

## INNOWACYJNE TECHNOLOGIE PRZETWARZANIA ODPADÓW NA NAWOZY AGROEKOLOGICZNEJ UŻYTECZNOŚCI

Jan Łabętowicz<sup>1\*</sup>, Wojciech Stępień<sup>1</sup>, Monika Kobiąłak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zakład Chemii Rolnej, Wydział Rolnictwa i Biologii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 159. 02-776 Warszawa

\* Autor do korespondencji: [jan\\_labetowicz@sggw.pl](mailto:jan_labetowicz@sggw.pl)

### STRESZCZENIE

W artykule scharakteryzowano odpady organiczne i nieorganiczne w aspekcie ich przydatności do wykorzystania rolniczego. Przedstawiono źródła powstawania odpadów i sposoby ich przetwarzania na nawozy. Omówiono poszczególne technologie przetwórcze oraz ich zalety i wady. Wskazano, że bezpośrednie stosowanie wielu rodzajów odpadów do nawożenia gleb jest kłopotliwe ze względu na ich niekorzystne właściwości fizyczno-chemiczne, a także nierównomierną zawartość materii organicznej oraz składników pokarmowych. Stwierdzono, że najbardziej korzystną technologią produkcji nawozów z odpadów jest przetworzenie ich w formie granul lub peletu. W efekcie nawożenia gleb nawozami wytworzonymi z odpadów możliwe jest uzyskanie znaczącej poprawy właściwości fizycznych i chemicznych gleb uprawnych przejawiającej się wzrostem odczynu gleb kwaśnych, wzrostem zawartości substancji organicznej, zwiększeniem zawartości frakcji ilastych w glebie, a także wzrostem przyswajalnych dla roślin form makro i mikroelementów.

**Słowa kluczowe:** przetwarzanie odpadów, biodegradacja, nawozy, rolnictwo

## INNOVATIVE WASTE TREATMENT TECHNOLOGIES FOR AGROECOLOGICAL UTILITY FERTILIZERS

### ABSTRACT

In the article we characterized organic and inorganic wastes in terms of their suitability for agricultural use. The sources of waste formation and methods of their processing into fertilizers are presented. Individual processing technologies and their advantages and disadvantages are discussed. It was pointed out that direct application of many types of waste for soil fertilization is problematic due to their unfavorable physical and chemical properties as well as uneven organic matter and nutrient content. It was found that the most advantageous technology for the production of fertilizers from waste is their processing in the form of granules or pellets. As a result of fertilizing soils with wastes produced from wastes, it is possible to achieve significant improvement of physical and chemical properties of arable soils, increasing the pH of organic matter, increasing clay content in the soil, and increasing the macro and micronutrients available to plants.

**Keywords:** waste treatment, biodegradation, fertilizers, agriculture

### WPROWADZENIE

Odpady są postrzegane jako atrybut współczesnej cywilizacji. Szacuje się, że w krajach wysoko rozwiniętych przy wzroście liczby ludności rocznie 1-2%, produkcja przemysłowa rośnie o 4-6% i w podobnym tempie zwiększa się ilość wytwarzanych w ciągu roku odpadów. Z historycz-

nego punktu widzenia na każdym etapie rozwoju cywilizacji poszukiwano nowych sposobów aby powtórnie wykorzystać odpady. Współcześnie opracowano wiele nowych innowacyjnych technologii i sposobów uzdatniania odpadów, umożliwiając w coraz doskonalszy sposób ich powtórne wykorzystanie jako surowca nadającego się do przetworzenia na produkt użyteczny. Sprzyja

temu obecne ustawodawstwo, w świetle którego termin odpad, ma w dużym stopniu charakter względny. Jeśli dla określonego odpadu opracuje się technologię lub sposób jego przetworzenia na produkty lub surowce użyteczne, wówczas przestaje on być odpadem. Spośród wielu kierunków przetwarzania odpadów szczególne miejsce mają technologie ukierunkowane na przyrodnicze ich wykorzystanie, głównie na cele nawozowe i poprawę właściwości gleb użytkowanych rolniczo. Przyrodnicze wykorzystanie odpadów jest ważnym elementem gospodarki obiegu zamkniętego.

## TECHNOLOGIE PRZETWARZANIA ODPADÓW ORGANICZNYCH NA PRODUKTY NAWOZOWE

### Charakterystyka odpadów organicznych możliwych do wykorzystania w rolnictwie

W wyniku działalności człowieka, zarówno tych związanych z jego bytowaniem, jak i tych związanych z działalnością przemysłową i rolniczą powstaje wiele różnorodnych materiałów odpadowych.

Odpady dzielimy ze względu na możliwości ich wykorzystania na odpady przejściowe-pozostałości poprodukcyjne, które mogą być ponownie użyte w danym lub innym obiegu produkcyjnym po nieznacznych procesach przetwórczych i odpady końcowe tzn. nadające się tylko do unieszkodliwiania. Ze względu na pochodzenie odpady dzielimy na:

- odpady komunalne tzn. pochodzące z gospodarstw domowych ulic, placów, zakładów usługowych, rzemieślniczych
- odpady przemysłowe tzn. pochodzące z technologicznych procesów produkcyjnych wraz z odpadami bytowo-gospodarczymi z terenu zakładów przemysłowych
- rolnicze tzn. pochodzące z zakładów rolniczych a w szczególności z dużych ferm hodowlanych

**Odpady przemysłowe** związane są z działalnością różnych gałęzi przemysłu (górnictwo, hutnictwo, przemysł energetyczny, przemysł chemiczny, przemysł drzewny itp.). Do tej grupy odpadów zaliczyć można popioły ze spalania węgla, odpadowe frakcje węgla brunatnego, różne odpady o właściwościach odkwaszających itp. Odpady te ze względu na swoje właściwości mają zastosowanie głównie do poprawy właści-

wości fizycznych gleb uprawnych, a także do ich odkwaszania. Wśród odpadów przemysłowych do przyrodniczego wykorzystania nadają się głównie odpady przemysłu energetycznego, a w szczególności popioły głównie ze spalania węgla brunatnego, a także odpadowy miął z węgla brunatnego. Mają one znaczenie dla poprawy właściwości fizycznych gleb piaszczystych. Ważną grupę wśród odpadów przemysłowych stanowią odpady, które ze względu na obecność związków zasadowych ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  itp.) wykorzystywane są do odkwaszania gleb nadmiernie zakwaszonych

**Odpady komunalne** powstają na obszarach miast i wsi. Występują w postaci ciekłej i stałej i związane są z bytowaniem ludzi, handlem, usługami itp. Przykładowo do grupy tej można zaliczyć takie odpady jak: osady ściekowe z oczyszczalni ścieków, śmieci z miast i obszarów wiejskich, biomasa odpadowa z terenów zielonych i inne. Do grupy tej można także zaliczyć ścieki bytowo-gospodarcze. Odpady komunalne z uwagi na wysoką zawartość substancji organicznej (30-50%) i obecność składników nawozowych wykorzystywane są do wytwarzania kompostów, które po spełnieniu odpowiednich norm jakościowych mogą być wykorzystywane do celów rekultywacji gruntów zdegradowanych przez przemysł (gorszej jakości) oraz nawożenia użytków rolnych (lepszej jakości).

