PODPIS ZAUFANY
MAREK
WASILEWSKI
16.11.2022 18:31:43 [GMT+1]
Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym

Autoreferat dotyczący osiągnięć w pracy naukowo-badawczej, dydaktycznej i organizacyjnej

Marek Wasilewski

Załącznik nr 3 do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

Opole, 17.11.2022 r.

Spis treści

1. Imię i nazwisko. 4

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej. 4

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych. 4

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). 5

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego. 5

4.2. Artykuły naukowe wchodzące w skład cyklu publikacji. 6

4.3. Charakterystyka cyklu publikacji. 9

4.3.1. Wprowadzenie do tematyki badań oraz omówienie przesłanek podjęcia tematu badawczego. 9

4.3.2. Cel i zakres badań. 13

4.3.3. Omówienie wypracowanych rozwiązań i otrzymanych rezultatów. 14

4.4. Charakterystyka oryginalnych osiągnięć konstrukcyjnych. 51

4.5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze. 52

4.5.1. Działalność i osiągnięcia naukowo-badawcze po uzyskaniu stopnia doktora. 52

4.5.2. Działalność i osiągnięcia naukowo-badawcze przed uzyskaniem stopnia doktora. 61

4.5.3. Podsumowanie całości dorobku naukowego. 63

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej. 65

5.1. Współpraca z innymi uczelniami lub instytucjami naukowymi o zasięgu międzynarodowym. 65

5.1.1. Współpraca z Birla Institute of Technology. 65

5.1.2. Współpraca z Uniwersytetem w Sumy. 65

5.1.3. Współpraca z Uniwersytetem Sikkim Manipal. 65

5.1.4. Współpraca z Uniwersytetem w Kalkucie. 66

5.2. Współpraca z innymi uczelniami lub instytucjami naukowymi o zasięgu krajowym. 66

5.2.1. Politechnika Poznańska. 66

5.2.2. Uniwersytet Warszawski (Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego). 66

5.2.3. Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie. 67

5.2.4. Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych; Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska. 67

5.2.5. Politechnika Wrocławska. 67

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę. 68

6.1. Działalność dydaktyczna..... 68

6.2. Działalność organizacyjna i popularyzująca naukę. 69

7. Nagrody, wyróżnienia. 71

8. Staże, studia podyplomowe, udział w szkoleniach lub warsztatach..... 72

1. Imię i nazwisko.

Marek Wasilewski

Tabela 1. Identyfikatory baz danych indeksujących publikacje naukowe.

Baza	Identyfikator
ORCID	0000-0001-8596-3209
Scopus	7003915584
ResearcherID (WoS)	H-7164-2019

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- Uzyskanie stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Data wszczęcia przewodu: 4.07.2012 r., data obrony: 14.01.2015 r.
  Nazwa jednostki, która nadała stopień: Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny.
  Tytuł rozprawy doktorskiej: *Optymalizacja konstrukcji cyklonów pierwszego stopnia instalacji wypalania klinkieru*.
  Promotor: dr hab. inż. Jerzy Duda,
  Recenzenci: prof. dr hab. inż. Krzysztof Jesionek; dr hab. inż. Bolesław Dobrowolski.
- Uzyskanie tytułu zawodowego magistra inżyniera na kierunku studiów inżynieria środowiska (Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, specjalność: racjonalne gospodarowanie energią) – 2004 r.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

- 2017 r. – nadal – adiunkt, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, Politechnika Opolska.
- 2011–2017 r. – asystent, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, Politechnika Opolska.
- 2005–2011 r. – pracownik Politechniki Opolskiej w jednostkach administracji centralnej (Biuro Transferu Technologii i Wdrożeń, Dział Nauki i Transferu Technologii, Akademicki Inkubator Przedsiębiorczości).

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego.

Analiza zjawiska przepływu aerozolu oraz doskonalenie konstrukcji odpylaczy cyklonowych, w szczególności cyklonów specjalnego przeznaczenia.

Osiągnięcie naukowe zostało zaprezentowane jako cykl tematycznie powiązanych ze sobą 12 publikacji naukowych oraz 2 oryginalnych osiągnięć konstrukcyjnych (2 indywidualne patenty). W większości publikacji (10) odgrywałem kluczową rolę (byłem też pierwszym autorem) w analizie zagadnień w ramach tematu zaproponowanego do oceny osiągnięcia naukowego. W 2 przypadkach byłem jedynym autorem publikacji. Z kolei w 11 artykułach byłem autorem korespondencyjnym. 4 artykuły ([A1–A3, A6]) będące składowymi ww. osiągnięć naukowych stanowiły podstawę w procesie oceny i przyznania stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców (2020 r.). Pięcioletni, sumaryczny współczynnik oddziaływania (Impact Factor – **IF**) prac wchodzących w skład osiągnięć wynosi **57,674**. Łączna wartość punktów **MEiN** zgodnie z rokiem publikacji wynosi **860**, a wg punktacji na rok 2022 – **1135** pkt. Łączna liczba cytowań wg bazy Web of Science (WoS) wynosi **194** (**160** bez autocytacji). Oświadczenia współautorów, opisujące indywidualny wkład (w języku polskim dla autorów polskojęzycznych oraz w języku angielskim, gdy co najmniej jeden ze współautorów pochodził spoza Polski) każdego z nich w powstanie wymienionych prac zamieszczono w załączniku 6. Natomiast kopie prac [A1–A12] zebrano w załączniku 5.

Uzyskane w toku realizacji badań wyniki mają cechy oryginalności oraz charakter interdyscyplinarny. Oprócz podstawowych efektów w postaci ograniczenia oddziaływania procesów technologicznych na środowisko oraz zdrowie i życie człowieka (inżynieria środowiska, górnictwo oraz energetyka) poszerzają one wiedzę w zakresie:

- zagadnień mechaniki płynów oraz usprawnień konstrukcji (inżynieria mechaniczna),
- projektowania aparatury i urządzeń stosowanych w procesach inżynierii chemicznej i procesowej (inżynieria chemiczna).

4.2. Artykuły naukowe wchodzące w skład cyklu publikacji.

Artykuł [A1] **M. Wasilewski,** *Analysis of the effects of temperature and the share of solid and gas phases on the process of separation in a cyclone suspension preheater,* Separation and Purification Technology 168 (2016), 114–123.

Liczba cytowań wg WoS: 25(18)*	Impact Factor: 8,258**	Punkty MNSiW: 40/140***

Wkład: Artykuł jednoautorski.

Artykuł [A2] **M. Wasilewski**, L. Brar, Optimization of the geometry of cyclone separators used in clinker burning process: A case study, Powder Technology 313 (2017) 293–302.

Liczba cytowań wg WoS: 34(27)*	Impact Factor: 5,305**	Punkty MNSiW: 40/140***

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na określeniu koncepcji badań i artykułu (conceptualization), określeniu metodologii badań (methodology), doborze oprogramowania do realizacji badań oraz zastosowaniu technik obliczeniowych do analizy i syntezy danych badawczych (software), analizie formalnej (formal analysis), przeprowadzeniu badań (investigation), zgromadzeniu materiałów źródłowych (resources), administracji projektu (project administration), wizualizacji wyników badań (visualization), przygotowaniu tekstu artykułu w wersji pierwotnej (writing – original draft), przeglądzie i edycji (writing – review & editing) oraz nadzorze nad całością prac (supervision).

Artykuł [A3] **M. Wasilewski,** *Analysis of the effect of counter-cone location on cyclone separator efficiency,* Separation and Purification Technology 179 (2017), 236–247.

Liczba cytowań wg WoS: 36(31)*	Impact Factor: 8,258**	Punkty MNSiW: 40/140***

Wkład: Artykuł jednoautorski.

Artykuł [A4] **M. Wasilewski**, G. Ligus, *The effect of vortex finder shape on separation efficiency and pressure drop in lower-stage cyclones used for clinker burning. A CFD study,* Engineering Mechanics 2018, 24th International Conference May 14–17, 2018 Svratka, Czech Republic, 917–920 (*artykuł konferencyjny indeksowany w bazie WoS*).

Liczba cytowań wg WoS: 0(0)*	Impact Factor: -	Punkty MNSiW: 15/5***

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na określeniu koncepcji badań i artykułu (conceptualization), określeniu metodologii badań (methodology), doborze oprogramowania do realizacji badań oraz zastosowaniu technik obliczeniowych do analizy i syntezy danych badawczych (software), analizie formalnej (formal analysis), przeprowadzeniu badań (investigation), zgromadzeniu materiałów źródłowych (resources), administracji projektu (project administration), przygotowaniu tekstu artykułu w wersji pierwotnej (writing – original draft), przeglądzie i edycji (writing – review & editing) oraz nadzorze nad całością prac (supervision).

Artykuł [A5] **M. Wasilewski**, G. Ligus, *Effect of discretization method of a computational domain on particle separation in a cyclone separator*, 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO–DOK 2018, E3S Web of Conferences, 2018, 185 (*artykuł konferencyjny indeksowany w bazie WoS*).

Liczba cytowań wg WoS: 0(0)* Impact Factor: - Punkty MNSiW: 15/5***

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na określeniu koncepcji badań i artykułu (conceptualization), określeniu metodologii badań (methodology), doborze oprogramowania do realizacji badań oraz zastosowaniu technik obliczeniowych do analizy i syntezy danych badawczych (software), przeprowadzeniu badań (investigation), zgromadzeniu materiałów źródłowych (resources), administracji projektu (project administration), wizualizacji wyników badań (visualization), przygotowaniu tekstu artykułu w wersji pierwotnej (writing – original draft), przeglądzie i edycji (writing – review & editing) oraz nadzorze nad całością prac (supervision).

Artykuł [A6] **M. Wasilewski**, L. Brar, *Effect of the inlet duct angle on the performance of cyclone separators*, Separation and Purification Technology 213 (2019) 19–33.

Liczba cytowań wg WoS: 47(42)* Impact Factor: 8,258** Punkty MNSiW: 140/140***

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na określeniu koncepcji badań i artykułu (conceptualization), określeniu metodologii badań (methodology), doborze oprogramowania do realizacji badań oraz zastosowaniu technik obliczeniowych do analizy i syntezy danych badawczych (software), analizie formalnej (formal analysis), przeprowadzeniu badań (investigation), administracji projektu (project administration), wizualizacji wyników badań (visualization), przygotowaniu tekstu artykułu w wersji pierwotnej (writing – original draft), przeglądzie i edycji (writing – review & editing) oraz nadzorze nad całością prac (supervision).

Artykuł [A7] **M. Wasilewski,** S. Anwailer, M. Masiukiewicz, *Characterization of multiphase gas–solid flow and accuracy of turbulence models for lower stage cyclones used in suspension preheaters*, Chinese Journal of Chemical Engineering 27 (2019) 1618–1629.

Liczba cytowań wg WoS: 7(6)* Impact Factor: 2,853** Punkty MNSiW: 40/40***

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na określeniu koncepcji badań i artykułu (conceptualization), określeniu metodologii badań (methodology), doborze oprogramowania do realizacji badań oraz zastosowaniu technik obliczeniowych do analizy i syntezy danych badawczych (software), analizie formalnej (formal analysis), przeprowadzeniu badań (investigation), zgromadzeniu materiałów źródłowych (resources), administracji projektu (project administration), przygotowaniu tekstu artykułu w wersji pierwotnej (writing – original draft), przeglądzie i edycji (writing – review & editing) oraz nadzorze nad całością prac (supervision).

Artykuł [A8] **M. Wasilewski**, L. Brar, *Investigations of the flow field inside a square cyclone separator using DPIV and CFD*, 11th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO–DOK 2019, E3S Web of Conferences, 2019, 100 (*artykuł konferencyjny indeksowany w bazie WoS*).

Liczba cytowań wg WoS: 6(4)* Impact Factor: - Punkty MNSiW: 5/5***

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na określeniu koncepcji badań i artykułu (conceptualization), określeniu metodologii badań (methodology), doborze oprogramowania do realizacji badań oraz zastosowaniu technik obliczeniowych do analizy i syntezy danych badawczych (software), analizie formalnej (formal analysis), przeprowadzeniu badań (investigation), administracji projektu (project administration), wizualizacji wyników badań (visualization), przygotowaniu tekstu artykułu w wersji pierwotnej (writing – original draft), przeglądzie i edycji (writing – review & editing) oraz nadzorze nad całością prac (supervision).

Artykuł [A9] **M. Wasilewski**, L. Brar, G. Ligus, *Experimental and numerical investigation on the performance of square cyclones with different vortex finder configurations*, Separation and Purification Technology 239 (2020) 116588.

Liczba cytowań wg WoS: 26(21)* Impact Factor: 8,258** Punkty MNSiW: 140/140***

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na określeniu koncepcji badań i artykułu (conceptualization), określeniu metodologii badań (methodology), doborze oprogramowania do realizacji badań oraz zastosowaniu technik obliczeniowych do analizy i syntezy danych badawczych (software), analizie formalnej (formal analysis), przeprowadzeniu badań (investigation), walidacji wyników badań (validation), zgromadzeniu materiałów źródłowych (resources), administracji projektu (project administration), wizualizacji wyników badań (visualization), przygotowaniu tekstu artykułu w wersji pierwotnej (writing – original draft).

Artykuł [A10] **M. Wasilewski**, L. Brar, G. Ligus, *Effect of the central rod dimensions on the performance of cyclone separators – optimization study*, Separation and Purification Technology 274 (2021) 119020.

Liczba cytowań wg WoS: 11(9)* Impact Factor: 8,258** Punkty MNSiW: 140/140***

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na określeniu koncepcji badań i artykułu (conceptualization), określeniu metodologii badań (methodology), doborze oprogramowania do realizacji badań oraz zastosowaniu technik obliczeniowych do analizy i syntezy danych badawczych (software), analizie formalnej (formal analysis), wizualizacji wyników badań (visualization), przygotowaniu tekstu artykułu w wersji pierwotnej (writing – original draft), przeglądzie i edycji (writing – review & editing) oraz nadzorze nad całością prac (supervision).

Artykuł [A11] R. Shastri, **M. Wasilewski,** L. Brar, *Analysis of the novel hybrid cyclone separators using large–eddy simulation*, Powder Technology 394 (2021) 951–969.

Liczba cytowań wg WoS: 2(2)* Impact Factor: 5,305** Punkty MNSiW: 140/140***

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na doborze oprogramowania do realizacji badań oraz zastosowaniu technik obliczeniowych do analizy i syntezy danych badawczych (software), analizie formalnej (formal analysis), przeprowadzeniu badań (investigation), walidacji wyników badań (validation), wizualizacji wyników badań (visualization), przeglądzie i edycji tekstu (writing – review & editing).

Artykuł [A12] S. Pandey, I. Saha, O. Prakash, T. Mukherjee, J. Iqbal, A.K. Roy, **M. Wasilewski**, L. Brar, *CFD investigations of cyclone separators with different cone heights and shapes*, Applied Sciences 12 (2022) 4904.

Liczba cytowań wg WoS: 0(0)* Impact Factor: 2,921** Punkty MNSiW: 100/100***

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na określeniu metodologii badań (methodology), doborze oprogramowania do realizacji badań oraz zastosowaniu technik obliczeniowych do analizy i syntezy danych badawczych (software), walidacji wyników badań (validation), analizie formalnej (formal analysis), przeprowadzeniu badań (investigation), gromadzeniu danych (data curation), przygotowaniu tekstu artykułu w wersji pierwotnej (writing – original draft), przeglądzie i edycji tekstu (writing – review & editing) wizualizacji wyników badań (visualization) oraz nadzorze nad całością prac (supervision).

* w nawiasie liczba cytowań bez autocytacji
** 5-letni IF (w 2022 r.)
*** punktacja MEiN zgodnie z rokiem publikacji/punktacja na rok 2022 r.

4.3. Charakterystyka cyklu publikacji.

4.3.1. Wprowadzenie do tematyki badań oraz omówienie przesłanek podjęcia tematu badawczego.

W dzisiejszych czasach dużym wyzwaniem stojącym przed przemysłem wytwórczym jest ograniczenie oddziaływania na środowisko, zdrowie i życie człowieka. Jedną z podstawowych grup zanieczyszczeń generowanych przez przemysł są substancje i związki (cząstki stałe lub zanieczyszczenia gazowe) wpływające na jakość powietrza. Zakłady przemysłowe zobowiązane są do systematycznego dostosowania się do coraz bardziej wymagających norm w tym zakresie. Obecnie do kontroli poziomu emitowanych zanieczyszczeń stosowanych jest wiele urządzeń (np. elektrofiltry, filtry tkaninowe, skrubery). Bardzo szeroko rozpowszechnioną grupę urządzeń stanowią separatory mechaniczne. W większości z nich proces separacji opiera się na wykorzystaniu siły grawitacji i/lub siły odśrodkowej. Do najczęściej stosowanych można zaliczyć odpylacze cyklonowe. Opracowano je na przełomie XIX i XX w. (1885 r. – firma Knickerbocker Company, patent US325521A, 1901 r. – firma MAN, patent DE134360C). W odniesieniu do innych metod separacji odpylacze cyklonowe mają wiele zalet (np. prosta konstrukcja, brak

elementów ruchomych, niskie koszty eksploatacji oraz konserwacji), co sprawia, że wykorzystywane są w wielu gałęziach przemysłu (np. w energetyce, przemyśle chemicznym, przemyśle drzewnym, przemyśle cementowym) – nie tylko jako separatory, ale także jako urządzenia regulujące procesy (np. transport pneumatyczny, suszenie, prażenie, podgrzewanie, kalcynacja, klasyfikacja cząstek). Dodatkowo możliwe jest ich zastosowanie w agresywnych środowiskach pracy (np. wysoka temperatura, wysokie ciśnienie, aktywne chemicznie czynniki robocze). Pomimo prostej konstrukcji fizyka i struktury przepływu w separatorze cyklonowym są bardzo złożone. Silnie wirowy, turbulentny przepływ mieszaniny dwufazowej w separatorach cyklonowych jest z natury bardzo niestabilny i wysoce anizotropowy.

W związku z faktem, iż każda, nawet minimalna poprawa wydajności odpylaczy cyklonowych ma duże znaczenie (szczególnie biorąc pod uwagę separatory uczestniczące w procesie regulacji układów technologicznych), podejmowane są liczne działania mające na celu usprawnienie ich konstrukcji – pod kątem zwiększenia ich wydajności (definiowanej poprzez skuteczność odpylania oraz spadek ciśnienia – mierzonego między kanałem wlotowym a kanałem wylotowym oczyszczonego gazu z separatora). Pierwszy z parametrów odpowiada za podstawową funkcję tych aparatów – separację, z kolei drugi znacząco wpływa na aspekt ekonomiczny. Najczęściej dąży się do osiągnięcia kompromisu pomiędzy tymi parametrami. Odbywa się to poprzez balans między parametrami konstrukcyjnymi i operacyjnymi. Do parametrów operacyjnych można zaliczyć przede wszystkim warunki przepływowe, takie jak: strumień objętości fazy gazowej, strumień masowy fazy stałej, średnica cząstek fazy stałej oraz właściwości obu faz. Proces usprawnienia ich konstrukcji wymaga jednakże dokładnej charakterystyki zjawiska przepływu dwufazowego zachodzącego wewnątrz separatora.

Rozpoczynając standardowy proces (bez uwzględnienia rozwiązań nowatorskich) projektowania nowych konstrukcji (lub doskonalenie istniejących) odpylaczy cyklonowych, należy każdorazowo określić indywidualne warunki technologiczne projektowanej instalacji. Często istnieje potrzeba uwzględnienia czynników charakterystycznych dla konkretnej instalacji lub zakładu. Na pierwszym etapie, w zależności od zakładanej wydajności instalacji, należy określić podstawowy parametr geometryczny – średnicę części cylindrycznej odpylacza cyklonowego *(D)*. Parametr ten jest punktem wyjścia przy doborze

wymiarów poszczególnych sekcji konstrukcyjnych separatora, są to:

- wymiary kanału wlotowego (*a* – wysokość, *b* – szerokość),
- średnica kanału wylotowego oczyszczonego gazu (D_e),
- długość kanału wylotowego oczyszczonego gazu (*S*),
- wysokość części cylindrycznej (*h*),
- wysokość części stożkowej (H_c),
- całkowita wysokość odpylacza cyklonowego (*H*),
- dolna średnica części stożkowej (*B*).

Ich proporcje często zależą od założonego celu, czyli np. wysokiej skuteczności bądź przepustowości.

W przeszłości dobór geometrii odpylacza cyklonowego na potrzeby konkretnych instalacji odbywał się najczęściej za pomocą modeli empirycznych i półempirycznych oraz badań doświadczalnych. Tego typu prace badawcze były czaso- i kosztochłonne. Dodatkowo pewnym ograniczaniem badań eksperymentalnych jest możliwość uwzględnienia jedynie analizy skuteczności separacji oraz spadku ciśnienia (bez opisu zjawiska przepływu). Wraz z rozwojem technik komputerowych i dostępnego oprogramowania dużą rolę w projektowaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych odpylaczy cyklonowych zaczęły odgrywać badania z zastosowaniem modelowania numerycznego przepływów (*computational fluid dynamic* – CFD). Obecnie ta metoda jest najczęściej stosowana w pracach badawczych poświęconych tej grupie separatorów. Jednakże i w tym przypadku bardzo istotne znaczenie ma dobór właściwej strategii badań numerycznych (np. modeli obliczeniowych). Aby przeprowadzone badania (niezależnie od zastosowanej metody badawczej) uznać za wiarygodne, konieczne jest połączenie co najmniej dwóch metod badawczych. Tylko część podejmowanych do tej pory prac badawczych uwzględniała ten aspekt.

Przed zdefiniowaniem **celu badawczego cyklu publikacji** zaproponowanego do oceny przeprowadziłem szczegółową analizę literatury specjalistycznej, danych pochodzących z praktyki przemysłowej oraz rozwiązań patentowych. Pozwoliło to na zdefiniowanie następujących wniosków oraz określenie luk badawczych:

1. Większość przeprowadzonych dotychczas prac badawczych z zakresu projektowania

i optymalizacji konstrukcji odpylaczy cyklonowych skupia się na **tradycyjnych odpylaczach cyklonowych.** Najczęściej stosowanymi konstrukcjami są rozwiązania zaproponowane przez Stairmanda, Lapple oraz Swift. Kolejną grupę odpylaczy cyklonowych stanowią modyfikacje standardowych konstrukcji o przekroju okrągłym (często ich zmiany geometryczne wynikają ze specyfiki procesu technologicznego, w jakim separatory biorą udział). **Bardzo mała ilość badań dotyczy niestandardowych konstrukcji tych separatorów** – odpylaczy cyklonowych specjalnego przeznaczenia, pełniących funkcję nie tylko odpylaczy, ale także odpowiedzialnych za regulację procesów technologicznych (np. cyklonowe wymienniki ciepła w przemyśle cementowym, procesy suszenia, procesy klasyfikacji cząstek).

