

Model CFD przepływu oczyszczanego powietrza w separatorze po procesie peletowania słomy

Streszczenie

Stworzono model komputerowy oraz przeprowadzono symulację w programie ANSYS CFX 12.1 dla tunelowego odpylacza powietrza. Oczyszczanie powietrza z zanieczyszczeń jest niezwykle istotnym procesem, gwarantującym bezpieczeństwo pracy podczas przetwarzania materiałów stałych. W niniejszej pracy przedstawiono założenia do stworzenia modelu komputerowego oraz wyniki symulacji. Zaprezentowany tunel służy do oczyszczania powietrza z pyłu po peletowaniu słomy oraz do zbadania procesu sedymentacji cząstek pyłu w poziomym tunelu. Wyniki wykazały, że pył tworzy V-kształtne czoło, gdzie mniejsze i lżejsze cząstki wędrują w głąb tunelu, a cięższe cząstki opadają przy wlocie. Ponadto zauważono, że powstają wiry, co potwierdza założenia, iż sedymentacja także jest przepływem turbulentnym.

Słowa kluczowe: model CFD, podejście Eulera, przepływ dwufazowy, zapylenie powietrza, produkcja peletu

A Computational Fluid Dynamics model of two-phase mixture flow in a separator after straw pellet production

Summary

A computer model of a tunnel aircleaner was created as well as simulation was performed using ANSYS CFX 12.1 software. Air cleaning is an essential process that guarantees a job security during the solid material processing. In the paper the basis for creating a computational model of a tunnel air cleaner and results of the simulation were presented. The considered tunnel is ment for cleaning air after straw pelletization. It is also used to analyze the process of sedimentation of the dust. It showed that the air creates a V-shaped front, where smaller particles travel further and bigger particles fall out immediately. Vortexes appeared what confirmed that sedimentation is a turbulent flow.

Key words: CFD model, Euler method, two-phase flow, level of pollution, pellet production

Wykaz oznaczeń:

C_d – gęstość fazy rozproszonej [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$];
 D_{ma} – współczynnik rozproszenia fazy [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$];
 F – pozostałe siły [$\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$];
 L – odległość w tunelu [m];
 d_d – średnica zastępcza cząstki [μm];
 u_d – prędkość cząstkowa [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$];
 d_y – odległość cząstkowa między warstwami [m];
 f_a – współczynnik oporu przepływu dla fazy rozproszonej [-];
 g – przyspieszenie grawitacyjne [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$];
 m_{dc} – transport masy między fazami [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$];
 p – ciśnienie [Pa];

u – prędkość [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$];
 u_{slide} – prędkość między warstwami [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$];
 σ_k – stała Prandtla [-];
 φ_d – udział objętościowy fazy rozproszonej [-];
 φ_c – udział objętościowy fazy ciągłej [-];
 τ – naprężenia ścinające [$\text{N}\cdot\text{s}^{-2}$];
 ρ_d – gęstość fazy rozproszonej [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$];
 ρ_c – gęstość fazy ciągłej [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$];
 ρ – gęstość [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$];
 ν – lepkość kinematyczna [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$];
 μ – lepkość dynamiczna [Pa];
 μ_T – lepkość turbulentna [$\text{Pa}\cdot\text{s}$].

Wprowadzenie

W ostatnich latach zmiany klimatu stały się na tyle widoczne i odczuwalne, że nie można już temu zaprzeczyć. W tej chwili działania ludzkości mają na celu nie tyle ochronę środowiska, co zaplanowanie zmian oraz próbę naprawienia zniszczeń. Wzrost średniej temperatury na ziemi jest związany z ocieplaniem klimatu wywołanym przez nadmierną emisję gazów cieplarnianych. Głównym gazem cieplarnianym jest dwutlenek węgla, który powstaje przy spalaniu paliw kopalnianych, które są wykorzystywane

przy produkcji energii. Z każdym rokiem wzrasta zapotrzebowanie na energię, a to oznacza większe zapotrzebowani

Biomasa może być wykorzystana, jako substrat do produkcji biometanu w biogazowni, może zostać zgazowana lub spalona. O ile spalanie paliw kopalnianych ma dodatni bilans CO_2 to przy spalaniu biomasy bilans CO_2 jest zerowy. Uznaje się, że rośliny w czasie wzrostu pochłaniają pewna ilość węgla z atmosfery, która w tej samej ilości jest potem oddawana w procesie utleniania biomasy. Najczęściej wykorzystuje się biomasę odpadową, jak np. słomę, odpady tartaczne czy też odpady przetwórstwa spożywczego bądź

biodegradowalne odpady komunalne i miejskie. Prowadzone są także plantacje roślin energetycznych, ale te najczęściej są poddawane fermentacji w biogazowni (Oberberger i Thek, 2010; Döring, 2013).

