
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 10

ISSN 1899-3230

Rok V

Warszawa–Opole 2012

MARTA BOŻYM*

Biologiczne przetwarzanie biodegradowalnej frakcji odpadów komunalnych i osadów ściekowych w wermikulturze

Słowa kluczowe: wermikultura, odpady komunalne, osady ściekowe.

Wermikultura to hodowla dżdżownic przy wysokim ich zagęszczeniu, prowadzona na odpadach organicznych. Głównym celem wermikultury jest produkcja nawozów organicznych lub środków wspomagających uprawę roślin, zgodnie z Ustawą z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz.U. z 2007 r. nr 147, poz. 1033). Wermikulturę można także wykorzystać do przetworzenia frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych bądź osadów ściekowych. Dodatkowo służy ona do hodowli samych dżdżownic, które następnie stosuje się w produkcji leków, detergentów i środków kosmetycznych oraz jako pasza. Dżdżownice wraz z wermikompostem można wykorzystać do podniesienia jakości gleb, wprowadzając je na tereny zdegradowane. W wermikompostowaniu odpadów najlepiej sprawdza się *Eisenia fetida* (Sav.). Najważniejsze cechy odróżniające ten gatunek od innych dżdżownic glebowych to większa płodność, dłuższe życie oraz duża odporność na negatywne czynniki środowiskowe. W produkcji wermikompostu należy pamiętać o zdolnościach kumulacji metali ciężkich w ciałach dżdżownic. Zjawisko to jest często wykorzystywane w tak zwanej bioindykacji zanieczyszczeń środowiska.

W pracy opisano sposób prowadzenia kompostowania w wermikulturze, wady i zalety procesu oraz możliwość dalszego wykorzystania wermikompostu. Przedstawiono wyniki badań własnych oraz licznych autorów nad prowadzeniem wermikultury na odpadach i osadach ściekowych.

1. Wermikultura

Wermikultura to hodowla dżdżownic prowadzona na różnego rodzaju odpadach [26]. Najczęściej celem wermikultury jest produkcja nawozu organicznego lub zagospodarowanie odpadów organicznych. Wermikompostowanie jako proces biologicznego przetwarzania odpadów zgodnie z ustawą o odpadach (Dz.U.

* Dr inż., Politechnika Opolska.

z 2007 r. nr 62, poz. 628) [46] klasyfikowany może być jako proces odzysku (R3) lub proces unieszkodliwiania (D8). Zgodnie z definicją zawartą w ustawie o odpadach, odzysk to wszelkie działania polegające na wykorzystaniu odpadów w całości albo w części lub prowadzące do odzyskania z odpadów substancji, materiałów lub energii i ich wykorzystania. Jeżeli wermikompost spełni wymagania jakościowe w odniesieniu do nawozów lub środków wspomagających uprawę roślin, zgodnie z ustawą o nawozach i nawożeniu [47], może być wprowadzony na rynek, a jego zagospodarowanie można traktować jako odzysk. W polskim prawie wymagania jakościowe dotyczące nawozów organicznych i środków wspomagających uprawę roślin zostały jednoznacznie określone (tab. 1). Oprócz zanieczyszczenia metalami ciężkimi, w kompostach (w tym w wermikompostach) nie mogą występować żywe jaja pasożytów jelitowych – *Ascaris sp.*, *Trichuris sp.*, *Toxocara sp.* – oraz bakterie z rodzaju *Salmonella*. Jeśli jakość produktu procesu R3 nie odpowiada wymaganiom ustawy o nawozach i nawożeniu należy uznać, że winien być on klasyfikowany jako proces unieszkodliwiania (D8). Wermikompost traktowany jest wówczas jako odpad o kodzie 19 05 03 – kompost nieodpowiadający wymaganiom (nienadający się do wykorzystania).

T a b e l a 1

Wymagania jakościowe dotyczące nawozów organicznych oraz środków wspomagających uprawę roślin [47]

Parametr	Nawozy	Środki wspomagające
Substancja organiczna [% s.m.]	≥ 30	-
Nikiel, Ni [mg/kg s.m.]	≤ 60	≤ 60
Chrom, Cr [mg/kg s.m.]	≤ 100	≤ 100
Ołów, Pb [mg/kg s.m.]	≤ 140	≤ 140
Kadm, Cd [mg/kg s.m.]	≤ 5	≤ 5
Rtęć, Hg [mg/kg s.m.]	≤ 2	≤ 2
Potas, K ₂ O [% masy]	≥ 0,2	-
Fosfor, P ₂ O ₅ [% masy]	≥ 0,2	-
Azot, N [% masy]	≥ 0,3	-

Jeżeli wermikompost prowadzony był na osadach ściekowych, może być wykorzystany przyrodniczo, pod warunkiem spełnienia norm sanitarnych i zawartości metali ciężkich zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz.U. z 2010 r. nr 137, poz. 924) [37]. Graniczne wartości metali ciężkich w osadach wykorzystywanych przyrodniczo przedstawia tabela 2.

