

■ Halina Pawlak-Kruczek, Michał Czerep, Jakub Mularski, Krystian Krochmalny, Łukasz Niedźwiecki,
Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

Kilku stopniowa utylizacja osadów ściekowych - biomasy odpadowej z wykorzystaniem karbonizacji, zgazowania

Problem opłacalnej energetycznie i ekonomicznie utylizacji biomasy odpadowej - w szczególności osadów ściekowych oraz innych zanieczyszczonych typów biomasy jest przedmiotem wielu analiz i badań.

W przypadku porządku prawnego, panującego w Polsce, szczególne znaczenie ma fakt uznania osadu ściekowego za biomasę, potwierdzony przez nowelizację ustawy o Odnawialnych Źródłach Energii. Ponadto, Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 16/07/2015 w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach zabrania składowania ustabilizowanych osadów ściekowych (kod 19 08 05) o wartości opałowej większej niż 6 MJ/kg - w praktyce uniemożliwia to ich składowanie.

Na terenie Unii Europejskiej składowanie jest generalnie najmniej ekonomiczną metodą zagospodarowania osadów ściekowych, w porównaniu z termiczną utylizacją oraz wykorzystaniem w rolnictwie.

Na rysunku 1 pokazano produkcję i zagospodarowanie osadu ściekowego na obszarze Unii Europejskiej, którego ilość ma tendencję wzrostową i stąd poszukiwania tanich i energetycznie korzystnych technologii.

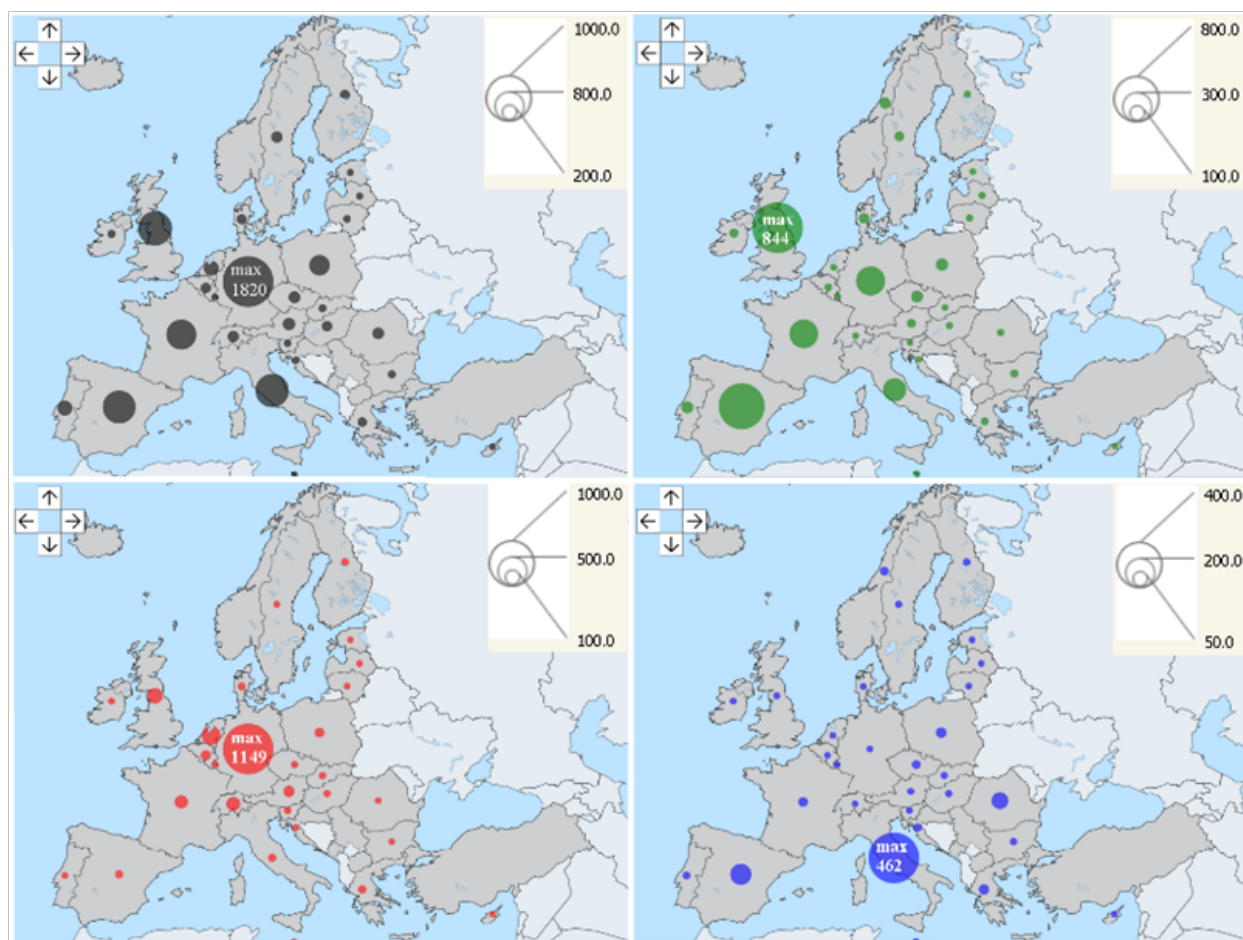
Ze względu na różne aspekty środowiskowe, zdrowotne i bezpieczeństwa - osady ściekowe podlegają różnym regulacjom, zarówno na poziomie Unii Europejskiej (UE), jak i na poziomie krajowym. Produkcja (rys. 1) i wykorzystanie różnią się w poszczególnych krajach UE. Z rys. 1, opartego na oficjalnych statystykach Eurostatu [1], widać wy-

rażnie, że Niemcy produkują najwięcej osadów ściekowych w Europie, a także są liderem w utylizacji termicznej, podczas gdy Wielka Brytania dominuje pod względem wykorzystania osadów ściekowych w rolnictwie.

Istotnym i krytycznym problemem, ze względu na zapotrzebowanie energetyczne, jest usunięcie wody z osadów. Suszenie osadów ściekowych jest stosunkowo drogie, a koszt w dostępnej literaturze wahał się od 550 zł/tonę do 900 zł/tonę. Wynikało to z ceny nośników energii niezbędnych do wytworzenia wymaganej ilości ciepła. Intensywny wysiłek został w ostatnim czasie poświęcony opracowaniu nowych technologii utylizacji osadów ściekowych, pozwalających na wykorzystanie przede wszystkim energii chemicznej zawartej w organicznej frakcji osadów ściekowych do celów energetycznych.

Utylizacja osadów poprzez ich spalanie pozwala na znaczne zmniejszenie ich masy. Jednak zawartość niepalnych substancji nieorganicznych (popiołu) może w osadzie ściekowym sięgać nawet 1/4 lub nawet 1/3 jego suchej masy (np. patrz tab. 1). Ponadto spalanie nigdy nie jest całkowite, co zwiększa całkowitą masę odpadów pozostałych po spalaniu. Dlatego można zasadnie stwierdzić, że spalanie jest tylko częściowym rozwiązaniem problemu osadów ściekowych, ponieważ wciąż znaczna część masy pierwotnego strumienia odpadów musi być składowana na wysypisku.

