

# Problematyka modelowania matematycznego procesów termicznego przekształcania odpadów stałych

## The problem of mathematical modeling of processes solid waste incineration

dr hab. inż. Tomasz JAWORSKI

dr hab. inż. Tomasz Jaworski, Politechnika Śląska, Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, 44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18, e-mail: tomasz.jaworski@polsl.pl, Tel. +48 32 2372122



### W KILKU SŁOWACH

Modelowanie procesu transportu masy na rusztach urządzeń do spalania odpadów stanowi bardzo istotną tematykę, która warunkuje prawidłowe podejście do zagadnień modelowania całego bloku spalania odpadów, jaki stanowi komora wyposażona w ruszt ruchomy (posuwisty, posuwisto-zwrotny lub walcowy). Dotychczas stosowane metody opierają się na nieuwzględnianiu mieszania mechanicznego wywołanego głównie przez ruchome części rusztu materiału odpadów oraz stopnia dyspersji, próbując zastąpić te parametry: prędkością rusztu, współczynnikiem poślizgu czy efektywnym współczynnikiem transportu tylko nie liczne modele uwzględniają współczynnik mieszania wstecznego.

W pracy przedstawiono możliwość zastosowania analogii: komora spalania z rusztem ruchomym – reaktor chemiczny i na tej podstawie zaproponowano wyjaśnić i opisać zjawiska transportu masy na różnych systemach rusztów, co stanowi nowatorstwo i znaczne rozwinięcie dotychczas stosowanych modeli matematycznych procesu spalania w konwencjonalnych spalarniach odpadów stałych.



### SUMMARY

Modelling of the mass transfer process on the grates of waste incineration equipment constitutes a very important issue that determines the correct approach to the problems of modelling the entire waste incineration unit which is a chamber equipped with a (travelling, reciprocating, or cylindrical) movable grate. Methods that have been used so far rely on not considering the mechanical friction caused chiefly by the movable parts of the waste material grate and the degree of dispersion, while attempting to substitute these parameters with grate speed, the slip factor or the effective transfer coefficient, and only few models take into account the back-mixing coefficient.

The present study uses the movable grate combustion chamber – chemical reactor analogy and on this basis explains and describes the phenomena of mass transfer on different grate systems, which constitutes an innovation and a considerable extension of the currently used mathematical models of the process of combustion in conventional solid waste incineration plants.

## 1. Wprowadzenie

W procesach wysokotemperaturowych, realizowanych w piecach przemysłowych i komorach paleniskowych wykorzystuje się w różnych celach substancje gazowe, ciekłe lub stałe. Mogą one stanowić czynnik lub paliwo procesu, w przypadku odpadów można wykorzystać ich potencjał energetyczny (tzw. odzysk energetyczny) lub zastosować wobec nich destrukcję termiczną, przeobrażając je do np. bardziej neutralnej wobec środowiska formy zagospodarowania. W opisie tych procesów, w sensie modelowania matematycznego bardzo ważną rolę odgrywają zjawiska wymiany ciepła i masy, homogeniczne i heterogeniczne reakcje chemiczne oraz transport-przepływ substancji w przestrzeni reaktora (komory spalania). W tak określonych ramach na pierwszy plan wysuwają się modele opisujące cały proces w urządzeniu lub reaktorze. Przykładami są: spalanie w komorze paleniskowej, spalanie i odgazowanie na systemach rusztowych spalarni odpadów itd. Z tych modeli całkowicie opisujących proces płyną informacje z poszczególnych procesów jednostkowych opisanych za pomocą tzw. modeli szczegółowych lub podmodeli, przykładami mogą być: proces dyfuzji lub przenikania masy, modele spalania pojedynczego ziarna itd. Modele całkowite składają się z serii modeli szczegółowych. Dla stopnia szczegółowości modelu całkowitego ważne jest aby dokładność i elastyczność przeprowadzonej w tym modelu analizy systemowej były zgodne z dokładnością i dostępnością każdej wymaganej danej i przyjętych warunków brzegowych w każdym modelu szczegółowym.

