



# Zastosowania fluidyzacji w gospodarce odpadami

The use of fluidization in waste management

dr hab. inż. Tomasz JAWORSKI<sup>1</sup>, mgr inż. Agata WAJDA<sup>2</sup>

Autorzysą pracownikami Katedry Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechniki Śląskiej  
tel.: 032 2371213  
1. e-mail: tomasz.jaworski@polsl.pl,  
2. e-mail: agata.wajda@polsl.pl



## W KILKU SŁOWACH

Rocznie w Polsce powstaje około 10 mln Mg odpadów komunalnych, spośród których ponad połowa w dalszym ciągu jest składowana. Rozwiązaniem tego problemu jest między innymi zwiększenie poziomów recyklingu oraz termicznego przekształcania odpadów. Fluidyzacja jest procesem zawieszania drobnych cząstek ciał stałych w przepływającym od dołu płynie. Technika jest z powodzeniem wykorzystywana w procesach jednostkowych takich jak: suszenie, mieszanie, transport, oczyszczanie i odpylanie, termiczne przekształcanie. W praktycznym ujęciu w gospodarce odpadami znajduje zastosowanie w recyklingu, przygotowaniu odpadów do dalszych przekształceń, termicznym przekształcaniu oraz oczyszczaniu gazów spalinowych.



## SUMMARY

Annually there are 10 million Mgs of municipal waste in Poland, of which more than half is still stored. The solution to this problem, among others, is increasing the level of the recycling and thermal transforming of waste. Fluidization is a process of suspension of fine solid particles in a liquid flowing from the bottom. The technique has been successfully used in the unit processes such as drying, blending, transport, cleaning and dust removal, thermal processing. In practical terms in waste management, the technique is used in recycling, preparation of waste for further restructuring, incineration and treatment of exhaust gases.

Rocznie w Polsce wytwarzanych jest ponad 10 mln Mg samych tylko odpadów komunalnych, spośród których 53% zostaje poddanych składowaniu, 21% zostaje poddanych recyklingowi, 15% unieszkodliwia się termicznie oraz 11% przetwarza biologicznie (2014). Porównując to ze średnią Unii Europejskiej, gdzie poziomy wyżej wymienionych wskaźników wynoszą odpowiednio: 31%, 27%, 25% oraz 15%, można zauważyć duże pole do działania w zakresie poprawy gospodarowania odpadami. W szczególności należy zwrócić uwagę na zwiększanie udziału termicznego przekształcania odpadów oraz ich recyklingu. Dodatkowo ustawodawstwo polskie, dostosowując się do prawa po-

zostałych krajów członkowskich, nakazuje inny niż składowanie rodzaj postępowania z odpadami o pewnej określonej wartości opałowej. Wskazane czynniki wpływają na obserwowany obecnie rozwój technik niezbędnych w realizacji spójnej gospodarki odpadami, wśród których wyróżnić można między innymi fluidyzację. Niesie ona ze sobą wiele korzyści, zarówno ekonomicznych jak i środowiskowych oraz co istotne znajduje coraz to szersze zastosowanie w gospodarce odpadami. Co więcej można stwierdzić, że fluidyzacja może być wykorzystana na każdym etapie postępowania z odpadami, począwszy od podziału odpadów na określone frakcje, oczyszczania i przygotowania



materiału odpadów do dalszych przekształceń, termiczne unieszkodliwianie odpadów, zwłaszcza problematycznych oraz oczyszczanie i odpylanie produktów procesów termicznych[1,2].

## Fluidyzacja

Fluidyzacją nazywa się proces zawieszania drobnych cząstek ciał stałych w medium przepływającym z dołu do góry, które może być cieczą lub gazem. Uogólniając można mówić o przepływającym płynie, który przenikając przez warstwę materiału porowatego, rozluźnia strukturę złoża, zwiększając jego porowatość oraz, w dalszym etapie powoduje unoszenie poszczególnych cząstek. Podczas przepływu płynu przez porowatą warstwę nieruchomą materiału stałego następuje spadek ciśnienia spowodowany oporem ośrodka porowatego. Im większa będzie prędkość przepływającego medium, tym wyższe będą opory warstwy stałej, i co za tym idzie, większe spadki ciśnienia. Stopniowe zwiększanie poszczególnych parametrów doprowadzi do osiągnięcia stanu fluidalnego przez złożo. Oznacza to, iż odległości pomiędzy poszczególnymi ziarnami są na tyle spore, że zachowują się jak cząstki indywidualne, a całe złożo przyjmuje właściwości cieczy. Technologia fluidalna zapewnia maksymalne wymieszanie materiału złoża, co pozwala na utworzenie się równomiernego pola temperatury[3,4].

