

Aparat hybrydowy ze złożem ziarnistym w instalacji spalania odpadów

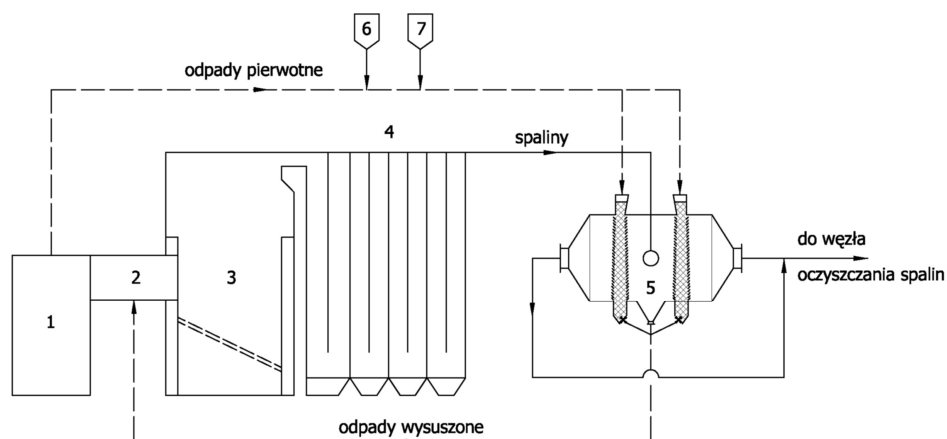
*Jan Hehlmann, Ewa Pietrasik, Edyta Kujawska, Dominik Bania
Politechnika Śląska, Gliwice*

1. Wstęp

Jednym z obecnie stosowanych sposobów utylizacji zarówno odpadów komunalnych jak i przemysłowych jest ich spalanie. Metoda ta jest stosowana ze względu na możliwość bieżącej likwidacji odpadów i zmniejszenie ich objętości z jednoczesnym wytworzeniem użytecznych form energii. Procesowi spalania odpadów towarzyszy szereg problemów, między innymi takich jak: zapewnienie odpowiedniej wartości opałowej odpadów, ograniczenie emisji substancji szkodliwych (pyłów, dwutlenku siarki, tlenku węgla, tlenków azotu, WWA i dioksyn) znajdujących się w gazach spalinowych [3, 7].

Odpady komunalne charakteryzuje znaczna niejednorodność a także zmienna wartość opałowa, wynosząca w krajowych uwarunkowaniach około (4...7) MJ/kg, która nie gwarantuje autogennego prowadzenia procesu spalania [9÷14]. W takich przypadkach niezbędne jest zastosowanie współspalania odpadów komunalnych z dodatkowym paliwem.

W celu maksymalnego ograniczenia emisji szkodliwych związków, projektowane instalacje spalania odpadów wyposażone są w złożone systemy oczyszczania spalin i utylizacji popiołów, których koszt dochodzi nawet do $\frac{3}{4}$ kosztów całej spalarni. Sposobem na obniżenie kosztów eksploatacyjnych może być wykorzystanie ciepła spalin do suszenia specjalnie preparowanego złoża, które oczyszcza spaliny z pyłów i składników gazowych, a następnie podlega współspalaniu z odpadami, przyczyniając się do podwyższenia ich wartości opałowej oraz stabilizacji procesu spalania. Koncepcję współspalania odpadów z jednoczesnym oczyszczaniem spalin i układ urządzeń do realizacji tego sposobu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat instalacji spalania odpadów z zastosowaniem aparatu hybrydowego z przesuwным złożem. 1 – system rozładunku i przygotowania odpadów, 2 – zasobnik na odpady, 3 – komora spalania, 4 – kocioł, 5 – aparat z przesuwным złożem, 6 – zasobnik wapna (CaCO_3), 7 – zasobnik biopaliwa lub paliwa alternatywnego

Fig. 1. Waste combustion installation with the use of hybrid apparatus with slidable bed. 1 – system of unloading and waste preparation, 2 – waste container, 3 – combustion chamber, 4 – boiler, 5 – apparatus with slidable bed, 6 – limestone container (CaCO_3), 7 – container for biofuel or alternative fuel

Metoda ta polega na wykorzystaniu aparatu z przesuwным złożem, który jest zlokalizowany bezpośrednio za kotłem, zastępując filtr tkaninowy. Część odpadów transportowana jest do aparatu, który zaprojektowano jako urządzenie hybrydowe, realizujące równocześnie proces suszenia odpadów, odpylania gazów spalinowych jak i ich częściowego adsorpcyjnego oczyszczania. Sorbent, w postaci mączki kamienia wapiennego oraz paliwo dodatkowe – alternatywnie biopaliwo, jest dozowane do strumienia rozdrobnionych odpadów kierowanych do dwóch stref filtracyjnych aparatu (poz. 5 na rys. 1).

Preparowane złożo przepływa grawitacyjnie przez aparat podlegając wysuszeniu do wilgotności krytycznej tzn., że suszenie odbywa się według kryteriów I okresu suszenia. Wydzielająca się para wodna nasycza gazy spalinowe oraz sorbent wapniowy, stymulując proces adsorpcji SO_2 , w wyniku którego powstaje CaSO_3 i $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Wysuszone odpady, o podwyższonej wartości opałowej, są recykulowane do komory odpadów pierwotnych i podlegają współspalaniu z pozostałą częścią odpadów. Ustalenie właściwej proporcji strumienia odpadów surowych i recykulowanych, pozwala na poprawę sprawności energetycznej kotła oraz poprawę relacji ekonomiczno – ekologicznych instalacji oczyszczania spalin. Odpylone i wstępnie oczyszczone spaliny podle-

gają bowiem dalszemu procesowi uzdatniania w instalacji oczyszczania spalin wg znanych metod [7, 19, 20, 21].

