

HIGIENIZACJA OSADÓW ŚCIEKOWYCH ZA POMOCĄ PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO. PRZYKŁADY INSTALACJI DO RADIACYJNEJ OBRÓBKI OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Hygienization of sewage sludge using ionizing radiation. Examples of installations for radiation processing of sewage sludges

Marcin Sudlitz

Streszczenie: W ciągle rozwijającym się świecie i co za tym idzie zwiększającej się liczbie ludności problem powstawania ogromnych ilości osadów ściekowych w ciągu roku stanowi coraz poważniejszy problem. Jednym z możliwych sposobów zagospodarowania tych kłopotliwych odpadów jest wykorzystanie rolnicze, jednak przedtem należy pozbyć się patogenów, jakimi są szkodliwe bakterie i jaja pasożytów obecne w ściekach. Nawiezenie pola skażonymi osadami może skończyć się zarażeniami u ludzi i zwierząt spożywających plony wyhodowane na takim polu. Zawartość wybranych patogenów w osadach ściekowych przeznaczonych do zastosowań rolniczych jest uregulowana prawnie. Higienizację osadów ściekowych można przeprowadzić za pomocą promieniowania jonizującego. Na świecie zbudowana została pewna ilość instalacji do napromieniowywania osadów ściekowych, m.in. w Indiach, Niemczech, USA czy Korei Południowej. Możliwe jest wykorzystanie źródeł izotopowych lub też akceleratorów elektronów. Z doświadczeń przeprowadzonych z użyciem takich instalacji, jak również badań laboratoryjnych wynika, że dawka potrzebna do higienizacji zawiera się w przedziale 3-5 kGy.

Abstract:

In a constantly evolving world and, consequently, an increasing population, the problem of the formation of huge amounts of sewage sludge during the year is a growing problem. One of the possible ways to manage this troublesome waste is agricultural use, but before that you must get rid of the pathogens that are harmful bacteria and parasite eggs present in the wastewater. Fertilization of the field with contaminated sediments may end up infecting humans and animals consuming crops grown in such field. The content of selected pathogens in sewage sludge intended for agricultural applications is regulated by law. Hygienization of sewage sludge can be carried out using ionizing radiation. A number of sewage sludge irradiation installations have been built in the world, including in India, Germany, the USA or South Korea. It is possible to use isotope sources or electron accelerators. From experiments carried out with the use of such installations, as well as laboratory tests, it appears that the dose needed for hygienization is in the

Słowa kluczowe: osad ściekowy, higienizacja, promieniowanie jonizujące, patogeny, instalacja.

Keywords: sewage sludge, hygienization, ionizing radiation, pathogens, installation.

W ciągle rozwijającym się świecie następuje rozrost populacji, a także aglomeracji. Zatem ilość wytwarzanych obecnie osadów ściekowych (będących odpadem powstającym przy procesie oczyszczania ścieków, zarówno miejskich, przemysłowych, jak i pochodzących ze wsi) stanowi coraz większy problem. Przykładowo w Polsce w 2016 r. (według GUS-u) uzyskano 947,2 tys. ton suchej masy osadów ściekowych, z czego 568,3 tys. ton suchej masy osadów uzyskanych ze ścieków komunalnych i 378,9 tys. ton suchej masy osadów uzyskanych ze ścieków przemysłowych. Z kolei w 2017 r. ilości te wyniosły odpowiednio: 1035,2, 584,5 oraz 450,7 tys.

ton suchej masy. [1]. Powoduje to konieczność szukania metod redukcji ilości tychże osadów, najlepiej poprzez ich racjonalne wykorzystanie.

Spośród możliwych sposobów zagospodarowywania osadów ściekowych wymienić można: spalanie (w tym współspalanie w piecach do wyrobu cementu, klinkieru etc.) oraz składowanie.

Ostatnia z metod ma poważne ograniczenie ze względu na obowiązujący od 1 stycznia 2016 r. zakaz składowania osadów ściekowych na składowiskach.

