

# WPLYW TEMPERATURY WLOTOWEJ GAZÓW NA SKUTECZNOŚĆ SEPARACJI W CYKLONOWYM WYMIENNIKU CIEPŁA

Marek WASILEWSKI, Jerzy DUDA

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano wyniki analizy wpływu temperatury fazy gazowej na skuteczność separacji fazy stałej w odpylaczu cyklonowym. Do badań wykorzystano modelowanie numeryczne przepływów (pakiet ANSYS Fluent). W obliczeniach zastosowano model turbulencji RSM, który posłużył do modelowania przepływu turbulentnego o wysokich zawirowaniach. Trajektorie cząsteczek obliczono za pomocą modelu fazy dyskretniej (DPM).

**Słowa kluczowe:** skuteczność odpylania, cyklonowy wymiennik ciepła, wypalanie klinkieru, modelowanie numeryczne przepływów wielofazowych.

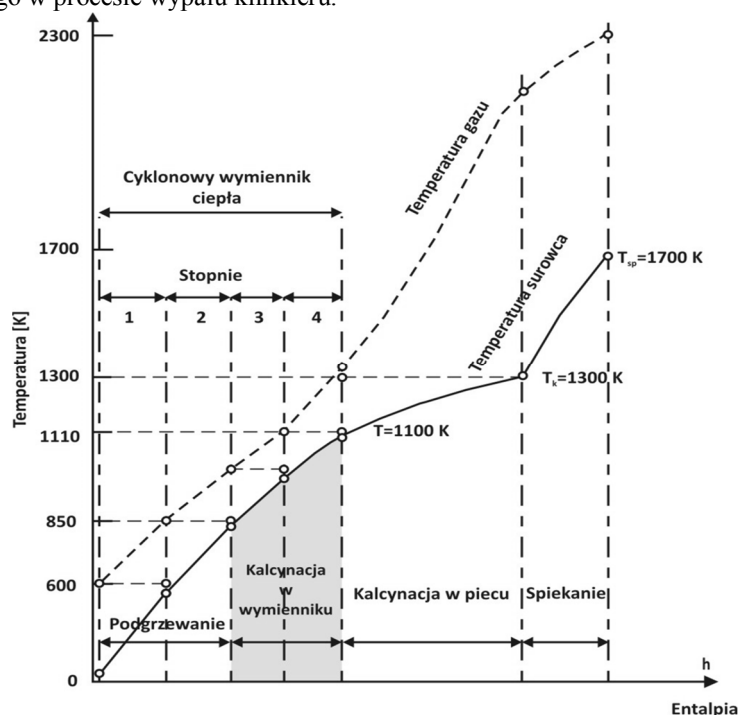
## 1. Wstęp

Zewnętrzne cyklonowe wymienniki ciepła są jednymi z najważniejszych elementów instalacji piecowej do wypalania klinkieru cementowego metodą suchą. Zastosowanie tej technologii pozwoliło na znaczne obniżenie zużycia energii w procesie produkcyjnym oraz na wprowadzenie dwustopniowego opalania pieca, tzw. wstępnej dekarbonizacji (stopień dekarbonizacji mączki piecowej bez zastosowania prekalcyntora wynosi ok. 30-40 %). Praca cyklonowego wymiennika ciepła zbliżona jest do pracy klasycznych wymienników ciepła w stanie zawieszenia. Współczesne wieże wymiennikowe posiadają od 4 do 6 stopni cyklonów. Najwyższy stopień – pierwszy (przyjmuje się numerację od góry) wykonany jest najczęściej z dwóch cyklonów. Konstrukcje cyklonów poszczególnych stopni wymiennika ciepła wynikają z warunków temperaturowych oraz z ich funkcji. Wysokości cylindrycznych części cyklonów II, III i IV stopnia nie są duże. Wynika to z faktu, że na tych poziomach mniejsze znaczenie ma stopień separacji (ok. 70-80%). Ważniejszym celem dla tych cyklonów jest zwiększenie sprawności cieplnej, ograniczenie strat ciśnienia oraz wymiarów wieży wymiennikowej. Natomiast cyklony z wysoką sprawnością separacji cząstek znajdują zastosowanie na najwyższym stopniu (I stopień), gdzie jest wymagana separacja > 95 %. W niższych stopniach wymiennika trudno jest zapewnić wysoką sprawność separacji cząstek ze względu na postępujące rozdrobnienie cząstek (dekarbonizacja) oraz małą gęstość gazów (wysoka temperatura). Na rysunku 1. przedstawiono wartości temperatury wypalanego materiału i gazów w charakterystycznych punktach instalacji piecowej z zewnętrznym, 4-ro stopniowym cyklonowym wymiennikiem ciepła. Dokładny opis zasady działania został zaprezentowany m.in. w pracach [1, 2].

