



Politechnika Łódzka
Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź
tel. 42 631 3700, fax. 42 636 5663



dr inż. Paweł Wawrzyniak

AUTOREFERAT

Załącznik 2 do wniosku
o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

Łódź 2016

Spis treści

1. Dane osobowe.....	3
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuły broniomych prac.	3
3. Informacje o zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
4. Wskazanie osiągnięcia wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późn. zm.)	4
4.1. Tytuł.....	4
4.2. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 16 ust. 2 ustawy	4
4.3. Omówienie tematyki badań będącej podstawą wniosku	7
<i>Wprowadzenie.....</i>	7
<i>Analiza eksperymentalna pracy przeciwprądowej, przemysłowej suszarki rozpryskowej</i>	10
<i>Model CFD przepływu powietrza suszącego w przeciwprądowej suszarce rozpryskowej</i>	12
<i>Model wymiany ciepła w przeciwprądowej suszarce rozpryskowej z ujemnym źródłem wewnętrznego ciepła zastosowanym do symulacji odparowania wilgoci.....</i>	14
<i>Predykcyjny model procesu suszenia w przeciwprądowej suszarce rozpryskowej</i>	16
<i>Model kinetyczny procesu wymiany ciepła i masy w procesie suszenia w przeciwprądowej suszarce rozpryskowej</i>	20
<i>Budowa modelu suszenia rozpryskowego w aparacie przeciwprądowym z modelem aglomeracji suszonego produktu.....</i>	23
<i>Kontrola temperatury strefy zagrożonej przegrzewaniem w suszarce rozpryskowej za pomocą nawiewu chłodnego powietrza.</i>	27
<i>Bezpieczeństwo instalacji suszarniczej. Redukcja ciśnienia eksplozji pyłu w suszarce.</i>	29
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	37
<i>Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC)</i>	37
<i>Wybrane zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne Po uzyskaniu stopnia doktora:</i>	39
<i>Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne - omówienie</i>	40
<i>Udział w realizacji projektów badawczych finansowanych ze środków budżetowych na naukę przez KBN.</i>	50
<i>Udział w realizacji projektów badawczych zleczanych przez zakłady przemysłowe.</i>	50
<i>Udzielone patenty międzynarodowe i krajowe.....</i>	52
<i>Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie, o której mowa w pkt II A:</i>	52
<i>Referaty na konferencjach:</i>	53
<i>Referaty keynote:</i>	53
6. Działalność dydaktyczna	54
7. Działalność organizacyjna.....	54
8. Podsumowanie dorobku	55

1. Dane osobowe

- imię i nazwisko: **Paweł Wawrzyniak**
- zajmowane stanowisko: **adiunkt**
- miejsce pracy: **Politechnika Łódzka**
Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska
Katedra Inżynierii Środowiska
Zakład Procesów Ciepłych i Dyfuzyjnych
ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź
email: pawel.wawrzyniak@p.lodz.pl

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuły broniomych prac.

- **tytuł magistra inżyniera** – Instytut Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej, 1984r.,
tytuł pracy magisterskiej: „Rozwiązanie numeryczne modelu matematycznego suszenia w polu elektromagnetycznym”,
promotor: dr inż. Tadeusz Kudra
- **stopień doktora nauk technicznych:** Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej, 1999r.
tytuł pracy doktorskiej: „Efektywny współczynnik dyfuzji w niskotemperaturowym procesie wytwarzania aerożelu krzemionkowego”,
promotor: prof. dr hab. Czesław Strumiłło

3. Informacje o zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 1984r. – 1993r.: chemik w Katedrze Procesów Ciepłych i Dyfuzyjnych, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka
- 1993r. – 1999r.: asystent w Katedrze Procesów Ciepłych i Dyfuzyjnych, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka
- 1999r. – 2015r.: adiunkt w Katedrze Procesów Ciepłych i Dyfuzyjnych, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka
- 2015r. – : adiunkt w Katedrze Inżynierii Środowiska, Zakład Procesów Ciepłych i Dyfuzyjnych, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka
- 1991-1993: stypendysta Rządu Japońskiego (Monbusho) na Uniwersytecie Kioto,

4. Wskazanie osiągnięcia wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późn. zm.)

4.1. Tytuł

**Teoretyczna i eksperymentalna analiza pracy
przemysłowych instalacji suszenia rozpryskowego**

- 4.2. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 16 ust. 2 ustawy

Jako osiągnięcie naukowe, w rozumieniu art. 16 w/w ustawy, będące podstawą do wszczęcia i przeprowadzenia postępowania habilitacyjnego o uzyskanie stopnia doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria chemiczna przedstawiam monotematyczny cykl następujących publikacji:

1. **Paweł Wawrzyniak**, Marek Podyma, Ireneusz Zbicinski, Zdzisław Bartczak & Julia Rabaeva: Modeling of Air Flow in an Industrial Countercurrent Spray-Drying Tower: *Drying Technology*, vol. 30, 2, 2012, pp 217-224, (NR ISSN 0012-7086, pkt. 30) (IF 2012 1,814)
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w opracowaniu koncepcji modelu CFD przepływu fazy ciągłej w przeciwną prądową suszarce rozpryskowej. Brałem aktywny udział w opracowaniu modelu przepływu fazy ciągłej, projektowaniu obliczeń i analizie ich wyników. Weryfikowałem zgodność uzyskanych wyników z wartościami doświadczalnymi. Zredagowałem całość opublikowanego materiału. Mój udział procentowy szacuję na 50%.
2. **Paweł Wawrzyniak**, I. Zbicinski, Z. Bartczak, J. Rabaeva: Advanced Experimental Analysis of Industrial Counter Current Spray Drying Process, *Proceedings of the 11th International Drying Symposium*, Xiamen, China, 11-15 November 2012
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu planu badań eksperymentalnych, byłem współautorem projektu mikroseparatora. Brałem czynny udział we wszystkich pomiarach parametrów pracy instalacji suszenia rozpryskowego. Samodzielnie opracowałem wyniki pomiarów porównując je z długookresowymi zapisami danych rutynowo dokonywanymi w zakładzie. Zredagowałem całość opublikowanego materiału. Mój udział procentowy szacuję na 60%.
3. **Paweł Wawrzyniak**, Marcin Piątkowski, Maciej Jaskulski: Air temperature profile in spray dryer - experimental analysis., Raport of the research for Tetra Pack, 2013 Lodz (confidential)
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu planu badań eksperymentalnych dotyczących pomiaru temperatury. Brałem czynny udział we wszystkich pomiarach parametrów pracy instalacji suszenia rozpryskowego. Opracowałem wyniki pomiarów. Zredagowałem raport dla firmy Tetra Pack. Mój udział procentowy szacuję na 70%.
4. **Paweł Wawrzyniak**, Marek Podyma, Ireneusz Zbicinski, Zdzisław Bartczak, Andrzej Polanczyk, Julia Rabaeva: Model of Heat and Mass Transfer in an Industrial Counter-Current Spray-Drying Tower, *Drying Technology*, vol. 30, 11-12, 2012, pp 1274-1282, (NR ISSN 0012-7086, pkt. 30) (IF 2012 1,814)
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji modelowania odparowania wilgoci w procesie suszenia za pomocą przestrzennej funkcji stanowiącej ujemne źródło ciepła. Brałem udział w budowie modelu, projektowaniu obliczeń i analizie ich wyników. Weryfikowałem zgodność uzyskanych wyników z wartościami doświadczalnymi. Redagowałem opublikowany materiał. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