Fluidyzacja w latach ubiegłych, jak i obecnie, najczęściej jest stosowana w przemyśle spożywczym, przede wszystkim w procesach suszenia, chłodzenia, podgrzewania oraz zamrażania. Aktualnie techniki fluidalne są kojarzone z różnego rodzaju procesami przemysłowymi oraz efektywnym wykorzystaniem znacznych ilości różnego rodzaju paliw oraz odpadów, które są w tym przypadku surowcem energetycznym. Paleniska fluidalne są mocno rozwijaną gałęzią energetyki, a należy zauważyć, że fluidyzacja znajduje zastosowanie w różnych sektorach gospodarki. Metoda ta jest wykorzystywana w wielu procesach technologicznych, jak i jest integralną częścią urządzeń o zróżnicowanym przeznaczeniu. Procesy jednostkowe, w których fluidyzacja znalazła zastosowanie to: suszenie, mieszanie, transport, nanoszenie

powłok na określone materiały, sortowanie i klasyfikacja materiałów oraz termiczne przekształcanie paliw i odpadów. Poniżej zestawiono korzyści oraz wady wynikające z zastosowania techniki fluidalnej[3-5].

Zalety fluidyzacji	Wady fluidyzacji
Intensywna wymiana ciepła i masy	Ścieranie powierzchni cząstek
Izotermiczność złoża fluidalnego	Erozyjne działanie na powierzchnie ścian i cząstek zanurzonych w złożu
Duża powierzchnia kontaktu cząstka-płyn	Kanałowanie i tłokowanie
Bardzo dobre wymieszanie materiału złoża z płynem	Spore zapotrzebowanie instalacji na energię

Tab.1. Charakterystyka procesu fluidyzacji [3-5,7]

Urządzenie realizujące proces fluidyzacji stanowi komora (w przypadku procesów termicznych- wyłożona materiałem ogniotrwałym) ze złożem inertnym składającym się z piasku kwarcowego lub innego materiału fluidyzacyjnego jak tlenek glinu czy węglan wapnia (sorbenty odsiarczające spaliny). Elementem instalacji, który warunkuje przeprowadzanie procesu fluidyzacji jest ruszt podtrzymujący złożo oraz system doprowadzania i rozprowadzania czynnika fluidyzującego w strefie znajdującej się pod rusztem[3,5,7].

Jedną z ważniejszych cech złoża fluidalnego, wyróżniającą tę technikę jest przyjęcie przez materiał stały złoża własności, jakie posiada ciecz, takie jak:

- pływanie przedmiotów lekkich,
- wypływ z otworu,
- proporcjonalność spadku ciśnienia między dwoma przekrojami w warstwie do ładunku statycznego materiału złoża zawartego między tymi dwoma przekrojami,
- poziomowość powierzchni,
- wyrównywanie poziomów w naczyniach połączonych[7].

Warto również przytoczyć tu tak zwaną klasyfikację cząstek według Geldarta, która została dokonana w oparciu o charakterystykę cząstek stałych poddawanych fluidyzacji. Szczególnie jest to ważne w przypadku odpadów wykorzystywanych w technice fluidalnej jako składnika warstwy[8].

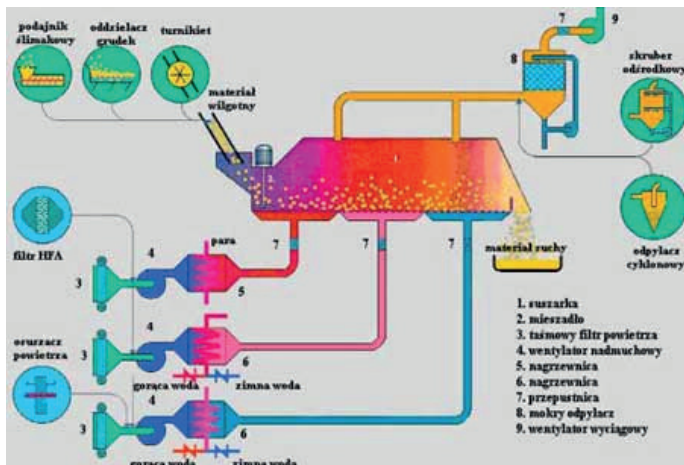


Grupa	Charakterystyka
A	Materiały o rozmiarze cząstek 20-100 µm, i gęstości poniżej 1400 kg/m <sup>3</sup> ; cząstki łatwo przechodzą w stan fluidalny, tworząc złoża jednorodne lub pęcherzykowe z drobnymi rozmiarami pęcherzy; należą tu wysoko aktywne zeolity;
B	Materiały o rozmiarze cząstek 40-500 µm i gęstości zawartej w przedziale 1400-4000 kg/m <sup>3</sup> ; cząstki łatwo przechodzą w stan fluidalny, tworząc złoża pęcherzykowe o dużej średnicy pęcherzy, należą tu w większości substancje poddawane fluidyzacji z przemysłu metalurgicznego;
C	Materiały o średnicy ziarna nie przekraczającej 30 µm; można je scharakteryzować jako spójne i bardzo drobne pudry; złoża tych cząstek bardzo trudno wprowadzić w stan fluidalny, najczęściej nie mogą pokonać sił międzycząsteczkowych, gaz kanałuje takie złoża; należą tu pudry kosmetyczne, talk, skrobia;
D	Materiały o średnicy ziarna powyżej 600 µm; charakteryzują się wysoką gęstością; złoża takich cząstek są trudne do fluidyzacji; tworzą się tu duże pęcherze, utrudniające proces; należą tu suszone ziarna, palone ziarna kawy, groch, wiele spiekanych metali;

