

Zbysław DYMACZEWSKI¹,
Piotr KRAJEWSKI²

¹Institut Inżynierii Środowiska
Politechnika Poznańska

²Institut Inżynierii Środowiska
PWSZ w Gnieźnie

TECHNOLOGIE OBRÓBK I OSADÓW Z UZDATNIANIA WODY I MOŻLIWOŚCI ICH WYKORZYSTANIA

PROCESSING OF SLUDGES FROM WATER TREATMENT AND THEIR BENEFICIAL FINAL USE

During water treatment processes contaminants are removed as waste by-products. These products are referred to as residuals coming out of coagulation, lime softening processes and spent filter backwash. Elimination of surface water discharge, stricter landfilling regulations, higher landfill tipping fees and restrictions on sewer discharge have forced water utilities to develop alternatives to disposal. Many water treatment plants use actually a variety of beneficial use methods for managing coagulant- and lime- sludges. Beneficial use markets of these waste by-products presented in the article include: hydrogen sulphide (H₂S) binding, bricks making, cement manufacturing, composting, nutrient control, forest and land application, soil deacidification and land reclamation.

1. Wprowadzenie

Technologię uzdatniania wody można zdefiniować jako technologię rozdziału uzdatnianej wody na:

- wodę z domieszkami w niej zawartymi w ilościach dopuszczalnych,
- osady i popłuczyny, będące hydromieszaninami usuniętych z wody nadmiernych ilości domieszek w stosunku do stężeń dopuszczalnych

Powstawanie osadów i popłuczyn jako produktów odpadowych zakładów wodociągowych wyjaśniają relacje między jakością wody ujmowanej, normą jakości wody do picia oraz technologią jej uzdatniania. Różnica między składem wody ujmowanej a normą jakości wody do picia określa zakres uzdatniania wody, a pośrednio także rodzaj i ilość produktu odpadowego. W ostatnich kilkudziesięciu latach obserwuje się znaczny i systematyczny wzrost wymagań w zakresie wody do picia, co oznacza intensyfikację procesów uzdatniania wody, a pośrednio zwiększenie stężenia i objętości produktów odpadowych.

Osady i popłuczyny w zakładach wodociągowych powstają na ogół jako wynik chemicznej, fizykochemicznej bądź biochemicznej transformacji usuwanych domieszek z substancji rozpuszczonych lub koloidalnych w makroskopowe cząstki osadu oraz oddzielenie ich od uzdatnianej wody w procesach sedymentacji i filtracji pospiesznej. Tak powstają osady pokoagulacyjne, osady z odżelaziania i odmanganiania wód podziemnych oraz osady z dekarbonizacji przez chemiczne strącanie wapnem. Skład i właściwości tych osadów zależą od składu ujmowanej wody, efektów i technologii uzdatniania, w tym głównie stosowanych reagentów.

Technologie unieszkodliwiania osadów i popłuczyn z uzdatniania wody determinuje ich objętość, podatność na odwadnianie, skład fazy stałej, w tym w szczególności zawartość substancji toksycznych i uwarunkowania lokalne. Technologie te pod wpływem zmieniających się przepisów i istniejących trendów w badaniach naukowych zmierzają w kierunku wykorzystania osadów zarówno w przyrodzie, jak i gospodarce. Jednak przyrodnicze wykorzystanie osadów powstałych w procesie uzdatniania wody może być bardziej kłopotliwe niż osadów ściekowych. Wynika to przede wszystkim z małej zawartości w nich substancji organicznej, nadającej im cechy odpadu mineralnego.

We wcześniejszych programach badawczych dotyczących technologii unieszkodliwiania osadów tego rodzaju główny nacisk kładziono na procesy i urządzenia do ich odwadniania. Obecnie z uwagi na znaczne zaostrzenie się norm ochrony środowiska w programach tych widać wyraźne ukierunkowanie celów i tematów na opracowanie metod ostatecznego wykorzystania i unieszkodliwiania, a także składowania osadów, dostosowanych do współczesnych kryteriów środowiskowych pod względem zawartości w nich substancji toksycznych.

2. Procesy i systemy gospodarki osadowej

Rozwiązanie problemów gospodarki osadowej w każdym projektowanym lub modernizowanym zakładzie wodociągowym winno opierać się na:

- znajomości rodzajów, objętości, składu i właściwości osadów oraz popłuczyn powstających lub które mogą powstać w procesach uzdatniania wody,
- ocenie możliwości zmian w technologii uzdatniania wody, zmierzających do zmniejszenia objętości i masy powstających osadów i popłuczyn z uwzględnieniem recyklingu odzyskanej wody i reagentów (np.: wapna, koagulantów glinowych),
- uwzględnieniu istniejących przepisów i restrykcji (dotyczących odpadów i osadów) w proponowanych rozwiązaniach
- analizie ekonomicznej proponowanych rozwiązań i wyborze rozwiązania najlepszego, uwzględniającego uwarunkowania lokalizacyjne i klimatyczne.

Systemy gospodarki osadowej w zakładach wodociągowych w Polsce obejmują najczęściej procesy, instalacje i urządzenia do kondycjonowania osadów i popłuczyn, ich zagęszczania, rzadziej mechanicznego odwadniania oraz suszenia w lagunach, wspomaganego częściowym wymrażaniem. Osady odwodnione składa się bądź na terenach wodociągowych, bądź na komunalnych składowiskach odpadowych. W rozwiązaniach zachodnich stosuje się bardziej rozbudowane systemy gospodarki osadowej, co obrazuje schematycznie algorytm niemiecki przedstawiony na rys. 1 (DVGW 1986). Małe zakłady wodociągowe w Europie Zachodniej i USA odwadniają swoje popłuczyny i osady w

przewoźnych stacjach odwadniania osadów (Koppers 1987). W Polsce bardzo małe wodociągi nie dysponujące odpowiednim terenem lokalizacji lagun bądź wywożą osady z popłuczyn (po zagęszczeniu grawitacyjnym) wozami asenizacyjnymi, bądź odprowadzają je do kanalizacji.