## 2. Znaczenie badania rozkładu czasu przebywania oraz parametrów towarzyszących w modelowaniu procesu transportu

Znaczącym warunkiem wstępnym w opisie procesów wysokotemperaturowych w komorach paleniskowych, na systemach rusztów spalarni odpadów, piecach obrotowych itd. jest w pierwszej kolejności opis ruchu i sił każdego gazowego/stałego obiektu występującego w systemie reakcji (np.: ziarno, cząstka itp.).

Można wyróżnić modele ze względu na: [1]

- prawa zachowania (substancji, energii, pędu), opisane za pomocą praw transportu,
- zależność rozkładu czasu przebywania,
- związki empiryczne.

W modelowaniu wykorzystującym prawa zachowania można uwzględniać prawa transportu w różny sposób: od bardzo szczegółowych w skali mikroskopijnej do całkowitych, efektywnych wielkości wymiany przy opisie makroskopowym. Przykładem takiej efektywnej wielkości wymiany jest wymiana energii podczas mieszania w przepływie turbulentnym.

Ten sposób opisu jest odpowiedni dla lokalnie ograniczonych procesów lub dla przepływów, przy których mieszanie odbywa się w małej przestrzeni reaktora. Dla rosnącej wielkości obszaru mieszania w stosunku do wielkości reaktora rosną nakłady obliczeniowe rozwiązania układu równań transportu.

Jeżeli rozwiązanie zagadnienia przepływu i reakcji chemicznych w mikroskali jest nieodpowiednie, generuje bowiem np. duże nakłady obliczeniowe czy ogólnie kosztowe, to należy się zastanowić nad opisem procesów mieszania i rozkładu czasu przebywania za pomocą „population-balance-method” – metody populacyjnej doboru i analizy grupy próbnej.

Daje ona informację dotyczącą funkcji rozkładu frakcji materiału w reaktorze i czasu pobytu w nim. Model dotyczy procesu makromieszania w reaktorze i pozwala opisać procesy przepływu i mieszania w taki sposób i za pomocą takich parametrów, które są wystarczające dla określenia istotnych przemian i zjawisk w nim występujących. W pracy [6] właśnie ten model został wykorzystany do określenia tzw. parametrów przepływowych, definiowanych jako: rozkład czasu przebywania masy odpadów na ruszcie oraz mu towarzyszącym: stopniowi zmieszania materiału odpadów na ruszcie, mieszania wzdłużnego i poprzecznego, współczynnikom dyspersji wzdłużnej i poprzecznej. Parametry te pozwoliły przybliżyć opis transportu materiału odpadów na różnych systemach rusztów wykorzystywanych w komorach paleniskowych spalarni odpadów.

Trzeci typ modeli, tzw. modele empiryczne wykorzystują dane eksperymentalne, które otrzymuje się np. na podstawie statystycznie



określonych planów badań, są one usadowione w korelacji z opisywanym procesem. Również ten rodzaj modelu wykorzystano w pracy [6] wprowadzając dane z eksperymentu badawczego w skali laboratoryjnej spalania warstwy odpadów w warstwie nieruchomej, jako zagadnienie brzegowe modelowania numerycznego CFD dla całej komory paleniskowej w skali pełnotechnicznej.