2. **Niewiele prac badawczych uwzględniało pełną analizę zjawiska przepływu** (np. rozkłady pól przepływu fazy gazowej, charakterystykę składowych prędkości, identyfikację rdzenia wiru czy też trajektorii cząstek fazy stałej) dwufazowego wewnątrz odpylaczy cyklonowych. Tego typu analiza jest niezbędna, aby właściwie zinterpretować wpływ wszelkiego rodzaju zmian konstrukcyjnych na wydajność tych separatorów. Wynikało to z ograniczeń metod analitycznych oraz doświadczalnych. Z kolei przeprowadzone tego typu analizy z zastosowaniem CFD w dużej części nie zawierały walidacji pod kątem zjawiska przepływu. Pomocne w tym zakresie były badania z zastosowaniem: laserowej anemometrii dopplerowskiej (*laser doppler anemometry* – LDA) oraz fazowej anemometrii dopplerowskiej (*phase doppler anemometry* – PDA), jednakże metody te umożliwiają przeprowadzanie analiz porównawczych w ograniczonym zakresie. Odpowiedzią w tym przypadku mogą być badania z zastosowaniem metody cyfrowej anemometrii obrazowej (*digital particle image velocimetry* – DPIV, PIV).
3. Realizowane dotychczas badania dotyczące określania skuteczności separacji i spadku ciśnienia przeprowadzane były **w większości przypadków w warunkach izotermicznych**. W niewielu pracach autorzy uwzględniali zmienne wartości temperatury przepływających mediów. Uwzględnienie wpływu temperatury jest bardzo istotne ze względu na fakt, że większość odpylaczy cyklonowych pracuje w zmiennych warunkach temperaturowych. **Także tylko nieliczne prace uwzględniały udziały poszczególnych faz przepływających mediów.** Czynnik ten jest

szczególnie istotny, gdy odpylacze cyklonowe stanowią element instalacji technologicznych, a strumienie obu faz bezpośrednio przekładają się na zdolność produkcyjną danej instalacji.

4. Istotny wpływ na wydajność odpylaczy cyklonowych (szczególnie w przypadku dużego udziału fazy stałej) może mieć **sposób doprowadzenia mieszaniny dwufazowej do odpylacza cyklonowego**.
5. Podejmowane prace badawcze nakierowane były głównie na udoskonalenie konstrukcji w **zakresie standardowych zmian wymiarów podstawowych sekcji konstrukcyjnych odpylaczy cyklonowych** – wymiarów i ukształtowania kanału wlotowego oraz kanałów wylotowych, wymiarów sekcji cylindrycznej i stożkowej. Ze względu na duże osiągnięcia w tym zakresie badacze zmuszeni są **do poszukiwania niestandardowych rozwiązań konstrukcyjnych.**
6. Bardzo mała liczba prac badawczych zawiera wnioski **o charakterze uniwersalnym** (czyli takie, które można wykorzystać niezależnie od wymiarów odpylaczy cyklonowych czy też warunków przepływowych).
7. Część autorów wskazuje na bardzo istotny wpływ zjawiska **precesji rdzenia wiru** (*precessing vortex core* – PVC) **wewnętrznego** na wydajność odpylaczy cyklonowych. Jednakże dotychczas zjawisko to **nie zostało dokładnie scharakteryzowane** – głównie ze względu na ograniczenia możliwych do zastosowania metod badawczych.
8. **Niewielu badaczy** podejmowało próby zastosowania zaawansowanego modelu ***large eddy simulation*** (LES) do odwzorowania przepływu turbulentnego w odpylaczach cyklonowych.

4.3.2. Cel i zakres badań.

Na podstawie przesłanek podjęcia tematyki badawczej zdefiniowałem **główny cel badawczy**, **stanowiący oś główną**:

Zdefiniowanie, przebadanie i opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych pozwalających na zwiększenie wydajności odpylaczy cyklonowych.

Przeprowadzone badania zaprezentowałem w publikacjach obejmujących następujące zagadnienia tematyczne (cele szczegółowe), będące **składowymi osi głównej cyklu**:

1. Określenie najważniejszych czynników wpływających na wydajność cyklonów (w szczególności **wpływu temperatury** czynników roboczych, **udziału poszczególnych faz** oraz **ukształtowania wylotu oczyszczonych gazów**). **Opracowanie nowego modelu** umożliwiającego dobór średnicy części cylindrycznej odpylacza cyklonowego *D* – z uwzględnieniem indywidualnych warunków pracy danej instalacji technologicznej. Przeprowadzenie studium przypadku. Artykuły [A1, A2, A4].
2. **Opracowanie niestandardowych rozwiązań konstrukcyjnych usprawniających pracę odpylaczy cyklonowych** (**z uwzględnieniem uniwersalnego charakteru** zaproponowanych metod zwiększenia wydajności – możliwych do zastosowania niezależnie od typu, wymiarów i parametrów przepływowych). Artykuły [A3, A6, A10].
3. Zbadanie wpływu przyjętej strategii badań numerycznych odpylaczy cyklonowych na jakość wyników uzyskanych na drodze obliczeń CFD. Zbadanie potencjału **zaawansowanego modelu LES** w badaniach nad odpylaczami cyklonowymi. Artykuły [A5, A7–A11].
4. Możliwie jak **najdokładniejszy opis zjawiska przepływu dwufazowego** wewnątrz odpylaczy cyklonowych (w tym zbadanie zjawiska PVC) – w celu właściwej interpretacji wpływu zmian konstrukcyjnych na parametry wydajności. Artykuły [A2–A4, A7–A12].
5. **Opracowanie nowych konstrukcji odpylaczy cyklonowych (w tym separatorów hybrydowych)** o szerokim spektrum potencjalnego wykorzystania (np. jako separatory wstępne lub końcowe, klasyfikatory cząstek, separatory w instalacjach kotłów fluidalnych). Artykuły [A11, A12].

4.3.3. Omówienie wypracowanych rozwiązań i otrzymanych rezultatów.

Artykuł [A1]. *Zrealizowane w ramach artykułu badania wpisują się w zagadnienie tematyczne nr 1.*

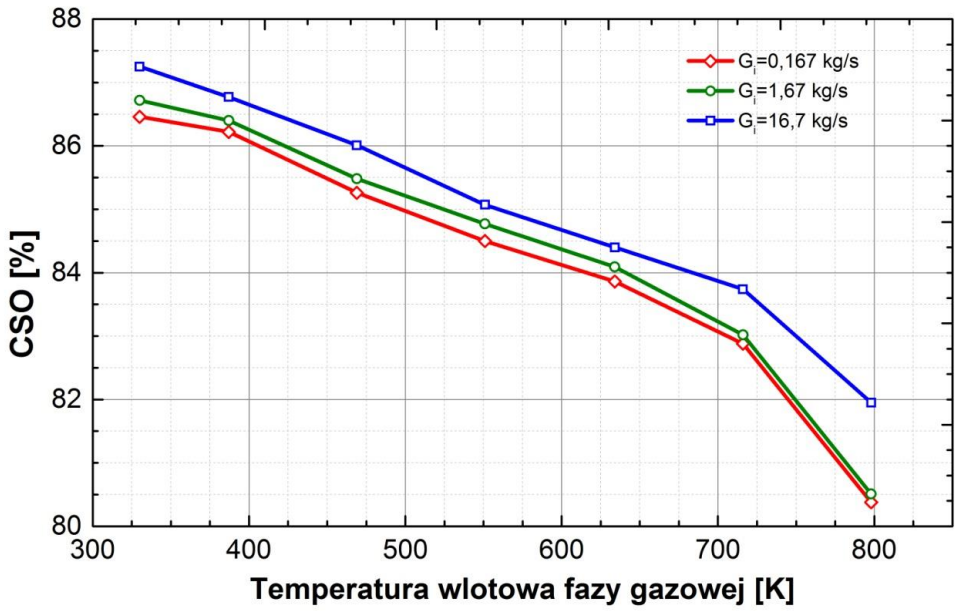
Dostępne w literaturze modele analityczne do określania skuteczności odpylania zostały opracowane na podstawie danych doświadczalnych uzyskanych **w warunkach otoczenia** (stałe wartości temperatury oraz ciśnienia). Także przedstawiane prace eksperymentalne oraz badania CFD w większości zostały przeprowadzone w warunkach izotermicznych.

Natomiast dane eksploatacyjne z rzeczywistych instalacji przemysłowych pracujących w szerokim zakresie temperatury (kilkuset stopni) wykazują często znaczne rozbieżności w porównaniu z wynikami prac badawczych. Dodatkowo większość przeprowadzonych badań **nie uwzględniała wpływu udziału poszczególnych faz** na skuteczność odpylania.

W większości badań przedstawionych w literaturze specjalistycznej sposób doprowadzenia mieszaniny oraz reakcje zachodzące na tym etapie są pomijane. Jest to istotne z tego względu, że pomiary temperatury 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 precyzyjniejszy. Warunki przepływowe (a także właściwości obu faz) i temperaturowe (badania przeprowadzono dla temperatur wlotowych do układu: 330 K, 400 K, 500 K, 600 K, 700 K, 800 K, 900 K) zostały określone na podstawie zebranych danych z rzeczywistej instalacji. Informacje te posłużyły także do walidacji zastosowanej strategii numerycznej. Analiza CFD wykonana została metodą objętości skończonych. W związku z tym, że przepływ w cyklonie ma charakter turbulentny, zastosowano metodę równań uśredniających Naviera-Stokesa (*Reynolds averaged Navier-Stokes equations* – RANS) do odwzorowania tej postaci przepływu. Jako model domykający zastosowano model naprężeń Reynoldsa (*Reynolds stress model* – RSM). Obecność fazy stałej zamodelowano z wykorzystaniem metody Eulera-Lagrange'a (E–L). Zdecydowano się na dokonanie obliczeń na podstawie sformułowania równań dla ciśnienia (*pressure based solution method segregated solver*). Do rozwiązania równań różniczkowych (w celu właściwego określenia sprzężenia pól ciśnienia i prędkości dla zachowania równania ciągłości pędu) wykorzystano algorytm obliczeniowy SIMPLE (*semi implicit method for pressure linked equations*). Zastosowano interpolację metodą drugiego poziomu (*second-order upwind*) dla wyznaczenia reprezentatywnych próbek wartości składowych na powierzchni objętości kontrolnych oraz standardową funkcję ścian. Fazę gazową stanowiła mieszanina spalin, natomiast fazę stałą surowiec stosowany w procesie technologicznym (głównym składnikiem był $CaCO_3$). W badaniach uwzględniono trzy wartości strumienia masowego fazy stałej.

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- **Całkowita skuteczność odpylania (CSO) zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury, zwłaszcza w zakresie wyższej temperatury** (od około 700 K), dla której skuteczność gwałtownie maleje w odniesieniu do niższego zakresu temperatury (rysunek 1). Głównymi czynnikami wpływającymi na zmniejszenie skuteczności odpylania są spadek gęstości i wzrost lepkości fazy gazowej.
- **Wraz ze wzrostem strumienia fazy stałej wzrasta skuteczność odpylania** (rysunek 1). Wynika to z faktu, że drobne cząstki tworzą skupiska (tzw. aglomeracje). Także dla tych cząstek odnotowano największe różnice w wyniku wzrostu wartości temperatury wlotowej.
- W przypadku odpylaczy cyklonowych stosowanych wyłącznie w procesie separacji korzystne jest prowadzenie procesu w możliwie jak najniższej temperaturze.
- Przeprowadzona walidacja pozwala stwierdzić, że rezultaty eksperymentu wykazały skuteczność zastosowanych modeli numerycznych oraz właściwe sparametryzowanie warunków obliczeniowych i brzegowych.
- Najintensywniejsza wymiana ciepła następuje w rejonie wlotu do cyklonu, a najmniej efektywna jest w sekcji stożkowej – szczególnie w jego dolnej części. Cząstki ciała stałego tworzą skupiska, a następnie są transportowane w dół separatora, wykonując przy tym ruch spiralny w okolicach ścianek – składający się z kilku obrotów (liczba obrotów zależy od średnicy cząstek i wynosi najczęściej od 2 do 4). Pierwszy etap wymiany ciepła można zauważyć tuż za wlotem do cyklonu. Cząstki wprowadzane do cyklonu są intensywnie ogrzewane w tym rejonie. Największe wartości temperatura osiąga w części cylindrycznej oraz na wylocie z cyklonu.
- Uzyskane wartości skuteczności odpylania dla rzeczywistego strumienia masowego fazy stałej oraz rzeczywistej temperatury wlotowej do odpylaczy cyklonowych za pomocą badań CFD są nieznacznie mniejsze od wartości rzeczywistych. Wynikać to może z ograniczeń modelu numerycznego.



Rysunek 1. Skuteczność separacji w zależności od temperatury wlotowej fazy gazowej do odpylacza cyklonowego oraz udziału fazy stałej.

Wypracowane w ramach realizacji badań wnioski poszerzają wiedzę z zakresu wpływu parametrów przepływających mediów na wydajność odpylaczy cyklonowych. Dodatkowo mają praktyczne zastosowanie – mogą być pomocne na etapie zarządzania procesem separacji (lub procesem technologicznym w przypadku cyklonów specjalnego przeznaczenia). Skonfigurowanie właściwych warunków termicznych oraz parametryzacja udziałów poszczególnych faz mogą się przyczynić do zmniejszenia oddziaływania na środowisko (w tym energochłonności) procesów technologicznych.

Artykuł [A2]. *Zrealizowane w ramach artykułu badania wpisują się w zagadnienia tematyczne nr 1 i 4.*

Doskonalenie konstrukcji, w tym odpylaczy cyklonowych, dotyczy przede wszystkim zagadnień związanych z wyborem parametrów kształtu i cech fizycznych szeroko rozumianych konstrukcji. W przypadku odpylaczy cyklonowych prace projektowe opierają się głównie na zdefiniowaniu średnicy części cylindrycznej *D* oraz charakterystycznych wymiarów geometrycznych pozostałych sekcji. Analizując dostępne w literaturze modele opisujące ten parametr, można stwierdzić, że większość z nich wymaga **wyłącznie zdefiniowania strumienia objętości fazy gazowej, prędkości wlotowej oraz wymiarów kanału wlotowego do separatora. Nie gwarantuje to jednak uwzględnienia wpływu temperatury** na właściwości fazy gazowej w procesie projektowania konstrukcji. Czynnik

ten jest szczególnie istotny w przypadku odpylaczy cyklonowych odpowiedzialnych – oprócz separacji – za regulacje procesów technologicznych (np. kalcynacji, suszenia). Jedynym modelem uwzględniającym wymienione czynniki jest wzór zaprezentowany przez Kalena i Zenza (wzór 1). Jednakże zaproponowane tam współczynniki pomocnicze (oznaczone na potrzeby prowadzonych badań jako: x_1, x_2, x_3 we wzorze 1) nie zapewniały wystarczająco dokładnych wyników dla odpylaczy cyklonowych specjalnego przeznaczenia (np. stosowanych w instalacjach wypalania klinkieru, instalacjach suszenia surowców, układach kotłów CFB).

$$D = x_1 \left[\frac{Q_i\, \rho^2}{\mu g \left(\rho_p - \rho\right)} * \frac{\left(1 - \frac{a}{D}\right)}{\frac{a}{D}\left(\frac{b}{D}\right)^{x_2}} \right]^{x_3} \quad (1)$$

gdzie:

D – średnica części cylindrycznej, Q_i – strumień objętości fazy gazowej, *g* – przyśpieszenie ziemskie, *a* – wysokość kanału wlotowego, *b* – szerokość kanału wlotowego, ρ – gęstość fazy gazowej, ρ_p – gęstość fazy stałej, μ – lepkość dynamiczna fazy gazowej.

W wyniku przeprowadzonych badań dokonano korekty tych współczynników. Wartości poszczególnych współczynników zdefiniowano na drodze analitycznej z wykorzystaniem metody algorytmów genetycznych. **Zaproponowano następującą postać wzoru pozwalającego określić średnicę *D*:**

$$D = 0{,}11 \left[\frac{Q_i\, \rho^2}{\mu g \left(\rho_p - \rho\right)} * \frac{\left(1 - \frac{a}{D}\right)}{\frac{a}{D}\left(\frac{b}{D}\right)^{3}} \right]^{0{,}612} \quad (2)$$

W celu przebadania potencjalnego zastosowania nowego modelu zostało **przeprowadzone studium przypadku**. Na podstawie równania (2) wyznaczono średnicę *D*, a następnie dobrano pozostałe wymiary poszczególnych sekcji odpylacza cyklonowego. Skonfigurowano trzy warianty konstrukcyjne dla trzech funkcji celu: wariant I – maksymalizacja skuteczności odpylania przy możliwie niskiej wartości spadku ciśnienia, wariant II – maksymalizacja skuteczności odpylania, wariant III – minimalizacji wartości spadku ciśnienia. Punktem odniesienia w procedurze porównawczej była konstrukcja stosowana obecnie w jednej z cementowni. Parametry przepływowe ujęte w badaniach

zostały określone także dla tej instalacji. Proces badawczy został przeprowadzony z wykorzystaniem metody CFD. Przyjęta strategia numeryczna była tożsama ze strategią przedstawioną w pracy [A1]. Walidację założeń badań CFD przeprowadzono w odniesieniu do warunków rzeczywistej instalacji.

Przeprowadzone badania przyczyniły się do opracowania następujących wniosków:

- Zgodnie z przyjętymi założeniami największą wartość CSO uzyskano dla wariantu II (88,6%). Jest to wartość aż o 6,4% większa od wariantu bazowego. Także pozostałe dwa warianty wykazały duże korzyści w tym aspekcie. Dla wariantu I uzyskano wartość 86,1%, natomiast dla wariantu III CSO wyniosła 83,8%.
- Największe różnice odnotowano dla najmniejszych cząstek ciała stałego. Informacja ta może być istotna na etapie zarządzania procesem wypalania klinkieru. Operatorzy na podstawie tych informacji mogą podejmować działania mające na celu ograniczenie procentowego udziału drobnych ziaren – np. poprzez optymalizację krzywej przemiału.
- W przypadku wartości spadku ciśnienia także trzy nowe konstrukcje okazały się korzystniejsze. Dla każdej z nich uzyskano mniejsze wartości spadku ciśnienia (niezależnie od przyjętej funkcji celu optymalizacji) w porównaniu z wariantem bazowym. Najmniejszą wartość spadku ciśnienia uzyskano dla wariantu III – 778 Pa (redukcja o 43,54%). Zbliżoną wartość uzyskano dla wariantu I (redukcja o 39,91%), natomiast wariant II, w którym zastosowano największy kąt korpusu wlotowego, wykazał się największą wartością spadku ciśnienia: 1015 Pa (redukcja o 26,34%).
- Na podstawie otrzymanych profili prędkości stycznych oraz profili ciśnienia stwierdzono, że kluczowe znaczenie miał dobór dwóch cech konstrukcyjnych: kształtu kanału wylotowego oczyszczonych gazów oraz kąta korpusu wlotowego do cyklonu. Zastosowanie korpusu spiralnego pod kątem 270° oraz kanału wylotowego w kształcie stożka (wariant II) wpłynęło najbardziej na wzrost wartości prędkości stycznych oraz wartości ciśnienia. Zmiana kąta korpusu spiralnego na 180° (wariant I) generowała mniejsze wartości tych parametrów. Z kolei zmiana kształtu wylotu na cylindryczny (wariant III) spowodowała dalsze ograniczenie wartości prędkości stycznych oraz wartości ciśnienia. Rozpatrując drugą składową prędkości – prędkość osiową – stwierdzono, że dla wariantów I i II uzyskano zbliżone wartości. Różnice

występują głównie w rejonie rdzenia wiru wewnętrznego. W przypadku wariantu III uzyskano zdecydowanie niższe wartości. Wynika to z kształtu zastosowanego kanału wylotowego oczyszczonych gazów – w dolnym jego rejonie pojawił się obszar niższych wartości prędkości osiowych, co przekłada się także na niższe wartości ciśnienia.

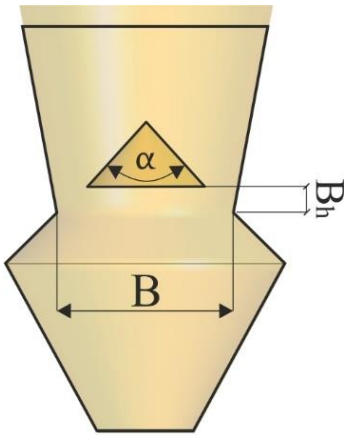
Przeprowadzone studium przypadku potwierdziło skuteczność nowego modelu wyznaczania średnicy części cylindrycznej *D*. Model umożliwia uwzględnienie indywidualnych warunków (w tym temperatury mediów roboczych) instalacji technologicznych. Ponadto ma charakter uniwersalny, może być stosowany zarówno w przypadku procesu projektowania tradycyjnych odpylaczy cyklonowych, jak i cyklonów specjalnego przeznaczenia.

Artykuł [A3]. *Zrealizowane w ramach artykułu badania wpisują się w zagadnienia tematyczne nr 2 i 4.*

Jedną z metod doskonalenia konstrukcji odpylaczy cyklonowych, w przypadku gdy funkcją celu jest maksymalizacja skuteczności odpylania, jest zainstalowanie wewnątrz separatora **dodatkowego elementu** – tzw. przeciwstożka, zlokalizowanego w dolnych rejonach separatora. Rozwiązanie to może być stosowane dla większości typów konstrukcji. Jego głównym zadaniem jest ograniczenie zjawiska cyrkulacji wtórnej odseparowanych cząstek ciała stałego oraz ustabilizowanie wewnętrznego wiru wznoszącego (m.in. poprzez organicznie zjawiska PVC). Śledząc prace badawcze w tym zakresie stwierdzono **brak badań w zakresie opracowania uniwersalnej procedury doboru wymiarów przeciwstożka oraz jego lokalizacji, dostosowanej do indywidualnych wymiarów separatora**. Wobec powyższej luki badawczej zdecydowano się przeprowadzić badania mające na celu **opracowanie uniwersalnej metody pozwalającej określić optymalną lokalizację przeciwstożka oraz jego wymiary**.

Proces badawczy został przeprowadzony dla rzeczywistej konstrukcji (i warunków pracy) odpylacza cyklonowego z płaszczem spiralnym. Tego typu konstrukcje cyklonów są powszechnie stosowane w wielu gałęziach przemysłu – jest to dodatkowa zaleta badanej konstrukcji. Opracowano i przebadano 15 wariantów modyfikacji konstrukcji separatora, polegających na zainstalowaniu wewnątrz odpylacza cyklonowego przeciwstożka o różnych parametrach geometrycznych. W związku z tym, że kluczowe znaczenie ma lokalizacja

dodatkowego elementu, zaproponowano 5 położeń przeciwstożka (oznaczonych symbolami a–e). Jako opis jego lokalizacji przyjęto oznaczenie B_h (odległość podstawy przeciwstożka od kanału wylotowego odseparowanych cząstek) – rysunek 2. Dla nadania uniwersalnego charakteru przeprowadzonych badań wartość tego parametru uzależniono od średnicy kanału wylotowego odseparowanych cząstek ciała stałego *B*. Parametr ten stanowił podstawę do zaproponowania optymalnej lokalizacji przeciwstożka. W zależności od położenia przeciwstożka wartość B_h wynosiła od -0,35*B* (warianty e) do 0,15*B* (warianty a). Dodatkowo dla pięciu położeń przeciwstożka zaproponowano po trzy kąty (α) – oznaczono je symbolami: 1 (85°), 2 (95°) oraz 3 (105°).