Przewoźne jednostki do odwadniania osadów mogą być wykorzystywane do regularnego odwadniania osadów z mniejszych stacji uzdatniania wody, zwłaszcza zakładów produkujących osady w ilości poniżej 1 tony dziennie, przykładem są zakłady uzdatniania wody podziemnej w Holandii (Van Nievenhuyze R.F. & van de Baan E., 1989).

Regularne usuwanie produktów ubocznych procesu uzdatniania wody przy użyciu przewoźnych jednostek umożliwia utrzymanie odpowiedniej jakości i homogenizacji osadu. Nie dopuszcza do zarastania zbiornika, w którym magazynowany jest osad, ograniczone jest też zanieczyszczenie większymi substancjami stałymi. Dzięki temu uzdatnianie osadu jest łatwiejsze ponieważ można pominąć proces wstępnego oczyszczania osadu oraz homogenizacji, młody osad jest lepszej jakości.

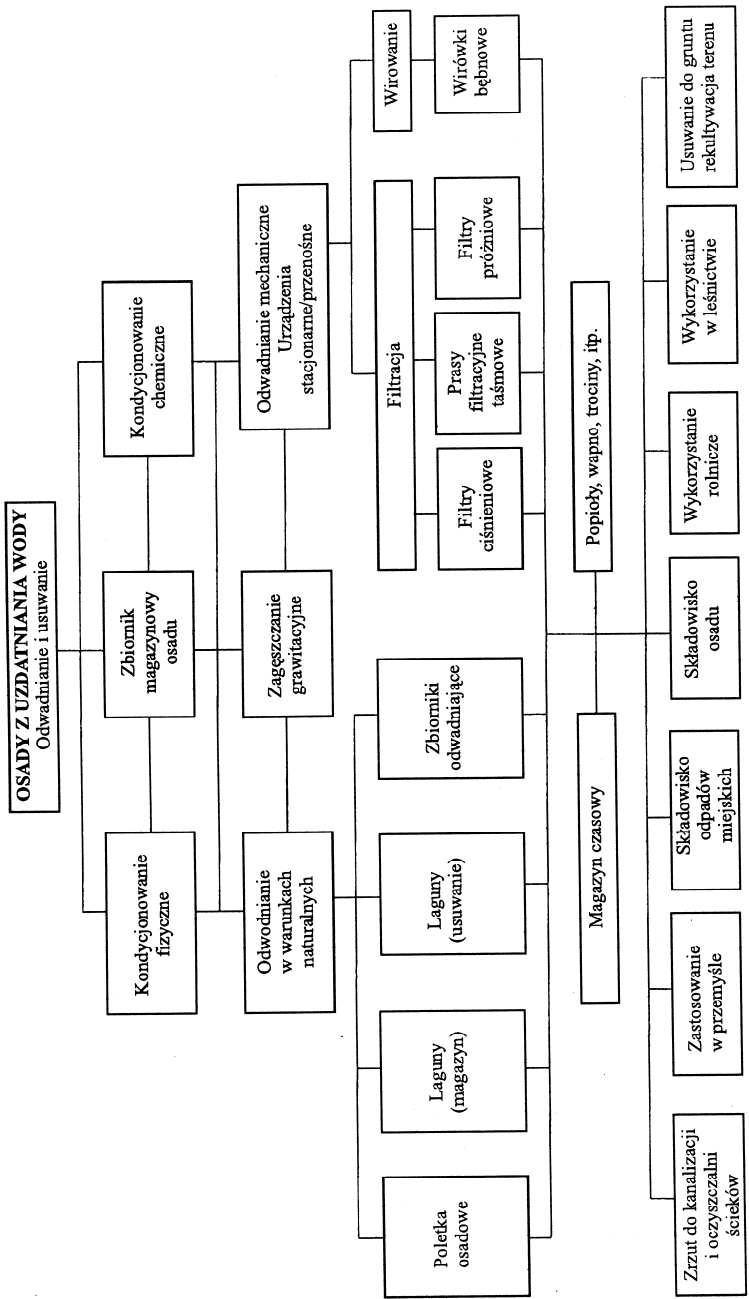
Można zwiększyć ciągłość obróbki mechanicznej osadów przez połączenie oczyszczania popłuczyn w kompaktowych instalacjach z zagęszczaniem osadów, możliwe jest to dzięki wykorzystaniu koagulantów obniżających czas sedymentacji, a co za tym idzie wymaganą powierzchnię nawet o 10-20 razy w porównaniu do konwencjonalnych metod. Jeszcze większą oszczędność powierzchni sedymentacyjnej może przynieść zastosowanie separatorów płytowych (Van Nievenhuyze R.F. & van de Baan E., 1989).

W przypadku stacji uzdatniania, z których dziennie odprowadza się mniej niż 500 m³ popłuczyn, nie ma konieczności stosowania ciągłego procesu sedymentacji. Mogą one być kierowane bezpośrednio do zbiorników sedymentacyjnych odpowiadających dziennemu zapotrzebowaniu. Po kilku godzinach, odprowadzana jest ciecz nadosadowa, natomiast osiadły osad jest okresowo usuwany za pomocą zgarniaczy do zbiornika.

Ciągła sedymentacja zalecana jest w przypadku produkcji popłuczyn w ilości powyżej 1000 m³/dobę. Należy wtedy zastosować zbiornik buforowy i dalej separator płytowy.