Tab.2. Klasyfikacja cząstek według Geldarta [8]

**Suszenie**

Suszenie materiałów w warstwie fluidalnej jest efektywnym procesem, możliwym dzięki własnościom złoża fluidalnego. Przede wszystkim duża powierzchnia kontaktu cząstki materiału z gazem, bardzo dobre wymieszanie oraz intensywne wymiana ciepła i masy umożliwiają suszenie różnego rodzaju materiałów z wysoką sprawnością. Ponadto suszarki fluidalne w porównaniu z innymi suszarkami konwekcyjnymi wykazują się niższym zużyciem energii oraz, co istotne z punktu widzenia bardzo zróżnicowanej grupy materiałów jaką są odpady, szerszym zakresem ziarnistości materiału poddanego suszeniu. W związku z tym technika suszenia fluidalnego bardzo dobrze sprawdza się zarów-



Rys.1. Schemat suszarki fluidalnej osadów ściekowych[9]

no w przemyśle jak i gospodarce odpadami, gdzie wykorzystywana jest między innymi do suszenia osadów ściekowych oraz paliw wtórnych[9].

Suszarnię fluidalną najczęściej stanowi prostopadłościan, w którego dolnej części znajduje się umieszczone poziomo sito. Ten element instalacji warunkuje prawidłowe zachodzenie całego procesu. Przy doborze perforacji powinno się kierować uzyskaniem możliwie najniższych oporów przepływu przy zachowaniu równomierności przepływu płynu na całej powierzchni. Efekt ten dają, często stosowane w warunkach krajowych, sita wirowe, dla których opory przepływu zawierają się w przedziale 150 – 200 Pa. Korzyścią wynikającą z zastosowania fluidalnej suszarki osadów ściekowych jest również brak problemów z zaleganiem mokrego materiału w dolnej warstwie złoża, gdyż wszystkie cząstki są stale w ruchu, co umożliwia efektywne i intensywne odparowanie wilgoci[9].

Na powyższym rysunku1 przedstawiono schemat suszarki fluidalnej dedykowanej osadom ściekowym. Materiał wsadowy, charakteryzujący się wysoką zawartością wilgoci, może być podawany do urządzenia fluidalnego bezpośrednio lub jak powyżej za pomocą urządzeń zasilających jak podajnik ślimakowy oraz turnikiet. Czynnik suszący - powietrze, podawane jest z dołu złoża przy użyciu dystrybutorów gazu, przepływając przez system filtrów, wentylatorów i nagrzewnic. Część instalacji znajdująca się nad złożem fluidalnym stanowi wyciąg, po czym następuje system oczyszczania i odpylania uchodzących gazów. Natomiast wysuszony materiał uchodzi dołem do zbiornika końcowego osadu ściekowego. Częstym zabiegiem, służącym podniesieniu efektywności energetycznej procesu, jest odzysk ciepła z powietrza wylotowego do ogrzania powietrza wlotowego[9,10].

Wykorzystanie suszarki fluidalnej może mieć miejsce również w przypadku suszenia paliw z odpadów, charakteryzujących się zawartością wilgoci na poziomie ok. 40%. Sprzyjające parametry procesu, które omówiono powyżej oraz możliwość suszenia w aparacie fluidalnym cząstek o zróżnicowanym uziarnieniu, uzasadnia stosowanie tego rozwiązania. Problematyczne



jest w tym przypadku pojawienie się w gazach odlotowych sporej ilości węglowodorów oraz emisja odorów, spowodowane uwalnianiem się w trakcie przeprowadzania suszenia związków organicznych zawartych w paliwie wtórnym[9-11].

Warto nadmienić, że technika fluidalna ma zastosowanie także w procesie zamrażania, który znajduje się poniekąd po przeciwstawnej stronie do suszenia. W tym przypadku schłodzone powietrze odbiera ciepło od cząstek materiału stałego. Aktualnie zamrażanie fluidalne jest szeroko wykorzystywane głównie w przemyśle spożywczym[12].

### Sortowanie i klasyfikacja

Technika fluidalna może być z powodzeniem wykorzystywana do klasyfikacji i sortowania cząstek materiału stałego. W tym przypadku złoża fluidalne składa się z dwóch lub więcej frakcji zróżnicowanych materiałów, które ulegają wyraźnemu rozdzielaniu. Fluidyzacja złoża poldispersyjnego powoduje, że wzdłuż jego wysokości można rozróżnić frakcję cięższą, która będzie zlokalizowana w dolnej części złoża oraz frakcję lżejszą przemieszczającą się w górną część warstwy fluidalnej. Separatory fluidalne stosowane na szeroką skalę w przemyśle, aktualnie są wprowadzane również w gospodarce odpadami do wspomaganie recyklingu poprzez oczyszczanie określonych frakcji – tworzywo sztuczne lub szkło- z lekkich zanieczyszczeń jak na przykład papier czy styropian, które przepływają ku górze i stamtąd są odbierane i oddzielane od właściwego materiału. Dzięki temu można uzyskać oczyszczony z domieszek surowiec wtórny, który staje się wartościowym substytutem surowców pierwotnych[13].