Efektywność pracy cyklonowego wymiennika ciepła w głównej mierze zależy od konstrukcji zastosowanych cyklonów. Cyklon w instalacji piecowej w przemyśle cementowym spełnia rolę urządzenia odpylającego a także wymiennika ciepła. Głównymi parametrami cechującymi sprawność separatorów cyklonowych są skuteczność odpylania

ciała stałego i spadek ciśnienia. Zależą one od geometrii cyklonu i warunków pracy. Dokładne określenie tych parametrów jest bardzo ważne, ponieważ odnosi się bezpośrednio do kosztów operacyjnych. Projektowanie konstrukcji cyklonu opiera się przede wszystkim na wynikach badań doświadczalnych i modelowych [3]. Dotychczas nie opracowano metody obliczeń, która miałaby uniwersalne znaczenie i była w pełni zgodna z wynikami badań rozmaitych typów. Niemniej jednak analiza teoretyczna zachodzących zjawisk w cyklonie oparta na obserwacjach fizycznych umożliwi przybliżone ustalenie związków zachodzących między parametrami konstrukcyjnymi a skutecznością odpylania.

Większość prac badawczych nad separatorami cyklonowymi dotyczy określania skuteczności odpylania i spadku ciśnienia bez uwzględnienia temperatury czynników. W związku z tym autorzy podjęli się analizy wpływu temperatury przepływającego medium na parametry cechujące pracę cyklonów, na przykładzie cyklonowego wymiennika ciepła stosowanego w procesie wypału klinkieru.



Rys. 1. Wykres wartości temperatury gazów i surowca w instalacji wypału klinkieru

## 2. Skuteczność separacji fazy stałej w odpylaczu cyklonowym

Analizując literaturę specjalistyczną napotykać można na kilka teorii dotyczących separacji cząstek ciała stałego w cyklonach. W większości z nich do szacowania wydajności odpylacza stosuje się pojęcie średnicy ziarna granicznego ( $d_{pc}$ , określana też jako średnica  $d_{50}$ ), która jest średnicą cząstki odseparowanej ze skutecznością 50%. Oczywiście dąży się do tego, aby wartość ta była możliwie jak najmniejsza. W tabeli 1. zaprezentowano cztery najczęściej spotykane w literaturze modele do określania skuteczności odpylania zaproponowane kolejno przez: Barth'a [4], Lapple'a [5], Lozia i Leith'a [6], oraz Li i Wang'a [7]. Porównanie w/w modeli przedstawiono między innymi w

pracach [8, 9].

Tab. 1. Skuteczność odpylania cząstek ciała stałego według modeli Barth'a, Lapple, Lozia i Leita oraz Li i Wang.

Badacz	$\eta_i$	Wzory pomocnicze
Barth	$\eta_i = \frac{1}{1 + \left( \frac{\pi H^m \rho_p v_{max}^2 d_{pc}^2}{9\mu\dot{Q}} \right)^{-3.2}}$	$H^m = H - S, \text{ dla } D_e \leq D_d$ $H^m = \frac{(H - h)(D - D_e)}{D - D_d} + (h - S), \text{ dla } D_e \geq D_d$ $v_{max} = v_o \left[ \frac{\left( \frac{D_e}{2} \right) (D - b)\pi}{2ab\alpha + H^m(D - b)\pi\lambda} \right]$ $v_o = \frac{4\dot{Q}}{\pi D_e^2}$ $\gamma = 1 - 1,2 \left( \frac{b}{D} \right)$ $\lambda_s = 0,02$
Lapple	$\eta_i = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_{pi}} \right)^2}$	$d_{pc} = \left[ \frac{9\mu b}{2\pi N_e v_i (\rho_p - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{2}}$ $N_e = \frac{1}{a} \left[ h + \frac{H - h}{2} \right]$
Lozia i Leita	$\eta_i = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_{pi}} \right)^\beta}$	$d_{pc} = \left[ \frac{9\mu b}{\pi \rho_p h_c v_{max}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$ $h_c = (H - S) - \left[ \frac{H - S}{\frac{D}{B} - 1} \right] \left[ \left( \frac{d_c}{B} \right) - 1 \right] d_c -$ <p style="text-align: center;">średnica, dla <math>d_c &gt; B</math>  <math>h_c = H - S</math>, dla <math>d_c &lt; B</math></p> $d_c = 0,47D \left( \frac{ab}{D^2} \right)^{-0,25} \left( \frac{D_c}{D} \right)^{1,4}$ $\beta = 0,62 - 0,87 \ln \left( \frac{d_{pc}}{100} \right) + 5,21 \ln \left( \frac{ab}{D^2} \right) + 1,05 \left[ \ln \left( \frac{ab}{D^2} \right) \right]^2$ $v_{max} = 6,1 v_i \left( \frac{ab}{D^2} \right)^{0,61} \left( \frac{D_e}{D} \right)^{-0,74} \left( \frac{H}{D} \right)^{-0,33}$
Li i Wang	$\eta_i = 1 - \exp\{-\lambda\theta_1\}$	$\theta_1 = \frac{2\pi(S + H)}{(1 - a)K v_w} = \frac{D_r r_a^n}{D_r r_a^n}$ $K = \frac{(1 - n)(\rho_p - \rho_g)d^2\dot{Q}}{18\mu b(r_a^{1-n} - r_i^{1-n})}$ $0,5 < n < 1$