Istnieje też możliwość wytwarzania alternatywnych paliw formowanych na bazie osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków, z dodatkiem różnych biokomponentów. Tego typu paliwo, o wartości opałowej (14...18) MJ/kg, może być dostarczane z drugiego zasobnika tworząc kolejny komponent złoża, podwyższający w rezultacie wartość opałową spalanych odpadów komunalnych. Jednocześnie uzyskuje się możliwość bezpiecznego zagospodarowania uciążliwych osadów ściekowych.

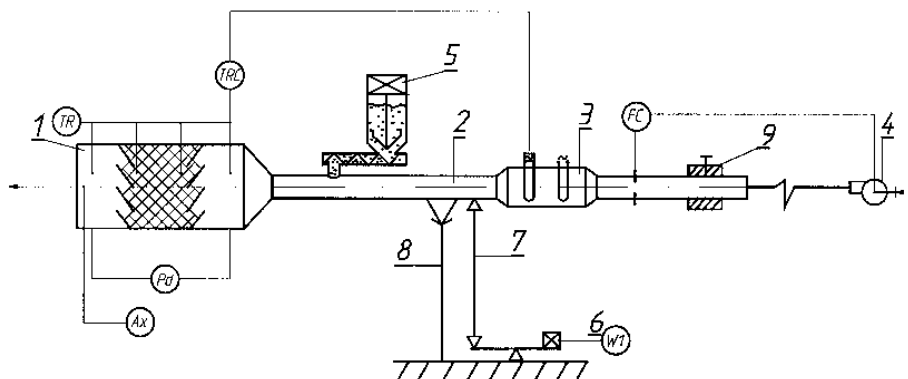
Uznając celowość stosowania aparatów ze złożem ziarnistym, szczególnie ze względu na możliwość realizacji procesów w konwencji układów hybrydowych, przeprowadzono badania procesu odpylenia, suszenia oraz oporów przepływu gazu przez złożo ziarniste.

2. Część eksperymentalna

2.1. Stanowisko doświadczalne

Badania kompleksowe, obejmujące proces odpylenia gazu, suszenia złoża i oporów przepływu przeprowadzono w instalacji laboratoryjnej przedstawionej na rys. 2. Instalacja umożliwiła pomiar: skuteczności odpylenia złóż ziarnistych, szybkości suszenia złoża oraz pomiar oporów przepływu gazu przy jego zmiennych; prędkościach, temperaturach, stężeniach zapylenia a także zmiennych parametrach złoża.

Podstawowym elementem instalacji jest komora z żaluzjowymi ścianami, pomiędzy którymi umieszcza się badany materiał. Komora usytuowana jest na dwuramiennej dźwigni, zaopatrzonej w grzejnik i dozownik pyłu. Komora wyposażona jest w zespół termometrów (TR) i (TRC) umożliwiający precyzyjną stabilizację temperatury przed warstwą. Przepływ powietrza jest wymuszony wentylatorem o regulowanej wydajności (FC), mierzonej za pomocą kryzy. Cały układ posiada podparcie, zaś startowe położenie zerowe jest ustalane za pomocą przesuwne go obciążnika. Stabilne, początkowe stężenie zapylenia ustalano za pomocą cechowanego dozownika a wartości końcowe mierzono metodą aspiracyjną w oparciu o sondę zerową (A_x), przy czym, zmiana skuteczności odpylenia i oporów przepływu złoża w funkcji czasu jest oceniana z uwzględnieniem efektu akumulacji pyłu w złożu. Pomiar kinetyki suszenia prowadzi się odrębnie. W tym przypadku ubytek wilgoci jest rejestrowany za pomocą wagi, w określonych przedziałach czasowych $\Delta\tau$.



Rys. 2. Schemat stanowiska do kompleksowych badań procesowych w złożu ziarnistym; 1 – komora z żaluzjowymi ścianami, 2 – dźwignia, 3 – grzejnik, 4 – wentylator, 5 – dozownik pyłu, 6 – waga rejestrująca ubytek masy złoża w procesie suszenia, 7 – transmiter ubytku masy złoża, 8 – podparcie układu dźwigniowego, 9 – przesuwany obciążnik równoważący układ

Fig. 2. Stand for complex process research in the granular bed; 1 – chamber with shutter walls, 2 – lever, 3 – heater, 4 – fan, 5 – dust feeder, 6 – analytical balance with registration of mass decrement of the bed in the drying process, 7 – transmitter of mass decrement of the bed, 8 – support of balance system, 9 – slidable weight

Badania procesu odpylania i oporów przepływu przeprowadzono dla modelowych złożów ziarnistych o cechach aplikacyjnych, których charakterystyczne parametry ustalono w oparciu o badania dodatkowe, a wyniki przedstawiono w tabeli 1 [2, 17].

Tabela 1. Charakterystyczne parametry badanych złożów

Table 1. Characteristic parameters of tested beds

Złoże	Średnica zastępcza ziarna $d_z \cdot 10^3$ [m]	Porowatość złoża ε [m^3/m^3]	Sferyczność ψ
Koksik	4,87	0,613	0,399
Żwir	4,27	0,375	0,887
Polistyren	2,25	0,379	0,767

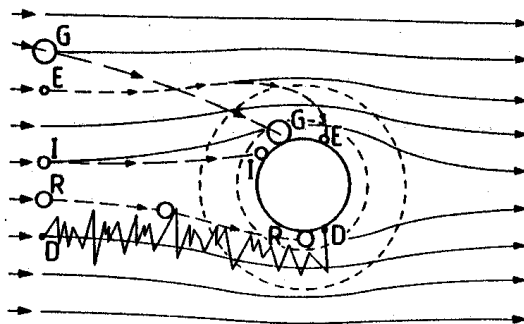
2.2. Badania procesu odpylania

Analiza literaturowa procesu odpylania w złożach ziarnistych [2, 4, 21] wskazuje, że wpływ na skuteczność odpylania mają:

- wielkość elementów tworzących złożę filtracyjne,
- grubość warstwy złoża,
- porowatość warstwy,
- prędkość przepływu gazu,
- ilość pyłu akumulowana w złożu,
- film cieczowy na ziarnach złoża lub jednoczesne suszenie złoża wilgotnego.