Ponadto można zaobserwować próby przeprowadzania recyklingu z wykorzystaniem aparatu fluidalnego. Opatentowana w Stanach Zjednoczonych technologia pozwalająca na rozdział różnych frakcji tworzyw sztucznych, może stać się w przyszłości pożytecznym narzędziem w przypadku efektywniejszego wykorzystania surowców wtórnych lub formowania paliw z odpadów. Instalacja, wykorzystująca jako czynnik fluidalny wodę, pozwala na segregację

różnych rodzajów tworzyw według ich gęstości. Frakcje o gęstości niższej od gęstości wody, czyli poliolefiny, polipropylen (PP) oraz polietylen (PE) będą znajdować się w górnej części warstwy fluidalnej, natomiast polistyren (PS), polichlorek winylu (PVC) oraz politeraftalen etylenu (PET) w dolnej części. Frakcja cięższa charakteryzuje się wyższą zawartością chloru oraz zazwyczaj niższą wartością opałową (wyjątek tu stanowi PS)[14]. Dzięki podziałowi tworzyw sztucznych na opisane powyżej dwie grupy możliwe będzie odpowiednie zbalansowanie paliwa zastępczego dla cementowni, które powinno charakteryzować się, zgodnie z wymogami cementowni, określoną minimalną wartością opałową oraz maksymalną zawartością chloru[15]. Ponadto segregacja pozwoli na właściwe przygotowanie materiału wysortowanych tworzyw sztucznych do recyklingu oraz do przekształceń termicznych w spalarniach odpadów lub instalacjach współspalających materiał odpadów. W przypadku przekształceń termicznych jakim poddawane są odpady, szczególnie ważne jest dopełnienie standardów emisyjnych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2014 w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania oraz zapewnienie odpowiednich parametrów przeprowadzania procesu termicznego zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 21 stycznia 2016 w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów oraz sposobów postępowania z odpadami powstałymi w wyniku tego procesu[16,17]. Warunki zatwierdzone poprzez wyżej wymienione akty ustawodawcze są ściśle zależne między innymi od zawartości chloru w odpadach. Zatem segregacja rozdzielająca frakcje bardziej zasobne w ten pierwiastek usprawni dalsze postępowanie z odpadami.

### Oczyszczanie i odpylanie

Technika fluidalna znajduje zastosowanie także w oczyszczaniu i odpylaniu gazów odlotowych z różnego rodzaju instalacji termicznego przekształcania paliw i odpadów. Wśród urządzeń fluidalnych realizujących procesy