T a b e l a 2

Normy jakościowe osadów ściekowych wykorzystywanych przyrodniczo [37]

Metale	Ilość metali ciężkich w mg/kg suchej masy osadu nie większa niż przy stosowaniu komunalnych osadów ściekowych		
	w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne	do rekultywacji terenów na cele nierolne	przy dostosowaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, do upraw roślin przeznaczonych do produkcji kompostu, do produkcji roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz
mg/kg s.m.			
Ołów (Pb)	750	1 000	1 500
Kadm (Cd)	20	25	50
Rtęć (Hg)	16	20	25
Nikiel (Ni)	300	400	500
Cynk (Zn)	2 500	3 500	5 000
Miedź (Cu)	1 000	1 200	2 000
Chrom (Cr)	500	1 000	2 500

2. Proces kompostowania odpadów w vermikulurze

Badania nad wykorzystaniem dżdżownic do przetwarzania odpadów rozpoczęli Amerykanie w latach czterdziestych XX w. Badali i krzyżowali liczne gatunki w celu wyłonienia tych, które najbardziej efektywnie przyspieszają rozkład materii organicznej odpadów. W połowie XX w. zaczęto wykorzystywać efekty tych badań i tworzono vermikulurę głównie do produkcji nawozu z odpadów rolniczych. W Polsce w latach siedemdziesiątych XX w. zainteresowano się tą tematyką, a w latach osiemdziesiątych powstały zakłady zajmujące się masową produkcją dżdżownic i vermikompostu, np. firma LOMBRIGO [31]. Wówczas produkcję tę opierano na oborniku. By potwierdzić wysoką wartość nawozową vermikompostu na bazie obornika, w 1989 r. przeprowadzono badania wegetacyjne w Instytucie Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach. Wyniki były zaskakujące. Okazało się, że wartość nawozowa vermikompostów z obornika była niższa niż samego obornika. Podczas vermikompostowania doszło do wyraźnych strat azotu i substancji organicznej, co obniżyło wartość nawozową produktu [31]. Wynika z tego, że w przypadku stosowania vermikulurę jedynie do produkcji nawozu, należy wziąć pod uwagę to, czy wartość nawozowa sub-

stratu nie jest na tyle wysoka, by zastosować go w rolnictwie bez przetwarzania. Dlatego vermikulturę powinno się wykorzystywać do przetwarzania odpadów, gdy materiał poddawany przeróbce nie może być stosowany bezpośrednio jako nawóz.

W vermikulturze najczęściej wykorzystuje się dżdżownicę *Eisenia fetida* (Sav.), czyli tak zwaną czerwoną kalifornijską. Gatunek ten żyje przy powierzchni, gdzie jest najbardziej skoncentrowana materia organiczna. Dzięki tej właściwości dżdżownica trzyma się siedliska i przetwarza podawaną od góry materię organiczną. Najważniejsze cechy odróżniające ją od innych dżdżownic glebowych to większa płodność (zapłodnienie co 7 dni), długość życia dochodząca do 16 lat oraz duża odporność na negatywne czynniki środowiskowe. Czerwona kalifornijska została wyhodowana przez naukowców amerykańskich w latach pięćdziesiątych XX w. Pewne modyfikacje gatunkowe wprowadzili uczeni włoscy i francuscy. Dżdżownica jest obupłciowa, ale wymaga partnera w procesie zapłodnienia. Dorosłe osobniki zabarwione są na ciemnoczerwony kolor. U form dojrzałych pojawia się tak zwane clitelium (siodelko), które pełni funkcje rozrodcze. Zapłodnione jaja otoczone są kokonem, rozwijają się w podłożu. Wylęganie młodych osobników następuje zwykle po ok. 14–21 dniach. W porównaniu z żyjącą w glebie dżdżownicą *Lumbricus terrestris* L., czerwona kalifornijska charakteryzuje się czterokrotnie dłuższym życiem i jest dwunastokrotnie bardziej płodna [18].

Dżdżownice wykorzystuje się do utylizacji odpadów organicznych, takich jak odchody zwierzęce, resztki poźniwne, frakcje biodegradowalną odpadów komunalnych, odpady z przemysłu rolno-spożywczego czy osady ściekowe. Dżdżownice wraz z vermikompostem można także wprowadzać na tereny zdegradowane w celu podniesienia jakości gleb. Potwierdzają to badania Pośpiech [35] dotyczące możliwości introdukcji *Eisenia fetida* na rekultywowane osadniki byłych Krakowskich Zakładów Sodowych „Solvay”. Autor uzyskał zadowalające wyniki doświadczenia. Okazało się, że dżdżownice poprawiły strukturę gleby na terenach poprzemysłowych. Prowadzone są także badania nad wykorzystaniem dżdżownic do przetwarzania ścieru odpadów gumowych w vermikulturze [18].

Wermikultura świetnie nadaje się również do utylizacji odpadów kuchennych. Vermikompostowanie resztek kuchennych jest już popularne w USA. Sprzedawane są tam specjalne pojemniki, które mogą być przechowywane wewnątrz domu lub poza nim. Przedsiębiorstwa komercyjne prowadzą hodowle dżdżownic i sprzedają populacje zarodowe. Dodatkowo instruuja nabywców jak prowadzić vermikulturę w domu. Propagowanie vermikultury ma miejsce także w innych krajach, nawet tak egzotycznych jak Afryka Południowa czy Indie. Również w Polsce coraz bardziej popularne stają się tak zwane skrzynki ekologiczne w szkołach, które mają edukować dzieci w zakresie recyklingu [24–25].

Duże zasługi w propagowaniu wykorzystania dżdżownic do utylizacji odpadów ma prof. Joanna Kostecka z Uniwersytetu Rzeszowskiego, która od lat dziewięćdziesiątych XX w. organizuje spotkania i konferencje na ten temat.