Osobną grupę badań nad skutecznością separacji fazy stałej (podobnie jak w przypadku określania spadku ciśnienia) stanowią prace z wykorzystaniem technik modelowania numerycznego (CFD). Przykładem mogą być prace [10-16]. Analizując wnioski w/w prac można stwierdzić, że metoda CFD jest w stanie zapewnić wgląd w proces separacji cząstek ciała stałego w cyklonach, ale wymaga konfrontacji z danymi doświadczalnymi. Niewątpliwie zaletą tej metody w porównaniu do metod zaprezentowanych w tabeli 1 jest możliwość przeanalizowania wpływu niestandardowych modyfikacji na parametry skuteczności tych separatorów (np. zmienny kąt wlotu do cyklonu).

### 3. Podstawy teoretyczne modelowania numerycznego

CFD jest metodą symulacji zachowania systemów, procesów i urządzeń związanych z przepływem płynów, wymiany ciepła i masy, reakcji chemicznych i zjawisk fizycznych. Osiąga się to przez numeryczne rozwiązanie równań różniczkowych związanych z zachowaniem pędu, masy i ciepła, tzw. modeli matematycznych. Dzięki zastosowaniu CFD mamy możliwość przeprowadzenia szczegółowej analizy zagadnień związanych z przepływem płynów, eliminując przy tym konieczność przeprowadzenia czasochłonnych i kosztownych badań doświadczalnych podczas cyklu projektowania i modernizacji urządzeń. Programy CFD pozwalają uzyskać niezbędne informacje o przepływie płynu (np. rozkład pola prędkości, pola ciśnienia), ruchu ciepła (pole temperatury) i innych zjawisk towarzyszących (w tym reakcji chemicznych). Umożliwia to w pierwszej kolejności, a następnie ilościowo interpretację otrzymanych wyników.

Biorąc pod uwagę fakt, iż w równaniach zachowania masy, pędu i energii występują powtarzające się człony opisujące wkład poszczególnych mechanizmów transportu można wprowadzić następujący zapis:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \text{div}(\rho \varphi \vec{w}) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \varphi) + S_{\varphi} \quad (1)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$t$  – czas [s]

$\vec{w}$  – uśredniony wektor prędkości [m/s]

$S_{\varphi}$  – człon źródłowy

$\Gamma$  – współczynnik dyfuzji

$\varphi$  – uogólniona zmienna skalarna (wynikająca z powtarzających się Członów)

Dzięki możliwości zapisania równań zachowania w postaci jednego wyrażenia, niezbędna jest tylko jedna procedura numeryczna, która będzie powtarzalna dla właściwych  $\varphi$  (i odpowiednich wyrażen na  $\Gamma$  i  $S_{\varphi}$ ).

Zdecydowana większość przepływów występujących w inżynierii chemicznej i procesowej ma postać przepływu turbulentnego. Charakteryzują się one nieregularnością, wirowością, dyfuzyjnością i nieciągłością. Dlatego też w metodach CFD istnieje konieczność modelowania zjawisk związanych z przepływem burzliwym. Najczęściej stosowana jest metoda Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations (RANS). Równanie N-S ma następującą postać (równanie zachowania pędu):

$$\frac{\partial(\rho \vec{w})}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{w} \vec{w} + \rho \overline{w'_i w'_j}) = \text{div}(\mu \text{grad} \vec{w}) - \text{div}(p \vec{I}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

(i, j, k = 1,2,3 lub x, y, z - to elementy w kartezjańskim układzie współrzędnych).

Pojawienie się nowego członu  $\overline{\rho w'_i w'_j}$  powoduje, że układ równań opisujący ruch turbulentny staje się układem niezamkniętym. Naprężenie turbulenne są przedstawione w następującej postaci:

$$-\overline{\rho w'_i w'_j} = \mu_T \left( \frac{\partial \overline{w}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{w}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (3)$$

gdzie:

$\mu_T$  – lepkość turbulentna [Pa\*s]

$\delta_{ij}$  – delta Kroneckera

$\overline{w}_i, \overline{w}'_i$  – uśredniony wektor prędkości i jej fluktuacja (zapis tensorowy w kierunku  $x_i$ )