Po spalaniu zarówno popiół denny, jak i lotny stanowią odpad i mają swoje własne kody odpadów, zgodnie z Rozporządzeniem (WE) nr 2150/2002 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 25 listopada 2002 r. w sprawie statystyki



Rys. 1. Produkcja i zagospodarowanie osadu ściekowego na obszarze Unii Europejskiej w tysiącach ton suchej masy w 2015 r.1 (czarny kolor - całkowita ilość osadu ściekowego wytworzona w ciągu roku; zielony kolor - wykorzystanie osadu ściekowego w rolnictwie; kolor czerwony - spalanie osadu ściekowego; kolor niebieski - składowanie osadu ściekowego) - oprac. na podstawie [1]

Charakterystyka osadu ściekowego	
Części lotnych	56.0-58.1% _{dry}
Masa palna	9.4-17.8% _{dry}
Popiół	26.2-32.5% _{dry}
Ciepło spalania	13.66-15.70 MJ/kg
Elementarna analiza	
C	27.89-32.16% _{dry}
H	2.86-6.67% _{dry}
N	4.36-4.83% _{dry}
S	0.29-0.81% _{dry}
O	28.80-33.14% _{dry}

Tab. 1. Zakres wartości dla analizy zbliżeniowej i końcowej osadów ściekowych na podstawie analiz własnych na próbkach z oczyszczalni ścieków we Wrocławiu (Janówku) i Brzegu

odpadów. Takie odpady należy skierować na odpowiednie składowisko - co generuje koszty, których można by uniknąć, gdyby odpady zostały przekształcone w użyteczny produkt, co jest możliwe na podstawie dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów. Dyrektywa, w artykule 6, określa wymagania dotyczące uzyskania statusu end-of-waste. Zgodnie z dyrektywą odpady, które zostały poddane recyklingowi lub innej operacji odzysku, uznaje się za przestające być odpadami, jeżeli spełniają następujące warunki:

- substancja lub przedmiot ma być używany do określonych celów,
- istnieje rynek lub zapotrzebowanie

- na taką substancję lub przedmiot, substancja lub przedmiot spełnia wymagania techniczne dla określonych celów oraz spełnia obowiązujące przepisy i normy mające zastosowanie do produktów,
- zastosowanie substancji lub przedmiotu nie będzie prowadzić do ogólnego niekorzystnego wpływu na środowisko lub zdrowie ludzkie.

Jednym z obiecujących sposobów uzyskania takich wartości jest zastosowanie kilkustopniowego procesu przetwarzania osadów poczynając od karbonizacji-toryfikacji (suchej i mokrej) do generacji syngazu i wityfikacji substancji nieorganicznej. Proces wityfikacji, tj. ze-

szklenia osadów zmienia strukturę odpadów, takich jak popiół, w taki sposób, że ich struktura przypomina amorficzne kryształy, tj. bezpiecznych do składowania, a nawet wykorzystania jako kruszywo sztuczne.

Procesy toryfikacji, tj. wolnej pirolizy w zastosowaniu do biomasy odpadowej poprawiają właściwości produktu stałego, tj. biowęgla, które mogą być kolejno wykorzystywane w różny sposób jako paliwo lub wsad do produkcji syngazu lub nawet do produkcji specjalnych sorbentów do oczyszczania wody i/lub gazów.

Wyróżniamy dwa rodzaje toryfikacji, tzw. suchą i moką (hydrokarbonizacja). Pierwsza przebiega dla wolnych szybkości nagrzewu w inertej atmosferze gazowej, a druga w fazie ciekłej w podobnych temperaturach.

Zastosowanie hydrokarbonizacji do waloryzacji osadów ściekowych jest procesem, który pozwala na zredukowanie produktów odpadowych i pozwala na skuteczne w dużym stopniu mechaniczne odwodnienie i kolejno wykorzystanie biowęgla, np. jako paliwa do zgazowania. Dodatkową zaletą hydrokarbonizacji jest możliwość odzyskania fosforu i związków azotowych z osadów.

W pracy omówiono kolejno metody utylizacji osadów tradycyjnych-spalarni, toryfikacji-karbonizacji, zgazowania.

Tradycyjne techniki termicznego przekształcania i utylizacji osadów ściekowych

Koszty związane z przetwarzaniem i utylizacją osadów ściekowych mogą stanowić nawet do 50% kosztów operacyjnych oczyszczalni ścieków. Z tego względu dużym zainteresowaniem cieszą się badania zarówno w obszarze nowatorskich procesów utylizacji, jak i też w obrębie poprawy sprawności i obniżenia kosztów technik tradycyjnych. Zasadność stosowania określonych technologii różni się, w zależności od skali przedsięwzięcia, czyli od rozmiaru populacji ob-

sługiwanej przez daną oczyszczalnię [3]. Za tradycyjne techniki termicznego przekształcania i utylizacji osadów ściekowych uznać można ich suszenie, spalanie oraz współspalanie [3-7].

Pod względem energetycznym największy koszt generuje proces suszenia osadów ściekowych, ze względu na ciepło niezbędne dla przejścia fazowego. Suszenie osadu ściekowego jest etapem koniecznym, bez względu na to jaki proces konwersji jest stosowany w dalszej kolejności [7]. Przekłada się to na koszty finansowe, głównie w oparciu o koszty nośników energii, tj. dla typowych instalacji suszenia osadów ściekowych w Polsce koszt w przeliczeniu na 1 tonę suchej masy osadu ściekowego może wahać się pomiędzy 550 PLN/t_{sm}, a 900 PLN/t_{sm}. W przypadku kosztów instalacji wyzwaniem stanowi stosunkowo wysoka wilgotność początkowa oraz także kleista natura osadów ściekowych dla określonych względnie wysokich wilgotności. Właściwość „kleistości” wymaga specjalnych rozwiązań suszarek i nie pozwala na stosowanie rozwiązań pozwalających osiągać wymagany poziom wilgotności przy stosunkowo niskich czasach przebywania (np. złożo toroidalne). Co prawda możliwa jest poprawa i zmniejszenie kleistości dzięki zastosowaniu dodatków, takich jak np. reaktywny CaO lub chlorek poliglinu (PACI), jednakże w pierwszym przypadku zastosowanie utrudnia wydzielanie się amoniaku w trakcie mieszania CaO z osadem ściekowym, zaś w drugim przypadku problemem jest koszt samego dodatku. W Polsce obecnie funkcjonuje ponad 45 instalacji do suszenia osadów ściekowych, będących lub taśmowych - w tym przynajmniej 12 instalacji wykorzystujących energię słoneczną [6].