5. **Paweł Wawrzyniak**, Marek Podyma, Maciej Jaskulski, Ireneusz Zbiciński: Indirect Valiation in CFD Modeling of Spray Drying Process: *Proceedings of the 6th Nordic Drying Symposium*, Copenhagen, Denmark, 5-7 June 2013

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji tworzenia serii modeli CFD o stopniowo rosnącej złożoności. Każdy pośredni model weryfikowano za pomocą danych doświadczalnych. Brałem udział w tworzeniu modeli, planowaniu obliczeń i analizie ich wyników. Weryfikowałem uzyskane wyniki z wartościami doświadczalnymi. Redagowałem całość opublikowanego materiału. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

6. **Paweł Wawrzyniak**, Maciej Jaskulski, Ireneusz Zbiciński, Marek Podyma: Two Phase CFD Model of Counter Current Spray Drying Process, *Proceedings of the 19th International Drying Symposium*, Lyon, France, 24-27 August 2014

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji modelu CFD z wykorzystaniem charakterystycznej krzywej suszenia i uproszczonym opisie aglomeracji. Weryfikowałem uzyskane wyniki. Współredagowałem opublikowany materiał. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

7. **Paweł Wawrzyniak**, Maciej Jaskulski, Marek Podyma, Ireneusz Zbiciński: CFD Modelling of Moisture Evaporation in an Industrial Dispersed System, *Advanced Powder Technology* (<http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2016.09.029>) , (NR ISSN: 0921-8831, pkt. 30) (IF 2015 2,478)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji modelu CFD procesu suszenia rozpryskowego z wymianą masy i energii pomiędzy fazą ciągłą i rozproszoną, zdefiniowaniu i udziale w realizacji programu obliczeniowego, opracowałem analizę wyników. Weryfikowałem zgodność uzyskanych wyników z wartościami doświadczalnymi. Zredagowałem większość opublikowanego materiału. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

8. Maciej Jaskulski, **Paweł Wawrzyniak**, Ireneusz Zbiciński, CFD Model of Particle Agglomeration in Spray Drying, *Drying Technology*, vol. 33, 15-16, 2015, pp. 1971-1980, (NR ISSN 0012-7086, pkt. 30) (IF 2015 1,854)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu koncepcji modelu CFD, bieżącej analizie wyników obliczeń i modyfikacji założeń poszczególnych funkcji własnych, opracowanie programu obliczeniowego, brałem też aktywny udział w analizie wyników. Brałem udział w weryfikacji uzyskanych wyników z wartościami doświadczalnymi. Zredagowałem większość opublikowanego materiału. Mój udział procentowy szacuję na 45%.

Zastosowanie modelu do układu przemysłowego zostało przedstawione na konferencji:

Paweł Wawrzyniak, Maciej Jaskulski, Marek Podyma, Ireneusz Zbiciński: CFD Prediction Of Powder Particle Size Distribution In The Industrial Scale Spray Drying Process, *Proceedings of the 20th International Drying Symposium*, Gifu, Japan, 7-10 August 2016

9. Ireneusz Zbiciński, **Paweł Wawrzyniak**, Marek Podyma, Zdzisław Bartczak, Julia Rabaeva Optimal air cooling of ATEX areas in spray drying tower and determination of discrete phase flow in spray drying, Raport of the research for Henkel, 2009 Lodz (confidential)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji modelu CFD z ujemnym źródłem ciepła oraz sposobu wykorzystania modelu do analizy temperatury ścian suszarki, brałem udział w implementacji modelu, planowaniu obliczeń i analizie ich wyników. Brałem czynny udział we wszystkich pomiarach parametrów pracy instalacji suszenia rozpryskowego. Samodzielnie opracowałem wyniki pomiarów konfrontując je z długookresowymi zapisami danych rutynowo dokonywanymi w zakładzie. Weryfikowałem zgodność uzyskanych wyników z wartościami doświadczalnymi. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

- 10. Paweł Wawrzyniak, Marek Podyma, Ireneusz Zbicinski:** Industrial Spray Tower Hot Air Inlets Area Temperature Control, *Proceedings of the 20th International Drying Symposium*, Gifu, Japan, 7-11 August 2016

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu i realizacji planu pomiarów doświadczalnych, zdefiniowaniu koncepcji modelu CFD i sposobu jego weryfikacji doświadczalnej, brałem udział w tworzeniu modelu, obliczeniach i analizie ich wyników. Weryfikowałem uzyskane wyniki z wartościami doświadczalnymi. Zredagowałem całość opublikowanego materiału. Mój udział procentowy szacuję na 65%.