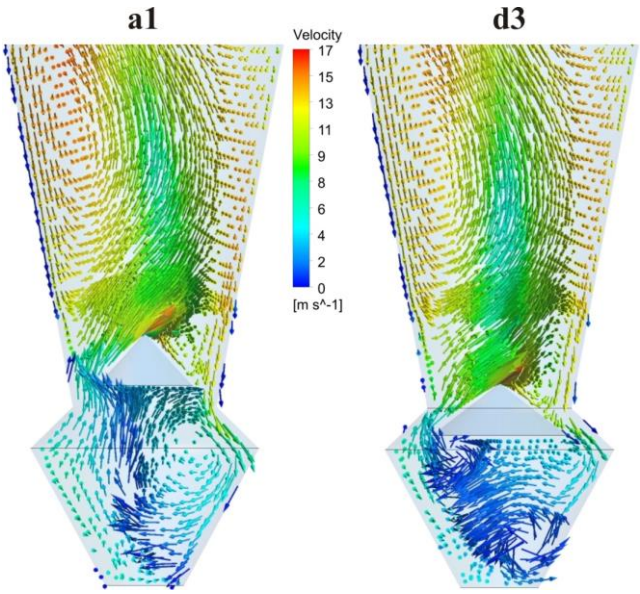


Rysunek 2. Metoda określania lokalizacji i wymiarów przeciwstożka.

Badania przeprowadzono z zastosowaniem dwóch metod badawczych: modelowania numerycznego oraz badań eksperymentalnych. Instalacja doświadczalna składała się z: wentylatora wyposażonego w falownik (zasilanie fazy gazowej), dozownika (zasilanie fazy stałej), modelu odpylacza cyklonowego, przetwornika różnicy ciśnień, przepływomierza, zbiornika odseparowanych cząstek oraz filtru tkaninowego (zabezpieczenie tzw. unosu). Strategia numeryczna była zbliżona do warunków przedstawionych w pracy [A1]. Zaprezentowane metody analizowania zjawiska przepływu wewnątrz odpylaczy cyklonowych wyposażonych w dodatkowy element konstrukcyjny w postaci przeciwstożka pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- **Zastosowanie przeciwstożka w każdym z przebadanych wariantów geometrycznych pozwoliło na zwiększenie skuteczności odpylania**.

- Kluczowym parametrem geometrycznym okazała się **lokalizacja przeciwstożka** (przeciwstożek powinien być zlokalizowany powyżej kanału wylotowego odseparowanych cząstek).
- **Istotną rolę odgrywa także wartość kąta rozwarcia przeciwstożka** (wartość tego parametru powinna wynosić 85°); zwiększanie kąta rozwarcia prowadziło do zmniejszenia skuteczności odpylania.
- Efekt poprawy skuteczności odpylania odnotowano głównie dla najdrobniejszych cząstek (wynika z tego, że ze zbiornika dolnego porywane są głównie cząstki o najmniejszych średnicach).
- Zastosowanie przeciwstożka wpłynęło m.in. na uzyskanie efektu „przywierania" dolnego fragmentu wiru wznoszącego do górnego fragmentu przeciwstożka, co pozwoliło ograniczyć zjawisko porywania osadzających się cząstek ciała stałego na ściankach separatora w rejonie kanału wylotowego odseparowanych cząstek (rysunek 3).
- Zastosowanie dodatkowego elementu konstrukcyjnego o dużym kącie (α>100°) może prowadzić do ryzyka pojawienia się zjawiska nadmiernej aglomeracji cząstek ciała stałego w okolicach przeciwstożka.
- Negatywnym efektem wprowadzenia dodatkowej przegrody jest wzrost wartości spadku ciśnienia.



Rysunek 3. Wektory prędkości w dolnych rejonach odpylacza cyklonowego dla dwóch przykładowych wariantów.

Wypracowane w ramach realizacji badań rezultaty i wnioski poszerzają wiedzę z zakresu wpływu wprowadzenia dodatkowego elementu w postaci przeciwstożka na wydajność odpylaczy cyklonowych. Bazując na nich, zaproponowano nową niestandardową (o cechach uniwersalności) metodę zwiększenia skuteczności odpylania – polegającą na zdefiniowaniu optymalnej lokalizacji przeciwstożka w oparciu o średnicę kanału wylotowego odseparowanych cząstek ciała stałego *B*. Stwierdzono, że optymalną lokalizację przeciwstożka (przy założeniu maksymalizacji skuteczności odpylania) można uzyskać, gdy odległość podstawy przeciwstożka od dolnego wylotu (B_h) wynosi 0,15*B* (B_h = 0,15*B*).

Artykuł [A4]. *Zrealizowane w ramach artykułu badania wpisują się w zagadnienia tematyczne nr 1 i 4.*

Jednym z kluczowych parametrów wpływających na wydajność odpylaczy cyklonowych jest **ukształtowanie (profil oraz wymiary) kanału wylotowego oczyszczonego gazu. W związku z tym podjęto próbę określenia wpływu tego elementu na wydajność dla separatora specjalnego przeznaczenia (stwierdzono brak podobnych badań w literaturze specjalistycznej).** W tym celu do badań wytypowano rzeczywistą geometrię odpylacza cyklonowego trzeciego stopnia instalacji wypalania klinkieru (jest on odpowiedzialny głównie za regulację procesu technologicznego – kalcynacji – nie pełni wyłącznie klasycznej funkcji separatora). Dodatkowo w konstrukcji tej podczas wcześniejszych prac modernizacyjnych w cementowni usunięto część kanału wylotowego. Wynikało to m.in. z tworzenia się tzw. narostów oraz zamiaru ograniczenia spadku ciśnienia. Jednak zmiana ta spowodowała zbyt duży spadek skuteczności odpylania. Zaproponowano 6 rozwiązań konstrukcyjnych polegających na zastosowaniu różnych konfiguracji kanału wylotowego – po trzy długości wylotu (oznaczenia a–c) w kształcie walca (oznaczenie 1) oraz stożka (oznaczenie 2). Tego typu wyloty są najczęściej stosowane w odpylaczach cyklonowych. Badania zostały przeprowadzone z zastosowaniem metody CFD, z założeniami numerycznymi zbliżonymi do pracy [A1]. Walidację strategii badań numerycznych dokonano w odniesieniu do danych z instalacji przemysłowej dla badanej konstrukcji. Oprócz analizy porównawczej wpływu ukształtowania kanału wylotowego oczyszczonego gazu na parametry wydajnościowe przeprowadzona została także analiza zmian zjawiska przepływu w efekcie zaimplementowanych konfiguracji konstrukcji separatora.

Przeprowadzona analiza pozwoliła stwierdzić, że:

- Konfiguracja kanału wylotowego znacząco wpływała na uzyskane wartości spadku ciśnienia. Wylot w kształcie walca pozwalał uzyskać znacznie mniejsze wartości tego parametru (niezależnie od długości) od stożka. Z rozpatrywanych długości walca najmniejszy spadek ciśnienia uzyskano dla wariantu 1a (1620 Pa). Także w przypadku stożka najmniejszą wartość (2293 Pa) uzyskano dla najmniejszej jego długości (wariant 2a). W obu przypadkach zwiększanie długości prowadziło do wzrostu spadku ciśnienia.
- W przypadku CSO uzyskane rezultaty były bardzo zbliżone. Największą wartość (74,4%) uzyskano dla stożka o najmniejszej długości (wariant 2a). Z kolei najmniejszą wartość uzyskano dla walca o największej długości 6m (wariant 1c) – 71,2%. Jednakże uzyskane wartości niezależnie od konfiguracji kanału wylotowego były znacznie wyższe od wartości CSO wariantu bazowego – 58,1%.
- Najmniejsze różnice pomiędzy wariantami były zauważalne dla cząstek o najmniejszej średnicy – 2,5 µm (skuteczność separacji ok. 2%, niezależnie od wariantu). Potwierdza to teorię, że cząstki tego typu nie ulegają odseparowaniu w cyklonach niższych stopni i dodatkowo podkreśla kluczowe znaczenie cyklonów pierwszego stopnia wieży wymiennikowej.
- Analiza fizyki przepływu wykazała, że zastosowanie kanału wylotowego w kształcie stożka spowodowało znaczny wzrost wartości prędkości stycznych – wynikający ze wzrostu burzliwości przepływu w okolicach wylotu (mieszanie się ze sobą strumieni – wznoszącego i opadającego). Wylot w kształcie walca pozwala ograniczyć to zjawisko, niestety kosztem spadku skuteczności odpylania.

Wypracowane wnioski poszerzają wiedzę z zakresu wpływu ukształtowania kanału wylotowego oczyszczonych gazów na wydajność separatorów cyklonowych, w szczególności cyklonów specjalnego przeznaczenia. W wyniku realizacji badań zaproponowano następujące wytyczne konstrukcyjne: zaleca się, aby w przypadku odpylaczy cyklonowych niższych stopni instalacji wypalania klinkieru (w odróżnieniu od cyklonów pierwszego stopnia) stosować kanał wylotowy oczyszczonego gazu w kształcie walca. Tym samym takie rozwiązanie może przynieść znaczne oszczędności w zużyciu energii elektrycznej związanej z pracą wentylatorów wieżowych. Dodatkowo

przeprowadzona analiza wykazała, że wdrożenie nawet prostych technicznie zmian może prowadzić do poprawy wydajności pracy.

Artykuł [A5]. *Zrealizowane w ramach artykułu badania wpisują się w zagadnienie tematyczne nr 3.*

Wybór optymalnej metody dyskretyzacji domeny obliczeniowej jest bardzo istotnym zagadnieniem obliczeń CFD. Każdorazowo należy przeanalizować geometrię rozpatrywanego aparatu oraz rodzaj przepływu. Definiując atrybuty siatki, należy pamiętać, aby uwzględnić umiejscowienie i liczbę jej węzłów, kształt komórek, ich kąty oraz gęstość. Czynniki te w dużej mierze wpływają na dokładność uzyskanych wyników oraz ich niezależność od gęstości siatki obliczeniowej. Ponadto istotnie wpływają na czas badań. Szacuje się, że proces konfiguracji optymalnej domeny obliczeniowej może zająć do 80% czasu przeznaczonego na rozwiązanie danego problemu badawczego. Proces dyskretyzacji jest szczególnie istotny przy analizie przepływów turbulentnych, niestabilnych i wysoce anizotropowych, jak to ma miejsce w odpylaczach cyklonowych. **W realizowanych do tej pory pracach badawczych nad tego typu separatorami badacze stosowali różne metody doboru siatki obliczeniowej. W związku z tym podjęto próbę zbadania wpływu procesu dyskretyzacji domeny obliczeniowej na uzyskane wyniki w przypadku odpylaczy cyklonowych.** Badania zostały przeprowadzone z zastosowaniem dwóch metod badawczych: badań doświadczalnych na stanowisku badawczym (zbliżonym konstrukcją do pracy [A3]) oraz modelowania numerycznego przepływów (strategia numeryczna zbliżona do pracy [A1]). Wyniki uzyskane dzięki pierwszej z metod stanowiły podstawę do przeprowadzenia analizy. Weryfikacja została dokonana w zakresie wartości skuteczności odpylania oraz spadku ciśnienia. Dodatkowo porównano rozkłady prędkości stycznych w wybranych rejonach odpylacza cyklonowego (dla wyników CFD).

Ze względu na podejmowaną problematykę badawczą analizie poddano trzy warianty geometrii siatek: tetrahedralne (wariant a), heksagonalne (wariant b) oraz hybrydowe (zawierające komórki tetrahedralne w rejonie górnym – o bardziej skomplikowanej geometrii – oraz heksagonalne w dolnej części – wariant c). Dodatkowo ze względu na fakt, że duży wpływ na dokładność wyników i czas obliczeń ma gęstość siatki – zaproponowano po trzy gęstości siatek (oznaczone odpowiednio 1–3) dla przedstawionych wyżej wariantów. W wyniku tego powstało 9 domen obliczeniowych, które zostały uwzględnione

w procedurze badawczej. Aby zapewnić wystarczającą jakość przyjętych siatek, wartość średniej skośności musiała wynosić mniej niż 0,25. Przeprowadzona analiza pozwoliła zdefiniować następujące wnioski:

- W przypadku odpylaczy cyklonowych zasadne jest stosowanie domen obliczeniowych z wykorzystaniem siatek heksagonalnych**.** Uzyskane wartości skuteczności odpylania takiej konfiguracji domen obliczeniowych wykazały największą zgodność w porównaniu z wynikami badań eksperymentalnych.
- Najmniejszą dokładnością cechowały się domeny z zastosowaniem siatek tetrahedralnych.
- Zastosowanie siatki heksagonalnej wiąże się z większym nakładem pracy przy konfiguracji domeny obliczeniowej oraz dłuższym czasem samych obliczeń.

Przedstawione wnioski poszerzają wiedzę w zakresie metod dyskretyzacji domeny obliczeniowej odpylaczy cyklonowych. W oparciu o nie stwierdzono, że istotne jest na samym początku procedury badawczej uwzględnienie charakteru podejmowanych badań nad odpylaczami cyklonowymi. W przypadku badań przemysłowych (gdy wymagany jest krótszy czas obliczeń) bardziej zasadny wydaje się wybór domeny o mniejszych wymaganiach obliczeniowych (np. domeny hybrydowe) – w przeciwieństwie do badań naukowych i dostępu do wysokowydajnego sprzętu obliczeniowego (w tym przypadku zaleca się siatki heksagonalne).

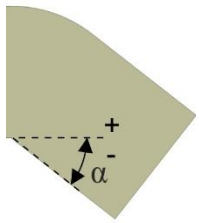
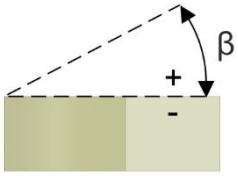
Artykuł [A6]. *Zrealizowane w ramach artykułu badania wpisują się w zagadnienia tematyczne nr 2 i 4.*

Kolejną luką badawczą wskazaną podczas przeglądu zasobów wiedzy z zakresu doskonalenia konstrukcji odpylaczy cyklonowych jest **konfiguracja przewodu doprowadzającego mieszaninę gazu i cząstek stałych do komory wlotowej odpylacza cyklonowego**. W większości gałęzi przemysłu przewody doprowadzające strumień gazu procesowego z instalacji technologicznej do komory cyklonowej nie są prostoliniowe. W zależności od lokalizacji separatora przewody mogą napotkać zmiany kierunku przepływu w kilku miejscach, co wpływa na strukturę przepływu mieszaniny dwufazowej. Ponadto wytworzone lokalne turbulencje przypływu mogą powodować wymianę pędu między dwiema fazami, co z kolei może wpływać na dyspersję cząstek. Odnotowano tylko kilka prac na temat wpływu tego zjawiska na wydajność odpylaczy cyklonowych. W pracach

tych nie dokonano szczegółowej analizy zjawiska przepływu dwufazowego – skupiano się głównie na parametrach określających wydajność odpylaczy cyklonowych.

Mając na uwadze opisaną wyżej problematykę, zdecydowano się **zbadać wpływ kąta przewodu doprowadzającego mieszaninę dwufazową do kanału wlotowego odpylacza cyklonowego na skuteczność odpylania oraz spadek ciśnienia**. Zaprojektowano 20 konstrukcji przewodu doprowadzającego – po 10 kątów zagięć przewodu w płaszczyźnie pionowej (oznaczenie v) i poziomej (oznaczenie h) + 1 wariant bazowy (oznaczenie vh6) – tabela 2. Założenia strategii badań CFD były zbliżone do pracy [A1] (walidacja została przeprowadzona względem wariantu bazowego – w oparciu o dane z rzeczywistej instalacji).

Tabela 2. Warianty modyfikacji.

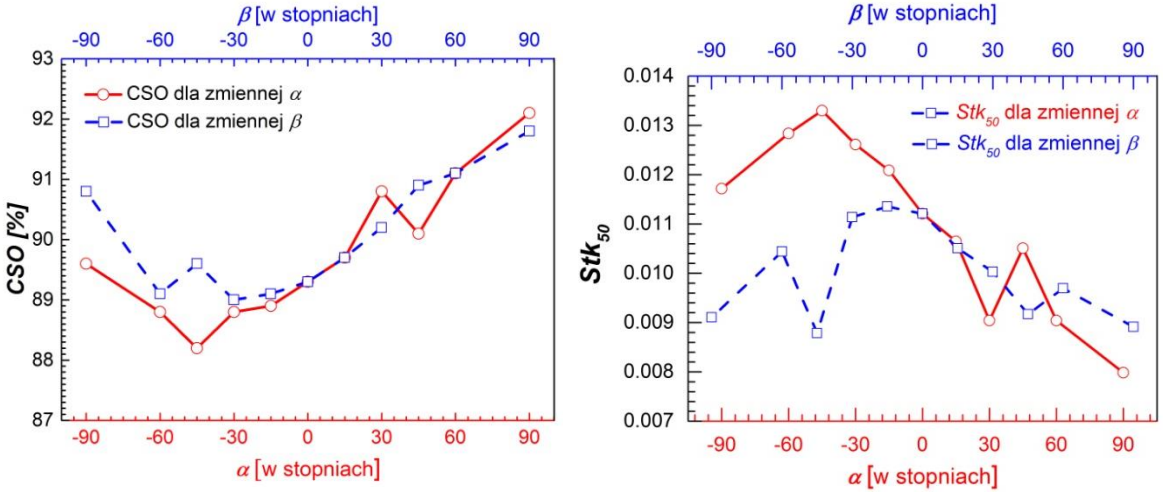
Kąt pionowy α [°]	Oznaczenia											
	v1	v2	v3	v4	v5	vh6	v7	v8	v9	v10	v11	
	–90	–60	–45	–30	–15	0	15	30	45	60	90	
Kąt poziomy β [°]	Oznaczenia											
	h1	h2	h3	h4	h5	vh6	h7	h8	h9	h10	h11	
	–90	–60	–45	–30	–15	0	15	30	45	60	90	

W wyniku przeprowadzonej procedury badawczej stwierdzono, że:

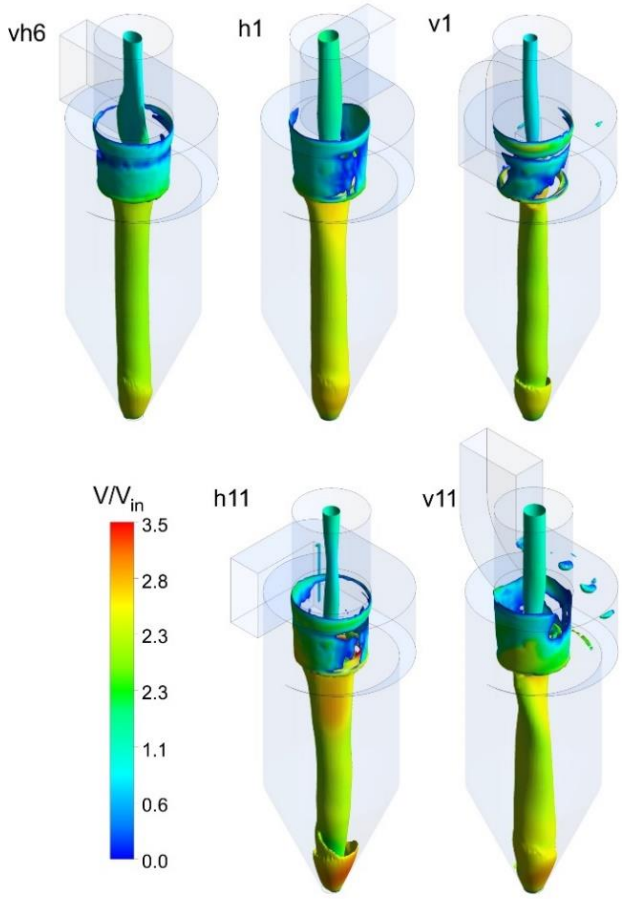
- Maksymalna różnica odnotowana w CSO wyniosła 3,1% dla wariantów v i 2,8% dla wariantów h w odniesieniu do modelu bazowego (rysunek 4).
- Dla kątów zgięcia w płaszczyźnie pionowej dostarczanie cząstek stałych od góry zapewniało wyższe wartości skuteczności separacji (zapewniając lepszą penetrację obu faz w dolne obszary separatora cyklonowego). Skuteczność separacji wzrastała wraz ze wzrostem kąta (z wyjątkiem α = 45°). Optymalny kąt α wynosił 90° (CSO zwiększyła się o 3,1%, a liczba Stokesa (Stk_{50}) zmniejszyła się o 28,8% w porównaniu z kątem 0°). Z kolei gdy cząstki były dostarczane od dołu, to kąt krytyczny miał wartość -45°, gdyż ta wartość zapewniała najniższą skuteczność separacji (CSO spadła o 1,2%, a Stk_{50} wzrosła o 18,6%).

- W przypadku zmian kątów zgięcia w płaszczyźnie poziomej lepszym rozwiązaniem dla kątów większych niż 0° było podawanie cząstek wzdłuż kierunku, w którym cząstki obracały się wewnątrz separatora cyklonowego. Umożliwiło to skierowanie większego strumienia cząstek stałych w kierunku ścian cyklonu, zapewniając tym samym lepszą penetrację cząstek w tym kierunku. W tym przypadku najkorzystniejszy kąt również wynosił 90° (CSO wzrosła o 2,8%, a Stk_{50} zmniejszyła się o 20,5%). Jedynym wyjątkiem był α = -90°; jest to najprawdopodobniej spowodowane skupiskami cząstek stałych odbitych od bocznej ściany kanału wlotowego cyklonu, które prawdopodobnie zmieniają kierunek przepływu.
- Wzrost kąta zgięcia (w obu płaszczyznach) prowadził do wzrostu wartości spadku ciśnienia (wyrażonego w postaci bezwymiarowej za pomocą liczby Eulera – *Eu)*. Stwierdzono, że liczba *Eu* wzrasta po osiągnięciu przez kąt wartości krytycznej, tj. α = -30° dla wariantów v i β = -45° dla wariantów h. Dla wariantów v trend liczby *Eu* był porównywalny); maksymalny wzrost *Eu* o 62%, zaobserwowano dla α = 90°. Z kolei dla modeli z wariantami h *Eu* istotnie wzrastało wraz ze wzrostem kąta β (maksymalny wzrost *Eu*, o 111%, zaobserwowano dla β = 90°).
- Zastosowanie zgięcia przewodu wlotowego powoduje znaczną zmianę wartości ciśnienia statycznego oraz prędkości stycznej w rejonie zewnętrznego wiru swobodnego. Fluktuacja w rejonie wewnętrznego wiru wznoszącego jest mniej zauważalna. Z kolei w przypadku prędkości osiowej różnice zauważono głównie w dolnym rejonie kanału wylotowego oczyszczonych gazów. Zmiany kątów zgięcia prowadziły nie tylko do zmian położenia wartości minimalnych i maksymalnych, ale wpłynęły również na kształt profili.
- Analizy intensywności turbulencji (*turbulence kinetic energy – TKE*) wykazały, że zmiany kątów zagięcia nie wpływają na wartości tego parametru w dolnym rejonie odpylacza cyklonowego (niewielkie zmiany odnotowano dla β = -90° i α = 90°). Z kolei znaczące zmiany zaobserwowano w dolnym rejonie kanału wylotowego oczyszczonych gazów. Przy kątach kanałów wlotowych α, β = ±90° intensywność *TKE* w obszarze swobodnego wiru znacznie wzrosła. W przypadku wszystkich kątów zagięcia kanału wlotowego wartość *TKE* w obszarze swobodnego wiru uległa zmianie.
- Kształt i położenie przestrzenne rdzenia wiru (bazując na kryterium $\lambda 2$ – metody, która pozwala na prezentację obszarów wirów przez izopowierzchnię 3D) nie

odzwierciedlają znaczących różnic. Jednak dla ekstremalnych kątów zgięcia zaczęła powstawać skręcona struktura przypominająca linę. Jedną z zauważalnych różnic jest też kształt wewnętrznego wiru w pobliżu dna cyklonu, zwłaszcza w wariantach cyklonu v1, v11, h1 i h11 (rysunek 5).