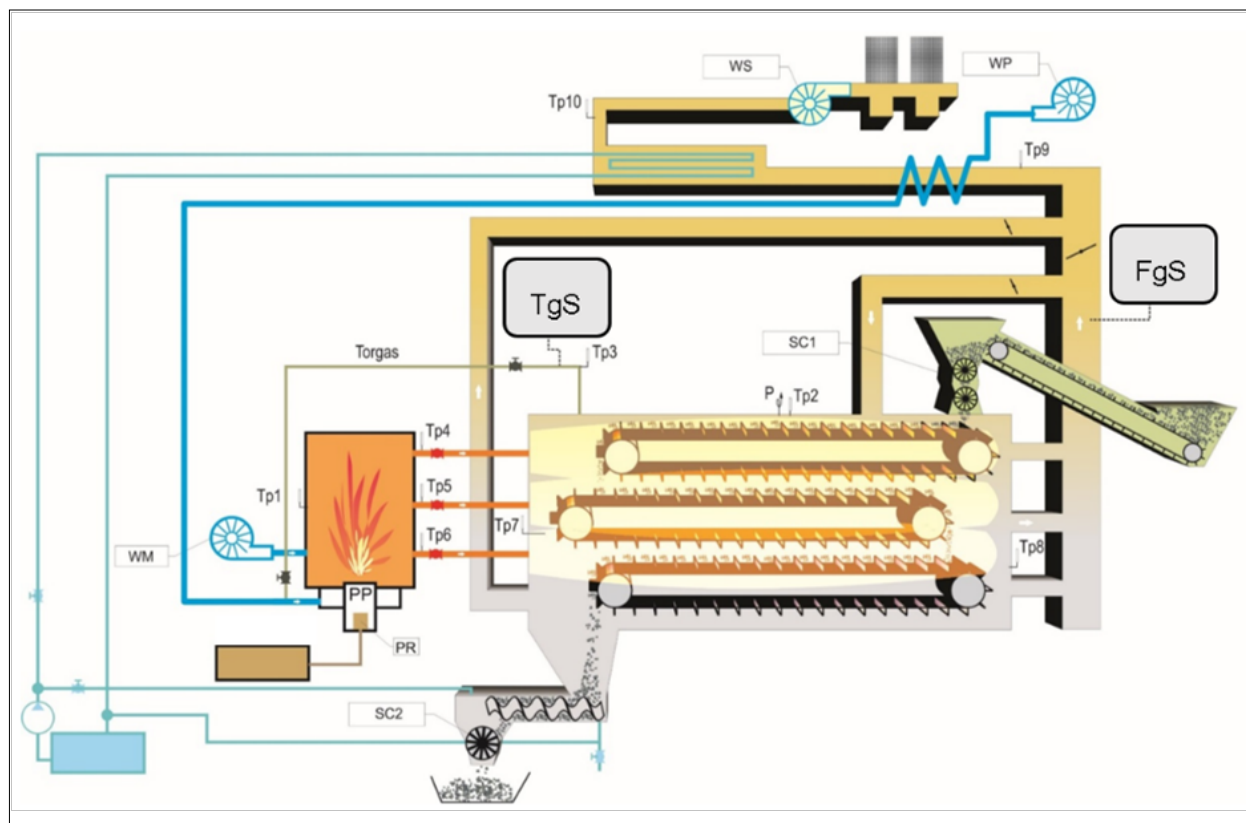
Spalanie może odbywać się w dedykowanych instalacjach, których w Polsce jest obecnie co najmniej 11, stosujące paleniska fluidalne (w większości) oraz rusztowe. W tym przypadku istotnym jest kwestia zapotrzebowania na nadwyżki produkowanego ciepła, która potencjalnie może wiązać się z do-

datkowym strumieniem przychodu, np. poprzez jej sprzedaż do sieci ciepłowniczej. Współspalanie możliwe jest zarówno w cementowniach (13 w Polsce), jak i w zakładach termicznej utylizacji odpadów komunalnych (TUOK).

Ważnym czynnikiem, decydującym o ekonomicznej zasadności utylizacji osadu ściekowego poprzez spalanie jest lokalizacja zakładu, tj. odległość pomiędzy oczyszczalnią ścieków, a potencjalnym odbiorcą. W przypadku cementowni korzystnym czynnikiem jest brak odpadu (popiołu), natomiast potencjalną barierą techniczną mogą być wymagania dot. wartości opałowej dostarczanego osadu ściekowego. W przypadku spalania i współspalania pamięta należy o konieczności zagospodarowania popiołu, przy czym w przypadku współspalania konieczne jest jego składowanie. Natomiast istnieją możliwości odzyskania składników mineralnych (zwłaszcza fosforu) zawartych w popiele, pochodzącym ze spalania osadu ściekowego, w postaci nawozu [8,9], co może stanowić dodatkowy strumień przychodów w przypadku instalacji spalania wyposażonych w taką technologię.

Toryfikacja - karbonizacja osadów ściekowych

Toryfikacja to proces cieplny o dużych możliwościach w zakresie modyfikacji oraz poprawy własności różnych paliw stałych niskiej jakości [10-11]. Ten proces termicznej waloryzacji paliw stałych zachodzi przy podwyższonej temperaturze (typowy zakres: 250°C do 300°C), przy braku (lub znacznym niedoborze) tlenu. Toryfikacja ma duże perspektywy jako proces wstępnej obróbki cieplnej paliwa stałego, zarówno na potrzeby technik spalania, jak i innowacyjnych rozwiązań takich jak szybka piroliza lub zgazowanie. Dotychczas opublikowanych zostało stosunkowo niewiele prac badawczych, odnośnie toryfikacji osadu ściekowego. Jednakże opublikowane prace potwierdzają potencjał toryfikacji w zakresie poprawy wartości



Rys. 2. Schemat pilotażowej wielopoziomowej instalacji do toryfikacji biomasy i odpadów, (Tp - termopara; TgS - punkt poboru próbki Torgazu; FgS - punkt poboru próbki spalin; WP - wentylator powietrza wtórnego; WM - wentylator powietrza pierwotnego; WS - wentylator spalin; SC1 i 2 - podajniki celkowe na wlocie i wylocie; PR - regulator ciśnienia; PP - palnik olejowy; P - manometr)

opałowej toryfikowanego osadu ściekowego, zwiększenia stopnia jego uwęglenia. Spośród opisywanych typów reaktorów, w których wykonywano toryfikację osadów ściekowych wymienić można reaktor obrotowy, śrubowy oraz rektor ze złożem fluidalnym. Na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej opracowano i wykonano pilotażową instalację do toryfikacji biomasy oraz odpadów [12]. Schemat instalacji przedstawiony jest na rys. 2.