Procesy spalania co prawda znacznie zmniejszają objętość odpadów, jednakże nie eliminują problemu składowania odpadów całkowicie, ponadto wytwarzane są w tym procesie zanieczyszczenia chemiczne (dioksyne, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne). Spalanie jest także kosztowne ze względu na ilość energii potrzebnej do odparowania wody z osadu. Ze względu na zawartość wielu składników odżywczych, w tym białek, węglowodanów i tłuszczów, także pierwiastków: N, P, K, Mn czy Zn ten kłopotliwy osad może z powodzeniem służyć jako nawóz rolniczy lub też biomasa w procesie fermentacji metanowej. Osady ściekowe można rozróżnić na osad wstępny (zwany też surowym) oraz osad nadmierny. Pierwszy rodzaj powstaje w trakcie zagęszczania ścieków, które trafiają do oczyszczalni bezpośrednio z beczkowozów lub kanalizacji. Drugi rodzaj to efekt procesu oczyszczania za pomocą bakterii tlenowych w tzw. komorach osadu czynnego. Po procesie oczyszczania następuje sedymentacja powstałego osadu nadmiernego. [2] Wywóz osadów ściekowych (czy to w postaci nieprzetworzonej, czy też jako osad nadmierny powstały w oczyszczalni ścieków lub poferment uzyskany z procesu fermentacji metanowej) na pola uprawne niesie za sobą jednak zagrożenia biologiczne ze względu na pochodzenie ścieków. Proces fermentacji tlenowej czy też metanowej (beztlenowej) nie jest w stanie wyeliminować zagrożeń biologicznych.

Zagrożenia biologiczne

Ze względu na pochodzenie osady ściekowe mogą zawierać patogeny odpowiedzialne za wiele chorób.

Oprócz ludzkich odchodów do kanalizacji wędrują również ekskrementy zwierzęce, pochodzące od zwierząt domowych, hodowlanych, jak i bezpańskich. Z tego względu w osadach ściekowych można znaleźć bardzo różnorodne organizmy patogeniczne od bakterii, przez jaja pasożytów po wirusy i grzyby. Mogą to być m.in. bakterie: salmonella, E. Coli, Shigella, Vibrio Cholerae i inne, grzyby: Candida spp., Aspergillus spp., wirusy oraz jaja pasożytów takich jak: włosogłówka (*Trichuris sp.*) – nicien bytujący w ludzkim organizmie, glista ludzka (*Ascaris sp.*) – pasożyt ludzkiego układu pokarmowego, glista psia/kocia (*Toxocara sp.*) – pasożyt jelitowy zwierząt domowych, tasiemiec, tęgoryjec dwunastnicy, owsik. [3] Przykłady pasożytów jelitowych przedstawiono na fot. 1. Ponieważ do ścieków trafiają również ekskrementy ze szpitali mnogość bakterii chorobotwórczych i pasożytów się zwiększa. Patogeny są w stanie przeżywać w ściekach, osadach ściekowych czy glebach dość długi czas i przez cały ten okres być zdolne do zarażania, możliwe jest zarażenie się takimi chorobami jak: węglik, cholera, zapalenie wątroby, czerwonka czy różne zakażenia pasożytnicze. [2] W tabeli 1 przedstawiono okresy przeżywalności dla wybranych gatunków bakterii i pasożytów.