Z technicznego punktu widzenia sama sedymentacja powinna zagwarantować prawidłowe mechaniczne odwodnienie osadów. Jednak dalsze zagęszczanie grawitacyjne prowadzi nieodmiennie do oszczędności w dalszym procesie odwadniania.

Często w celu przyspieszenia zagęszczania dodawane są polielektrolyty. W przypadku zagęszczania osadów po zmiękczeniu nie ma takiej konieczności ponieważ mają one bardzo dobre właściwości zagęszczające.



Rys. 1. Systemowe rozwiązania gospodarki osadowej – algorytm niemiecki

Fig. 1. Systems of sludge management from water treatment – German algorithm

3. Metody zagospodarowania osadów

Ostatecznym sposobem rozwiązania problemu osadowego w zakładach wodociągowych jest ich wykorzystanie i zagospodarowanie. Osady powstające w komunalnych systemach uzdatniania wody obejmują głównie (Sozański i in. 1999):

- osady pokoagulacyjne,
- popłuczyny z płukania filtrów,
- osady i popłuczyny z procesów zmiękczenia wody.

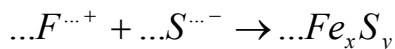
Te wyżej wymienione produkty odpadowe z uzdatniania wody w przeszłości były rzucane bezpośrednio do odbiorników bądź składane na terenach należących do wodociągów, a główną uwagę skupiano na uzdatnianiu wody. W ciągu ostatnich 30 lat ta sytuacja uległa zmianie. W wielu krajach odprowadzanie osadów do odbiorników jest obecnie prawnie zabronione.

Maksymalne wykorzystanie produktów ubocznych i odpadowych jest stosowane w każdym dobrze zaprojektowanym i eksploatowanym zakładzie przemysłu chemicznego. Również dążenie do kompleksowych rozwiązań problemu wykorzystania osadów i popłuczyn w zakładach uzdatniania wody przyczyniło się do powstania wielu prac badawczych i studiów nad ich zagospodarowaniem. Przemawiają za tym zarówno względy ekonomiczne, jak i technologiczne. Czynniki ekonomiczne to odzysk i wykorzystanie surowców zawartych w osadach. Pozytywne względy technologiczne to zmniejszenie objętości osadów i popłuczyn wskutek oddzielenia od nich tych substancji, których odzyskanie jest opłacalne.

Zmniejszenie objętości osadów i popłuczyn wiąże się bezpośrednio z ich likwidacją oraz ochroną wód powierzchniowych przed zanieczyszczeniem.

3.1. Wykorzystanie osadów żelazowych do wiązania siarkowodoru

Mechanizm wiązania siarkowodoru przez pokoagulacyjne osady żelazowe nie jest dokładnie poznany. Stwierdzono jednak, że w kontakcie z osadami pokoagulacyjnymi, zawierającymi uwodnione tlenki żelaza, zachodzi reakcja, którą ogólnie można zapisać następująco:



W ten sposób wytrącają się takie związki, jak: FeS, Fe₂S₃, FeS₂ lub inne nierozpuszczalne związki kompleksowe w układzie żelazo - siarka.

Powyższe właściwości pokoagulacyjnych osadów żelazowych zostały wykorzystane w Holandii (Van der Veer 1987) do serii eksperymentów przeprowadzonych w skali technicznej w następujących przypadkach.

Badania prowadzono w okresie dwóch miesięcy, dozując osad żelazowy w przepompowni ścieków pod ssawy pomp. Dawka żelaza w dozowanym osadzie pokoagulacyjnym wynosiła 31 mg/L ścieków. Pomiar zawartości H₂S przeprowadzono w kolektorze w odległości 5300 m od przepompowni. Z eksperymentu tego wynikają następujące wnioski:

- w dni bezdeszczowe czas spływu ścieków na odcinku 5300 m był stosunkowo długi i wahał się od 8 do 10 h, co sprzyjało intensyfikacji procesów gnilnych. Stężenie siarkowodoru w środowisku kanalizacyjnym wynosiło maksymalnie aż 900 mg/L, a w ściekach - 8 mg/L.

- po dozowaniu osadu żelazowego stężenie H_2S w środowisku kanalizacyjnym zmniejszyło się do około 50 mg/L. To zmniejszenie zawartości H_2S o 95% nastąpiło prawie natychmiast po dodaniu osadu żelazowego.
- zastosowanie osadu żelazowego pozwoliłoby uniknąć prac nad ochroną rur kanalizacyjnych przed korozją, np. wykładania kanalizacji materiałem syntetycznym, chroniącym przed korodującym działaniem powstającego kwasu siarkowego.

Uwolniony osad żelazowy jest również wykorzystywany w płuczkach pozwalających wiązać gazowy H_2S . Metoda ta jest stosowana w Holandii w pięciu oczyszczalniach do usuwania H_2S z biogazu powstającego w **fermentacji beztlenowej** osadu. Zakłady te wykorzystują wytwarzany biogaz na własne potrzeby energetyczne. Spalanie nieoczyszczonego gazu powodowało do tej pory korozję urządzeń do spalania.

Pomiary i obserwacje z 35-tygodniowego stosowania osadu żelazowego w płuczkach gazowych pozwalają stwierdzić, że:

- przed rozpoczęciem procesu płukania biogazu w płuczkach wypełnionych osadem żelazowym stężenie H_2S wahało się od 600 do 1500 mg/L.
- po zastosowaniu płukania gazu stężenie H_2S w biogazie niemalże od razu zmniejszyło się do 50 mg/L.
- możliwe jest zmniejszenie zawartości H_2S wytwarzanego podczas fermentacji osadów ściekowych przez dodawanie żelazowego osadu pokoagulacyjnego w ilości nie mniejszej niż 18 g Fe/kg s.m. Dawka taka pozwala utrzymać stężenie H_2S w biogazie na dopuszczalnym poziomie 300 mg/L.
- nie stwierdzono, aby większe dawki osadu żelazowego ponad 160 g/kg s.m. osadu wywołały negatywne skutki w procesie fermentacji. Oznacza to, że osad żelazowy nie musi być dozowany w sposób ciągły, ale może być dodawany periodycznie w większych ilościach (Baaltussen 1986).
- koszt zastosowania pokoagulacyjnego osadu żelazowego jest o 50% niższy w porównaniu z zastosowaniem chlorku żelazowego.