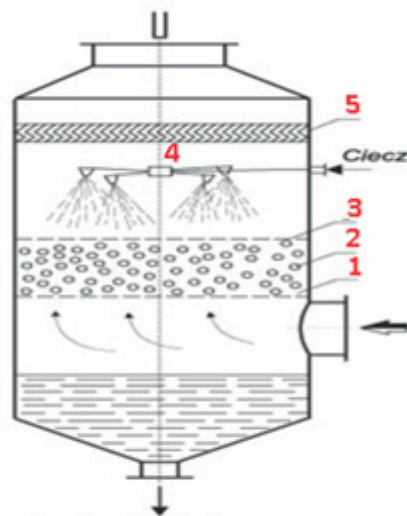
#### Literatura

- [1] Hycnar J., Paleniska fluidalne przykładem racjonalnego rozwiązywania problemów odpadów, Polityka energetyczna, Tom 9, Zeszyt specjalny, 2006;
- [2] Nowak W., Bednarek M., Czysto i ekonomicznie. Działania Polski w zakresie spalania w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej cz. 1, Energetyka ciepła i zawodowa, nr 4/2013;
- [3] Pałamarczuk P., Koniecznyński J., Ekologiczne walory stosowania kotłów fluidalnych w sektorze komunalnym, Górnictwo i Środowisko, 3/2005;
- [4] Chodor M., Aplikacje pieca fluidalnego do utylizacji wszelkich typów odpadów powstających na komunalnej i przemysłowej oczyszczalni ścieków, Piece przemysłowe i kotły VII-VIII/ 2013;
- [5] Laszczuk A., Pabiś A., Szoja J., Wróblewski W., Prędkość krytyczna w przypadku fluidyzacji materiałów pylistych dodatkowo mieszanych mechanicznie, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, z. 1-Ch/2008;
- [6] Wojciechowski J., Charakterystyka złoża fluidalnego, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, materiały dydaktyczne;
- [7] Wandrasz J., Zieliński J., Procesy fluidalne utylizacji odpadów, Wydawnictwo Ossolineum, Wrocław 1984
- [8] Geldart D., Powder Technology, 7, 1973, 285;
- [9] Lossmann O., Wybrane metody suszenia osadów ściekowych, artykuł ze strony internetowej www.eurekainz.pl, data pobrania: 11.09.2016;
- [10] [http://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/inzynieria\\_srodowiska](http://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/inzynieria_srodowiska), data pobrania: 09.09.2016;
- [11] [http://archiwum.chlodnictwoiklimatyzacja.pl/artykuly/2003\\_5/fluidyzacja.html](http://archiwum.chlodnictwoiklimatyzacja.pl/artykuly/2003_5/fluidyzacja.html), data pobrania: 09.09.2016;
- [12] Fluidyzacja w urządzeniach chłodniczych, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, nr 15, rok VI, Warszawa-Opole 2013;
- [13] Tesoro-Martinez D., Ganiiron T., Taylor H., Use of fluidized bed technology in solid waste management, Science and Technology, Vol. 7, No. 1 (2014);
- [14] <http://www.google.com.gt/patents/US5988395>, data pobrania: 12.09.2016;
- [15] Hryb W., Biegańska J., Wytwarzanie paliw z odpadów dla cementowni, Przegląd Komunalny, Dodatek Specjalny -2013-4;
- [16] Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2014 w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń





oczyszczania oraz odpylania gazów można wymienić odpowiednio skrubery, absorbery oraz filtry fluidalne. W praktyce technika fluidalna częściej stosowana jest do usuwania szkodliwych substancji gazowych aniżeli pyłów[18,19].



skruber fluidalny:  
 1-półka oporowo-rozdzielająca,  
 2-wypełnienie, 3-półka zatrzymująca,  
 4-kolektor zraszający, 5-odkraplacz

Rys. 2. Schemat skrubera fluidalnego [18]

Absorpcja zanieczyszczeń gazowych w skrubrze fluidalnym jest realizowana w układzie trójfazowym lub inaczej trójfazowym. Skruber przedstawiony na rysunku 2 posiada wypełnienie z lekkich cząstek tworzywa, boczne doprowadzenie gazów oraz system zraszania, który wprowadza ciecz, często z różnego rodzaju domieszkami dedykowanymi określonym zanieczyszczeniom gazowym (na przykład sorbent wapniowy dla związków siarki). Dzięki istnieniu fazy ciekłej możliwe jest efektywne przeprowadzanie procesu absorpcji kwaśnych gazów spalinowych. Korzyści wynikające z zastosowania skrubierów są znaczące. Przede wszystkim wysoka sprawność procesu, wynikająca z dobrego kontaktu na granicy faz. Ponadto stabilność procesu, niezawodność, niewielkie straty energii przy jednoczesnych wysokich wartościach prędkości przepływu[13,19].

**Termiczne przekształcanie**

W urządzeniu fluidalnym można przeprowadzać wszystkie procesy termiczne, a zatem

pirolizę, zgazowanie i spalanie. Termiczne przekształcanie w złożu fluidalnym umożliwia unieszkodliwianie zróżnicowanych, zarówno pod względem konsystencji jak i rodzaju, odpadów. Jedynym wymogiem jakiego należy dotrzymać jest rozdrobnienie materiału odpadów do frakcji poniżej 60 mm. Zatem w paleniskach fluidalnych można termicznie przekształcać przetworzone odpady komunalne (RDF), zużyte opony, mączki mięsno-kostne, odpady z przemysłu farmaceutycznego, metalurgicznego, petrochemicznego, chemicznego, odpady z instalacji wzbogacania węgla oraz biomasę. W praktyce głównie ze względu na spełnienie wymogów emisyjnych i kompleksowość procesu, w odniesieniu do unieszkodliwiania odpadów, najczęściej przeprowadzane na skalę przemysłową jest spalanie oraz zgazowanie w warstwie fluidalnej[1,7,20].

