

## Sposoby zagospodarowania osadów ściekowych powstających w oczyszczalniach ścieków mleczarskich

Artur Mielcarek

Katedra Inżynierii Środowiska  
Wydział Geoinżynierii  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Kontakt e-mail: [artur.mielcarek@uwm.edu.pl](mailto:artur.mielcarek@uwm.edu.pl)

Europejski przemysł mleczarski odpowiada za produkcję około 160 milionów ton mleka (22% światowej produkcji) [2]. Jednocześnie przetwarzanie mleka i produktów mlecznych prowadzi do powstania dużych ilości ścieków, które muszą być oczyszczone przed ich odprowadzeniem do środowiska lub ponownym wykorzystaniem. Ciąg technologiczny przeznaczony do oczyszczania ścieków mleczarskich zazwyczaj podzielony jest na trzy główne etapy. Pierwszy etap obejmuje sedymentację/fizyczne cedzenie w celu usunięcia dużych cząstek i zanieczyszczeń, uśrednienie przepływu i składu ścieków, dodawanie substancji chemicznych w celu korygowania pH oraz flotację z zastosowaniem rozpuszczonego powietrza w celu usunięcia tłuszczów zwierzęcych, olejów i smarów [1]. Drugi etap obejmuje zastosowanie metod biologicznego oczyszczania. W tym celu stosuje się dwa rodzaje systemów: tlenowy i/lub beztlenowy. Etap ten, przede wszystkim, ma na celu usunięcie związków organicznych. Biologiczne oczyszczanie ścieków mleczarskich charakteryzuje się powstawaniem dużych ilości osadów (nawet 0,6 kg s.m. osadu na 1 kg usuniętych związków organicznych wyrażonych BZT<sub>5</sub>). Ogólnie można przyjąć, że ilość osadów podczas biologicznego oczyszczania jest wyższa w sytuacji zastosowania procesów tlenowych oraz biomasy zawieszanej (np. osadu czynnego) i niższa w przypadku zastosowania metod beztlenowych oraz biomasy przytwierdzonej do wypełnienia (biofilmu, błony biologicznej). Usuwanie fosforu prowadzone jest zazwyczaj w trzecim stopniu oczyszczania, z wykorzystaniem substancji chemicznych, takich jak sole żelaza i glinu. Fosfor może być również usuwany poprzez zastosowanie systemu recyrkulacji w systemach biologicznych, poprzez stworzenie warunków tlenowo-anoksydacyjno-beztlenowych, które umożliwiają zwiększone biologiczne usuwanie fosforu, przez co eliminuje się dozowanie środków chemicznych lub znacznie ogranicza ich zużycie [3]. Ilość i jakość powstających osadów zależy zarówno od przyjętej technologii oczyszczania ścieków jak również od ilości i jakości tych ścieków. Złożoność, czasochłonność i energochłonność procesów przeróbki osadów ściekowych powoduje, że wysokość nakładów inwestycyjnych i eksploatacyjnych z tym związanych może wynosić nawet 50% wszystkich kosztów ponoszonych na oczyszczanie ścieków [2].



Zagospodarowanie osadów ściekowych odbywa się poprzez zastosowanie procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych, które mają na celu doprowadzenie ich do stanu, który nie będzie stwarzał zagrożenia dla życia i zdrowia ludzi oraz środowiska naturalnego. Pozwala również na odzysk materiałowy, np. poprzez wykorzystanie przetworzonych osadów jako czynnika poprawiającego żyzność gleb lub odzysk energetyczny, np. poprzez produkcję biogazu w procesie fermentacji metanowej, a następnie wykorzystanie go do produkcji energii elektrycznej i ciepłej. W praktyce procesy te zmierzają do zmniejszenia objętości osadów, stabilizacji składu chemicznego poprzez zmniejszenie ilości związków organicznych, a także higienizacji, podczas której następuje inaktywacja patogenów, w tym jaj i larw pasożytów jeśli takie występują w osadzie. Często cele te są uzyskiwane jednocześnie.

