ilości C w celu zapobiegania emisji CO<sub>2</sub>. Z tego powodu, koncepcja CCS polega na uwstecznieniu materii organicznej do bezpiecznych, stabilnych związków odpornych na procesy biol – chem – fiz. Natomiast istotą recyklingu organicznego EOM metodą kompostowania jest uzyskanie tzw. użytecznej biomasy (**Bekier i in. 2022a i b**). Produkt taki powinien być możliwy do zastosowania dla celów rolniczych i/lub pozarolniczych w celu osiągnięcia określonego efektu produkcyjnego lub przyrodniczego. Zarówno kwasy fulwowe, jak i huminowe, biorące czynny udział w obiegu materii i warunkujące funkcjonowanie łańcucha troficznego, będą w konsekwencji podlegały mineralizacji. Dlatego też najważniejsze założenia recyklingu związków z EOM, a w szczególności kompostowanych biodegradowalnych frakcji odpadów komunalnych, nie spełniają warunku CCS.

Bardzo ważnym aspektem wynikającym ze stosowania recyklingu organicznego EOM jest możliwość uzyskania produktów stanowiących substytut torfu w organicznych podłożach wykorzystywanych w rolnictwie (Adamczewska-Sowińska i in. 2022, Becher i in. 2021, 2022, **Bekier i in. 2022b**, Glina i in. 2019). Biorąc pod uwagę najnowsze wytyczne w zakresie uznawania torfowisk jako obszarów o niezwykle istotnej roli w kształtowaniu bioróżnorodności, obiegu wody oraz sekwestracji węgla, wszelkie rozwiązania zmniejszające lub eliminujące konieczność eksploatacji tych siedlisk, stanowią bardzo cenny wkład w poprawę stanu środowiska. Z powyższych względów, przeprowadzone badania nad możliwością uzyskania alternatywy poprzez kompostowanie biomasy wierzbowej, potwierdzone wynikami eksperymentalnymi oraz patentem, bardzo dobrze wpisują się w rozwijanie nowoczesnych strategii racjonalnego i zrównoważonego gospodarowania zasobami materii organicznej w ekosystemach lądowych.

Uwzględniając powyższe spostrzeżenia oraz uzyskane wyniki prowadzonych badań, należałoby: (a) uznać kompostowanie zmieszanych odpadów komunalnych jako metodę ich

### Załącznik 3

stabilizacji, a nie recyklingu; (b) zweryfikować poglądy dotyczące uznawania kompostowania jako jednej z metod sekwestracji węgla z EOM zawartej w biodegradowalnych odpadach komunalnych; (c) zintensyfikować prace nad zwiększaniem skuteczności kompostowania jako metody tlenowego recyklingu organicznego związków zawartych w różnych substratach EOM poprzez stosowanie dodatków oraz stymulację procesu metodami chemicznymi, biologicznymi/mikrobiologicznymi i technicznymi; (d) propagować produkty oraz wdrażać metody recyklingu EOM jako najwłaściwszych metod racjonalnego gospodarowania zasobami SOM.

Wyniki przeprowadzonych badań wnoszą istotny wkład do poznania przemian materii organicznej w podczas kompostowania organicznej części odpadów i biomasy ligninowo-celulozowej. Opublikowane prace z tego zakresu przyczynią się do rozwoju dyscypliny rolnictwo i ogrodnictwo poprzez propagowanie idei wykorzystania kompostów produkowanych z łatwo dostępnej biomasy oraz odpadów gromadzonych w sposób selektywny do poprawy bilansu materii organicznej w glebach, a także ich wykorzystania jako komponentów podłoży ogrodniczych. Ten aspekt pozwoli także na bardziej racjonalne podejście do ochrony zasobów glebowych, co z kolei przełoży się na ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> i zachowanie cennych ekosystemów torfowych.

#### Podsumowanie osiągnięć

Przedstawione osiągnięcia, poparte wynikami badań, pozwalają na wysunięcie kilku kluczowych wniosków:

1. Przedstawione wyniki (**Bekier i in. 2011, 2014, 2022a**) nie potwierdzają powszechnie panującej opinii, iż kompostowanie odpadów komunalnych można uznać za metodę sekwestracji węgla. Natomiast z całą pewnością, kompostowanie odpadów komunalnych zebranych selektywnie oraz innego rodzaju EOM należy traktować jako jedną z najwłaściwszych metod tlenowego, mechaniczno - biologicznego recyklingu organicznego.
2. Stosowanie nadwyżek lub pozostałości z upraw wierzby energetycznej lub innych materiałów ligninowo-celulozowych w kombinacjach z dodatkami organicznymi i mineralnymi jako substratów EOM do produkcji alternatywnych organicznych środków wspomagających metodą kompostowania, wydaje się być bardzo uzasadnionym kierunkiem uzyskania produktu będącego alternatywą dla torfu (**Bekier i in. 2022b, Kałuża-Haładyn i in. 2018, 2019**).



### Załącznik 3

3. Znaczenie frakcji WEOC i HSC jako substratów w procesach powstawania substancji humusowych (HS) podczas kompostowania jest niezwykle istotne, a związki te należy traktować głównie jako źródło energii dla mikroorganizmów odpowiedzialnych za intensywność i kierunek humifikacji (**Bekier i in. 2009, 2014, 2022a, Kałuża-Haładyn i in. 2019**).
4. Badania wskazują na możliwość zastosowania kwasów tłuszczowych jako bioindykatorów aktywności mikrobiologicznej podczas kompostowania (**Bekier i in. 2009, 2014**). Jednocześnie koncepcja opracowania wskaźników dojrzałości kompostów w oparciu o zmiany zawartości kwasów tłuszczowych jest nadal dyskutowana i uwzględniana w wielu opracowaniach.
5. Przeprowadzone badania potwierdzają rolę kwasów tłuszczowych, szczególnie LCFA, w tworzeniu alifatycznych, hydrofobowych struktur związków humusowych, szczególnie w czasie kompostowania odpadów. Należy jednak pamiętać, iż kwasy tłuszczowe mogą pochodzić zarówno z rozpadu glicerolipidów zawartych w substracie (EOM lub SOM), ale także mogą być syntezowane *de novo* w procesach metabolicznych (**Bekier i in. 2009, 2014**).
6. Uzyskane wyniki wykazały różnice między stabilnością a stabilizacją związków próchnicznych (**Bekier i in. 2011, 2022a, Kałuża-Haładyn 2019**). Stabilność wynika z odpowiedniego stopnia aromatyzacji, utlenienia i kondensacji organicznych struktur budujących molekuły kwasów humusowych i humin, czyli z kierunków i intensywności przemian biochemicznych substratów organicznych. Stabilizacja jest procesem współtowarzyszącym lub wtórnym, który zawsze zachodzi przy udziale fazy mineralnej w wyniku dodatkowych procesów fizycznych i chemicznych - czyli zależy od zasobności środowiska, w którym występują substancje humusowe.