W wielu zagadnieniach z obszaru techniki wysokotemperaturowej metoda RCP (Rozkład Czasu Przebywania) odznacza się relatywnie niskimi nakładami: obliczeniowymi oraz w skali bazy danych wejściowych. Jest ona przeciwieństwem bardzo wymagającej obliczeniowo metody, wykorzystującej opis przepływu i mieszania za pomocą praw zachowania ciągłości. Przepływ materiału odpadów na systemach rusztów stosowanych w spalarniach odpadów, określonych jako kaskada pojedynczych reaktorów rurowych, opisany za pomocą „population-balance-method”, jest dobrym wykorzystaniem tej metody, przedstawiającym bardzo blisko zjawiska transportu i mieszania zachodzące na różnych systemach rusztów spalarni odpadów. Parametry wyznaczone za pomocą „population-balance-method,” do których należy RCP, stopień zmieszania oraz współczynniki dyspersji materiału odpadów na ruszcie oraz inne, są bardzo pomocne w modelowaniu procesu spalania, w warstwie odpadów na ruszcie pozwalając na określenie choćby takich parametrów, istotnych z punktu widzenia prowadzenia procesu spalania na ruszcie, jak: porowatość warstwy, powierzchnia jednostkowa wypełnienia, gęstość pozorną i nasypowa czy kształt i wielkość spalanego ziarna. W pracy [6] określono metodykę wykorzystania parametrów przepływowych, otrzymanych w ww. metodzie badań populacyjnych w modelowaniu procesu spalania w warstwie i komorze paleniskowej spalarni odpadów.

### 3. Przegląd modeli opisujących proces transportu masy w urządzeniach termicznego przekształcania odpadów stałych

Badanie procesu spalania paliw stałych ma tak długą tradycję i jest tak stare, jak sama technika. Jako przykłady można wymienić prace

badawcze prowadzone w latach 1933-35 przez Meiera [2], Tannera [3], Leye [4], a także Rosina, Kaysera i Fehlinga [5]. W pracach tych praktycznie przetestowano proces zapłonu i spalania, określono powiązania rusztu z komorą spalania poprzez analizę stężeń gazów i rozkładu temperatur w warstwie spalanego paliwa. Opracowane wtedy zasady i reguły nie tracą swojej aktualności i pozostają ważne dzisiaj. Zasadniczą różnicą obecnego stanu badań do poprzedniego jest rozwój metod analitycznych i odpowiadające im możliwości tworzenia modeli i symulacji. Obecnie punkt ciężkości w rozwoju obszaru termicznego przekształcania odpadów stanowią tzw. środki wtórne, czyli: poprawa jakości produktów ( pozostałości) po tych procesach ( pozostałości stałe to: żużle, popioły, pyły itp., pozostałości gazowe w postaci spalin). Celem tych procesów jest także maksymalizacja odzysku energii z odpadów, a także redukcja kosztów ich unieszkodliwiania. Nowe podejście to realizacja pierwotnych środków zaradczych sprowadzających się do minimalizacji zanieczyszczeń. Minimalizację zanieczyszczeń może stanowić przykładowo: minimalizacja tlenków azotu poprzez odpowiednio kontrolowane strefy redukcji w komorze spalania, spiekanie popiołów w celu immobilizacji (zestalenia) czy opracowanie nowych kształtów geometrii komór spalania w celu osiągnięcia optimum przepływów. W tabeli 1 poniżej, przedstawiono i scharakteryzowano kilkanaście, egzystujących obecnie na świecie najważniejszych, modeli matematycznych spalania paliwa stałego (odpadów stałych) w warstwie na ruszcie. Autorzy tych modeli przywołani są w niniejszym zestawieniu z nazwiska, szczegółowe pozycje literaturowe opisujące modele są zawarte w [6]. Tabela 1 przedstawia modele wg wybranych parametrów charakteryzujących transport materiału odpadów na ruszcie, są nimi:

- model i typ reaktora,
- zakres wymiarowy modelu,
- rodzaj podmodelu ziarna paliwa,
- sposób określenia własności nasypowych warstwy,
- rodzaj rusztu, sposób przemieszczania się materiału, opis mieszania się materiału na ruszcie,

- sposób określania (wymiarowania) geometrii warstwy także ze zmianami tej geometrii wymuszonymi ubytkiem masy wskutek spalania. Sposób powiązania geometrii warstwy z przestrzenią gazową komory spalania,
- szczególne własności modelu.