Rysunek 4. Całkowita skuteczność odpylania (CSO) oraz liczba Stokesa Stk_{50}.



Rysunek 5. Izopowierzchnie wirów określone na podstawie uśrednionego kryterium λ2 dla przykładowych wariantów.

Uzyskane rezultaty i wnioski poszerzają zakres wiedzy zarówno w aspekcie wydajności, jak i zjawiska przepływu wewnątrz odpylaczy cyklonowych. Bazując na przedstawionych wnioskach zaproponowano optymalny sposób doprowadzenia mieszaniny dwufazowej do komory wlotowej odpylaczy cyklonowych. Kanał wlotowy powinien być skierowany pod kątem 90° zarówno w płaszczyźnie pionowej (doprowadzenie od góry), jak i poziomej (zgięcie w prawą stronę). Dodatkowo w procesie analizy fizyki przepływu wykorzystano dwa narzędzia dotychczas bardzo rzadko stosowane w przypadku odpylaczy cyklonowych (analiza izopowierzchni 3D kształtu i położenia rdzenia wiru – w oparciu o kryterium λ2 oraz analiza intensywności turbulencji z wykorzystaniem *TKE*).

Artykuł [A7]. *Zrealizowane w ramach artykułu badania wpisują się w zagadnienia tematyczne nr 3 i 4.*

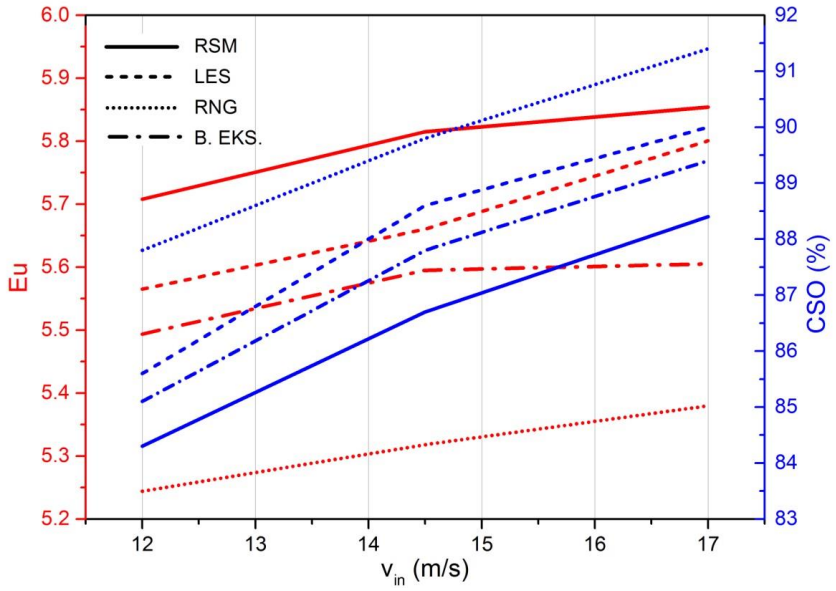
Przed przystąpieniem do prac badawczych opierających się na metodzie CFD należy możliwie dokładnie zidentyfikować i opisać charakter przepływu, który ma miejsce w rozpatrywanej domenie. Wynika to z faktu, iż nie istnieje uniwersalny model (każdy z modeli został opracowany z zastosowaniem pewnych uproszczeń – przez co ma pewne ograniczenia) zapewniający wystarczającą wiarygodność wyników dla różnych konstrukcji urządzeń lub klas przepływów. Z tego względu od momentu zastosowania metody CFD kluczowym problemem było właściwe skonfigurowanie strategii badań zjawiska przepływu (np. dobór modeli obliczeniowych, dyskretyzacja obszaru obliczeniowego, dobór warunków brzegowych). Urządzeniem, które jest przykładem rozwoju badań CFD, jest odpylacz cyklonowy. **Na przestrzeni ostatnich 30 lat można odnotować kilka modeli stosowanych przez badaczy w przypadku tego typu aparatów. W związku z tym podjęto badania, których celem była analiza zjawiska przepływu w odpylaczach cyklonowych oraz ocena dokładności i poziomu wiarygodności modeli numerycznych CFD**. Badania zostały przeprowadzone z zastosowaniem modelowania numerycznego przepływów dla metody RANS oraz LES. W przypadku modelu RANS zastosowano dwa modele domykające: k–ε RNG i RSM. Zastosowanie modelu LES możliwe było dzięki uzyskaniu dostępu do wysokiej klasy sprzętu badawczego w ramach nawiązanej współpracy z Interdyscyplinarnym Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego (Grant badawczy G71–5). Weryfikacja została dokonana w zakresie wartości spadku ciśnienia i skuteczności odpylania cząstek ciała stałego – na podstawie przeprowadzonych badań

eksperymentalnych (na stanowisku zbliżonym konstrukcją do instalacji opisanej w pracy [A3]. Dodatkowo porównano następujące parametry przepływu: prędkość styczną, prędkość osiową oraz ciśnienie statyczne dla badanych modeli. Aby zapewnić wysoką wiarygodność uzyskanych wyników, badania przeprowadzono dla trzech wartości prędkości wlotowej (v_{in}) fazy gazowej. Uzyskanie wyniki na drodze obliczeń numerycznych oraz badań eksperymentalnych doprowadziły do następujących wniosków:

- Każdy z zastosowanych modeli numerycznych pozwolił uzyskać zgodność wyników na zadowalającym poziomie (odchylenia mieściły się w granicy 10%).
- W przypadku prognozowania skuteczności separacji (rysunek 6) najdokładniejszy okazał się model LES – zarówno dla wartości CSO, frakcyjnej skuteczności odpylania, jak i średnicy odcięcia cząstek *(d_{50})*. Na przykład dla ostatniego z tych parametrów odchylenia wynosiły (odpowiednio dla prędkości wlotowych v_{in} = 12 m/s; v_{in} = 14,5 m/s; v_{in} = 17 m/s): LES: 1,7%; 0,9%; 1,0%; RSM: 3,4%; 3,8%; 3,0%; k–ε RNG: 8,6%; 7,5%; 7,1%. Warto także podkreślić, że modele LES oraz k–ε RNG zawyżały wartości całkowitej skuteczności odpylania, natomiast model RSM zaniżał ten parametr – w porównaniu z badaniami doświadczalnymi.
- Także w przypadku wartości spadku ciśnienia (*Eu*) najprecyzyjniejszy okazał się model LES (rysunek 6). Dla prędkości v_{in} = 12 m/s odchylenie wynosiło 1,3%, dla prędkości v_{in} = 14,5 m/s wynosiło 1,2%, natomiast dla największej wartości prędkości v_{in} = 17 m/s wynosiło 3,5%. W przypadku modelu k–ε RNG odchylenia wynosiły odpowiednio: 2,2%, 2,5%, 1,7%. Najmniej dokładny okazał się model RSM (odpowiednio: 5,0%, 5,1%, 5,3%). Warto zaznaczyć, że model k–ε RNG zaniżał uzyskane wartości – w przeciwieństwie do modeli LES oraz RSM, które je zawyżały.
- Analiza czynników charakteryzujących przepływ pozwoliła stwierdzić, że uzyskane profile dla tych modeli były bardzo zbliżone. Model RSM nieznacznie zawyżał maksymalne wartości ciśnienia statycznego oraz prędkości stycznej. Jedyną znaczącą różnicę odnotowano dla prędkości osiowej. Najprawdopodobniej jest to efekt występowania zjawiska PVC w regionie centralnym odpylacza cyklonowego. Źródła literaturowe wskazują, że model LES pozwala na dokładniejsze odwzorowanie tego zjawiska. Zdecydowanie większymi odchyleniami cechował się model k–ε RNG. Wynika to z faktu, że nie opisuje on w sposób wystarczający warstw przyściennych.

Ponadto jego wadą jest założenie izotropowej turbulencji. W związku z tym jest coraz rzadziej stosowany w badaniach nad cyklonami (obecnie stosuje się go praktycznie tylko w przypadkach dodatkowego uwzględnienia wymiany ciepła pomiędzy obiema fazami).

- Stwierdzono, że odpylacze cyklonowe w zależności od swojej geometrii oraz warunków pracy cechuje optymalny przedział prędkości wlotowych.
- Osobnym aspektem, który należy rozważyć przed podjęciem badań z zastosowaniem CFD, jest cel i zakres badań (w tym zakres czasowy) oraz dostępne zasoby sprzętowe (wydajność obliczeniowa jednostek komputerowych). W przypadku badań przemysłowych (nakierowanych na optymalizację danego parametru wydajnościowego), gdy wymagany jest krótszy czas obliczeń (i wystarczające są uzyskane wyniki jakościowe), bardziej zasadny wydaje się wybór modelu RSM. Natomiast w przypadku badań naukowych i dostępu do wysokowydajnego sprzętu obliczeniowego zasadne jest zastosowanie modelu LES. Pozwala to na uzyskanie wartościowych wyników jakościowych i ilościowych. Na przykład w zrealizowanych badaniach czas obliczeń dla modelu LES był ok. 5-krotnie dłuższy niż dla modelu k–ε RNG.



Rysunek 6. Całkowita skuteczność odpylania (CSO) oraz liczba Eu.

Zaprezentowane wnioski poszerzają wiedzę w zakresie konfiguracji strategii badań numerycznych odpylaczy cyklonowych. Rezultaty wykazały dużą zasadność stosowania

modelu LES w badaniach nad tego typu separatorami. Model ten nie był dotychczas powszechnie stosowany w tego typu badaniach. Oprócz możliwości uzyskania większej dokładności w zakresie parametrów wydajnościowych umożliwia on dokładniejszą analizę fizyki przepływu. Może być stosowany do badania zaawansowanych szczegółów przepływu, takich jak uśrednione w czasie i zmienne pola składowych ciśnienia i prędkości, a także wpływu niestabilności hydrodynamicznej na struktury rdzenia wirów.

Artykuł [A8]. *Zrealizowane w ramach artykułu badania wpisują się w zagadnienia tematyczne nr 3 i 4.*

Wraz z rozwojem technik modelowania numerycznego poszukiwano wiarygodnych metod walidacji przyjętych założeń badań CFD, szczególnie w zakresie identyfikacji zjawiska przepływu. **W przypadku odpylaczy cyklonowych proces ten jest realizowany głównie na podstawie tradycyjnych badań eksperymentalnych. Pewnym ograniczeniem jest jednak w tym przypadku możliwość walidacji jedynie w zakresie skuteczności separacji oraz spadku ciśnienia.** Nie ma możliwości szerszej analizy przepływu dwufazowego (np. rozkładów pól przepływu fazy gazowej czy też trajektorii cząstek fazy stałej). Pomocne w tym zakresie są badania z zastosowaniem metod PDA i LDA, jednakże metody te umożliwiają przeprowadzanie analiz porównawczych w ograniczonym zakresie. Odpowiedzią w tym przypadku mogą być badania z zastosowaniem metody DPIV (PIV). Potencjał tej metody nie został dotychczas wykorzystany w zakresie badań nad odpylaczami cyklonowymi. W literaturze specjalistycznej można spotkać tylko nieliczne prace badawcze nad tego typu aparatami z zastosowaniem metody DPIV (PIV).

Celem niniejszych badań była **analiza możliwości zastosowania metody DPIV (PIV) w pracach badawczych nad odpylaczami cyklonowymi**. Do badań zastosowano nietypową konstrukcję odpylacza cyklonowego – cyklon kwadratowy. Takie rozwiązania stosowane są coraz częściej w systemach kotłów fluidalnych (CFB), natomiast liczba prac badawczych nad tego typu geometriami jest ograniczona. Weryfikacja metody DPIV (w odniesieniu do badań CFD) została dokonana w zakresie prędkości stycznych oraz osiowych w wybranych płaszczyznach. Dodatkowo porównano wartości spadku ciśnienia uzyskane podczas badań eksperymentalnych oraz CFD. Aby zrealizować cel badań, stanowisko badawcze wyposażono w układ pomiarowy DPIV składający się z lasera Nd:YAG (stanowiącego źródło światła), kamery CCD rejestrującej zjawiska przepływowe oraz generatora impulsów

(synchronizującego te urządzenia). Przed wlotem do separatora zainstalowano generator posiewu dostarczający czynnik znacznikowy do przestrzeni badawczej. Jako znacznika użyto związku Di-Ethyl-Hexyl-Sebacic-Acid-Ester (DEHS). W przypadku badań CFD przyjęto założenia takie jak w pracy [A1]. W wyniku realizacji badań wyciągnięto następujące wnioski:

- Uzyskane wyniki wykazują dużą zgodność obu metod badawczych (tym samym są dobrym narzędziem do badania zjawiska przepływu w odpylaczach cyklonowych i mogą być wykorzystane w procesach doskonalenia ich konstrukcji). Dla metody DPIV uzyskano nieznacznie większe wartości maksymalne i minimalne analizowanych parametrów przepływu.
- Uzyskane mapy wektorowe oraz profile prędkości dla odpylacza kwadratowego pozwalają przypuszczać, że rozkład przepływu w jego górnej części ma dwie składowe: zewnętrzny swobodny wir i wewnętrzny wymuszony wir w centrum. Zasadne jest podejmowanie dalszych badań w celu określenia, czy podobna struktura ma miejsce w dolnym rejonie (szczególnie pod kątem diagnozy ukształtowania rdzenia wiru wewnętrznego). Może to mieć kluczowe znaczenie dla wydajności tego typu odpylaczy cyklonowych.
- W narożach cyklonów kwadratowych generowane są dodatkowe wiry. Przekrój kwadratowy separatora wymusza ostry, anomalny skręt mieszaniny dwufazowej, powodując intensywne kolizje między cząstkami, a także pomiędzy ścianą a cząstkami. Narożnik jest jednym z głównych regionów powodujących spadek ciśnienia. Natomiast zjawisko to może pozytywnie wpływać na skuteczność odpylania – ze względu na to, iż silny fluktuujący przepływ w tym rejonie pochłania dużo energii kinetycznej zarówno cząstek, jak i płynu.

Uzyskane informacje poszerzają wiedzę w zakresie konfiguracji badań CFD odpylaczy cyklonowych, a także możliwości zastosowania metody DPIV (PIV). W wyniku realizacji badań i opracowanych wniosków zidentyfikowano duży potencjał metody DPIV (PIV), która dotychczas była bardzo rzadko wykorzystywana w badaniach nad odpylaczami cyklonowymi. Ta metoda badawcza może być bardzo dobrym narzędziem w procesie walidacji wyników uzyskanych za pomocą CFD – także w zakresie analizy rozkładów pól

prędkości i innych parametrów przepływu. Dodatkowo ma większy potencjał i możliwości niż dotychczas stosowane w procesie walidacji metody LDA i PDA.

Artykuł [A9]. *Zrealizowane w ramach artykułu badania wpisują się w zagadnienia tematyczne nr 3 i 4.*

Jednym z podstawowych elementów instalacji spalania paliwa z zastosowaniem kotłów CFB są odpylacze cyklonowe. Pierwotnie stosowano standardowe separatory o przekroju okrągłym. Jednakże wraz z ich eksploatacją ujawniły się pewne wady tego typu rozwiązań. Do podstawowych można zaliczyć duże wymiary (wynikające z przekroju okrągłego) oraz konieczność zastosowania okładzin ogniotrwałych (często kilkuwarstwowych). Czynniki te prowadzą do zwiększenia czasu reakcji na zmiany parametrów mediów roboczych, wynikających ze zmiennych warunków pracy kotła CFB. Fakt ten utrudnia zintegrowanie pracy separatora z kotłem. W latach 90. ubiegłego wieku firma Ahlstrom Corporation zaproponowała nowe rozwiązanie – **odpylacz cyklonowy o przekroju kwadratowym**. Konstrukcja ta pozwoliła wyeliminować część wad separatorów cyklonowych o przekroju okrągłym współpracujących z kotłami CFB. Pozwoliła na ograniczenie wymiarów, umożliwiła zastosowanie cienkiej wykładziny ogniotrwałej, zmniejszyła czas rozruchu – zatrzymania instalacji. Kolejną zaletą tych konstrukcji było ograniczenie spadku ciśnienia podczas przepływu mieszaniny dwufazowej przez separator. Niestety negatywnym zjawiskiem było znaczne obniżenie skuteczności separacji. W ostatnich latach można zauważyć wzrost liczby badań z zakresu cyklonów kwadratowych. Wynikać to może z dużego potencjału tych konstrukcji (np. zastosowania ich nie tylko jako elementu instalacji kotła CFB), a także niewielu badań w porównaniu z tradycyjnymi odpylaczami cyklonowymi o przekroju okrągłym. Jednakże przeprowadzone badania nad cyklonami kwadratowymi skupiały się tylko na analizie parametrów wydajnościowych tych separatorów. **Niewiele prac poświęconych było doskonaleniu ich konstrukcji oraz opisowi zjawiska przepływu dwufazowego.**

Głównym celem badań była analiza wpływu ukształtowania (długości oraz średnicy) **kanału wylotowego oczyszczonych gazów w cyklonie kwadratowym na jego wydajność i zjawisko przepływu** za pomocą trzech metod badawczych. Badania zostały przeprowadzone z zastosowaniem CFD, DPIV (PIV) i badań eksperymentalnych (stanowisko zbliżone konstrukcją do instalacji opisanej w pracy [A3] dodatkowo wyposażono w układ

do badań DPIV). Model separatora bazowego został wykonany z poly(methyl 2-methylpropenoate) – PMMA. Weryfikacja metody CFD (w odniesieniu do badań DPIV) została dokonana w zakresie średnich prędkości stycznych, osiowych oraz promieniowych w wybranych lokalizacjach. Dodatkowo porównano wartości skuteczności odpylania i spadku ciśnienia uzyskane podczas badań eksperymentalnych oraz CFD. Metodyka pomiarowa zakładała przeprowadzenie badań dla 15 konfiguracji geometrycznych kanału wylotowego. Zaproponowano 5 dodatkowych średnic (oznaczenia A–E), a dla każdej ze średnic 3 poziomy długości (oznaczenia 1–3). Punktem odniesienia był wariant bazowy cyklonu kwadratowego. Wnioski z badań opisanych w artykule [A8] oraz dostęp do wysokiej jakości sprzętu badawczego (w ramach podjętej współpracy z Interdyscyplinarnym Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego – Grantu badawczego G73–10: *Symulacja i analiza zjawisk cieplno-przepływowych urządzeń i układów procesowych*) pozwoliły na zastosowanie w badaniach CFD modelu turbulencji LES. W celu właściwego określenia sprzężenia pól ciśnienia i prędkości dla zachowania równania ciągłości pędu zastosowano algorytm *Non-iterative Time Advancement* (NITA) ze schematem kroków frakcyjnych. Do modelowania przepływu „małej skali" wykorzystano standardowy model podsiatkowy (*subgrid-scale model*) Smagorinsky'ego. Z badań przeprowadzonych z zastosowaniem trzech metod badawczych wyciągnięto następujące wnioski:

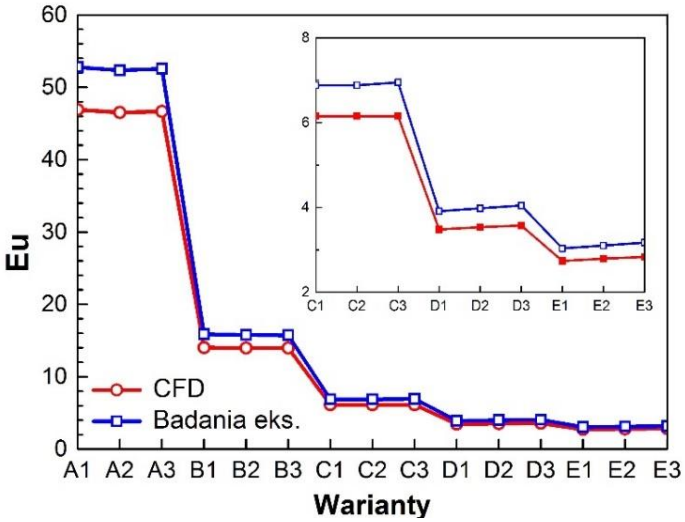
- Średnica kanału wylotowego oczyszczonych gazów znacząco wpływa na wartość spadku ciśnienia (rysunek 7; wariant bazowy oznaczono symbolem C2). Zmniejszenie średnicy (w odniesieniu do wariantu bazowego) generuje zdecydowany wzrost wartości *Eu* (maksymalnie wartości wzrastały o ok. 660% – warianty Ax). Z kolei zwiększenie średnicy pozwalało obniżyć wartość *Eu* nawet o 55% (warianty Ex). Długość kanału wylotowego oczyszczonych gazów nie miała dużego wpływu na wartość *Eu*.
- W przypadku parametrów definiujących skuteczność odpylania (CSO, liczba Stokesa – Stk_{50}) odnotowano, że średnica kanału wylotowego oczyszczonych gazów nie wpływała znacząco na wartości skuteczności odpylania – dopiero w połączeniu z wartością krytyczną długości można było wskazać wyróżniające się w tym aspekcie warianty. W najkorzystniejszym wariancie (D2 – zwiększenie średnicy w odniesieniu

do wariantu bazowego) uzyskano spadek Stk_{50} o ok. 30% oraz wzrost CSO o ok. 16%. Zbliżone wartości (spadek Stk_{50} o ok. 29% oraz wzrost *CSO* o ok. 14,5%) uzyskano dla wariantów C1 (zmniejszenie długości kanału wylotowego). Także dla wariantu D1 (zwiększenie średnicy oraz skrócenie długości) uzyskano znaczącą poprawę – spadek Stk_{50} o ok. 22% oraz wzrost CSO o ok. 13%. Poprawa parametrów opisujących skuteczność separacji **wynikała głównie ze zwiększenia wartości prędkości stycznych, a także uzyskania większej symetrii przepływu** w przekroju wzdłużnym separatora w wyniku wprowadzonych zmian konstrukcyjnych. Z 15 nowo zaproponowanych konfiguracji kanału wylotowego 14 pozwoliło uzyskać większą wartość CSO w odniesieniu do wariantu bazowego (w przypadku Stk_{50} 10 wariantów uzyskało korzystniejszą wartość). Zdecydowanie najmniej korzystny w tym aspekcie okazał się wariant A3 (zmniejszenie średnicy kanału w połączeniu z jego wydłużeniem) – wzrost Stk_{50} o ok. 48% oraz spadek CSO o ok. 5%). Wariant C1 potwierdza, że nawet proste zmiany konstrukcyjne mogą prowadzić do poprawy wydajności odpylaczy cyklonowych. Graficzne podsumowanie parametrów definiujących skuteczność separacji zaprezentowano na rysunku 8.