**Odpady rolnicze** nie były dotychczas wyodrębniane jako odrębna grupa. Wzrost intensywności gospodarowania, nasilająca się specjalizacja produkcji rolniczej, powstanie przemysłowych ferm produkcji zwierzęcej, kombinatów szklarniowych, pieczarkarni, czy biogazowni, uzasadniają potrzebę wyodrębnienia odpadów rolniczych jako oddzielnej grupy wymagającej odpowiedniego uzdatnienia przed wykorzystaniem do celów nawozowych na użytkach rolnych.

Do celów nawozowych najlepiej nadają się odpady biodegradowalne. Pod pojęciem odpady biodegradowalne rozumie się wszystkie odpady ulegające tlenowemu lub beztlenowemu rozkładowi. Do odpadów ulegających biodegradacji zalicza się głównie odpady komunalne i rolnicze oraz niektóre odpady przemysłowe. Z odpadów biodegradowalnych obecnie największa ilość do zagospodarowania to osady ściekowe, odpady z przemysłu rolno-spożywczego oraz odpady rolnicze z dużych ferm oraz produkcji pieczarek.

**Osady ściekowe** są produktem oczyszczania ścieków i powstają na skutek szeregu procesów

fizycznych, fizyczno-chemicznych i biologicznych zachodzących w oczyszczalniach ścieków. Wg definicji zaproponowanej przez Europejski Komitet Normalizacyjny – CEN osadem ściekowym nazywamy mieszaninę wody i ciał stałych oddzielonych z różnych typów wody w rezultacie procesów naturalnych lub sztucznych. Na przestrzeni ostatnich lat nastąpił wzrost ilości osadów ściekowych pochodzących z oczyszczalni komunalnych. Związane to jest z systematyczną budową nowych miejskich i gminnych oczyszczalni ścieków. Ponadto ilość powstających osadów ściekowych zwiększa się ponieważ postępuje proces kanalizacji wsi.

Zgodnie z obowiązującymi przepisami prawnymi istnieje obowiązek zagospodarowania wszystkich odpadów organicznych zawierających więcej niż 5% ogólnego węgla organicznego. Dotychczas odpady te składowane były na wysypiskach. Obecnie opady te muszą zostać poddane procesowi uzdatniania, który pozwoli na ich powtórne wykorzystanie (np. kompostowanie, produkcja biogazu, produkcja nawozów organiczno-mineralnych) oraz stosowanie w rolnictwie. Przydatność osadów ściekowych do przyrodniczego, a w tym i rolniczego zagospodarowania przyczyniła się do wydania przez Radę EWG Dyrektywy 86/278/EWG z późniejszymi zmianami. Tak w ustawodawstwie UE jak i krajowym preferowanym sposobem zagospodarowania osadów jest ich rolnicze wykorzystanie. Głównym składnikiem osadu ściekowego warunkujących jego przyrodnicze, w tym także rolnicze, wykorzystanie jest substancja organiczna. W osadzie ściekowym występuje 35–80% s.m. substancji organicznej, jej średnia zawartość wynosi 60% s.m. Odpady komunalne, które można użyć do nawożenia po przekompostowaniu zawierają w porównaniu do obornika dwukrotnie więcej azotu i fosforu, ale mniej potasu. Substancje te charakteryzuje wąski stosunek węgla do azotu, charakterystyczny dla materiałów, w których proces kompostowania jest już praktycznie zakończony. Ważną rzeczą jest zatem przy procesie kompostowania odpadów komunalnych tak zróżnicować materiał organiczny, aby rozszerzyć stosunek węgla do azotu. Osady ściekowe mogą być wykorzystywane w celach nieprzemysłowych, jeżeli:

- powstają podczas oczyszczania ścieków pochodzących z gospodarstw domowych, komunalnych lub innych i jeżeli ich skład jest zbliżony do ścieków bytowo-gospodarczych;

- są ustabilizowane poprzez poddanie ich procesom biologicznym, chemicznym, termicznym i innym, mającym na celu eliminację zagrożenia ich dla zdrowia zwierząt i ludzi;
- zawartość metali ciężkich w nich nie przekracza dopuszczalnych norm;
- sposób ich wykorzystania nie spowoduje uciążliwości dla ludzi, zwierząt i środowiska, a szczególnie pogorszenia, jakości wód powierzchniowych i podziemnych;
- zawartość metali ciężkich w wierzchniej (0-25 cm) warstwie gruntu, na którym osady ściekowe mają być stosowane, nie przekracza dopuszczalnych norm;
- odczyn pH gleby na terenach użytkowanych rolniczo jest nie mniejszy niż 5,6;
- podlegają systematycznie badaniom chemicznym i mikrobiologicznym

**Podłoże po produkcji pieczarek** to mieszanina kompostowanego obornika końskiego, kurzego, słomy oraz torfu, będąca skondensowanym nawozem bogatym w składniki mineralne i mikroelementy. Do podłoża do produkcji pieczarek w celu stabilizacji odczynu w dużych ilościach dodaje się gipsu ( $\text{CaSO}_4$ ). W ostatnich latach Polska stała się czołowym producentem pieczarek w świecie. W ślad za zwiększeniem produkcji pieczarek, zwiększyła się również ilość podłoża popieczarkowych, które trzeba zagospodarować. Podłoże po produkcji pieczarek jest bardzo cennym źródłem składników pokarmowych. Przyjmując średnią zawartość suchej masy na poziomie 35% w rocznej produkcji tego odpadu znajduje się około 400 tys. ton suchej masy w której wnosimy olbrzymie ilości makroelementów.

**Wywary gorzelniane** to uboczny produkt gorzelnian powstający przy przetwarzaniu surowców skrobiowych takich jak kukurydza, zboża, ziemniaki i inne na spirytus. Wywary gorzelniane jako materiały nawozowe są zmienne w składzie w zależności od użytego surowca i technologii produkcji spirytusu. Cechą wspólną wszystkich badanych wywarów jest zbyt niska zawartość fosforu w stosunku do azotu i potasu. Stosowanie wywaru w postaci płynnej jest kłopotliwe z uwagi, iż kampania gorzelniana odbywa się najczęściej jesienią i zimą a więc w okresach pozawegietacyjnych, zachodzi więc potrzeba przechowywania wywaru. W tej sytuacji możliwe jest jego kompostowanie z odpowiednimi materiałami organicznymi takich jak słoma, trociny, węgiel brunatny itp.