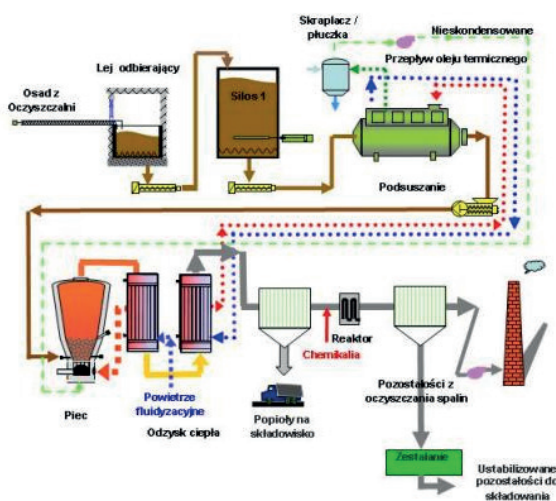
Cechą charakterystyczną spalania fluidalnego jest wysoka intensywność wymiany energii i masy w warstwie. Dzięki temu można zastosować mniejsze wymiary komory spalania niż w innych technikach oraz obniżyć temperaturę procesu, która w przypadku spalania w warstwie fluidalnej wynosi około 850°C-900°C. Wzdłuż całej komory spalania panuje ustalony rozkład temperatury. Niska temperatura procesu minimalizuje negatywne oddziaływanie spalarni na środowisko, ponieważ znacząco zostaje ograniczone powstawanie szkodliwych tlenków azotu. Dodatkowo instalacja nie wymaga skomplikowanego systemu usuwania lotnych związków siarki, gdyż możliwe jest bezpośrednie dozowanie sorbentu wapniowego do komory spalania. Panujące warunki temperaturowe umożliwiają utrzymanie wiązań siarki z sorbentem wapniowym w postaci stałej, co w wyższych temperaturach nie jest oczywiste, a wręcz często dochodzi do odwrócenia reakcji i ponownego przejścia siarki w stan lotny. Kolejną korzyścią wynikającą z przeprowadzania procesu w takim reżimie temperaturowym jest brak problemów z zużłowaniem i z zarastaniem powierzchni kotłowych. Niska temperatura procesu nie powoduje mięknięcia ani topienia popiołu. Jednak fluidyzacja niesie ze sobą pewne zagrożenia. Niekorzystnym aspektem procesu jest głównie możliwość wystąpienia erozji oraz wzrost zużycia energii na potrzeby własne



instalacji, między innymi do pracy pomp i wentylatorów[1,7,20].

Pomimo wymiennych korzyści wynikających z zastosowania fluidyzacji w termicznym przekształcaniu odpadów, w Polsce nie istnieje żadna spalarnia odpadów komunalnych ani paliw alternatywnych wykorzystująca tę technikę. W Europie jest niewiele przykładów zastosowania techniki fluidalnej w spalarniach odpadów komunalnych. Jednym z nich jest włoska instalacja Lomellina o mocy 17 MWe. Skromne zastosowanie techniki fluidalnej w termicznym przekształcaniu odpadów komunalnych wynika z zastosowania w tym charakterze innej technologii, to jest komór spalania wyposażonych w ruszty na przykład posuwiste, walcowe. Jednak należy zaznaczyć, że technika fluidalna jest jedynym możliwym substytutem paleniska rusztowego ze względu na dotrzymanie standardów emisyjnych oraz sprawność spalania cząstek paliwa. Zdecydowanie inna sytuacja ma miejsce w przypadku termicznego unieszkodliwiania odpadów problematycznych i niebezpiecznych. W szczególności dotyczy to osadów ściekowych. W tym przypadku powstał szereg instalacji przeznaczonych tylko do termicznego unieszkodliwiania osadów ściekowych zarówno pochodzenia komunalnego jak i przemysłowego. Największe krajowe spalarnie stosują właśnie technikę fluidalną. Wymienić tu można instalacje fluidalne w oczyszczalniach ścieków: „Czajka” w Warszawie, Orlen Eko w Płocku, Kraków- Płaszów, Gdańsk-Wschód, „Fordon” w Bydgoszczy, „Dębogórze” w Gdyni, „Pomorzany” w Szczecinie, w Łodzi czy w Kielcach. Fluidyzacja jako jedyna technika umożliwia unieszkodliwienie wszystkich rodzajów odpadów powstających na terenie oczyszczalni ścieków, w tym bardzo uciążliwych skratek. Poniżej na rysunku 3 zamieszczono schemat ciągu technologicznego termicznego unieszkodliwiania osadów ściekowych w Oczyszczalni Ścieków Gdańsk – Wschód. Osady, trafiające do pieca fluidalnego, muszą zostać odwodnione do poziomu około 22% suchej masy. Podszuszenie to ma miejsce w suszarce dyskowej, następnie osad trafia do pieca fluidalnego, gdzie w temperaturze  $>850^{\circ}\text{C}$  jest poddawany spalaniu. Gazy odlotowe powstałe w procesie kierowane są do systemu odzysku

ciepła, którego zadaniem jest podgrzanie powietrza trafiającego do pieca oraz zapewniającego energię cieplną dla węzła podsuszania. Opisywana instalacja posiada dwustopniowy system oczyszczania spalin za pomocą filtrów workowych. Odpady po procesowe, w głównej mierze stanowiące popioły lotne oraz w pewnej części pozostałości z oczyszczania spalin, zostaną ustabilizowane i zestalone celem wykorzystania przemysłowego lub składowania[1,4,7,13,20]



Rys.3. Instalacja termicznego przekształcania osadów ściekowych w Oczyszczalni Gdańsk-Wschód [21]