Wiele metod przetwarzania materiałów stałych grozi powstawaniem chmur pyłu. Na zagrożenie pyłowe składa się ryzyko wybuchu, zagrożenie wypadkami związane ze zmniejszoną widocznością, mechaniczne i chemiczne niszczenie sprzętu oraz zagrożenie dla zdrowia. Wszędzie tam gdzie są generowane pyły musi być również system oczyszczania powietrza. Dostępnych jest wiele urządzeń do odpylania, o różnej wielkości, wydajności, energochłonności czy sposobie usuwania zanieczyszczeń. Tak ogromna różnorodność pozwala na dobranie właściwego systemu do potrzeb danego zakładu (WHO, 1999).

Wyróżnia się odpylacze suche, czyli komory osadnicze, cyklony, odpylacze tkaninowe oraz odpylacze elektrostatyczne. Odpylacze mokre to wszelakie płuczki, bez wypełnienia, z wypełnieniem, pianowe oraz z przepływem gazu. Oprócz podziału ogólnego na odpylacze suche i mokre różni się podział urządzeń według wykorzystywanych w nich zjawisk: siły bezwładności, odśrodkowej, zjawisk elektrostatycznych, bądź zjawisk filtracji. Wysoki koszt urządzeń do redukcji zanieczyszczeń powietrza skłania do zmian technologii. Duże znaczenie ma także hermetyzacja oraz automatyzacja procesów, w wyniku których zachodzi wyeliminowanie człowieka z bezpośredniego sąsiedztwa zanieczyszczeń (Sarna, 2005; Kabsh, 1992).

Nawet przy małej skali produkcji, np. przetwarzanie słomy na pellet przez rolnika na własny użytek generuje pewne ilości pyłu. Zapylenie powierzchni roboczej może skutkować zagrożeniem dla zdrowia. Drobinki mogą przenosić bakterie lub pleśnie, bądź osadzać się w płucach i powodować szereg chorób.

Jest wiele publikacji, w których poddano analizie przepływ powietrza w cyklonie, zbadano także opadanie pyłu w tunelach pionowych. Dla rolni-spożywczej gałęzi przemysłu badania skupiają się na transporcie pneumatycznym ziaren zbóż. Sakai i Koshizuka wykorzystali metodę DEM do analizy przenośnika pneumatycznego (Sakai i Koshizuka, 2009). Cleary i Hilton przeanalizowali wpływ kształtu na przepływ materiału przez rury w transporcie pneumatycznym (Cleary i Hilton, 2011). Biorąc to pod uwagę postanowiono przyjrzeć się procesowi przechodzenia drobnych cząstek w aerozol oraz ich sedymentacji. W tym celu stworzono model komputerowy tunelu, który także może służyć, jako odpylacz dla małej skali produkcji.

Cel pracy

Celem niniejszej pracy było stworzenie modelu CFD dwufazowego przepływu mieszaniny powietrza i pyłu w zaproponowanym tunelu oraz na podstawie wyników symulacji, przeprowadzenie analizy sedymentacji cząstek pyłu.

Materiały i metody

Materiał badawczy stanowił prostokątny tunel o następujących wymiarach: szerokość 0,3 m, głębokość 4 m i wysokość 0,7 m. Na wysokości 0,6 m wykonano okrągły otwór wlotowy o średnicy 0,14 m. Na dnie tunelu umieszczono progi działowe o wysokości 0,03 m i grubości 0,18 m. Na podstawie badań wstępnych ustalono następujące parametry pyłu: minimalna średnica 28 μm , maksymalna średnica 64 μm , średnia średnica 44 μm , odchylenie standardowe 13 μm i gęstość 700 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$.

