

Katarzyna Środa<sup>1</sup>, Agnieszka Kijo-Kleczkowska<sup>1</sup>,  
Henryk Otwinowski<sup>1</sup>

## TERMICZNE UNIESZKODLIWIANIE OSADÓW ŚCIEKOWYCH

**Streszczenie.** Ciągły wzrost wytwarzanych osadów w oczyszczalniach ścieków wymaga ich sukcesywnej utylizacji. Według ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. [37] przez unieszkodliwianie tych odpadów rozumie się poddawanie ich procesom przekształceń biologicznych, chemicznych czy fizycznych, w celu doprowadzenia do stanu nie zagrażającego zdrowiu oraz życiu ludzi, a także środowisku. W pracy przedstawiono sposoby termicznego unieszkodliwiania osadów ściekowych, a szczególnie spalania oraz współspalania z paliwami węglowymi. Podjęto również zagadnienie suszenia osadów ściekowych, jako wstępnego etapu ich przygotowania do dalszego wykorzystania.

**Słowa kluczowe:** właściwości, przygotowanie, unieszkodliwianie osadów ściekowych.

### WPROWADZENIE

Osady powstające w oczyszczalniach ścieków stanowią odpad, którego zgodnie z ustawą z dnia 27 kwietnia 2001 r. [37] należy się pozbyć, nie tylko ze względów prawnych, ale również estetycznych oraz praktycznych. Ze względu na zawartość związków organicznych i biogennych odpady te są bogatym źródłem substancji niezbędnych do wzrostu roślin, co wskazywać może na możliwości wykorzystania przyrodniczego. Natomiast biorąc pod uwagę występowanie w osadach metali ciężkich oraz substancji toksycznych, które ograniczają użycie wspomnianego wyżej rozwiązania, najodpowiedniejszym sposobem jest wykorzystanie metod termicznych.

Z uwagi na właściwości energetyczne osady ściekowe są atrakcyjnym paliwem, zbliżonym do węgla brunatnego. Należy najpierw poddać je procesowi suszenia. Suszenie ma głównie na celu zmniejszenie objętości odpadów, przez całkowite lub częściowe usunięcie wody, poprawienie wartości opałowej, stabilizację oraz higienizację. Paliwo z osadów wykorzystuje się w energetyce oraz przemyśle cementowym w procesach spalania i współspalania. Uzyskiwane korzyści to możliwość całkowitej utylizacji wspomnianych odpadów nie nadających się do wykorzystania przyrodniczego. W postępowaniu tym istotne są ocena właściwości osadów ściekowych oraz wybór technologii ich unieszkodliwiania.

---

<sup>1</sup> Instytut Maszyn Ciepłych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska, ul. Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa, e-mail: katarzynasroda@o2.pl; kijo@kkt.pcz.czyst.pl; otwinowski@imc.pcz.czyst.pl

## WŁAŚCIWOŚCI OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Na właściwości osadów ściekowych ma wpływ sposób ich oczyszczania. W tabeli 1 podano skład osadów ściekowych oraz podstawowe ich właściwości.

**Tabela 1.** Przykładowy skład oraz podstawowe właściwości osadów ściekowych [12, 13]

| Właściwości osadu        | Jednostka   | Rodzaj osadu                                      |  |   |                                     |  |                                     |
|--------------------------|---|---|--|---|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
|                          |   | Osad wstępny z mechanicznego oczyszczania ścieków | Osad wtórny (po złożach biologicznych lub komorach osadu czynn.) | Osad źle preferen- towany                 | Osad słabo przefer-mento- wany      | Osad dobrze preferen- towany               | Osad bardzo dobrze preferen- towany |
| pH                       | –   | 5,0 – 7,0   | 6,0 – 7,0  | 6,5 – 7,0                                 | 6,8 – 7,3                           | 7,2 – 7,5                                  | 7,4 – 7,8                           |
| Sucha masa osadu         | %   | 4 – 8 (złoża)<br>0,5 – 3,0<br>(os.cz.)            | 4 – 12   | 4 – 12                                    | 4 – 12                              | 4 – 12                                     | 4 – 12                              |
| Strata przy prażeniu     | % <sub>s.m.o.</sub> *   | 60 – 75   | 55 – 80  | 55 – 80                                   | 55 – 80                             | 45 – 55                                    | 30 – 45                             |
| Zasadowość               | mgCaCO <sub>3</sub> /dm <sup>3</sup> lub mmol/dm <sup>3</sup> | 500 – 1000  | 55 – 1000<br>(czasem <500)<br>20 – 40                            | 100 – 2500                                | 2000–3500                           | 3000 – 4500                                | 4000 – 5500                         |
| Zawartość kwasów lotnych | mg CH <sub>3</sub> COOH/l lub mmol/dm <sup>3</sup>            | 1800 – 3600                                       | 1800 – 3600  | 2500 – 4000<br>i więcej<br>40 – 70        | 1000–2500                           | 100 – 1000                                 | < 100                               |
| Azot ogólny              | % N w <sub>s.m.o.</sub> *                                     | 2 – 7   | 1,5 – 50<br>(złoża)<br>3 – 10 (os.cz.)                           | 1 – 5                                     | 1 – 3,5                             | 0,5 – 3,0                                  | 0,5 – 2,5                           |
| Fosfor ogólny            | % P w <sub>s.m.o.</sub> *                                     | 0,4 – 3   | 0,9 – 1,5  | 0,8 – 2,6                                 | 0,8 – 2,6                           | 0,8 – 2,6                                  | 0,8 – 2,6                           |
| Potas                    | % K w <sub>s.m.o.</sub> *                                     | 0,1 – 0,7   | 0,1 – 0,8  | 0,1 – 0,3                                 | 0,1 – 0,3                           | 0,1 – 0,3                                  | 0,1 – 0,3                           |
| Opór właściwy filtracji  | m/kg  | 10 <sup>11</sup> – 10 <sup>13</sup>               | 10 <sup>12</sup> – 10 <sup>13</sup>                              | 5·10 <sup>11</sup><br>–5·10 <sup>13</sup> | 10 <sup>11</sup> – 10 <sup>12</sup> | 5·10 <sup>10</sup> –<br>5·10 <sup>11</sup> | 10 <sup>10</sup> – 10 <sup>11</sup> |
| Wartość opałowa          | kJ/g <sub>s.m.o.</sub> *                                      | 16 – 20   | 15 – 21  | 15 – 18                                   | 12,5 – 16                           | 10,5 – 15                                  | 8 – 10                              |

\*<sub>s.m.o.</sub> – sucha masa osadu.