Analiza wybranych parametrów charakteryzujących modele procesu spalania w warstwie, przedstawiona w tabeli 1 dostarcza nam informacji o różnym sposobie opisu procesu transportu materiału odpadów na systemach rusztowych komór spalania. Sposób opisu przemieszczania się materiału, sposób i opis mieszania na ruszcie są głównie skorelowane z prędkością rusztu i tylko w kilku modelach możemy spotkać próbę opisu transportu poprzez współczynniki mieszania czy mieszania wstecznego.

### 4. Wybór rodzaju urządzenia i analiza przepływu

Jest wiele konstrukcji wykorzystywanych do termicznego przekształcania odpadów. Podstawowe rodzaje tych urządzeń przedstawia tabela 2. Obecnie najczęściej wykorzystywaną, ze względu na swoje zalety konstrukcją w realizacji procesu spalania odpadów stałych jest urządzenie wyposażone w komorę spalania z odpowiednio dobranym rusztem. Spośród głównych parametrów charakteryzujących procesy zachodzące w komorach zaopatrzonych w ruszty, dwa związane są bezpośrednio z transportem masy materiału odpadów stałych wewnątrz tego urządzenia, są nimi:

- rodzaj przepływu fazy stałej przez urządzenie,
- czas przebywania materiału odpadów w urządzeniu.

Dla pierwszego przypadku parametru przepływowego może wystąpić jeden z trzech rodzajów przepływu:

- idealne wymieszanie,
- przepływ tłokowy, tj. taki, w którym nie występuje mieszanie,
- przepływ pośredni między przepływem tłokowym a idealnym wymieszaniem.

Dwa pierwsze modele przedstawiają przypadki idealne i przeciwstawne sobie. Model

trzeci odpowiada warunkom rzeczywistym. Model pierwszy przyjmuje, że w przepływającym strumieniu cząsteczki reagentów są idealnie mieszane we wszystkich kierunkach. Natomiast model drugi jest przeciwieństwem pierwszego i charakteryzuje się brakiem mieszania w kierunku przepływu. Na tej podstawie różni się dwa typy idealnych reaktorów przepływowych.

Idealny reaktor zbiornikowy - charakteryzuje się idealnym stanem wymieszania w całej objętości, przyczyną czego jest nieskończenie wielki współczynnik dyspersji wzdłużnej. Skład mieszaniny nie zależy od zmiennych przestrzennych, a jedynie od czasu. Możemy powiedzieć, że w reaktorze z idealnym wymieszaniem skład mieszaniny jest w każdym punkcie reaktora identyczny i w związku z tym strumień opuszczający go ma skład identyczny ze składem mieszaniny reagującej w reaktorze.

Idealny reaktor rurowy – podstawowymi założeniami definiującymi ten model są:

- przepływ tłokowy, tzn. przemieszczanie się cząsteczek reagentów po liniach równoległych z tą samą prędkością; koniecznym i wystarczającym warunkiem przepływu tłokowego jest taki sam czas przebywania w reaktorze wszystkich elementów płynu,
- brak jakichkolwiek zjawisk mieszania w kierunku podłużnym
- nieskończenie intensywne mieszanie w kierunku prostopadłym do przepływu,
- prowadzące do zaniku gradientów stężenia i temperatury w tym kierunku.

Drugi z parametrów - czas przebywania materiału odpadów w urządzeniu może z powodzeniem, dla przypadku przepływu rzeczywistego i pośredniego, być reprezentowany przez tzw. rzeczywisty czas przebywania. W teorii reaktorów występuje zwyczaj także czas obliczeniowy nazywany czasem przebywania lub zetknięcia. Jednak ten parametr jest wielkością średnią. Rzeczywisty czas przebywania cząstki w reaktorze przepływowym jest zmienną przypadkową i podlega określonemu prawu rozkładu, które wyraża się ogólnie widmem czasu przebywania  $E(t)$  i dystrybuantą czasu przebywania  $F(t)$ .