Cztery prowincje (spośród 13) w Holandii prowadzą intensywną hodowlę trzody chlewnej i bydła. W efekcie w ciągu roku powstaje 18 000 000 m³ gnojowicy, stanowiącej poważne zagrożenie dla środowiska. Z ilości tej tylko ograniczona część gnojowicy może być wykorzystana rolniczo. Pozostała część jest oczyszczana w procesie fermentacji beztlenowej, a powstający biogaz wykorzystuje się do ogrzewania obór i chlewni. Wytwarzany gaz może być oczyszczany w płuczkach z osadem żelazowym w analogiczny sposób jak biogaz z fermentacji beztlenowej osadów ściekowych. Szacuje się, że na 1 mln t gnojowicy zużyto by 2000 t osadów żelazowych, co stanowi 10% całkowitej ilości osadów powstających po procesie koagulacji solami żelaza w holenderskich stacjach uzdatniania wody (Oostelbos 1988).

3.1.1. Dozowanie osadów do przepompowni ścieków

Badania prowadzono w okresie dwóch miesięcy, dozując osad żelazowy w przepompowni ścieków pod ssawy pomp. Dawka żelaza w dozowanym osadzie pokoagulacyjnym wynosiła 31 mg/L ścieków. Pomiary zawartości H_2S przeprowadzono w kolektorze w odległości 5300 m od przepompowni. Z eksperymentu tego wynikają następujące wnioski:

- w dni bezdeszczowe czas spływu ścieków na odcinku 5300 m był stosunkowo długi i wahał się od 8 do 10 h, co sprzyjało intensyfikacji procesów gnilnych. Stężenie siarkowodoru w środowisku kanalizacyjnym wynosiło maksymalnie aż 900 mg/L, a w ściekach - 8 mg/L;

- po dozowaniu osadu żelazowego stężenie H_2S w środowisku kanalizacyjnym zmniejszyło się do około 50 mg/L. To zmniejszenie zawartości H_2S o 95% nastąpiło prawie natychmiast po dodaniu osadu żelazowego;
- zastosowanie osadu żelazowego pozwoliłoby uniknąć prac nad ochroną rur kanalizacyjnych przed korozją, np. wykładania kanalizacji materiałem syntetycznym, chroniącym przed korodującym działaniem powstającego kwasu siarkowego.

3.1.2. Oczyszczanie biogazu

Uwolniony osad żelazowy jest również wykorzystywany w płuczkach pozwalających wiązać gazowy H_2S . Metoda ta jest stosowana w Holandii w pięciu oczyszczalniach do usuwania H_2S z biogazu powstającego w **fermentacji** beztlenowej osadu. Zakłady te wykorzystują wytwarzany biogaz na własne potrzeby energetyczne. Spalanie nieoczyszczonego gazu powodowało do tej pory korozję urządzeń do spalania.

Pomiary i obserwacje z trzydziestopięcioletniego stosowania osadu żelazowego w płuczkach gazowych pozwalają stwierdzić, że:

- przed rozpoczęciem procesu płukania biogazu w płuczkach wypełnionych osadem żelazowym stężenie H_2S wahało się od 600 do 1500 mg/L,
- po zastosowaniu płukania gazu stężenie H_2S w biogazie niemalże od razu zmniejszyło się do 50 mg/L,
- możliwe jest zmniejszenie zawartości H_2S wytwarzanego podczas fermentacji osadów ściekowych przez dodawanie żelazowego osadu pokoagulacyjnego w ilości nie mniejszej niż 18 g Fe/kg s.m. Dawka taka pozwala utrzymać stężenie H_2S w biogazie na dopuszczalnym poziomie 300 mg/L,
- nie stwierdzono, aby większe dawki osadu żelazowego ponad 160 g/kg s.m. osadu wywołały negatywne skutki w procesie fermentacji. Oznacza to, że osad żelazowy nie musi być dozowany w sposób ciągły, ale może być dodawany periodycznie w większych ilościach (Baaltsussen 1986),
- koszt zastosowania pokoagulacyjnego osadu żelazowego jest o 50% niższy w porównaniu z zastosowaniem chlorku żelazowego.

3.1.3. Wiązanie H_2S w beztlenowej fermentacji gnojowicy

Cztery prowincje (spośród 13) w Holandii prowadzą intensywną hodowlę trzody chlewnej i bydła. W efekcie w ciągu roku powstaje 18 000 000 m³ gnojowicy, stanowiącej poważne zagrożenie dla środowiska. Z ilości tej tylko ograniczona część gnojowicy może być wykorzystana rolniczo. Pozostała część jest oczyszczana w procesie fermentacji beztlenowej, a powstający biogaz wykorzystuje się do ogrzewania obór i chlewni. Wytwarzany gaz może być oczyszczany w płuczkach z osadem żelazowym w analogiczny sposób jak biogaz z fermentacji beztlenowej osadów ściekowych. Szacuje się, że na 1 mln t gnojowicy zużyto by 2000 t osadów żelazowych, co stanowi 10% całkowitej ilości osadów powstających po procesie koagulacji solami żelaza w holenderskich stacjach uzdatniania wody (Oostelbos 1988).