Model matematyczny

Poniżej zaprezentowano model matematyczny dla modelowanego procesu. Równanie ciągłości dla współrzędnych kartezjańskich dla płynu (Abbott i Basco, 1989):

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

Przepływ fazy rozproszonej prezentuje poniższe równanie (Abbott i Basco, 1989; Jakubowski i in., 2014):

$$\nabla \cdot \varphi_d \left[\mathbf{u} + \varphi_d (1 - c_d) \mathbf{u}_{slide} - \frac{D_{md}}{\varphi_d} \nabla \varphi_d \right] = - \frac{m_{dc}}{\rho_d} \quad (2)$$

Równanie bilansowe dla prędkości przyjmuje następującą formę (Abbott i Basco, 1989; Jakubowski et al., 2014):

$$\nabla \cdot \varphi_d \left[\mathbf{u} + \varphi_d (1 - c_d) \mathbf{u}_{slide} - \frac{D_{md}}{\varphi_d} \nabla \varphi_d \right] = - \frac{m_{dc}}{\rho_d} \quad (3)$$

Równanie pędu przyjmuje następującą formę (Abbott i Basco, 1989; Jakubowski i in., 2014):

$$\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla [-p + (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] - \nabla \cdot \{ [\rho c_d (1 - c_d)] \mathbf{u}_{slide} \mathbf{u}_{slide} \} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (4)$$

gdzie,

$$\rho = \varphi_c \rho_c + \varphi_d \rho_d \quad (5)$$

oraz

$$c_d = \frac{\varphi_d \rho_d}{\rho} \quad (6)$$

Opór płynu jest opisany przez model Schillera-Neumanna:

$$\frac{3f_d}{4d_d \cdot 10^{-6}} \rho_c |\mathbf{u}_{slide}| \mathbf{u}_{slide} = \frac{\rho - \rho_d}{\rho} \nabla p \quad (7)$$

Liczba Reynoldsa pozwala zachować właściwe limity wartości w wyznaczonych obszarach:

$$f_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & \text{dla } Re_p < 1000 \\ 0,44 & \text{dla } Re_p > 1000 \end{cases} \quad (8)$$

gdzie liczba Reynoldsa jest obliczana ze wzoru:

$$Re_p = \frac{d_d \cdot 10^{-6} \rho_c |\mathbf{u}_{stide}|}{\mu} \quad (9)$$

Do opisu turbulencji wykorzystano κ - ε model (Jakubowski i in., 2014; Dewan, 2011):

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot [\mu + \sigma_k \mu_T \nabla] + P_k - \rho \beta k \omega \quad (10)$$

oraz

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

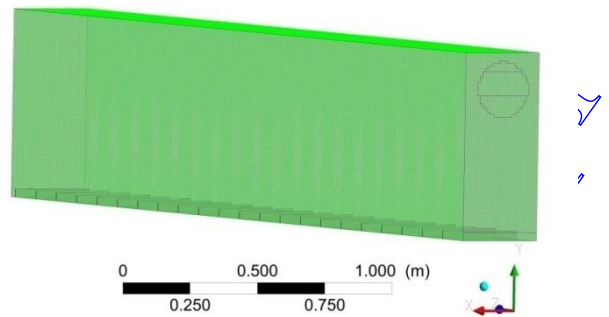
gdzie $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$.

Wartość P_k jest obliczana według następującego równania:

$$P_k = \mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_T \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

Model komputerowy

Symulację komputerową przeprowadzono w programie ANSYS CFX 12.1, który wykorzystuje metody numeryczne do rozwiązywania równań modelu matematycznego. Metoda skończonych objętości jest obecnie szeroko stosowana w analizie CFD. Polega ona na zamianie modelu geometrycznego obszaru przepływu z postaci ciągłej do postaci dyskretnej jako zbioru komórek o pewnej objętości. Dyskretyzacja geometrii opiera się na tworzeniu siatki, w której węzły obliczeniowe mogą być umieszczone w geometrycznym środku komórki (Ferziger i Peric, 2002). Dla potrzeb symulacji komputerowej stworzono model komputerowy odpylacza na podstawie modelu fizycznego w skali 1:1. Dystrybuantę średnicy cząstek oparto na rozkładzie Gaussa. Do analizy przepływu powietrza i pyłu zastosowano podejście Eulerowskie. Geometria domeny została stworzona w kartezjańskich współrzędnych (X, Y, Z), gdzie długość przebiega wzdłuż osi Z, szerokość wzdłuż osi X, a wysokość wzdłuż osi Y. Siatka na potrzeby modelu została stworzona za pomocą narzędzia Mesh w programie ANSYS i posiadała 931 023 węzłów i 884 220 elementów. Na potrzeby tworzonego modelu wybrano siatkę ustrukturyzowaną, której komórki były prostokątne, co zapobiega wypaczaniu geometrii.