**Zasoby roślinne z pielęgnacji zieleni miejskiej** – m.in. powierzchnie trawiaste, parki, lasy komunalne, obszary zajęte pod uprawę roślin i in. Ze wszystkich obszarów zieleni miejskiej, w trakcie ich pielęgnacji, usuwane są znaczne ilości masy roślinnej, które stanowią surowiec do kompostowania. W wielu miastach prowadzone lub planowane jest przetwarzanie odpadów roślinnych pochodzących z pielęgnacji zieleni miejskiej na drodze kompostowania na nawozy. Jak podaje GUS zieleni miejska i osiedlowa stanowi w Polsce około 72 000 ha. Przy średniej produkcji 5 t s.m. z 1 ha otrzymuje się każdego roku około 360 000 t s.m. surowca do kompostowania.

**Geologiczne zasoby surowców organicznych** do produkcji kompostów to głównie torfy, muły organiczne i organiczno-mineralne oraz węgiel brunatny. Torfy zarówno niskie jak i wysokie stanowią doskonały surowiec do kompostowania z uwagi na ich dużą chłonność. Szczególnie dobrze ulegają kompostowaniu wraz z komponentami łatwo ulegającymi rozkładowi. Równie dobrym surowcem do kompostowania są muły. Mogą one jednak być wykorzystywane w tym celu, podobnie jak torfy, tylko w razie konieczności usunięcia ich z miejsca naturalnego zalegania. Pył z węgla brunatnego kompostowany jest zazwyczaj z odpadami zasobnymi w łatwo rozkładalne części organiczne i rozpuszczalne składniki nawozowe.

**Odpady z gospodarstw domowych** obejmują odpady organiczne pochodzenia roślinnego (trawy, liście, popielegnacyjne i użytkowe części roślin z polowej i szklarniowej uprawy warzyw, rozdrobione gałęzie drzew i krzewów itp) oraz części odpadów pochodzenia zwierzęcego. Odpady te są dobrym surowcem do produkcji kompostu i powinny być segregowane u źródła powstawania i zagospodarowane użytecznie.

**Organiczne odpady przemysłowe** są głównie dostarczane przez przemysł celulozowo-papierniczy, rolno-spożywczy, tytoniowy, zielarski, drzewny i paszowy oraz energetyczny. Odpady te powstają w stosunkowo dużych ilościach i lokalnie dla danej okolicy mogą stanowić bardzo dobry surowiec do produkcji kompostów. Najcenniejszymi, z uwagi na ich skład chemiczny, surowcami do kompostowania są:

- trociny, kora, wióry drzewne,
- odpady z przemysłu zielarskiego,
- odpady z przemysłu celulozowo-papierniczego,
- odpady z przetwórstwa warzyw.
- odpady z produkcji biogazu

Odpady te powstają w stosunkowo dużych ilościach i lokalnie dla danej okolicy mogą stanowić bardzo dobry surowiec do produkcji kompostów.

**Odpady przemysłu drzewnego** ze względu na skład chemiczny nie nadają się do bezpośredniego stosowania do nawożenia w rolnictwie. Mogą być wykorzystywane w produkcji sadowniczej do mulczowania (ściółkowania) gleby w sadach w celu poprawy gospodarki wodnej roślin a przede wszystkim mogą też stanowić cenny komponent w procesie produkcji kompostów. Materiały te charakteryzują się bardzo szerokim stosunkiem węgla do azotu w związku z czym trudno ulegają rozkładowi. Proces kompostowania takich odpadów należy intensyfikować przez wprowadzanie szczepów bakterii wyspecjalizowanych w rozkładzie celulozy bądź/ oraz wspólne kompostowanie trocin z innymi odpadami łatwo ulegającymi rozkładowi – o stosunkowo wąskim stosunku C:N. Ważną rzeczą jest to, że nawet skład chemiczny w obrębie jednego odpadu organicznego (kora drzew) może być bardzo zróżnicowany. Kora bukowa zawiera 2 razy więcej azotu, 12 razy więcej fosforu i dwukrotnie większą zawartość magnezu w porównaniu do kory sosnowej. Najuboższe w składniki pokarmowe są trociny.

**Poferment** – w wyniku produkcji biogazu powstaje odpad po fermentacji metanowej, tzw. masa pofermentacyjna zwana potocznie pofermentem. Teoretycznie jedna biogazownia o mocy 1 MW produkuje rocznie nawet do 60 000 t masy pofermentacyjnej. Ilość pozostającej masy jest uzależniona od rodzaju wsadu, a także od przyjętej technologii produkcji biogazu. Dokładny skład chemiczny masy pofermentacyjnej jest ściśle uzależniony od materiału wsadowego używanego w biogazowni. Z tego względu każda biogazownia produkuje zróżnicowaną jakościowo masę pofermentacyjną. Podczas fermentacji metanowej następuje degradacja materii organicznej, co prowadzi do zawężenia stosunku C:N w masie pofermentacyjnej. Z punktu widzenia żywienia roślin jest to bardzo korzystne, ponieważ w takich warunkach ograniczony jest proces immobilizacji azotu w glebie i zwiększa się dostępność azotu dla roślin. Zachodząca podczas fermentacji amonifikacja powoduje, że masa pofermentacyjna zawiera większe ilości azotu w formie amonowej ( $N-NH_4$ ) w stosunku do materiału wyjściowego. Jest to forma dostępna dla roślin i co jest bardzo istotne z punktu widzenia ochrony środowiska,

ulega sorpcji wymiennej w glebie. Przy wysokiej zawartości  $N-NH_4$  i odczynie zasadowym masy pofermentacyjnej może dochodzić do strat azotu w postaci amoniaku. Ulatnianie amoniaku może mieć miejsce podczas składowania, jak i stosowania na pola, czy użytki zielone.

Z uwagi na właściwości chemiczne podstawową metodą zagospodarowania masy pofermentacyjnej powinno być jej rolnicze wykorzystanie. Masa pofermentacyjna może być bezpośrednio stosowana na pola uprawne lub użytki zielone. Problemem jednak jest niska zawartość suchej masy (ok. 5–9%), co wymaga użycia specjalnego sprzętu rolniczego, w który zazwyczaj wyposażone są tylko gospodarstwa utrzymujące zwierzęta. Ogranicza to ilość odbiorców masy pofermentacyjnej z biogazowni. Ponadto należy pamiętać, że masa pofermentacyjna może być stosowana w określonych terminach, analogicznie do nawozów naturalnych, tj. od 1 marca do 30 listopada. W pozostałym okresie musi być ona magazynowana, co wymaga budowy lagun o dużej pojemności. W związku z powyższym biogazownie powinny wdrażać różne technologie zmniejszające objętość masy pofermentacyjnej. Jednym ze sposobów jest technologia suchej fermentacji.