Prowadzenie vermikultury wymaga stworzenia optymalnych warunków do życia i rozwoju dżdżownic. Przed wprowadzeniem dżdżownic do podłoża, odpad powinien być wstępnie przetworzony przez liczne organizmy. Część z nich obecnych w podłożach hodowlanych samoczynnie je zasiedla, zanim zostaną tam wprowadzone dżdżownice. Do organizmów tych należą pierwotniaki, nicienie i wazonkowce. Łączna aktywność tych organizmów sprzyja przyspieszeniu przemian występujących w podłożu. Dzięki drażnionym przez nie korytarzom poprawia się natlenienie i wilgotność, mieszana i rozdrabniana jest materia organiczna, co zwiększa tempo mineralizacji wermikompostu. W przewodach pokarmowych dżdżownic tworzą się trwałe agregaty organiczno-mineralne, o gruzelkowej strukturze i zwiększonej wodoodporności, które poprawiają strukturę wermikompostu. Podstawowym czynnikiem hodowli jest wysoki udział substancji organicznej. Odczyn pH podłoża powinien zawierać się w granicach 6–8. Regulację odczynu prowadzi się poprzez stosowanie zasadowej kredy, kamienia wapiennego, czy też kwaśnego torfu lub liści z drzew iglastych.

Podobnie można wpływać na stosunek C:N, podnosząc zawartość węgla przez dodanie na przykład tektury albo słomy. Kalembasa [20] wykazała, że najbardziej odpowiedni dla dżdżownic stosunek C:N wynosi 25:1, a najbardziej korzystne rozdrobnienie podłoża to 25 mm. Istotnym czynnikiem decydującym o aktywności dżdżownic w podłożu jest również wilgotność. Zaleca się, żeby udział wody w podłożu wynosił 70–80%. Wynika to ze specyfiki odżywiania się dżdżownic, które zasysają pokarm w stanie półpłynnym. Ilość wody powinna być przez hodowcę stale kontrolowana. W zbyt suchych lub uwodnionych siedliskach reprodukcja spada. W warunkach naturalnych o wilgotności podłoży decydują deszcze, dlatego przy nadmiernych opadach zaleca się okrywanie siedlisk hodowlanych. Naturalne parowanie można zmniejszyć i łatwiej je kontrolować, gdy siedliska zlokalizowane są w miejscach ocienionych i osłoniętych od wiatru lub gdy mają ochronne osłony. Na terenie prowadzenia vermikultury musi być dostępna woda, przy czym niekoniecznie musi to być wodociąg. Innym czynnikiem ważnym dla dżdżownic jest temperatura podłoża. Dżdżownica kompostowa aktywna jest w szerokim zakresie temperatur (optimum 12–28°C). Z tego powodu siedliska dżdżownic nie powinny być budowane na otwartych przestrzeniach o silnym nasłonecznieniu. W okresie wegetacyjnym prawidłową temperaturę hodowli można regulować jedynie przez zacienianie i prawidłowe zraszanie siedlisk. Odporność na zimno zmienia się u dżdżownic w zależności od pory roku. Pojawia się u nich stopniowo. W lecie zginą, jeśli wystawi się je na działanie niskiej temperatury (poniżej 0°C). Z nadejściem zimy są natomiast

zdolne przetrwać w podłożu zamrożonym. Późną jesienią siedliska powinny być przykrywane dodatkowymi warstwami obornika, liści czy słomy.

Po zakończonym procesie dżdżownice łatwo można oddzielić od gotowego wermikompostu, metodami fizycznymi, rzadziej chemicznymi [27]. Następnie przenosi się je do nowego stanowiska wermikultury, możliwe jest wykorzystanie jedynie części osobników. Resztę można wykorzystać gospodarczo, np. jako pasza dla zwierząt, jeżeli skład biomasy dżdżownic nie jest przeciwwskazaniem [23–24, 26–27]. Wśród zalet wytwarzania wermikompostu z odpadów należy wymienić możliwość produkcji nawozu organicznego, zmniejszenie objętości wyjściowej odpadów, homogenizacja i stabilizacja składu, ograniczenie odorów, poprawa struktury, rozwój mikroorganizmów kompostowych czy wzrost udziału dostępnych form makroelementów. Do wad trzeba zaliczyć duże zapotrzebowanie terenu, pracochłonność i konieczność ciągłej kontroli procesu, zmniejszenie udziału substancji organicznej i azotu, niepełna higienizacja, możliwość kumulacji metali ciężkich w wermikompoście wskutek zmniejszenia objętości masy pierwotnej oraz w ciałach dżdżownic, które następnie mogą stanowić odpad niebezpieczny.