Zmniejszenie objętości osadów polega na zagęszczeniu, a następnie odwodnieniu osadów. Zagęszczenie jest najprostszym sposobem zmniejszenia objętości osadu, przy stosunkowo niewielkich nakładach technicznych i energetycznych. Cechą charakterystyczną jest to, iż w dalszym ciągu zachowuje on płynną konsystencję. Osady mogą być zagęszczane: samoistnie (grawitacyjnie) w wyniku sedymentacji, np. w osadnikach; poprzez zastosowanie flotacji, gdzie cząsteczki osadu dzięki zastosowaniu czynnika flotującego (zazwyczaj powietrza) są wynoszone na powierzchnię, zagęszczane i odprowadzane z flotatora; oraz mechanicznie, gdzie woda z osadu oddzielana jest poprzez filtrację, np. w zagęszczaczach taśmowych czy prasach ślimakowych lub wirowanie w wirówkach.

Odwadnianie osadów polega na dalszym obniżeniu w nich zawartości wody, w porównaniu do procesów zagęszczania. Proces ten może być prowadzony zarówno przed jak i po stabilizacji osadów. Wynika to z faktu, że niektóre metody zagospodarowania osadów wymagają różnej zawartości wody w osadzie w celu sprawnego przebiegu procesu. Osad odwodniony charakteryzuje się zawartością wody na poziomie 60-85% a ciecz osadowa pozbawiona jest zawiesiny. Jednocześnie osad traci swoją płynność, co ułatwia jego transport i dalsze zagospodarowanie. Procesy odwadniania mogą być realizowane: w warunkach zbliżonych do naturalnych jak laguny, poletka, w tym systemy hydrofitowe, oraz w urządzeniach mechanicznych, takich jak wirówki i prasy filtracyjne oraz workownice. Dalsze usuwanie wody z osadów określane jest jako suszenie osadów i podobnie jak w przypadku odwadniania może być realizowane w warunkach naturalnych lub z zastosowaniem urządzeń mechanicznych. Suszenie w warunkach naturalnych może być realizowane poprzez zastosowanie lagun czy poletek osadowych, a o jego efektywności będzie decydowała przewaga parowania i transpiracji w przypadku występowania roślinności nad opadem atmosferycznym. Z tego względu częściej prowadzone jest suszenie mechaniczne, gdzie następuje dostarczanie ciepła oraz zwiększenie przepływu powietrza, w celu zoptymalizowania wymiany masy (wody) i ciepła pomiędzy powietrzem suszącym a nasyconym parą wodną w warstwie nad powierzchnią osadów. Suszenie powoduje zmniejszenie zawartości wody w osadzie do 5-10% i pozwala na długie przechowywanie osadu oraz jego energetyczne wykorzystanie poprzez spalanie. Opisane procesy zmniejszenia objętości osadów ściekowych często są poprzedzone kondycjonowaniem osadu. Jest to proces pozwalający na uzyskanie nowych właściwości osadu, pozwalających na szybsze i bardziej skuteczne usunięcie zawartej w osadzie wody. Kondycjonowanie stosuje się dla wszystkich typów osadów, tzn. zarówno dla osadów surowych jak i ustabilizowanych. Im osad trudniej podlega odwadnianiu tym zastosowanie kondycjonowania jest bardziej wskazane w celu zmniejszenia nakładów energii i pracy. Metody kondycjonowania możemy podzielić na chemiczne i fizyczne. Najczęściej są stosowane metody chemiczne polegające na dodaniu do osadów środków strącająco-koagulacyjnych, takich jak wapno czy sole żelaza i glinu, a także polielektrolity. Rzadziej stosowane są metody fizyczne zarówno mechaniczne, jak dodawanie substancji zmieniających strukturę osadu (np. trociny, popiół), oraz termiczne polegające na zmianie struktury osadu wskutek znacznej zmiany temperatury (wymrażanie, podgrzewanie). Mogą być stosowane również inne metody jak zastosowanie pola ultradźwiękowego i elektromagnetycznego, ale obecnie nie znalazły one szerokiego zastosowania w pełnej skali technicznej w stosunku do osadów z oczyszczania ścieków mleczarskich.