Wyróżnia się następujące właściwości osadów ściekowych: fizyczne, chemiczne, sanitarne, technologiczne, reologiczne [25]. Poniżej podano główne ich cechy.

### Właściwości fizyczne osadów ściekowych:

- barwa i zapach – wskazują na pochodzenie osadów ściekowych. W zależności od miejsca powstawania w ciągu technologicznym oczyszczania ścieków wyróżnia się odpowiednie rodzaje osadów, charakteryzujące się odmienną barwą i zapachem [26];
- struktura – wpływa na zdolność osadu do zatrzymywania wody [25]. Wyróżnia się strukturę komórkową, kłaczkową oraz mieszaną. Poszczególne struktury różnią się porowatością [14];

- uwodnienie – zależy od typu zastosowanego do oczyszczania ścieków urządzenia. Uwodnienie osadów pochodzenia organicznego wynosi średnio od 85 do 99%, natomiast mineralnego: od 50 do 70% [2]. Woda zawarta w osadzie występuje jako wolna, związana w koloidach i kapilarna, związana biologicznie [21, 25]. Poszczególne rodzaje związanej z cząsteczką osadu wody cechują odmienne trudności jej usuwania;
- zawartość ciał stałych – udział suchej masy osadu stanowiących związki organiczne i nieorganiczne [13]. Wyraża masę odparowanej oraz wysuszonej w temperaturze 105°C próbki osadu w danej jednostce objętości [g/l, kg/m<sup>3</sup>] [25]. Osady trudniej się odwadniają, gdy zawierają znaczne ilości związków organicznych [13];
- gęstość cząstek osadu – zależna od sposobu prowadzenia procesu oczyszczania ścieków. Przykładowo, dla osadów miejskich przyjmuje wartości w przedziale 1,4 – 2,1 kg/dm<sup>3</sup> [34];
- wielkość i kształt cząstek – istotne w procesach aglomeracji, zagęszczania, sedymentacji oraz odwadniania. Dla frakcji mniejszej od 100 μm wyróżnia się cząstki opadające, kruche, parakoloidalne, koloidalne i rozpuszczone [21];
- potencjał dzeta (ζ) – określa wielkość sił odpychania sąsiednich koloidów podwójnej warstwy jonowej [25]. Pomiar tej właściwości wykorzystuje się przed odwodnieniem osadu, do wyznaczenia dawek chemikaliów używanych w celu jego kondycjonowania. Osady ściekowe posiadają zwykle ładunek ujemny mieszczący się w przedziale od -10 do -20 mV. W przypadku, gdy potencjał dzeta przyjmuje wartości za wysokie, osad źle się odwadnia i flokuje [21];
- objętość osadów – liczona na podstawie wzoru [13]:

$$V_{os} = \frac{100 \cdot G_{os}}{\rho_{os} \cdot (100 - W)} \cdot \frac{m^3}{doba} \quad (1)$$

gdzie:

$G_{os}$  – sucha masa substancji stałych zawartych w osadzie, kg<sub>s.m.o.</sub>/doba,

$\rho_{os}$  – gęstość osadu, kg<sub>s.m.o.</sub>/m<sup>3</sup>,

$W$  – uwodnienie osadu, % (wagowo).

### Właściwości sanitarne osadów ściekowych

W osadach ściekowych występuje znaczna ilość wirusów, bakterii, pierwotniaków, a także jaj helmintów, jak również organizmów chorobotwórczych [28]. Pochodzenie tych patogennych organizmów jest zróżnicowane, począwszy od osób chorych, czy nosicieli po składowiska odpadów, np. z rzeźni, rolnictwa, handlu oraz przemysłu. Ze względu na długi okres przeżycia tych patogennych mikroorganizmów, istotne jest odpowiednie użytkowanie osadów ściekowych [25]. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 [30] określa wskaźniki sanitarne wykorzystywane w metodzie pośredniej do oceny obecności bakterii chorobotwórczych w osadzie ściekowym.

**Właściwości chemiczne osadów ściekowych:**

- wartość pH – występuje zwykle w zakresie od 5 do 8 [34]. Zakresy wartości pH odczynu, możliwe do przyjmowania przez osady ściekowe podano w tabeli 1. Oznacza się na podstawie cieczy zdekantowanej z nad osadu, wykorzystując metody wykluczające stratę  $\text{CO}_2$  [25];
- zawartość związków organicznych – określana przeważnie za pomocą suchej masy organicznej [%<sub>s.m.o.</sub>] przy użyciu metod fizycznych lub chemicznych. Wartość tą uzyskuje się na podstawie różnicy wagi osadu, wysuszonego w temperaturze 105°C oraz wagi osadu po spalaniu w temperaturze 550°C [25];
- zasadowość [mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ ] – przedstawia zawartość związków alkalicznych, rozpuszczonych w cieczy osadowej (tab. 1) [13]. Osad wstępny oraz wtórny mogą mieć zasadowości rzędu 500 – 1500  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ , natomiast osady przefermentowane:  $(2 - 6) \cdot 10^3 \text{CaCO}_3/\text{l}$ . Osady o dużej zasadowości wymagają w czasie odwadniania większych dawek chemicznych reagentów [13, 34];
- zawartość metali ciężkich – uzależniona od udziału ścieków przemysłowych w całej ilości ścieków komunalnych, poddawanych oczyszczeniu. Znaczna wartość stężenia metali ciężkich w osadzie to istotny czynnik, ograniczający jego przyrodnicze oraz rolnicze wykorzystanie. Do najbardziej niepożądanych toksycznych dla organizmów żywych metali ciężkich występujących w osadach ściekowych zalicza się kadm, ołów, chrom, nikiel i rtęć. Wykazują one (poza niklem) znaczną podatność na biokumulację [7, 25]. Niezwykle ważna jest zawartość metali ciężkich w osadach, w przypadku ich składowania na kwaśnym podłożu składowiska, ze względu na niebezpieczeństwo wymywania związków metali. Duże znaczenie odgrywają także metale ciężkie podczas spalania osadów, gdyż pozostają w popiołach i substancjach po oczyszczaniu spalin, gdzie na skutek zmniejszenia masy odpadu stężenie ich wzrasta cztero- do pięciokrotnie [25];
- zawartość lotnych kwasów tłuszczowych – LKT (mg  $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$ ) [13] – określa w osadzie kwasy, które można destylować pod ciśnieniem atmosferycznym, począwszy od kwasu mrówkowego po kwas heksanowy [14]. Zawartość LKT to wskaźnik kontrolny osadu w procesie fermentacji metanowej [13], którego przykładowe zawartości w różnego rodzaju osadach podano w tabeli 1;
- zawartość związków biogenych – istotna przy wykorzystaniu osadów pod kątem rolnictwa. Ponieważ osady ściekowe posiadają związki humusowe, pierwiastki śladowe, oraz inne substancje niezbędne do wzrostu roślin można je traktować jako wartościowy nawóz [13]. Średnie ilości wspomnianych związków podano w tabeli 1;
- substancje toksyczne – w osadzie ściekowym mogą pojawić się następujące substancje toksyczne: wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), polichlorowane bifenyle (PCB), chlorowcopochodne związków organicznych, wyrażone sumarycznym wskaźnikiem adsorbowalnych organicznych związków chloru (AOX), polichlorowanedibenzodioksyny (PCDD) – dioksyny, polichlo-