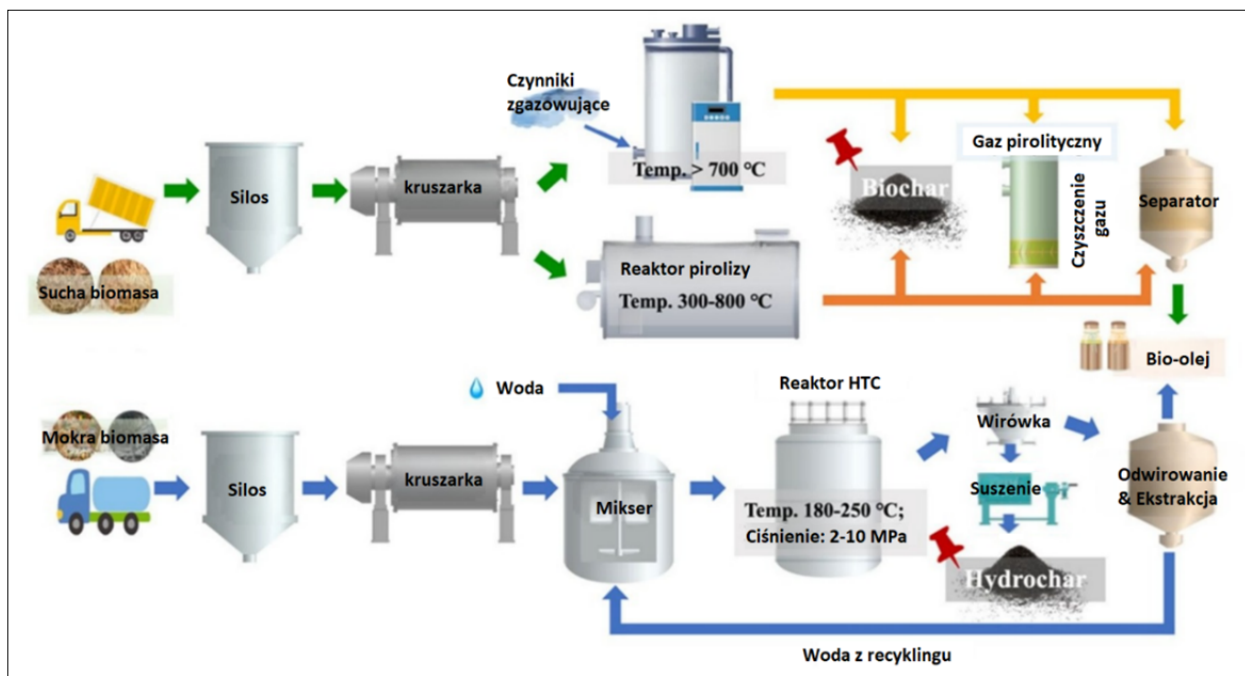
Na instalacji przeprowadzono, z sukcesem, próby toryfikacji wielu różnych typów biomas, w tym osadów ściekowych, a także próby suszenia materiałów [13, 14]. Dostarczanie ciepła do procesu odbywa się w sposób pośredni, tzn. spaliny pochodzące ze spalania torgazu są podawane do wnętrza potiek, po których przesuwana jest toryfikowana biomasa. Podstawową zaletą takiego roz-

wiązania jest wysoka temperatura potiek, uniemożliwiająca kondensację obecnych w torgazie substancji smolistych na ich powierzchniach, co zapobiega klejeniu się materiału. Dodatkowo instalacja jest odporna na nagłe, czasowe przyrosty stężenia tlenu w spalinach, co przy kontakcie bezpośrednim mogłoby doprowadzić do zapłonu przetwarzanej biomasy. Instalacja jest w stanie pracować w reżimie auto termicznym, tzn. zaspokajając swoje potrzeby cieplne poprzez spalanie torgazu, co jednak w dużym stopniu zależy od właściwości przetwarzanego materiału. W komorze spalania, zintegrowanej z toryfikatorem, zamontowany jest palnik olejowy, który stanowi podstawowe źródło ciepła w trakcie rozruchu oraz pełni funkcję płomienia pilotującego, tym samym minimalizując ryzyko zaniku płomienia w komorze i związane z tym zagrożenia wybuchowe.

Głównym produktem toryfikacji jest biowęgiel, który może stanowić paliwo stałe lub po chemicznej lub fizycznej aktywacji ma duży potencjał, aby stać się przyjaznym dla środowiska procesem konwersji do produkcji szerokiej gamy produktów.

Biowęgiel można też uzyskać z procesu karbonizacji hydrotermalnej (HTC), pirolizy, zgazowania.

Rysunek 3 pokazuje schematyczny diagram procesów produkcji różnych rodzajów biowęgla, z ich wydajnościami w kolejności HTC>piroliza>zgazowanie. Te biowęgle różnią się znacznie właściwościami chemicznymi i fizycznymi ze względu na warunki ich produkcji i dobór surowców. Czynniki takie jak temperatura pirolizy, szybkość ogrzewania, czas przebywania, atmosfera, ciśnienie gazu i rodzaje odpadów biomasy odgrywają kluczową rolę w wydajności i właściwo-



Rys. 3. Piroliza i hydrotermalna karbonizacja biomasy do produkcji biowęgla [2]

ściach fizyko-chemicznych otrzymanych biowęgla (w tym rozkład wielkości porów, powierzchnia właściwa, zdolność wymiany kationów, zdolność retencji wody, itp.). W rezultacie właściwości te decydują o zastosowaniu biowęgla.

Oprócz tradycyjnego zastosowania do produkcji biowęgla i innych nośników energii, piroliza może wytwarzać produkty do zastosowań środowiskowych, katalitycznych, elektronicznych i rolniczych. Biowęgle mogą stanowić materiały do sorpcji zanieczyszczeń ciekłych, gazowych (VOC), a umieszczone w glebie mają duży udział w dekarbonizacji (CCS). Ponadto pełnią rolę zamiennika czynników odżywczych.

Ostatnio zaproponowano biowęgiel, jako niewielki zamiennik cementu w materiałach konstrukcyjnych, co skutkuje zwiększoną wytrzymałością. Proces produkcji biowęgla i jego składniki są bardziej ekonomiczne i przyjazne dla środowiska niż cement [2].

Ostatnio intensywne prace prowadzone są nad odmiennym procesem torfikacji tzw. hydrotermalną karbonizacją w zastosowaniu do osadów ściekowych.