- 11. Paweł Wawrzyniak, Andrzej Polanczyk, Ireneusz Zbicinski, Maciej Jaskulski, Marek Podyma, Julia Rabaeva:** Modeling of Dust Explosion in the Industrial Spray Dryer: *Drying Technology* vol. 30, 15, 2012, pp 1720-1729, (NR ISSN 0012-7086, pkt. 30) (IF 2012 1,814)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu i realizacji programu eksperymentalnego, zdefiniowaniu modelu CFD i sposobu jego weryfikacji doświadczalnej, brałem udział w tworzeniu modelu, projektowaniu obliczeń i analizie wyników. Weryfikowałem zgodność wyników obliczeń z wartościami doświadczalnymi. Redagowałem całość opublikowanego materiału. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

Cześć wyników pracy była wcześniej prezentowana jako referat konferencyjny:

Paweł Wawrzyniak, Marek Podyma, Maciej Jaskulski, Andrzej Polańczyk, Julia Rabaeva, Ireneusz Zbicinski: 3D Simulation of Dust Explosion in the Industrial Drying Tower: *Proceedings of the 5th Nordic Drying Symposium*, Helsinki, Finland, 19-21 June 2011

- 12. Andrzej Polańczyk, Paweł Wawrzyniak, Ireneusz Zbicinski:** CFD analysis of dust explosion relief system in the counter-current industrial spray drying tower: *Drying Technology* vol. 31, 8, 2013, pp 881-890, (NR ISSN 0012-7086, pkt. 30) (IF 2013 1,742)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na definiowaniu modelu CFD, ustaleniu wielkości i położenia upustów bezpieczeństwa, zaplanowaniu i realizacji programu obliczeniowego, brałem udział w analizie i interpretacji wyników. Zredagowałem opublikowany materiał. Mój udział procentowy szacuję na 45%.

Suma punktów 180, $\sum IF=11,516$

Główne osiągnięcia prezentowanego monotematycznego cyklu zostały w większości opublikowane w "*Drying Technology*" - najważniejszym czasopiśmie zajmującym się teoretycznymi i aplikacyjnymi zagadnieniami suszarnictwa. Spójność tematyki cyklu i opublikowanie kolejnych prac w stosunkowo krótkim czasie w jednym czasopiśmie pozwoliły dotrzeć do dużego grona zainteresowanych badaczy.

4.3. Omówienie tematyki badań będącej podstawą wniosku

Prezentowany cykl publikacji powstał w wyniku realizacji trzech projektów badawczych zleconych przez jednego z największych producentów chemii gospodarczej, firmę Henkel GmbH, Dusseldorf, Niemcy oraz firmę Tetra Pack, Drachten, Holandia. Dzięki współpracy z firmami Henkel i Tetra Pak uzyskano dostęp do przemysłowych instalacji suszenia rozpryskowego gdzie wykonano inwentaryzację procesu suszenia. W wyniku obszernej eksperymentalnej analizy pracy instalacji powstał unikalny zestaw danych ilustrujący proces przeciwpądowego suszenia rozpryskowego w skali przemysłowej. Uzyskany zbiór danych procesowych był później wykorzystywany do walidacji powstających modeli przepływu, wymiany ciepła i masy.

Pierwszy ze zrealizowanych projektów badawczych dotyczył modelowania dynamiki przepływu fazy ciągłej i wymiany ciepła. Następny dodatkowo obejmował zagadnienia modelowania procesu wymiany masy, kinetyki suszenia i aglomeracji cząstek suszonego produktu. Powstałe modele wykorzystano, między innymi, do analizy możliwości zwiększenia wydajności instalacji. Realizując trzeci projekt skoncentrowano się na zagadnieniach związanych z bezpieczeństwem procesu, przegrzewaniem gromadzących się na ścianach suszarki depozytów produktu, zagrożeniem eksplozją suszonego proszku oraz zabezpieczeniami redukującymi skutki ewentualnego wybuchu.

Zebrane dane eksperymentalne i zdobyte doświadczenie umożliwiły opracowanie coraz bardziej złożonych i dokładnych modeli procesu suszenia rozpryskowego. Zdobyta wiedza o procesie suszenia rozpryskowego i doświadczenie w tworzeniu modeli CFD procesu pozwoliły, sięgając po dane zebrane w czasie eksploatacji własnej instalacji pilotowej, na opracowanie pierwszego zweryfikowanego doświadczalnie modelu procesu suszenia obejmującego aglomerację suszonego produktu.

Metody doświadczalne opracowane dla projektów realizowanych dla firmy Henkel, zostały z powodzeniem zastosowane w innym projekcie badawczym zrealizowanym dla firmy Tetra Pack, Drachten, Holandia.

Wprowadzenie

Suszenie jest jednym z najbardziej energochłonnych procesów inżynierii chemicznej, stanowi ważną część bardzo wielu procesów technologicznych i ma znaczny udział w kosztach produkcji. Zależnie od typu i wielkości instalacji suszarniczej oraz jednostkowego kosztu wytworzenia produktu, wartość dobowej produkcji może sięgnąć setek tysięcy złotych. Większość instalacji suszarniczych pracuje blisko maksymalnej wydajności. Zwiększenie produktywności suszarki zwykle wymaga wprowadzenia zmian konstrukcyjnych w instalacji. W celu wprowadzenia koniecznych modyfikacji często niezbędne jest okresowe zatrzymanie produkcji, jednakże żaden producent nie może pozwolić sobie na utratę zysków, które nie zostaną zrekomensowane przez wzrost produkcji.

Suszenie rozpryskowe jest powszechnie stosowaną przemysłową metodą wytwarzania suchego produktu z roztworów, past, lub zawiesin. Surowiec zawierający znaczną ilość wilgoci, po rozpyleniu kontaktuje się gorącym gazem dostarczającym energię do

odparowania. Rozdrobnienie surowca za pomocą dysz lub dysku obrotowego zapewnia dużą powierzchnię wymiany ciepła i masy natomiast wysoka temperatura i duże względne prędkości suszonych kropel i gazu wpływają na intensywność procesu.

Wyróżniamy 2 podstawowe typy przemysłowych suszarek rozpyłowych; współ- i przeciwpądowe.

W suszeniu współpądowym kierunek przemieszczania się kropel i powietrza jest zbliżony, a najbardziej wilgotny surowiec kontaktuje się z gazem o najwyższej temperaturze. Proces współpądowy pozwala na suszenie składników wrażliwych termicznie, zwykle nie towarzyszy mu intensywna aglomeracja, rozkład czasów przebywania drobin produktu jest stosunkowo wąski, ale produkt finalny nie zawsze jest równomiernie wysuszony. Proces suszenia w suszarkach współpądowych charakteryzuje się niższymi objętościowymi wskaźnikami odparowania wilgoci niż proces przeciwpądowy. Mechanizmy transportu pędu, masy i ciepła w procesie współpądowym są stosunkowo dobrze zbadane, a liczne próby modelowania całego procesu znalazły potwierdzenie eksperymentalne Kieviet 1997¹, Harvie 2002², Langrish 2004³, Woo 2009⁴.