3. Proces kompostowania osadów ściekowych w wermikulturze

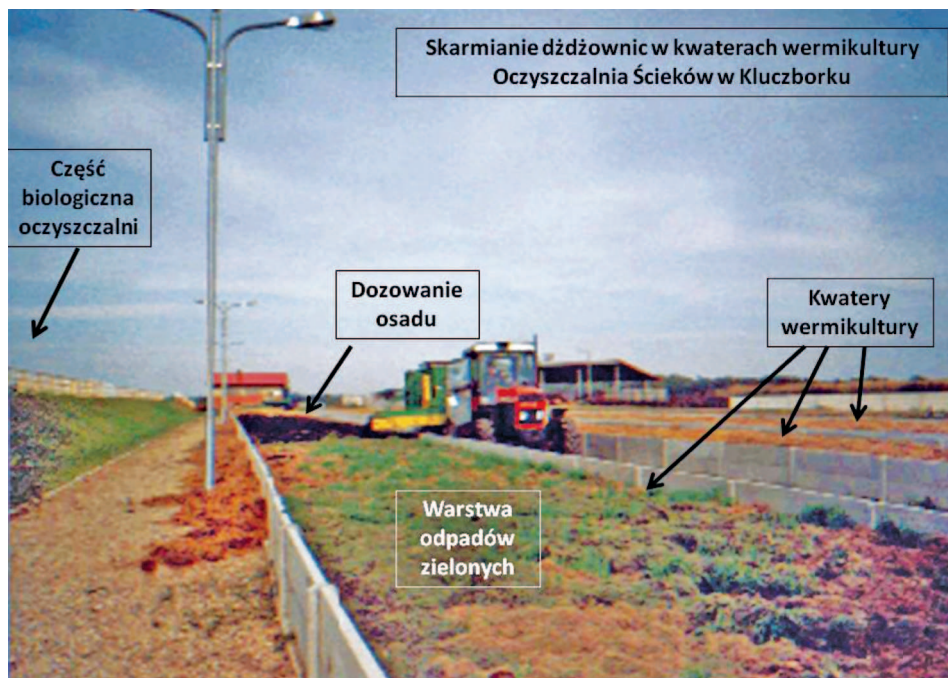
Szerokie zastosowanie dżdżownic do kompostowania osadów ściekowych występuje w Polsce od połowy lat dziewięćdziesiątych XX w. Pionierem była Oczyszczalnia Ścieków w Pyrzycach, która rozpoczęła produkcję wermikompostu nieco wcześniej, wykorzystując go do celów rolnych [25]. Hodowle na osadach ściekowych prowadzi się w odpowiednich stanowiskach, ograniczonych z boków deskami lub elementami betonowymi. Ograniczenia boczne stanowisk muszą ściśle do siebie przylegać, podobnie jak dno. Dzięki temu hodowla oddzielona jest od środowiska, w tym od naturalnych drapieżników takich jak kret. Populacje dżdżownic wprowadzane do stanowisk wermikultury pochodzą najczęściej z hodowli obornikowych. W pierwszej fazie wprowadzane są do odpowiednio przygotowanej warstwy stratyfikacyjnej [26]. W Oczyszczalni Ścieków w Kluczborku osady są wstępnie mieszane z materiałem strukturotwórczym, najczęściej ze słomą, i pozostawione na pewien okres w celu wstępnego rozkładu materiału (ryc. 1). Należy wspomnieć, że dżdżownice wrażliwe są na obecność amoniaku w podłożu, który działa na nie toksycznie [51]. Osady ściekowe bogate w ten składnik mogą w bezpośrednim kontakcie spowodować straty w populacji. Dlatego przed wprowadzeniem dżdżownic, stosuje się wstępnie przetworzony osad ściekowy z materiałem roślinnym [10]. Według badań Hury [17] lepszym dodatkiem do wermikompostowanych osadów ściekowych w porównaniu z trocinami, liśćmi czy makulaturą jest słoma.



Fot. M. Bożym.

Ryc. 1. Wstępne leżakowanie osadów z materiałem strukturotwórczym w Oczyszczalni Ścieków w Kluczborku

Przetwarzanie osadów odbywa się etapowo. Osad rozkładany jest cienkimi warstwami na przemian z odpadami zielonymi (słomą, sianem). Dzięki temu nie jest wymagane przrzucanie masy kompostowej, co jest rutynowym zabiegiem podczas standardowego kompostowania w przyzmacach. Najważniejszym zabiegiem pielęgnacyjnym jest zraszanie stanowisk i regularne karmienie dżdżownic. Udział wody w osadzie musi być kontrolowany. Zbyt duże uwodnienie, np. w czasie deszczy, może spowodować procesy gnilne i obumieranie populacji dżdżownic. Dlatego bardzo ważny jest dobry drenaż pod stanowiskiem do wermikompostowania. Skarmianie dżdżownic może odbywać się ręcznie lub w sposób zmechanizowany. W Oczyszczalni Ścieków w Kluczborku wykorzystuje się do tego celu specjalnie przerobiony ciągnik rolniczy (ryc. 2). Proces produkcyjny wermikompostu z osadów ściekowych zwykle odbywa się od kwietnia do października. Przed zimą stanowiska specjalnie zabezpiecza się grubą warstwą słomy.



Fot. M. Bożym.

Ryc. 2. Stanowiska wermikultury w Oczyszczalni Ścieków w Kluczborku, moment skarmiania dżdżownic

Jakość wermikompostu z osadów ściekowych zależy od składu wyjściowego, zawartości zanieczyszczeń czy prowadzonych zabiegów pielęgnacyjnych. Kostecka [26] podaje, że jakość wermikompostów z polskich oczyszczalni ścieków, takich jak Zambrów, Kluczbork, Praszka, Wrocław, Łowicz, Kutno, Krynica Morska, Ustroń, Wadowice, Brzesko, Łódź, wykazywały dobrą jakość i wysoki udział składników pokarmowych. Potwierdzają to badania własne prowadzone w Oczyszczalni Ścieków w Kluczborku [10], przedstawione w tabeli 3. Wykonano je w czasie cyklu produkcyjnego, próbki pobierano z trzech stanowisk wermikultury.