Literatura  
 [1] - Scholtz R., Beckman M., Schulenburg F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahren- und Anlagenkonzepte. G. Teubner. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden. 2001.  
 [2] - Meier, W.: Untersuchungen über die Verbrennungsvorgänge bei Verfeuerung oberbayrischer Pechkohlen in der Wanderrostfeuerung. Dissertation TH München. 1935.  
 [3] - Tanner E.: Der Temperaturverlauf im Brennstoffbett und im Rost bei der Verbrennung von Steinkohle. Berichte der Technisch-Wissenschaftlichen Sachverständigenausschüsse des Reichskohlenrates. Bericht D 60. Essen, 1934.  
 [4] - Leye A.: Die Verbrennung auf dem Rost (Beitrag zur Kritik der Verbrennungsvorgänge in glühenden Brennstoffschichten). Dissertation TH Berlin, 1933.  
 [5] - Rosin P., Kayser H.G., Fehling, R.: Die Zündung fester Brennstoffe auf dem Rost. Untersuchungen über das Zündverhalten. Berichte der Technisch-Wirtschaftlichen Sachverständigenausschüsse des Reichskohlenrates Bericht D 51. Berlin. 1935.  
 [6] - Jaworski T., Modelowanie procesu transportu masy na rusztach urządzeń termicznego przekształcania odpadów. Monografia. Nr 419. Politechnika Śląska. Gliwice 2012 r.



Tabela 1. Zestawienie wybranych parametrów transportu materiału odpadów na systemach rusztowych w egzystujących modelach matematycznych procesu spalania w warstwie na ruszcie, [6]

Autor modelu	Klasen	Beckmann	Gruber	Gort	Rovaglio	Warnecke	Shin	Ahmed	Swi-then-bank	Appel	Riccus	Staudt	rull	Peters	Jaworski
Kryterium															
Model reaktora/typ	-	kaskada reaktorów zbiornikowych/stacjonarny	kaskada reaktorów zbiornikowych/stacjonarny	kaskada reaktorów rurowych/niestacjonarny	kaskada reaktorów zbiornikowych/niestacjonarny	kaskada reaktorów zbiornikowych/niestacjonarny	różnicowy	różnicowy	różnicowy	kaskada reaktorów zbiornikowych	różnicowy	różnicowy	różnicowy	różnicowy	różnicowy
Zakres wymiarowy modelu	1-wym.	1-wym.	1-wym.	1-wym.	1-wym.	2-wym.	1-wym.	1-wym.	2-wym.	1-wym.	2-wym.	2-wym.	2-wym.	3-wym.	2-wym.
Paliwo/Model ziarna odpadu	-	kulisty/kurczące się ziarno	kula/kurcząca się ziarno	własny model pojedynczego ziarna	-	kulisty	kulisty/kurczące się ziarno	-	kulisty/shrinking core model, shrinking particle model	kulisty	kulisty	kulisty/stały wymiarowo	kulisty, shrinking particle	nieregularne ziarno	-
Parametry nasypowe warstwy	-	zewnątrzna powierzchnia	zewnątrzna powierzchnia	-	-	zewnątrzna powierzchnia	zewnątrzna powierzchnia	powierzchnia pow. , związana objętością	efektywna pow. , specyficzna objętość reakcji	zewnątrzna powierzchnia	-	-	powierzchnia efektywna	powierzchnia efektywna	jednostkowe powierchnie
Ruszt: sposób przemieszczania się materiału/ sposób mieszania	-	prędkość rusztu, wsp. mieszania wstecznego	prędkość rusztu, wsp. poślizgu	prędkość rusztu	prędkość rusztu	prędkość rusztu, wsp. mieszania	-	prędkość rusztu	prędkość rusztu, wykorzystania dyfuzji do mieszania	prędkość rusztu, wsp. mieszania wstecznego	prędkość rusztu	prędkość rusztu	prędkość rusztu, efektyw. transportu	wynikowa siła odziały wodzi na ziarno	prędkość rusztu
Uwzględnienie geometrii warstwy	typowy profil uwalniania ciepła	-	podział powietrza do spalania	przepływ pionowy gazu przez warstwę	-	rysunek komory spalania	-	wymiary trapezowe warstwy	-	bezp. średnie sprzężenie z CFD	bezp. średnie sprzężenie z CFD	bezp. średnie sprzężenie z CFD	bezp. średnie sprzężenie z CFD	bezp. średnie sprzężenie z CFD	prze- pływ pionowy gazu przez warstwę
Szczególne własności modelu	szybkie generowanie profili	Uwzględnienie procesów dyfuzji	daleko idące uproszczenia	symulacja efektywności podawania powietrza	uwzględ. zagadnienia regulacji	dopasowywanie parametrów mieszania	model uproszczony	celuloza jako paliwo modelowe	duże wykorzystanie wiedzy eksperckiej	semi-empiryczny	Specjalizujący się dla rusztów posuwistych przeciwbieżnych	Specjalizujący się dla rusztów posuwistych	Specjalizujący się dla rusztów walcowych, rozdział powietrza dopasowany do typu rusztu	wysoka szczegółowość	Specjalizujący się dla rusztów walcowych