Najwięcej przypadków zakażeń pasożytniczych odnotowuje się w krajach biednych, głównie w Afryce, czy Azji, gdzie utrudniony dostęp do służby medycznej w połączeniu z dużą gęstością zaludnienia oraz niskim poziomem higieny daje efekty w postaci roznoszenia chorób pasożytniczych. W pracy N.R. de Silva z 2003 r. napisano, że glistą ludzką zarażonych jest około



Fot. 1. Przykłady pasożytów, których jaja występują w osadach ściekowych. Od lewej: Glista ludzka, włosogłówka oraz glista psia (wszystkie zdjęcia pochodzą z: <https://pasozyty.org.pl>)

Photo 1. Examples of parasites, eggs of which are present in sewage sludge. From the left: human roundworm, human whipworm and dogs roundworm (all graphics taken from: <https://pasozyty.org.pl>)

Tabela 1. Przeżywalność wybranych patogenów w różnych środowiskach [2]

Table 1. Survival of selected pathogens in various environments

Patogen	Okres przeżywalności/środowisko
Prątki gruźlicy	5-6 miesięcy/woda rzeczna, ścieki 1 rok/osady ściekowe kompostowane 6 miesięcy/gleba (suche lato)
Salmonella	do 1 roku/ścieki do 1,5 roku/gleba do 1,5 miesiąca/rośliny, warzywa
Laseczki węglika	powyżej 50 lat/gleba, ścieki, rośliny
Wirusy i enterowirusy	kilka tygodni – kilka miesięcy/ścieki
Jaja glisty ludzkiej	do 6 lat/gleba

1,2 mld ludzi, z czego w samych tylko Chinach połowa tej liczby. [4] Jednakże problem pasożytów dotyczy nie tylko mieszkańców biednych krajów, ale całej populacji światowej. Jeżeli chodzi o obecność jaj pasożytów jelitowych w osadach ściekowych, wcale nie trzeba szukać daleko. Jako przykład mogą posłużyć badania wykonane w Polsce.



Fot. 2. Usunięty chirurgicznie wycinek jelita 3-letniego dziecka z Afryki, w którym doszło do zablokowania glistami. (<https://www.flickr.com/photos/gtzecosan/16424898321/>)

Photo 2. Small intestine fragment removed surgically from 3 year old child from Africa. Huge amount of worms formed obstacle (source: <https://www.flickr.com/photos/gtzecosan/16424898321/>)

J. Zdybel i in. prowadzili badania nad obecnością jaj pasożytów jelitowych: glisty ludzkiej, glisty psiej/kociej, oraz włosogłówki. Wyniki uzyskane z badań próbek pobranych z 17 różnych oczyszczalni z 7 różnych województw wykazały, że występowanie jaj pasożytów jelitowych jest powszechne. Zbadano osady z różnych etapów pracy oczyszczalni ścieków i znaleziono jaja pasożytów w każdym z tych osadów: osad z piaskowników (11% badanych próbek), osad wstępny (76% badanych próbek) oraz nadmierny (44% badanych próbek), ścieki surowe (46% badanych próbek), poferment (pozostałość po fermentacji metanowej, 100% badanych próbek) oraz osad odwodniony (82% badanych próbek). [5] Z innych badań J. Zdybel i in. próbek pobranych z różnych wielkości oczyszczalni ścieków wynikało, że jaja glisty ludzkiej wykryto w 96% badanych próbek, jaja glisty psiej wykryto w 95% badanych próbek, a jaja włosogłówki w 60% badanych osadów. [6] W związku z poważnym zagrożeniem, jakim jest możliwość zarażenia się pasożytami oraz bakteriami chorobotwórczymi, oraz fakt, że jaja pasożytów oraz bakterie są w stanie zarażać jeszcze długo po wprowadzeniu do gleby, niezwykle ważne jest pozbycie się patogenów z osadów ściekowych przed zastosowaniem ich jako nawóz rolniczy.