Rys. 1. Geometria tunelu wraz z siatką

Fig. 1. The geometry of the tunnel with the applied mesh

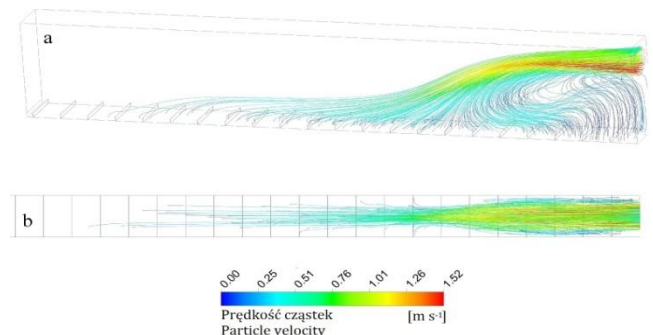
Warunki brzegowe

Dla badanej domeny określono następujące warunki brzegowe: powietrze jest nieściśliwe i jego właściwości fizykochemiczne są stałe. Badany proces jest izotermiczny i ustalony, wprowadzono wpływ grawitacji i siły oporu. Turbulencję przyjęto na poziomie 1%. Ruch cząstek jest sprzężony z ruchem płynu. Ściany tunelu zdefiniowano, jako gładkie i bez poślizgu (no-slip wall). Ustalono też, że warstwa przyścienna płynu posiada prędkość równą zero. Pominęto zmiany ciśnienia, na wlocie i na wylocie przyjęto ciśnienie atmosferyczne. Ciśnienie w modelu obliczano w formie wielkości względnej, tzn. względem ciśnienia atmosferycznego panującego na wylocie z tunelu do ciśnienia atmosferycznego (1 bar).

Wlot podzielono na trzy sekcje, gdyż w eksperymencie zauważono niejednorodny rozkład prędkości. Na brzegach domeny ustalono następujące wartości, sekcja górna: prędkość ustalono na $0,60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, masowe natężenie przepływu pyłu na $0,02 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$. Sekcja środkowa: prędkość ustalono na $0,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, masowe natężenie przepływu pyłu na $0,03 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$. Sekcja dolna: prędkość ustalono na $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, masowe natężenie przepływu pyłu na $0,10 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$.

Wyniki

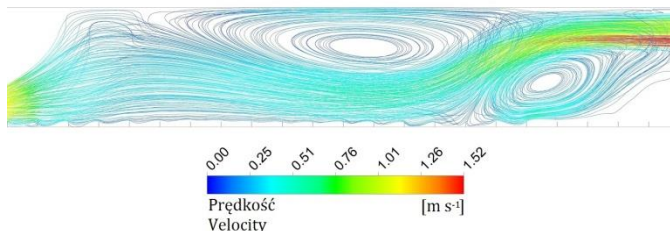
Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że po wejściu do tunelu cząstki podążyły za ruchem powietrza. Rozkład prędkości dla cząstek pyłu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Rozkład prędkości cząstek na trajektorii (a) i widok z góry (b)

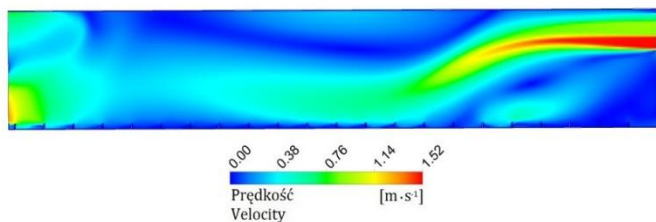
Fig. 2. Particle velocity distribution on particle track (a) and seen from above (b)

Siła grawitacji i opór powietrza spowodowały, że drobinki pyłu wytraciły prędkość i osiadły na dnie tunelu. Linia prądu ukazała dwa regiony turbulencji – rysunek 3. Wir nad strumieniem powietrza nie wpływa na ruch pyłu, natomiast wir pod strumieniem powietrza zawrócił część cząstek na przednią część tunelu. Średnia prędkość powietrza w tym miejscu wyniosła $0,46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, sięgając od $0,53$ do $0,36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cząstki o największej średnicy osiągnęły średnią prędkość opadania $0,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i osiadły na pierwszych pięciu przedziałach.