### **Kierunki przetwarzania (uzdatniania) odpadów biodegradowalnych na produkty nawozowe**

Odpady mogą być stosowane w rolnictwie bez wstępnego przygotowania jeżeli spełniają wymogi jakościowe podawane w rozporządzeniach Ministra Środowiska, Rolnictwa i Gospodarki. Jeżeli podawane w rozporządzeniach normy nie są spełnione, powinny być one poddane procesowi uzdatniania z wykorzystaniem różnych technologii mniej lub bardziej skomplikowanych.

Współcześnie opracowano wiele nowych innowacyjnych technologii i sposobów uzdatniania odpadów, umożliwiając w coraz doskonalszy sposób ich powtórne wykorzystanie jako surowca nadającego się do przetworzenia na produkt użyteczny. Sprzyja temu obecne ustawodawstwo, w świetle którego termin odpad, ma w dużym stopniu charakter względny. Jeśli dla określonego odpadu opracuje się technologię lub sposób jego przetworzenia na produkty lub surowce użyteczne, wówczas przestaje on być odpadem. Spośród wielu kierunków przetwarzania odpadów szczególne miejsce mają technologie ukierunkowa-

ne na przyrodnicze ich wykorzystanie, głównie na cele nawozowe i poprawę właściwości gleb użytkowanych rolniczo (rys. 1). Głównym celem uzdatnienia (przetworzenia) odpadów w celu ich przyrodniczego zagospodarowania jest:

- poprawa właściwości fizycznych,
- zmniejszenie uciążliwości odorowej
- eliminacja zagrożeń higieniczno-sanitarnych.

Biorąc pod uwagę pochodzenie odpadów oraz ich przyrodnicze wykorzystanie można je podzielić na trzy grupy:

- odpady komunalne,
- odpady przemysłowe,
- odpady rolnicze.

Technologie przetwarzania odpadów na nawozy są zasadniczo odmienne dla odpadów organicznych i odpadów nieorganicznych.

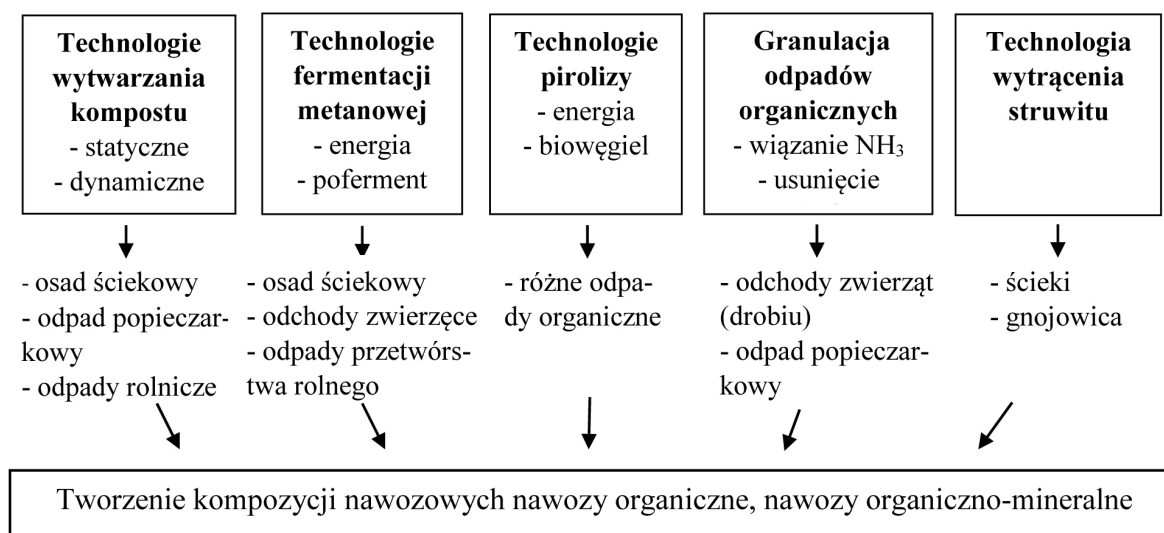
### *Kompostowanie*

Najczęściej obecnie stosowaną technologią przetwarzania i uzdatniania odpadów do celów nawozowych jest kompostowanie. Proces ten można przeprowadzić tradycyjnymi metodami w każdym gospodarstwie. Jednak coraz częściej jest on prowadzony z wykorzystaniem nowoczesnych technologii w specjalnie zbudowanych w tym celu zakładach przetwórczych. W zakładach tych z materiałów odpadowych po procesie kompostowania produkuje się nawozy organiczne lub organiczno-mineralne, które po uzyskaniu zgody Ministerstwa Rolnictwa są wprowadzane do obrotu handlowego.

Zalety kompostowania:

- jednoczesną utylizację kilku odpadów organicznych
- kompostowanie zapewnia higienizację odpadów pod względem sanitarno-epidemiologicznym;
- szacuje się, że w procesie kompostowania ilość odpadów może zmniejszyć o 30–50%;
- technologie kompostowania są sprawdzone w skali technicznej, dostępne i stosunkowo łatwe oraz ekonomicznie uzasadnione w eksploatacji;
- pozyskiwanie pełnowartościowego nawozu o wartości nawozowej zbliżonej do obornika,

Przebieg procesu kompostowania w znacznym stopniu uzależniony jest od stosunku C:N w kompostowanych materiałach. Stosunek węgla do azotu powinien kształtować się na poziomie 25 – 40:1. Optymalny do kompostowania stosu-



Rys. 1. Kierunki i technologie przetwarzania odpadów organicznych na nawozy (opracowanie własne)

nek C:N w odpadach organicznych wynosić powinien 20 – 30:1. Gdy stosunek C:N w kompostowanych materiałach przekracza wartość 30:1 następuje opóźnienie procesów rozkładu. Przy stosunku C :N w odpadach mniejszym niż 20:1 obserwowane są starty azotu. Stosunek węgla do azotu w masie przeznaczony do kompostowania uregulować można mieszając ze sobą materiały o szerokim stosunku C:N (słoma, trociny, kora drzew itp.) z materiałami o wąskim stosunku C:N (fekalia, odchody zwierząt, pomiot ptasi, odpady z rzeźni itp.).