Prawo dotyczące obecności bakterii oraz jaj pasożytów w osadach ściekowych

Ilości bakterii patogenicznych oraz jaj pasożytów w osadach ściekowych, które mają być wykorzystane

jako nawóz rolniczy, jest regulowana prawnie. Na terenie Unii Europejskiej każde z państw członkowskich posiada własne przepisy na temat dopuszczalnej zawartości patogenów w osadach ściekowych przeznaczonych do zastosowań rolniczych. W przypadku Polski dokumentem, gdzie zawarte są wytyczne w tej kwestii, jest rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych [7], a organizmy, które wskazuje ta ustawa to: bakterie rodzaju salmonella oraz pasożyty: włosogłówka, glista ludzka oraz glista kocia/psia. Ustawa ta stwierdza, że: łączna liczba żywych jaj pasożytów jelitowych *Ascaris sp.*, *Trichuris sp.*, *Toxocara sp.* w 1 kg suchej masy osadów stosowanych jako nawóz rolniczy w rolnictwie – musi wynosić 0, gdy stosuje się osady ściekowe do rekultywacji terenów, liczba ta nie może być większa niż 300. Podobnie, jeżeli osadów używa się do dostosowania gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu oraz do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i do produkcji pasz, to łączna liczba żywych jaj pasożytów nie może przekraczać 300. Ustawa stwierdza także, że w przypadku stosowania osadów ściekowych w rolnictwie i do rekultywacji gruntów na cele rolne w 100g osadów wyizolowanych do badań nie mogą znajdować się bakterie z rodzaju salmonella.

Oddziaływanie promieniowania jonizującego na żywe organizmy

Destrukcyjny wpływ promieniowania jonizującego dla życia znany jest od dawna. Sterylizacja radiacyjna produktów medycznych, żywności czy też zapobieganie biodeterioracji zbiorów muzealnych za pomocą napromieniowania to dość często stosowane techniki. Za niszczycielski wpływ napromieniowania na żywe komórki odpowiadają zarówno oddziaływanie bezpośrednie kwantów promieniowania, jak i pośrednie. Działanie bezpośrednie polega na depozycji energii elektronu, cząstki alfa lub kwantu gamma bezpośrednio na nić DNA powodując jej uszkodzenia. Pęknięcie nici może być pojedyncze dla promieniowania o niskim LET (Linear Energy Transfer), takim jak promieniowanie elektronowe czy gamma lub podwójne dla promieniowania o wysokim LET (takiego jak promieniowanie alfa). Mechanizm pośredni polega na reakcji DNA z produktami radiolizy wody występującej wewnątrz komórek organizmów żywych. Wytworzone w wyniku oddziaływania promieniowania jonizującego: rodniki OH, solwatowane elektrony, rodniki wodorowe wchodzi w reakcje z cząsteczkami w nici DNA. Szczególnie istotne są rodniki OH, te odpowiadają za 90% wszystkich uszkodzeń. Szacuje się, że napromieniowanie komórki dawką 1 Gy powoduje 1000 pojedynczych pęknięć nici, 40 podwójnych pęknięć nici, 150 reakcji pomiędzy

nią DNA a białkami prowadzące do usieciowania DNA oraz 250 reakcji utlenienia tyminy. [8]

Prowadzono również wiele badań nad skutecznością promieniowania jonizującego w eliminowaniu patogenów w ściekach. Jako przykład może posłużyć praca A. Chmielewskiego i in. [9] gdzie przeprowadzono badania osadów ściekowych napromieniowanych za pomocą akceleratora elektronów o energii 10 MeV. Badania wykazały, że do zabicia jaj pasożytów potrzebna jest dawka 6 kGy, natomiast napromieniowanie dawką 5 kGy powoduje zmniejszenie ilości bakterii w osadzie o 2 rzędy wielkości, a napromieniowanie dawką 7 kGy o 4 rzędy. T.T. Naing i K.K. Lay [10] w swojej pracy z kolei stwierdzili, że dawka 7 kGy całkowicie eliminuje bakterie z osadu ściekowego. Z badań R. El-Motaium i in. [11] wynika, że dawka 6 kGy eliminuje bakterie z osadu, natomiast do zabicia bakterii w surowych ściekach wystarczy 1,5 kGy. Według autorów wyższa dawka potrzebna do higienizacji osadów względem ścieków surowych wynika z faktu, że bakterie mają tendencję do osiadania wraz z cząstkami stałymi w ściekach, co zwiększa ich ilość w osadzie.