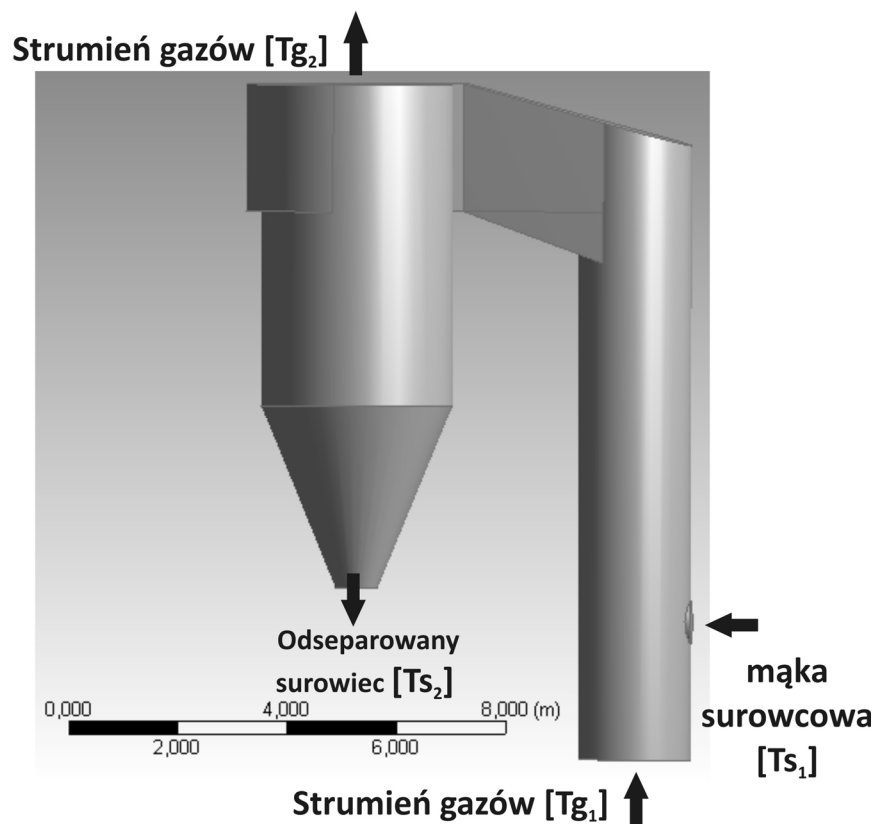
$k$  - energia kinetyczną turbulencji (liczna na jednostkę masy płynu).

Rozwiązanie takiego zagadnienia wymaga sformułowania hipotezy zamykającej, tzw. modelu szczegółowego. Najczęściej stosowanym modelem domykającym w przypadku odpylaczy cyklonowych jest model Reynolds Stress Model (RSM). Model ten pozwala dokładnie odwzorować naprężenia turbulenne, o charakterze wysoce anizotropowym (występujące w cyklonach). Został on szczegółowo opisany w pracach [17-19].

W celu oceny skuteczności separacji ciała stałego w cyklonie, jako model dyskretnej fazy (Discrete Phase Model – DPM) może być wykorzystane podejście eulerowsko-lagrange'owskie (EL). W metodologii tej płyn jest traktowany jako faza ciągła (obliczenia polegają na rozwiązaniu równania Naviera-Stokesa) natomiast faza rozproszona identyfikowana jest poprzez śledzenie cząstek (obliczenie pola przepływu). Trajektorie poszczególnych grup cząstek są przewidywane przez dokonanie bilansu sił działających na daną grupę cząstek. Dokładny opis tej metody przedstawiono w pracach [20, 21].

#### 4. Opis procesu badawczego i analiza wyników

Celem badań była analiza wpływu temperatury wlotowej gazów powstałych w wyniku spalania paliwa w piecu obrotowym na skuteczność separacji fazy stałej (mąka surowcowa) w cyklonach. Do badań wykorzystano model cyklonu I stopnia, wchodzących w skład cyklonowego wymiennika ciepła. Ze względu na fakt, iż 80 % wymiany ciepła następuje w przewodach między cyklonami, a 20 % w samych cyklonach [22] zdecydowano się na rozbudowę modelu samego cyklonu o przewody doprowadzające gazy i surowiec do cyklonu (w większości badań przedstawionych w literaturze specjalistycznej sposób doprowadzenia oraz reakcje zachodzące na tym etapie są pomijane). Jest to istotne z tego względu, że pomiary temperatur w pracujących instalacjach często mogą być nieprecyzyjne ze względu na mieszanie się strumieni fazy stałej i gazowej. Dlatego w badaniach zdecydowano się na wykorzystanie danych wejściowych, których pomiar może być bardziej precyzyjny (temp. mąki surowcowej przed doprowadzeniem do przewodów gazowych oraz temp. gazów przed miejscem doprowadzenia surowca). Pozwala to (przy wykorzystaniu metody CFD) na oszacowanie temperatur obu faz na wlocie do cyklonu (surowiec został już ogrzany przed wlotem do cyklonu w przewodach gazowych). Na rysunku 2. zaprezentowano model 3D wykorzystany w badaniach.