Potwierdzeniem opisanego osiągnięcia jest uzyskanie świadectwa patentowego. Ponadto, nadal prowadzone są prace w celu: a) optymalizacji składu kompostowanej masy poprzez zastosowanie odpowiednich dodatków naturalnych zawierających makro- i mikroskładniki; b) opracowania najbardziej efektywnych sposobów stymulacji procesu kompostowania z wykorzystaniem metod mikrobiologicznych i technicznych.

**Bibliografia uzupełniająca do pkt 4:**

- Abbott L.K.; Murphy D.V., 2007. What is soil biological fertility? W: Soil Biological Fertility; Abbott, L.K., Murphy, D.V., (Red.); Springer; Dordrecht, The Netherlands, 2007; pp. 1–15.
- Adamczewska-Sowińska K., Sowiński J., Jamroz E., Bekier J., 2022. Compost from willow biomass (*Salix viminalis* L.) as a horticultural substrate alternative to peat in the production of vegetable transplants. *Sci. Rep.* 2022, 12, 17617, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22406-7>.
- Adani F., Ricca G., Tambone F., Genevini P., 2006. Isolation of the stable fraction (the core) of the humic acid. *Chemosphere* 2006, 65, 1300–1307.
- Amir S, Merlina G, Pinelli E, Winterton P, Revel C, Hafidi M., 2008. Microbial community dynamics during composting of sewage sludge and straw studied through phospholipid and neutral lipid analysis. *J Hazard Mater* 2008, 159 (2–3): 593–601.
- Barje F, Amir S, Winterton P, Pinelli E, Merlina G, Cegarra J, Revel J-C, Hafidi M., 2008. Phospholipid fatty acids analysis to monitor the co-composting process of olive oil mill wastes and organic household refuse. *J. Hazard. Mater. J Hazard Mater* 2008, 154(1–3):682–987.
- Becher M, Banach-Szott M, Godlewska A. 2021. Organic Matter Properties of Spent Button Mushroom Substrate in the Context of Soil Organic Matter Reproduction. *Agronom.* 2021, 11, 2, <https://doi.org/10.3390/agronomy11020204>
- Becher M, Tołoczko W, Godlewska A, Pakuła K, Żukowski E. 2022. Fractional Composition of Organic Matter and Properties of Humic Acids in the Soils of Drained Bogs of the Siedlce Heights in Eastern Poland. *J. Ecol. Eng.* 2022, 23, 4, 208-222, doi:10.12911/22998993/146679.
- Bekier J., Jamroz E., Walenczak-Bekier K., Uściła M., 2023. Soil organic matter composition in urban soils: a study of Wrocław agglomeration, SW Poland, *Sustainability* 2023, 15,3, DOI:10.3390/su15032277.
- Ciavatta C., Centemero M., Toselli M., Zaccone C., Senesi N., 2022. Compost production, analysis and applications in agriculture. W: Multi-Scale Biogeochemical Processes in Soil Ecosystems; Yang, Y., Keiluweit, M., Senesi, N., Xing, B., (Red.); JohnWiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA, 2022.

### Załącznik 3

- Ćwieląg-Piasecka I. 2023. Soil Organic Matter Composition and pH as Factors Affecting Retention of Carbaryl, Carbofuran and Metolachlor in Soil. *Molecules* 2023, DOI: 10.3390/molecules28145552.
- Ćwieląg-Piasecka I., Medyńska-Juraszek A., Jerzykiewicz M., Dębicka M., Bekier J., Jamroz E., Kawałko D. 2018. Humic acid and biochar as specific sorbents of pesticides. *J. Soils Sediments* 2018, 18, DOI: 10.1007/s11368-018-1976-5.
- De Nobili M., Bravo C., Chen, Y. , 2020. The spontaneous secondary synthesis of soil organic matter components: A critical examination of the soil continuum model theory. *Appl. Soil Ecol.* 2020, 154, 103655.
- Dębicka M., Jamroz E., Bekier J., Ćwieląg-Piasecka I., Kocowicz A. 2023. The Influence of Municipal Solid Waste Compost on the Transformations of Phosphorus Forms in Soil. *Agronomy* 2023; 13(5):1234, <https://doi.org/10.3390/agronomy13051234>
- Dębska B., Kotwica K., Banach-Szott M., Spychaj-Fabisiak E., Tobiašová E. 2022. Soil Fertility Improvement and Carbon Sequestration through Exogenous Organic Matter and Biostimulant Application. *Agriculture*. 2022; 12(9):1478, <https://doi.org/10.3390/agriculture12091478>
- Dębska B., Długosz J., Piotrowska-Długosz A., Banach-Szott M. 2016. The impact of a bio-fertilizer on the soil organic matter status and carbon sequestration – results from a field-scale study. *J Soils Sediments* 2016, 16, 2335–2343, <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1430-5>
- Diacono M., Montemurro, F., 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. *Agron. Sustain. Dev.* 2010, 30, 401–422.
- Doichinova V., Zhiyanski M., Hursthouse A., 2006. Impact of urbanisation on soil characteristics. *Environ. Chem. Lett.* 2006. 160–163, <https://doi.org/10.1007/s10311-005-0024-z>
- Gea T., Ferrer P, Alvaro G., Valero F., Artola A., Sanchez A., 2007. Co-composting of sewage sludge: fats mixtures and characteristics of the lipases involved. *Biochem. Eng. J.* 2007, 13, 3, 275-283, <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.11.007>.
- Glina B., Sykuła M., Mendyk Łukasz., 2019. Land use changes and landscape pattern dynamics of a peatland area under diversified human impact: the Grójec Valley (Central Poland). *Bulletin of Geography. Physical Geography Series* 2019, (16), 21–30, <https://doi.org/10.2478/bgeo-2019-0002>