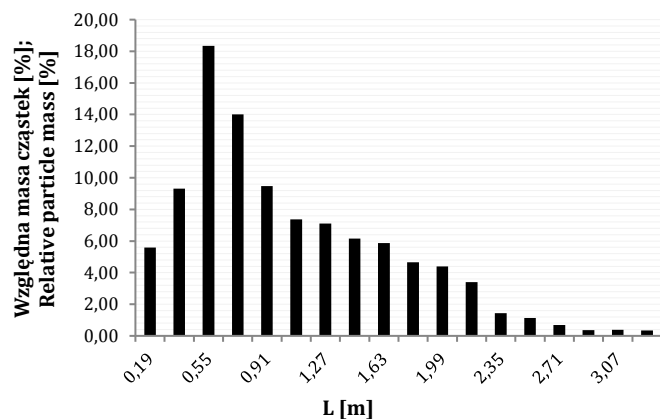
Rys. 3. Wektorowy rozkład prędkości na linii prądu
Fig. 3. Velocity vector distribution on a streamline

Prędkość opadania cząstek jest istotna w aspekcie przechodzenia kropelek w stan aerozolu. W zaprezentowanym modelu widać, że cząstki utrzymują się w powietrzu na znacznym dystansie od wlotu i zachowują prędkość zbliżoną do początkowej. Osady kurzu mogą być przenoszone nawet przez niewielkie podmuchy powietrza. Na rysunku 4 pokazano rozkład prędkości powietrza na całej długości i wysokości tunelu w połowie jego szerokości. Górna część strumienia powietrza miała założoną prędkość $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, która wzrosła do $0,91 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (wartości średnie), a następnie uległa stopniowemu zmniejszeniu. Przyspieszenie ruchu wynika z faktu, iż dolna szybsza część strumienia pociągnęła za sobą górną wolniejszą. Przy brzegach otworu wlotowego powietrze miało średnią prędkość $0,62 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



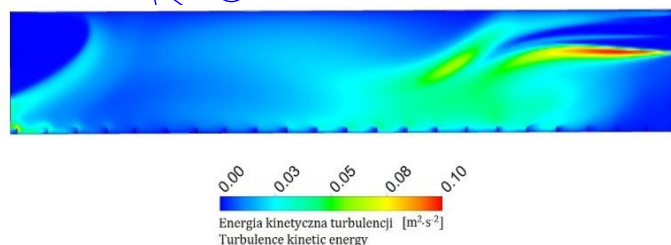
Rys. 4. Rozkład prędkości na płaszczyźnie ZY dla $X = 0,15 \text{ m}$
Fig. 4. Velocity profile on ZY plane for $X = 0,15 \text{ m}$

Na rysunku 5 przedstawiono wykres rozkładu względnej masy cząstek pyłu wzdłuż tunelu uzyskany w trakcie symulacji. Cząstki, które posiadały największą prędkość szybko opadły na dno. Najlżejsze cząstki, mimo iż miały najmniejszą prędkość, osiadły dopiero przy końcu tunelu. Rysunek 6 przedstawia rozkład energii kinetycznej turbulencji przepływu powietrza (turbulence kinetic energy – TKE). Maksymalna wartość TKE wyniosła $0,10 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$.



Rys. 5. Rozkład względnej masy cząstek pyłu wzdłuż tunelu
Fig. 5. Relative particle mass distribution along the tunnel

Jest to wartość dla tej części strumienia, która poruszała się z największą prędkością. W miarę jak strumień zanieczyszczonego powietrza rozpraszał się nad dnem tunelu wartość TKE spadała do wartości $0,04 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$.