Toryfikacja hydrotermalna (HTC) jest to proces termicznej waloryzacji, zwy-

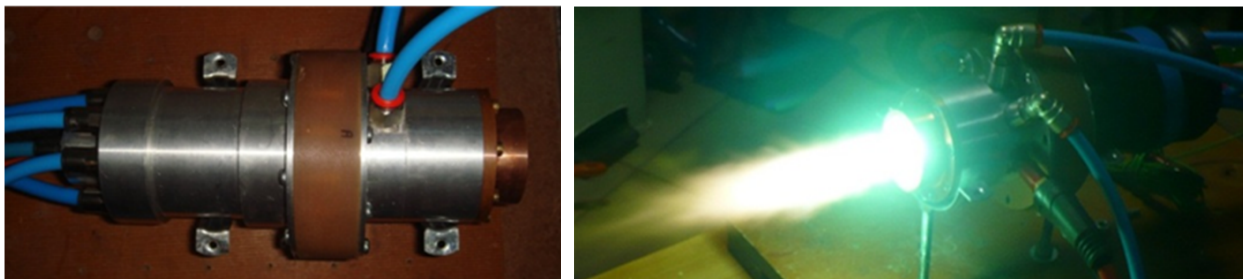
kle przeprowadzany w temperaturze od 200°C do 260°C, w wodzie podkrytycznej pod ciśnieniem nasycenia. Pomiędzy 200°C, a 280°C woda zachowuje się jak rozpuszczalnik niepolarny. Proces obejmuje wiele współbieżnych reakcji, z wieloma różnymi produktami, zwłaszcza gdy jest wykonywany z wykorzystaniem osadów ściekowych. Hydroliza to pierwszy etap procesu HTC. Po hydrolizie następuje odwodnienie i dekarboksylacja. Odwodnienie zmniejsza ilość grup hydroksylowych (OH). Struktury koloidalne ulegają zniszczeniu, co zmniejsza ilość grup hydrofilowych i sprzyja powstawaniu gazów (głównie CO₂). Można również wykryć inne gazy, takie jak: CO, CH₄ i H₂ (w przypadku procesu katalitycznego). Zmniejszenie ilości grup OH powoduje również niższy stosunek O/C. Dekarboksylacja zmniejsza ilość grup karboksylowych (COOH) i karbonylowych (C=O), a także nieznacznie obniża stosunek O/C w produkcie stałym. Następnie następuje polimeryzacja i aromatyzacja. Karbonizacja hydrotermalna jest również zdolna do usunięcia części nieorganicznej frakcji osadów-biomasy. HTC osadów ściekowych ma znaczny potencjał

ze względu na proces późniejszego odwadniania. Możliwe jest usunięcie dużej ilości wody mechanicznymi prasami, co w konsekwencji znacznie zmniejsza zapotrzebowanie na ciepło do suszenia. Potencjalne zalety zastosowania HTC do osadu ściekowego to zmniejszenie ogólnej masy stałej, odkażanie osadu i wyeliminowanie problemów związanych z emisją zapachów z instalacji, poprawa jego właściwości paliwowych. Ponadto proces ten pozwala na odzysk substancji odżywczych dla gleby - w tym związków fosforu.

Z procesów torfikacji uzyskany biowęgiel stanowi dobry materiał wsadowy do procesów zagazowania, m. in. z powodu większej kaloryczności od surowego osadu, a zarazem pozwala na minimalizację w syngazie ciężkich węglodorów.

Zgazowanie i wityfikacja - reaktory tradycyjne oraz plazmowe

Zgazowanie to proces oparty na częściowym utlenieniu substratów, którymi są paliwa stałe, przy czym czynnik zga-



Rys. 4. Źródło plazmy - plazmotron wewnątrz przed (po lewej) i w trakcie pracy na argonie [19]

zowujący podawany jest w stosunku podstechiometrycznym. Ciepło pochodzące z reakcji egzotermicznych jest wykorzystywane do odparowania wody oraz odgazowania paliwa stałego. Następnie w strefie rekombinacji ciepło jest wykorzystywane także do reakcji endotermicznych. W wyniku procesu powstaje gaz składający się głównie z wodoru, tlenu węgla, dwutlenku węgla, tlenu, metanu i pary wodnej. W gazie, w zależności od parametrów procesu i konfiguracji aparatury procesowej występują także inne produkty węglowodorowe, kondensujące we względnie wysokich temperaturach, w stosunkowo niewielkim stężeniu.

W przypadku technologii zgazowania różnego rodzaju biomasy odpadowej, wykorzystuje się szereg metod uwzględniających także konieczność wtyfikacji dominujących pozostałości nieorganicznych. Jedną z metod jest proces Purox, opatentowany w 1973 r. Wykorzystywany jest tu reaktor ze złożem stałym, przeciuprądowy, z ciekłym odprowadzaniem szlaki. Czynnikiem zgazującym jest tlen. Jednostka o nominalnej przepustowości 200 ton na dobę została zbudowana w Charleston, wykorzystująca odpady komunalne jako paliwo. Zgazowanie biowęgli z osadów ściekowych stanowi rozwiązanie, które może stanowić optymalne rozwiązanie pod warunkiem uzyskania dobrego składu syngazu i zeszkłonego-zwytrefikowanego popiołu mogącego stanowić użyteczny produkt.

Z racji wysokiej gęstości energii oraz możliwości uzyskania wysokich temperatur (kilka tysięcy stopni Celsjusza) technologie plazmowe wydają się być