Przepływowi aerozolu przez złożę ziarniste towarzyszą siły związane z ruchem cząstek pyłu i gazu, oporem opływu elementów złoża oraz siłami zewnętrznymi. Ich szczegółową analizę prezentują wyczerpująco Hehlmann, Użow, Kabsch i Warych [2, 4, 5, 21].

W obszarze ziarnistej warstwy filtracyjnej występuje wielokrotny efekt podziału i łączenia się strug gazu, intensyfikujący kontakt pyłu z elementami złoża. Z aerozolu następuje wydzielenie pyłu na pojedynczym ziarnie w wyniku jednoczesnego działania mechanizmów: inercyjnego, zaczepienia, grawitacyjnego opadania, dyfuzyjnego, elektrostatycznego a także specyficznego oddziaływania efektu rekombinacji strug [2, 8]. Występujące mechanizmy elementarne ilustruje rys. 3.



Rys. 3. Zderzenia ziaren z pojedynczym elementem filtracyjnym wskutek oddziaływania mechanizmów: D – dyfuzyjnego, I – bezwładnościowego, E – elektrostatycznego, G – grawitacyjnego, R – zaczepienia

Fig. 3. Particles collision with singular filtration element as a result of the following mechanisms interaction: D – diffusional, I – inertial, E – electrostatic, G – gravitational, R – catch

W zależności od parametrów warstwy ziarnistej i aerozolu, szybkości i sposobu naprowadzenia strumienia aerozolu, proces odpylania zachodzi według jednego lub jednocześnie według kilku mechanizmów. Dla przebadanego

układu na całkowitą skuteczność procesu η mają wpływ parametry reprezentujące następujące mechanizmy elementarne:

$$\eta = f(k_I, k_R, k_G, k_D, k_E, k_A) \quad (1)$$

Przyjmując selektywny udział poszczególnych mechanizmów odpylania sformułowano równanie skuteczności odpylania η w postaci (2) lub (3):

$$\eta = 1 - \exp \left[- \frac{1,5(1 - \varepsilon) \cdot \psi \cdot H \cdot k}{\varepsilon \cdot d_z \cdot w_0} \right] \quad (2)$$

$$\eta = 1 - \exp(Mo^*) \quad (3)$$

gdzie:

ε – porowatość złoża, [m³/m³]

ψ – sferyczność elementów złoża,

H – wysokość złoża, [m]

k – współczynnik szybkości odpylania, [m/s]

d_z – zastępcza średnica ziarna złoża polidispersyjnego ustalona w oparciu o analizę sitową, [m]

w_0 – prędkość przepływu czynnika suszącego, [m/s]

Mo^* – zmodyfikowana liczba Margulesa

Funkcyjną zależność współczynnika szybkości odpylania k można zapisać jako:

$$k = f(d_z, d_p, \rho_g, \rho_p, \eta, w_0, g) \quad (4)$$

gdzie:

d_p – zastępcza średnica ziarna pyłu, [m]

ρ_g – gęstość gazu, [kg/m³]

ρ_p – gęstość pyłu, [kg/m³]

D – kinematyczny współczynnik dyfuzji, [m²/s]

g – przyspieszenie siły ciężkości, [m/s²]

Stosując metodę analizy wymiarowej, opracowano empiryczne równanie korelacyjne dla złoża ziarnistego w postaci:

$$Mo^* = x_1 \cdot Stk^{x_2} \cdot Fr^{x_3} \cdot Pe^{x_4} \cdot Pz^{x_5} \quad (5)$$

gdzie:

Stk – liczba Stokesa, $Stk = (d_p^2 \cdot w_0) / (v_g \cdot d_z)$

Fr – liczba Froude, $Fr = w_0^2 / (d_z \cdot g)$

Pe – liczba Peckleta, $Pe = (w_0 \cdot d_z)/D$

Pz – parametr złoża, $Pz = [1,5(1 - \varepsilon)\psi \cdot H]/(\varepsilon \cdot d_z)$

v_g – kinematyczny współczynnik lepkości gazu, [m²/s]

$x_{1...5}$ – stała i wykładniki w równaniu (5).

Wyznaczenie stałej i wykładników w równaniu kryterialnym wymagało przeprowadzenia badań procesu odpylania aerozolu w warstwie ziarnistej utworzonej z materiałów modelowych. W badaniach procesu odpylania pyłem testowym był talk techniczny o zastępczej średnicy ziarna $d_p=17,86 \cdot 10^{-6}$ m (badania prowadzono na złożu żwiru i koksiku) oraz pył bieli tytanowej z pieca kalcynacyjnego o zastępczej średnicy $d_z=2,54 \cdot 10^{-6}$ m i temperaturze 175°C, przy czym badania przeprowadzono przy stężeniu zapylenia $c_p=5,81 \cdot 10^{-3}$ kg/Nm³ na złożu kulek korundowych o średnicy $d_z=3,18 \cdot 10^{-3}$ m.

Całość pomiarów wykonano dla:

- początkowych stężeń zapylenia $c_p = \langle 1...10 \rangle \cdot 10^{-3}$ kg/m³,
- prędkości przepływu gazu $w_0 = \langle 0,1...1,0 \rangle$ m/s,
- grubości warstwy $H = \langle 50...200 \rangle \cdot 10^{-3}$ m.