### Załącznik 3

- Gonet S.S., Dębska B. 1998. Properties of humic acids developed during humification process of post-harvest plant residues. *Environ. Int.* 1998, 24, 5/6, 603 – 608.
- Hachicha R., Hachicha S., Trabelsi I., Woodward S., Mechichi T., 2009. Evolution of the fatty fraction during co-composting of olive oil industry wastes with animal manure: maturity assessment of the end product. *Chemosphere* 2007, 75(10):1382–1386.
- Hayes M. H. B., Mylotte R., Swift R. S., 2017. Chapter Two: Humic: Its composition and importance in soil organic matter. *Adv. Agron. Advances in Agronomy* 2017,, 143, 47–138.
- Hayes M.H.B., Swift R.S., 2020. Vindication of humic substances as a key component of organic matter in soil and water. *Adv. Agron.* 2020, 163, 1–37.
- IHSS, 2007. <https://humic-substances.org/what-are-humic-substances-2/>
- Kabala C., Galka B., Labaz B., Anjos L., Cavassani R.D. 2018. Towards more simple and coherent chemical criteria in a classification of anthropogenic soils: A comparison of phosphorus tests for diagnostic horizons and properties. *Geoderma* 2018, 320, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.024>.
- Komatsuzaki M., Ohta H., 2007. Soil management practices for sustainable agro-ecosystems. *Sustain. Sci.* 2007, 2, 103–120.
- Komilis D., Ham R.K., 2003. The effect of lignin and sugars to the aerobic decomposition of solid waste. *Waste Manag.* 2003, 23, 419–423.
- Kononova M. M. ,1966. *Soil Organic Matter: Its Nature, its Role in Soil Formation and in Soil Fertility*, second edition (English). Pergamon, 1966.
- Kwiatkowska-Malina J. 2018a. Qualitative and quantitative soil organic matter estimation for sustainable soil management. *J Soils Sediments* 2018,18, 2801–2812, <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1891-1>
- Kwiatkowska-Malina J. 2018b. Functions of organic matter in polluted soils: The effect of organic amendments on phytoavailability of heavy metals. *Appl. Soil Ecol.* 2018, 123, 542 – 545, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.021>
- Lal R., 2007. Carbon management in agricultural soils. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 2007, 12, 303–322.
- Lazcano C., Arnold J., Tato A., Zaller J.G., Dominguez J., Salgado A.T., 2009. Compost and vermicompost as nursery pot components: Effects on tomato plant growth and morphology. *Span. J. Agric. Res.* 2009, 7, 944–951.

### Załącznik 3

- Loffredo E., Senesi N. 2006. The role of humic substances in the fate of anthropogenic organic pollutants in soil with emphasis on endocrine disruptor compounds. In: *Soil and Water Pollution Monitoring, Protection and Remediation*, Twardowska I. et al. (eds.) Springer, 3-23.
- Lutzow M.V., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., Flessa H., 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions-a review. *Eur. J. Soil. Sci.* 2006, 57, 426–445.
- Oktaba L., Odrobinska D., Uzarowicz L., 2018. The impact of different land uses in urban area on humus quality. *J. Soils Sediments* 2018, 18, 2823–2832.
- Pouyat R., Groffman P., Yesilonis I., Hernandez L., 2002. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environ. Pollut.* 2002, 116, 107–118.
- Resolution of the 17th World Congress of Soil Science. In *Global Enhancement of Soil Organic Matter*; Bulletin of the International Union of Soil Sciences; No 102; Blum, W.E.H., Ed.; IUSS: Vienna, Austria, 2002; pp. 22–23.
- Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 21 grudnia 2009 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu. *Dz.U.* 2009 nr 224 poz. 1804. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20092241804/O/D20091804.pdf>
- Ryckeboer J., Mergaert J., Coosemans J., Deprins K., Swings, J., 2003. Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin. *J. Appl. Microbiol.* 2003, 94, 127–137.
- Schnitzer M., Monreal C.M., 2011. Chapter Three - Quo Vadis Soil Organic Matter Research? A Biological Link to the Chemistry of Humification. *Adv. Agron.* 2011, 113, 143–217.
- Spaccini R, Piccolo A., 2009. Molecular characteristics of humic acids extracted from compost at increasing maturity stages. *Soil Biol Biochem* 2009, 41:1164–1172.
- Stevenson F. J., 1994. *Humus Chemistry; Genesis, Composition, Reaction*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 1994.
- Swift R.S. 1996. Organic matter characterization. In: Sparks, D.L., et al. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America Inc., Madison, WI., USA 1996, 1011–1069.