W badanych osadach stwierdzono zmniejszenie udziału azotu i substancji organicznej w czasie trwania procesu. Maćkowiak [31] uważa to za normalny efekt procesu wermikompostowania, wynikający z mineralizacji masy organicznej osadów. Określono także stosunek węgla do azotu, który w osadach surowych wahał się w zakresie 12–17:1 (średni 15:1), natomiast w gotowym wermikompoście wynosił średnio 25:1. W wyniku wermikompostowania osadów nastąpiła poprawa struktury z mazistej na ziemistą oraz ograniczone zostały odory. W badaniach osadów ściekowych w Kluczborku stwierdzono zmniejszenie udziału

amoniaku. Wzrosła natomiast zawartość suchej masy, fosforu, azotanów oraz metali ciężkich. Zwiększenie udziału metali ciężkich wynika z redukcji masy kompostowej, a tym samym z zagęszczenia składników. Część metali może być kumulowana w ciałach dżdżownic, co potwierdzono w badaniach.

T a b e l a 3
Zmiany w składzie wermikompostowanych osadów ściekowych z Kluczborka [10]

Parametr w przeliczeniu na suchą masę	Osad surowy	Wermikompost
Sucha masa [%]	23,7±2,5	52,8±5,6
Substancja organiczna [%]	36,7±1,7	24±2
pH	6,7±0,2	6,6±0,3
N – ogólny [g/kg]	22±1	17±1
N – NH ₄ [mg/kg]	698±30	571
N – NO ₃ [mg/kg]	64±11	560±74
C:N	15±2	25±2
P – ogólny [g/kg]	65±9	79±17
K [g/kg]	2,0±0,04	4,0±0,08
Mg [g/kg]	1,0±0,03	1,3±0,04
Ca [g/kg]	3,0±1,0	8,0±1,0
Na [g/kg]	0,30±0,02	0,26±0,01
Cd [mg/kg]	3,2±0,4	2,8±0,5
Pb [mg/kg]	30,3±2,5	43,6±1,3
Cu [mg/kg]	34,4±0,7	41,9±1,9
Zn [mg/kg]	136±6	102±6
Cr [mg/kg]	133±10	132±6
Ni [mg/kg]	25,1±2,3	26,5±1,1

Z uwagi na zdolność kumulacji metali przez dżdżownice, wermikompostowanie osadów wydaje się najbardziej odpowiednie dla oczyszczalni ścieków na terenach wiejskich bądź w małych nieuprzemysłowionych miejscowościach. Wówczas możliwe jest uzyskanie wartościowego nawozu i uniknięcie skażenia metalami, zarówno produktu, jak i dżdżownic.

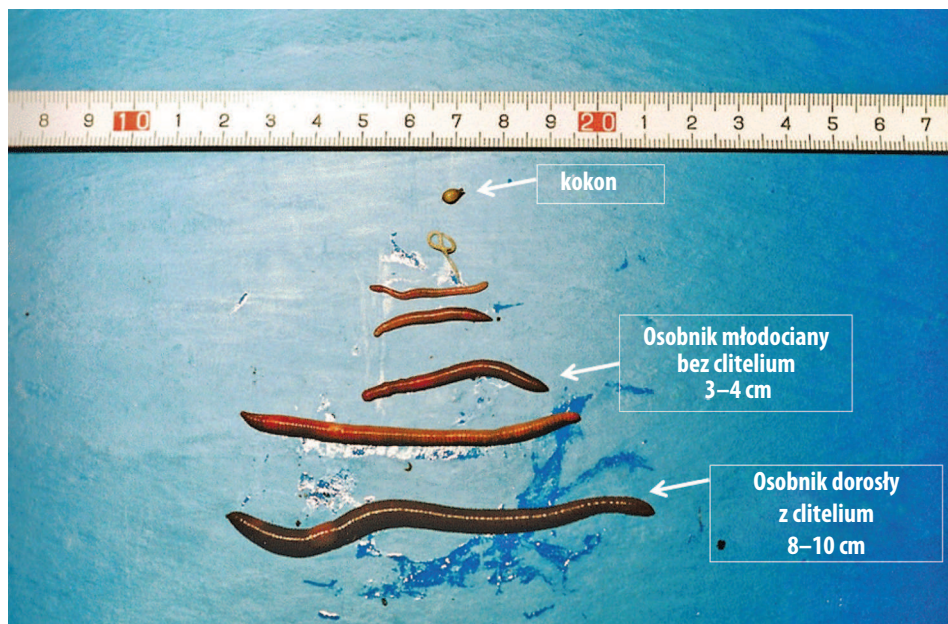
Innym zagrożeniem prowadzenia wermikultury na osadach ściekowych jest możliwość produkcji materiału skażonego przez pasożyty przewodu pokarmowego. Problem został opisany przez Kiepas-Kokot i in. [21]. Autorzy zbadali wermikomposty obornikowe, zieleni miejskiej oraz osadowe i stwierdzili ponadnormatywne zanieczyszczenie wermikompostów na bazie obornika przez jaja helmintów. Pozostałe wermikomposty nie wykazywały zanieczyszczenia. Autorzy sugerują, że na wynik mogło mieć wpływ skażenie materiału poddawane go wermikompostowaniu. Okazuje się, że technologia przetwarzania odpadów na wermikompost, z uwagi na wymagania życiowe dżdżownic, nie pozwala na pełną higienizację zanieczyszczonego surowca. Temperatura w stanowiskach rzadko przekracza 40°C, co nie gwarantuje pełnej higienizacji materiału.