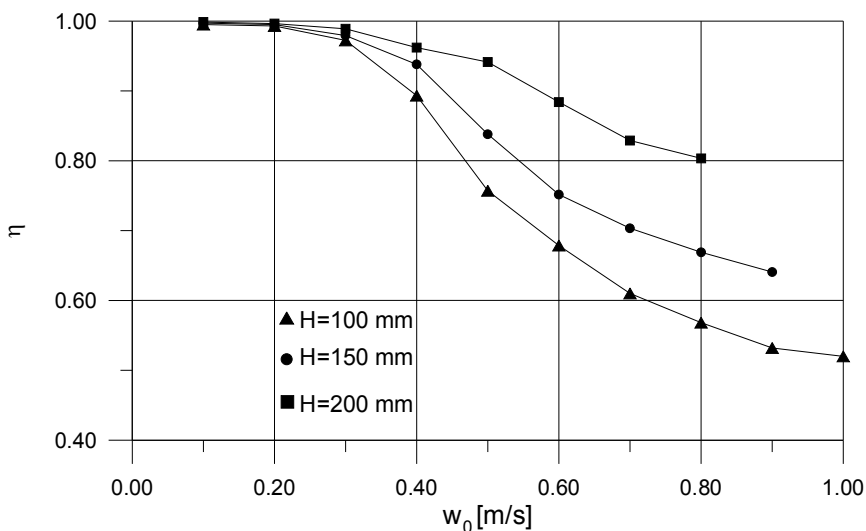
Graficzną interpretację wyników badań przedstawiono na rys. 4 i 5. Analiza wykresów wskazuje, że złoża ziarniste w zakresie prędkości $\langle 0,1...0,3 \rangle$ m/s mogą spełniać rolę wysokosprawnego odpylacza o skuteczności $\langle 96...99 \rangle\%$, zaś w przypadku wyższych prędkości przepływu mogą stanowić odpylacz pierwszego stopnia o skuteczności powyżej 70%, przy czym procesowi odpylania może towarzyszyć jednoczesne suszenie złoża bądź utylizacja ciepła i odzysk pylistego produktu.

Dane doświadczalne procesu odpylania opracowano w oparciu o równanie skuteczności odpylania (2) i równanie kryterialne (5). Zastosowano metodę estymacji nieliniowej quasi-Newtona używając programu STATISTICA 6. Otrzymane wartości stałej i wykładników zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Stałe i wykładniki szczegółowych równań korelacyjnych, dotyczących skuteczności odpylania

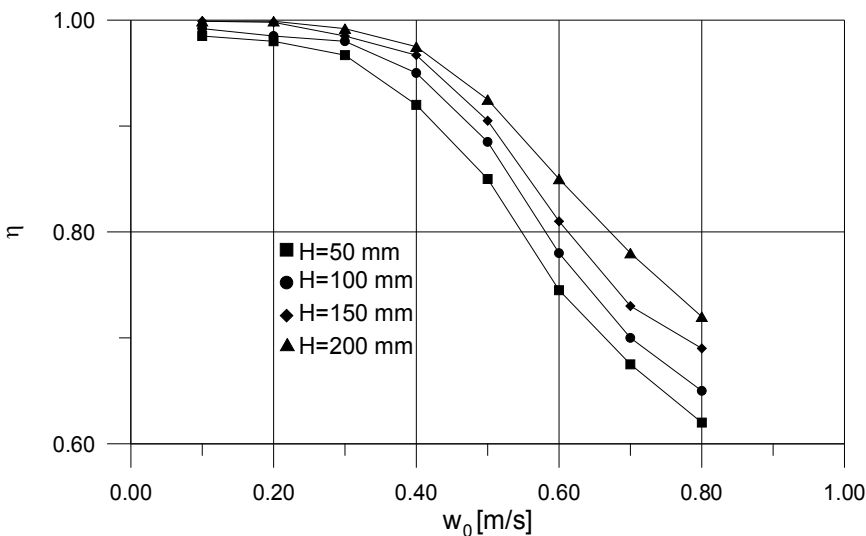
Table 2. Constants and exponents of detailed correlation equations for gas cleaning efficiency

Materiał ziarnisty	$Mo^* = x_1 \cdot Stk^{x_2} \cdot Fr^{x_3} \cdot Pe^{x_4} \cdot Pz^{x_5}$					Współczynnik korelacji R
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
Koksik	0,302	0,355	-0,769	0,229	0,253	0,93
Żwir	0,333	0,241	-0,713	0,129	0,417	0,98
Polistyren	0,244	0,104	-0,666	0,116	0,318	0,91



Rys. 4. Zależność skuteczności odpylania od prędkości przepływu gazu dla różnych grubości złoża żwiru

Fig. 4. Dependence of gas cleaning efficiency on the gas flow velocity for different thickness of gravel



Rys. 5. Zależność skuteczności odpylania od prędkości przepływu gazu dla różnych grubości złoża koksiku

Fig. 5. Dependence of gas cleaning efficiency on the gas flow velocity for different thickness of quick coke bed

Wyznaczono ogólne równanie korelacyjne dla połączonych zbiorów wartości doświadczalnych; dla złożów koksiku (stosowanych do oczyszczania spalin w kotłach małej mocy – kotły centralnego ogrzewania), złożów żwirowych i korundowych (stosowanych w wysokotemperaturowych węzłach technologicznych) oraz złożów polistyrenowych (modelujących obecność tworzyw sztucznych w odpadach). Uzyskano następujące równanie empiryczne:

$$Mo^* = 0,405 \cdot Stk^{0,113} \cdot Fr^{-0,644} \cdot Pe^{0,153} \cdot Pz^{0,55} \quad (6)$$

Współczynnik regresji równania $R=0,95$.

Opracowane równania są słuszne dla następujących zakresów zmienności liczb bezwymiarowych: $Mo^* \in \langle 0,173 \div 5,671 \rangle$, $Stk \in \langle 8,809 \cdot 10^{-4} \div 90,99 \cdot 10^{-4} \rangle$, $Fr \in \langle 0,453 \div 45,305 \rangle$, $Pe \in \langle 1,687 \cdot 10^8 \div 30,61 \cdot 10^8 \rangle$, $Pz \in \langle 3,88 \div 167,56 \rangle$.