Rys. 2. Trójwymiarowy model układu badawczego

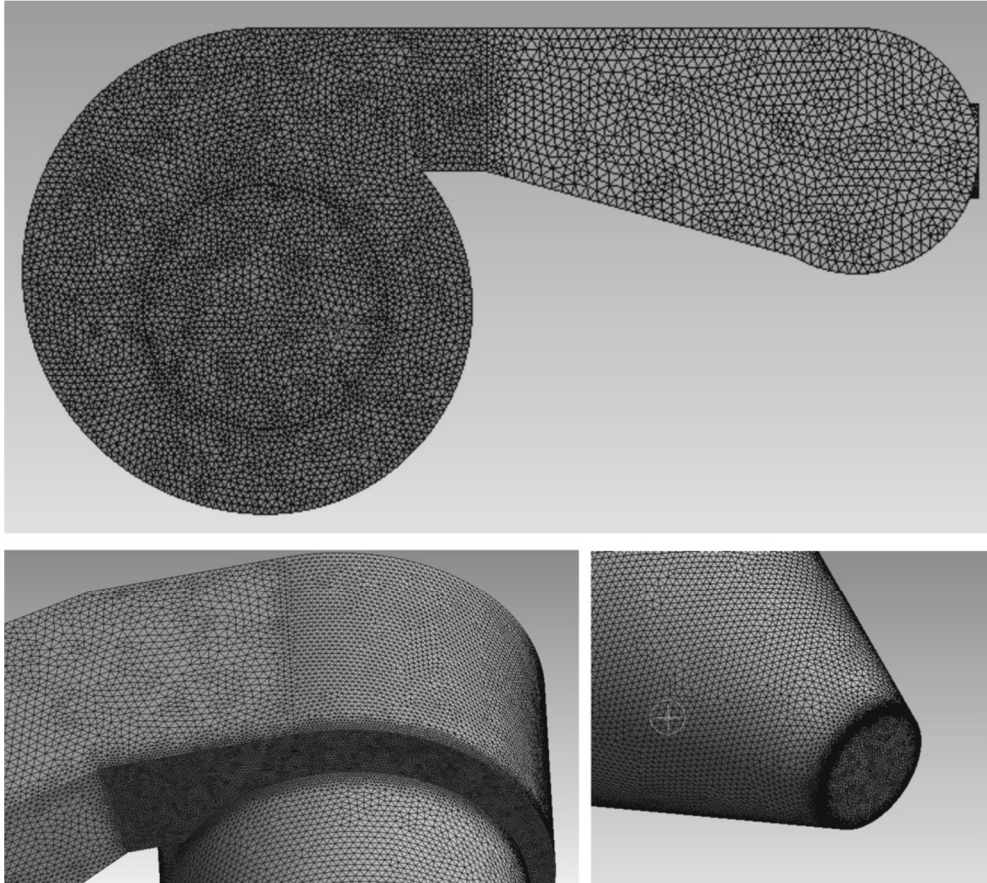
Po analizie bilansu masowo-ciepłnego, wydajności pieca, zużycia mąki surowcowej, ilości gazów odlotowych, rozkładu temperatur w wymienniku cyklonowym, a także wartości średnich z pomiarów eksploatacyjnych przyjęto parametry wejściowe do układu. Gaz (spaliny powstałe w wyniku spalania paliwa w piecu obrotowym) zdefiniowano, jako mieszaninę o następującym składzie chemicznym: 63% N<sub>2</sub>, 31% CO<sub>2</sub> oraz 6% O<sub>2</sub>. Gęstość gazu w warunkach normalnych wynosiła 1,3153 kg/m<sup>3</sup>. W modelu uwzględniono zmianę gęstości wraz ze zmianą temperatury czynnika. Przyjęty strumień masowy gazu wynosił 64,7 kg/s. Natomiast cząstkami ciała stałego była zhomogenizowana mączka surowcowa (gęstość 2800 kg/m<sup>3</sup>), stanowiąca nadawę w procesie wypalania klinkieru. W związku z tym, że faza stała składa się z cząstek o różnych średnicach, oszacowano ich udziały w poszczególnych frakcjach. Po przeprowadzeniu analizy sitowej określono udziały procentowe poszczególnych frakcji przy założeniu rozkładu Rosina-Rammlera-Sperlinga (RRS).

Analiza numeryczna przepływów wykonana została metodą objętości skończonych przy użyciu pakietu Fluent (ANSYS Inc.). Szczegółowe informacje dotyczące zadanych warunków modelowania CFD zostały przedstawione w tabeli 2. Zdecydowano się na zastosowanie najdokładniejszego modelu obliczeniowego, uwzględniającego naprężenia turbulentne o charakterze wysoce anizotropowym [17-19]. Do rozwiązania równań różniczkowych zastosowano algorytm obliczeniowy SIMPLEC, w celu właściwego określenia sprzężenia pól ciśnienia i prędkości dla zachowania równania ciągłości pędu.