4. Zdolność kumulacji metali ciężkich przez dżdżownice

Gdy prowadzący wermikulturę chce wyprodukować bezpieczny dla środowiska wermikompost i zdrową biomasę dżdżownic, nie może lekceważyć zjawiska kumulowania metali ciężkich w ciałach dżdżownic. Zdolność kumulacji związków toksycznych przez organizmy wykorzystuje się w badaniach monitoringowych nad stopniem zanieczyszczenia środowiska. Dżdżownice, z uwagi na ich odporność na wysokie stężenia metali ciężkich w podłożu, często wykorzystuje się jako bioindykatory zanieczyszczenia środowiska tymi związkami. Zgodnie z ekologicznym prawem minimum Liebiega i prawem tolerancji Shelforda oraz wymaganiami dotyczącymi organizmów uznawanych za bioindykatory, dżdżownice świetnie nadają się do tego celu [8, 11]. Należy pamiętać, że stanowią one pokarm wielu drapieżnych bezkręgowców i kręgowców, a tym samym mogą odgrywać ważną rolę w transferze zanieczyszczeń w wyższych poziomach troficznych. Toksyczność metali w odniesieniu do dżdżownic zależy od wielu czynników, w tym od stężenia metalu w podłożu, jego formy chemicznej, zawartości substancji organicznej, odczynu, zmian sezonowych. Dżdżownice stały się obiektem wielu doświadczeń dotyczących kumulacji metali w ich organizmach. Badane są miejsca gromadzenia w poszczególnych organach, biochemia detoksykacji, wpływ na czynności życiowe, dawki letalne i śmiertelne dla poszczególnych gatunków i konkretnych metali czy wpływ czynników środowiska na kumulację. Stwierdzono, że bezkręgowce lądowe nie potrafią regulować procesów pobierania metali. Istnieje jednak zjawisko wybiórczości pokarmowej dżdżownic. W doświadczeniu Depta i in. [12] udowodnili zdolność dżdżownic do rozróżniania pokarmu skażonego metalami od czystego. Reinecke i in. [36] wykazali, że dżdżownice posiadają większą odporność na wysokie stężenia metali, jeżeli znajdują się w środowisku naturalnym niż w bezpośrednim kontakcie z metalem w warunkach laboratoryjnych. Autorzy sugerują stopniowe uodpornianie się dżdżownic na wysokie stężenia metali w podłożu. Bezpośredni kontakt z toksyną dżdżownic nieprzystosowanych może być dla nich zabójczy. Badania obaliły wcześniejsze przypuszczenia autorów, że dżdżownice posiadają genetycznie uwarunkowaną odporność na metale. Okazuje się, że przystosowują się one do niekorzystnych warunków środowiska z czasem, nie przekazują jednak tych zdolności następnym pokoleniom. Każdy osobnik wytwarza mechanizmy obronne samodzielnie. Voua-Otomo i in. [48] nazwali tę zdolność aklimatyzacją fizjologiczną.

Toksyczność metali dla dżdżownic jest różna. Dla *Eisenia fetida* przedstawia się następująco: według Kalembasy [19] $Pb < Ni < Cd$, natomiast według Sauve i in. [38] $Pb < Zn < Mo < Cd < Cu < Hg$. Wynika z tego, że najmniej toksycznym dla dżdżownic metalem jest ołów. Ma to związek z jego powino-

wactwem z wapnem i kumulacji w formie związanej w gruczołach wapiennych. Dżdżownice są odporne na wysokie stężenia metali w podłożu, m.in. dzięki możliwości ich detoksykacji w organizmie. Najczęściej metale gromadzone są w komórkach chloragocytarnych otaczających jelito, wiązane przez substancje organiczne w chloragosomach, wodniczках odpadowych, w których koncentrują się produkty rozpadu metalotionein czy w gruczołach wapiennych, których zadaniem jest neutralizacja wapnia zawartego w pokarmie. Dżdżownice posiadają nie tylko zdolności do kumulowania metali i ich neutralizacji, ale także do ich wydalania z organizmu w formie nietoksycznej. Jednak te zdolności przystosowawcze niosą za sobą także negatywne konsekwencje dla dżdżownic. W warunkach skażenia podłoża metalami dochodzi do zmniejszenia przyrostu masy dżdżownic, ich ruchliwości oraz do ograniczenia płodności. Badania meksykańskie przedstawiają wpływ wermikompostowania zanieczyszczonych metalami osadów ściekowych na wzrost i zdolności reprodukcyjne dżdżownicy *Eisenia fetida* oraz na jakość wermikompostu. Domínguez-Crespo i in. [13] ustalili kolejność przyswajania metali ciężkich przez dżdżownice z podłoża ($Zn > \cong Cd > Cu > Ni$). Natomiast Li i in. [29] zbadali zdolności do kumulacji metali ciężkich pochodzących z obornika świńskiego przez ten sam gatunek oraz wpływ biodostępności tych metali w podłożu na zdolności kumulacyjne w ciałach dżdżownic. Wykazali, że decydujący wpływ na pobieranie ma forma metalu. Autorzy podają kolejność w przyswajaniu metali, czyli tak zwany współczynnik BAF (BioAccumulation Factor), który przedstawia się następująco: $Cd > Zn > Pb > Cu$. Inne badania wykazują wpływ gatunku dżdżownic na gromadzenie metali. Ma [30] stwierdził, że na kumulację metali w dżdżownicach wpływa nie tylko gatunek, ale także pH gleby, zawartość substancji organicznej oraz wiek dżdżownicy. Ustalił, że ma miejsce kilkukrotne zwiększenie zawartości metali w ciałach dorosłych osobników w porównaniu z młodocianymi. Potwierdzają to badania własne przeprowadzone w Oczyszczalni Ścieków w Kluczborku. W trakcie wermikompostowania pobierano dżdżownice w różnych fazach rozwoju. Określono udział metali w kokonach, osobnikach młodocianych (kilkumiesięczne, wybarwione, o długości 3–4 cm, niedojrzałe – bez wykształconego clitelium) i dorosłych (wybarwione, o długości 8–10 cm, dojrzałe – z wykształconym clitelium) (ryc. 3). Nie badano osobników niewybarwionych stadium młodocianego, z uwagi na trudność w ich wyizolowaniu z podłoża.