rowanedibenzofurany (PCDF) – furany, alkilobenzenosulfonian liniowy (LAS), nonylofenol, chloroform, pestycydy, nonylofenolopolietoksylany (NPnEO), nonylofenoljedno- oraz dwuetoksylany (NP1EO, NP2EO) [7, 22, 25, 28];

- wymywalność – polega na rozpuszczeniu w wodzie albo na bezpośredniej migracji do niej niektórych składników fazy stałej osadu. Skutkiem jest wzrost stężenia rozpuszczonych związków, a w konsekwencji łatwość ich wnikania w głąb podłoża [25]. Wymywalność oznacza się przez długotrwały kontakt osadu z wodą destylowaną, po czym wyznacza się udział zanieczyszczenia w wodzie oddzielonej od osadu. Pomiarów dokonuje się dla postaci osadu, w jakiej jest usuwany na składowisko [14].

### **Właściwości technologiczne osadów ściekowych:**

- charakterystyka sedymentacyjna – wyróżnia się krzywą sedymentacji, optymalny czas zagęszczania, indeks objętościowy [25];
- podatność na mineralizację – osady ściekowe ulegają mineralizacji biochemicznej do momentu, gdy posiadają jeszcze żywe mikroorganizmy, a także źródło węgla organicznego, będącego dla nich substratem energetycznym. Natomiast, gdy brakuje w cieczy osadowej łatwo przyswajalnych związków węgla, wówczas ich źródłem staje się obumarła biomasa, po wstępnej hydrolizie [25]. Do najczęściej używanych wskaźników mineralizacji osadów ściekowych zalicza się: moduł fermentacji  $M_f$ , moduł Rawna i Banta, ubytek substancji organicznej, iloraz stabilizacji osadu oraz szybkość respiracji [25];
- właściwości filtracyjne – decydują o skuteczności odwadniania osadu. Filtracja polega na rozdziale faz osadu (stałej oraz ciekłej) przy użyciu różnicy ciśnień po dwóch stronach przegrody filtracyjnej. W procesie filtracji próżniowej różnice ciśnień mają wartość 0,1 MPa, natomiast w filtracji ciśnieniowej osiągają nawet 2,5 MPa [24]. Wśród podstawowych mierników oceny możliwości odwadniania osadów wyróżnia się: opór właściwy filtracji, współczynnik ściśliwości oraz czas ssania kapilarnego (CSK). Uzyskuje się je doświadczalnie w warunkach laboratoryjnych [25];
- właściwości energetyczne – określane są głównie przez ciepło spalania i wartość opałową. Ciepło spalania  $W_g$  to parametr określający ilość energii możliwej do uzyskania ze spalania 1 kg<sub>s.m.o.</sub>. Oznaczenie wykonuje się w bombie kalorymetrycznej. Ciepło spalania zależy od ilości i jakości związków organicznych wchodzących w skład analizowanego osadu [2]. Ciepło spalania surowych osadów ściekowych wynosi  $(23-29) \cdot 10^3$  kJ/kg, a osadów ustabilizowanych tylko  $(9-14) \cdot 10^3$  kJ/kg, gdyż zawierają one mniej substancji organicznych [28]. Osady ustabilizowane poddane są procesom przeróbki mającej na celu zmniejszenie podatności na gnicie i obniżenie ilości substancji organicznych [18]; Wartość opałowa  $W_d$  to parametr określający ilość energii jaką można uzyskać w czasie całkowitego spalania 1 kg uwodnionego osadu. Wyznacza się z bilansu cieplne-

go, przez określenie różnicy między ciepłem spalania a ciepłem koniecznym do ogrzania oraz odparowania wody będącej w osadzie [2]. Osady surowe charakteryzują się wartością opałową w zakresie od 15 – 21 MJ/kg [28], natomiast osady ustabilizowane 6,3 – 18 MJ/kg.

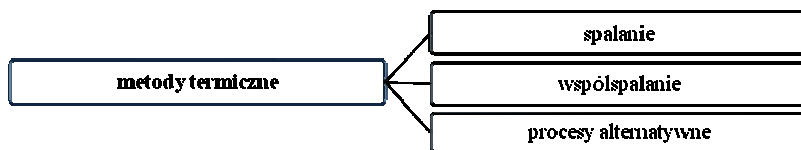
- wartość nawozowa osadów ściekowych – zależy od udziału substancji organicznej oraz priorytetowych składników pokarmowych dla roślin (azotu, potasu, fosforu, wapnia, magnezu), a także mikroelementów [2].