Proces suszenia rozpryskowego w aparatach przeciwpądowych jest bardzo wydajny energetycznie, pozwala na połączenie w jednym urządzeniu kilku procesów: suszenia, aglomeracji i segregacji produktu. Jednakże towarzysząca przeciwpądowemu procesowi suszenia rozpryskowego złożona dynamika przepływu powietrza i suszonego produktu sprawia, że wiedza o mechanizmach transportu ciepła, masy i momentu pędu, parametrach kontrolujących suszenie i wpływających na jakość produktu jest wciąż ograniczona. Brak sprawdzonego eksperymentalnie modelu procesu przeciwpądowego suszenia rozpryskowego utrudnia przewidywanie rezultatów, dokonanie zmian konstrukcyjnych instalacji i ekstrapolację skutków zmian warunków prowadzenia procesu.

Przeciwpądowy proces suszenia rozpryskowego jest stosowany w przemyśle do suszenia materiałów o znacznej odporności termicznej. Doświadczenie operatorskie zbierane przez lata obsługi takich urządzeń jest gromadzone w postaci reguł heurystycznych pozwalających kontrolować najważniejsze wskaźniki produkcyjne i przewidywać przez interpolację skutki zmian parametrów procesowych.

W praktyce przemysłowej największe znaczenie ma kontrola jakości produktu decydująca o zyskach przedsiębiorstwa, przewidywanie sprawności energetycznej suszenia, od której zależą koszty eksploatacyjne procesu oraz monitorowanie bezpieczeństwa produkcji rozumiane zarówno jako ochrona załogi, samej instalacji jak i produktu.

¹ Kieviet F.G., Van Raaij J., De Moor P.P.E.A., Kerkhof P.J.A.M.: Measurement and modelling of the air flow pattern in a pilot-scale spray dryer. Chemical Engineering Research and Design 1997, 75(3), 321-328.

² Harvie D.J.E., Langrish T.A.G., Fletcher D.F. A.: Computational Fluid Dynamics Study of A Tall-Form Spray Dryer. TRANS. IChemE 2002, 80(C), 163-175.

³ Langrish T.A.G., Williams J., Fletcher D.F.: Simulation of the effects of inlet swirl on gas flow patterns in a pilot-scale spray dryer. Chemical Engineering Research and Design 2004, 82, 821-833.

⁴ Woo, M.W., Daud W.R.W., Mujumdar A.S., Wu Z.H., Talib M.Z.M., Tasirin S.M.: Steady and transient flow simulations in short-form spray dryers. Chemical Product and Process Modelling 2009, 4(1).

Niniejszy autoreferat dotyczy badań procesu przeciwprądowego suszenia rozpryskowego prowadzących do zaproponowania metod umożliwiających ocenę skutków zmian technologii suszenia lub modyfikacji konstrukcji w pracujących instalacjach przemysłowych. Analiza działania instalacji suszarniczej i stworzenie zweryfikowanego modelu procesu suszenia umożliwia przewidywanie skutków planowanych zmian w konstrukcji instalacji i technologii suszenia. Przedstawione w autoreferacie prace badawcze prowadzące do stworzenia kompleksowego opisu procesu suszenia rozpryskowego i towarzyszące im badania eksperymentalne wykonane w warunkach przemysłowych zostały podzielone na etapy prowadzące do zbudowania narzędzi umożliwiających analizę procesu suszenia i jego sprawności energetycznej, kontrolę jakości produktu, oraz analizę rozwiązań zapewniających bezpieczeństwo załodze i instalacji.

Mój wkład w powstanie wymienionych powyżej publikacji jest dominujący. Oświadczenia współautorów odnośnie ich udziału w powstawaniu wspólnych publikacji zamieszczone zostały w Załączniku 5. Badania zaprezentowane w wymienionych pracach obejmuje następujące zagadnienia:

- Analiza eksperymentalna przeciwprądowej, przemysłowej suszarki rozpryskowej [2, 3]
- Modelowanie CFD i analiza przepływu powietrza suszącego w przeciwprądowej, przemysłowej suszarce rozpryskowej [1]
- Opracowanie jednofazowego modelu przeciwprądowego procesu suszenia rozpryskowego z odparowaniem wilgoci symulowanym za pomocą ujemnego źródła ciepła wewnętrznego opisanego funkcją doświadczalną [4]
- Opracowanie modelu kinetycznego procesu wymiany ciepła i masy w czasie procesu suszenia rozpryskowego w przeciwprądowej suszarce rozpryskowej [5, 6, 7]
- Opracowanie modelu suszenia rozpryskowego z aglomeracją cząstek suszonego produktu w aparacie przeciwprądowym [8].
- Analiza kontroli temperatury strefy zagrożonej przegrzewaniem w suszarce rozpryskowej za pomocą nawiewu chłodnego powietrza [9, 10]
- Bezpieczeństwo przemysłowej instalacji suszenia rozpryskowego. Analiza zagrożenia wybuchem [11, 12]

Osią omówionych w autoreferacie prac jest analiza zagadnień technologicznych, procesowych i konstrukcyjnych dotyczących procesu suszenia rozpryskowego i stosowanych do niego urządzeń pracujących w warunkach przemysłowych. Profesjonalne środowisko programowe służące do modelowania przepływu płynów CFD (*Computational Fluid Dynamics*) uzupełnione o własne procedury UDF (*User Defined Function*) wykorzystano do opisu zjawisk wymiany pędu, ciepła i masy oraz opracowania modeli procesu i jego analizy bez kosztownego zatrzymywania produkcji.

Celem każdego procesu suszenia jest usunięcie wilgoci z materiału przy możliwie niskim zużyciu energii i uzyskanie produktu o pożądanych cechach. Suszenie rozpryskowe w układzie przeciwprądowym jest powszechnie stosowaną techniką suszenia roztworów i zawiesin. Intensywny kontakt faz ciągłej i rozproszonej sprzyja wymianie ciepła i masy.