Fot. M. Bożym.

Ryc. 3. Dżdżownice w różnych fazach rozwojowych, pochodzące z Oczyszczalni Ścieków w Kluczborku

Dżdżownice przed analizą pozbawione zostały zawartości przewodu pokarmowego. Uzyskane wyniki przedstawia tabela 4. Najniższy udział metali stwierdzono w kokonach, które stanowiły tło do porównań nad kumulacją metali w różnych fazach rozwojowych. Osobniki młodociane kumulowały metale, lecz nie w takim stopniu jak dorosłe. Dla tych ostatnich stwierdzono zwiększenie udziału metali, często dziesięciokrotnie, niż u osobników młodocianych. W przypadku Cd i Ni udział w ciałach dżdżownic był wyższy niż w podłożu.

Tabela 4

Zmiany w zawartości metali ciężkich w dżdżownicach pochodzących z wermikompostów osadowych w Kluczborku w zależności od stadium rozwoju [10]

Metal	Kokony	Osobniki młodociane	Osobniki dorosłe	Podłoże
Cd [mg/kg s.m.]	0,13±0,0	0,63±0,2	5,59±1,9	3,2±0,4
Pb [mg/kg s.m.]	0,29±0,1	2,24±0,3	29,2±5,2	30,3±2,5
Zn [mg/kg s.m.]	2,56±0,3	15,6±3,0	129±15,0	136±6
Cu [mg/kg s.m.]	1,60±0,2	7,63±0,5	25,2±1,6	34,4±0,7
Ni [mg/kg s.m.]	0,97±0,1	5,20±0,2	36,7±3,3	25,1±2,3
Cr [mg/kg s.m.]	0,76±0,2	3,33±0,9	21,7±5,5	133±10

5. Wykorzystanie wermikompostów z odpadów i osadów ściekowych

Wermikomposty mogą być stosowane w nawożeniu roślin. Niektórzy autorzy proponują wspólne nawożenie gleb wermikompostem i nawozami mineralnymi, by uzupełniać niedobór składników pokarmowych, głównie azotu i potasu. Wacławowicz i Parylak [50] wykazali poprawę jakości gleby średniej przy jednoczesnym nawożeniu wermikompostem z obornika, uzupełnionego nawozami sztucznymi. Potwierdzają to badania Gandeckiego i in. [15] nad plonowaniem jęczmienia ozimego i buraka cukrowego, nawożonych wermikompostem i mineralnym nawozem azotowym. W przypadku wykorzystania wermikompostów z odpadów mleczarskich, nie jest konieczne dodatkowe nawożenie azotem, gdyż odpady są bogate w ten składnik [4]. W doświadczeniu lizymetrycznym, prowadzonym na glebach nawożonych różnymi rodzajami osadów zmieszanych w różnych proporcjach, w ramach badań własnych, stwierdzono, że wprowadzenie do gleb wermikompostu zmniejsza wymywanie zanieczyszczeń do wód podziemnych w porównaniu z osadami nieprzetworzonymi i wapnowanymi [5, 7]. Do zanieczyszczeń tych należały azotany, amoniak, fosforany, siarczany, chlorki i metale ciężkie. Podobne wnioski wyciągnęła Patorczyk-Pytlik [34], która ustaliła, że wprowadzenie wermikompostów z osadów do gleb kwaśnych zmniejsza przemieszczanie metali do podglebia w porównaniu z nieprzetworzonymi osadami. Gupta i Garg [16] badali możliwość przetwarzania osadów ściekowych przez dżdżownice *Eisenia fetida* w Indiach. Stwierdzili, że wartościowy wermikompost powstaje już po 105 dniach od rozpoczęcia procesu. Uzyskali najbardziej wartościowy produkt pod względem nawozowym z mieszaniny osadów ściekowych i obornika krowiego (30–40%). Natomiast Subramanian i in. [42] badali możliwość produkcji wermikompostu ze stałych odpadów przeróbki sagowców w Indiach. Odpady w różnych proporcjach mieszano z obornikiem krowim i pomiotem kurzym. Autorzy uzyskali najlepszy wermikompost pod względem zawartości makro- i mikroelementów oraz optymalnej proporcji C:N dla mieszaniny odpadów, obornika krowiego i pomiotu kurzego w proporcji objętościowej 1:1:1.

Z uwagi na produkcję przez dżdżownice specyficznych enzymów jak i zdolność dezaktywacji metali, prowadzone są badania nad zmianami form metali w podłożu w trakcie wermikompostowania. Filipek-Mazur i Gondek [14] ustalili, że wymywalność (dostępność) metali w glebie była niższa w przypadku nawożenia wermikompostem z osadów garbarskich niż z nawożenia obornikiem. Autorzy uzasadniają to wpływem zakwaszenia podłoża, gdyż w przypadku obornika oznaczyli znacznie niższy odczyn niż wermikompostów. Patorczyk-Pytlik i Gediga [33] zbadali udział form miedzi w kompostowanych i wermikompostowanych osadach ściekowych pochodzących z Oczyszczalni Ścieków w Kluczborku.