Stabilizacja jest zasadniczym procesem przeróbki osadów powstających podczas oczyszczania ścieków mleczarskich. Polega na zmniejszeniu zawartości łatwo rozkładalnych substancji organicznych, dzięki czemu osady ustabilizowane nie mają tendencji do zagniwania. W wyniku stabilizacji zmniejszeniu również ulega liczba organizmów patogennych. Podczas stabilizacji zachodzą często bardzo złożone procesy mineralizacji spowodowane czynnikami biologicznymi, chemicznymi i fizycznymi. Zanieczyszczenia zawarte w osadach ulegają hydrolizie do roztworu oraz ulegają rozkładowi do gazów lub prostych związków mineralnych. Metody stabilizacji występują w bardzo licznych modyfikacjach techniczno-technologicznych. Podobnie jak w przypadku oczyszczania ścieków, stabilizacja biologiczna może zachodzić w warunkach tlenowych oraz beztlenowych. W przypadku tlenowej stabilizacji osadów najczęściej stosowane jest kompostowanie. Proces ten obejmuje mineralizację i częściową humifikację materii organicznej, w wyniku czego powstaje stabilny, pozbawiony patogenów produkt o właściwościach zbliżonych do próchnicy glebowej. Ogólnie proces można podzielić na fazę mineralizacji oraz dojrzewania (humifikacji). W fazie mineralizacji zachodzą procesy utleniania związków organicznych, a produktami jest ditlenek węgla, woda oraz inne proste związki nieorganiczne i organiczne. Na ilość i dystrybucję tlenu w kompostowanej masie duży wpływ ma uwodnienie, gdzie za optymalne uznawane jest 50-70%, które w przypadku „czystych” osadów zazwyczaj jest wyższe. Częstym rozwiązaniem tego problemu jest kompostowanie osadów z innymi odpadami (np. odpadami zielonymi, materiałami drewnopochodnymi, słomą) zapewniającymi odpowiednią strukturę kompostowanej masy, a także poprawiającymi parametry takie jak odpowiedni stosunek C:N. Cechą charakterystyczną kompostowania jest powstawanie znacznych ilości energii, co przejawia się we wzroście temperatury kompostowanych osadów nawet do 50-65°C. Zmiany temperatury w trakcie kompostowania powodują zmianę aktywności różnych grup mikroorganizmów zaangażowanych w rozkład zanieczyszczeń. Wysoka temperatura pozwala również na higienizację osadów. Końcowym etapem kompostowania jest proces dojrzewania (humifikacja), w którym następuje jakościowa i ilościowa przemiana materii organicznej. Dojrzały kompost może być stosowany jako nawóz organiczny, poprawia strukturę gleby, zwiększa żyzność oraz zawartość próchnicy glebowej. Z punktu technicznego kompostowanie wymaga jednak dodatkowych rozwiązań zapewniających odpowiednie warunki dla przebiegu procesu takich jak: miejsce pod przykryciem, dedykowane komory, urządzenia mieszające, napowietrzające itp.

Biologiczna stabilizacja osadów w warunkach beztlenowych odbywa się przede wszystkim przez zastosowanie fermentacji metanowej. Proces ten prowadzi do rozkładu części zanieczyszczeń organicznych, w wyniku czego powstaje biogaz zawierający głównie metan, ditlenek węgla, siarkowodór i amoniak. Fermentacja metanowa jest złożonym procesem, w którym zasadniczo można wyróżnić cztery fazy: hydrolizy, kwasogenezy, octanogenezy i metanogenezy. Ostatecznie metan powstaje w wyniku biochemicznej dekarboksylacji kwasu octowego oraz z biochemicznej syntezy wodoru i ditlenku węgla. Ten sposób stabilizacji osadów nie wymaga zużycia energii do napowietrzania osadów, może być prowadzony w wielu wariantach reaktorów oraz parametrów technologicznych, które wpływają na ilość jak i na jakość powstającego biogazu. Jednym z głównych czynników wpływających na ograniczenie i hamowanie sprawnego prowadzenia beztlenowej degradacji osadów jest konieczność zapewnienia odpowiedniej dostępności substratu organicznego dla mikroorganizmów metanogennych. Do tego konieczna jest zwykle wstępna obróbka i kondycjonowanie osadów. Z tego względu poszukuje się rozwiązań ekonomicznie i technologicznie uzasadnionych, pozwalających na takie wstępne przygotowanie osadów przed stabilizacją beztlenową, które umożliwiają depolimeryzację i rozpad komórek osadu, transformację materii organicznej, jej udostępnienie bakteriom metanogennym i skuteczniejsze przetworzenie do wysokoenergetycznych produktów. Pozostałe czynniki to parametry samego procesu, takie jak czas zatrzymania, obciążenie komory ładunkiem zanieczyszczeń, temperatura procesu. Fermentacja metanowa jest rozwiązaniem gwarantującym w wielu przypadkach uzyskanie zysku energetycznego oraz produktu końcowego, który może być wykorzystany rolniczo lub przyrodniczo.