Struktura surowca przeznaczony do kompostowania powinna zapewniać optymalne warunki do rozwoju mikroorganizmów tlenowych w całej kompostowanej masie. Składniki masy kompostowej powinny być rozdrobnione i dokładnie ze sobą wymieszane. Dokładne rozdrobnienie surowców przeznaczonych do kompostowania, głównie drewna i zdrewniałych części roślin, zapewnia zwiększenie podatności masy roślinnej na rozkład mikrobiologiczny, dokładne wymieszanie wszystkich kompostowanych składników, zwiększenie dostępności powietrza atmosferycznego do całej kompostowanej masy. Optymalna zawartość wody w kompostowanej masie (50–60%) powinna być utrzymywana podczas całego procesu kompostowania, co zapewnia odpowiednie napowietrzenie i wilgotność niezbędną do rozwoju mikroorganizmów tlenowych oraz prawidłowy wzrost i przebieg temperatury podczas kompostowania. Utrzymywanie optymalnej wilgotności masy kompostowej uzyskuje się dzięki uzupełnianiu niedoborów

wody oraz mieszanie masy kompostowej. Przesuszenie masy kompostowej spowalnia procesy biochemiczne oraz rozkład i humifikację związków organicznych. Nadmiar wody natomiast ogranicza dostęp tlenu do masy kompostowej i stwarza warunki do beztlenowego rozkładu substancji organicznych oraz utrudnia utrzymanie optymalnej temperatury. Napowietrzanie masy kompostowej jest niezbędne w procesie kompostowania niezależnie od zastosowanej technologii. Stosowane są różne sposoby mechanicznego napowietrzania masy kompostowej w bioreaktorach oraz różne technologie przekładana masy kompostowej w pryzmach. Temperatura w masie kompostowanej jest wynikiem przemian biochemicznych jakim podlegają substancje organiczne. Przy zapewnieniu optymalnych do kompostowania warunków (rozdrobienie, wilgotność, napowietrzenie masy kompostowej) temperatura bardzo szybko osiąga wartość optymalną dla procesu kompostowania tj. 60–75 °C, która zapewnia zniszczenie bakterii chorobotwórczych i jaj pasożytów jelitowych..

W zależności od przyjętych kryteriów można przyjąć wiele różnych sposobów kompostowania. Najczęściej wyróżniamy kompostowanie w systemie otwarte (kompostowanie w pryzmach lub brykietach) lub w systemie zamkniętym (bioreaktory) z przemieszczaniem kompostowanej biomasy (kompostowanie tunelowe, kontenerowe, bębnowe).

**Piroliza** jest procesem niepełnego spalania związków organicznych zawartych w odpadach. Produktami pirolizy są: gaz zawierający wodór,

tlenek węgla (II i IV) oraz metan. Gaz ten posiada wysoką wartość ciepła spalania i jest wykorzystywany gospodarczo, ciecz zawierająca smołę, oleje, aceton itd. Oraz tzw. biowęgiel składający się z węgla oraz substancji nieorganicznych zawartych w odpadach. Metoda ta jest szczególnie zalecana do uzdatniania odpadów zanieczyszczonych mikrobiologicznie. W tym procesie następuje pełna higienizacja. Uzyskany w tym procesie biowęgiel jest cennym dodatkiem do innych odpadów o zbyt dużej wilgotności.

## TECHNOLOGIE PRZETWARZANIA ODPADÓW NIEORGANICZNYCH NA PRODUKTY NAWOZOWE

Wśród nieorganicznych odpadów przemysłowych do przyrodniczego wykorzystania nadają się głównie odpady przemysłu energetycznego, a w szczególności popioły głównie ze spalania węgla brunatnego a także odpadowy miął z węgla brunatnego. Mają one znaczenie dla poprawy właściwości fizycznych gleb piaszczystych. Ważną grupę wśród odpadów przemysłowych stanowią odpady, które ze względu na obecność związków zasadowych ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  itp.) wykorzystywane są do odkwaszania gleb nadmiernie zakwaszonych.

Z odpadów nieorganicznych zawierających związki wapnia i magnezu produkowane są nawozy stosowane w rolnictwie do odkwaszania gleb. Nawozy te stanowią około 1/3 wszystkich surowców do produkcji nawozów wapniowych. Pochodzą one z wielu przemysłów, w tym z przemysłu cukrowniczego, papierniczego, hutniczego i chemicznego. Tak w rozporządzeniu Ministra Gospodarki jak w rozporządzeniu Ministra Rolnictwa podane są klasyfikacje odpadów w tym odpadów wapiennych. Wśród 16 kategorii odpadów wymienionych w załączniku do ustawy o odpadach, odpady zawierające związki wapnia występują w sześciu kategoriach i pochodzą z różnych źródeł. Największe praktyczne znaczenie w przyrodniczym wykorzystaniu mają odpady z przemysłu: hutniczego, chemicznego, budowlanego, energetycznego i spożywczego (rys. 2).

**Odpady przemysłu hutniczego** – w tej grupie odpadów wapiennych dominują odpady w formie tlenkowej łatwo rozpuszczalne w wodzie o dużej aktywności chemicznej i wysokiej sile zobojętniania. Wadą odpadów powstających przy produkcji materiałów ogniotrwałych jest

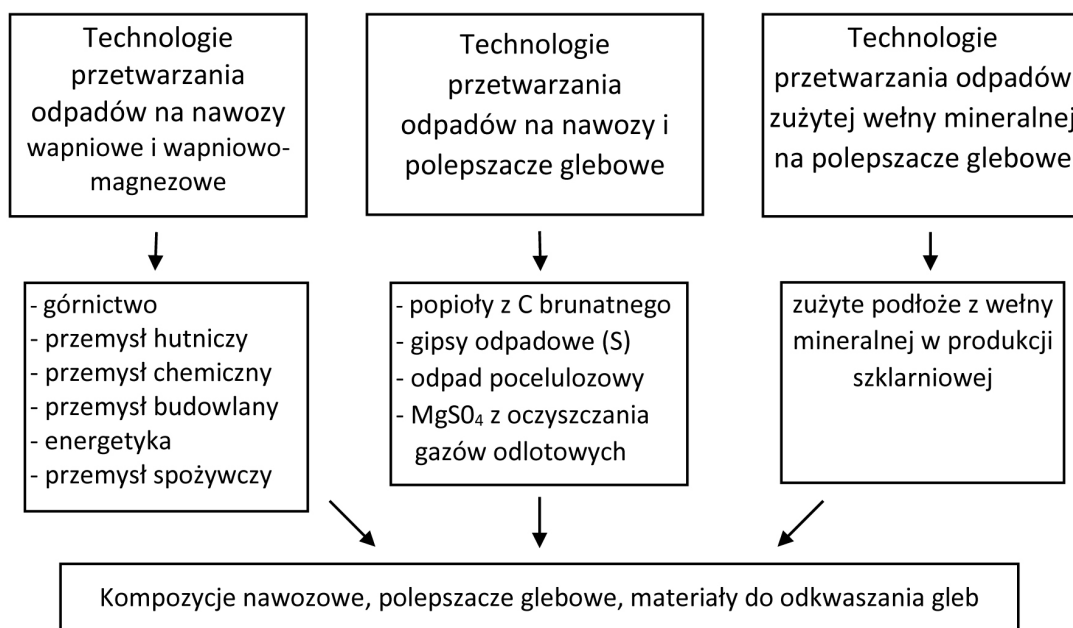
duża pylistość co utrudnia ich wysiew. Odpad ten może być wykorzystywany do uzdatniania odpadów mokrych, takich jak osad ściekowy. Po wymieszaniu z osadem zmniejsza on zawartość wody a poza tym tlenek wapnia ma właściwości dezynfekujące. Wapna pohaniczne głównie z hut metali kolorowych najczęściej zawierają zbyt wysoką zawartość metali ciężkich co ogranicza ich rolnicze wykorzystanie. W odpadach z hut żelaza jest przeważnie zbyt wysoka zawartość krzemionki.