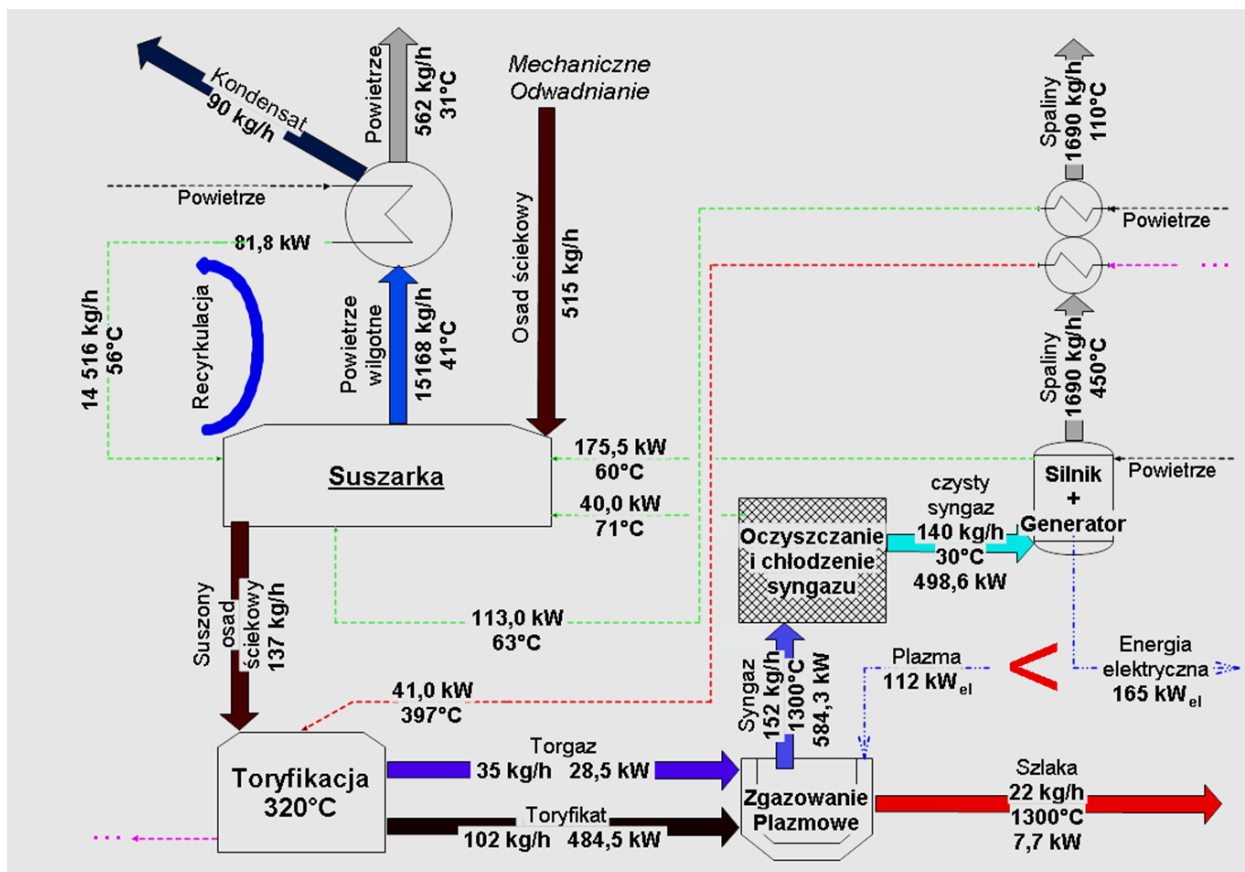
optymalnym i skutecznym rozwiązaniem utylizacji osadów ściekowych. Plazma jest uznawana za czwarty stan skupienia i składa się z jonów, elektronów oraz cząstek neutralnych. Plazma w warunkach ziemskich powstaje zwykle wskutek zjonizowania gazów poprzez dostarczenie energii z zewnętrznego źródła. Takim źródłem może być wysokie napięcie generujące łuk elektryczny, strumień mikrofal lub promieniowanie elektromagnetyczne (przykład generatora plazmy - plazmotron wewnątrz - pokazany jest na rys. 4). Plazmę można podzielić na wysokotemperaturową (równowagową), termiczną (quasi-równowagową) oraz nietermiczną (nierównowagową). Parametrem charakterystycznym dla każdej z nich są temperatury elektronów, jonów oraz cząstek neutralnych. W plazmie równowagowej wszystkie typy cząstek są ze sobą w równowadze termicznej, zaś w quasi-równowagowej taka równowaga występuje jedynie lokalnie.

Korzystną cechą instalacji wykorzystujących plazmowe przekształcanie odpadów jest wtyfikacja części mineralnej. Zeszkłona pozostałość stała może być bezpiecznie składowana, gdyż zeszkłona postać znacznie utrudnia wypukiwanie związków chemicznych zawartych w szlacie.

Obecnie istnieje wiele technologii wykorzystujących zgazowanie plazmowe w termicznej konwersji odpadów komunalnych. Jedną z nich jest proces zaprojektowany przez kanadyjską firmę Alter NRG (<https://netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasification/westinghouse>) oraz instalacja opisana w pracy [15].

Odnosząc się ściśle do zgazowania osadów ściekowych jest obecnie niewiele informacji na temat instalacji przemysłowych, a także jest ograniczona ilość publikacji naukowych na temat ich zgazowania. Montouris et al. stwierdził, że wykorzystując model równowagowy GasifEq zgazowanie plazmowe osadów ściekowych umożliwi uzyskanie energii elektrycznej [16]. Zakładając wydajność 250 t/d osadów ściekowych z wilgotnością 68%, zamodelowana instalacja odznaczała się uzyskiem energii elektrycznej w instalacji o mocy 2.85 MW. Konwersja smół jest kluczowa w kontekście procesu zgazowania, z racji, że ich obecność może powodować problemy eksploatacyjne. Ich pozbycie się jest kluczowe, jeśli planowane jest wykorzystanie gazu w turbinach, silnikach, bądź w dalszych procesach syntezy. Dwie grupy badawcze przeprowadziły eksperymenty z dwustopniowymi instalacjami plazmowymi [18, 19]. W obu przypadkach zastosowanie plazmy poprawiło jakość gazu. Podczas badania przeprowadzonego przez Striugas wykorzystanie łuku plazmowego pozwoliło uzyskać 99% konwersję smół, podczas gdy pozostały gaz nie uległ większym zmianom [18].

Zgazowanie plazmowe jest dużo bardziej elastyczne w odniesieniu do jakości paliwa w porównaniu ze standardowymi zgazownikami. W przypadku osadów ściekowych jest pożądane pozbycie się wilgotności w takim stopniu, w jakim to tylko możliwe, ażeby móc poprawić bilans cieplny instalacji, ze względu na wykorzystywanie, w procesie zgazowania plazmowego, energii elektrycznej.



Rys. 5. Bilans masy i energii innowacyjnej instalacji do termicznego przekształcania osadów ściekowych

Koncepcja wielostopniowej instalacji do termicznego przekształcania osadów ściekowych

Koncepcja wielostopniowej instalacji do termicznego przekształcania osadów ściekowych wykorzystuje synergię pomiędzy kilkoma różnymi technologiami / procesami, w celu uzyskania jej samowystarczalności energetycznej. Jest to szczególnie ważne w kontekście, kosztów nośników energii. Stąd wstępna konwersja osadów do biowęgla i/lub kolejno tanie energetycznie odwadnianie oraz zgazowanie plazmowe nie generuje żadnych odpadów, a więc mieści się w idei gospodarki w cyklu zamkniętym.

Proponowana instalacja, pokazana na rys. 5 składa się z następujących modułów:

- suszenie,
- odzysk ciepła utajonego,
- toryfikacja sucha,
- plazmowe zgazowanie,
- chłodzenie i oczyszczanie syngazu,
- silnik tłokowy wraz z generatorem.

Na rys. 5 pokazany jest bilans masy i energii proponowanej instalacji, obliczony dla osadu ściekowego po odwadnianiu mechanicznym o wilgotności 85%. Suszenie jest najbardziej kosztownym energetycznie procesem w obrębie osłony bilansowej instalacji, dlatego istotnym założeniem jest maksymalizacja odzysku ciepła w obrębie tejże instalacji i maksymalne wykorzystanie wszystkich dostępnych źródeł ciepła, w tym ciepła utajonego. W przypadku proponowanej instalacji, oprócz odzyskiwania ciepła utajonego, przewidywane jest wyko-

rzystanie innych niskotemperaturowych źródeł ciepła, takich jak:

- ciepło pochodzące z chłodzenia silnika,
- ciepło pochodzące z intercoolera (silnik),
- entalpia fizyczna syngazu i spalin,
- ciepło pochodzące z sekcji chłodzenia i oczyszczania syngazu,
- ciepło kondensacji oparów.