Procesem, który pozwala na stabilizację osadów zarówno nieodwodnionych jak i odwodnionych oraz pofermentacyjnych, jest stabilizacja chemiczna przede wszystkim poprzez wapnowanie z wykorzystaniem wapna palonego ( $\text{CaO}$ ) oraz wapna gaszonego ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). W przypadku wapna palonego, głównym czynnikiem zapewniającym stabilizację, ale również higienizację jest wysoka temperatura w wyniku reakcji  $\text{CaO}$  z wodą (reakcja egzotermiczna). W przypadku wapna gaszonego uzyskiwany efekt wynika z podwyższenia pH osadów. Zastosowanie tlenku wapnia, jest metodą szybkiej stabilizacji (do kilkudziesięciu godzin), jednak wymaga znacznie większej ilości reagentu, w porównaniu do sytuacji, gdzie zastosowano  $\text{Ca(OH)}_2$ . W drugim przypadku proces trwa nawet do kilkudziesięciu dni. Stabilizacja poprzez wapnowanie pozwala na higienizację osadu oraz jego rolnicze i przyrodnicze wykorzystanie. Zastosowanie wapna, gdzie w warunkach Polski grunty orne zazwyczaj charakteryzują się zbyt niskim pH, dodatkowo zwiększa opłacalność tej metody i atrakcyjność produktu końcowego. Proces wapnowania nie wymaga zaawansowanych rozwiązań technicznych, technologicznych oraz wysokich nakładów energii i pracy.

Stabilizacja fizyczna, to przede wszystkim stabilizacja termiczna zachodząca podczas suszenia lub w wysokotemperaturowych procesach przeróbki osadów, często będących fazami bardziej złożonych procesów, jak fermentacja metanowa prowadzona w warunkach termofilowych czy wzrost temperatury w pierwszej fazie kompostowania. Do tych metod stabilizacji, możemy również zaliczyć takie procesy jak piroliza i zgazowanie. Piroliza polega na beztlenowym przekształceniu materii organicznej w biowęgiel oraz palny gaz pirolityczny pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury. Biowęgiel wykorzystywany jest zazwyczaj jako paliwo lub sorbent, natomiast, gaz pirolityczny jako paliwo. Zgazowanie, to właściwie kontynuacja procesu pirolizy, gdzie pozostały węgiel zawarty w koksie pirolitycznym podlega niepełnemu utlenieniu w warunkach ograniczonego dostępu tlenu i przy wysokiej temperaturze. Wymienione procesy wymagają zastosowania zaawansowanych technik, zaplecza sprzętowego oraz nakładów energetycznych i wyspecjalizowanej kadry.

Higienizacja to ograniczenie lub całkowita likwidacja organizmów patogennych. Najpowszechniej stosowaną metodą higienizacji osadów powstających podczas oczyszczania ścieków mleczarskich jest wapnowanie osadów. W tym przypadku higienizacja i stabilizacja osadów przebiega jednocześnie. Higienizacja może być połączona również z innymi procesami stabilizacji czy odwadniania i suszenia osadów. Jej efektywność będzie zależała od przebiegu tych procesów i ich wpływu na żywotność mikroorganizmów chorobotwórczych oraz jaj i larw pasożytów.