### Załącznik 3

- Ustawa z dnia 10. lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu. Dz.U. 2007 nr 147 poz. 1033 ze zm.,  
<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20071471033/U/D20071033Lj.pdf>
  - Ustawa z dnia 14. grudnia 2012 o odpadach. Dz. U. 2013, poz. 21 ze zm.,  
<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20130000021/U/D20130021Lj.pdf>
  - Waksman S.A., 1936. Humus: Origin, Chemical Composition and Importance in Nature. Williams and Wilkins: Baltimore, MD, USA, 1936. Available online:  
<https://soilcarboncoalition.org/files/Waksman-Humus.pdf>
  - Weber J., Jamroz E., Kocowicz A., Dębicka M., Bekier J., Cwieliąg-Piasecka I., Ukalska-Jaruga A., Mielnik L., Bejger R., Jerzykiewicz M., 2022. Optimized isolation method of humin fraction from mineral soil material., Environ Geochem Health Environmental Geochemistry and Health, 2022, 44, 1289-1298. DOI:10.1007/s10653-021-01037-3.
  - Weber J., Chen Y., Jamroz E., Miano T. 2018. Preface: Humic substances in the environment. J. Soils Sediments 2018, 18, 2665–2667.
  - Weber J., Kocowicz A., Bekier J., Jamroz E., Tyszka R., Dębicka M., Parylak D., Kordas, L., 2014. The effect of a sandy soil amendment with municipal solid waste (MSW) compost on nitrogen uptake efficiency by plants. Eur. J. Agron. 2014, 54, 54–60.
  - Żukowska G., Myszura M., Zdeb M., Pawłowska M. 2020. Carbon Sequestration in Soil as a Sustainable Way of Greenhouse Effect Mitigation. Problems of Sustainable Development 2020, 2, 196-204.
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Realizacja omawianych osiągnięć nie byłaby możliwa bez współpracy z innymi jednostkami. Ze względu na specyfikę prowadzonych badań, podjęto w 2011 roku współpracę z Department of Agro-Forestry and Environmental Biology and Chemistry, University of Bari (Di.B.C.A) w zakresie przemian materii organicznej podczas

### Załącznik 3

kompostowania odpadów komunalnych, przebiegającą w dwóch etapach; 1) listopad 2011 – kwiecień 2012; 2) luty 2012 - maj 2012, współfinansowanych ze środków NCN N N305 395738 i LLP- Erasmus 2011 – 2012 (Załączniki 3.9 i 3.10). W wymienionych okresach odbyłem staż w Uniwersytecie w Bari (Włochy), a nawiązana współpraca dotyczyła w szczególności poszerzenia wiedzy i umiejętności praktycznych w zakresie: 1) kompostowania odpadów komunalnych i zielonych; 2) wymiany poglądów związanych z przemianami materii organicznej w środowisku; 3) doskonalenia wiedzy i umiejętności praktycznych w zakresie przygotowania administracyjnego i nauczania studentów oraz wymiany akademickiej na poziomie studiów doktoranckich i staży post-doc zgodnie z zasadami Procesu Bolońskiego.

Kolejną formą aktywności był mój udział jako wykonawca projektu NCN „OPUS 16”, nr 2018/31/B/ST10/00677: „Właściwości spektroskopowe i chemiczne glebowej frakcji humin w odniesieniu do ich wzajemnych interakcji z pestycydami”, realizowanego w ramach konsorcjum. Najważniejszymi osiągnięciami tego projektu są:

- Opracowanie i optymalizacja metody izolowania (w odróżnieniu od ekstrakcji rozpuszczalnikami organicznymi) frakcji humin, która jest najbardziej trwałą frakcją glebowej materii organicznej, o kluczowym znaczeniu dla sekwestracji węgla. Wyniki opublikowane w czasopiśmie *Environmental Geochemistry and Health* (IF= 4,609).
- Wykazanie, że wieloletnie oddziaływanie alkalicznych składników na właściwości substancji humusowych powoduje tworzenie bardziej złożonych struktur, charakteryzujących się wyższą koncentracją pierścieni aromatycznych w rdzeniu cząsteczki.
- Wykazanie przydatności spektroskopii fluorescencyjnej (jednowymiarowej, synchronicznej i trójwymiarowej) do jakościowego charakteryzowania zmian struktur substancji humusowych w różnych warunkach środowiskowych.
- Dostarczenie szczegółowych i wielostronnych informacji o właściwościach (zwłaszcza strukturze) frakcji humin, która jest najsłabiej rozpoznaną frakcją glebowej materii organicznej. W badanych glebach mineralnych frakcja ta charakteryzuje się dominacją struktur aromatycznych nad zawartością struktur alifatycznych, a udział węgla połączeń hydrofobowych przeważa nad udziałem połączeń hydrofilowych. Frakcja humin wyizolowana przyjętą metodą składa się z trwałych połączeń organiczno-mineralnych. Wyniki tych badań zostały zgłoszone do druku w *Molecules*.

### Załącznik 3

- Określenie charakterystyki sorpcji pestycydów na huminach oraz wykazanie wzajemnych interakcji pestycydów i humin. Wskazanie preferencji sorpcji pestycydów hydrofilowych przez alifatyczne grupy funkcyjne zlokalizowane przy pierścieniu aromatycznym względem pestycydów hydrofobowych.
- Wykazanie wpływu badanych pestycydów – zarówno substancji aktywnych jak i produktów komercyjnych – na równowagi chinonowe w huminach. Dla wszystkich badanych humin stwierdzono spadek stężenia rodników co jest dowodem na przesunięcie równowag w kierunku form diamagnetycznych.

Przeprowadzone badania zrealizowano w ścisłej współpracy z następującymi ośrodkami naukowymi: Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowy Instytut Badawczy w Puławach, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Uniwersytet Wrocławski, Wydział Chemii. Efektem tej współpracy jest praca opublikowana (Weber i in. 2022) i kolejna, która znajduje się aktualnie w fazie recenzji (złożona do *Molecules*).

Należy podkreślić, iż wyniki uzyskane w ramach realizacji projektu „OPUS 16”, są zgodne z prezentowanymi osiągnięciami dotyczącymi powstawania i stabilizacji SOM w postaci CR i CHU w środowiskach o wysokiej zasobności w kationy i frakcje mineralne oraz wiodącej roli organicznych związków niehydrolizujących w procesach sekwestracji węgla.

Wszystkie wymienione osiągnięcia naukowe zostały docenione przez władze Uczelni przyznaniem przez Rektora Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu nagród zespołowych (Załącznik 3.11 i 3.12) oraz nagród indywidualnych (Załącznik 3.13).