**5. Analogia: reaktor chemiczny – komora urządzenia do termicznego przekształcania odpadów z rusztem ruchomym**

Przepływ w chemicznych reaktorach rzeczywistych wykazuje duże podobieństwo do przepływu materiału odpadów w urządzeniach do spalania z rusztem ruchomym, będąc w swym

charakterze czymś pośrednim do skrajnych przypadków występujących w teorii chemicznej reaktorów, tj. reaktora zbiornikowego i rurowego. W rzeczywistości w przepływie materiału odpadów na rusztach nie zawsze osiąga się stan idealnego wymieszania, natomiast wystąpi zawsze w mniejszym lub większym stopniu zjawisko mieszania wzdłużnego bądź

Tabela 2. Podsumowanie najważniejszych parametrów przepływowych podstawowych urządzeń termicznego przekształcania odpadów [6]

Rodzaj urządzenia	Postać wejściowa odpadu	Temperatura	Czas przebywania	Stopień mieszania odpadu w warstwie	Stopień zmieszania odpadu z gazem reakcyjnym	Rodzaj reaktora
Piec obrotowy	Forma stała, kawałkowa, pastowata, ciekła, gazowa	do 1200°C	ca. 1 h	dobry	dostateczny	Faza stała, w pojedynczych strefach przeważa przepływ zbliżony jak w reaktorze zbiornikowym, dla całej długości pieca przepływ zbliżony jest do tego, jaki jest w reaktorze rurowym. Faza gazowa, przepływ mało odbiegający od przepływu, jaki jest w reaktorze rurowym.
Ruszt	Forma stała, kawałkowa, pastowata	do 850°C	ca. 2 h	dobry	bardzo dobry	Faza stała, w strefach działania poszczególnych rusztów przeważa przepływ zbliżony do przepływu jak w reaktorze rurowym (np. ruszt posuwisto-zwrotny) lub jak w przypadku rusztu walcowego - przepływ zbliżony jak w reaktorze rurowym. Rozpatrując ruszt dla całej jego długości przeważa przepływ jak w reaktorze rurowym. Faza gazowa: 1) powietrze pierwotne przepływa przez warstwę odpadów na ruszcie mając z nim bardzo dobry kontakt, 2) gazowe produkty procesów termicznych przepływają przez komorę w układzie współprądu lub przeciwprądu. Przepływ wszystkich gazów zbliżony jest do przepływu tłokowego.
Piec półkowy	Forma stała, kawałkowa, pastowata	do 950°C	ca. 1/2 h	dobry	dostateczny do dobrego	Faza stała - na poszczególnych półkach może przeważać przepływ zbliżony jak w reaktorze zbiornikowym, jednakże w bilansie całego pieca przepływ zbliżony jest do reaktora rurowego. Faza gazowa, przepływ zbliżony do przepływu w reaktorze rurowym.
Reaktor fluidalny	Ciało stałe z zawężonym składem frakcyjnym, ciekła	do 850°C	Minutowy	bardzo dobry	bardzo dobry	Faza stała, faza gazowa - realizacja przepływu idealnie wymieszanego jak w reaktorze zbiornikowym.
Piec przepływowy (tunelowy, taśmowy)	Forma stała, kawałkowa	do 1400°C	Wielogodzinny do wielodniowego	nie dotyczy	dostateczny do dobrego	Faza stała, przepływ jak w reaktorze tłokowym. Faza gazowa-zasadniczo przepływ podobny jak w reaktorze rurowym, jednak w strefach możliwy przepływ zbliżony do reaktora zbiornikowego (palniki impulsowe).
Piec szybowy	Faza stała w formie warstwy, ciekła	do 1600°C	Godzinny do dniowego	dostateczny	bardzo dobry	Faza stała, przepływ odpowiada podobieństwu jak w reaktorze rurowym. Faza gazowa, przepływ odpowiada podobieństwu jak w reaktorze rurowym.
Komora spalania	Ciekła, gazowa, pyłowa	do 1500°C	Sekundowy	bardzo dobry	bardzo dobry	Pył/gaz, w zależności od rozwiązania technicznego: przepływ bliski tłokowego lub z idealnym wymieszaniami