### Właściwości reologiczne osadów ściekowych

Do właściwości reologicznych osadu zalicza się lepkość oraz granicę płynięcia, zależne od uwodnienia i temperatury [2, 25].

## SPALANIE OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Termiczne metody utylizacji osadów ściekowych podano na rysunku 1. Zgodnie z ustawą z dnia 27 kwietnia 2001 r. [37] termiczne przekształcanie odpadów to przede wszystkim spalanie. Inne procesy przekształcania odpadów to piroliza, zgazowanie i procesy plazmowe, przy czym substancje powstające w wyniku tych procesów są następnie spalane.



Rys. 1. Termiczne metody utylizacji osadów ściekowych [2]

Wśród procesów alternatywnych wyróżniamy mokre utlenianie, pirolizę i zgazowanie (również ich kombinacje), a także wityfikację [2].

**Mokre utlenianie** cechuje się możliwością wykorzystania nieodwodnionego osadu ściekowego, jedynie zagęszczonego mechanicznie. Podczas tego procesu w reaktorze panują warunki wysokiej temperatury oraz ciśnienia, które umożliwiają oksydację przy użyciu tlenu organicznej masy zawartej w tych odpadach. Efektem jest uzyskanie osadu zmineralizowanego, odcieku biodegradowalnego oraz gazu poreakcyjnego [5, 6].

**Piroliza** odpadów prowadzona jest w środowisku beztlenowym przy temperaturze 350 – 500°C. W efekcie uzyskuje się trzy produkty: fazę stałą, gaz pirolityczny, fazę ciekłą – stanowiącą mieszaninę olejów, a także smół. Część produktów ciekłych oraz gazowych zwracana jest w celu pokrycia zapotrzebowania na ciepło procesu [9].

**Zgazowanie** polega na termochemicznej przemianie substancji organicznych stałych bądź ciekłych w gaz, o odpowiedniej wartości kalorycznej. Skład powstałego gazu przede wszystkim zależy od substancji, którą poddaje się procesowi i wyróżnić można

w nim takie związki chemiczne jak:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ , poza tym – śladowe ilości wyższych węglowodorów oraz gazy inertne, a także różne zanieczyszczenia. Proces ten cechuje się obecnością czynnika zgazowującego oraz tym, że zachodzi w warunkach niedomiaru tlenu [3].

**Witryfikacja** to termiczna przemiana substancji w postać szklaną, co sprzyja zmianie właściwości i postaci materiału poddanego modyfikacji. Polega na kontrolowanym dozowaniu energii do substancji, która w wysokiej temperaturze rozkłada się wytwarzając fazę gazową, po czym ulega spopieleniu oraz stopieniu. Produktem jest witryfikat cechujący się amorficzną strukturą, niewielką chemiczną reaktywnością, korzystnymi własnościami chemicznymi, dobrą odpornością mechaniczną oraz brakiem toksyczności, a także pylenia [4, 15].

Według [13] wyróżnia się następujące termiczne sposoby utylizacji osadów ściekowych:

- spalanie – utlenienie związków organicznych do  $\text{CO}_2$  oraz  $\text{H}_2\text{O}$ . Celem procesu jest zmniejszenie objętości produkowanych osadów. Wykorzystywany jest on tam, gdzie nie można ich rolniczo wykorzystać, z powodu wysokiej wartości stężeń metali ciężkich [9],
- współspalanie, a w nim:
  - współspalanie osadów ściekowych ze stałymi odpadami komunalnymi – rozwiązanie takie obniża koszty inwestycyjne, dotyczące ciepła potrzebnego do odparowania wody z osadów ściekowych i nadwyżek ciepła do tworzenia pary, a także wspomaga spalanie odpadów oraz osadów [13],
  - współspalanie osadów ściekowych z węglem, przy czym węgiel kamienny powinien być wysuszony średnio do 90 %<sub>s.m.o.</sub>, węgiel brunatny natomiast do wartości niższej. Spalając osady w kotłowniach węglowych uzyskuje się dobre warunki do likwidacji składników organicznych znajdujących się w tych odpadach, a także wykorzystania ich zasobów energetycznych [13],
  - współspalanie osadów ściekowych w piecach cementowych – bezpieczny sposób spalania różnych odpadów organicznych. Muszą być one wysuszone i posiadać wartość opałową nawet 16 MJ/kg. Ponadto, zawartość chloru nie powinna przekroczyć 5% masy osadów.

## SUSZENIE OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Uzyskanie osadu o wilgotności poniżej 40% wymaga suszenia. Ubytek wody związanej kapilarnie i wody wolnej w procesie suszenia otrzymuje się w wyniku parowania. By poddać osad suszeniu najpierw powinno się go odwodnić. Przeważnie wykorzystuje się prasy filtracyjne ramowe oraz komorowe pozwalające uzyskać uwodnienie na poziomie do 50% [8].

Najczęściej suszenie osadów przebiega w podwyższonej temperaturze w odpowiednich suszarkach. Zaletą suszenia termicznego jest otrzymanie osadu o znacznej za-

wartości suchej masy, nawet ponad 90%, a także krótki czas suszenia. Ponadto działanie wysokiej temperatury higienizuje osad. Gazy odlotowe jak również wodę odparowaną z tego odpadu można poddać filtracji, powodując tym samym zmniejszenie wpływu na środowisko procesu oczyszczania ścieków. Główną wadą suszenia termicznego jest energochłonność i wysokie koszty związane z budową linii technologicznej [8].

Według [27] suszenie osadu wykonywane jest w celu:

- eliminacji całkowitej bądź częściowej wody związanej; minimalizacja objętości osadu (z uwagi na problem transportu oraz składowania),
- poprawienia wartości opałowej osadu kierowanego do spalania,
- stabilizacji i higienizacji osadu poprzez wysuszenie do udziału suchej masy ponad 90%,
- ulepszenia struktury osadu przed jego rozsiewaniem (przy wykorzystaniu maszyn rolniczych).