Instalacje do napromieniowywania osadów ściekowych

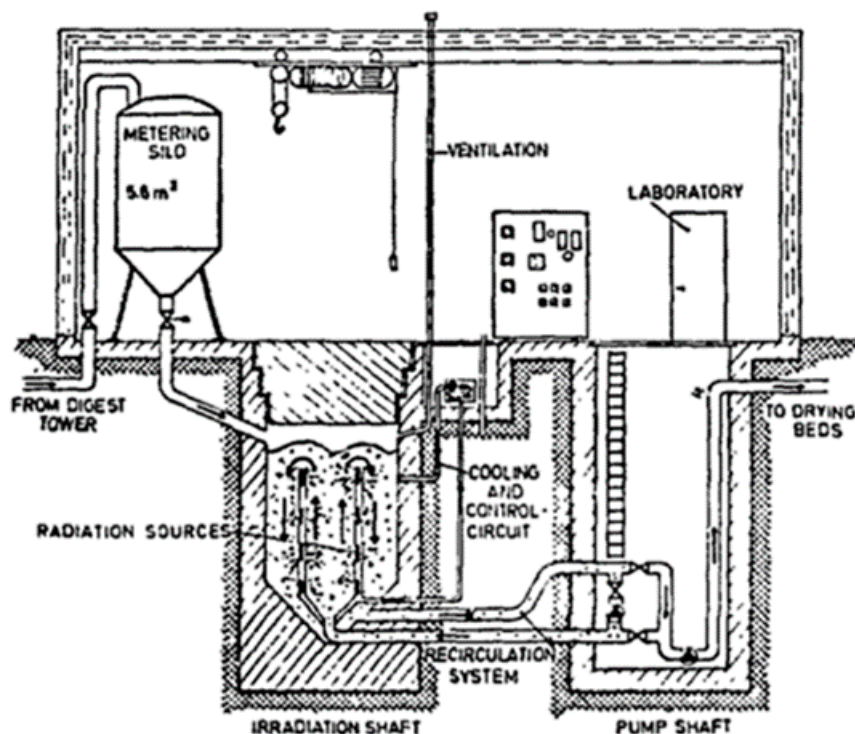
Powstało wiele instalacji (głównie badawczych) do napromieniowywania osadów ściekowych. Instalacje takie mogą wykorzystywać zarówno źródła izotopowe, jak i akceleratory elektronów.

Instalacje wykorzystujące źródła izotopowe gamma

Jednym z przykładów instalacji wykorzystującej źródła gamma może być stworzona w 1973 r. badawczo-demonstracyjna instalacja do napromieniowywania osadów ściekowych z wykorzystaniem źródeł izotopowych. W pierwszym okresie pracy instalacja wyposażona została w źródło o aktywności 110 000 Ci i możliwe było napromieniowanie 30m³ osadów ściekowych w ciągu doby. W roku 1975 aktywność źródła zwiększono do 450 000 Ci (w instalacji wykorzystywano źródła ⁶⁰Co i ¹³⁷Cs) co pozwoliło na zwiększenie wydajności do 120 m³ na dobę. W jednym cyklu napromieniowywane było 5,6 m³ osadów dawką 3 kGy.

Cała instalacja umieszczona została na dwóch poziomach: na pierwszym umieszczono silos o pojemności 5,6 m³ na osad ściekowy, dźwig, sterownię oraz małe laboratorium. Na dolnej kondygnacji znajdowały się grubościenna komora zawierająca źródła izotopowe oraz, w oddzielnym pomieszczeniu, zespół pomp, zaworów i aparatura sterująca. Umieszczenie tych elementów w oddzielnym pomieszczeniu pozwalało na łatwiejszą i bezpieczniejszą konserwację, bez narażania obsługi na promieniowanie.