Rys. 6. Rozkład energii kinetycznej turbulencji powietrza na płaszczyźnie YZ, dla $X = 0,15 \text{ m}$
Fig. 6. Turbulence kinetic energy distribution on YZ plane, $X = 0,15 \text{ m}$

Podsumowanie

Stworzony model komputerowy tunelowego odpylacza pozwolił na przeanalizowanie ruchu powietrza oraz cząstek pyłu. Ruch zanieczyszczonego powietrza jest turbulentny – występują dwa wiry, jeden nad strumieniem, który wypycha powietrze z tunelu, a drugi pod strumieniem, który zawraca część pyłu z głównego pasma. Tunel może być wykorzystany do oczyszczania powietrza w małych gospodarstwach rolnych, które przetwarzają słomę na pelet. Jako kolejne badania, można sprawdzić skuteczność rozdziału mieszanin drobnych cząstek pyłowych. Model jak i samo urządzenie może służyć do dalszych badań procesu sedymentacji cząstek w trakcie poziomego ruchu. Walidacja modelu została przeprowadzona na podstawie eksperymentu, a jej wyniki zostały przygotowane do publikacji, która jest w trakcie recenzji.

Bibliografia

Abbott, M.B., Basco, D.R. (1997). *Computational Fluid Dynamics: An Introduction For Engineers*. London, Longman Group UK Limited. ISBN: 9780582013650.

- Cecala, A.B., O'Brien, A.D., Schall, J., Colinet, J.F., Fox, W.R., Franta, R.J., Joy, J., Reed, W.R., Reeser, P., Rounds, J.R., Schultz, M.J. (2012). *Report of Investigations 9689. Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing*, Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health Office of Mine Safety and Health Research Pittsburgh, www.cdc.gov dostęp: 2014.10.20.
- Cleary, P.W., Hilton, J.E. (2011). The influence of particle shape on flow modes in pneumatic conveying. *Chemical Engineering Science*, 66, 231–240, DOI 10.1016/j.ces.2010.09.034.
- Döring, S. (2013). *Power from Pellets Technology and Applications*, Berlin, Springer, ISBN 978-3-64219-962-2.
- Dorrell, R., Hogg, A.J. (2010). Sedimentation of bidisperse suspensions. *International Journal of Multiphase Flow*, 36, 481–490. DOI 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.02.001.
- Flagan, R.C., Seinfeld, J.H. (1988). *Fundamentals Of Air Pollution Engineering*. Prentice-Hall Inc., 391-478, <http://authors.library.caltech.edu> dostęp: 21.11.2014.
- Ferziger, J.H., Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd Edition, Springer, Verlag, 36, ISBN 3-540-42074-6.
- www.who.int, Hazard prevention and control in the work environment: Airborne dust, dostęp: 10.21.2014.
- Jakubowski, M., Sterczyska, M., Matysko, R., Poreda, A. (2014). Simulation and experimental research on the flow inside a whirlpool separator. *Journal of Food Engineering*, 133, 9–15, DOI 10.1016/j.jfoodeng.2014.02.011.
- Kabsch P. (1992). *Odpylanie i odpylacze*. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa. ISBN 8-204-1563-2.
- Martin M. Laboratories (1987). *Dust Control Handbook For Minerals Processing*. U.S. Department of the Interior, https://www.osha.gov/dsg/topics/silicacrystalline/dust/dust_control_handbook.html, dostęp: 10.21.2014.
- Obernberger I., Thek G. (2010) *The Pellet Handbook The Production and Thermal Utilization of Pellets*. Abington, Earthscan, 85-108. ISBN 978-1-84407-631-4.
- Sarna M. (2005). *Wybrane zagadnienia elektrostatycznego odpylania gazów przemysłowych*. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała. ISBN: 978-83-63713-18-8.
- Sakai M., Koshizuka S. (2009). Large-scale discrete element modeling in pneumatic conveying. *Chemical Engineering Science*, 64, 533–539. DOI 10.1016/j.ces.2008.10.003.
- Xu Z., Michaelides E. (2003). The effect of particle interactions on the sedimentation process of non-cohesive particles. *International Journal of Multiphase Flow*, 29, 959–982. DOI 10.1016/S0301-9322(03)00060-0.
- Zikanov O. (2010). *Essential Computational Fluid Dynamics*. New Jersey, Wyd. Wiley & Sons, 86-102. ISBN 978-0-470-423-29-5.

Marta Stachnik

Politechnika Koszalińska,

○ Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego

e-mail: marta.stachnik@tu.koszalin.pl