Interpretacja równania (6) wskazuje, że:

- skuteczność odpylania w złożu ziarnistym rośnie wraz ze wzrostem liczby Stokes'a, reprezentującej prawdopodobieństwo zderzeń inercyjnych, a także ze wzrostem liczby Froude'a, przy czym ten łączny efekt spełniają w zasadzie frakcje pyłu o większych wymiarach;
- podwyższenie skuteczności odpylania następuje również ze wzrostem cech dyfuzyjnych układu, reprezentowanych liczbą Peckleta oraz ze wzrostem bezwymiarowego parametru złoża Pz ,
- korzystne jest stosowanie złożów regularnych o porowatości $\varepsilon < 0,5$ i sferyczności $\psi \rightarrow 1$ (warunki te spełnia złożo korundowe, a w przybliżeniu złożo żwirowe);
- złożo koksiku, reprezentujące materiały szorstkie, powoduje istotne obniżenie skuteczności odpylania przy $w_0 > 0,3$ m/s, co ma niewątpliwie związek z generowaniem wirów w pobliżu szorstkiej powierzchni elementów złoża.

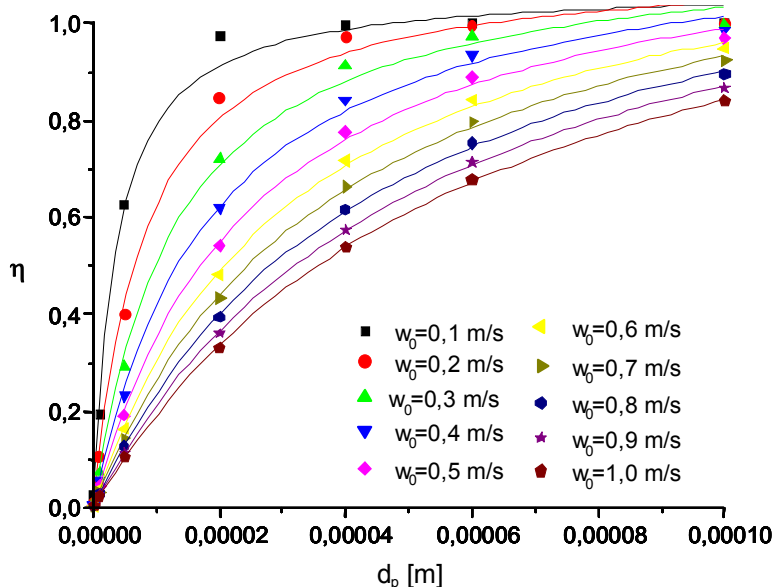
Opracowane równanie może być również wykorzystane do prognozowania frakcyjnej skuteczności odpylania dla innych rodzajów pyłów występujących w instalacjach przemysłowych. W tym celu przekształcono równanie (6) do postaci

$$\eta = 1 - e^{-Mo_i^*} \quad (7)$$

umożliwiającej generowanie wykresów skuteczności frakcyjnej $\eta_i = f(d_p)$ przy zadanych wartościach liczby określającej strukturę złoża (Pz) i prędkości przepływu w_0 lub wykresów $\eta_i = f(w_0)$ przy założonej wartości (Pz) i zmieniającej się średnicy d_p . Przykładową zależność $\eta_i = f(d_p)$ przedstawia rysunek 6. Przedstawioną symulację przeprowadzono dla złoża koksiku o grubości $H = 50$ mm i średnicy zastępczej $d_z = 4,87 \cdot 10^{-3}$ m, oraz aerozolu powietrze – polidispersyj-

ny pył talku. Dla pyłów polidispersyjnych całkowitą skuteczność odpylania η_{og} oblicza się wg wzoru:

$$\eta_{og} = \sum x_i \cdot \eta_i = \sum x_i (1 - e^{-M\alpha_i^*}) \quad (8)$$



Rys. 6. Zależność $\eta_i=f(d_p)$ dla różnych prędkości przepływu gazu $w_0 \in \langle 0,1 \dots 1 \rangle$ m/s

Fig. 6. $\eta_i=f(d_p)$ relation for variable gas flow velocities $w_0 \in \langle 0,1 \dots 1 \rangle$ m/s

Projektowanie urządzenia odpylającego może być podporządkowane; bądź to całkowitej skuteczności odpylania, bądź skuteczności odpylania wybranej frakcji. Parametrami procesu odpylania w złożu ziarnistym są: struktura złoża; w tym grubość H i porowatość ε , średnica zastępcza ziarna d_z i jego sferyczność oraz prędkość gazu w_0 , jego lepkość i gęstość.

2.3. Badania oporów przepływu gazu przez złożę ziarniste

Jednym z istotnych parametrów projektowych odpylacza są opory przepływu gazu. Uwzględnić należy dwa przypadki:

1. pracę urządzenia z przepływem gazów czystych, kiedy to wszystkie parametry złoża oraz prędkość przepływu gazu w złożu jest stała,
2. pracę urządzenia z przepływem aerozolu, kiedy to wyżej wymienione parametry są zmienne w czasie.

Przypadek pierwszy jest stanem odpowiadającym procesowi suszenia, adsorpcji lub początkowej fazie procesu odpylania. Wraz z upływem czasu, skuteczne odpylanie aerozolu prowadzi do kumulacji pyłu w złożu, czemu towarzyszą zmiany struktury złoża, szczególnie porowatości ε i współczynnika kształtu ziaren ψ , a więc warunków aerodynamicznych. Ponadto, obserwuje się wzrost oporów przepływu o charakterystyce uzależnionej od wielu indywidualnych cech tj.: początkowego stężenia zapylenia aerozolu, skuteczności odpylania i prędkości przepływu gazu czyli ładunku pyłu kumulowanego w jednostce czasu w warstwie, a także ewentualnej dyslokacji elementów złoża np. w filtrach z przesuwczą warstwą ziarnistą.

Równania obliczeniowe dotyczące tego zagadnienia, bazujące na kapilarnym modelu warstwy, dają wyniki znacznie odbiegające od danych eksperymentalnych [2, 3, 16, 17]. Lepsze rezultaty uzyskuje się w oparciu o model energetyczny, bazujący na charakterystycznych parametrach złoża i zmiennych parametrach przepływowych.