Wyróżnia się trzy etapy suszenia osadów ściekowych (rys. 2) [11]:

- suszenie wstępne – temperatura osadów rośnie do stałej wartości (faza podgrzewania osadu),
- suszenie zasadnicze (stan ustalony) – powierzchnia cząstek pokryta jest wodą, która ulega odparowaniu (szybkość migracji oraz szybkość parowania są sobie równe, tak samo jest w przypadku temperatury cząstek i temperatury otaczającej ich wody – mniejszej z kolei od temperatury czynnika suszącego). Etap ten trwa najdłużej, gdyż jego czas uzależniony jest od różnicy wilgotności na powierzchni cząstki oraz wilgotności gazu suszącego, jak i ilości wody niezwiązanej będącej wewnątrz cząstki osadu.
- suszenie końcowe – woda z powierzchni cząstki w porównaniu do wody migrującej z jej wnętrza odparowuje szybciej; temperatura na granicy faz stale rośnie, natomiast szybkość suszenia maleje.

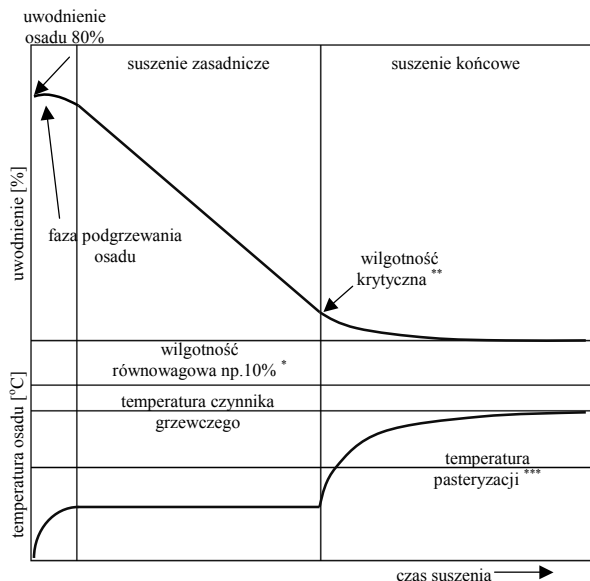
Wśród istotnych czynników wpływających na szybkość oraz efekt suszenia wyróżnia się:

- różnicę temperatur między powierzchnią cząstek osadu a ich środowiskiem,
- szybkość przesunięcia się cząstek w stosunku do medium grzewczego,
- różnicę wilgotności między powierzchnią mokrych cząstek a wilgotnością, która panuje w otaczającym je gazie,
- powierzchnię suszonego osadu [13].

Suszenie, tak jak inne procesy usuwania wody z odpadów, wykorzystuje zjawiska fizyczne (tutaj odparowanie) do oddzielenia fazy stałej od fazy ciekłej [11].

Cechą charakterystyczną osadów ściekowych jest występowanie w czasie suszenia fazy kleistej, która pojawia się przy stężeniu 40 – 50%<sub>s.m.o.</sub>. Z tego właśnie względu większość instalacji do suszenia wysokotemperaturowego powinna mieć wprowadzane odpady o stężeniu powyżej 50%<sub>s.m.o.</sub>. Odpowiednie stężenie s.m.o. otrzymujemy przez recyrkulację osadu wysuszonego i wymieszanego z odpadem odwodnionym [11].





\* wilgotność równowagowa – zawartość wilgoci, która jest w stanie równowagi z parą będącą w czynniku suszącym, powietrzu. W określonych warunkach procesu (przy danej wilgotności czynnika suszącego oraz temperaturze) można wysuszyć materiał wyłącznie do wilgotności równowagowej [13, 33]

\*\* wilgotność krytyczna – wilgotność graniczna między suszeniem zasadniczym a suszeniem końcowym

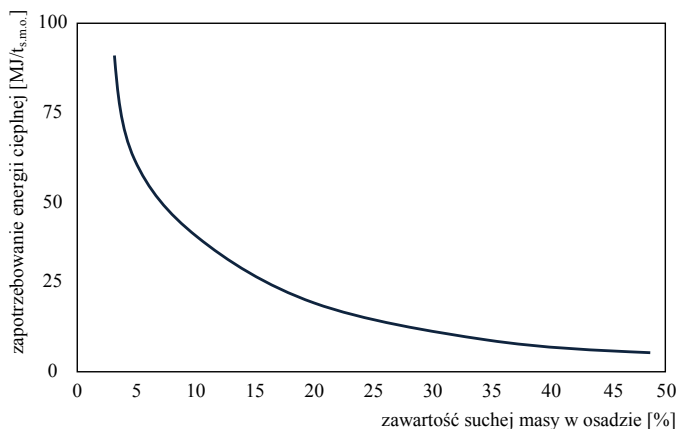
\*\*\* temperatura pasteryzacji (min. 80°C) [13] – utrzymująca się na określonym poziomie przez jakiś czas

Rys. 2. Przebieg procesu suszenia [2, 4]

Osad wysuszony przy pomocy nowoczesnych suszarni zawiera 90 – 95%<sub>s.m.o.</sub>, posiada formę granulek mających wielkość 1 – 4 mm, poza tym występuje w nim maksymalnie 1% pyłu. Chociaż wymagane jest, by osad przebywał w temperaturze co najmniej 80°C przez minimum 30 min w celach sterylizacyjnych, zwraca się jednak uwagę na to, by nie przekroczyła ona 85°C podczas całego procesu suszenia tego odpadu. Ponieważ w temperaturze ponad 85°C ma miejsce rozpoczęcie zwęglania substancji organicznej, spadek właściwości nawozowych, a także zwiększenie emisji odorów oraz wzrost ilości trudno podatnych na rozkład biologicznych związków organicznych [11].

Od strony technicznej prowadzenia procesu możemy wyróżnić suszenie całkowite oraz częściowe. Celem technologicznym pełnego suszenia jest uzyskanie koncentracji suchej masy rzędu 90 – 92%, natomiast częściowego rzędu 50 – 65%<sub>s.m.o.</sub> [11].

Do termicznego suszenia osadów wykorzystuje się biogaz, parę, gaz ziemny, olej opałowy, ciepło „odpadowe”, np. nadwyżka pary z zakładów przemysłowych, a także ciepło z turbin gazowych [17]. Energochłonność procesu zależy głównie od uwodnienia odpadów, dlatego ważne jest ich odpowiednie wstępne odwodnienie [27], co przedstawiono na rysunku 3.