3.1.4. Wiązanie H₂S powstającego podczas oczyszczania ścieków garbarskich

Do wiązania siarkowodoru wykorzystano zagęszczony osad żelazowy ze stacji uzdatniania wód podziemnych o stężeniu zawiesin 5-20%. Ścieki powstające z procesu garbowania skór są oczyszczane w napowietrzanych zbiornikach wyrównawczych. Jednakże ilość dostarczanego powietrza jest niewystarczająca do utlenienia siarczków powstających podczas garbowania. W przeszłości problem wiązania siarkowodoru rozwiązywano, stosując siarczan żelazowy, który jednak nie w pełni likwidował wydobywający się odór. Zastosowanie osadów żelazowych z uzdatniania wód podziemnych dawało podobne efekty przy znacznie niższych kosztach.

Należy również podkreślić, że zastosowanie osadów żelazowych ma mimo wszystko przewagę nad stosowaniem FeCl₃ z uwagi na to, że ścieki garbarskie po procesach garbowania i tak zawierają duże ilości chlorków, często przekraczające dopuszczalne wartości (Oostelbos 1988).

3.2. Odprowadzanie osadów do kanalizacji miejskiej

Wprowadzanie osadów z uzdatniania wody do kanalizacji miejskiej było powszechnie stosowane w USA, w Europie metoda ta była praktykowana w znacznie mniejszym stopniu (Such 1986).

W 1986 roku 10 ze 143 zakładów wodociągowych w Niemczech Zachodnich odprowadzało swoje osady do kanalizacji miejskiej, a 3 z nich bezpośrednio do oczyszczalni ścieków. W żadnym z tych rozwiązań nie stwierdzono osadzania się zawiesin w kanałach. W razie odprowadzania osadów lub popłuczyn do kanalizacji konieczne jest podawanie informacji o jakości i ilości tych osadów i popłuczyn, co pozwala kontrolować i oceniać efekty procesów technologicznych w oczyszczalniach oraz korygować ilość odprowadzanych do kanalizacji osadów i popłuczyn. Do wad tej metody unieszkodliwiania osadów należy zaliczyć odprowadzanie dużej masy zawiesin do oczyszczalni. Zrzuty osadów do kanalizacji winny być wyrównane w czasie. Celem uniknięcia osadzania się zawiesin zalecana jest w kanalizacji minimalna prędkość przepływu mieszaniny ścieków i osadów pochodzących z uzdatniania wody, równa 0,8 m/s a stężenie zawiesin nie powinno być większe od 3% (wagowo). Objętość osadów pokoagulacyjnych i popłuczyn w stosunku do objętości ścieków oczyszczanych w oczyszczalni nie powinna także przekraczać 8% (Sarfert 1987).

Odprowadzanie osadów pokoagulacyjnych i popłuczyn do oczyszczalni ścieków prowadzi do:

- poprawy efektów mechanicznego oczyszczania ścieków, w szczególności zdolności sedymentacyjnych zawiesin,
- poprawy efektów usuwania fosforu,
- zwiększenia objętości osadów powstających w oczyszczalni ścieków,
- zmniejszenia produkcji gazu w procesie fermentacji metanowej.

W praktyce stosowanie tej metody jest uwarunkowane zasięgiem sieci kanalizacyjnej i lokalizacją zakładu wodociągowego w bezpośredniej styczości tej sieci (Sharma et al., 2013).

3.3. Wykorzystanie osadów pokoagulacyjnych w produkcji cementu

Głównymi składnikami cementu są: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 . W surowcach stosowanych do produkcji, powyższe tlenki występują w formie węglanów oraz związków mineralnych zawartych w glinie i w kredzie.

Stosowanie osadów pokoagulacyjnych w mieszaninie surowców nie wywołuje negatywnych skutków w produkcji (Kreft 1988). Dla przykładu, stacje uzdatniania wody w Hamburgu usuwają 8500 m^3 na rok osadów z odżelaziania i odmanganiania wody podziemnej i $25\,000 \text{ m}^3$ na rok osadów z procesów zmiękczenia wody. Stężenia wagowe fazy stałej w tych osadach wynoszą odpowiednio 6% i 50%. Osady są transportowane z zakładów uzdatniania wody do cementowni. Koszty transportu osadu z odżelaziania i odmanganiania wody na odległość 32 km są niższe aniżeli w przypadku odprowadzania ich do kanalizacji miejskiej. Również osady ze zmiękczenia wody opłacało się odwozić do około 50%, a następnie transportować do cementowni. W ocenie możliwości wykorzystania osadów z uzdatniania wody do produkcji cementu należy rozpatrzyć następujące kryteria:

- stężenia niepożądanych metali ciężkich w osadach nie mogą być większe aniżeli w surowcach naturalnych stosowanych do produkcji cementu.
- niezbędne jest właściwe odwodnienie, tak aby osad osiągnął konsystencję pasty, co ułatwia w znacznym stopniu jego transport na taśmociągach;
- osad winien być jednorodny, nie może zawierać większych cząstek i zbryleń;
- osad winien zawierać jak najmniej nierozpuszczalnych substancji organicznych.

Osady z wyżej wymienionych stacji uzdatniania wody spełniały powyższe wymagania. Długi okres wypalania w piecach oraz wysoka temperatura (1450°C) pozwalają w bezpieczny sposób wykorzystać osady z uzdatniania wody do produkcji cementu. Substancje toksyczne w tej temperaturze ulegają rozkładowi, a metale ciężkie wiążą się trwale z klinkierem.

Z uwagi na powyższe cechy wydaje się, że wykorzystanie tego typu osadów w cementowniach ze względu na zminimalizowany ich wpływ na środowisko jest godny polecenia. W Holandii np. rocznie $20\,000 \text{ t}$ osadów ze zmiękczenia wody wykorzystuje się w cementowniach (Wichmann 1988).