Model ten polega na obliczaniu iteracyjnym na przemian składowych prędkości oraz ciśnienia [23, 24]. Dla wyznaczenia reprezentatywnych próbek wartości składowych na powierzchni objętości kontrolnych zastosowano interpolację metodą „pod prąd” pierwszego rzędu (First-Order Upwind). Warunek konwergencji dla równania ciągłości ustalono na  $10^{-5}$  a dla pozostałych równań wynosił  $10^{-3}$ . Zdefiniowano standardowe funkcje przyścienne do modelowania warstwy granicznej. Dodatkowo wykorzystano standardowe wartości współczynników podrelaksacji, aby ustabilizować proces obliczeniowy. Obecność fazy stałej została odwzorowana za pomocą metody Eulera-Lagrange'a realizowanego w ANSYS FLUENT jako model dyskretny fazy (DPM). Gęstość siatki była zmienna, w celu uwzględnienia miejsc w okolic, których występują największe zaburzenia przepływu. Łączna ilość komórek modelu wynosiła około 1 700 000. Przy doborze gęstości siatki obliczeniowej uwzględniono także minimalną ilość komórek, przy której nie odnotowano znaczących zmian wyników. Na rys. 3 przedstawiono dyskretyzację wybranych obszarów obliczeniowych.

Tab. 2. Szczegółowa charakterystyka badań CFD

<b>Warunki brzegowe</b>	
Wlot	Velocity inlet
Wylot	Outflow
Ściany cyklonu	Standardowa funkcja ścian
Model turbulentny	Reynolds stress model (RSM)
<b>Dyskretyzacja</b>	
Ciśnienie	Standard
Sprężenie pól ciśnienia i prędkości	SIMPLEC
Pęd	First order upwind
Energia kinetyczna turbulencji	First order upwind
Współczynnik dyspacji	First order upwind
Naprężenia Reynoldsa	First order upwind
<b>Warunki konwergencji</b>	
Równania ciągłości	$10^{-5}$
pozostałe	$10^{-3}$
<b>Współczynniki podrelaksacji</b>	Standardowe
<b>Discrete phase model ling (DPM)</b>	
Założenie	Cząstki kuliste



Rys. 3. Siatka obliczeniowa dla charakterystycznych miejsc modelu

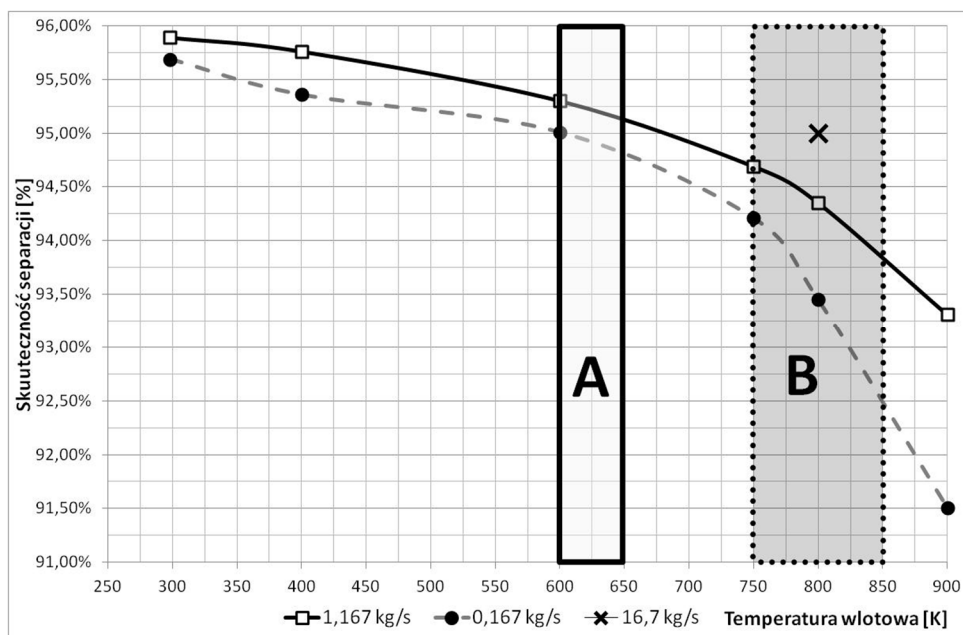
W modelu konieczne było wprowadzenie dodatkowych założeń ze względu na:

- duży rzeczywisty strumień mąki surowcowej (16,7 kg/s),
- ciało stałe wprowadzane do cyklonu posiada nienaturalnie wysokie koncentracje w porównaniu z fazą gazową,
- zastosowanie złożonego modelu turbulentnego RSM zintegrowanego z algorytmem wymiany ciepła.

Połączenie w/w czynników wymagałoby zastosowania dużych mocy obliczeniowych (np. wysokowydajnych klastrów komputerowych). Dlatego też zdecydowano się na ograniczenie strumienia mąki wprowadzanej do cyklonu (zastosowano 2 warianty: 10 % oraz 1 % wartości rzeczywistej).