W wyniku analizy wymiarowej zjawiska, opracowano równanie korelacyjne opisujące opory przepływu przy przepływie gazu przez złożo ziarniste:

$$Eu = x_1 \cdot Re^{x_2} \cdot Pz^{x_3} \quad (9)$$

gdzie:

$$Eu - \text{liczba Eulera, } Eu = \Delta p / (w_0^2 \cdot \rho_g)$$

$$Re - \text{liczba Reynoldsa, } Re = (w_0 \cdot d_z \cdot \rho_g) / \eta_g$$

W celu wyznaczenia stałej oraz wykładników równania (9), dla złóż koksiku, żwiru polistyrenu i korundu przeprowadzono badania na instalacji przedstawionej na rys. 2. Charakterystyczne parametry przebadanych złóż ziarnistych przedstawia tabela 1. Zakres pomiarowy obejmował: grubości złoża $H = \langle 0,05 \dots 0,2 \rangle$ m oraz prędkości przepływu gazu $w_0 = \langle 0,1 \dots 1,0 \rangle$ m/s. Wyniki badań opracowano metodą statystyczną quasi-Newtona, za pomocą programu STATISTICA 6. Wykładniki oraz uzyskane stałe przedstawia tabela 3.

Współczynnik regresji równania (10) wynosi $R=0,92$. Równanie to jest słuszne dla następujących przedziałów zmienności liczb bezwymiarowych:

$$Eu \in \langle 159,22 \div 9228,14 \rangle, Re \in \langle 14,32 \div 261,48 \rangle, Pz \in \langle 3,89 \div 167,56 \rangle.$$

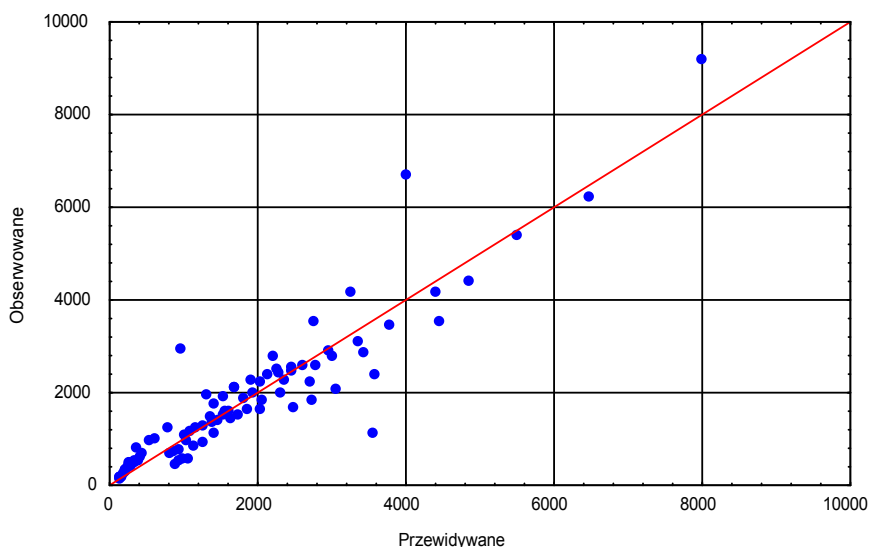
Rozkład wartości liczb Eulera obserwowanych i przewidywanych wg korelacji (10) przedstawia rysunek 7.

Tabela 3. Stałe i wykładniki równania korelacyjnego oporów przepływu przez złożę
Table 3. Constants and exponents of correlation equation of pressure drop across the bed

Materiał ziarnisty	$Eu = x_1 \cdot Re^{x_2} \cdot Pz^{x_3}$			Współczynnik korelacji R
	x_1	x_2	x_3	
Koksik	1113	-0,695	1,186	0,94
Żwir	59	-0,539	1,371	0,86
Polistyren	464	-0,615	0,89	0,97
Kulki korundowe	52	-0,542	1,382	0,98

Poprzez połączenie wyników badań poszczególnych złóż utworzono bazę danych, która posłużyła do opracowania ogólnego równania korelacyjnego:

$$Eu = 898 \cdot Re^{-0,542} \cdot Pz^{0,713} \quad (10)$$

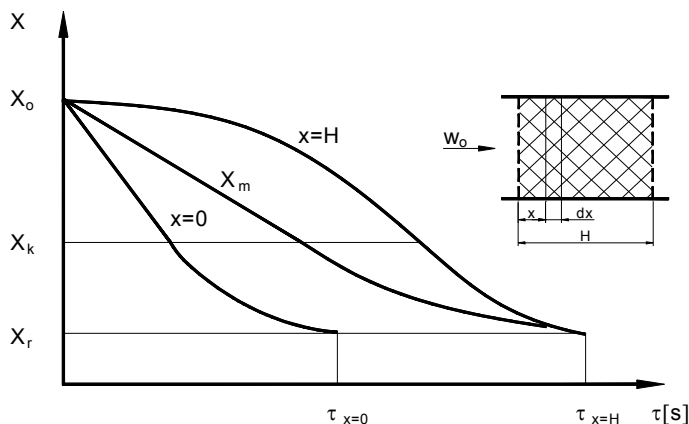


Rys. 7. Rozkład wartości liczb Eulera obserwowanych i przewidywanych wg równania korelacyjnego (10)

Fig.7. Distribution of Eulers Numbers experimental and predicted according to correlation equation No.10

2.4. Badania procesu suszenia złożów ziarnistych

Cechą charakterystyczną procesu suszenia w złożu ziarnistym, z przepływem czynnika suszącego przez złożo, jest przesuwanie się frontu suszenia zgodnie z kierunkiem przepływu czynnika suszącego (rys. 8).



Rys. 8. Przebieg krzywych szybkości suszenia materiału przy przepływie czynnika suszącego przez złożo

Fig. 8. Drying curves of material when the drying agent flows through the bed

Suszenie złożów ziarnistych może być przedstawione za pomocą krzywej opisującej średnią szybkość suszenia X_m [3, 6, 18]. Dla takiego przypadku dobrze sprawdza się model czasu suszenia bazujący na addytywnym ujęciu I i II okresu suszenia [3, 18]:

$$\tau = \frac{1}{\kappa} \left[(X_1 - X_{kr}) + (X_{kr} - X_r) \ln \frac{(X_{kr} - X_r)}{(X_2 - X_r)} \right] \quad (11)$$

gdzie:

- κ – współczynnik szybkości suszenia, [1/s],
- X_1 – początkowa zawartość wilgoci, [kg/kg],
- X_{kr} – krytyczna zawartość wilgoci, [kg/kg],
- X_r – równowagowa zawartość wilgoci, [kg/kg],
- X_2 – końcowa zawartość wilgoci, [kg/kg].