Stwierdzili zmniejszenie udziału form przyswajalnych miedzi w wyniku wermikompostowania w porównaniu z kompostowaniem. Dodatek węgla brunatnego sprzyjał związaniu tego metalu z frakcją organiczną. Okazuje się, że nawożenie gleby wermikompostem może ograniczyć przyswajalność metali przez rośliny. Potwierdzają to badania Barana i in. [2–3] oraz badania własne [6, 50].

Dżdżownice wpływają nie tylko na skład chemiczny przetwarzanych osadów. Zmieniają także skład mikrobiologiczny i dostarczają enzymów wermikompostowanym odpadom. Przyczynia się to do zwiększenia żywności gleb nawożonych takimi wermikompostami [1]. Makulec i Olejniczak [32] w swych badaniach ustalili, że nawożenie gleb wermikompostami może wzbogacić glebę w mezo-faunę, w tym wazonkowce, skoczogonki czy roztocza, czyli w organizmy bardzo w glebie pożądane.

Rolnicze stosowanie wermikompostów może zahamować zachwaszczenie pól. Wykazały to badania Sławińskiego i Songin [39] nad zachwaszczeniem pól jęczmienia jarego nawożonego kompostami i wermikompostami z różnych odpadów. Jednak niepokojące wydają się doniesienia o negatywnym wpływie wermikompostów na wschody siewek warzyw i wzrost podatności na choroby. Stompor-Chrzan [41] potwierdziła negatywny wpływ nawożenia wermikompostem, pochodzącym od kilkunastu producentów, na siewki warzyw, zwłaszcza sałaty i ogórka. Ta sama autorka w badaniach z 2004 r. wykazała, że wermikomposty wytworzone z obornika zmniejszyły wschody roślin strączkowych, zahamowały rozwój siewek i nie chroniły także przed zgorzelą [40]. Nie potwierdzają tego zjawiska Kołodziej i Kostecka [22], które analizowały wpływ nawożenia wermikompostem i nawozami mineralnymi na uprawy ogórka i marchwi. Autorki skonstatowały, że wpływ nawożenia na wschody i plony badanych warzyw jest pozytywny. Być może dodatkowe uzupełnienie mikroelementami podłoży przyczyniło się do uzyskania dobrych rezultatów doświadczenia. Szczech i Smolińska [45] stwierdziły zahamowanie rozwoju i zwiększenie podatności na choroby siewek pomidora nawożonego wermikompostem. Natomiast w badaniach z 1996 r. Szczech [44] ustaliła, że ma miejsce ograniczenie podatności pomidorów nawożonych wermikompostem na patogen zgnilizny pierścieniowej. We wcześniejszych badaniach Szczech i Brzeski [43] zaprzeczają negatywnemu wpływowi nawożenia wermikompostem na wzrost podatności roślin na choroby. W swoich badaniach wykazali oni działanie grzybobójcze wermikompostów produkowanych przez różnych producentów. Autorzy zauważyli, że niektóre wermikomposty charakteryzowały się silnym zasoleniem, co mogło przyczynić się do spowolnienia wzrostu roślin. Być może właśnie silne zasolenie wermikompostów wpłynęło na obumieranie siewek warzyw oraz zwiększenie podatności roślin na niektóre choroby. Okazuje się jednak, że wermikompost może być z sukcesem stosowany w innych uprawach. W badaniach własnych prowadzonych w terenie (doświadczenie lizymetryczne, wazonowe i poletkowe) wykazano, że wermikom-

posty z osadów świetnie nadają się do nawożenia traw oraz kukurydzy. Z uwagi na duże wymagania kukurydzy dotyczące zawartości azotu w podłożu, konieczne może być jednocześnie nawożenie nawozem azotowym tych upraw.

Z przytoczonych przykładów nie można wysnuć jednoznacznych konkluzji. Na wzrost roślin czy podatność na choroby może mieć bowiem wpływ wiele czynników. Jednak nasuwa się wniosek, że przed zastosowaniem w uprawach wermikompostu czy jakiegokolwiek nawozu organicznego, należy wcześniej przeprowadzić badania dotyczące ich wpływu na rośliny, by uniknąć strat w plonach.

6. Podsumowanie

W pracy została przybliżona metoda biologicznego przetwarzania odpadów, jaką jest wermikompostowanie. Do zalet procesu należy głównie produkcja bogatego w składniki pokarmowe kompostu, zmniejszenie objętości odpadów, homogenizacja i rozkład materii organicznej oraz poprawa struktury i zmniejszenie odorów (w przypadku osadów ściekowych). Metoda posiada też wady, z których najważniejszy to brak możliwości pełnej higienizacji przetwarzanych odpadów. Dlatego zaleca się prowadzenie wermikultury na odpadach nieskażonych biologicznie. W pracy przedstawiono także doświadczenia licznych autorów nad wykorzystaniem przyrodniczym wermikompostów. Okazuje się, że nawóz ten nie zawsze może być stosowany pod uprawy, zwłaszcza warzyw, z uwagi na możliwość pogorszenia plonów. Radzi się, by jednocześnie stosować wermikomposty i nawożenie mineralnym, w celu uzupełnienia brakujących składników. Metoda wermikompostowania odpadów potrzebuje stosowania rygorystycznych wymagań dżdżownic, ale efektem końcowym, w przypadku prawidłowo prowadzonego procesu, może być uzyskanie wartościowego nawozu*.

* Cytowaną literaturę zamieszczono po tłumaczeniu artykułu w języku niemieckim.