Na rysunku 4. zaprezentowano otrzymane wartości skuteczności separacji ciała stałego w zależności od temperatury wlotowej do odpylacza cyklonowego. Badania przeprowadzono dla następujących prędkości wlotowych: 298 K, 400 K, 600 K, 750 K, 800 K, 900 K. Prędkość wlotowa do cyklonu była stała. Dodatkowo na wykres naniesiono wartość uzyskaną dla cyklonu tej samej konstrukcji, pracującego w jednej z cementowni w Polsce.





Rys. 4. Skuteczność separacji fazy stałej w zależności od temperatury wlotowej

Pole A – przedział temperatur wylotowych gazów z cyklonów I stopnia

Pole B - przedział temperatur wlotowych gazów do cyklonów I stopnia

Analizując otrzymane wyniki zauważono, że wraz ze wzrostem temperatury wlotowej zmniejsza się skuteczność separacji fazy stałej. Efekt ten jest głównie spowodowany spadkiem gęstości i wzrostem lepkości gazu. Dla strumienia maki surowcowej wynoszącego 1,67 kg/s (10 % wartości rzeczywistej) uzyskano większe wartości skuteczności separacji w porównaniu do strumienia 0,167 kg/s (1 % wartości rzeczywistej). Wynika z tego, że wraz ze wzrostem obciążenia układu strumieniem fazy stałej wzrasta skuteczność odpylania. Tendencję tą potwierdzają wyniki uzyskane z praktyki przemysłowej – zwiększenie strumienia o kolejne 10 % (punkt X – 100 % wartości rzeczywistej) powoduje porównywalny wzrost skuteczności odpylania. Warto zauważyć także, że im większa temperatura wlotowa, tym większy jest spadek skuteczności. Można to zauważyć analizując odcinki krzywych do temperatury ok. 750 K (łagodny spadek) oraz dla wartości większych (gwałtowny spadek).

Dodatkowo analizując rozkład temperatury wewnątrz aparatu stwierdzono, że wymiana ciepła pomiędzy fazą gazową a stałą zwiększa się wraz z wzrostem prędkości wlotowej oraz ze zwiększaniem obciążenia układu substancją stałą. Najintensywniejsza wymiana ciepła następuje w przewodzie doprowadzającym oraz w rejonie wlotu, a najmniej efektywna w części stożkowej, szczególnie w jego dolnej części.

## 5. Wnioski

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Całkowita skuteczność odpylania cyklonu zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury, zwłaszcza w zakresie wyższych temperatur (od około 750-800 K),

dla których skuteczność gwałtowniej maleje w odniesieniu do niższego zakresu temperatur.

- Wraz ze wzrostem strumienia fazy stałej wzrasta ogólna sprawność separacji.
- Intensywność spadku skuteczności odpylania maleje wraz ze wzrostem strumienia fazy stałej - szczególnie w zakresie wysokich temperaturach. Wynika to z faktu tworzenia się aglomeracji cząstek.
- Intensyfikacja wymiany ciepła pomiędzy fazami wzrasta wraz z prędkością wlotową oraz wraz z obciążeniem układu fazą stałą.
- W przypadku cyklonów stosowanych wyłącznie do odpylania korzystne jest prowadzenie procesu w możliwie jak najniższej temperaturze.

### Oznaczenia do tabeli 1.

- a - wysokość wlotu do cyklonu [m]  
b - szerokość wlotu do cyklonu [m]  
B - dolna szerokość części stożkowej [m]  
 $d_c$  - średnica wiru [m]  
 $d_p$  - średnica cząstki fazy stałej [m]  
 $d_{pi}$  - średnica cząstki, dla której skuteczność jest wymagana [m]  
 $d_{pc}$  - średnica cząstki granicznej  $d_{50}$  [m]  
D - średnica cyklonu [m]  
 $D_e$  - średnica wylotu do cyklonu [m]  
 $D_r$  - promieniowy współczynnik dyfuzji [m]  
h - wysokość części walcowej [m]  
 $h_c$  - długość wiru [m]  
H - wysokość cyklonu [m]  
 $H^m$  - wysokość osi środkowej cyklonu [m]  
K - parametr określający konfigurację cyklonu i charakter pracy stałej  
 $N_e$  - liczba obrotów wiru  
 $r_i$  - promień przewodu wylotowego gazu [m]  
 $r_a$  - promień części walcowej cyklonu [m]  
 $r_e$  - odległość od osi cyklonu do osi przewodu wlotowego [m]  
S - głębokość zanurzenia przewodu wylotowego [m]  
Q - strumień objętości gazu [kg/s]  
 $v_i$  - prędkość wlotowa do cyklonu [m/s]  
 $v_{max}$  - maksymalna prędkość styczna [m/s]  
 $v_o$  - średnia prędkość w przewodzie wylotowym [m/s]  
 $\rho_p$  - gęstość cząstki fazy stałej [ $\frac{kg}{m^3}$ ]  
 $\rho_g$  - gęstość cząstki fazy gazowej [ $\frac{kg}{m^3}$ ]  
 $\alpha$  - współczynnik oporu dla cyklonu  
 $n_i$  - współczynnik wiru cyklonu  
 $\lambda$  - współczynnik tarcia czystego gazu o ścianki cyklonu = 0,0075  
 $\lambda_s$  - współczynnik tarcia zapyłonego gazu o ścianki  
 $\mu$  - stężenie masowe pyłu kg/kg  
Y - współczynnik korekcyjny dla cyklonu