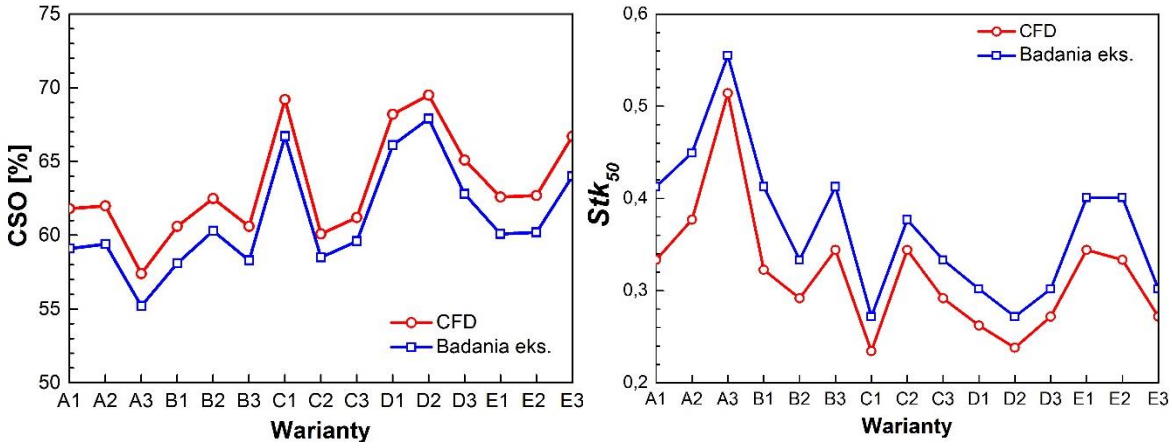
- W przypadku optymalizacji wielokryterialnej najlepszy okazał się wariant D2 (zwiększenie średnicy kanału wylotowego oczyszczonych gazów).
- **Uzyskane wyniki wykazują dużą zgodność metod CFD i DPIV**, szczególnie w zakresie prędkości stycznych – pozwala to stwierdzić, że zarówno CFD, jak i PIV są dobrymi narzędziami do analizy pól przepływu w odpylaczach cyklonowych i mogą być wykorzystane w procesie doskonalenia ich konstrukcji. Zaobserwowane różnice w wartościach wyników między metodami mogą wynikać z następujących czynników:
  - ✓ symulacje CFD są ogólnie idealistyczne – wykazują regularniejsze i stabilniejsze wzory składowych prędkości, ciśnienia itp.,
  - ✓ stosowany materiał (PMMA) modelu odpylacza może cechować się pewną niedoskonałością optyczną (w szczególności w pobliżu ścian – największe odchylenia odnotowano w tym rejonie),
  - ✓ elementy układu optycznego mogą generować pewne zaburzenia w procesie rejestracji obrazu (np. ostrość kamery, odbicie światła lasera).
- **Przeprowadzone symulacje CFD oraz badania DPIV pozwoliły lepiej zrozumieć zjawisko przepływu w cyklonach kwadratowych.** Uzyskane kontury i profile

prędkości osiowych, stycznych i promieniowych oraz mapy wektorowe pozwalają stwierdzić, że przepływ wewnątrz cyklonu kwadratowego ma bardziej złożony charakter niż w przypadku standardowej konstrukcji (np. nie można jednoznacznie wyróżnić zewnętrznego swobodnego wiru opadającego i wewnętrznego wymuszonego wiru wznoszącego na całej wysokości separatora kwadratowego – wskazane jest dalsze badanie tego zjawiska).

- W narożach cyklonów kwadratowych generowane są dodatkowe wiry – pozytywnie wpływające na skuteczność odpylania (natomiast powodujące wzrost wartości spadku ciśnienia).
- Przepływy typu cyklonowego (wykazujące silną wirowość, anizotropię i turbulencje) **nie są wolne od niestabilności o niskiej częstotliwości**, **określanej jako PVC.** Zjawisko to wpływa na średnie i zmienne pola składowych przepływu. Wahania prędkości mają tendencję do rozpraszania oddzielonych cząstek w pobliżu ścian, zmniejszając w ten sposób skuteczność odpylania. **Fluktuacje te można opisać za pomocą funkcji średniej kwadratowej** (*root mean square* – RMS) wartości zmiennych przepływu. Na podstawie tego parametru (RMS składowej stycznej i osiowej prędkości) stwierdzono, że zdecydowanie największe fluktuacje zaobserwowano dla najmniejszych średnic kanału wylotowego oczyszczonych gazów, natomiast wzrost średnicy prowadził do zmniejszenia fluktuacji. Zmniejszenie długości kanału nasilało fluktuacje, czemu towarzyszyła zwiększona asymetria wahań w dolnym rejonie kanału.



Rysunek 7. Wartości spadku ciśnienia (Eu) dla poszczególnych wariantów.



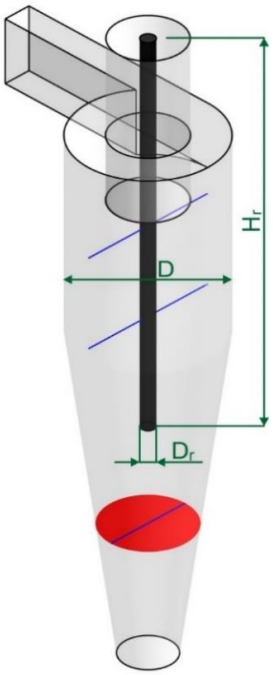
Rysunek 8. Całkowita skuteczność odpylania (CSO) oraz liczba Stokesa Stk_{50}.

Przeprowadzone badania i opracowane wnioski poszerzają wiedzę zarówno w aspekcie doskonalenia konstrukcji cyklonów kwadratowych, jak i analizy fizyki przepływu. Potwierdzono bardzo istotną rolę ukształtowania kanału wylotowego oczyszczonego gazu, także w przypadku cyklonów kwadratowych. Zaprezentowane nowe warianty ukształtowania tego elementu umożliwiają, w zależności od funkcji celu – zwiększenie efektywności odpylania lub zmniejszenie wartości spadku ciśnienia. Dodatkowo połączenie trzech metod badawczych (w tym metody DPIV – w przypadku której potwierdzono wysoką skuteczność) umożliwiło przeprowadzenie szerokiej analizy fizyki przepływu (w zdecydowanie szerszym zakresie niż dostępny w literaturze specjalistycznej) w cyklonie kwadratowym. Przeprowadzona walidacja zastosowanych metod potwierdziła dużą dokładność i potencjał modelu LES. W procesie badawczym wykorzystano nową metodę umożliwiającą identyfikację i analizę fluktuacji składowych prędkości i ciśnienia, bazując na funkcji RMS.

Artykuł [A10]. *Zrealizowane w ramach artykułu badania wpisują się w zagadnienia tematyczne nr 2, 3 i 4.*

Kolejnym przykładem **niestandardowych rozwiązań konstrukcyjnych** mających na celu poprawę wydajności odpylaczy cyklonowych, wskazywanym w literaturze specjalistycznej jest zainstalowanie wewnątrz odpylacza cyklonowego **dodatkowego elementu w postaci pręta**. W dostępnych pracach wskazywano potencjalnie pozytywne efekty tego typu rozwiązania, małą liczbę prac badawczych w tym zakresie oraz konieczność dalszych prac badawczych na temat właściwego doboru średnicy oraz długości. W odpowiedzi na te sugestie przeprowadzono badania nad tym zagadnieniem. **Głównym celem badań była**

analiza wpływu ukształtowania (długości H_r oraz średnicy D_r) **pręta usytuowanego w osi odpylacza cyklonowego** (rysunek 9) **na skuteczność odpylania, spadek ciśnienia oraz zjawisko przepływu**. Dodatkowo na podstawie uzyskanych rezultatów **zaproponowano uniwersalną metodę doboru wymiarów pręta w zależności od średnicy części cylindrycznej cyklonu *D***. Badania zostały przeprowadzone z zastosowaniem trzech metod badawczych (CFD, PIV i badań eksperymentalnych).



Rysunek 9. Geometria odpylacza cyklonowego wyposażonego w pręt.

Zgodnie z przyjętym celem badań zaproponowano 6 długości (oznaczono je literami B–G) pręta usytuowanego w osi odpylacza cyklonowego oraz 5 wartości jego średnic (oznaczono je cyframi 1–5) – łącznie 30 konfiguracji. Zaproponowane długości wynikały z przeprowadzonej wstępnej analizy wpływu długości pręta na wydajność odpylaczy cyklonowych (analizowano długość pręta H_r od wartości $H_r = 0{,}5D$ do $H_r = 4D$). Punktem odniesienia przy ocenie wpływu wymiarów pręta na skuteczność odpylania oraz spadek ciśnienia był wariant standardowy odpylacza cyklonowego (oznaczony symbolem A). Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku badawczym zbliżonym konfiguracją do pracy [A3]. Dodatkowo wyposażono je w urządzenia umożliwiające przeprowadzenie badań z wykorzystaniem metody stereoPIV. Były to: Nd:YAG laser (źródło światła), dwie kamery CCD (umieszczone tak, aby w pełni wykorzystać dostępną rozdzielczość), generator impulsów, generator posiewu (cząstkami znacznikowymi był

DEHS) oraz adaptery Scheimpfluga. Model odpylacza cyklonowego wykonany był z PMMA. Ze względu na geometrię badanego obiektu (odpylacza cyklonowego o przekroju okrągłym) niezbędne było podjęcie działań mających na celu minimalizację zniekształceń obrazu wynikających z dystorsji beczkowych. W tym celu model cyklonu umieszczony był w zbiorniku wypełnionym 56,9-procentowym roztworem jodku sodu (NaI). Z kolei badania CFD przeprowadzono z wykorzystaniem modelu LES (strategia numeryczna zgodna z przyjętą w pracy [A9]).

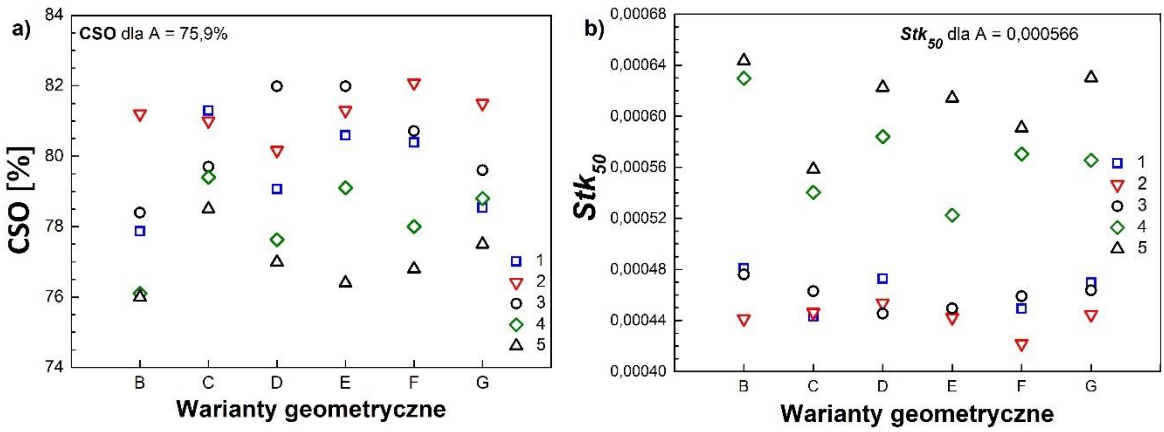
Uzyskane wyniki pozwoliły zdefiniować następujące wnioski:

- **Zastosowanie pręta o przekroju kołowym w osi odpylacza cyklonowego znacząco poprawia jego wydajność** (CSO, Stk_{50} oraz *Eu*).
- Nie odnotowano liniowej zależności wartości średnicy lub długości pręta na CSO oraz St_{k50}.
- W przypadku spadku ciśnienia (wyrażonego poprzez *Eu)* odnotowano liniową zależność średnicy pręta na uzyskane wartości tego parametru (zwiększenie średnicy generowało mniejszy spadek ciśnienia), nie odnotowano podobnej zależności dla długości pręta. **Dla wszystkich wariantów uzyskano wyższe wartości CSO oraz mniejszą wartość *Eu*; dla większości z zaproponowanych geometrii odnotowano korzystniejsze wartości Stk_{50} w odniesieniu do wariantu bazowego.**
- Najkorzystniejsze zwiększenie wydajności odpylaczy cyklonowych możliwe jest dzięki zdefiniowaniu tzw. **wartości krytycznej średnicy** (D_r) oraz **długości pręta** (H_r), w zależności od wymiaru głównego separatora – **średnicy *D*** (D_r/D oraz H_r/D). Najkorzystniejsze z punktu widzenia skuteczności odpylania (rysunek 10) okazały się warianty F2 (wzrost CSO o 8,2%; spadek Stk_{50} o 25,5%), D3 (wzrost CSO o 8%; spadek Stk_{50} o 21,3%), E3 (wzrost CSO o 8,0%; spadek Stk_{50} o 20,6%) oraz G2 (wzrost CSO o 7,3%; spadek Stk_{50} o 21,3%).
- Najkorzystniejsze z punktu widzenia spadku ciśnienia (wyrażonego jako *Eu*) okazały się warianty G5 (spadek *Eu* o 23,9%), E5 (spadek *Eu* o 23,5%) oraz D5 (spadek *Eu* o 23%).
- W aspekcie optymalizacji wielokryterialnej najkorzystniejsze okazały się warianty E3 oraz D3.

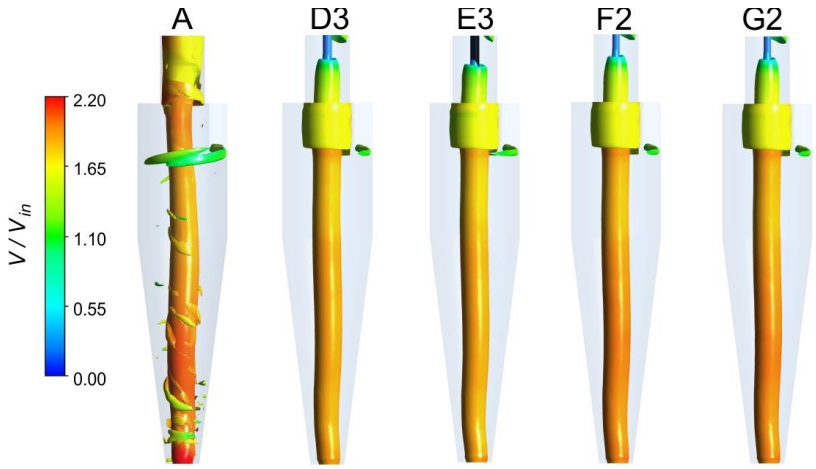
- Głównymi czynnikami wpływającymi na zwiększenie wydajności odpylacza cyklonowego w efekcie zastosowania pręta były:
  - ✓ **stabilizacja przepływu w rejonie wiru wewnętrznego** (przy zachowaniu struktury wiru wznoszącego i opadającego) – wraz ze wzrostem średnicy zjawisko to było bardziej zauważalne (długość pręta odgrywała w tym przypadku mniejszą rolę); uzyskany efekt ograniczył negatywne zjawisko PVC;
  - ✓ **zwiększenie symetrii przepływu** (co jest korzystne dla stabilności pola przepływu) – efekt symetrii nie był zachowany dla wariantu standardowego odpylacza cyklonowego;
  - ✓ **poprawa rozkładu pola prędkości osiowej** (zwiększenie jej ujemnej wartości w rejonie warstwy przyściennej oraz zmniejszenie jej dodatniej wartości w rejonie wiru wewnętrznego – osiągnięcie nawet wartości ujemnych) – co prowadziło do intensywniejszego transportu cząstek w dół odpylacza w strefie ścian separatora – oraz zmniejszenie zjawiska porywania cząstek do kanału oczyszczanego gazu; także w przypadku tej składowej prędkości odnotowano zwiększenie symetrii;
  - ✓ poprawa rozkładu pola prędkości promieniowej (zmniejszenie jej wartości w rejonie wiru wymuszonego) – dotyczyło to w szczególności wariantów z najdłuższym prętem; pozytywnym efektem tego trendu jest ograniczenie transportu cząstek z obszaru wiru zewnętrznego do obszaru wiru wewnętrznego (ograniczające tym samym zjawisko wstecznego mieszania cząstek); dotyczy to w szczególności cząstek o mniejszej średnicy, gdyż siły oporu działające w kierunku osi odpylacza cyklonowego mają mniejsze wartości.
- **Stwierdzono, że największe fluktuacje składowych prędkości i ciśnienia występują w rejonie rdzenia separatora** – ze względu na zjawisko PVC. Analiza fluktuacji ciśnienia (z wykorzystaniem funkcji *root mean square* – RMS) wykazała spadek wartości tego parametru w wyniku zastosowania pręta (wraz ze wzrostem średnicy efekt ten był coraz bardziej widoczny). W przypadku fluktuacji prędkości stycznych (RMS prędkości stycznej) największe wartości fluktuacji zarejestrowano w okolicach osi kanału wylotowego oczyszczonego gazu, a prędkości osiowej (RMS prędkości osiowej) bliżej ścian tego kanału. Wprowadzenie pręta do wnętrza odpylacza

cyklonowego pozwoliło uzyskać mniejsze wartości fluktuacji obu składowych prędkości w części stożkowej separatora (organicznie zjawiska PVC).

- Wykorzystanie dwóch **funkcji identyfikacji wirów** (hesjanu ciśnienia – oraz funkcji kryterium *Q*) **potwierdziło ograniczenie negatywnego zjawiska PVC poprzez zastosowanie pręta** (oraz bardzo istotny wpływ PVC na wydajność odpylaczy cyklonowych). **Odnotowano stabilizację rdzenia wiru na całej jego długości** (rysunek 11) **oraz zmniejszenie prędkości w obszarze wiru wewnętrznego.** Jest to bardzo ważna informacja zarówno z punktu widzenia zwiększenia skuteczności separacji, jak i ograniczenia spadku ciśnienia. **Funkcje identyfikacji wirów nie były dotąd stosowane w pracach badawczych nad odpylaczami cyklonowymi – natomiast wykazują duży potencjał w zakresie dokładniejszego opisu ukształtowania rdzenia wiru wewnętrznego.**



Rysunek 10. Całkowita skuteczność odpylania (CSO) oraz liczba Stk_{50} (A – wariant bazowy).



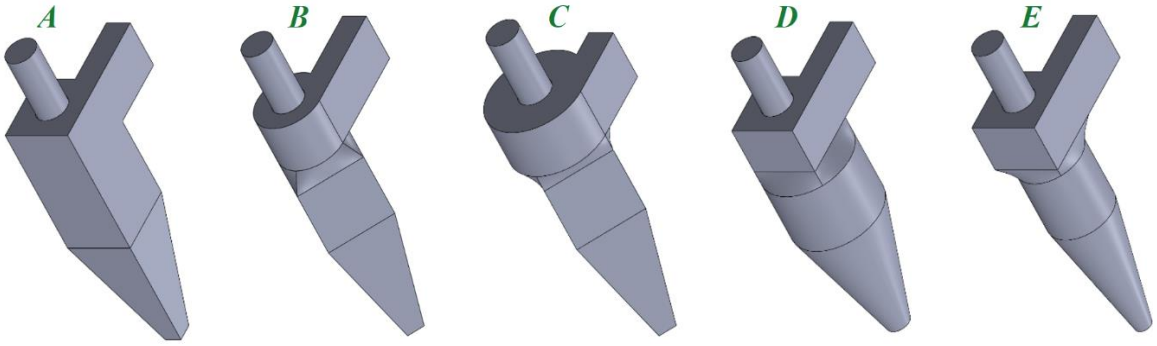
Rysunek 11. Izopowierzchnie wirów zdefiniowane na podstawie uśrednionego kryterium Q dla wariantów: D3, E3, F2, G2 oraz wariantu bazowego A.

Wypracowane w ramach realizacji badań wnioski poszerzają wiedzę zarówno z zakresu wpływu zastosowania niestandardowych metod doskonalenia konstrukcji na wydajność odpylaczy cyklonowych, jak i analizy zjawiska przepływu. Na ich podstawie zaproponowano nową, wysoce efektywną metodę zwiększającą wydajność odpylaczy cyklonowych. Polega ona na umieszczeniu w osi separatora pręta o właściwie skonfigurowanych wymiarach. W przypadku maksymalizacji skuteczności odpylania stosunek wartości H_r/D oraz D_r/D powinien wynosić odpowiednio: 2,00 i 0,08. Natomiast w przypadku gdy priorytetem jest ograniczenie wartości spadku ciśnienia, parametry te powinny wynosić: 2,25 i 0,2. Dodatkowo połączenie trzech metod badawczych umożliwiło przeprowadzenie szerokiej analizy fizyki przepływu (w zdecydowanie szerszym zakresie niż dostępny w literaturze specjalistycznej) w cyklonach o przekroju okrągłym. Przeprowadzona walidacja zastosowanych metod potwierdziła dużą dokładność i potencjał modelu LES. Potwierdzono także bardzo istotną rolę zjawiska PVC w przypadku tych konstrukcji. W procesie badawczym wykorzystano nowe metody: identyfikację i analizę fluktuacji składowych prędkości i ciśnienia w oparciu o funkcję RMS oraz identyfikacji wirów bazującą na funkcji hesjanu ciśnienia i kryterium *Q*.