**Rys. 3.** Zapotrzebowanie ciepła do suszenia w zależności od zawartości s.m.o. w osadzie odwodnionym [2, 4]

Osady najlepiej odwodnić do zawartości co najmniej 18 – 20%<sub>s.m.o.</sub> [13] z uwagi na koszty związane z wysokim zapotrzebowaniem na ciepło (rys. 3). Energochłonność suszenia wynika z wysokiego ciepła parowania wody, które dla temperatury 20°C przyjmuje wartość 2454 kJ/kg odparowanej wody. Sporadycznie tylko sprawność urządzeń suszarniczych przekracza 65%, dlatego na odparowanie wody podczas tego procesu potrzebujemy minimum 3775 kJ/kg ciepła [38].

W przypadku suszenia ważne jest, by cena energii koniecznej do wysuszenia osadów była mniejsza niż odzyskana podczas termicznego ich przekształcania [35]. Dlatego instalacje suszenia odpadów powinny charakteryzować się jak najmniejszym wskaźnikiem zużycia ciepła koniecznego do odparowania 1 kg wody. Wskaźnik ten, jak podają autorzy pracy [23] na podstawie danych proponowanych instalacji na polskim rynku, zawiera się w granicach 0,78 – 0,90 kWh/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>.

W tabeli 2 zestawiono cechy oraz parametry współczesnych konstrukcji instalacji suszenia osadów.

Autorzy pracy [11] podają, że teoretyczne zapotrzebowanie na energię konieczną do odparowaniu wody, przy normalnym ciśnieniu wynosi 627 kWh/t. W zależności od rodzaju urządzenia, zapotrzebowanie na energię by usunąć z osadu wodę związaną wymaga doprowadzenia dodatkowej energii, mogącej wynieść 25 – 75% energii podstawowej. Praktyka pokazuje jednak, że nie zawsze możliwe jest wykorzystanie optymalnych warunków opłacalności i należy wziąć pod uwagę średnie zapotrzebowanie na energię cieplną, które wynosi 700 – 1400 kWh/t odparowanej wody.

Sprawność suszenia osadów zależy od ich właściwości, typu suszarki, parametrów procesu oraz samego sposobu eksploatacji instalacji. Te właśnie czynniki wpływają na uzyskanie maksymalnej sprawności energetycznej w danych warunkach [38]. Jednak pierwszorzędne znaczenie w całkowitym zużyciu energii ma dominujący wpływ wilgotności początkowej suszonego odpadu, następnie

**Tabela 2.** Zestawienie podstawowych cech i parametrów dostępnych na rynku suszarek osadów ściekowych [23]

| Cecha lub parametr   | Opis   |
|--|--|
| Rodzaj konstrukcji   | szeroko zróżnicowany, od konstrukcji zapewniających przede wszystkim pośredni sposób suszenia do konstrukcji opartych na suszeniu w złożu fluidalnym |
| Wskaźnik zużycia ciepła dla odparowania 1 kg wody          | 0,78 – 0,90 kWh/kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> (2,808 – 3,240 MJ/kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> )  |
| Przeciętna moc dla napędu urządzeń zasilanych elektrycznie | 20 – 40 kW <sub>el</sub>   |
| Możliwość odzysku ciepła kondensatu                        | oferowana w większości instalacji  |
| Zapewnienie higienizacji osadu                             | gwarantowane w większości instalacji   |
| Postać wysuszonego osadu                                   | w każdej wersji możliwość peletyzowania osadu  |
| Łatwość obsługi i automatyzacja procesu                    | pełna automatyzacja procesu i duża prostota obsługi  |
| Nakłady inwestycyjne                                       | trudne do precyzyjnego określenia; zależne od zakresu dostawy i szeregu innych czynników   |

różnice w nakładach energetycznych, które wynikają ze wspomnianej sprawności procesu suszenia [38].

Autor pracy [38] podaje, że zawartość suchej masy w osadzie przed suszeniem powinna wynosić ponad 25%, by ten proces pochłonął porównywalną ilość energii do uzyskanej podczas spalania suchego osadu.

Zgodnie z [35] wyróżnia się następujące metody suszenia z uwagi na możliwość przenoszenia ciepła z nośnika energii na osad suszony:

- suszenie konwekcyjne – bezpośredni kontakt suszonego osadu z nośnikiem ciepła. Metodę tę wykorzystuje się w: suszarniach bębnowych, fluidalnych, półkorych, CENTIDRY, a także w suszarniach powietrznych,
- suszenie kontaktowe (przeponowe) – ciepło przenoszone do suszonych osadów za pomocą powierzchni wymiany. Do grupy tej należą instalacje: suszarnie tarczowe oraz cienkowarstwowe i suszarnie z rurowym wymiennikiem ciepła (obrotowe, a także fluidalne),
- suszenie promiennikowe – ciepło przekazywane za pomocą promieniowania podczerwonego. Wyróżnia się tutaj suszarnie słoneczne oraz BLUE-TEC.

Ze względu na koszty związane z suszeniem termicznym osadów ściekowych, [11, 13, 27], powinno się dostosować stopień tego procesu do wymogów planowanego ostatecznego sposobu zagospodarowania tych odpadów. W tabeli 3 zestawiono wskazówki francuskich specjalistów odnośnie opłacalnego zakresu suszenia osadów.