Przewidywane jest także wykorzystanie entalpii fizycznej spalin pochodzących ze spalania syngazu w silniku (źródło wysokotemperaturowe). Jednakże w tym wypadku priorytetem jest zaspokojenie potrzeb cieplnych procesu toryfikacji, z uwagi na konieczność uzyskania znacznie wyższych temperatur na potrzeby tego procesu. Niemniej jednak moc cieplna na potrzeby instalacji tory-

fikacji, jest stosunkowo niewielka w porównaniu z poprzedzającym go suszeniem. Z tego względu nadwyżka ciepła może także być kierowana do procesu suszenia. Wykorzystanie procesu torfikacji to z jednej strony dodatkowy proces oraz związany z tym koszt energetyczny. Z drugiej strony, ze względu na stosunkowo wysokie temperatury, wymagania co do wielkości urządzenia są znacznie mniejsze w porównaniu z suszeniem, co wiąże się z kosztem tego urządzenia. Jednocześnie torfikacja pozwala efektywnie „dosuszać” utylizowany suszony osad ściekowy, przed układem zgazowania, wstępnie go odgazować oraz podnieść jego reaktywność, co przekłada się na wymagany czas przebywania w gazogeneratorze, a tym samym na jego wielkość [18].

Wykorzystanie mokrej torfikacji powoduje wg. wstępnych szacunków mniejsze zapotrzebowanie na konsumpcję energii dla tzw. „potrzeb własnych”, co stanowi temat kolejnych prac.

Na szczególną uwagę zasługuje wykorzystanie zgazowania plazmowego. Z jednej strony proces ten konsumuje znaczne ilości energii elektrycznej. Z drugiej strony jest on znacznie mniej wrażliwy na wahania jakości przetwarzanego osadu ściekowego oraz pozwala uzyskać stosunkowo czysty gaz, ograniczając tym samym nakłady inwestycyjne na układ oczyszczania gazu. Względnie wysokie obciążenie cieplne reaktora, jakie można uzyskać dzięki wykorzystaniu plazmy pozwala na uzyskanie kompaktowej budowy. Co więcej, produktem ubocznym jest wityrykat (zeszklona substancja mineralna), który potencjalnie można wykorzystać np. w budownictwie. Zgazowanie pozwala na zastosowanie bardziej kompaktowego układu oczyszczania gazu, ze względu na znacznie mniejszy, w porównaniu do spalania, strumień objętości gazu kierowanego do oczyszczania. Energia elektryczna uzyskana przy pomocy silnika i generatora pozwala na zaspokojenie zapotrzebowania gazogeneratora plazmowego na energię elektryczną.

Podsumowanie

Opłacalność tradycyjnych technologii utylizacji osadów ściekowych jest różna, w zależności od skali przedsięwzięcia, czyli od wielkości populacji obsługiwanej przez daną oczyszczalnię ścieków. Z tego względu w dalszym ciągu istnieje konieczność poprawy rozwiązań stosowanych w mniejszej skali (poniżej 3000 ton suchej masy na rok). Kilkustopniowa instalacja ma szansę być konkurencyjna ekonomicznie ze względu na zastosowanie nowoczesnych technologii pozwalających na ograniczenie gabarytów stosowanych urządzeń ze względu na wysoką gęstość energii (zgazowanie plazmowe) oraz stosowanie technik wstępnej waloryzacji poprawiających reaktywność substratu (torfikacja). W połączeniu z kompaktowym i modułowym charakterem instalacji daje to szansę na ograniczenie kosztów inwestycyjnych. Ponadto proponowana instalacja umożliwia obniżenie kosztów eksploatacyjnych, poprzez uzyskanie pełnej samowystarczalności pod względem energetycznym, zarówno w przypadku ciepła, jak i energii elektrycznej. To ostatnie może mieć szczególnie duże znaczenie w przypadku nowoczesnych oczyszczalni ścieków, gdzie zainstalowane są biogazownie wraz z silnikami kogeneracyjnymi, gdyż potencjalnie pozwala to na zwiększenie strumienia przychodów z instalacji ze względu na zwiększenie sprzedaży subsydiowanej energii elektrycznej, w związku z uznaniem osadów ściekowych jako OZE.

Ogólnie rzecz biorąc, wydaje się prawdopodobne stwierdzenie, że technologia zgazowania z ciekłym odprowadzaniem żużla wydają się być najbardziej obiecujące, ponieważ pozwala na przekształcenie pozostałości nieorganicznych w produkt szklisty mogący stanowić tzw. sztuczne kruszywo. Spośród wszystkich rozwiązań takiego zgazowania najbardziej korzystne wydaje się zgazowanie plazmowe.

Rozwój konstrukcji palników plazmowych należy traktować jako zachętę do

projektowania i opracowywania zaawansowanych technologii plazmowych do przetwarzania odpadów z odzyskiem energii i materiałów o wartości dodanej. Ponadto technologia plazmowa może odgrywać istotną rolę w koncepcji P2X (power-to-x), ze względu na możliwości regulacji (np. od 10 do 100% pobieranej mocy).

W obecnych czasach utylizacja osadów ściekowych za pomocą plazmy jest jednym z głównych zainteresowań przemysłu oczyszczania ścieków. Rozkład osadu w wysokiej temperaturze (przy użyciu palnika plazmowego) umożliwia bezpieczne odzyskiwanie odpadów i wyklucza zanieczyszczenie metalami ciężkimi powstałego produktu bogatego w P. Technologia plazmowa ma tę zaletę, że oprócz produktu bogatego w P, który może być praktycznie wolny od metali ciężkich, oferuje również bardzo interesujące produkty towarzyszące. Wytworzony bezsmolowy, bogaty w wodór gaz do syntezy (syngaz) może być wykorzystany w kolejnym cyklu przetwarzania odpadów, jako paliwo do produkcji energii (np. CHP).

Obróbka plazmą wysokotemperaturową umożliwia osiągnięcie wysokiego stopnia konwersji produktu i bezpieczeństwa, dzięki niezwykle wysokiej entalpii procesu. Wszystkie te zalety można połączyć w nową zaawansowaną strategię waloryzacji. Prawdopodobną instalacją przemysłową może być zrównoważona, zdecentralizowana produkcja wodoru z wszelkich odpadów, takich jak osad. Wytwarzanie czystego wodoru ze stosunkowo czystego gazu syntezowego to dobrze znana, wydajna i prosta procedura (nowa instalacja w Japonii). Technologia zgazowania plazmowego może być ekonomiczną i przyjazną dla środowiska alternatywą do produkcji gazu syntezowego, który z kolei może być wykorzystany do produkcji metanolu z wykorzystaniem w procesie CO₂, jako reagenta.

Pomimo wymaganej energii elektrycznej, która jest potrzebna do wytwarzania plazmy i może być uważana za wadę tej technologii, przeważają zalety do

tej technologii stosowane w utylizacji osadów ściekowych.