Artykuł [A11]. *Zrealizowane w ramach artykułu badania wpisują się w zagadnienia tematyczne nr 3, 4 i 5.*

Głównym motywatorem do realizacji niniejszych badań była koncepcja **wykorzystania zalet różnych konstrukcji odpylaczy cyklonowych**. Powszechnie wiadomo, że standardowe odpylacze cyklonowe o przekroju okrągłym cechuje wysoka skuteczność separacji przy dużej wartości spadku ciśnienia. Z kolei skuteczność separacji cyklonów kwadratowych jest znacznie niższa niż w przypadku konwencjonalnej konstrukcji (przy takim samym natężeniu przepływu) – lecz przy znacznie mniejszej wartości spadku ciśnienia. Dlatego biorąc pod uwagę te dwa aspekty, zaproponowano **hybrydowe modele cyklonów kwadratowo-okrągłych**. Opracowane hybrydowe separatory mogą być stosowane w instalacjach CFB, jako klasyfikatory cząstek oraz jako separatory wstępne do usuwania dużej frakcji gruboziarnistych cząstek stałych ze strumienia gazu przy racjonalnych wartościach spadku ciśnienia. Dodatkowo odseparowanie cząstek o większej średnicy na wcześniejszym etapie układu odpylania może pozytywnie wpłynąć na żywotność tzw. separatorów końcowych (np. poprzez ograniczenie zjawiska erozji ścian).

Zaprojektowano cztery modele odpylaczy hybrydowych (rysunek 12). Opracowane konstrukcje to dwie wersje sekcji o przekroju okrągłym zamontowane na sekcjach o przekroju kwadratowym (B i C) oraz dwie sekcje kwadratowe zamontowane na przekroju okrągłym (D i E). W każdym wariancie długość boku przekroju kwadratowego pozostaje taka sama jak w przypadku podstawowej konstrukcji cyklonu kwadratowego (A) – będącej punktem odniesienia przy ocenie wydajności nowo zaprojektowanych konstrukcji. Ponadto wysokość górnego segmentu montażowego (w każdym z przypadków) równa jest długości kanału wylotowego oczyszczonego gazu. Dodatkowo w pracy oprócz oceny wydajności odpylaczy hybrydowych podjęto się badań dotyczących zjawiska przepływu (z uwzględnieniem wniosków z pracy [A9]), głównie w zakresie analizy ruchu wirów w cyklonach kwadratowych (pod kątem zbadania istnienia wiru Rankine'a w tego typu konstrukcjach). Badania zostały wykonane z użyciem metody CFD, zgodnie ze strategią przyjętą w pracy [A9]. Przed właściwym procesem badawczym została wykonana walidacja przyjętej metodologii na podstawie badań eksperymentalnych i metody stereoPIV (warunki tych badań były zgodne z warunkami przyjętymi w pracy [A10]). W celu jak najdokładniejszej oceny nowych konstrukcji badania przeprowadzono dla trzech prędkości wlotowych.



Rysunek 12. Konstrukcje separatorów: A – wariant bazowy; B i C – cyklony hybrydowe o przekroju okrągłym zamontowanym na korpusie o przekroju kwadratowym; D i E – cyklony hybrydowe o przekroju kwadratowym zamontowanym na korpusie o przekroju okrągłym.

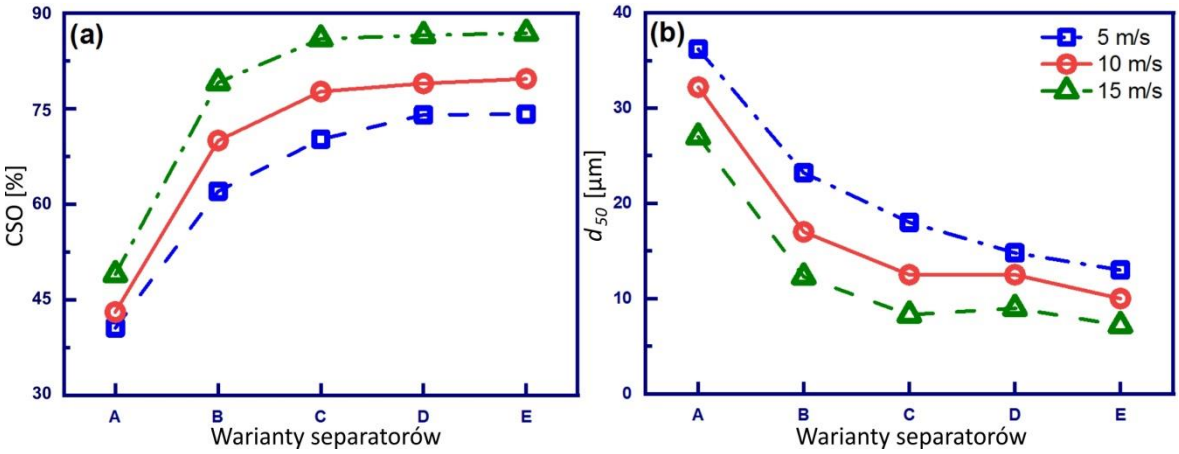
Do najważniejszych wniosków z przeprowadzonej analizy **nowych hybrydowych konstrukcji odpylaczy cyklonowych można zaliczyć:**

- **Wszystkie zaproponowane konstrukcje cyklonów hybrydowych pozwoliły uzyskać zdecydowanie lepsze parametry skuteczności odpylania** (CSO, średnica odcięcia cząstek d_{50}) **w odniesieniu do wariantu konwencjonalnego cyklonu kwadratowego** – rysunek 13. Na przykład dla jednej z badanych prędkości wlotowych (V_{in} = 5 m/s) w odniesieniu do wariantu bazowego A zaobserwowano, że:
  - ✓ w konstrukcji cyklonu B CSO wzrosła o 52,84%, a d_{50} zmniejszyła się o 35,91% – przy wzroście spadku ciśnienia jedynie o 11,11%;
  - ✓ w konstrukcji cyklonu C CSO wzrosła o 72,94%, a d_{50} zmniejszyła się o 50,28% – przy wzroście spadku ciśnienia o 27,27%;
  - ✓ w konstrukcji cyklonu D CSO wzrosła o 82,39%, a d_{50} zmniejszyła się o 59,12% – przy wzroście spadku ciśnienia o 33,33%;
  - ✓ w konstrukcji cyklonu E CSO wzrosła o 82,71%, a d_{50} zmniejszyła się o 64,09% – przy wzroście spadku ciśnienia o 42,42%.
- Po przeprowadzeniu szczegółowej analizy fizyki przepływu **nie znaleziono dowodów na istnienie rdzenia wirowego w cyklonie kwadratowym ani w modelach B i C. Z kolei wyraźny rdzeń wirowy był widoczny w konstrukcjach D i E. W cyklonach A–C struktura pola przepływu nie przypominała wiru Rankine'a, a jego siła znacznie malała podczas poruszania się w dół cyklonu.** Stąd w tych konstrukcjach odpylaczy cyklonowych odnotowano bardzo słaby przepływ rotacyjny. Potwierdziły to analizy:
  - ✓ rozkładu średniego ciśnienia statycznego w przekroju wzdłużnym – dla wariantów D i E oprócz znacznego wzrostu wartości ciśnienia wyraźnie zlokalizowano wiry wewnętrzne (dodatkowo dla wariantu E warto odnotować zmniejszenie zjawiska PVC – co także mogło przyczynić się do zwiększenia zdolności separacji tej konstrukcji);
  - ✓ rozkładu ciśnienia statycznego (chwilowego oraz średniego) w przekroju poprzecznym – w cyklonie kwadratowym (A) pole chwilowego ciśnienia statycznego nie pozwalało na zlokalizowanie strefy niskiego ciśnienia; jednak przy średnim polu ciśnienia statycznego można było zauważyć pojedynczą strefę niskiego ciśnienia; różnica pomiędzy najniższym i najwyższym ciśnieniem w tej płaszczyźnie była bardzo mała; chwilowe dane ciśnienia statycznego w modelach cyklonu B i C również nie wskazywały wyraźnej strefy niskiego ciśnienia, podczas gdy uśrednione w czasie pole ciśnienia pozwalało zlokalizować obszar niskiego

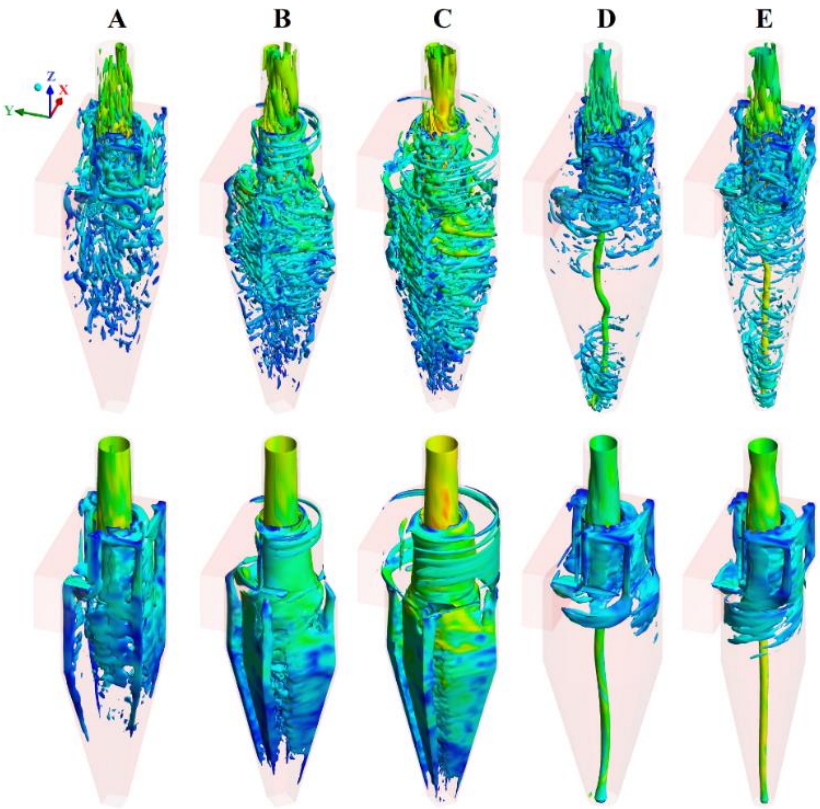
ciśnienia w pobliżu osi cyklonu (ponownie różnica w maksymalnych i minimalnych wartościach ciśnienia statycznego była znacznie mniejsza niż w standardowych odpylaczach cyklonowych o przekroju okrągłym); w przeciwieństwie do wyżej wymienionych modeli konstrukcje D i E wykazywały wyraźny i ostry obszar niskiego ciśnienia (zarówno chwilowe, jak i uśrednione), który odpowiadał środkowi jądra wiru;

- ✓ linii prądu – w konwencjonalnym cyklonie kwadratowym linie prądu mają nieregularny wzór; w cyklonach B i C linie prądu wykazywały równomierny przepływ w górnej części (dzięki okrągłemu przekrojowi), podczas gdy w dolnej części linie prądu miały nieregularny charakter (ze względu na kwadratowy przekrój); ponieważ w modelach D i E górna część miała przekrój kwadratowy, a dolna okrągły – przepływ w górnej części nie był równomierny, natomiast w dolnej części linie prądu wykazywały regularny trend; co więcej, w tych dwóch modelach przepływ rozciągał się aż do dna cyklonu, a wewnętrzny wir był dobrze widoczny;
- ✓ fluktuacji ciśnienia oraz składowych prędkości – główne źródło fluktuacji związane jest z precesyjnym ruchem wewnętrznym wiru wokół osi (zjawisko PVC) – określanym jako fluktuacje spójne – dominują one w obszarze rdzenia cyklonów; w zewnętrznym obszarze wirów pojawiają się fluktuacje turbulentne, które są znacznie słabsze niż fluktuacje spójne; uzyskane wyniki wskazują, że fluktuacje ciśnienia, a także prędkości znacznie wzrastały w centralnym obszarze tylko w przypadku konstrukcji D i E (oraz dla modelu C przy maksymalnej prędkości wlotowej) – miały pod tym względem trend zbliżony do standardowych odpylaczy cyklonowych o przekroju okrągłym;
- ✓ wizualizacji izopowierzchni spójnych struktur w oparciu o kryterium *Q* (rysunek 14, prędkość wlotowa V_{in} = 10 m/s) – w konstrukcjach separatorów A–C w polu przepływu chwilowego pojawiały się tylko wiry o małej skali – bez dowodów na istnienie jądra wiru; podobna obserwacja miała miejsce dla kryterium *Q* uśrednionego w czasie – w tym przypadku wiry narożne były bardzo dobrze zauważalne; z kolei w modelach cyklonów D i E widoczny był wyraźny rdzeń wirowy, zarówno dla chwilowego, jak i uśrednionego w czasie pola przepływu;

✓ trójwymiarowych wykresów opartych na renderowaniu objętości pola średniej prędkości.



Rysunek 13. Całkowita skuteczność odpylania (CSO) oraz średnica odcięcia d_{50}.



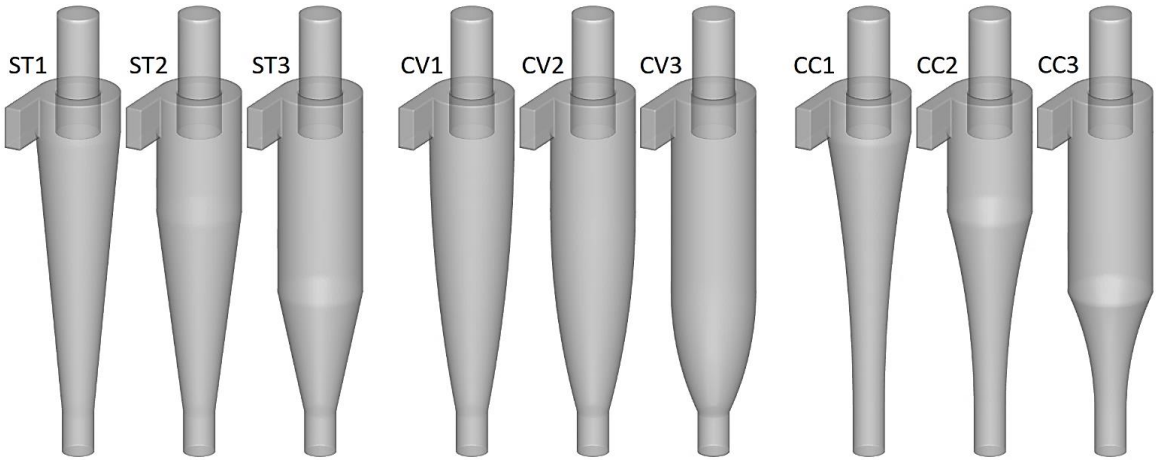
Rysunek 14. Izopowierzchnie wirów zdefiniowane na podstawie chwilowego kryterium Q (górny rząd) oraz uśrednionego kryterium Q (dolny rząd) dla analizowanych wariantów.

Przedstawione wnioski potwierdzają, że zaproponowane nowe konstrukcje hybrydowe mogą mieć szerokie zastosowanie (w zależności od wymagań i zastosowania) poprzez lepszy balans pomiędzy skutecznością odpylania a spadkiem ciśnienia. Na przykład warianty B i C mogą być lepszym wyborem w instalacjach CFB – zamiast typowych

cyklonów kwadratowych, zapewniając duży wzrost skuteczności separacji przy bardzo niskim wzroście wartości spadku ciśnienia (przy zachowaniu elastyczności cieplnej oraz krótkiego czasu reakcji start–stop). Kolejne warianty, w zależności od wymagań, mogą realizować funkcję separatorów wstępnych lub klasyfikatorów cząstek. Dodatkowo przeprowadzona analiza fizyki przepływu pozwoliła poszerzyć wiedzę także w tym zakresie (m.in. uzyskano nowe informacje nt. tworzenia się struktury wiru Rankine'a w cyklonie kwadratowym – pomimo przeprowadzenia szerokiej analizy nie znaleziono dowodów na istnienie rdzenia wirowego w tego typu konstrukcjach – co ma miejsce w przypadku tradycyjnych odpylaczy cyklonowych o przekroju okrągłym).

Artykuł [A12]. *Zrealizowane w ramach artykułu badania wpisują się w zagadnienia tematyczne nr 4 i 5.*

Analizując przeprowadzone prace badawcze, stwierdzono, że istotną rolę w pracy separatora cyklonowego odgrywa **geometria części stożkowej**. **Jednakże większość podjętych prac badawczych dotyczyła jedynie wymiarów tej sekcji**. W związku z tym podjęto próbę zbadania wpływu **ukształtowania (różnych kształtów ścian) części stożkowej na wydajność separatorów cyklonowych**. Zaproponowano różne warianty zakrzywionego profilu ściany sekcji stożkowej. Uwzględniono stożek z wklęsłą ścianą i wypukłe profile przyścienne (definicja wypukłości i wklęsłości ścian odnosi się do obserwatora znajdującego się „poza" cyklonem). Dodatkowo uwzględniono również zmienne długości sekcji cylindrycznej – aby ocenić ich wpływ na różne kształty sekcji stożkowych. Łącznie przygotowano 9 wariantów geometrycznych (rysunek 15). Uwzględniono trzy długości sekcji cylindrycznej oraz trzy kształty sekcji stożkowej – przy zachowaniu stałej wysokości całkowitej separatora. Jeden z wariantów (ST2) odpowiadał geometrii standardowego odpylacza cyklonowego Stairmanda i stanowił punkt odniesienia przy ocenie nowych konstrukcji. Badania przeprowadzono dla trzech wartości prędkości wlotowych: 10 m/s, 15 m/s oraz 20 m/s – z zastosowaniem badań numerycznych (walidację przyjętych modeli przeprowadzono dla wariantu podstawowego ST2).



Rysunek 15. Geometrie badanych odpylaczy cyklonowych (odpowiednio od lewej do prawej: wariant ST, wariant CV i wariant CC).

Na podstawie analizy uzyskanych wyników **badań nowych konstrukcji odpylaczy cyklonowych sformułowano następujące wnioski:**

- Wzrost prędkości wlotowej wpływał na:
  - ✓ wzrost wartości spadku ciśnienia, niezależnie od rozpatrywanej geometrii odpylacza cyklonowego,
  - ✓ zmniejszenie wartości średnicy d_{50},
  - ✓ znaczny wzrost wartości CSO dla wszystkich wariantów.
- Zwiększenie długości odcinka cylindrycznego:
  - ✓ wpłynęło na ograniczenie wartości spadku ciśnienia we wszystkich wariantach separatora,
  - ✓ nieznacznie pogorszyło uzyskane wartości d_{50},
  - ✓ generowało minimalny spadek wartości CSO.
- Zmiana profilu ścian części stożkowej:
  - ✓ dla wypukłych profili ściennych (CV, warianty 1 i 2) uzyskano najmniejsze wartości spadku ciśnienia – dla prędkości wlotowych 10 m/s i 15 m/s; z kolei największe wartości spadku ciśnienia uzyskano dla wariantu CV3; wariant wklęsły CC3 zapewnił zmniejszenie wartości spadku ciśnienia (w odniesieniu do wariantu bazowego) niezależnie od wartości prędkości wlotowej;
  - ✓ parametr d_{50} wykazywał łagodne wahania w zależności od prędkości wlotowej; najmniej korzystne wartości uzyskano dla wariantów wypukłych (CV); z kolei dla wariantów ST i CC zanotowano nieznaczne różnice;

- ✓ w przypadku CSO wariant CC1 zapewnił wzrost wartości tego parametru niezależnie od prędkości wlotowej (wariant CC2 dla prędkości 15 m/s oraz 20 m/s); najmniejsze wartości uzyskano dla wariantów CV 1 i CV2 (z wyjątkiem prędkości wlotowej 15 m/s); dla wszystkich nowo zaproponowanych wariantów profili ściennych najkorzystniejsze warunki pracy występowały dla prędkości wlotowej 15 m/s (każdy z wariantów odnotował wzrost CSO w odniesieniu do wariantu bazowego); potwierdzać to może spostrzeżenia odnotowane w pracy [A7], iż odpylacze cyklonowe w zależności od swojej geometrii oraz warunków pracy cechuje optymalny przedział prędkości wlotowych.

Zaprezentowane wyniki poszerzają wiedzę zarówno w zakresie wpływu ukształtowania sekcji stożkowej na wydajność odpylaczy cyklonowych, jak i zjawiska przepływu. Uzyskane rezultaty potwierdziły skuteczność nowej grupy konstrukcji odpylaczy cyklonowych o szerokim zakresie potencjalnego wykorzystania (w zależności od wymagań, zastosowania oraz parametrów przepływowych). Zaprezentowane informacje potwierdzają, że konstrukcje te umożliwiają balans pomiędzy parametrami wydajnościowymi – skutecznością odpylania i spadkiem ciśnienia.

4.4. Charakterystyka oryginalnych osiągnięć konstrukcyjnych.

- Patent 238406 *Odpylacz cyklonowy.* Data zgłoszenia: 26.05.2020 r., Data udzielenia prawa: 19.05.2021 r.

  Odpylacz cyklonowy według wynalazku, dzięki zastosowaniu podłużnego elementu wewnętrznego w kształcie pręta, wyposażonego w łopatki o skonfigurowanych wymiarach względem średnicy cylindrycznej części odpylacza, umożliwia zwiększenie skuteczności odpylania cząstek ciała stałego poprzez ograniczenie zjawiska precesji wiru wewnętrznego, stabilizację wiru wewnętrznego i zmniejszenie prędkości osiowej w strefie wylotu odseparowanych cząstek ciała stałego. Zarówno zjawisko porywania odseparowanych cząstek ciała stałego ze zbiornika cząstek, jak i zjawisko porywania cząstek odbitych od ścian odpylacza w jego części cylindrycznej są znacznie ograniczone w porównaniu do zjawisk zachodzących w znanych odpylaczach cyklonowych.

  Wkład: Patent jednoautorski.

- Patent: *Odpylacz cyklonowy z wlotem czystego powietrza*. Data zgłoszenia 15.03.2022 r., Data przyznania prawa: 21.10.2022 r. Numer zgłoszenia P.440654 (w trakcie nadawania nr patentu).

  Odpylacz cyklonowy według wynalazku, dzięki zastosowaniu kanału wlotowego czystego gazu o określonych wymiarach, lokalizacji i wskazanych jego parametrach przepływowych umożliwia zwiększenie skuteczności odpylania cząstek ciała stałego, w tym pyłu, poprzez ograniczenie zjawiska przepływu wstecznego, czyli porywania nieodseparowanych cząstek ciała stałego do kanału wylotowego oczyszczonego gazu. Wprowadzanie czystego gazu obwodowo, a nie punktowo, jak w znanych rozwiązaniach, przez kanał wlotowy usytuowany osiowo w dachu części cylindrycznej, równolegle do kanału wylotowego oczyszczonego gazu oraz do ścian części cylindrycznej, powoduje równomierne generowanie warstwy granicznej czystego gazu w rejonie ściany zewnętrznej kanału wylotowego oczyszczonego gazu oraz w rejonie dachu odpylacza cyklonowego.

  Wkład: Patent jednoautorski.

Szczegóły obu rozwiązań wraz z kopiami dokumentów przyznania praw ochronnych zamieszczono w załączniku nr 8.

4.5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze.