3.4. Wykorzystanie glinowego osadu pokoagulacyjnego w budownictwie

Południowa Karolina jest największym producentem cegieł w Stanach Zjednoczonych. W latach 1973-1974 do produkcji cegieł wykorzystano tam 2,5 tys. ton gliny. W ilości tej 1% stanowiły osady z koagulacji domieszek wody siarczanem glinowym.

W 1974 roku w Durham (Rolan 1976) uwodniony osad pokoagulacyjny z koagulacji gliną o zawartości fazy stałej równej 8% wykorzystywano do produkcji cegieł zamiast wody w ilości $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Wyprodukowane cegły niczym nie różniły się od otrzymanych z surowców tradycyjnych. Przeprowadzone testy doświadczalne w skali technicznej produkcji cegieł z zastosowaniem od 1 do 15% uwodnionego osadu glinowego dały bardzo pozytywne rezultaty. W wyprodukowanych ceglach wraz ze zwiększeniem dodawanego osadu obserwowano jedynie intensyfikację koloru czerwonego. Nie stwierdzono natomiast żadnych zmian w strukturze i wytrzymałości mechanicznej cegieł.

Konieczność praktycznego wykorzystania glinowych osadów pokoagulacyjnych w budownictwie wynika z braku innych rozwiązań. Przykładem mogą być zakłady uzdatniania wody w Santa Clara Valley (Kalifornia) (Migneault 1988). W mieście tym dwie stacje uzdatniania wody w Penitencia i Rinconada w 1970 r. produkowały łącznie w ciągu roku 76 000 m³ osadu pokoagulacyjnego. Osady te były usuwane za pomocą 3800 wozów asenizacyjnych z przyczepą, co pociągało za sobą koszty 500 000 \$. W 1986 roku kontrakt wyżej wymienionych wodociągów z wysypiskiem nie został przedłużony, w związku z czym zastosowano odwadnianie mechaniczne osadu na prasie taśmowej. Zagęszczony osad mógł być w tej postaci wykorzystany do produkcji płytek podłogowych, dachówek, rur ceramicznych oraz cegieł. Skład wykorzystanego osadu w fazie stałej był następujący:

- 55% Al₂O₃,
- 11% Fe₂O₃,
- 2% SiO₂.

Zastosowanie osadu pokoagulacyjnego umożliwiło obniżenie kosztów produkcji wyżej wymienionych produktów budowlanych.

W budownictwie mogą być również zastosowane osady pokoagulacyjne z dużą zawartością metali ciężkich lub innych mineralnych substancji toksycznych. Cegły wyprodukowane z surowców zawierających niebezpieczne osady były prażone w temperaturze 1090°C przez 48h. W efekcie tego procesu substancje organiczne zostały wypalone, a metale ciężkie wtopione w cegły; które ulegają rozpuszczeniu jedynie w kwasie fluorowodorowym. Cegły te zastosowano do budowy oczyszczalni ścieków w Maryland (Engineering News Record 1989). Planuje się także ich wykorzystanie do umacniania poboczy dróg i skarp (Huang et al., 2001, Goldbold et al., 2003).

3.5. Wykorzystanie żelazowych osadów pokoagulacyjnych w hutnictwie

W Holandii osady po koagulacji solami żelaza w przeszłości były odprowadzane na składowiska, zajmując dużą przestrzeń, a zawarte w nich toksyczne substancje stanowiły potencjalne zagrożenie dla środowiska. Pewnym rozwiązaniem jest ich wykorzystanie w przemyśle hutniczym. W 1987 roku stalownia Hoogovenst w Holandii (Van der Veer 1987) zastosowała osad po koagulacji solami żelaza w produkcji stali. Wymagana przez stalownię koncentracja zawieszin wynosiła 70-80% wagowo, a zawartość żelaza w osadzie 50% wagowo. Duża zawartość arsenu (przeciętnie 167 mg/kg s.m.) charakterystyczna dla większości pokoagulacyjnych osadów żelazowych pozwoliła na zastosowanie go do wytopu stali wysokiej jakości. Obecnie w Holandii 3 stalownie stosują żelazowe osady pokoagulacyjne w domieszce z rudą żelaza.

3.6. Zastosowanie osadu po koagulacji siarczanem glinu w kompostowaniu

Badania prowadzone w 1988 roku w skali pilotowej w kompostowni w mieście Greenwich (Connecticut - USA), przetwarzającej do tej pory wyłącznie osady ściekowe z odpadami, wykazały, że dodatek glinowego osadu pokoagulacyjnego nie spowodował pogorszenia jakości kompostu. Osad pokoagulacyjny był dozowany do mieszaniny

osadu ściekowego i odpadów w stosunku 1:16. Analiza chemiczna wykonana w 6 tygodni po kompostowaniu wykazała, że stężenia metali ciężkich były nieco mniejsze aniżeli w normalnym kompoście. Autorzy zalecają prowadzenie procesu kompostowania w optymalnym stosunku objętościowym 4:1. Otrzymany kompost był stosowany jako nawóz do zieleni na poboczach autostrad.

Na podstawie otrzymanych wyników zaleca się kompostowanie **odpadów organicznych** i osadów ściekowych z osadem glinowym w stosunku objętościowym 4:1

$$\frac{\text{osad glinowy}}{\text{odpad organiczny} + \text{osad ściekowy}} = \frac{1}{4}$$

3.7. Rolnicze wykorzystanie osadów ze zmiękczenia wody

Rolnicze wykorzystanie dotyczy głównie osadów pochodzących z procesów zmiękczenia wody przez strącanie wapnem. Osady te łatwiej ulegają odwodnieniu niż osady pokoagulacyjne glinowe czy żelazowe.