W oparciu o analizę procesu wymiany ciepła i masy w procesie suszenia, opracowano empiryczne równanie kryterialne umożliwiające wyznaczenie liczby intensywności suszenia L_s , która w swojej definicyjnej postaci zawiera współczynnik szybkości suszenia κ

$$Ls = (\kappa \cdot d_z) / (v_g \cdot a) \quad (12)$$

$$Ls = x_1 \cdot Re^{x_2} \cdot Gu^{x_3} \cdot (H/d_z)^{x_4} \quad (13)$$

gdzie:

a – powierzchnia właściwa złoża, $[m^2/m^3]$,

Gu – bezwymiarowa liczba Guchmana, $Gu = (T_s - T_m)/T_s$,

T_s – temperatura termometru suchego,

T_m – temperatura termometru mokrego.

Wyznaczenie stałej i wykładników równania kryterialnego wymagało przeprowadzenia modelowych badań procesu suszenia. Badania te przeprowadzono dla złóż: koksiku, żwiru i kulek glinokrzemianowych reprezentujących odmienne cechy w zakresie kinetyki procesowej. Charakterystyczne parametry przebadanych złóż ustalono w oparciu o badania dodatkowe, których wyniki przedstawiono w tabeli 4 [3].

Tabela 4. Charakterystyczne parametry badanych złóż

Table 4. Characteristic parameters of examined beds

Rodzaj materiału	Średnica ziaren $d_z \cdot 10^3$ [m]	Porowatość ε [m^3/m^3]	Gęstość usypowa ρ_u [kg/m^3]	Sferyczność ψ
Kulki glinokrzemianowe	3,15	0,401	965,72	1
	5	0,457	1023,5	1
Koksik	4,87	0,613	592	0,399
Żwir	0,78	0,305	1593	0,912
	2,39	0,347	1460	0,903
	4,27	0,375	1464	0,887

Badania procesu suszenia przeprowadzono w zakresach zmienności parametrów procesowych odpowiadających również procesowi odpylania aerozoli:

- prędkość przepływu powietrza suszącego $w_0 \in \langle 0,4..1,2 \rangle$ m/s,
- grubość warstwy suszonego materiału $H \in \langle 50..200 \rangle \cdot 10^{-3}$ m,
- temperatura gazu suszącego $t \in \langle 90..190 \rangle ^\circ C$.

Podstawą uogólnienia wyników badań było równanie modelowe (11), określające czas suszenia oraz równanie kryterialne (13). Otrzymane dane doświadczalne opracowano metodą estymacji nieliniowej quasi-Newtona za pomocą programu STATISTICA 6. Obliczone wartości stałej i wykładników zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Stałe i wykładniki równań korelacyjnych
Table 5. Constants and exponents of correlation equations

Materiał ziarnisty	$LS = x_1 \cdot Re^{x_2} \cdot Gu^{x_3} \cdot (H/d_z)^{x_4}$				Współczynnik korelacji R
	x_1	x_2	x_3	x_4	
Kulki glinokrzemianowe	$0,8 \cdot 10^{-5}$	0,99	0,61	-0,89	0,99
Żwir	$1,9 \cdot 10^{-5}$	0,92	0,37	-1,51	0,95
Koksik	$16,2 \cdot 10^{-5}$	1,07	0,81	-1,04	0,98

Analiza wartości liczb bezwymiarowych równania (13) wskazuje, że intensywność procesu suszenia:

- rośnie wraz z liczbą Reynoldsa, przy czym w przypadku ziaren o szorstkiej powierzchni (glinokrzemiany i koksik) wpływ ten jest silniejszy (wykładnik bliski 1), co tłumaczy się zwiększoną burzliwością w strefie opływu ziarna w złożu,
- rośnie wraz ze wzrostem psychrometrycznej różnicy temperatur ($T_s - T_m$) występującej w liczbie Guchmana,
- maleje ze wzrostem względnej grubości złoża (H/d_z), co wynika z obserwowanego strefowego suszenia materiału i przesuwania się frontu suszenia w kierunku przepływu czynnika suszącego.

W wyniku przeprowadzonych badań opracowano równania korelacyjne, umożliwiające wyznaczenie czasu suszenia a także optymalnej wartości inwariantu (H/d_z) dla materiałów zawierających wilgoć powierzchniową (żwir, kulki szklane) oraz materiałów kapilarno-porowatych (kulki glinokrzemianowe, koksik).

3. Podsumowanie

Przedstawione badania poszerzają możliwości aplikacyjne aparatów ze złożem ziarnistym. Opisany proces odpylania gazu i jego równoczesne wykorzystanie jako czynnika suszącego, może być zastosowany w instalacji spalania odpadów stałych. Suszenie odpadów przed ich termiczną utylizacją daje możliwość podwyższenia ich wartości opałowej o 27÷30%, co przekłada się bezpośrednio na wydajność cieplną kotła.

Przeprowadzone badania dowiodły możliwość uzyskania skuteczności odpylania w zakresie od 60 do 99,9%. Rozwiązanie takie, może zatem stanowić pierwszy stopień odpylania bądź stopień końcowy w zależności od struktury złoża, właściwości gazu i pyłu oraz wybranych obciążeń powierzchni filtracyjnej a także sekwencji aparatów w linii oczyszczania gazów spalinowych z instalacji spalania odpadów komunalnych.