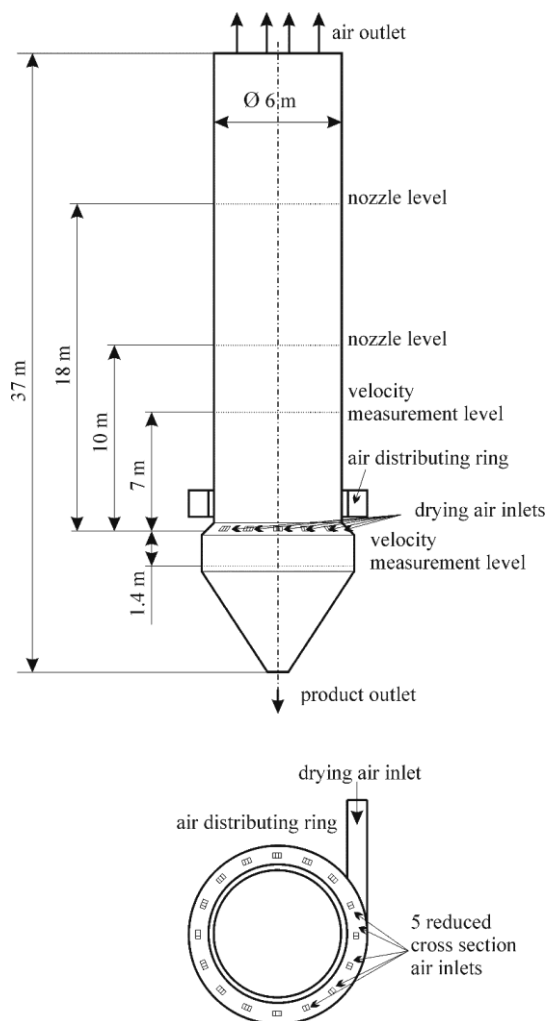
Jednocześnie złożony charakter przepływu faz sprawia, że brakuje pełnego opisu procesu uwzględniającego zarówno wymianę ciepła i masy, kinetykę suszenia, segregację aerodynamiczną i aglomerację cząstek suszonego materiału. Przedstawiony cykl prac stanowi propozycję opisu najważniejszych zjawisk zachodzących w czasie przeciwnieprądowego suszenia rozpryskowego.

Instalacje suszarnicze działające w przemyśle są wyposażone w układy kontroli procesu konieczne do skutecznego i powtarzalnego wytwarzania produktu. Zasięg parametrów rutynowo rejestrowanych w przemyśle zazwyczaj jest niewystarczający do stworzenia pełnego bilansu energetycznego i masowego. Pomiary temperatury powietrza suszącego czy prędkości przepływu w warunkach przemysłowych są trudne i często wymagają budowy specjalistycznych narzędzi.

Analiza eksperymentalna pracy przeciwnieprądowej, przemysłowej suszarki rozpryskowej

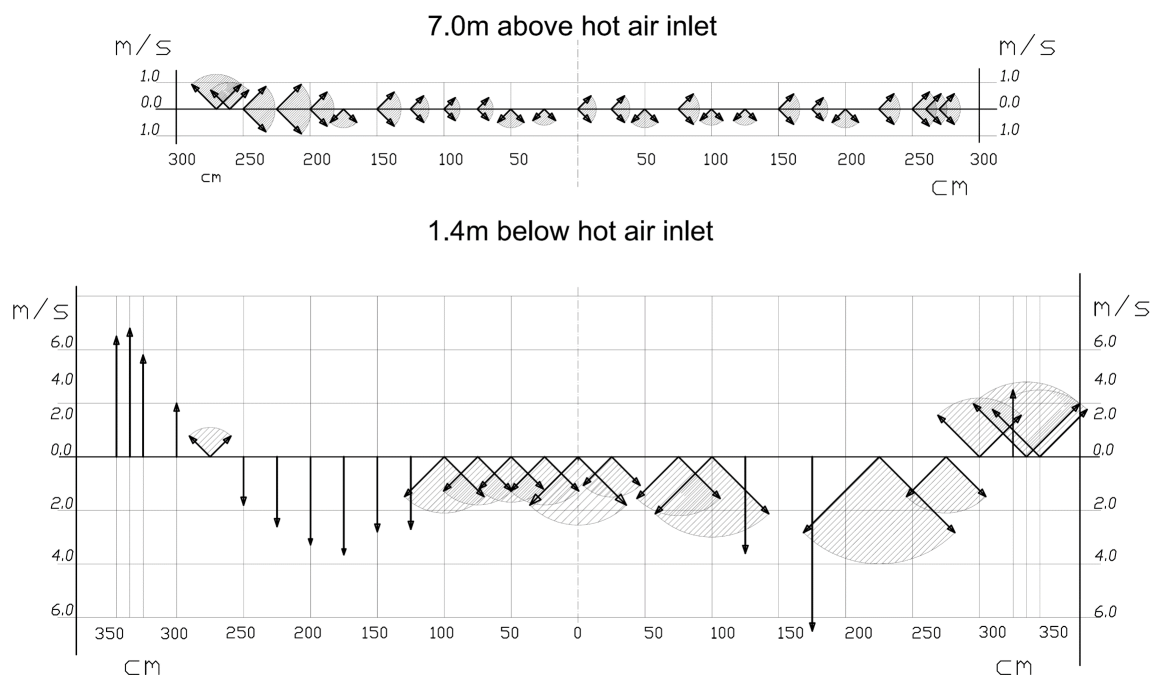
W publikacji [2] przedstawiono metodykę wykonywania pomiarów i zbierania danych o procesie w przeciwnieprądowej suszarce rozpryskową działającą w oddziale firmy Henkel w Raciborzu. Na Rys. 1 zamieszczono ogólny schemat suszarki rozpryskowej wraz podstawowymi wymiarami. Znaczna średnica i wysokość suszarki oraz duża ilość suszonego materiału w powietrzu utrudniały wykonanie pomiarów podstawowych parametrów procesowych za pomocą typowych przyrządów. Z uwagi na obecność w powietrzu dużej ilości cząstek suszonego produktu o różnej wilgotności, pomiar temperatury powietrza wymagał uprzedniego odseparowania wilgotnego materiału. Dynamika zmian przepływu powietrza w suszarce wymagała pomiaru zarówno prędkości jak i kierunku i zwrotu ruchu strumienia powietrza. Zbudowano dedykowane urządzenia pomiarowe dostosowane do zbierania danych w czasie pracy instalacji suszarniczej.