**Wapno posodowe** zawiera głównie węglan wapnia, siarczan wapnia i wodorotlenek magnezu, krzemionkę i związki siarki. Wadą tego odpadu jest wysoka zawartość wody co utrudnia jego stosowanie. Najczęściej jest dosuszane na otwartym terenie. Zawiera w swoim składzie również dość dużo chlorków oraz sodu. Zawartość tych pierwiastków może niekorzystnie wpływać na właściwości gleb lekkich. Jony chloru powodują zasolenie gleb natomiast jony sodu powodują peptyzacje koloidów glebowych co może przyczynić się to niszczenia struktury gleb. Aby zmniejszyć ujemne skutki zawartości tych pierwiastków najlepiej je stosować na jesieni pod rośliny jare. Przez okres jesienno-zimowy tak chlorki jak i sól w większości zostaną wymyte poza strefę korzeniową.

**Wapno pokarbidowe** – zawartość wapnia w odpadach z sześciu największych zakładów wytwarzających wapno pokarbidowe wg danych Okręgowych Stacji Chemiczno-Rolniczych) wynosił od 69,5% do 72,2%  $\text{CaO}$ . Wapno to ma podobne ograniczenia jak wapno posodowe opisane powyżej.

**Wapno pocelulozowe** – jest składnikiem odpadów z produkcji oraz przetwórstwa masy celulozowej, papieru i tektury. Stanowią one niewielki procent odpadów wytwarzanych w przemyśle celulozowo-papierniczym. Wadą tego odpadu jest zbyt duża wilgotność i dość wysoka zawartość chlorków.

**Odpady przemysłu energetycznego** – powstają w procesie spalania surowców energetycznych (węgiel kamienny i brunatny), w wyniku stosowania metod oczyszczania gazów odlotowych. Głównymi rodzajami wytwarzanych odpadów są: mieszanki popiołowo-żużłowe z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych, popioły lotne z węgla, mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych, żużle, popioły paleniskowe i pyły z kotłów. Do przyrodniczego wykorzystania



Rys. 2. Kierunki i technologie przetwarzania odpadów przemysłowych (nieorganicznych) na nawozy

bardziej przydatne są popioły z węgla brunatnego i ze spalania biomasy. Popioły z węgla kamiennego zawierają mało wapnia i magnezu a dużo krzemu i glinu i nie nadają się do nawozowego wykorzystania. Natomiast popioły z węgla brunatnego, szczególnie z elektrowni zbierających je metodą suchą są cennym surowcem bogatym w wapń, magnez oraz niektóre mikroelementy. Wadą tych popiołów jest zbyt duża pylistość. Najczęściej w Polsce są one wykorzystywane do uzdatniania osadów ściekowych stosowanych w rolnictwie.

Odpadem, które pojawił się w ostatnich latach w wyniku odsiarczania spalin jako odpad przemysłu energetycznego jest gips. Gips w rolnictwie można wykorzystywać do nawożenia siarką i poprawy właściwości fizyko-chemicznych gleb. Jak pokazują wyniki badań, produkt otrzymany po oczyszczeniu radiacyjnym gazów spalinowych z tlenków siarki wykazywał takie samo działanie nawozowe jak siarczan amonu czy siarczan potasu.

**Wapno defekacyjne** – odpad powstający w przemyśle celulozowo-papierniczym jest produktem wysokiej wartości nawozowej obok soli wapnia zawiera również materię organiczną oraz podstawowe składniki pokarmowe. Podstawowym problemem w zwiększeniu stopnia odzysku tych odpadów jest ich duże uwodnienie. Z tego powodu są one najczęściej deponowane na zakładowych składowiskach odpadów, pełniących rolę stawów osadowych lub lagun. Go-

spodarka tymi odpadami wymaga odwodnienia do poziomu umożliwiającego racjonalne zastosowanie tych odpadów.

**Wełna mineralna** – jest obecnie najbardziej znanym i rozpowszechnionym na świecie podłożem w produkcji ogrodniczej. Zawiera głównie krzem ( $\text{SiO}_2$ ) – 47%, a następnie wapń ( $\text{CaO}$ ) – 16%, glin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – 14%, magnez ( $\text{MgO}$ ) – 10%, żelazo ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) – 8%, sód ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) – 2%, potas ( $\text{K}_2\text{O}$ ) – 1%, mangan ( $\text{MnO}$ ) 1%, tytan ( $\text{TiO}_2$ ) – 1%.

Poprodukcyjna wełna mineralna jest odpadem o wysokiej pojemności wodnej i bardzo dobrych właściwościach kapilarnych. Charakteryzuje się wysoką zawartością magnezu i wapnia oraz zawiera pewne ilości makro i mikroelementów. Nie jest przyjmowana na wysypiskach odpadów ze względu na dużą objętość i trudności w jej zagęszczaniu. Sposobem, który daje szansę zagospodarowania tego odpadu jest wykorzystanie jej do kształtowania właściwości produkcyjnych gleb, szczególnie słabej jakości. Wełna mineralna jest odpadem o wysokiej pojemności wodnej i bardzo dobrych właściwościach kapilarnych. Sposobem, który daje szansę zagospodarowania tego odpadu jest wykorzystanie go do poprawy właściwości fizycznych gleb poprzez poprawę stosunków powietrzno-wodnych. Ze względu na wysoką pojemność wodną odpadowa wełna mineralna może być dobrym komponentem do kompostowania z odpadami o zbyt dużej wilgotności jakim jest np., ośsad ściekowy czy poferment.