Wartym zaznaczenia jest fakt, iż krajowa energetyka w dużej mierze korzysta z kotłów fluidalnych, które bardzo dobrze sprawdzają się w spalaniu zarówno tradycyjnych wysokokalorycznych paliw (węgiel, koks, olej, torf) jak i paliw niskokalorycznych między innymi odpadów. Kilkanaście elektrowni oraz elektrociepłowni w Polsce, które stosują technikę fluidalną, oprócz spalania paliw konwencjonalnych współspala również odpady. Jako zamienniki paliw stosowane są muły węglowe, biomasa leśna oraz rolnicza, czy też pozostałości z przemysłu papierniczego i drzewnego. Co prawda takie działanie jest podyktowane w dużej mierze przez krajowe ustawodawstwo, które nakazuje częściową substytucję paliw kopalnych paliwami alternatywnymi, to jednak można zauważyć, że niektóre z zakładów wytwarzających energię stosują tylko alternatywne nośniki energii. Przykładami takich instalacji są zakłady w Koninie, Połańcu, Jaworznie, Szczecinie, Łodzi, Wrocławiu. Poniżej zestawiono

spalania lub współspalania odpadów (Dz.U. 2014 poz. 1546);  
 [17] Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 21 stycznia 2016 w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów oraz sposobów postępowania z odpadami powstałymi w wyniku tego procesu (Dz.U. 2016 Poz. 108);  
 [18] [http://archiwum.chlodnictwoiklimatyzacja.pl/artykuly/2003\\_6/57.html](http://archiwum.chlodnictwoiklimatyzacja.pl/artykuly/2003_6/57.html), data pobrania: 10.09.2016;  
 [19] <http://www.verantis.com/products/scrubbers/fluidized-bed-scrubbers/>, data pobrania: 12.09.2016;  
 [20] Sobolewski A., Wasielewski R., Stelmach S., Wykorzystanie stałych paliw wtórnych w energetyce, *Polityka Energetyczna*, Tom 10, Zeszyt specjalny 2, 2007;  
 [21] <http://www.giwk.pl/inwestycje/gdanski-projekt-wodnosiekowy-2>, data pobrania: 10.09.2016;  
 [22] Czernski G., Dziok T., Porada St., Możliwości wykorzystania technologii zgazowania węgla do wytwarzania energii, paliw i produktów chemicznych, *Polityka Energetyczna*, Tom 17, Zeszyt 4, 2014;  
 [23] Chmielniak T., Ściążko M., Sobolewski A., Tomaszewicz G., Popowicz J., Zgazowanie węgla przy zastosowaniu CO<sub>2</sub> sposobem na poprawę wskaźników emisyjnych i efektywności procesu, *Polityka Energetyczna*, Tom 15, Zeszyt 4, 2012;





krajowe instalacje energetyczne spalające lub współpalające odpady[1,2,7,20].

Instalacja	Rodzaj złoża	Moc kotła	Paliwo
EC Katowice S.A.	cyrkulacyjne	120 MWe	węgiel kamienny, muły węglowe
PKE S.A. Jaworzno II	cyrkulacyjne	2 x 70 MWe	węgiel kamienny, muły węglowe
EC Ostrołęka	pęcherzykowe	30 MWth	biomasa, węgiel kamienny, odpady produkcji papieru, kora
Tauron Wytwarzanie S.A. Oddział Elektrownia Łagisza	cyrkulacyjne	460 MWe	węgiel kamienny, muły węglowe
Świecie	cyrkulacyjne	164 MWth	węgiel kamienny biomasa
PAK Konin	cyrkulacyjne	154 MWth 55 MWe	biomasa -20% odpady
GDF Sues Połaniec	cyrkulacyjne	447 MWth 190 MWe	biomasa leśna 20% agro
Tauron Wytwarzanie S.A. Jaworzno II	cyrkulacyjne	139,7 MWth	biomasa odpady
Fortum Power and Heat Polska Sp. z o.o. w Częstochowie	cyrkulacyjne	120 MWth 64 MWe	węgiel kamienny, biomasa pochodzenia leśnego i agro
PGE Dolna Odra Szczecin	pęcherzykowe	183 MWth	biomasa
Stora Enso Poland Ostrołęka	cyrkulacyjne	164 MWth	biomasa węgiel kamienny, odpady produkcji papieru, kora
EC Białystok	pęcherzykowe	-	biomasa, węgiel kamienny, odpady produkcji papieru
Dalkia Łódź S.A.	pęcherzykowe		biomasa odpady agro
Kogeneracja SA Wrocław	pęcherzykowe		Biomasa, odpady agro

Tab.3. Fluidalne instalacje energetyki zawodowej w Polsce współpalające odpady [1,2]

W praktyce najczęściej fluidyzacja przebiega w warstwie stacjonarnej lub cyrkulacyjnej. Czynnikiem rozróżniającym w tym przypadku jest prędkość czynnika fluidyzującego – większa jest w złożu cyrkulacyjnym. Fluidalna warstwa stacjonarna, ze względu na pojawianie się pęcherzy gazowych w trakcie przeprowadzania procesu, nazywana jest warstwą pęche-

rykową. W zależności od ukształtowania ścian komory oraz stopnia pochylenia rusztu, można wymienić następujące rodzaje warstwy stacjonarnej: rotacyjną, jednowirową oraz dwuwrową. Fluidalne złożo cyrkulacyjne charakteryzuje się natomiast zamkniętym obiegiem materiału stałego złoża. Oznacza to, że cząstki stałe złoża w wyniku przepływu płynu fluidyzującego, wydostają się z komory spalania, po czym następuje ich odpylenie w cyklonie lub innym separatorze, by w kolejnym etapie powrócić do komory spalania. Zatem w przypadku materiału stałego złoża pozostaje ono w obiegu zamkniętym, będąc jedynie okresowo uzupełnianym[3-5,7,22].