W środku komory do napromieniowywania znajdowała się rura o podwójnych ściankach. Pomiędzy ściankami zewnętrznymi i wewnętrznymi umiejscowione



Rys. 1. Schemat instalacji do napromieniowywania osadów ściekowych w Geiselbullach, w Niemczech [12]

Fig. 1. Scheme of installation for sewage sludge irradiation in Geiselbullach, Germany

były źródła promieniowania. Po włączeniu pomp osad przepływał od dołu przez centralną część rury, po czym przelewał się przez górną krawędź tejże rury, spływając na dno komory, a stamtąd szedł z powrotem do pompy. Osad cyrkulował do osiągnięcia żądanej dawki, żeby po napromieniowaniu trafił na zewnątrz instalacji. Same źródła chłodzone były wodą demineralizowaną. Instalacja ta była zautomatyzowana i działała 24 h na dobę. W roku 1993 instalację zlikwidowano. [12]

Innym przykładem może być zastosowana w 1992 r. w miejscowości Vadodara w Indiach komora do napromieniowywania wykorzystująca źródła ^{60}Co . Komora ta jest zaprojektowana do współpracy z istniejącą instalacją. Cały zespół ma wydajność 110 m^3 na dobę. Sama komora zawiera wewnątrz szereg rur z umieszczonymi wewnątrz źródłami promieniotwórczymi. Pompowany do wnętrza osad opływa te rury i ulega napromieniowaniu, podobnie, jak w poprzednim przypadku, osad recyrkuluje aż do osiągnięcia żądanej dawki. [13]

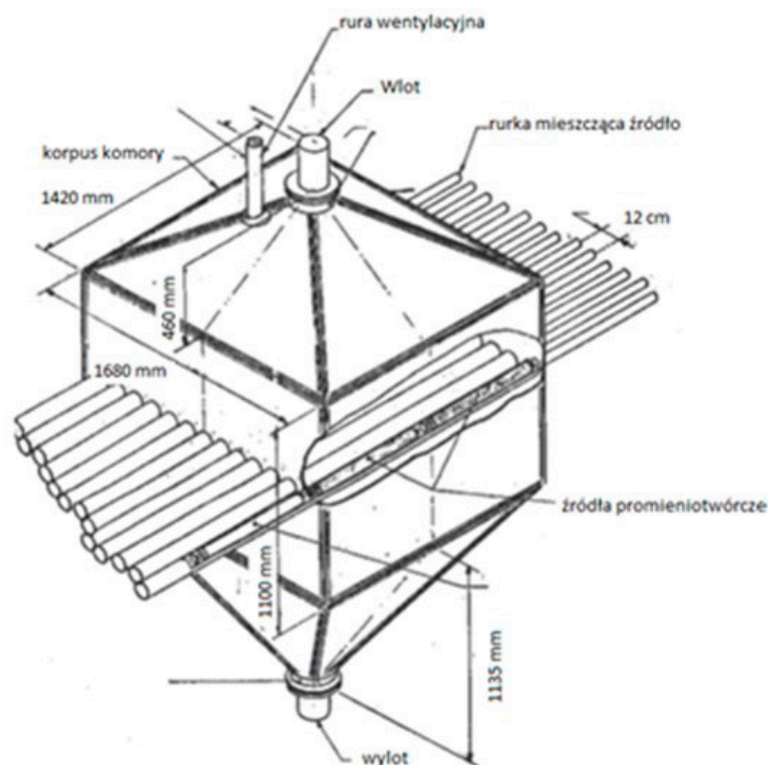
W Argentynie, w Tucuman, powstała instalacja PIBA, podobna do instalacji w Geiselbullah, wykorzystująca źródła ^{60}Co . Służyła ona do napromieniowywania pofermentu pochodzącego z procesu fermentacji metanowej osadów ściekowych o ilości suchej masy wynoszącej 8-10% dawką 3 kGy z wydajnością wynoszącą 180 m^3 na dobę. W jednym cyklu napromieniować można było 6 m^3 pofermentu. [14]