## WYKORZYSTANIE ODPADÓW DO PRODUKCJI NAWOZÓW I POLEPSZACZY GLEBOWYCH DO NAWOŻENIA GLEB I ROŚLIN

Przedstawiona wyżej charakterystyka różnych odpadów organicznych i nieorganicznych wskazuje, że ich bezpośrednie stosowanie do nawożenia może być kłopotliwe ze względu na ich właściwości fizyczne i chemiczne. Część odpadów jest zbyt mokra, inne są zbyt suche i pyliste. Zawartość materii organicznej oraz podstawowych składników pokarmowych jest zróżnicowana. Poza tym nawozy wytworzone z odpadów powinny mieć taką formę fizyczną aby można je było równomiernie wysiać na glebę nowoczesnymi maszynami używanymi w rolnictwie. Dlatego jak podano na rysunkach 1 i 2, aby spełnić te wymagania najczęściej tworzy się kompozycje nawozowe z wykorzystaniem kilku różnych odpadów o zróżnicowanych właściwościach fizyko-chemicznych. Przy ustalaniu składu nawozów bierze się pod uwagę wymagania różnych gatunków roślin pod które te nawozy mają być stosowane oraz właściwości gleb. Inne nawozy proponuje się na gleby lekkie słabo próchniczne a inne na gleby ciężkie. Inne pod rośliny sadownicze, pod zboża a jeszcze inne pod rośliny okopowe. Oddzielną grupę stanowią nawozy do odkwaszania gleb.

Końcowym etapem produkcji nawozów z odpadów jest przetworzenie ich w formie granul o jak najbardziej wyrównanej granulacji lub w postaci peletu, jeżeli nie ma możliwości granulacji. Taka postać nawozów umożliwia ich łatwe magazynowanie oraz stosowanie przy użyciu dostępnych w rolnictwie maszyn.

Stosowanie odpadów na użytkach rolnych obok korzyści jakie z tego osiągamy, związane

jest z ryzykiem zanieczyszczenia nie tylko wód podziemnych i gleb, ale może także stanowić czynnik ryzyka dla jakości wytworzonych płodów rolnych. Stosowanie odpadów jako materiałów nawozowych na użytkach rolnych musi więc uwzględniać nie tylko korzyści społeczne (pozbycie się odpadów) i gospodarcze (walory nawozowe odpadów), ale także, co jest nie mniej ważne, zapewnić bezpieczeństwo środowiska i płodów rolnych. Aby materiały odpadowe można było bezpiecznie wykorzystać w rolnictwie muszą być odpowiednio stosowane w ustalonych dawkach i terminach agrotechnicznych. Należy podkreślić, że postęp badań w zakresie przyrodniczego wykorzystania odpadów tworzy z jednej strony nowe możliwości ich wykorzystania, ale z drugiej rozpoznawane są coraz lepiej złożone, długofalowe interakcje, jakim odpady podlegają w środowisku glebowym, co skutkuje odpowiednimi zmianami w systemach prawnych, normach i technologiach ich stosowania, zapewniając coraz lepsze bezpieczeństwo ich nawozowego stosowania na użytkach rolnych

Dany odpad w zależności od tego jaki rodzaj nawozu chcemy produkować musi spełnić określone wymagania prawne. W tabeli 1 podano jak należy zapewnić bezpieczeństwo przy przyrodniczym wykorzystaniu odpadów w produkcji roślinnej.

### GLEBA JAKO UKŁAD UMOŻLIWIAJĄCY WYKORZYSTANIE ODPADÓW

Środowisko glebowe pola uprawnego jest sprawnym układem przyrodniczym, stanowiący swego rodzaju „oczyszczalnię”, w której wszelkie materiały nawozowe dostarczone z zewnątrz w formie materiałów odpadowych zarówno or-

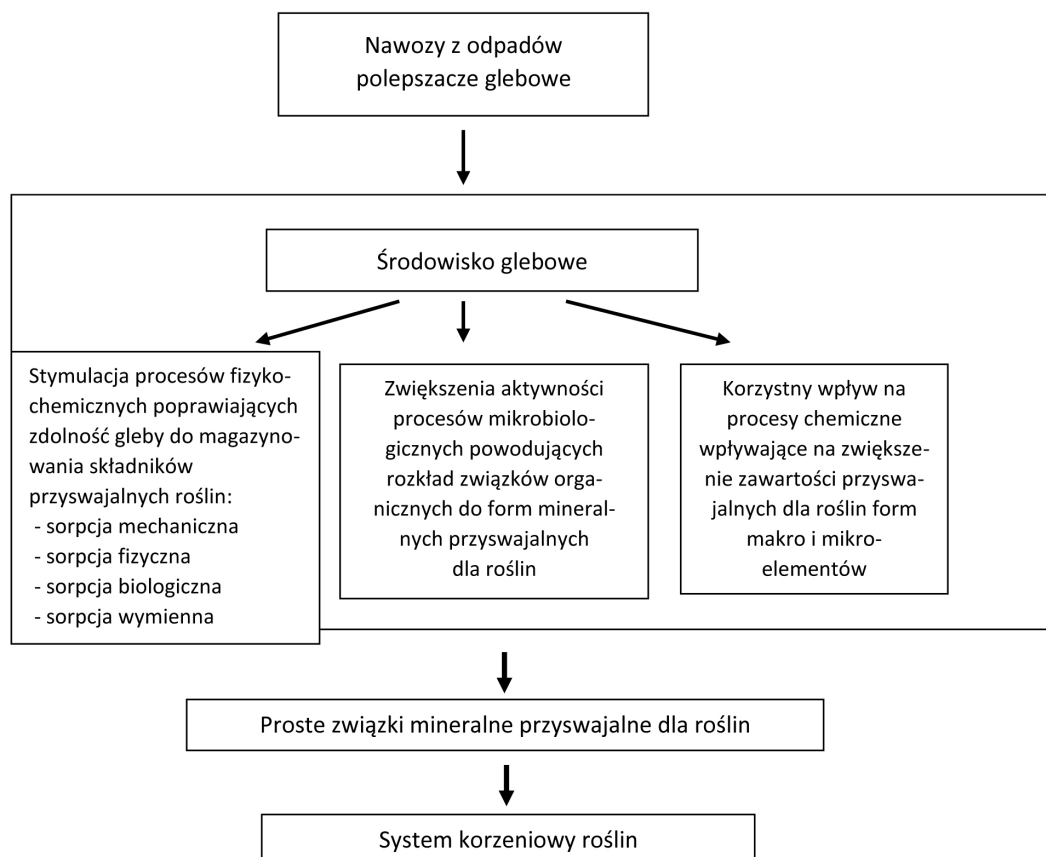
**Tabela 1.** System zapewnienia bezpieczeństwa przy nawozowym stosowaniu odpadów na użytkach rolnych [na podstawie Rozporządzenia]