Prędkość i kierunek przepływu powietrza mierzono za pomocą termoanemometru zaopatrzonego w aerodynamiczny wskaźnik kierunku przepływu powietrza. Pomiary prędkości i kierunku przepływu powietrza wykonano na siedmiu poziomach zaznaczonych na Rys 1. Wyniki pomiarów dla dwóch najniższych



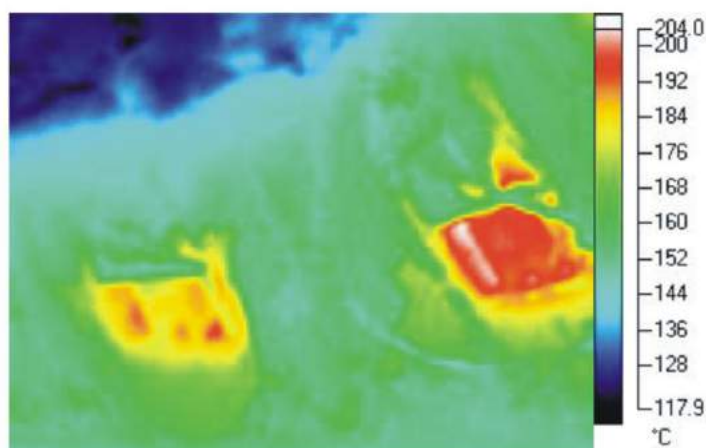
kys.1 Schemat suszarki rozpryskowej z zaznaczonymi poziomami pomiarów temperatury i prędkości powietrza (Fig1 w pracach [1] i [2])

poziomów przedstawiono na Rys. 2.



Rys.2 Prędkość powietrza i przybliżone kierunki przepływu zmierzone na najniższych poziomach suszarki (Fig2 w [1])

Temperaturę powietrza w obecności dużej ilości wilgotnego pyłu mierzono za pomocą mikroseparatora - układu pomiarowego własnej konstrukcji. Schemat układu pomiarowego przedstawiono również w pracy [4] na Fig 2. Koncepcja bezwładnościowej separacji cząstek zawieszonych w powietrzu w celu pomiaru temperatury samego powietrza nie jest nowa, jednak budowa urządzenia o długości 4 metrów, działającego w warunkach przemysłowych wymagała rozwiązania problemu osadzania wilgotnego materiału zarówno wewnątrz sondy jak i na zewnętrznej jej obudowie. Długość sondy przy znacznych prędkościach powietrza w suszarce wymagała zastosowania układu pozycjonowania sondy. Po opublikowaniu w pracach [1, 2, 4] opisu mikroseparatora i wyników pomiarów otrzymano zlecenie z firmy Tetra Pak poszukującej sprawdzonego rozwiązania do pomiaru temperatury w suszarkach rozpryskowych. W wyniku realizacji programu pomiarów powstała pełna mapa pola temperatury w suszarce rozpryskowej pracującej w ośrodku badawczym firmy Tetra Pak w Drachten, Holandia. Ze względu na poufność zastrzeżoną przez

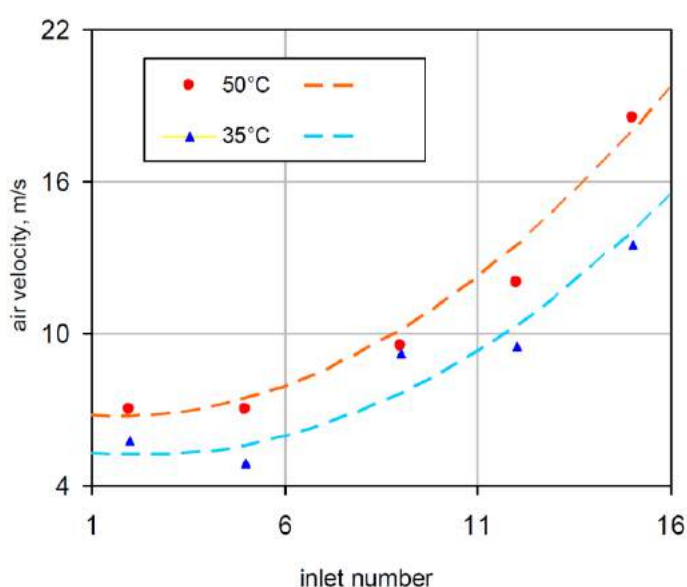


Rys.3 Przykład rozkładu temperatur na wewnętrznej ścianie suszarki (Fig7 w [2])

Tetra Pak wyniki pracy nie zostały opublikowane [3].

Dla jakościowej oceny rozkładu temperatury na wewnętrznej ścianie suszarki stosowano kamerę termowizyjną. Ze względu na dużą ilość wilgotnego pyłu w powietrzu zdjęcia wykonywano natychmiast po zatrzymaniu rozpylania suszonej zawiesiny. Przykład rozkładu temperatur na wewnętrznej ścianie suszarki zaprezentowano na Rys. 3. Uzyskane dane wykorzystano później do weryfikacji obliczeń modelowych rozkładów temperatury ścian w publikacjach [8, 9].

Wykonano również analizę układu zasilającego suszarkę w gorące powietrze. Powietrze suszące wprowadzane było do suszarki przez 16 otworów wlotowych (Rys.1). Stwierdzono znaczne zróżnicowanie masowych strumieni powietrza przepływających przez te otwory.



Rys.4 Rozkład prędkości powietrza w poszczególnych wlotach powietrza (Fig4 w [2])

Opracowano sposób pomiaru natężenia przepływu powietrza wprowadzanego do suszarki przez wybrane otwory wlotowe. Zbadany rozkład prędkości przedstawiono na Rys. 4.

Wykonane badania eksperymentalne pozwoliły na sporządzenie pełnych bilansów energii i masy suszarki oraz obliczenie jej sprawności energetycznej. Uzyskano obszerny i unikalny zbiór danych dotyczących procesu suszenia rozpryskowego w instalacji przemysłowej działającej przy pełnej wydajności.

Byłem autorem planu badań eksperymentalnych i współautorem projektu mikroseparatora. Brałem czynny udział we wszystkich pomiarach parametrów pracy instalacji suszenia rozpryskowego. Samodzielnie opracowałem wyniki naszych pomiarów oraz analizowałem dane rutynowo rejestrowane w zakładzie.

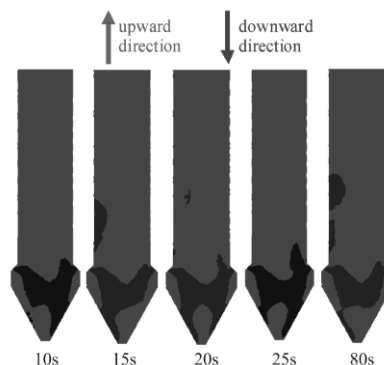
Model CFD przepływu powietrza suszącego w przeciwpądowej suszarce rozpryskowej

W publikacji [1] przedstawiono model CFD przepływu powietrza suszącego w przemysłowej suszarce rozpryskowej. Opracowanie trójwymiarowego modelu przepływu powietrza w tak dużym aparacie stanowiło wyzwanie zarówno teoretyczne jak i obliczeniowe.