W Indiach w miejscowości Baroda w 1990 r. wybudowano instalację SHRI (Sludge Hygienization Research Irradiator) współpracującą z istniejącą tam oczyszczalnią ścieków. Służyła ona do napromieniowywania pofermentu z procesu fermentacji metanowej dawką 4 kGy z wydajnością 110 m^3 na dobę, w jednym cyklu napromieniować można było 3 m^3 . Instalacja posiada dwie niezależne, wykonane ze stali nierdzewnej, komory do napromieniowywania osadów ściekowych. Gdy jedna z nich jest w użyciu, druga czeka w stanie gotowości. Osad po wejściu do komory opada pionowo i przechodzi przez sieć rurek z umieszczonymi wewnątrz źródłami promieniotwórczymi, ulegając napromieniowaniu. Z badań nad tym układem wynika, że do higienizacji ścieków surowych wystarcza dawka $1,5\text{ kGy}$, podczas gdy do higienizacji osadów ściekowych oraz pofermentu potrzeba 3 kGy . [14]

Instalacje wykorzystujące akceleratory elektronów

Oprócz instalacji wykorzystujących źródła izotopowe istnieją także takie, które posiadają akceleratory elektronów. Akceleratory ze względu na możliwość wyłączenia są bezpieczniejsze i wygodniejsze w obsłudze i konserwacji, wady natomiast stanowią niewielką głębokość penetracji wiązki, wymuszając zmniejszanie warstwy napromieniowywanego osadu oraz duże zużycie energii.

Jako przykład można wymienić wybudowaną w 1976 r. w USA w Bostonie instalację Deer Island Elec-



Rys. 2. Schemat komory do napromieniowywania osadów ściekowych zastosowanej w oczyszczalni ścieków w miejscowości Vadodara, w Indiach [13]
Fig. 2. Scheme of sewage sludge irradiation chamber used in Wastewater treatment plant in Vadodara, India [13]

tron Research Facility o wydajności 655 m³ na dobę. Umieszczony poziomo akcelerator o energii wiązki 1,5 MeV napromieniowywał osad w postaci wypływającej pionowo w dół z dyszy warstwy o grubości 4 mm dawką 5 kGy. [14, 15]

W Japonii, w Takasaki przy pomocy instalacji pracującej z wydajnością 300 kg/h napromieniowywano osad w postaci warstwy o grubości 10 mm umieszczonej na podajniku, która transportowana była pod akcelerator, a następnie odprowadzana na zewnątrz. Napromieniowany osad kompostowano. [13]

Także w Korei Południowej powstała instalacja piotowa w 2005 r. W tym wypadku z osadu formowana była warstwa o grubości 6 mm, która trafiała na podajnik ze stali nierdzewnej. Ten przenosił ją pod akcelerator o mocy 100 kW i energii wiązki 2,5 MeV, gdzie napromieniowywana była dawką 1-3 kGy. Wydajność tej instalacji to do 500 kg/h. Z badań wynikało, że dawka 3 kGy wystarczała do całkowitego wyeliminowania bakterii z rodzaju salmonella, a także spadek ilości bakterii z rodzaju coli o 3-4 rzędy wielkości. [16]

Pomimo tego, że niektóre z powstałych instalacji do napromieniowywania osadów ściekowych zakończyły już swoją działalność, idea radiacyjnej higienizacji takich osadów wcale nie umarła. Przykładem może być opracowywana w IChTJ we współpracy z lubelską firmą Biopolinex oraz oczyszczalnią ścieków Gea-Nova w Józefowie „zero -energetyczna” technologia, gdzie biogaz wyprodukowany na drodze fermentacji osadów ściekowych byłby spożytkowany na wyprodukowanie energii elektrycznej mogącej zasilać akcelerator elektronów służący do higienizacji pofermentu, aby można go było bezpiecznie wykorzystywać jako nawóz rolniczy.