W wyniku badań opracowano równanie kryterialne procesu odpylania na złożu ziarnistym (5) oraz równanie oporów przepływu gazu przez polidyspersyjne złożo ziarniste (9), a także równania korelacyjne służące do obliczenia czasu suszenia dla różnych materiałów ziarnistych. Równania te mogą stanowić podstawę procedur projektowych urządzeń wykorzystywanych w instalacji spalania odpadów, a także w instalacjach odpylania gazów technologicznych.

Literatura

1. **Coy C.:** *Gidrodinamika mnogofaznych sistem*. Mir, Moskwa 1971.
2. **Hehlmann J.:** *Ph.D. Thesis*. Politechnika Śląska, 1975.
3. **Hehlmann J., Pietrasik E.:** *Ekologiczne paliwa formowane. Wybrane aspekty inżynierii produktu*. Monografia, Gliwice 2005.
4. **Hehlmann J., Pikoń J.:** *Analysis of the dust collection process on granular beds*. Air Conservation vol. 10, Warsaw, 28-37, 1977.
5. **Kabsch P.:** *Odpylanie i odpylacze*. WNT, Warszawa 1992.
6. **Kneule F.:** *Suszenie*. Warszawa, Arkady, 1970.
7. **Koniczyński J.:** *Ochrona powietrza przed szkodliwymi gazami*. Gliwice 2004.
8. **Perry R.H., Green D.W.:** *Perry's Chemical Engineers' Handbook 7th ed.* McGraw-Hill 1997.
9. **Piecuch T.:** *Termiczna utylizacja odpadów – wdrażać czy nie ?*. Monografia, Wydawnictwo Komisji Ekosfery Polskiej Akademii Nauk Oddział Gdańsk z siedzibą w Szczecinie, 1999.
10. **Piecuch T., Dąbek L., Juraszka B.:** *Spalanie i piroliza odpadów oraz ochrona powietrza przed szkodliwymi składnikami spalin*. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 2002.
11. **Piecuch T.:** *Zarys metod termicznej utylizacji odpadów*. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 2006.
12. **Piecuch T., Juraszka B.:** *Spalanie osadów pokoagulacyjnych zawierających kleje organiczne oraz utylizacja powstałych popiołów*. Wydawnictwo IGSMiE PAN Kraków, Polityka Energetyczna, Tom 10 zeszyt 2, 2007.
13. **Piecuch T., Dąbrowski T., Dąbrowski J., Piekarski J.:** *Energetyczne wykorzystanie odpadów przemysłu chemii organicznej*. Kwartalnik Gazinform, Sankt-Petersburg, 2/2007.
14. **Piecuch T., Dąbrowski J., Dąbrowski T., Rytłewska A.:** *Badania laboratoryjne nad możliwością współspalania miazgi węglowej i osadów ściekowych z Zakładu Przetwórstwa Ryb*. Zeszyty Naukowe Politechniki Koszalińskiej Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Seria Inżynieria Środowiska Nr 23, 2007.
15. **Praca zbiorowa:** *Badania procesu suszenia materiałów ziarnistych*. BW-487 Pol Śl. Gliwice 2000.
16. **Praca zbiorowa:** *Badania suszarki z przesuwnym złożem*. BW-325, Pol Śl. Gliwice 1993.
17. **Praca zbiorowa:** *Nowe paliwa formowalne o zmniejszonej emisji substancji szkodliwych*. Badania własne BW-477, Pol. Śl. Gliwice 1995.

18. **Strumillo Cz.:** *Podstawy teorii techniki suszenia*. WNT, Warszawa 1983.
19. **Użow W.N.:** *Oczyszczanie przemysłowych gazów filtrami*. Chemia, Moskwa 1970.
20. **Warych J.:** *Oczyszczanie gazów. Procesy i aparatura*. WNT, Warszawa 1998.
21. **Warych J.:** *Oczyszczanie przemysłowych gazów odlotowych*. WNT, Warszawa 1994.

Hybrid Apparatus with Granular Bed in the Installation of Waste Combustion

Abstract

Combustion of municipal and industrial waste is widely used method of utilization. However it is accompanied by a number of problems, mainly related to ensuring adequate calorific value and reducing emission of pollutants in the exhaust gas (dust, sulfur dioxide, carbon monoxide, nitrogen oxides, dioxins and PAHs). The designed waste incinerating plants equipped with complex systems of harmful compounds emission reduction, flue gas treatment and disposal of ashes accounts for 75% of the whole incinerating plant capital costs. The way to reduce costs can be a usage of the flue gas heat for drying specially prepared bed. This bed purifies flue gas from the dust and gas components and then undergoes co-combustion with waste, contributing to an increase of calorific value and stabilization of the combustion process.

This paper presents potential use of the apparatus with sliding granular bed as a hybrid device for simultaneous removal of solid and gas pollutants from flue gas, as well as skin-drying of the bed. Finding this solution advisable, comprehensive process researches of the gas cleaning, drying and gas pressure drop across model granular beds have been carried out. The laboratory installation enabled measurement of gas cleaning effectiveness, rate of bed drying and gas pressure drop in its variables; flow velocity in the range of $w_0=(0.1...1)$ m/s, temperatures $t=(90...190)$ °C, dust concentration $c_p=(1...10) \cdot 10^{-3}$ kg/m³ and also different parameters of the bed have been used. Based on the collected results, the criterion equations of gas cleaning process, drying and pressure drop for model granular beds have been developed. Research and analysis of the results showed that: 1) the drying of waste prior to their thermal disposal gives the possibility of increasing their calorific value for about 27÷30%, which translates directly into the calorific effect of the boiler, 2) the possibility to obtain the gas cleaning efficiency in the range of 60 to 99.9%.

Such solution may be a first stage of dedusting or a final one, depending on the structure of bed, dust and gas properties and selected load of filtration surface as well as the sequences of apparatuses in the line of flue gas treatment from the municipal waste incinerating installation. Developed calculation methods are helpful in designing equipment for the beds drying and waste gases cleaning in the waste disposal process i.e.: in waste incinerating plants, in the plants of formed biofuel production, or when inert beds are used as high performance filter deduster especially in the case of high-temperature gases with recovery of the powdery product (eg. installation of Titanium White).