Kolejność postępowania	Forma zapewnienia bezpieczeństwa, określona w ustawach i rozporządzeniach	Sposób realizacji
1.	Normy określające maksymalne, dopuszczalne zawartości składników niepożądanych w odpadach przeznaczonych do celów nawozowych	Procedura dopuszczenia do stosowania na użytkach rolnych przez upoważnioną jednostkę naukową
2	Normy określające dopuszczalne ilości składników niepożądanych, jakie można jednorazowo wnieść na 1 ha użytków rolnych w dawce odpadów	Ustalenie dopuszczalnych dawek odpadów w t·ha <sup>-1</sup> i terminów agrotechnicznych ich stosowania przez rolnika lub rolnicze służby doradcze
3.	Normy określające dopuszczalne zawartości składników niepożądanych w glebie, na której stosowano odpady	Analiza chemiczna gleb przez Krajową Stację Chemiczno-Rolniczą w cyklach co 3-4 lata
4.	Normy określające zawartość składników niepożądanych w płodach rolnych	Kontrola zawartości składników niepożądanych w płodach rolnych przez państwowe organy kontrolne

ganicznych jak i mineralnych mogą zostać, odpowiednio wykorzystane, jako czynniki plonotwórcze. W ekosystemach naturalnych, zarówno wodnych, jak i glebowych odbywa się obieg pierwiastków tworzących materię organiczną i nieorganiczną. Jednym z głównych ogniw tego obiegu jest biologiczny rozkład substancji organicznych do prostych związków mineralnych, dwutlenku węgla i wody, który najintensywniej zachodzi w warunkach tlenowych. Dzięki temu procesowi każdy ekosystem posiada swoistą zdolność do „samoczyszczania” z odpadowych produktów przemiany materii i obumarłej substancji organicznej, zależną od specyficznych warunków środowiskowych określających aktywność mikroflory i mikrofauny wodnej, czy glebowej. Dzięki tej właściwości ekosystemy mają także zdolność do odnowy, w warunkach presji środowiskowych, jakie tworzy człowiek podczas ich eksploatacji.

Odpady organiczne zastosowane w formie nawozów naturalnych lub organicznych, w wyniku działalności mikroflory i mikrofauny glebowej zostają przetworzone na składniki mineralne i glebową substancję organiczną (rys. 3). Skład-

niki mineralne, w tym także składniki biogenne, jako składniki pokarmowe roślin są pobierane i przetwarzane na biomasę roślinną, co w efekcie eliminuje lub silnie ogranicza ryzyko zanieczyszczenia wód gruntowych. Glebowa substancja organiczna stanowi nie tylko substrat energetyczny dla mikroorganizmów glebowych, co istotnie przyczynia się do wzrostu ich aktywności i tym samym sprawności procesów „samoczyszczania”, ale co jest nie mniej ważne, zwiększa pojemność układu koloidalnego gleby. Powoduje to zwiększenie zdolności gleby do zatrzymywania jonów, co ma istotne znaczenie dla poprawy jej funkcji „filtracyjnej” chroniącej wody gruntowe przed zanieczyszczeniem oraz jej funkcji „magazynującej” wobec składników pokarmowych roślin. Kwestia ta jest szczególnie istotna dla gleb lekkich o małej pojemności sorpcyjnej. Również stosowanie odpadów przemysłowych na użytki rolne poprzez zwiększenie zawartości frakcji silnie rozdrobnionych (pył, il koloidalny) poprawia zdolności sorpcyjne gleby oraz poprzez wnoszenie związków alkalinizujących przyczynia się do odkwaszenia gleb nadmiernie zakwaszonych.



Rys. 3. Schemat obrazujący wpływ produktów nawozowych wytworzonych z odpadów na aktywność naturalnych procesów zachodzących w środowisku glebowym

W wyniku nawożenia gleb nawozami wytworzonymi z odpadów można nie tylko pozbyć się uciążliwego odpadu, ale uzyskać znaczącą poprawę właściwości fizycznych i chemicznych gleb uprawnych przejawiającą się wzrostem odczynu gleb kwaśnych, wzrostem zawartości substancji organicznej, czy zwiększeniem zawartości frakcji ilastych w glebie, a także wzrostem przyswajalnych dla roślin form makro i mikroelementów.

## WNIOSKI

1. Wybór technologii uzdatniania oraz dobór poszczególnych odpadów do produkcji nawozów musi spełnić wymogi ochrony środowiska oraz zapewnić produkcję bezpiecznej żywności paszy.
2. Preferowane technologie uzdatniania odpadów biodegradowalnych do celów przyrodniczego wykorzystania to kompostowanie, piroliza i produkcja biogazu.
3. Nawozy z odpadów nieorganiczne należy poddać procesowi granulacji lub wykorzystać je do produkcji nawozów z odpadami biodegradowanymi.
4. Wszystkie współczesne technologie wykorzystywane do uzdatniania odpadów w celu ich nawozowego wykorzystania muszą zapewnić możliwość nadania wytworzonym produktom nawozowym, odpowiedniej formy fizycznej tak aby mogły być bezpieczne magazynowane, transportowane (odory i inne) i wprowadzane do gleby przez nowoczesne siewniki nawozowe i wieloczynnościowe agregaty uprawowe.
5. Dobór składników i sposób przetwarzania powinien dążyć do tego aby powstające produkty (nawozy) były odpowiednio dedykowane z uwzględnieniem właściwości gleb i potrzeb pokarmowych roślin.

## LITERATURA

1. Bień J., Neczaj E., Worwąg M., Grosser A., Nowak D., Milczarek M., Janik M., Kierunki zagospodarowania osadów w Polsce po roku 2013. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 14(4), 2011, 375–384.
2. Bolan N., Kunhikrishnan A., Thangarajan R., Kumpiene J., Park J., Makino T., Kirkham M.B., Scheckel K. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils - To mobilize or to immobilize? *J. Hazard Mater.*, 266, 2014, 141–166.
3. Fytili D., Zabaniotou A., Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 2008, 116–140.
4. Krzywy E., Wołoszczyk C., Moździerz E., Possibility of producing granulated organic-mineral fertilizers from some municipal and industrial wastes. *Chemik*, 69(10), 2015, 684–697.
5. Neczaj E., Bień JB, Grosser A, Worwąg M, Kacprzak M. Anaerobic treatment of sewage sludge and grease trap sludge in continuous co-digestion. *Global Nest Journal*, 14(2), 2011, 141–148.
6. Nowak M., Kacprzak M., Grobelak A., Osady ściekowe jako substytut glebowy w procesach remediacji i rekultywacji terenów skażonych metalami ciężkimi. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 13(2), 2010, 121–131.
7. Obbard J., Ecotoxicological assessment of heavy metals in sewage sludge amended soils. *Applied Geochemistry*, 16(11), 2001, 1405–1411.
8. Rosik-Dulewska C., *Podstawy gospodarki odpadami*. PWN, Warszawa 2008.
9. Wiater J., Łukowski A., Fitko H., Stelmach S., Sobolewski A., Figa J., Wstępne badania aplikacyjne granulowanych nawozów organiczno-mineralnych na bazie osadów ściekowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Inżynieria Środowiska*. 16(2), 2003, 233–237.
10. Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *ISRN Ecology, Applied Geochemistry*, 16, 2011, 1405–1411.