Pełna opłacalność współspalania osadów z odpadami występuje powyżej 60% stopniu ich wysuszenia (tab. 3). Wynikać to może z tego, jaki produkt chcemy uzyskać. Ponieważ dąży się do otrzymania granulatu, o odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej z powyższej mieszanki, powinien on posiadać odpowiednią zawartość

**Tabela 3.** Zakres stopnia wysuszenia osadu jako funkcja ostatecznego zagospodarowania [13, 27]

| Sposób zagospodarowania        | Stopień wysuszenia                                    |   |   | Cel suszenia   |
|--------------------------------|---|---|---|--|
|                                | 30 – 40%  | 60 – 90%  | powyżej 90%   |  |
| Rolnicze                       | nieopłacalny ze względów technicznych i ekonomicznych | opłacalny   | opłacalny   | ułatwienie transportu i składowania; stabilizacja i higienizacja (powyżej 90%) |
| Spalanie w specjalnych piecach | opłacalny (35 – 45%)                                  | nieopłacalny ze względów technicznych i ekonomicznych | opłacalny (wysuszenie całkowite części osadu celem przygotowania mieszaniny z osadem niewysuszonym zawierającym 35 – 45% <sub>s.m.o.*</sub> przed wprowadzeniem do pieca) | autotermiczne spalanie   |
| Wspólne spalanie z odpadami    | nieopłacalny ze względów technicznych i ekonomicznych | opłacalny   | opłacalny   | ułatwienie eksploatacji pieca, transportu i składowania                        |

\*<sub>s.m.o.</sub> – sucha masa osadu.

wilgoci. Natomiast w przypadku spalania osadów proces ten jest opłacalny przy stopniu wysuszenia 35 – 45%. O tym z kolei może decydować rodzaj suszarki, jaką chcemy zastosować do przygotowania osadu do dalszej utylizacji.

Wysoki stopień wysuszenia – powyżej 90%<sub>s.m.o.</sub> jest konieczny przy planowanym spalaniu osadów w paleniskach pyłowych wraz z węglem oraz do opalania pieców cementowych. Przeważnie taki osad posiada niewielkie ilości pyłu. Produkowany jest w postaci ziaren przeważnie o średnicy od 2 do 4 mm. Można go składować przez dowolny okres czasu, gdyż nie stanowi zagrożenia sanitarnego dla obsługi. Poniżej 85%<sub>s.m.o.</sub> transport tych odpadów bywa utrudniony, tak samo jak mieszanie z węglem czy wtryskiwanie do kotłów pyłowych [27].

Suszenie osadów ściekowych umożliwia ich przekształcenie w produkt o odpowiednich parametrach, sprzyjających jego ostatecznemu unieszkodliwianiu. Dzięki temu procesowi można uzyskać osad o zawartości suchej masy od 50 do ponad 90%. Efektem jest uzyskanie materiału, który nie stanowi zagrożenia dla zdrowia ludzi i nie ulega biodegradacji [11].

## PODSUMOWANIE

W 1999 r. powstało ok. 354 tys. ton<sub>s.m.o.</sub> osadów komunalnych, natomiast 10 lat później już ok. 563,1 tys. ton<sub>s.m.o.</sub> osadów. Jak wynika z prognoz krajowego planu gospodarki odpadami na 2014 r. trend ten nadal zostanie utrzymany. Przewiduje się, że w 2022 r. wytworzonych zostanie 746 tys. t<sub>s.m.o.</sub> osadów komunalnych [36].

Wspomniany plan ukierunkowuje na coraz większe zainteresowanie metodami termicznej utylizacji tych odpadów. O korzyściach spalania osadów decydują skład

chemiczny, zawartość substancji palnych, udział wilgoci, związków organicznych oraz właściwości paliwowe.

Aby odpad stał się wartościowym paliwem, musi zostać odpowiednio przygotowany. W tym celu poddaje się go procesowi suszenia, którego głównym zadaniem jest zmniejszenie objętości osadu poprzez usunięcie wilgoci, a tym samym zwiększenie udziału s.m.o.

Prezentowana praca podejmuje problematykę spalania, współspalania oraz suszenia osadów ściekowych. Autorzy różnych prac wskazują, że najodpowiedniejszą technologią dla spalania osadów jest wykorzystanie kotłów ze złożem fluidalnym, natomiast w przypadku współspalania zastosowanie spalarni rusztowej.

Termiczne metody unieszkodliwiania osadów są nieuniknione. Należy także zastanowić się nad ich oddziaływaniem na środowisko naturalne ze względu na produkcję gazów zawierających tlenki siarki, azotu, węgla, pyły oraz węglowodory.

Według Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 19 marca 2010 r. [29] termiczny proces przekształcania odpadów powinien być prowadzony tak, aby:

- spalanie odpadów bądź też substancji tworzących się szczególnie w czasie pirolizy, procesu plazmowego oraz zgazowania czy wykorzystania innych procesów, temperatura gazów powstających na skutek spalania, zmierzona w reprezentatywnym miejscu komory spalania np. blisko ściany wewnętrznej, po ostatnim doprowadzeniu powietrza (w maksymalnie niesprzyjających warunkach), była podniesiona w sposób zarówno kontrolowany jak i jednorodny oraz utrzymywana została przez minimum 2 sekundy na poziomie, co najmniej:
  - 1100 °C – dla odpadów posiadających ponad 1% związków chlorowcoorganicznych przeliczonych na chlor,
  - 850 °C – odpadów posiadających poniżej 1% związków chlorowcoorganicznych przeliczonych na chlor,
- współspalanie odpadów bądź też substancji tworzących się szczególnie w czasie pirolizy, procesu plazmowego oraz zgazowania czy wykorzystania innych procesów, temperatura gazów powstających na skutek spalania, w maksymalnie niesprzyjających warunkach, była podniesiona w sposób zarówno kontrolowany jak i jednorodny oraz utrzymywana została przez minimum 2 sekundy na poziomie, co najmniej:
  - 1100 °C – odpadów posiadających ponad 1% związków chlorowcoorganicznych przeliczonych na chlor,
  - 850 °C – odpadów posiadających poniżej 1% związków chlorowcoorganicznych przeliczonych na chlor.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 kwietnia 2011 r. [31] reguluje natomiast kwestię współspalania odpadów innych niż niebezpieczne (w tym osadów ściekowych) wraz z paliwami (niebędącymi odpadami w świetle wspomnianego rozporządzenia) w ilości do 1% masy tych paliw. W takim przypadku obowiązują mniej rygorystyczne przepisy odnoszące się do spalania paliw, a nie do spalania odpadów.