Zgazowanie w urządzeniu fluidalnym może przebiegać, analogicznie jak w przypadku spalania, w warstwie cyrkulacyjnej lub pęcherzykowej. Zgazowanie w reaktorze fluidalnym z warstwą cyrkulującą zakłada obieg materiału stałego tworzącego złożo. Cząstki stałe uchodzące wraz z surowym gazem syntezowym górą reaktora są wychwytywane przy pomocy cyklonów i recykulowane na powrót do gazogeneratorsa. Cząstki popiołu usuwane są dołem reaktora, oddając wcześniej ciepło wchodzącej parze wodnej i recykulowanemu gazowi. W przypadku złoża pęcherzykowego, złożo materiału stałego znajduje się w dolnej części reaktora, natomiast w górnej strefie ma miejsce przepływ i uchodzenie tylko fazy gazowej. Czynniki zgazowujący pełni rolę płynu fluidyzującego, którego prędkość w zależności od rodzaju złoża zawiera się w przedziale 1-3 m/s (złożo pęcherzykowe) lub 5-10 m/s (złożo cyrkulujące). Zgazowanie w reaktorze fluidalnym zakłada ciągłe mieszanie cząstek paliwa w reaktorze, dzięki czemu w złożu utrzymywana jest jednolita temperatura. Gazogeneratory operują w średnio wysokich temperaturach, aby osiągnąć wymagany stopień konwersji paliwa rzędu 90-95%. Temperatura panująca w gazogeneratorze rzędu około 850 °C jest na tyle niska, żeby uniemożliwić aglomerację cząstek popiołu, a więc tym samym uniknąć defluidyzacji złoża. Oznacza to, że gazogeneratory są odpowiednimi urządzeniami w przypadku kłopotliwych paliw takich jak chociażby biomasa. Wśród technologii zgazowania paliw w złożu fluidalnym wymienić można te stoso-



wane na szeroką skalę jak HTW, KBR Transport, KRW czy U-GAS, oraz mające lokalne zastosowanie BHEL i IDGCC. Ponadto nieustannie mają miejsce działania zmierzające do opracowania nowych technologii, również w Polsce. Przykład może tu stanowić realizacja przez IChPW badań nad zgazowaniem w cyrkulującej warstwie fluidalnej w atmosferze CO<sub>2</sub>[22,23].

### Wnioski

Technika fluidalna cechuje się licznymi korzyściami zarówno pod względem ekonomicznym jak i środowiskowym. Znajduje ona liczne zastosowania w gospodarce odpadami. Jest ona z powodzeniem wykorzystywana do przygotowania odpadów do dalszych przekształceń, jak chociażby suszenie osadów ściekowych czy paliw formowanych, oczyszczania gazów odlotowych oraz frakcji surowców wtórnych ze zbędnych zanieczyszczeń, termicznej utylizacji problematycznej grupy odpadów jaką są osady ściekowe komunalne i przemysłowe. Fluidyzacja jest również wykorzystywana w krajowej energetyce zawodowej, gdzie instalacje tego

typu uczestniczą w spalaniu i współspalaniu odpadów. Dotyczy to przede wszystkim odpadów pochodzenia leśno-rolniczego oraz z przemysłu wydobywczego. Stanowią one w tym przypadku substytut paliw konwencjonalnych, dzięki czemu zmniejsza się ich wykorzystywanie w energetyce. Jednak możliwości wykorzystania techniki fluidalnej są o wiele większe. Ze względu na bardzo dobry stopień wypalenia cząstek paliwa oraz dopełnienie standardów emisyjnych, może w pewnych przypadkach stanowić zamiennik dla palenisk rusztowych. Jedynym ograniczeniem jest konieczność rozdrobnienia odpadów przed ich podaniem do komory spalania. Obserwowany aktualnie rozwój techniki fluidalnej, polegający na dobieraniu parametrów procesu pozwalających na uzyskanie możliwie najwyższych sprawności, przy jednoczesnym ograniczaniu kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, w przyszłości może pozwolić na częściej występujące wykorzystywanie urządzeń fluidalnych oraz znalezienie nowych zastosowań między innymi w gospodarce odpadami.

## 20 lat doświadczenia w fotografii przemysłowej



zapraszamy do współpracy  
fotografia artystyczna i reklamowa

**Piotr Komander**

tel. +48 601 438 404

[www.komander.com.pl](http://www.komander.com.pl)