## Literatura

1. Duda J.: Badania izotopowe przepływu materiału w nowoczesnym piecu obrotowym pracującym metodą suchą. *Prace IMMB*. Nr 13, 1994, s. 105-112.
2. Wasilewski M., Duczkowska-Kądział A., Duda J.: Wykorzystanie nowoczesnych technik modelowania numerycznego w celu minimalizacji spadku ciśnienia w odpylaczach cyklonowych stosowanych w procesie wypalania klinkieru. *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*. Tom II, część 5, 2013, s. 687-696.
3. Mazur M., Teisseyre M.: *Podstawy teorii i konstrukcji urządzeń odpylających: odpylacze cyklonowe i elektrostatyczne*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 1977.
4. Barth W.: Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheiden auf Grund neuerer Untersuchungen, *BWK*. Vol. 8, 1956, s. 1–9.
5. Lapple C. E.: Process uses many collector types. *Chemical Engineering*. Vol. 58, 1951, s. 144.
6. Lozia D. L., Leith D.: The logistic function and cyclone fractional efficiency. *Aerosol Science and Technology*. Vol. 12, 1990, s. 598–606.
7. Li E., Wang Y. A.: New collection theory of cyclone separators. *AIChE Journal*. Vol. 35(4), 1989, s. 666–669.
8. Gimbutun J., Choong T., Fakhru'l-Razi A., Chuah T. G.: Prediction of the effect of dimension, particle density, temperature, and inlet velocity on cyclone collection efficiency. *Jurnal Teknologi*. Vol. 40 (F), 2004: s. 37–50.
9. Parihar A. K. S., Joshi Ch., Sridhar G.: The performance of cyclones in producer gas cleaning: experimental and modeling studies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy* 2012, s. 1-18.
10. Chu K.W., Wang B., Vince A., Yu A.B., Barnett G.D., Barnett P.J.: CFD–DEM study of the effect of particle density distribution on the multiphase flow and performance of dense medium cyclone. *Minerals Engineering*. Vol. 22, 2009, s. 893–909.
11. Cortes C., Gil A.: Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 33, 2007, 409–452.
12. Kuang S.B., Chu K.W., Yu A.B., Zou Z.S., Feng Y.Q.: Computational investigation of horizontal slug flow in pneumatic conveying. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Vol. 47, 2008, s. 470–480.
13. Qian F., Huang Z., Chen G., Zhang, M.: Numerical study of the separation characteristics in a cyclone of different inlet particle concentrations. *Computers & Chemical Engineering*. Vol. 31, 2007, s. 1111–1122.
14. Wan G.J., Sun G.G., Xue X. H., Shi M. X.: Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator. *Powder Technology*. Vol. 183, 2008, s. 94–104.
15. Xu B.H., Yu A.B.: Numerical simulation of the gas–solid flow in a fluidized bed by combining discrete particle method with computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Science*. Vol. 52, 1997, s. 2785–2809.
16. Zhao Y.Z., Jiang M.Q., Liu Y.L., Zheng J.Y.: Particle-scale simulation of the flow and heat transfer behaviors in fluidized bed with immersed tube. *AIChE Journal*. Vol. 55, 2009, s. 3109–3124.
17. Su Y., Zheng A., Zhao B.: Numerical simulation of effect of inlet configuration on square cyclone separator performance. *Powder Technology*. Vol. 201, 2011, s. 293-303.
18. Wan G., Sun G., Xue X., Shi M.: Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator. *Powder Technology*. Vol. 183, 2008, s. 94-104.

19. Wang B., Xu D.L., Chu K.W., Yu A.B: Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator. *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 30, 2006, s. 1326-1342.
20. Ferziger J.H., Peric M.: *Computational Methods For Fluid Dynamics*. Springer 2002 r.
21. Dobrowolski B., Nowosielski G.: Modelowanie zjawisk przepływowych w odsiewaczu młyna wentylatorowego. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa*. Nr 25, 2004, s. 2097-2194.
22. Masin M.: Present Burning Procedure of Portland Clinker. Vol. 3, Praga 1966, s. 88-91.
23. Pantakar S.V.: *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation. Washington 1980.
24. Cristea E.D., Malfa E., Coghe A.: 3-D Numerical simulation and measurement of strongly swirling heavy dust-laden flow inside a cyclone separator. *3rd International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements*. Crete 1996.

Mgr inż. Marek Wasilewski  
Dr hab. inż. Jerzy Duda, prof. PO  
Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów  
Politechnika Opolska  
45-370 Opole, ul. Ozimska 75  
tel. (0-77) 423 40 44  
e-mail: m.wasilewski@po.opole.pl  
j.duda@po.opole.pl