*Marcin Sudlitz,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa*

Literatura:

- [1] Główny Urząd Statystyczny. (2018). Ochrona środowiska 2018. Informacje i opracowanie statystyczne. Warszawa, Pobrano dnia 28.02.2020 z <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2018,1,19.html>
- [2] Dymaczewski, Z., Oleszkiewicz, J.A., & Sozański, M.M. (1997). Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków. Poznań: Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych.
- [3] Strauch D.: Survival of pathogenic micro-organisms and parasites in excreta, manure and sewage sludge. Part I. Med Weter 1993, 49, 59–65.
- [4] de Silva NR, Brooker S, Hotez PJ, Montresor A, Engels D, Savioli L. Soil-transmitted helminth infections: updating the global picture. Trends Parasitol. 2003, 19(12), 547–551
- [5] Zdybel J., Cencek T., Karamon J., Kłapeć T., Effectiveness of selected stages of wastewater treatment in elimination of eggs of intestinal parasites, Bull Vet Inst. Puławy 59, 51-57, 2015
- [6] Zdybel J., Karamon J., Dąbrowska J., Różycki M., Bilka – Zajac E., Kłapeć T., Cencek T., Parasitological contamination with eggs *Ascaris* spp., *Trichuris* spp. and *Toxocara* spp. of dehydrated municipal sewage sludge in Poland, Env. Pol., 248 (2019), 621 - 626
- [7] Minister Środowiska. (2010). Rozporządzenie ministra środowiska z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych. Dz.U. 2010 nr 137 poz. 924.
- [8] Krajewski P., (2009) Biologiczne skutki promieniowania jonizującego, Materiał dydaktyczny dla Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej w ramach bloku wykładów pt.: „Podstawy Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej”. Pobrano 23 listo-pada 2018 r. http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/POKL33/pdf/mat-wykl/Biologiczne_skutki_promieniowania_jonizujacego.pdf
- [9] Chmielewski, A.G., Zimek, Z., Bryl-Sandelewska, T., Kosmal, W., Kalisza, L., & Kaźmierczuk, M. (1995). Disinfection of municipal sewage sludges in installation equipped with electron accelerator. Radiation Physics and Chemistry, 46, 1071-1074.
- [10] Naing, T.T., & Lay K.K. (2015). Utilization of gamma radiation in industrial wastewater treatment. International Journal of Mechanical and Production Engineering, 3, 6, 1-5.
- [11] El-Motaium, R., Ezzat, H.E.M., Et-Batanony, M., Kreuzig, R., & Abo-El-Seoud, M. (2002). Irradiated sewage sludge for increased crop production – I. Pathogens and polycyclic aromatic hydrocarbons. Vienna: International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-CD--1317. Pobrano 30 października 2019 r. z https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:34010893.
- [12] Lessel, T., & Hennig, E. (1976). The pilot plant in Geiselbulach for the gamma irradiation, operation, experience and cost calculations. W Meeting of the European Society of Nuclear Methods in Agriculture, 8 June 1976, Muenchen, Germany (s. 165-182). Pobrano 30 października 2019 r. z https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/08/330/8330700.pdf.
- [13] Haji-Saeid M., Sabharwal S., Chmielewski A.G. (2007), Radiation processing: environmental applications. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- [14] Lavahole D.S., Shah M.R., Rawat K.P., George J.R., Sewage sludge irradiators. Batch and continuous flow, Mumbai, India, 1998, pobrano 26.02.2020 z <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/644028>
- [15] Janlong, W., Jazhuo, W., Application of radiation technology to sewage sludge processing: a review. Journal of Hazardous Materials, 2007, 143, 2-7
- [16] Kim, Y., Han, B., Kim, J.K., Ben Yaacov, N., & Jeong, K.Y. Design of electron beam sludge hygienization plant. International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators, 4-8 May 2009, Vienna (SM/EB-25). Pobrano 30 października 2019 r. z <https://pdfs.semanticscholar.org/81ff/f088f4e2fba265d8faa685f83b47c53a800.pdf>.