Zawartość wapnia i wysoki odczyn pH powoduje, że osad ten po odwodnieniu może być stosowany na glebach kwaśnych lub glebach, w których na skutek stosowania nawozów azotowych znacznie obniżył się odczyn pH. Z tego względu zaleca się mieszanie nawozów azotowych z osadami wapniowymi w stosunku wagowym 45,5 kg do 1,4-1,8 kg. Według Amerykańskiego Departamentu Zdrowia w stanie Ohio (Ohio Department of Health 1969) osad powstający w procesach zmiękczenia wody wapnem ma większe zdolności neutralizujące glebę niż istniejące w handlu nawozy wapniowe. Aby podnieść pH gleby do pożądanego poziomu; trzeba zużyć 0,67 kg/m² wapna lub 2,2 kg/m² osadu wapniowego o 30-procentowym stężeniu zawiesin. Osad wapniowy jest łatwo przyswajalny przez glebę; a jego stosowanie zwiększa dodatkowo jej porowatość. Mimo tych właściwości rolnicy amerykańscy z uwagi na uwodnienie osadu i związane z tym problemy, np. transportu, stosują go niechętnie. Dlatego w praktyce amerykańskiej wykorzystanie w rolnictwie osadu ze zmiękczenia wody poprzedza jego odwodnienie i wysuszenie na poletkach, a w dalszej kolejności jego rozdrobnienie i przesianie przez sito 0,063 mm. **Osad** ten w postaci uwodnionej zawiesiny o stężeniu 20-40% jest rozprowadzany na pola jako nawóz. Zabiegi takie prowadzi się wczesną wiosną.

3.8. Produkcja granulatu z osadu po zmięczeniu wody wapnem

Z uwagi na duże możliwości praktycznego wykorzystania osadów z dekarbonizacji wody wapnem od 1989 roku w Holandii zaczęto produkcję granulatu na skalę przemysłową, w roku 1999 wyniosła ona 20 000 t. Granulat ten jest stosowany:

- jako dodatek do materiałów budowlanych,
- jako dodatek do karmy kurczaków,
- do neutralizacji kąpieli trawiennych w galwanotechnice,
- do odsiarczania instalacji w elektrowniach;
- do odkwaszania wód gruntowych,
- do zaprawy murarskiej (czyni ją bardziej elastyczną),

- w budownictwie autostrad; granulaty po zmieszaniu z bitumiczną masą asfaltową jest nieaktywny, dobrze wypełnia jednak przestrzeń między większymi bryłami masy bitumicznej.

Granulaty mogłyby być również stosowane (Baker et al., 2005):

- do rekalcynacji węgla wapnia,
- w produkcji stali,
- w produkcji nawozów,
- w stabilizowaniu osadów ściekowych,
- w defosfatacji ścieków.

3.9. Zastosowanie osadów z koagulacji glinem w kontroli eutrofizacji zbiorników wodnych

Zdolność glinu do wiązania fosforu zasugerowała możliwość zastosowania osadów pokoagulacyjnych do zmniejszenia zawartości fosforu w zbiornikach wodnych i jeziorach. Mniejsze stężenie związków fosforu w wodach tych zbiorników pozwala zmniejszyć zakwity glonów, co przyczynia się do poprawy jakości wód powierzchniowych. W Centralnym Uniwersytecie na Florydzie (Harper i Yousef 1988) przeprowadzono badania na dwóch małych jeziorach eutroficznych, dozując w jednym z nich glinowy osad pokoagulacyjny o uwodnieniu 89%, a w drugim osad wapniowy ze zmiękczenia wody o stężeniu zawieszin 2,9%. W odróżnieniu od osadu glinowego osad wapniowy nie był efektywny w zmniejszaniu stężenia fosforu uwalnianego z osadów dennych. Zastosowany w jednym z jezior osad po koagulacji glinem - w dawce 200 mg/L - spowodował znaczne zmniejszenie chlorofilu a (o 81% po 72 h), a także fosforanów rozpuszczonych, fosforu ogólnego, całkowitego węgla organicznego i mętności. Osad spowodował również ponad 90-procentowe zmniejszenie zawartości w tych wodach Cd, Zn, Cu, Fe, Pb i Ni. Zastosowanie większej dawki (1000 mg/L) spowodowało pogorszenie jakości wody. Mimo dużej zdolności osadu z koagulacji glinem do hamowania procesu eutrofizacji jezior winien on być dawkowany ostrożnie, tak aby nie przekroczyć dopuszczalnych stężeń Al w wodach powierzchniowych. Ponadto glin wbudowany w osady dennego jeziora może mieć toksyczny wpływ na organizmy wodne, co winno być przedmiotem dalszych badań.

3.10. Rekultywacja hałd pokopalnianych

Osady po zmięczeniu wody są stosowane do rekultywacji hałd pokopalnianych. Ich zastosowanie wiąże się z neutralizacją kwaśnych związków wypłukiwanych z tych hałd. Rezultaty wieloletnich badań obejmujących wpływ dodawanego osadu na jakość wypłukiwanej z hałd wody oraz vegetację roślin porastających hałdy wykazały, że osad po zmięczeniu wody może być stosowany jako nawóz w ilości 2,2 kg s.m./1 m² w roku (Goldbold et al., 2003).

4. Wnioski końcowe

Zagadnienia usuwania i unieszkodliwiania osadów i popłuczyn są integralnie związane z technologią uzdatniania wody. W praktyce oznacza to uwzględnienie już w fazie projektowania lub modernizacji zakładu uzdatniania wody kosztów usuwania i unieszkodliwiania powstających w nim osadów i popłuczyn, co może prowadzić np. do wyboru alternatywnego źródła wody lub/i wyboru technologii uzdatniania, w której objętość powstających osadów i popłuczyn jest mniejsza.