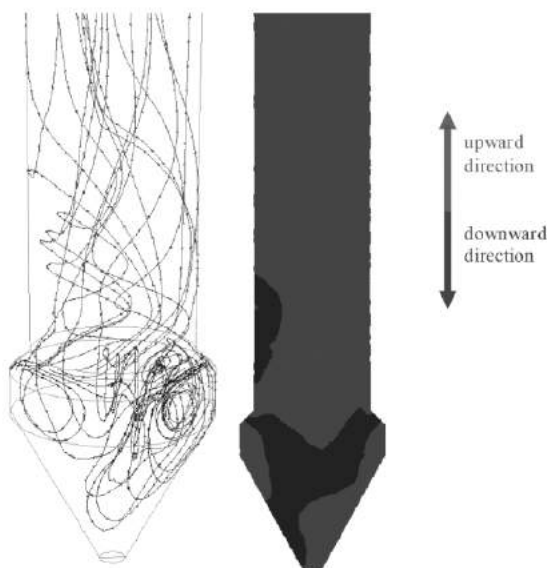
W obliczeniach modelowych odwzorowano najważniejsze szczegóły konstrukcyjne suszarki. Ze względu na zastosowanie różniących się wielkością 16 wlotów gorącego powietrza do suszarki i w konsekwencji brak symetrii osiowej przepływu powietrza w aparacie konieczne było zastosowanie obliczeń trójwymiarowych.

Uwzględniono zróżnicowaną wielkość otworów wlotowych powietrza suszącego jak i możliwość przedostania się do wnętrza aparatu powietrza

zimnego z otoczenia (we wnętrzu aparatu panowało obniżone ciśnienie). Obliczenia wykazały znaczne niestabilności przepływu powietrza w suszarce Rys. 5. Stwierdzono występowanie gwałtownych zmian kierunku przepływu powietrza, zarówno wzdłuż osi aparatu jak i w kierunku promieniowym i obwodowym. Wyróżniono obszary powstawania lokalnych wirów, które mogą być odpowiedzialne za odkładanie się suszonego materiału na ścianach suszarki Rys. 6.



Rys.5 Kontury osiowej składowej prędkości w suszarce w kolejnych krokach czasowych (Fig7 w [1])

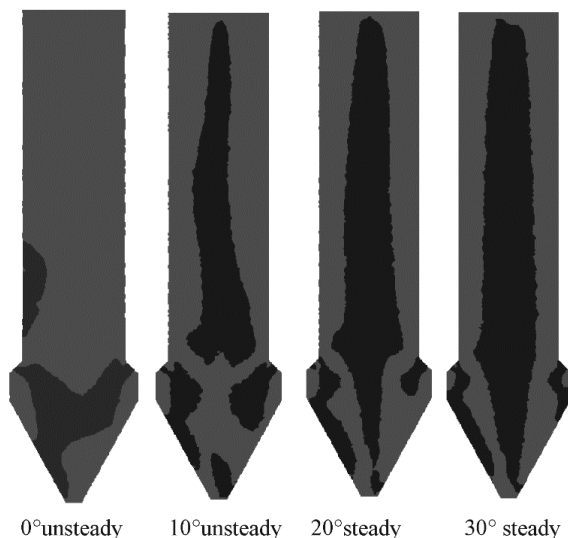


Rys.6 Kontury osiowej składowej prędkości w suszarce oraz linie prądu powietrza (Fig8 w [1])

Model CFD przepływu powietrza przedstawiony w pracy [1], po weryfikacji z wykorzystaniem danych eksperymentalnych [2] zastosowano do przetestowania koncepcji stabilizacji hydrodynamiki przepływu przez wprowadzenie składowej stycznej prędkości wlotowej powietrza. Przeprowadzono obliczenia dla trzech różnych wartości kąta odchylenia strumienia powietrza doprowadzanego do suszarki od kierunku prostopadłego do ściany aparatu (10° , 20° , 30°). Zaobserwowano zmianę charakteru przepływu powietrza wywołaną wprowadzeniem składowej stycznej prędkości strumienia powietrza.

Wzrost kąta między kierunkiem strumienia, a prostopadłą do ściany powodował powstawanie wiru, który osiągał pełną stabilizację dla kąta 30° , Rys. 7. O ile dla kąta 0° i 10° konieczne było wykonywanie obliczeń w stanie nieustalonym, to dla nachylenia 20° i 30° możliwe już

były obliczenia w stanie ustalonym ze znakomitym współczynnikiem zbieżności. Zaobserwowano również istotny wzrost prędkości powietrza w pobliżu ściany suszarki co może zmniejszyć tendencję do odkładania się produktu na ścianach suszarki, Fig. 14 w pracy [1].



Rys.7 Kontury osiowej składowej prędkości dla różnych kątów wlotu powietrzem do suszarki, czarny kierunek na dół, szary do góry (Fig13 w [1]).

W omawianej pracy byłem współautorem koncepcji modelu CFD, brałem aktywny udział w opracowaniu modelu przepływu fazy ciągłej, projektowaniu obliczeń i analizie ich wyników. Weryfikowałem zgodność uzyskanych wyników z wartościami doświadczalnymi.

Model przepływu powietrza w suszarce umożliwił analizę dynamiki przepływu fazy ciągłej. W celu analizy rozkładu temperatur w suszarce konieczne było uwzględnienie transportu ciepła i wymiany masy pomiędzy fazami

ciągłą i rozproszoną. Zaproponowałem wykorzystanie uzyskanych wcześniej danych eksperymentalnych [2] do zbudowania jednofazowego modelu procesu suszenia rozpryskowego, w którym odparowanie wilgoci z fazy rozproszonej będzie obliczane przy wykorzystaniu objętościowego ujemnego źródła ciepła.