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

#### 6.1. Osiągnięcia dydaktyczne

Od początku mojego zatrudnienia, uczestniczyłem w procesie dydaktycznym jako:

- Koordynator i prowadzący następujące przedmioty w języku polskim i angielskim: Odpady i Ich Klasyfikacja oraz Sozologia (kierunek: Odnawialne Źródła Energii i Gospodarka Odpadami); Podstawy Gospodarki Odpadami oraz Ekologia i Ochrona Środowiska (kierunek: Rolnictwo); Soil Science (ERASMUS);
- Prowadzący i współprowadzący następujące przedmioty w języku polskim i angielskim: zarządzanie środowiskowe (kierunek: Odnawialne Źródła Energii



### Załącznik 3

i Gospodarka Odpadami); przedmioty z zakresu gleboznawstwa, geologii i geomorfologii (kierunki: Ochrona Środowiska, Agrobiznes, Rolnictwo, Ogrodnictwo, Architektura Krajobrazu, Geodezja i Kartografia, Inżynieria Środowiska); kompleksowe ćwiczenia terenowe (kierunek: Ochrona Środowiska); Zagrożenia Cywilizacyjne i Zrównoważony Rozwój (kierunek: Zarządzani i Inżynieria Produkcji); Remediation of Degradable Land (kierunek: Ochrona Środowiska, ERASMUS);

- Opracowanie programu nauczania nowego przedmiotu: 3 przedmioty w języku polskim, 1 w języku angielskim;
- Promotorstwo: 9 prac magisterskich, 5 prac inżynierskich;
- Recenzent: 12 prac magisterskich , 4 prac inżynierskich;
- Opieka merytoryczna nad studentami zagranicznymi: Karoly Szarka (Hungary, Europass Mobility 2010), Uyanik Nuri Serhat (Turkey, ERASMUS 2011).

Zaprezentowane osiągnięcia dydaktyczne zostały docenione przez Radę Wydziału Przyrodniczo – Technologicznego oraz Studentów przyznanymi nagrodami i wyróżnieniami za działalność dydaktyczną i najwyższą ocenę w ankiecie studentów (Załącznik 3.14).

#### 6.2. Osiągnięcia popularyzujące naukę lub sztukę.

##### 6.2.1. Członkostwo w komitecie organizacyjnym i naukowym.

- Konferencje międzynarodowe:
  - Humic Substances i Ecosystems 9, Wrocław/Karpacz, Polish Humic Substances Society, Poland 2012;
  - 29. Congress of the Polish Society of Soil Science, Wrocław, Institute of Soil Science and Environmental Protection Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Polish Society of Soil Science, Committee of Soil Science and Agrochemistry of the Polish Academy of Science, Polish Society of Humic Substances, Poland 2015;
  - Humic Substances i Ecosystems 11, Wrocław/Kudowa Zdrój, Polish Humic Substances Society , Poland 2017.
- Konferencje krajowe:
  - Kompostowanie odpadów komunalnych. Produkcja, wykorzystanie i wpływ na środowisko, Wrocław/Duszniki Zdrój, Polskie Towarzystwo Substancji Humusowych, Polska 2004;
  - Ochrona Środowiska - wyzwania i perspektywy w XXI wieku", Poznań 2013
  - Sejmiki Studenckich Kół Naukowych (2013, 2016)

### Załącznik 3

- Rola i miejsce nauk o glebie w warunkach przyrodniczych, Wrocław, Instytut Nauk o Glebie i Ochrony Środowiska, Polskie Towarzystwo Substancji Humusowych, Polska 2016;
- Polskie gleboznawstwo na forum międzynarodowym, Wrocław, Instytut Nauk o Glebie i Ochrony Środowiska, Polskie Towarzystwo Substancji Humusowych, Polska 2018.

#### 6.2.2. Organizacja i prowadzenie warsztatów naukowych:

##### A. Prowadzone w języku polskim:

- Studia w pigułce (Załącznik 3.15);
- dni otwarte Uczelni i Wydziału 2016, 2017;
- Biotechnologia i medycyna roślin wyzwanie współczesnej nauki (Załącznik 3.16);
- Słońce-Roślina-Człowiek (Załącznik 3.17).

##### B. Prowadzone w języku angielskim:

- Soil BIP, EUGREEN 2023.

#### 6.2.3. Reprezentowanie Uczelni w mediach publicznych:

- udział w programach telewizyjnych (2 razy jako ekspert, 3 razy jako specjalista);
- wywiad dla prasy;
- rola w odcinku w serialu popularno-naukowym.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1 – 6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

#### 7.1. Udział w projektach badawczych

Bardzo ważnym przejawem aktywności naukowej był udział w projektach badawczych, finansowanych zarówno ze źródeł krajowych oraz z funduszy unijnych:

- Projekt NCBR NR 12 0010 04: „Mikrobiologiczna degradacja odpadowych produktów keratynowych”, 2008 – 2010, **wykonawca**;
- Projekt NCN N N305 395738: „Analiza kierunków transformacji materii organicznej oraz składników mineralnych w kompostach z odpadów miejskich, wytwarzanych według odmiennych technologii”, 2010 – 2013, **kierownik**;
- Projekt „Kluczowy Stażysta - II edycja”, Program Operacyjny Kapitał Ludzki (poz. 8.2.1)/Europejski Fundusz Społeczny, nr KSW/22/II/2013: „Kompostowanie jako biologiczna metoda zagospodarowania organicznych i mineralnych odpadów uprawowych”, 2013 - 2014, **kierownik**;

### Załącznik 3

- Analiza procesów biotransformacji materii organicznej i składników mineralnych w kompostach wytworzonych z odpadów produkcji ogrodniczej. 2014 – 2015. Zamawiający: Świdnicka fabryka Urządzeń Przemysłowych Sp. z o. o. (ŚFUP sp z o. o.), **kierownik**.

Wymienione wyżej projekty zostały zakończone i rozliczone, a uzyskane wyniki zostały utrwalone w postaci publikacji oraz dysertacji i zaprezentowane na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych.