Ogólnie osady ściekowe pochodzące z oczyszczania ścieków mleczarskich charakteryzują się wysoką zawartością materii organicznej, azotu i fosforu oraz obecnością tłuszczu. Mogą również zawierać inne zanieczyszczenia jak np. pozostałości środków czyszczących używanych w zakładzie czy metale ciężkie [1]. Biorąc pod uwagę ilość osadów, jakość, możliwości zakładów mleczarskich, a także dotychczasowe badania, dominującym sposobem ich zagospodarowania jest rolnicze i przyrodnicze wykorzystanie [2, 5]. Z tego względu, poza kompostowaniem, fermentacją metanową czy wapnowaniem, jako procesów cząstkowych godnym uwagi jest odwadnianie i stabilizacja osadów w warunkach zbliżonych do naturalnych, poprzez zastosowanie filtrów gruntowych lub gruntowo-roślinnych [6]. Rozwiązanie to polega na zastosowaniu filtra wypełnionego materiałem o różnej granulacji, w którym znajduje się system drenażu zapewniający odprowadzenie odcieku oraz wentylację filtra. Zastosowanie roślinności wodnolubnej, takiej jak np. trzcina pospolita, pozwala zintensyfikować proces odwadniania oraz przyspieszyć procesy stabilizacji. Jest to technologia przyjazna dla środowiska, nie wymaga stosowania związków chemicznych i zaawansowanego sprzętu, ponadto charakteryzuje się niskim zużyciem energii. Produkt końcowy jest ustabilizowany i ma właściwości zbliżone do próchnicy glebowej o dobrych właściwościach do rolniczego wykorzystania.



Powstające odcieki charakteryzują się lepszymi parametrami w porównaniu z tymi, które są generowane w technologiach do obróbki osadów o wysokim stopniu zaawansowania. Dlatego koszty ich zagospodarowania są znacznie niższe [4]. W filtrach zachodzą procesy oparte na działaniu grawitacji, temperatury (w warunkach Polskich ujemnej zimą i dodatniej latem), promieniowania słonecznego, parowania, transpiracji oraz oddziaływania roślin i innych organizmów żywych rozwijających się w odwadnianym osadzie i wypełnieniu filtra. Jednym z kluczowych parametrów prowadzenia procesu jest obciążenie powierzchni wypełnienia osadem oraz czas zatrzymania.

#### Literatura:

1. Ahmad T., Aadil R.M., Ahmed H., ur Rahman U., Soares B.C.V., Souza S.L.Q., Pimentel T.C., Scudino H., Guimarães J.T., Esmerino E.A., Freitas M.Q., Almada R.B., Vendramel S.M.R., Silva M.C., Cruz A.G. (2019). Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review, Trends Food Sci. Technol. 88, 361–372. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2019.04.003>
2. Ashekuzzaman S.M., Forrestal P., Richards K., Fenton O. (2019). Dairy industry derived wastewater treatment sludge: Generation, type and characterization of nutrients and metals for agricultural reuse. J. Clean. Prod. 230, 1266–1275. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.025>
3. Das P., Paul K.K. (2023). A Review on Different Treatment Possibilities of Dairy Wastewater. Theoretical Foundations of Chemical Engineering 4, 57, 563–580. <https://doi.org/10.1134/S0040579523040346>
4. KołECKA K., Gajewska M., Obarska-Pempkowiak H., Rohde D. (2017). Integrated dewatering and stabilization system as an environmentally friendly technology in sewage sludge management in Poland. Ecol. Eng. 98, 346–353. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.08.011>
5. Shi W., Healy M.G., Ashekuzzaman S.M., Daly K., Leahy J.J., Fenton O. (2021). Dairy processing sludge and co-products: A review of present and future re-use pathways in agriculture. J. Clean. Prod. 314, 128035. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128035>
6. Stefanakis A.I., Tsihrintzis V.A. (2011). Dewatering mechanisms in pilot-scale Sludge Drying Reed Beds: Effect of design and operational parameters. Chemical Engineering Journal 172, 430–443. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2011.05.111>