Wśród zalet należy wspomnieć, że taką technologię można łatwo kontrolować, przy znacznie prostszym uruchomieniu. Ponadto zastosowanie plazmy umożliwi wyższy stosunek pary do zgazowania bez utraty korzyści zeszklania i czyni taką technologię mniej podatną na zmiany jakości surowca. Wysoką zawartość pary można uznać za skuteczny środek do uzyskania stosunkowo wysokich wartości opałowych gazu generatorowego przy stosunkowo wysokim stężeniu wodoru. Większość technologii zgazowania żużła koncentrowała się dotychczas na zgazowaniu odpadów, gdzie potrzebna jest znacznie większa skala (150 000 ton/r. lub więcej). Spośród

wszystkich technologii plazma wydaje się być najbardziej elastyczną i najlepiej nadającą się do konstrukcji modułowych. Ogólnie rzecz biorąc, takie technologie są technicznie wykonalne z dostępnymi odniesieniami handlowymi.

HTC oferuje ważne usprawnienia, takie jak: ulepszone odwadnianie mechaniczne, usprawnienie suszenia, a także dodatkowy efekt synergii - zmniejszenie/eliminacja zapotrzebowania na flokulanty. Ponadto nie należy pomijać rozkładu odpornej biomasy, ponieważ może to zwiększyć produkcję biogazu w zakładzie. Udoskonalenia mechanicznego odwadniania mają kluczowe znaczenie dla takich instalacji, ponieważ pozwalają na zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło suszenia.

Ogólnie rzecz biorąc, zarówno etapy HTC, jak i zgazowania plazmowe osadów ściekowych w połączeniu z CCS, są technicznie wykonalne. Niemniej jednak usprawnienia i dostrojenie parametrów procesu są niezbędne, aby zmaksymalizować efekt synergii, a tym samym poprawić przewagę konkurencyjną koncepcji.

Prace zrealizowano częściowo w ramach projektu "Negative CO2 emission gas power plant"-NOR/POLNORCCS/NEGATIVE-CO2-PP/0009/2019-00, finansowany z Mechanizmu Norweskiego; 2014-2021 POLNOR 2019-Development of CO2 capture solutions integrated in power and industry processes. □

Literatura:

- [1] Eurostat. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater n.d. <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/mapToolClosed.do?tab=map&init=1&plugin=1&language=en&pcode=ten00030#> (accessed August 29, 2018).
- [2] *Biochar* volume 4, Article number: 59 (2022), Biochar as construction materials for achieving carbon neutrality, [Yuying Zhang](#), [Mingjing He](#), [Lei Wang](#), et al.
- [3] Kacprzak M, Neczaj E, Fijałkowski K, Grobelak A, Grosser A, Worwag M, et al. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environ Res* 2017;156:39-46. doi:10.1016/j.envres.2017.03.010.
- [4] Cieślak BM, Namieśnik J, Konieczka P. Review of sewage sludge management: Standards, regulations and analytical methods. *J Clean Prod* 2015;90:1-15. doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.031.
- [5] Pajak T. Thermal Treatment as sustainable sewage sludge management. *Environ Prot Eng* 2013;39:41-53. doi:10.5277/EPE130205.
- [6] Werle S. Sewage Sludge-To-Energy Management in Eastern Europe: A Polish Perspective. *Ecol Chem Eng S* 2015;22:459-69. doi:10.1515/eces-2015-0027.
- [7] Magdziarz A, Wilk M, Kosturkiewicz B. Investigation of sewage sludge preparation for combustion process. *Chem Process Eng - Inz Chem i Proces* 2011;32:299-309. doi:10.2478/v10176-011-0024-4.
- [8] Donatello S, Cheeseman CR. Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review. *Waste Manag* 2013;33:2328-40. doi:10.1016/j.wasman.2013.05.024.
- [9] Gorazda K, Tarko B, Wzorek Z, Kominko H, Nowak AK, Kulczycka J, et al. Fertilisers production from ashes after sewage sludge combustion - A strategy towards sustainable development. *Environ Res* 2017;154:171-80. doi:10.1016/j.envres.2017.01.002.
- [10] Moscicki KJ, Niedzwiecki L, Owczarek P, Wnukowski M. Commoditization of biomass: Dry torrefaction and pelletization-a review. *J Power Technol* 2014;94:233-49.
- [11] Nhuchhen D, Basu P, Acharya B. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. *Int J Renew Energy Biofuels* 2014;2014:1-56. doi:10.5171/2014.506376.
- [12] Pawlak-Kruczek H, Brzdekiewicz A, Madaj W. Sposób autotermicznej waloryzacji biomasy lub odpadów organicznych i urządzenie do autotermicznej waloryzacji biomasy lub odpadów organicznych. PL 227979 B1, 2018.
- [13] Pawlak-Kruczek H, Krochmalny KK, Niedzwiecki Ł, Mościcki KJ. Slow pyrolysis of the sewage sludge with additives: calcium oxide and lignite. In: Sakkestad BA, editor. *Clean. Clean Coal Conf. Proc. 42nd Int. Tech. Conf. Clean Energy, Clearwater (FL): Coal Technologies Associates; 2017.*
- [14] Pawlak-Kruczek H, Zgóra JM, Krochmalny KK. Characterization of torrefied biomass depends on process condition. *Clean. Clean Coal Conf. Proc. 40th Int. Tech. Conf. Clean Coal Fuel Syst., Clearwater (FL): 2015.*
- [15] Biomass Conversion and Biorefinery <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02434-z>; A comprehensive review of the application of plasma gasification technology in circumventing the medical waste in a post-COVID-19 scenario, 2022.
- [16] Mountouris A, Voutsas E, Tassios D. Plasma gasification of sewage sludge: Process development and energy optimization. *Energy Convers Manag* 2008;49:2264-71. doi:10.1016/j.enconman.2008.01.025.
- [17] Kordylewski W, Michalski J, Ociepa M, Wnukowski M. A microwave plasma potential in producer gas cleaning - preliminary results with a gas derived from a sewage sludge. *VI Konf. Nauk. Energ. Gazow. 2016*, Gliwice, Poland: Silesian University of Technology; 2016.
- [18] Striugas N, Valinčius V, Pedišius N, Poškars R, Zakarauskas K. Investigation of sewage sludge treatment using air plasma assisted gasification. *Waste Manag* 2017. doi:10.1016/j.wasman.2017.03.024.
- [19] Tadeusz Maczka, Technologie plazmowego zgazowania biomasy i odpadów organicznych dla wytwarzania paliw płynnych, WARSZAWA 2014; Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki.

Przypisy

- 1 W przypadku niektórych krajów dostępne jedynie dane z lat poprzedzających 2015 r.: AT, FR, SE, NL, EL (2014); LV, CH, EE, BA (2013); PT, LU, ES, UK, FI (2012); BE, IT, DK (2010).