W chwili obecnej realizowane są następujące tematy:

- Projekt NCN „OPUS 16”, nr 2018/31/B/ST10/00677: „Właściwości spektroskopowe i chemiczne glebowej frakcji humin w odniesieniu do ich wzajemnych interakcji z pestycydami”, 2018 – 2021 (projekt przedłużony z powodu pandemii), **wykonawca**;
- Projekt „MISTRZ – edycja II”, UP we Wrocławiu, Funduszu Wsparcia Badań Naukowych, nr N090/0009/22: „Określenie intensywności i kierunków humifikacji podczas współkompostowania biomasy drewnopochodnej w warunkach stymulacji preparatami mikrobiologicznymi”, 2022 – 2023, **kierownik**;

Wszystkie wyniki zostały zebrane i opracowane, a dodatkowo część rezultatów z grantu OPUS zostało opublikowanych (Weber i in. 2022, IF = 4,2, MNISW = 100) i zgłoszonych do publikacji w *Molecules* (IF = 4.6, MNiSW = 140 pkt.)

#### 7.2. Ekspertyzy i raporty

Aktywność zawodowa przejawiała się również członkostwem w zespołach wykonujących ekspertyzy i inne opracowania na zamówienie instytucji publicznych lub przedsiębiorców. Do najważniejszych z nich zaliczyć można:

- Ocena stanu rekultywacji wybranych obszarów Pól Irygacyjnych Osobowice we Wrocławiu. Zlecający: Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji we Wrocławiu S.A. (MPWiK S.A.), 2009: bardzo cenne prace inwentaryzacyjne służące określeniu stanu środowiska glebowego na badanym obszarze. Wyniki ekspertyzy stanowiły podstawę naukową do podjęcia działań w zakresie racjonalnego zagospodarowania terenów będących pod bezpośrednim i pośrednim wpływem budowy Autostradowej Obwodnicy Wrocławia (AOW).
- Ocena stanu wykonania rekultywacji gruntów rolnych po budowie rurociągu paliwowego na obszarze spółki Agro - Krzepice. Zlecający: Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo S.A. (PGNiG S.A.), 2010: przeprowadzone prace inwentaryzacyjne

### Załącznik 3

umożliwiły ocenę jakości gleb w zasięgu oddziaływania inwestycji. Wyniki ekspertyzy oraz wnioski płynące z raportu stanowiły materiał dowodowy w postępowaniu sądowym.

- Optymalizacja procesu kompostowania w systemie tunelowym. Zlecający: Viviena-Natura Sp. z o. o. w Prochowicach, 2011. Współpraca z firmą opierała się na zoptymalizowaniu składu materiałów (słoma, obornik, odpady zielone i in.) do procesu kompostowania w systemach tunelowych w celu uzyskania środka poprawiającego jakość gleby oraz na wystawieniu opinii o innowacyjności stosowanego systemu kompostowania.
- Ekspertyza oceny jakości i przydatności kompostu wytworzonego z łętów pomidorów do wytwarzania środka poprawiającego jakość podłoża dla roślin szklarniowych. Zlecający: Przedsiębiorstwo Produkcji Ogrodniczej „Siechnice” Spółka z o.o., 2021: wyniki ekspertyzy potwierdziły przydatność zastosowanego substratu oraz użytej technologii do wytwarzania produktu możliwego do zakwalifikowania jako środka wspomagającego uprawę.

#### 7.3. Kształcenie kadr

Oprócz promotorstwa i recenzowania prac dyplomowych (pkt. 6.1), przeprowadzono szkolenia dla pracowników i kierownictwa firmy KST Konsulting sp. z o.o. (Załącznik 3.18). Szkolenie przebiegało dwuetapowo:

- ETAP 1 - część teoretyczna; a) podstawy gleboznawstwa i waloryzacji gleb jako rolniczej przestrzeni produkcyjnej; b) racjonalne gospodarowanie zasobami glebowymi w kontekście stosowanych technik uprawy. Część terenowa: systematyka gleb oraz klasyfikacja bonitacyjna w oparciu o wykonane profile glebowe.
- ETAP 2 - część teoretyczna: a) gospodarowanie zasobami glebowej materii organicznej oraz rolnicze znaczenie związków humusowych; b) rola roślin okrywowych oraz systemów współpracy w kształtowaniu żyzności gleb i jakości plonów.

Firma nadal zainteresowana jest współpracą, a obecnie trwają rozmowy na temat przeprowadzenia szkolenia z zakresu nowoczesnych metod analizy gleb i interpretacji uzyskiwanych wyników.

### Załącznik 3

#### 7.4. Aktualnie prowadzone prace naukowo - badawcze

Kontynuowane są wcześniej podjęte badania z zakresu kompostowania/współkompostowania biomasy ligninowo-celulozowej, które zakończyły się uzyskaniem świadectwa patentowego. W chwili obecnej prowadzone są zaawansowane prace związane realizacją projektu „Określenie intensywności i kierunków humifikacji podczas współkompostowania biomasy drewnopochodnej w warunkach stymulacji preparatami mikrobiologicznymi” (projekt MISTRZ II, UP we Wrocławiu, 2022/2023). Celem badań jest poprawa jakości uzyskanego produktu poprzez zwiększenie jego zasobności w składniki pokarmowe oraz uzyskanie związków humusowych o optymalnych parametrach jakościowych i ilościowych. W nawiązaniu do wcześniejszych doświadczeń (Adamczewska -Sowińska i in. 2021, 2022, **Bekier i in. 2022b**, **Kaluża-Haladyn i in. 2018**, Sowiński i in. 2022), zastosowano kilka kluczowych modyfikacji i rozwiązań: a) wzbogacono skład kompostowanej masy poprzez zastosowanie odpowiednich dodatków naturalnych zawierających makro- i mikroskładniki; b) zrezygnowano ze stosowania nawozów sztucznych (saletra amonowa) w celu uregulowania początkowej wartości stosunku TOC/TN; c) zastosowano stymulację preparatem mikrobiologicznym, przyspieszającym rozkład celulozy; d) zoptymalizowano częstotliwość zabiegów pielęgnacji pryzmy (nawadnianie, mieszanie) w oparciu o dane z termohigrometrów umieszczonych w pryzmach. Przydatność uzyskanego produktu zweryfikowano za pomocą doświadczenia wegetacyjnego analizującego wpływ na kiełkowanie i wzrost rośliny testowej (pomidor oraz ogórek). Obecnie trwa zestawianie i statystyczne opracowywanie zebranych danych analiz fizycznych, chemicznych i wegetacyjnych. Wstępne wyniki wskazują, że zastosowane modyfikacje stymulowały przemiany biomasy substratu w użyteczny produkt i potwierdzają celowość zastosowanych modyfikacji.