Przez pojęcie współczesnej **gospodarki osadowej** w zakładach uzdatniania wody rozumiemy całokształt działań (metody, procesy, środki) obejmujących takie przygotowanie lub przeróbkę osadów, które umożliwiają w konsekwencji ich:

- **wprowadzenie do środowiska naturalnego lub rekultywowanego** w sposób bezpieczny, tzn. zgodny z istniejącymi przepisami,
- **wykorzystanie w gospodarce i w przemyśle**, np. w budownictwie, w sposób uzasadniony i określony kryteriami ekonomicznymi i technologicznymi,
- **wykorzystanie w technologii wody i ścieków**, głównie przez wykorzystanie odzyskanych z osadów reagentów, np. siarczanu glinowego, lub przez nawracanie do obiegu uzdatniania odzyskanej wody. np. przed zbiorniki szybkiego mieszania,
- **składowanie** w lagunach, na składowiskach osadów lub na składowiskach odpadów,
- **wspólne unieszkodliwianie z osadami ściekowymi**, np. zrzut do kanalizacji, lub z odpadami - kompostowanie w stosunkach ilościowych określonych technologią unieszkodliwiania.

Bibliografia

- [1] AWWA. Disposal of wastes from water treatment plants, AWWA Research Foundation Report, part I 10, part II 11, 1969
- [2] AWWA. Sludge, Cooperative Research Report, Denver, Colorado, 1990
- [3] AWWA. Water treatment plant design, McGraw-Hill, New York, 1990
- [4] AWWA. Mixing in coagulation and flocculation, Denver, Colorado, 1991
- [5] Baaltussen J. Combating hydrogen sulphide gas in biogas by the direct addition of iron chloride or iron containing waterworks sludge. A model approach based on practical data, GTD Oost-Brabant Internal Report, 86-ZTA-16. Boxtel, The Netherlands, 1985
- [6] Babatunde, A.O. ,Zhao, Y.Q. Constructive approaches towards water treatment works sludge management : an international review of beneficial re-uses, US-EPA, 2007
- [7] Baker R., van Leeuwen H., White D. Applications for Reuse of Lime Sludge from Water Softening, Iowa State University, 2005
- [8] DVGW. Deutscher Verein des Gas - und Wasserfaches, Arbeitsblatt W 221, 1986
- [9] Engineering News Record. Lime sludge put to good use. ENR 220, 4, s. 19, 1988
- [10] Goldbold P., Lewin K., Graham A., Barker P. The potential reuse of water utility products as secondary commercial materials, 2003

- [11] Harper M., Yousef Y. Reuse of water treatment sludges for improvement of reservoir water quality, w: Proc. AWWA Ann. Conf, Las Vegas, Nev., 1983
- [12] Hegazy Badr El-Din E., Fouad H.A., Hassanain, A.M. Incorporation of water sludge, silica fume, and rice husk ash in brick making, *Advances in Environmental Research*, Vol. 1, 1, 2012
- [13] Huang C., Pan J.R., Sun K.D., Liaw C.T. Reuse of water treatment plant sludge and dam sediment in brick making. *Wat. Sci. & Tech.*, 2001
- [14] Koppers H.M.M. Treatment of backwash water: Sludge problems of waterworks, KIWA Report 98, Nieuwegein, The Netherlands, 1987
- [15] Krasauskas J. W. Review of sludge disposal practices, AWWA Research Comm. on sludge disposal, *Journal AWWA*, 5, 1969
- [16] Kreft W. Entsorgung im Zementwerk. Verwertung von Rest- und Abfallstoffen, durch die Zementindustrie, *Entsorgungs Praxis*, 9, s. 360, 1988
- [17] Migneault W.H. Potential for brickmaking. Freshwater utility recycles its sludge, *Biocycle*, 4, s. 63, 1988
- [18] Ohio Department of Health. Supplement to report on waste sludge and filter wash-water disposal from water softening plants, 1969
- [19] Oorthuizen W.A. Iron (III) Chloride dosage reduces H₂S emission. *H₂O* 14, 13, s.281, 1981
- [20] Oostelbos P.G. An approach to the sludge problem at the Noordbergum, Oidenholtspade, Spannenburg, and Terwisscha water treatment plants, Water Company, Friesland, The Netherlands, 1988
- [21] Rolan A.T. Evaluation of water plant sludge disposal methods, w: Proc. Ann. Meeting. Jour. North Carolina Section, 12, 1, s. 56, 1976
- [22] Sarfert F. Entsorgung Wasserwerksschaemmen. DVGW - Schriftenreihe Wasser, 206, s. 21, 1987
- [23] Sharma A.K., Thornberg D., Andersen H.R. Application of waterworks sludge in wastewater treatment plants, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2013
- [24] Sozański M.M., Florkiewicz A., Krajewski P., Leszczyńska M. Technologie unieszkodliwiania i usuwania osadów z uzdatniania wody, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1999
- [25] Such W. Yerwertung und Ablagerung DVGW - Schriftenreihe Wasser, 50, s. 95, 1986
- [26] Van der Veer A.J. Appropriate sludge disposal, w: KIWA Report 98 „Sludge problems at waterworks" KIWA, Nieuwegein, The Netherlands, s. 112, 1987
- [27] Van Nievenhuyze R.F., van de Baan E. Mobile treatment facilities, KIWA/AWWARF Experts meeting, 1989
- [28] Wichmann K. Entsorgung von Wasserwerksschlaemmen, *Neue DELIWA Zeitschrift*, 4, s. 112, 1988
- [29] Xiao-Hong G., Guang-Hao C. Re-use of water treatment works sludge to enhance particulate pollutant removal from sewage, *Water Research*, 2013