dyspersji wzdłużnej, zależne od rodzaju rusztu, własności substancji i charakteru przepływu oraz niewielkie, ale występujące mieszanie poprzeczne, związane ze zmianą porowatości spalanej warstwy.

Przepływ materiału odpadów na ruszcie ruchomym w urządzeniu do spalania wywołany jest wymuszonym ruchem, w zależności od typu rusztu: rusztowin lub walców. Konsekwencją tego ruchu jest przekazywanie energii między cząstkami warstwy (przenoszenie

pędu) wskutek ich wzajemnych zderzeń, a także zderzeń z rusztowinami i ścianami bocznymi komory. Dochodzi do tego oddziaływanie sił grawitacji oraz oddziaływanie strugi gazu pochodzące od systemu doprowadzenia powietrza pierwotnego.

Przyjmując analogię - podobieństwo w przepływie materiału odpadów na ruszcie poprzez komorę spalania do przepływu płynu przez reaktor chemiczny możemy wykorzystać dość dobrze znaną teorię reaktorów i adaptować ją



na potrzeby opisu transportu mechanicznego materiału odpadów na różnych systemach rusztów [6].

#### Podsumowanie

Zaproponowana w niniejszej pracy analogia: reaktor chemiczny – komora urządzenia do termicznego przekształcania odpadów z rusztem ruchomym daje możliwość wykorzystania równań transportu płynów na potrzeby opisu zjawisk transportu materiałów ziarnistych. Pojawia się jednak wtedy problematyka definiowania warunków modelowych do których należy:

- założenie, iż dyspersja jest następstwem uśredniania prędkości przepływu masy i stężeń na ruszcie, stanowi ona składnik powstały w wyniku uśredniania równania transportu masy,
- zawarte w równaniach transportu płynów współczynniki dyfuzji w kierunkach wzdłużnym i poprzecznym, w warunkach

przepływu masy odpadów, a nie płynów, na analizowanych systemach rusztów, zostały określone jako współczynniki dyspersji wzdłużnej i poprzecznej stanowiąc zasadniczy parametr charakteryzujący dynamikę rozprzestrzeniania się masy wzdłuż i w poprzek rusztu,

- wartości współczynników dyfuzji w płynach zależą głównie od takich wielkości, jak: lepkość i gęstość płynu, stężenie dyfundującego składnika, temperatura itd. W warunkach przepływu masy odpadów na ruszcie te wielkości są bez większego znaczenia, ponieważ w czasie transportu na ruszcie statystyczne ziarno jest poddane wpływowi głównie: prędkości rusztowin (prędkości obrotowej walców), kąta nachylenia rusztu, strumienia masy odpadów, gęstości poziomej i nasypowej, składu granulometrycznego itd. Stąd potrzeba wprowadzenia tych parametrów jako zależności funkcyjnych w określaniu wartości dyspersji materiału odpadów na rusztach [6].