## LITERATURA

1. Bartoszewski K., Kurbiel J. 2002. Stabilizacja osadów ściekowych. *Przegląd Komunalny*, 1, 40–43.
2. Bień J.B. 2007. Osady ściekowe – teoria i praktyka. Wyd. II poprawione i uzupełnione. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
3. Bień J.D., Nowak W. 2005. Zgazowanie osadów ściekowych, cz. I. *Czysta Energia*, 4, 30–31.
4. Bień J.B., Wystalska K. 2008. Procesy termiczne w unieszkodliwianiu osadów ściekowych. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
5. Chodur M. 2008. Proces mokrego utleniania alternatywą dla termicznego przekształcania osadów ściekowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, z.8, 28–30.
6. Chodur M. 2008. Proces mokrego utleniania metodą przekształcania osadów ściekowych. *Wodociągi – Kanalizacja*, 10, 48–49.
7. Czekala J. 2009. Osady ściekowe – nawóz czy odpad? *Wodociągi – Kanalizacja*, 1, 30–33.
8. Fieducik J., Gawroński A. 2010. Suszenie i spalanie osadów ściekowych jako metoda ich utylizacji na przykładzie spalarni w Olsztynie. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, z.57, 271, 147–154.
9. Gluzińska J. 2009. Komunalne osady ściekowe – surowiec z odpadu. *Chemik*, 10, 360–363.
10. Góralczyk S., Kukielska D. 2009. Kruszywo lekkie z odpadów. *Przegląd Komunalny*, 11, 52–55.
11. Górski M., Zabawa S. 2008. Zarządzanie gospodarką odpadami: techniczno-organizacyjno-prawne aspekty gospodarki odpadami. *Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych*, Poznań.
12. Heidrich Z. 2004. *Kanalizacja*. Wydawnictwo WSiP, Warszawa.
13. Heidrich Z., Witkowski A. 2010. Urządzenia do oczyszczania ścieków. Projektowe przykłady obliczeń. Wydanie II, Wydawnictwo „Seidel – Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa.
14. Hermanowicz W., Dojlido J., Dożańska W., Koziarowski B., Zerbe J. 1999. Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków. Wydanie II, Arkady, Warszawa.
15. Kordylewski W., Robak Ł. 2002. Witryfikacja odpadów i popiołów. *Gospodarka Paliwami i Energią*, 7, 18–21.
16. Kosior-Kazberuk M. 2011. Nowe dodatki mineralne do betonu. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 1, Vol. 2, 47–55.
17. Malej J. 2004. Odpady i osady ściekowe. Charakterystyka, unieszkodliwianie, zagospodarowanie. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
18. Miksch K., Sikora J. 2010. *Biotechnologia ścieków*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
19. Niemiec W., Sobolewska P., Jasiński T. 2007. Wybrane możliwości przyrodniczego zagospodarowania osadów ściekowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, z.42, 240, 63–72.
20. *Ochrona Środowiska 2000-2010*. Główny Urząd Statystyczny. Informacje i Opracowania Statystyczne, Warszawa 2000-2010.
21. Oleszkiewicz J., przy współpracy Kalinowskiej E. 1998. *Gospodarka osadami ściekowymi*. Poradnik decydena. LEM s.c., Kraków.
22. Ostojski A. 2006. Prawne aspekty unieszkodliwiania osadów ściekowych. *Wodociągi – Kanalizacja*, 4, 32–36.

23. Pająk T., Wielgościński G. 2003. Współczesne technologie suszenia i spalania osadów ściekowych – kryteria i uwarunkowania wyboru technologii. II Międzynarodowa i XIII Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna n.t. Nowe spojrzenie na osady ściekowe, Odnawialne źródła energii, 3-5 luty 2003, Częstochowa, 491–500.
24. Pietraszek P., Podedworna J. 1990. Ćwiczenia laboratoryjne z technologii osadów ściekowych. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
25. Podedworna J., Umiejewska K. 2008. Technologia osadów ściekowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
26. Stier E., Fischer M. 1998. Podręczny przewodnik eksploatacji oczyszczalni ścieków. Wydawnictwo „Seidel – Przywecki” Sp. z o.o., Bydgoszcz.
27. Skalmowski K. (red.) 2006. Poradnik gospodarowania odpadami. Podręcznik dla specjalistów i referentów ds. Ochrony Środowiska. Stan prawny na 1 kwietnia 2006. Tom 4, Wydawnictwo Verlag Dashofer, Warszawa.
28. Rosik-Dulewska C. 2008. Podstawy gospodarki odpadami. PWN, Warszawa.
29. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 19 marca 2010r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów (Dz.U. Nr 61, Poz. 380).
30. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz.U. Nr 137, Poz. 924).
31. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 kwietnia 2011 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji.
32. Siuta J. 2002. Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych. Przegląd Komunalny, 1, 38–40.
33. Strumiłło C. 1983. Podstawy teorii i techniki suszenia. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
34. Szwabowska E., Hauke H., Kasperczyk B. 1992. Unieszkodliwianie i przeróbka osadów ściekowych. Tom I. Instytut Ekonomiki Przemysłu Chemicznego w Warszawie, Oddział w Gliwicach.
35. Szczygieł J. 2004. Energia z osadów ściekowych. Czysta Energia, 11, 34–35.
36. Uchwała Nr 217 Rady Ministrów z dnia 24 grudnia 2010 r. w sprawie „Krajowego planu gospodarki odpadami 2014” (Monitor Polski Nr 101, Poz. 1183).
37. Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Dz.U. Nr 62, Poz. 628 z póź. zm.).
38. Wawrzyniak P. 2011. Suszenie osadów ściekowych – wybór technologii. Wodociągi – Kanalizacja, 1, 29–31.

## THERMAL DISPOSAL OF SEWAGE SLUDGE

**Summary.** Due to the continuous growth of the sludge in sewage treatment plants, to reflect on the various disposal alternatives. Through the disposal of such wastes by the Act of 27 April 2001. [37] is meant to subject them to the processes of biological, chemical or physical, to bring about the state of health and is not threatening people’s lives and the environment. The paper presents the properties and methods of disposal of sewage sludge. It should be emphasized significant effects of thermal methods for disposal of these wastes, namely the co-combustion with coal fuels. In this paper the subject of drying of sewage sludge, as the initial stage of its preparation for further use.

**Keywords:** properties, preparation, neutralization, sewage sludge.