Prowadzone są także prace z zakresu określania parametrów jakościowych i ilościowych związków próchnicznych powstających pod wpływem czynnika antropogenicznego. Obiektami prowadzonych badań są komposty z różnych substratów (odpady niesegregowane, bioodpady, biomasa ligninowo-celulozowa), wysokopróchniczne gleby terenów zurbanizowanych oraz wysokopróchniczne gleby użytkowane rolniczo. Badania dotyczą głównie: 1) określenia wpływu stymulacji antropogenicznej na ilość i jakość powstających związków próchnicznych; 2) strukturalnych różnic otrzymanych preparatów związków humusowych w kontekście ich znaczenia rolniczego i przyrodniczego. Uzyskiwane wyniki potwierdzają kilka najważniejszych hipotez badawczych. Wykazano (**Bekier i in. 2022a**, 2023, Jamroz i in. 2020, **Kaluża-Haladyn i**

### Załącznik 3

in. 2019, Weber i in. 2022), że w warunkach optymalnej stymulacji antropogenicznej, dominują procesy humifikacji powodujące powstawanie próchnicy o korzystnym składzie frakcyjnym ( $CHA/CFA \geq 1$ ,  $CAC:CALK \leq 0,5$ ) i niskim wskaźniku wodnorozpuszczalności węgla organicznego ( $WEOC \leq 10\%TOC$ ), natomiast o znacznej zawartości frakcji rezydualnej, głównie humin ( $CHU \geq 40\%TOC$ ). Jednocześnie analizowane preparaty kwasów huminowych wykazują słaby stopień humifikacji i posiadają parametry charakterystyczne dla tzw. młodych kwasów humusowych. Huminy natomiast wykazują dużo wyższy stopień aromatyzacji, wysoką hydrofobowość oraz bardzo silne powiązanie z frakcjami mineralnymi, co najprawdopodobniej warunkuje stabilizację tej frakcji w środowisku.

Poznanie kierunków transformacji materii organicznej w ekosystemach miejskich może być pomocne w planowaniu nawożenia, szczególnie uzupełniania materii organicznej i ochrony środowiska glebowego. Materia organiczna w glebach miejskich charakteryzuje się różną podatnością na transformację, rozkład i humifikację. Są to procesy złożone, prowadzące do zmian związanych z łańcuchem troficznym, zachodzących w różnym horyzoncie czasowym. Wykazano (Beyer i in. 1995, Oktaba i in. 2018, Poyuat i in. 2002), iż na obszarach poddanych niektórym formom antropopresji, dominującą frakcją glebowej materii organicznej są związki niehydrolizujące (węgiel w pozostałości/węgiel rezydualny: CR), wśród których dominują huminy (CHU). Ponadto, w wielu przypadkach w składzie frakcyjnym substancji humusowych badanych gleb miejskich, kwasy huminowe (HA) dominowały nad kwasami fulwowymi (FA) i tworzyły bardzo specyficzne, stabilne cząsteczki, w tym kompleksy i związki chelatowe, przyczyniając się do stabilizacji próchnicy. Mając na uwadze powyższe przesłanki, przeprowadzono specjalistyczne jakościowe i ilościowe analizy materii organicznej w glebach poddanych antropopresji urbanizacyjnej.

Badania obejmowały poziomy A z gleb terenów miejskich (Bekier i in. 2023) zaklasyfikowanych według WRB do grupy Technosol (Mollic Urbic oraz Urbic), a według PTG 2019 jako typ technogeniczne (próchniczne i urbisole próchniczne), natomiast jako kontrolą była gleba naturalna zaklasyfikowana jako mada brunatna/Fluvis Cambisol (PTG/WRB). Badane gleby charakteryzowały się dużą zasobnością w składniki pokarmowe, odczynem obojętnym i uziarnieniem piasku gliniastego (mada) oraz gliny piaszczystej (technogeniczne). Zawartość TOC w poziomach powierzchniowych badanych gleb antropogenicznych była kilkukrotnie wyższa w porównaniu z glebą naturalną. Podobne wyniki uzyskano dla frakcji CR, przy czym w urbisolach i madzie brunatnej związki

### Załącznik 3

niehydrolizujące były frakcją dominującą. We wszystkich badanych glebach zawartość CHA była wyraźnie wyższa od CFA, a najwyższy wskaźnik CHA/CFA stwierdzono w glebie technogenicznej próchnicznej. Na podstawie analiz składu elementarnego molekuł kwasów huminowych wykazano, że w badanych glebach różnice w zawartości wodoru i węgla miały decydujący wpływ na stopień humifikacji i dojrzałość badanych substancji humusowych. Obliczone stosunki atomowe wykazały, że procesy zachodzące w profilu kontrolnym doprowadziły do powstania cząsteczek HA o wyższym stopniu humifikacji i większej stabilności w porównaniu do gleb technogenicznych. Ponadto, spektroskopia  $^{13}\text{C}$  NMR wykazała, że w strukturze kwasów huminowych z wszystkich badanych gleb dominowały komponenty alifatyczne. Obliczone wartości stopnia aromatyzacji także potwierdziły obecność słabo rozbudowanego rdzenia aromatycznego w preparatach HA.