**POREXTHERM**

**POREXTHERM**  
wiodący producent wysokowydajnych izolacji, dołączył do grona firm Morgan Advanced Materials w grupie Thermal Ceramics.

<http://www.porextherm.com/en/products.html>  
<http://www.morganthermalceramics.com/products/microporous-insulation/porextherm>

Już od dziś materiały mikroporowate są dostępne w ofercie!

**Thermal Ceramics Polska Sp. z o. o.**  
ul. Towarowa 9, 44-100 Gliwice

T: +48323053113  
T: +48323053114  
F: +48323053115  
E: [polska.tc@morganplc.com](mailto:polska.tc@morganplc.com)  
W: [www.morganthermalceramics.com](http://www.morganthermalceramics.com)

# Mikrosfery – pozyskiwanie, właściwości, zastosowania

## Microspheres – acquisition, properties, applications

inż. Agata WAJDA, dr inż. Michał KOZIÓŁ



#### W KILKU SŁOWACH

Mikrosfery (określane również jako cenosfery lub mikrosfery glinokrzemianowe) stanowią coraz szerzej pozyskiwany i stosowany surowiec. W artykule przedstawiono warunki powstawania oraz metody pozyskiwania mikrosfer. Podjęto się również próby oszacowania masy mikrosfer powstających rocznie na świecie. W dalszej części artykułu przedstawiono ich właściwości oraz szeroko omówiono możliwości praktycznego ich wykorzystania.

#### Wstęp

Energetyka światowa, a w szczególności polska, w znacznym stopniu jest oparta na spalaniu paliw stałych, przede wszystkim węgla kamiennego oraz brunatnego. Jednymi z głównych rozwiązań technicznych instalacji do spalania węgla są paleniska pyłowe. Ubocznym skutkiem procesu spalania węgla są duże ilości wytwarzanych przez elektrownie i elektrociepłownie odpadów paleniskowych takich jak popioły oraz żużle. Pewną część z wymienionych odpadów jest z powodzeniem podawana procesom odzysku, np. popioły znajdują liczne zastosowania: w budownictwie, drogownictwie, górnictwie, a nawet w rolnictwie [1, 2]. Specyficzną frakcję popiołów stanowią mikrosfery (określane są one również pojęciem cenosfery lub mikrosferami glinokrzemianowymi). Są to



#### SUMMARY

Microspheres (called also cenospheres or aluminosilicate microspheres) constitute raw material acquired and used on a wider and wider scale. The paper briefly presents conditions for formation and methods of acquisition of microspheres. Estimation of the mass of microspheres annually formed worldwide is also attempted. The following part of the paper presents properties and broadly discusses the possibilities of their practical application.

inż. Agata Wajda  
dr inż. Michał Kozioł (Politechnika Śląska, Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów)

glinokrzemianowe ziarna wypełnione wewnątrz gazami, wyjątkowo cenne ze względu na swoje liczne i uniwersalne właściwości, dzięki którym znajdują zastosowanie praktycznie w każdej dziedzinie gospodarki. Mogą być z powodzeniem wykorzystywane w produkcji szeregu materiałów, a ich dodatek znacznie poprawia właściwości końcowego produktu [3, 4]. Obecnie obserwuje się wzrastające zainteresowanie pozyskiwaniem jak również wykorzystaniem mikrosfer. Rozpatrując właściwości i liczne możliwości wykorzystania mikrosfer, trzeba jednak pamiętać że stanowią one znikomą część odpadów paleniskowych.

#### Pozyskiwanie mikrosfer

Mikrosfery powstają podczas spalania węgla kamiennego w paleniskach pyłowych. W wyniku