Mój dorobek naukowo-badawczy jest szerszy i nie dotyczy wyłącznie zagadnień związanych z tematyką przedstawionego do oceny cyklu publikacji. Zdecydowana większość aktywności naukowo-badawczej (zarówno przed, jak i po uzyskaniu stopnia doktora) skupiała się w obrębie dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

4.5.1. Działalność i osiągnięcia naukowo-badawcze po uzyskaniu stopnia doktora.

Do osiągnięć naukowo-badawczych po uzyskaniu stopnia doktora (realizowanych w różnych grupach tematycznych) można zaliczyć:

- Istotnym osiągnięciem w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka było opracowanie **nowych wytycznych projektowych dla wysokowydajnych konstrukcji odpylaczy cyklonowych, z uwzględnieniem różnych funkcji celu.** Osiągnięcie to uzyskano w wyniku realizacji pracy doktorskiej, a jej efekty zostały opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora w artykule [A13].

M. Wasilewski, J. Duda, *Multicriteria optimisation of first-stage cyclones in the clinker burning system by means of numerical modelling and experimental research*, Powder Technology 289 (2016) 143–158.

Liczba cytowań wg WoS:	Impact Factor:	Punkty MNSiW:
30(21)*	5,305**	35/140***

W związku z tym, iż kluczowym elementem wieży wymiennikowej instalacji wypalania klinkieru są odpylacze cyklonowe pierwszego stopnia, zdefiniowano potencjalne obszary doskonalenia ich konstrukcji. Stwierdzono, że kluczowe znaczenie ma właściwa konfiguracja wymiarów podstawowych sekcji konstrukcyjnych separatora (np. wymiary i kształt wlotu do cyklonu oraz wylotów z cyklonu, wymiary części stożkowej oraz cylindrycznej). **W związku z tym podjęto się opracowania wytycznych konstrukcyjnych dla cyklonów pierwszego stopnia.** Podstawowym założeniem wytycznych było umożliwienie przeprowadzenia procesu doskonalenia konstrukcji w zależności od podstawowego parametru geometrycznego – średnicy części cylindrycznej odpylacza cyklonowego *D* (dzięki temu wytyczne mają charakter uniwersalny) – oraz przyjętej funkcji celu procesu optymalizacji (maksymalizacji skuteczności odpylania, minimalizacji spadku ciśnienia lub maksymalizacji skuteczności odpylania przy możliwie niskim spadku ciśnienia). Realizacja tych założeń możliwa była poprzez analizę i opis zjawiska przepływu wielofazowego wewnątrz odpylaczy cyklonowych na podstawie metod badawczych numeryczno-doświadczalnych. Instalacja doświadczalna była zbliżona do warunków badań przedstawionych w pracy [A3]. Analiza CFD wykonana została metodą objętości skończonych wg strategii zbliżonej do badań [A1]. Badania obejmowały następujące modyfikacje konstrukcji modelu bazowego: zmiany wymiarów oraz ukształtowania kanału wlotowego do odpylacza cyklonowego, typów korpusu wlotowego (styczny, spiralny z kątem 180°, spiralny z kątem 270°), wymiarów i kształtu kanału wylotowego oczyszczonego gazu oraz wprowadzanie dodatkowych elementów konstrukcyjnych do cyklonu. Zaproponowane zmiany wymagały połączenia różnych wariantów modyfikacji. Łącznie powstało 57 konfiguracji, które poddano badaniom doświadczalnym dla czterech strumieni wlotowych fazy gazowej. Kolejnym etapem był proces walidacji uzyskanych wyników – polegający na porównaniu uzyskanych

wartości spadku ciśnienia oraz wartości CSO, z wykorzystaniem dwóch metod badawczych. Celem tego procesu było oszacowanie ilościowe błędów wynikających z poczynionych założeń w modelu, który został rozwiązany numerycznie. Uzyskane dane wykazały dużą zbieżność wyników. Średnia zgodność wyników w przypadku spadku ciśnienia wynosiła ok. 90%, a CSO ok. 94%.

W wyniku przeprowadzonej procedury badawczej stwierdzono, że:

- ✓ Największy wpływ na skuteczność odpylania miały dwa czynniki: kształt kanału wylotowego oczyszczonego gazu oraz typ korpusu wlotowego do odpylacza cyklonowego. Maksymalne wartości skuteczności odpylania uzyskano dla korpusu wlotowego spiralnego (pod kątem 270°) oraz kanału wylotowego oczyszczonego gazu w kształcie stożka (o długości minimalnie mniejszej w odniesieniu do wariantu bazowego). Pierwsza zmiana wpłynęła na zwiększenie zjawiska odprowadzania cząstek ciała stałego w okolice ścianki cyklonu, a następnie ich transport w dół separatora (negatywnym skutkiem był znaczący wzrost wartości spadku ciśnienia). Druga ze zmian pozytywnie wpłynęła na rozkład pól prędkości w dolnym rejonie kanału wylotowego oczyszczonych gazów. Pozwoliło to ograniczyć porywanie cząstek do kanału wylotowego (ograniczenie tzw. zjawiska przepływu wstecznego) przy minimalnym zwiększeniu wartości spadku ciśnienia.
- ✓ W przypadku drugiego parametru definiującego wydajność odpylaczy cyklonowych – spadku ciśnienia – zaobserwowano, że zastosowanie kanału wylotowego oczyszczonego gazu w kształcie walca istotnie wpływa na zmniejszenie lokalnych prędkości w tym rejonie. Przekładało się to również na mniejszą prędkość styczną w pobliżu ścian separatora cyklonu, a docelowo także ograniczyło mieszanie się dwóch wirów (wznoszącego i opadającego).
- ✓ W przypadku trzeciej funkcji celu – maksymalizacji skuteczności odpylania przy możliwie niskim spadku ciśnienia – najkorzystniejsze okazało się zastosowanie korpusu wlotowego spiralnego (pod kątem 180°) oraz kanału wylotowego oczyszczonego gazu w kształcie stożka.

Bazując na uzyskanych wynikach i przedstawionych wnioskach:

- ✓ **Zaproponowano nowe proporcje pomiędzy wymiarami poszczególnych sekcji konstrukcyjnych separatora** (omówionych w rozdziale 4.3.1) **oraz dodano kolejne**

cztery zależności: D_{e1} – górna średnica kanału wylotowego oczyszczonego gazu; D_{e2} – dolna średnica kanału wylotowego oczyszczonego gazu; r_e – odległość od osi odpylacza cyklonowego do osi kanału wlotowego; α_g – typ korpusu wlotowego do cyklonu.

- ✓ **Opracowano trzy nowe specyfikacje wytycznych projektowych**, **w zależności od przyjętej funkcji celu**: wariant I – maksymalizacja skuteczności odpylania przy możliwie niskiej wartości spadku ciśnienia; wariant II – maksymalizacja skuteczności odpylania; wariant III – minimalizacja wartości spadku ciśnienia. Pełne zestawienia nowych wariantów zależności geometrycznych zaprezentowano w tabeli 3. Dodatkowo dla porównania w tabeli 4 zaprezentowano dotychczas najczęściej stosowane charakterystyki w dobrze wymiarów poszczególnych sekcji standardowych odpylaczy cyklonowych. Można odnotować znaczące różnice w proponowanych wartościach wymiarowych.
- ✓ **Zaproponowane wytyczne mogą bardzo istotnie wpłynąć na poprawę parametrów wydajnościowych odpylaczy cyklonowych oraz na ograniczenie energochłonności i oddziaływania na środowisko procesu wypalania klinkieru.**

W związku z faktem, iż odpylacze cyklonowe pierwszego stopnia instalacji wypalania klinkieru (dla których przeprowadzono badania) pełnią głównie funkcję separatorów (w odróżnieniu od cyklonów niższych stopni, których głównym zdaniem jest przeprowadzenie procesu technologicznego – kalcynacji) **zaproponowane wytyczne mogą znaleźć zastosowanie w innych gałęziach przemysłu.**

Tabela 3. Zależności geometrycznych wymiarów cyklonów I stopnia stosowanych w procesie wypalania klinkieru wg wytycznych projektowych.

	a/D	b/D	D_e/D	S/D	h/D	H_c/D	H/D	B/D	D_{e1}/D_{e2}	r_e	α_g
Wariant I	0,57	0,29	0,59	0,56	1,67	0,95	2,63	0,14	1,21	$\frac{1}{2}D$	180°
Wariant II	0,57	0,29	0,59	0,55	1,67	0,95	2,63	0,14	1,21	$\frac{1}{2}D+\frac{1}{2}b$	270°
Wariant III	0,57	0,29	0,59	0,57	1,67	0,95	2,63	0,14	1	$\frac{1}{2}D$	180°

Tabela 4. Zależności geometryczne dla różnych konstrukcji cyklonów.

Badacz	***a/D***	***b/D***	***D_e/D***	***S/D***	***h/D***	***H_c/D***	***H/D***	***B/D***
Lapple	0,5	0,25	0,5	0,625	2	2	4	0,25
Stairmand (o wysokiej skuteczności)	0,5	0,2	0,5	0,5	1,5	2,5	4	0,375
Stairmand (o wysokiej przepustowości)	0,75	0,375	0,75	0,875	1,5	2,5	4	0,375
Swift (o wysokiej skuteczności)	0,44	0,21	0,4	0,5	1,4	2,5	3,9	0,4
Swift (o wysokiej przepustowości)	0,8	0,35	0,75	0,85	1,75	2	3,7	0,4

- W ramach kolejnej grupy tematycznej jako członek zespołów badawczych realizowałem badania nad analizą zjawiska przepływu oraz problemami eksploatacji wymienników ciepła. W artykule [A14] *CFD and PIV Investigation of a Liquid Flow Maldistribution across a Tube Bundle in the Shell-and-Tube Heat Exchanger with Segmental Baffles* (Energies 13 (2020) 5150) przedstawiono badania nierównomierności przepływu cieczy w przestrzeni międzyrurowej płaszczowo--rurowego wymiennika ciepła (STHE). Zjawisko to jest jedną z przyczyn tworzenia się stref stagnacji i niekorzystnie wpływa na wymianę ciepła i spadek ciśnienia. W celu wyjaśnienia szczegółów dystrybucji cieczy w STHE wykorzystano dwie metody badawcze (CFD oraz PIV). Przeprowadzona analiza wykazała, że nierównomierność przepływu w badanej geometrii jest wynikiem występowania dwóch głównych strug w przekroju przestrzeni międzyrurowej: strugi centralnej równoległej do kierunku przepływu cieczy pomiędzy rurami oraz strugi bocznej o ukośnym kierunku przepływu. Dodatkowo w badaniach zlokalizowano niekorzystne zjawiska wirowe pomiędzy ostatnim rzędem rur a dolną częścią płaszcza wymiennika. W kolejnym artykule [A15] *Influence of geometry and surface morphology of the U-tube on the fluid flow in the range of various velocities* (Measurement 164 (2020) 108094) skupiono się na ocenie różnic w nowo wyprodukowanych U-rurkach i po eksploatacji. Zbadano różnice w geometrii i chropowatości powierzchni wewnętrznej oraz przeprowadzono analizę zjawiska przepływu. W wyniku przeprowadzonych badań zauważono, że U-rurka po eksploatacji ma znacznie zmieniony kształt przekroju

w porównaniu z kształtem nowej. Ponadto charakteryzuje się 3-krotnie większą średnią wartością chropowatości powierzchni niż uzyskana w przypadku nowej U-rurki. Odnotowane zmiany istotnie wpływają na proces wymiany ciepła oraz spadek ciśnienia.

Do powyższej grupy tematycznej można zaliczyć także badania przedstawione w artykule [A16] *Analiza zjawisk cieplno-przepływowych w wymienniku ciepła z wykorzystaniem modelowania numerycznego przepływów* (Innowacyjne Opolskie – efekty współpracy nauki i gospodarki, Opolskie Centrum Demokracji Lokalnej FRDL, 2015 r.).

- Kolejna realizowana przeze mnie w ramach zespołu badawczego tematyka dotyczyła wpływu parametrów konstrukcyjnych i przepływowych na rozwój zjawisk dwufazowych gaz–ciecz w procesach zamgławiania ([A17] *Influence of Spray Nozzle Operating Parameters on the Fogging Process Implemented to Prevent the Spread of SARS-CoV-2 Virus* (Energies 14 (2021) 4280). W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu parametrów eksploatacyjnych na występowanie i przebieg zjawisk dwufazowych gaz–ciecz podczas procesu zamgławiania prowadzonego przy użyciu stożkowej dyszy ciśnieniowo-wirowej. Zidentyfikowano zależność parametrów dyszy od kształtu stożka oprysku w zakresie dynamiki i rozkładu średnic kropel. W wyniku przeprowadzonych badań zidentyfikowano szeroki zakres parametrów, w których proces zamgławiania był realizowany w sposób stabilny i powtarzalny.
- W artykule [A18] *Algorithms for determination of the vector velocity field in a two-phase gas–liquid flow* (Thermal Science 24 (2020) 1–9) podjęta została tematyka określenia optymalnego algorytmu do identyfikacji przepływu dwufazowego z zastosowaniem metody PIV w kanale prostokątnym. Realizowany temat badawczy wynikał z faktu, iż do wyznaczania pola prędkości w procesach wymiany ciepła z uwzględnieniem metody PIV wykorzystywane są różne algorytmy. Ich założenia oparte są na wstępnych wynikach badań wdrożeniowych projektowanych urządzeń. Dlatego badacze sygnalizowali problem z wyborem modelu, który umożliwi uzyskanie rezultatów najbardziej zbliżonych do rzeczywistych warunków. W artykule wykazano, że możliwe jest skuteczne zastąpienie czasochłonnego algorytmu *Adaptive PIV* przez bardziej wydajny algorytm *Adaptive Correlation*.

- Kolejną grupę tematyczną stanowiły badania procesów mieszania ([A19] *Impact of stirrer rotational speed on liquid circulation in a rectangular vessel – a study applying DPIV*, 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO–DOK 2018, E3S Web of Conferences oraz [A20] *Flow pattern identification in a rectangular tank comprising stirrer in an off-center orientation*, Engineering Mechanics 2018, 24th International Conference May 14–17, 2018 Svratka, Czech Republic, 509–512; oba artykuły zostały indeksowane w bazie WoS jako materiały konferencyjne). Badania dotyczyły opisu fizyki przepływu w procesach mieszania z zastosowaniem metody PIV. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono m.in. korelację między prędkością obrotową mieszadła a wahaniami i kierunkami prędkości przepływu cieczy, dokonano także oceny intensywności mieszania wynikającej z prostokątnej geometrii naczynia. Dodatkowo zaproponowano i opracowano zależność między kształtem profilu prędkości krążącej cieczy a intensywnością procesu mieszania. Zaprezentowane wnioski mogą być pomocne w intensyfikacji wymiany ciepła w procesach mieszania.
- Osobną grupę zrealizowanych przeze mnie działań badawczych stanowią badania dotyczące zmniejszenia oddziaływania na środowisko procesu produkcji cementu (jako kontynuacja zadań realizowanych przed uzyskaniem stopnia doktora). Wymienić tu można m.in. udział w badaniach nad metodą ograniczenia emisji NO_x w procesie produkcji cementu ([A21] *Ocena metod redukcji emisji NO_x na przykładzie procesu wypalania klinkieru cementowego*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych 28 (2017) 7–16), nad optymalizacją procesu przemiału cementu pod kątem zmniejszenia jego energochłonności ([A22] *Optymalizacja procesu przemiału cementu na przykładzie Cementowni Odra S.A.*, Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji, Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, Opole 2015, 752–763) oraz możliwości zastosowania paliw alternatywnych ([A23] *Logistyka paliw alternatywnych w kontekście ich wykorzystania w sektorze cementowym,* Logistyka 4 (2015) 6455–6462).
- Uczestniczyłem w badaniach nad efektywnością energetyczną pracy silników spalinowych: [A24] *Rozwiązania konstrukcyjne silników o zmiennym stopniu sprężania*, Logistyka 4 (2015) 4715–4723; [A25] *Eksperymentalne badania silnika o zwiększonym stopniu sprężania*, Logistyka 4 (2015) 4706–4714.

- Realizowałem badania związane z przedstawionym cyklem publikacji, jednakże ze względów formalnych (zostały opublikowane w latach 2017–2018 w czasopiśmie z Listy B MNiSW – 8 pkt) nie mogły być w nim uwzględnione: [A26] *Weryfikacja modeli numerycznych CFD na przykładzie cyklonów stosowanych w cyklonowym wymienniku ciepła*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych 29 (2017) 76–89; [A27] *Badania sprawności separacji dolnych cyklonów wymiennika w układzie wypalania klinkieru portlandzkiego*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych 32 (2018) 21–30.
- Byłem współautorem badań nad możliwością integracji platform e-commerce z zastosowaniem paradygmatu *Service Oriented Architecture* ([A28] *SOA Approach in E-Commerce Integration*, Proceedings of the 32nd International Business Information Management Association Conference 2018, Seville, 8506–8515 – artykuł indeksowany w bazie WoS).
- Jako promotor pomocniczy przewodu doktorskiego realizowałem badania z zakresu wykorzystania metod analizy wielokryterialnej w ocenie efektywności techniczno-ekonomicznej procesów cieplnych (efektem współpracy była realizacja doktoratu mgra inż. Jacka Tomasiaka pt. *Ocena efektywności techniczno-ekonomicznej wybranego procesu cieplnego za pomocą analizy wielokryterialnej*). Obrona pracy doktorskiej odbyła się w dniu 29 czerwca 2020 roku.
- Byłem członkiem międzynarodowego komitetu doradczego konferencji *ICTFESD-2022: International conference on Thermo-Fluids Engineering & System Design* (22–23.03.2022 r., Mesra, Indie), a także członkiem komitetów programowych międzynarodowych konferencji: *ICFVM 2018: International Conference on the Finite Volume Method: Applications and Numerics* (11–14.07.2018 r., Bejrut, Liban) oraz *GCFD 2018: International Conference on Green Nanotechnology and Computational Fluid Dynamics* (22–23.03.2018 r., Cambridge, Anglia). Dodatkowo byłem członkiem komitetu organizacyjnego jednej krajowej konferencji (II Międzynarodowa Konferencja *Heat not lost;* 25–26.11.2015 r., Kraków, Polska).
- Byłem kierownikiem grantu badawczego *Analiza zjawiska przepływu w odpylaczach cyklonowych z zastosowaniem metody anemometrii obrazowej* realizowanego ze środków NCN. Dodatkowo byłem kierownikiem dwóch grantów badawczych w ramach współpracy z Interdyscyplinarnym Centrum Modelowania

Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego (*Symulacja i analiza zjawisk cieplno-przepływowych urządzeń i układów procesowych; Wpływ ukształtowania przewodu wlotowego do odpylaczy cyklonowych na skuteczność odpylania oraz spadek ciśnienia*).

- Jestem kierownikiem grantu: *Analiza możliwości zwiększenia wydajności odpylaczy cyklonowych w zakresie niestandardowych zmian konstrukcyjnych.*
- Jestem członkiem dwóch zespołów badawczych realizujących granty: *Badanie wpływu nanocząstek na właściwości elektryczne i fizyczne cieczy elektroizolacyjnych; Badanie parametrów fali emisji akustycznej emitowanej w cieczach dielektrycznych oraz zastosowanie metod nadzorowanego uczenia maszynowego do rozpoznawania rodzaju jej źródła.*
- Jestem redaktorem tematycznym w zagranicznym czasopiśmie – Processes (IF 3,337), a także członkiem rady recenzentów w czasopiśmie Sustainability (IF: 3,437). Jestem także redaktorem wydziałowym Oficyny Wydawniczej Politechniki Opolskiej.
- Odbyłem staż naukowy w uczelni krajowej.
- Wyniki badań zaprezentowałem na czterech konferencjach międzynarodowych oraz jednej krajowej.
- W ramach działalności na rzecz nauki wykonałem 128 recenzji (w latach 2016–2022) do czasopism zagranicznych indeksowanych w bazie WoS oraz mających IF (tabela 5).

Tabela 5. Recenzje prac naukowych w czasopismach indeksowanych w bazie WoS w latach 2016–2022 (IF 2021 r.); źródło: www.webofscience.com.

Nazwa czasopisma	**Liczba recenzji**	**IF**
Powder Technology	40	5,64
Separation and Purification Technology	13	9,136
Separation Science and Technology	7	2,799
Energies	7	3,252
Applied Sciences	6	2,838
Processes	5	3,352
Chemical Engineering Research and Design	5	3,739
Desalination and Water Treatment	3	1,273
Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering	3	1,777
Measurement	3	5,131
Alexandria Engineering Journal	3	6,626
Sustainability	3	3,889
Reviews in Chemical Engineering	2	8,742
International Journal of Automotive and Mechanical Engineering	2	1,349

Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics	2	8,391
Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly	2	0,91
Applied Mathematical Modelling	2	5,336
Separation and Purification Reviews	2	9,636
Aerosol and Air Quality Research	2	3,063
Fluids	2	1,93
Thermal Science	1	1,94
Separations	1	3,334
Journal of Marine Science and Engineering	1	2,774
Journal of Environmental Management	1	8,91
International Journal of Mechanical Sciences	1	6,772
International Journal of Chemical Engineering	1	2,729
IETE Journal of Research	1	2,333
IEEE Access	1	3,367
Energy Science & Engineering	1	4,035
Chemical Engineering & Technology	1	2,215
Advanced Powder Technology	1	4,969
Water	1	3,53
Minerals	1	2,818
Metals	1	2,695
	128	

4.5.2. Działalność i osiągnięcia naukowo-badawcze przed uzyskaniem stopnia doktora.

Do osiągnięć naukowo-badawczych przed uzyskaniem stopnia doktora (realizowanych w różnych grupach tematycznych) można zaliczyć:

- Główny nurt mojej działalności naukowej skupiony był na realizacji pracy doktorskiej. Efektem pracy badawczej były m.in. publikacje: [A29] *Application of Computational Fluid Dynamics to optimization of cyclone dust separators operated in the cement industry*, Chemik 67 (2013) 985–994; [A30] *Influence construction of suspension preheater on energy consumption process during burning in rotary kiln,* XIVth International Symposium on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy HTRSE–2012, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane ZUT, 431–438; [A31] *Wpływ modernizacji cyklonowych wymienników ciepła na energochłonność procesu wytwarzania cementu*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych 11 (2012) 20–29; [A32] *Wpływ ukształtowania wlotu rury nurnikowej na skuteczność pracy I stopnia cyklonowego wymiennika ciepła*, Logistyka 6 (2014) 10913–1092; [A33] *Wykorzystanie nowoczesnych technik modelowania numerycznego w celu*

minimalizacji spadku ciśnienia w odpylaczach cyklonowych stosowanych w procesie wypalania klinkieru, Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji, Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, Opole 2013, 687–696; [A34] *Analiza zjawiska przepływu wielofazowego w cyklonie I stopnia instalacji wypalania klinkieru*, Studia i Monografie z. 403, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2014, 181–192.