Przeprowadzone badania dostarczyły informacji rozwijających wiedzę w zakresie transformacji SOM w ekosystemach miejskich, będących pod wpływem antropopresji urbanizacyjnej. Wzbogacenie powierzchniowych warstw zarówno naturalnych jak i antropogenicznych gleb miejskich w materię organiczną można wytłumaczyć stosowaniem nawozów organicznych i torfu na etapie urządzania i dostosowywania badanego obszaru do turystyki. Wykazano, że materia organiczna występująca w glebach technogenicznych posiadała niski stopień humifikacji, a kwasy huminowe wchodzące w jej skład były niedojrzałe. Potwierdzono występowanie znacznych ilości CR jako cechę charakterystyczną dla gleb miejskich (Beyer i in. 1995, Oktaba i in. 2018, Pouyat i in. 2002), natomiast hipotezy dotyczące powstawania i znaczenia frakcji niehydrolizujących jako integralnej części SOM w ekosystemach gleb miejskich są przedmiotem aktualnie prowadzonych badań. Wykazano również, że stabilizacja substancji humusowych badanych gleb miejskich wynikała z powstawania bardzo specyficznych cząstek: kompleksów wewnątrz- i międzycząsteczkowych (adhezja) oraz związków chelatowych z fazą mineralną gleby. Należy zatem przypuszczać, iż w środowiskach glebowych odpowiednio zasobnych w kationy metali i/lub minerały ilaste, interakcje fizyko – chemiczne między częścią mineralną a organiczną mogą mieć większe znaczenie w procesie stabilizowania SOM niż procesy biochemiczne odpowiedzialne za tworzenie struktur związków humusowych.

#### **Bibliografia uzupełniająca do pkt. 7.4:**

- Adamczewska-Sowińska K., Sowiński J., Jamroz E., Bekier J. 2021. Combining Willow Compost and Peat as Media for Juvenile Tomato Transplant Production, *Agronomy* 2021, 11, 10, 1-16, Numer artykułu: 2089, DOI:10.3390/agronomy11102089.

### Załącznik 3

- Adamczewska-Sowińska K., Sowiński J., Jamroz E., Bekier J. 2022. Compost from willow biomass (*Salix viminalis* L.) as a horticultural substrate alternative to peat in the production of vegetable transplants. *Sci. Rep.* 2022, 12, 1-14, Numer artykułu:17617. DOI:10.1038/s41598-022-22406-7.
- Bekier J., Jamroz E., Walenczak-Bekier K., Uściła M. 2023. Soil organic matter composition in urban soils: a study of Wrocław agglomeration, SW Poland, *Sustainability*, 2023, 15,3, DOI:10.3390/su15032277.
- Beyer, L., Blume, H.-P., Elsner, D.-C., Willnow, A. 1995. Soil organic matter composition and microbial activity in urban soils. *Sci. Total Environ.* 1995, 168, 3, 267-278.
- Jamroz E., Bekier J., Medyńska-Juraszek A., Kałuża-Haładyn A., Cwielał-Piasecka I., Bednik M. 2020. The contribution of water extractable forms of plant nutrients to evaluate MSW compost maturity: a case study, *Scientific Reports* 2020, 10, 1-9, Numer artykułu:12842. DOI:10.1038/s41598-020-69860-9.
- Oktaba L., Odrobinska D., Uzarowicz L. 2018. The impact of different land uses in urban area on humus quality. *J. Soils Sediments* 2018, 18, 2823–2832.
- Pouyat R., Groffman P., Yesilonis I., Hernandez L. 2002. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environ. Pollut.* 2002, 116, 107–118.
- Sowiński J., Jama-Rodzeńska A., Perera P., Jamroz E., Bekier J. 2022. The changes of willow biomass characteristics during the composting process and their phytotoxicity effect on *Sinapis alba* L. , *PLoS ONE*, 2022, vol. 17, 10, s.1-17, Numer artykułu: 0275268. DOI:10.1371/journal.pone.0275268.
- Weber J., Jamroz E., Kocowicz A., Dębicka M., Bekier J., Cwielał-Piasecka I., Ukalska-Jaruga A., Mielnik L., Bejger R., Jerzykiewicz M. 2022. Optimized isolation method of humin fraction from mineral soil material, *Environmental Geochemistry and Health* 2022, 44, 1289-1298. DOI:10.1007/s10653-021-01037-3.

#### 7.5. Podsumowanie dorobku naukowego

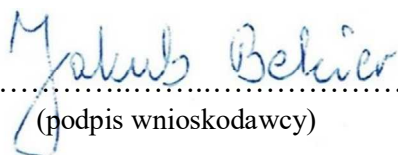
Na całkowity dorobek naukowy składają się nie tylko publikacje powstałe po uzyskaniu stopnia doktora i zatrudnieniu na stanowisku adiunkta. Wkład w rozwój zainteresowań oraz poszerzanie wiedzy i umiejętności miała aktywność naukowa w czasie studiów magisterskich oraz doktoranckich. Poniżej zaprezentowano porównanie sumarycznego dorobku przed oraz po uzyskaniu stopnia doktora inżyniera



**Załącznik 3**

<b>Rodzaj dorobku naukowo - badawczego</b>	<b>Przed uzyskaniem stopnia doktora inżyniera</b>	<b>Po uzyskaniu stopnia doktora inżyniera</b>
Artykuły z bazy JCR	0	16 (WoS), 17 (Scopus)
Artykuły z listy B MNiSW	2	6
Rozdziały w monografiach	4	4
Redakcja monografii naukowych	1	1
Abstrakty konferencyjne	7	17
Udział w projektach badawczych	1	7
Kierowanie projektami badawczymi	0	4
Recenzje artykułów naukowych	0	11
Liczba cytowań ogółem*	0	177 (WoS), 215 (Scopus),
Liczba cytowań bez autocytowań*	0	143 (WoS), 174 (Scopus),
Sumaryczny HI*	0	7 (Scopus), 6 (WoS)
Sumaryczny IF*	0	45,901
Punkty według MNiSW*	12	1243

\*) Baza Wiedzy UP we Wrocławiu, Web of Science (WoS), Scopus

  
.....  
(podpis wnioskodawcy)