- Byłem współautorem badań skupiających się na ograniczeniu energochłonności procesu produkcji cementu oraz jego oddziaływaniu na środowisko (w tym zastosowania tzw. czystych technologii): [A35] *Innowacyjne czyste technologie szansą rozwoju przemysłu,* Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji, Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, Opole 2013, 641–650; [A36] *Kierunki rozwoju konstrukcji cementowego pieca obrotowego*, Logistyka 6 (2014) 3295–3303; [A37] *Innowacyjna technologia utylizacji osadów ściekowych,* Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji, Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, Opole 2014, 68–77.
- Brałem udział w badaniach nad zastosowaniem metody minimalnego drzewa rozpinającego w procesie termicznego zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych oraz biomasy: [A38] *Application of the minimum spinning tree (MST) approach to searching for an optimum location of biomass storage*, Chemik 67 (2013), 935–944; [A39] *Możliwości termicznego zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych za pomocą MST w gospodarce paliwowej na przykładzie przemysłu cementowego*, Logistyka 6 (2014) 3286–3294.
- Odbyłem trzy staże przemysłowe mające na celu nabycie praktycznych umiejętności.
- Byłem współredaktorem dwóch monografii naukowych poświęconych transferowi wiedzy z ośrodków naukowych do przemysłu: *Nauka i praktyka – staże naukowe w przedsiębiorstwach*, Studia i monografie z. 293, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2011, 160 stron; *Nauka dla Innowacji,* Studia i monografie z. 403, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2014, 280 stron. W ramach tej grupy tematycznej opublikowałem także artykuły: [A40] *Po co wyważać otwarte drzwi – Best practice*, Podręcznik wsparcia spin-off, Opole 2011, Uniwersytet Opolski, 127–138; [A41] *Transfer wiedzy – (o)polskie doświadczenia*, Know how – efektywna

komunikacja w regionalnym transferze wiedzy, Opole 2012, Instytut Trwałego Rozwoju, 73–93.

- Brałem udział w pracach naukowo-badawczych w ramach działania statutowego: *Metody wspomagające innowacyjność procesów i produktów.*
- Wyniki badań zaprezentowałem na 8 konferencjach naukowych.
- Byłem członkiem komitetów organizacyjnych 5 konferencji naukowych.

4.5.3. Podsumowanie całości dorobku naukowego.

W skład całościowego mojego dorobku naukowego wchodzi **41** artykułów oraz redakcja naukowa 2 monografii. 14 artykułów zostało opublikowanych w czasopismach ze współczynnikiem IF, 5 publikacji zostało zaindeksowanych w bazie WoS jako materiały z międzynarodowych konferencji. Jestem również autorem 12 artykułów w czasopismach krajowych oraz 9 rozdziałów w monografiach. Sumaryczny **IF** dla wszystkich publikacji wynosi **75,721**. **Indeks Hirscha** według bazy **WoS** wynosi **8** (250 cytowań, 201 bez autocytowań; średnio 12,5 (10 bez autocytowań) na jedną publikację indeksowaną w bazie WoS), bazy **Scopus 8** (288 cytowań, 240 bez autocytowań), bazy **Google Scholar 9** (363 cytowań). Łączna wartość **punktów MEiN** zgodnie z rokiem publikacji wynosi **1572**, a wg punktacji na rok 2022 – **2120** pkt.

Szczegółowe informacje na temat pełnego dorobku naukowego znajdują się w załączniku nr 4 do wniosku. Z kolei tabelaryczne zestawienie (z podziałem na dorobek przed i po uzyskaniu stopnia doktora) zaprezentowano w tabeli 6.

Tabela 6. Zestawienie tabelaryczne – osiągnięcia naukowe dra inż. Marka Wasilewskiego.

Kryterium	**Przed uzyskaniem stopnia doktora**	**Po uzyskaniu stopnia doktora**	***Łącznie***
I. OSIĄGNIĘCIE GŁÓWNE			
Cykl tematycznie powiązanych publikacji naukowych	**0**	**1**	***1***
Oryginalne osiągnięcia konstrukcyjne	**0**	**2**	***2***
II. INFORMACJA O AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ			
Redakcja naukowa monografii	**2**	**0**	***2***
Publikacje naukowe	**13**	**28**	***41***
Publikacje naukowe w czasopismach z bazy JCR	0	14	***14***
Publikacje naukowe w materiałach konferencyjnych indeksowanych w bazie WoS	0	6	***6***

Artykuły w czasopismach spoza bazy JCR	6	6	***12***
Rozdziały w monografiach	7	2	***9***
Osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne, technologiczne	**1**	**6**	***7***
Udział w konferencjach	**7**	**5**	***12***
Konferencje krajowe	7	1	***8***
Konferencje międzynarodowe	0	4	***4***
Udział w komitetach organizacyjnych konferencji	**5**	**1**	***6***
Udział w komitetach naukowych konferencji	**0**	**3**	***3***
Udział w pracach zespołów badawczych	**0**	**4**	***4***
Członkostwo w organizacjach i towarzystwach naukowych	**2**		***2***
Staże naukowe	**0**	**1**	***1***
Członkostwo w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	**0**	**3**	***3***
Recenzje prac naukowych w czasopismach międzynarodowych (indeksowanych w bazie WoS)	**0**	**128**	***128***
Udział w programach europejskich/innych programach międzynarodowych	**4**	**1**	***5***
Udział w innych zespołach badawczych	**3**	**6**	***9***
Udział w zespołach oceniających wnioski o finansowanie badań/przyznanie nagród naukowych/konkursy naukowe lub dydaktyczne	**0**	**1**	***1***
III. INFORMACJA O WSPÓŁPRACY Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM			
Dorobek technologiczny	**0**	**2**	***2***
Współpraca z sektorem gospodarczym	**2**	**1**	***3***
Uzyskane patenty	**0**	**2**	***2***
Ekspertyzy lub inne opracowania wykonane na zamówienie instytucji publicznych lub przedsiębiorców	**2**	**0**	***2***
Udział w zespołach eksperckich lub konkursowych	**2**	**0**	***2***
IV. INFORMACJE NAUKOMETRYCZNE			
Sumaryczny IF	**0**	**75,721**	***75,721***
Liczba cytowań WoS; Scopus; Google Scholar/bez autocytowań	**0**	**250; 288; 363/ 201; 240; -**	**250; 288; 363/ 201; 240; -**
Indeks Hirscha WoS; Scopus; Google Scholar	**0**	**8; 8; 9**	**8; 8; 9**
Liczba punktów MEiN; z roku publikacji/punktacja na rok 2022 r.	**88/260**	**1484/1860**	***1572/2120***

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Interdyscyplinarny charakter realizowanych przeze mnie prac badawczych w dotychczasowym przebiegu kariery naukowej pozwolił nawiązać współpracę z pracownikami innych uczelni lub instytucji naukowych – zarówno zagranicznych, jak i krajowych.

5.1. Współpraca z innymi uczelniami lub instytucjami naukowymi o zasięgu międzynarodowym.

5.1.1. Współpraca z Birla Institute of Technology.

Współpraca została podjęta w 2016 r. i jest realizowana nadal. Dotyczy wspólnych badań z zakresu wykorzystania metody numerycznego modelowania przepływów oraz optymalizacji odpylaczy cyklonowych. Szczegóły prowadzonych wspólnie badań zostały opisane w rozdziale 4 (artykuły [A2], [A6], [A8–A12]). Dodatkowo do efektów współpracy można zaliczyć zaproszenie do międzynarodowego komitetu doradczego konferencji: *ICTFESD–2022: International conference on Thermo-Fluids Engineering & System Design* (2022 r. Mesra, Indie) oraz zaproszenie do udziału w zespole przygotowującym wniosek grantowy *Safety analysis of structural columns subjected to the flow-induced periodic loadings* (wniosek był składany w instytucji finansującej granty w Indiach).

5.1.2. Współpraca z Uniwersytetem w Sumy.

Współpraca z profesorem Ivanem Pavlenką z Uniwersytetu w Sumy (Sumy State University, Faculty of Technical Systems and Energy Efficient Technologies) dotyczyła badań wpływu parametrów konstrukcyjnych i przepływowych na rozwój zjawisk dwufazowych gaz–ciecz występujących podczas procesu zamgławiania realizowanego z wykorzystaniem stożkowej dyszy ciśnieniowo-wirowej. Efektem współpracy jest wspólny artykuł naukowy [A17].

5.1.3. Współpraca z Uniwersytetem Sikkim Manipal.

W ramach realizowanych wspólnie badań dotyczących opracowania nowych konstrukcji odpylaczy cyklonowych zaprojektowano i przebadano 9 wariantów geometrycznych

separatorów ze zmiennym profilem i długością ściany sekcji stożkowej. Efekty realizacji badań oraz opracowane wnioski zaprezentowano w artykule [A12].

5.1.4. Współpraca z Uniwersytetem w Kalkucie.

W ramach realizowanych wspólnie badań dotyczących opracowania nowych konstrukcji odpylaczy cyklonowych zaprojektowano i przebadano 9 wariantów geometrycznych separatorów ze zmiennym profilem i długością ściany sekcji stożkowej. Efekty realizacji badań oraz opracowane wnioski zaprezentowano w artykule [A12].

5.2. Współpraca z innymi uczelniami lub instytucjami naukowymi o zasięgu krajowym.

5.2.1. Politechnika Poznańska.

Współpraca z prof. Szymonem Wojciechowskim oraz prof. Bartoszem Gapińskim dotyczyła badań rur stosowanych w wymiennikach ciepła – w zakresie oceny różnic w nowo wyprodukowanych U-rurkach i po eksploatacji. Zbadano różnice w geometrii i chropowatości powierzchni wewnętrznej oraz przeprowadzono symulację przepływu, a także badania PIV. Efektem współpracy jest opublikowany artykuł naukowy [A15].
Współpraca z zespołem prof. Marka Ochowiaka w zakresie badań wpływu parametrów konstrukcyjnych i przepływowych na rozwój zjawisk dwufazowych gaz-ciecz występujących podczas procesu zamgławiania realizowanego z wykorzystaniem stożkowej dyszy ciśnieniowo-wirowej. Efektem współpracy jest artykuł naukowy [A17].

5.2.2. Uniwersytet Warszawski (Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego).

W ramach współpracy z Interdyscyplinarnym Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego realizowałem granty: *Wpływ ukształtowania przewodu wlotowego do odpylaczy cyklonowych na skuteczność odpylania oraz spadek ciśnienia* oraz *Symulacja i analiza zjawisk cieplno-przepływowych urządzeń i układów procesowych* (drugi z nich realizowany jest nadal) – w obu przypadkach pełniłem (lub pełnię) funkcję kierownika. Współpraca polegała m.in. na dostępie do laboratoriów badawczych wyposażonych w wysokowydajne klastry obliczeniowe oraz specjalistyczne narzędzia softwarowe. Głównym rezultatem współpracy i realizacji grantów są opublikowane artykuły [A4-A7], [A9–A11], [A14].

5.2.3. Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie.

Współpraca prowadzona była w czterech grupach tematycznych. Pierwsza związana była z wykorzystaniem metod analizy wielokryterialnej w ocenie efektywności techniczno-ekonomicznej procesów cieplnych. Efektem współpracy była realizacja doktoratu mgra inż. Jacka Tomasiaka pt. *Ocena efektywności techniczno-ekonomicznej wybranego procesu cieplnego za pomocą analizy wielokryterialnej*, której byłem promotorem pomocniczym. Obrona doktoratu odbyła się 29 czerwca 2020 r.

Kolejne trzy tematy badawcze dotyczyły: badań odpylaczy cyklonowych stosowanych w procesie wypalania klinkieru, metod ograniczenia emisji NO_x w procesie produkcji cementu oraz optymalizacji procesu przemiału cementu. Efektami współpracy były wspólne artykuły naukowe [A13, A21, A22].

Dodatkowo w 2022 roku (7.03–20.03) odbyłem staż naukowy, którego tematyka dotyczyła badań nad możliwością ograniczenia zużycia energii w wybranych procesach technologicznych. Uzyskane wyniki i opracowane wnioski zostaną zaprezentowane w przygotowywanym artykule o roboczym tytule: *Analysis of the possibility of reducing energy consumption in the technological process - a case study.*

5.2.4. Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych; Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska.

Współpraca dotyczyła przede wszystkim badań odpylaczy cyklonowych stosowanych w procesie wypalania klinkieru cementowego. Efektem współpracy są opublikowane dwa wspólne artykuły [A26, A27].

5.2.5. Politechnika Wrocławska.

Współpraca dotyczyła badań nad możliwością integracji platform e-commerce z zastosowaniem paradygmatu *Service Oriented Architecture* (SOA), w szczególności podejścia integracyjnego opartego na SOA dla przedsiębiorstw branży logistycznej. Efektem współpracy jest wspólny artykuł [A28].

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

6.1. Działalność dydaktyczna.

Swoją działalność dydaktyczną rozpocząłem w październiku 2011 r. wraz z podjęciem pracy jako asystent na Wydziale Inżynierii Produkcji i Logistyki Politechniki Opolskiej. W latach 2011–2022 prowadziłem zajęcia dydaktyczne na trzech kierunkach studiów: zarządzanie i inżynieria produkcji, logistyka oraz inżynieria bezpieczeństwa z następujących przedmiotów: Komputerowe wspomaganie prac inżynierskich (L), Systemy komputerowego wspomagania CAx (P), Innowacyjne projektowanie inżynierskie (Ć, P), Podstawy projektowania inżynierskiego (W, Ć, P), Automatyzacja i robotyzacja procesów produkcyjnych (Ć, P), Organizacja łańcuchów dostaw energii w przedsiębiorstwie (Ć), Efektywność procesów konwersji i dystrybucji energii (L), Techniczne przygotowanie produkcji (Ć), Urządzenia i systemy energetyczne (L), Projektowanie procesów technologicznych (L), Konstrukcja maszyn (W, Ć), Zarządzanie bezpieczeństwem (W, Ć), Zaawansowane bazy danych w inżynierii produkcji (W), Technologie informacyjne (L), Zarządzanie bezpieczeństwem informacji (W), Ekologistyka (Ć), Techniczne systemy zabezpieczeń (Ć), Seminarium dyplomowe (S), Seminarium magisterskie (S). W dużej części prowadzonych zajęć wykorzystywałem narzędzia CAx, których używam także w pracy naukowej. Dodatkowo prowadziłem zajęcia na studiach podyplomowych technologie informacyjne w edukacji z programowaniem.

Od momentu uzyskania stopnia doktora byłem promotorem 30 prac dyplomowych (26 prac inżynierskich oraz 4 magisterskie). Byłem także recenzentem prac dyplomowych. Ponadto jestem współautorem dwóch skryptów dydaktycznych dotyczących zastosowania narzędzi CAx:

- Łapuńka Iwona, Mazurek Regina, Paszek Alfred, **Wasilewski Marek**, Wittbrodt Piotr: *Komputerowe wspomaganie projektowania CAD. Ćwiczenia laboratoryjne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej; Opole 2016.
- Łapuńka Iwona, Marek-Kołodziej Katarzyna, Paszek Alfred, **Wasilewski Marek**, Wittbrodt Piotr: *Komputerowe Wspomaganie Wytwarzania CAM*. Ćwiczenia laboratoryjne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej; Opole 2017.

6.2. Działalność organizacyjna i popularyzująca naukę.

Od początku swojej pracy na Politechnice Opolskiej brałem aktywny udział w działalności organizacyjnej w różnych aspektach funkcjonowania uczelni oraz jej współpracy ze środowiskami instytucyjno-biznesowymi. Do najważniejszych punktów działalności organizacyjnej można zaliczyć:

- członek Rady Wydziału Inżynierii Produkcji i Logistyki (2016–2019 r.),
- członek Rady dydaktycznej kierunku ZIP (2019–2020 r.),
- członek Rady dydaktycznej kierunku Inżynieria bezpieczeństwa (2021 r. – nadal),
- członek Uczelnianego kolegium elektorów (2020 r. – nadal),
- członek Wydziałowego kolegium elektorów (2020 r. – nadal),
- członek zespołu do spraw opracowania planów zajęć (2012–2014 r.),
- członek komisji konkursowej w ramach konkursu na najlepszą pracę dyplomową zrealizowaną na kierunkach: zarządzanie i inżynieria produkcji oraz zarządzanie organizowanego przez Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją,
- członek Komisji rekrutacyjnej w projekcie: „Innowacje 4D – multidyscyplinarne wsparcie dla opolskich firm" – realizowanym przez Park Naukowo-Technologiczny w Opolu (2014 r.),
- ekspert w procesie oceny merytorycznej wniosków w ramach projektu „PO Klucz do biznesu 2!" realizowanego przez Wojewódzki Urząd Pracy w Opolu (2012–2013 r.),
- zastępca przewodniczącego oddziału opolskiego Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją,
- członek Polskiego Towarzystwa Zarządzania Innowacjami,
- członek zespołu promującego kierunki studiów wśród szkół woj. opolskiego (2018 r.),
- członek komitetów organizacyjnych następujących wydarzeń naukowych:
  - ✓ II Międzynarodowa Konferencja *Heat not lost* (25–26.11.2015 r., Kraków, Polska),
  - ✓ seminarium naukowe: *Innowacyjne rozwiązania w przemyśle chemicznym* (18.11.2010 r., Opole, Polska),
  - ✓ seminarium naukowe: *Nowe inicjatywy organizacyjne i technologiczne w zakresie chemii przemysłowej* (13.11.2008 r., Opole, Polska),
  - ✓ konferencja naukowa: *Budownictwo energooszczędne* (13–14.04.2007 r., Opole, Polska),

- ✓ konferencja naukowa: *Kogeneracja rozproszona – równoczesne wytwarzanie ciepła i prądu w gminie i w przedsiębiorstwie* (11.12.2006 r., Opole, Polska),
- ✓ konferencja naukowa: *Energochłonność budynków* (22.05.2006 r., Opole, Polska);

- członek zespołów redakcyjnych monografii:
  - ✓ *Innowacyjne rozwiązania w przemyśle chemicznym* (red. W. Tic), Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2011 r.,
  - ✓ *Budowanie przewag konkurencyjnych w wymiarze społecznym, ekonomicznym i terytorialnym* (red. K. Malik), Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2011 r.,
  - ✓ *Zrównoważony rozwój w gospodarce osadami ściekowymi* (red. M. Wzorek, A. Król), Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2010 r.,
  - ✓ *Nowe inicjatywy organizacyjne i technologiczne w zakresie chemii przemysłowej* (red. W. Tic), Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2008 r.;
- współautor oraz kierownik dwóch projektów współfinansowanych ze środków Unii Europejskiej (POKL 2007–2013; Działanie 8.2. Transfer Wiedzy), „Przedsiębiorczy naukowiec" oraz „Przedsiębiorczy naukowiec PLUS" – głównym celem projektów było wzmocnienie współpracy uczelni i przedsiębiorstw oraz promocja wyników badań naukowych pracowników Politechniki Opolskiej (łączna wartość obu projektów to ok. 1 200 000 zł);
- udział w akcji promocji dobrych praktyk z zakresu innowacyjności i transferu nowoczesnych technologii.

7. Nagrody, wyróżnienia.

Do głównych naród i wyróżnień otrzymanych podczas pracy na Politechnice Opolskiej można zaliczyć wyróżnienia przyznane przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (obecnie MEiN) – Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców (2020 r.) oraz Prezydenta RP – brązowy medal Prezydenta RP za Długoletnią Służbę (2016 r.). Dodatkowo w roku 2020 zostałem nominowany do nagrody Osobowość roku w kategorii Nauka w województwie opolskim (uzyskałem III miejsce) w konkursie organizowanym przez instytucję Polska Press Grupa.

Ponadto otrzymałem następujące nagrody i stypendia Rektora Politechniki Opolskiej – dotyczące działalności zarówno naukowej, jak i organizacyjnej:

- Nagroda indywidualna I stopnia Rektora Politechniki Opolskiej za osiągnięcia naukowe (2019 r.),
- Nagroda projakościowa Rektora Politechniki Opolskiej (2020 r., 2021 r.),
- Nagroda Rektora Politechniki Opolskiej za wysoko punktowane osiągnięcia naukowe (2020 r.),
- Stypendium doktorskie Rektora Politechniki Opolskiej (2013 r.),
- Nagroda zespołowa Rektora Politechniki Opolskiej w kategorii osiągnięć organizacyjnych (2010 r.),
- Nagroda III stopnia Rektora Politechniki Opolskiej dla pracowników niebędących nauczycielami akademickimi (2007, 2011 r.).

8. Staże, studia podyplomowe, udział w szkoleniach lub warsztatach.

W celu nabycia praktycznych umiejętności w zakresie podejmowanej tematyki badawczej uczestniczyłem w następujących stażach przemysłowych:

- Staż w roli asystenta innowacji – Przedsiębiorstwo Usług Technicznych DEMPOL-ECO (1.08–31.10.2012 r.). Opracowany dla przedsiębiorstwa raport Asystenta Innowacji został wyróżniony przez organizatorów stażu.
- Staż – Cementownia Odra (1.07–31.10.2014 r.). Współpraca skupiała się głównie na analizie możliwości usprawnienia odpylaczy cyklonowych oraz potencjalnych prac modernizacyjnych w zakresie instalacji wypalania klinkieru. W wyniku realizacji stażu zostałem wytypowany jako jeden z pięciu pracowników naukowych województwa opolskiego do udziału w projekcie „Biznes i nauka w Opolu", którego celem była promocja dobrych praktyk z zakresu innowacyjności i transferu nowoczesnych technologii.
- Staż – Diagnostyka Cieplna (1.10.2014 r. – 31.03.2015 r.). Podstawowymi zadaniami realizowanymi podczas stażu była analiza możliwości oraz wykazanie korzyści z potencjalnego wdrożenia systemów CAE (*Computer Aided Engineering*) w zakresie profilu działalności przedsiębiorstwa.

W roku 2010 w ramach samokształcenia ukończyłem studia podyplomowe: *świadectwa charakterystyki energetycznej i audyt energetyczny budynków*. Dodatkowo brałem aktywny udział w licznych szkoleniach i warsztatach, dotyczących zarówno naukowego aspektu pracy na Politechnice Opolskiej, jak i dydaktycznego oraz organizacyjnego. Do ukończonych szkoleń, warsztatów i seminariów można zaliczyć: *Zarządzanie projektem PO KL – proces realizacji projektu; Wrocławska Akademia Transferu Technologii - w zakresie komercjalizacji wyników badań naukowych; Optymalizacja i modelowanie procesów; Doskonalenie kompetencji zarządczych i partnerskich; Audytor wewnętrzny systemów zarządzania; Zarządzanie innowacjami; Metodologia opracowania idei projektowej na potrzeby realizacji staży w przedsiębiorstwach; Techniki negocjacji i komunikacji; Zarządzanie LEAN; Prawo patentowe i ochrona własności intelektualnych; Zarządzanie procesem wprowadzania nowego produktu; Termika w ANSYS Fluent; Metody trenerskie w pracy wykładowcy; Catia V6 Wprowadzenie do platformy V6 Academia; Delmia V6 Process*

planning – overview; Wprowadzenie do UDF'ów; Siatki na potrzeby analiz CFD; Particle Image Velocimetry 2D PIV, Stereoscopic PIV.

…….

(podpis wnioskodawcy)