Model wymiany ciepła w przeciwnieprądowej suszarce rozpryskowej z ujemnym źródłem wewnętrznego ciepła zastosowanym do symulacji odparowania wilgoci

Niezwykle złożona dynamika przepływu powietrza, duża ilość suszonego materiału, intensywna aglomeracja suszonego produktu i bardzo zróżnicowane trajektorie suszonych cząstek w suszarce utrudniają budowę dokładnego modelu przeciwnieprądowego procesu suszenia rozpryskowego. W rezultacie istnieje niewiele doniesień prezentujących próby modelowania takiego procesu. Publikacja [4] przedstawia uproszczony model procesu przeciwnieprądowego suszenia rozpryskowego w suszarce przemysłowej.

Głównym celem budowy modelu był precyzyjny opis charakteru przepływu powietrza i wymiany ciepła między powietrzem suszącym a ścianami suszarki. Zjawiska towarzyszące aglomeracji produktu, ze względu na brak w literaturze zweryfikowanych doświadczalnie modeli, zostały odwzorowane własną funkcją przejścia od rozkładu średnic kropeł powstających w dyszy do rozkładu cząstek gotowego produktu.

W prezentowanej pracy suszeniu poddawano materiał, w którym składniki suszonej mieszaniny wchodziły ze sobą w nieodwracalną reakcję co utrudniało laboratoryjne badanie kinetyki suszenia. Aby uniknąć teoretycznej aproksymacji kinetyki suszenia i stosowania trudnych do weryfikacji modeli aglomeracji produktu zaproponowałem zbudowanie modelu pół empirycznego. Człon równania zachowania energii reprezentujący wewnętrzne źródło ciepła $S_v/(c_p \cdot \rho)$ został wykorzystany do odwzorowania energii niezbędnej do odparowania wilgoci.

$$\frac{D_v T}{Dt} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \nabla^2 T + \frac{1}{c_p \rho} S_v$$

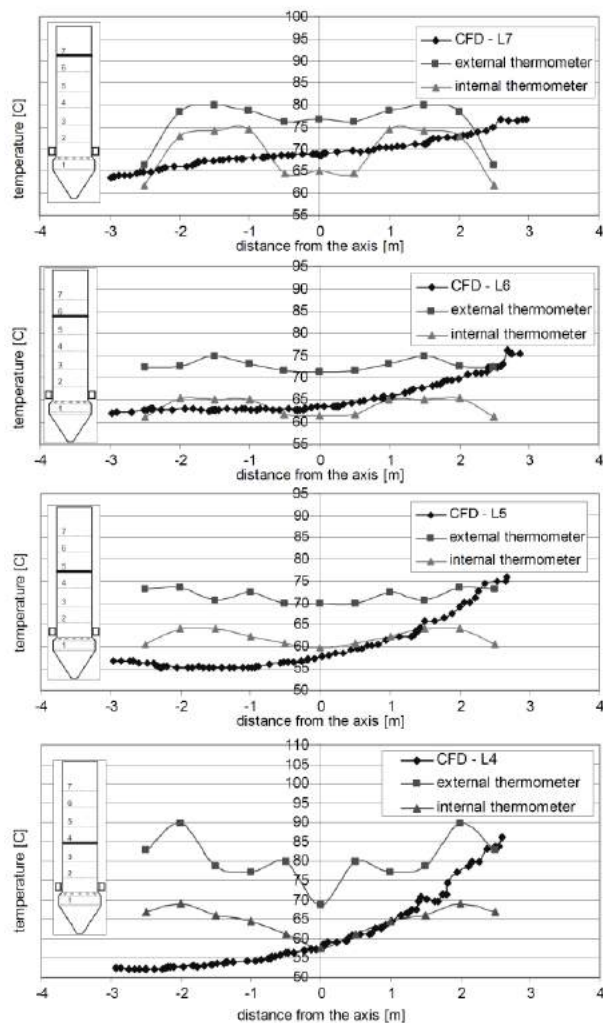
gdzie:

λ przewodnictwo cieplne

c_p ciepło właściwe

ρ gęstość

S_v objętościowy współczynnik
wewnętrznego źródła ciepła

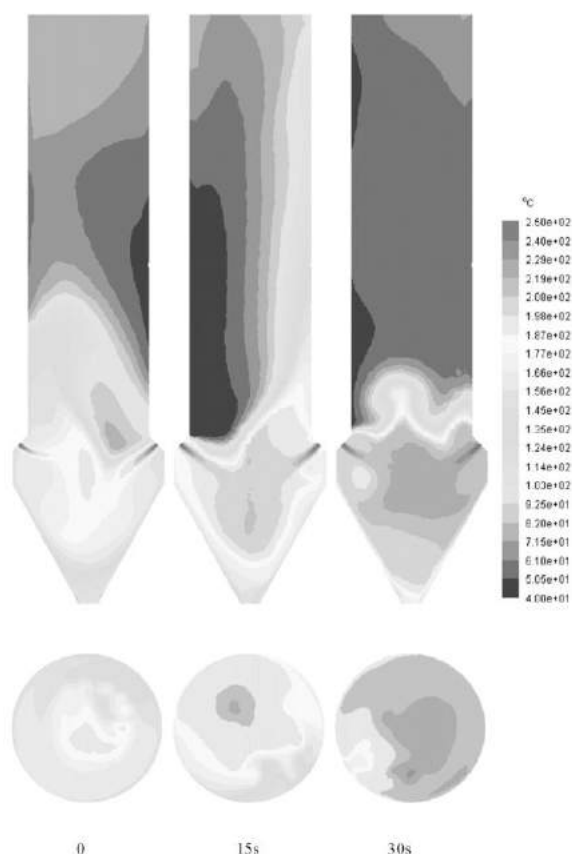


Rys.8 Promieniowe profile temperatury powietrza w suszarce na dolnych poziomach (Fig7A w [4])

Całkowita ilość energii wykorzystana w procesie suszenia oraz wielkość strat ciepła do otoczenia zostały wyznaczone na podstawie inwentaryzacji procesu przedstawionej w pracy [2]. Średnia wartość objętościowego współczynnika ujemnego źródła ciepła rozumiana jako wartość całkowitego zużycia energii odniesiona do objętości suszarki była równa $-3,8 \times 10^3 \text{ W/m}^3$. Analiza konstrukcji aparatu oraz doświadczalnie zmierzony rozkład temperatury powietrza wzdłuż osi i promienia suszarki w trakcie jej eksploatacji pozwoliły na wyznaczenia objętościowej mapy energii zużytej na odparowanie wilgoci. Na podstawie analizy procesu założono postać funkcji wiążącej objętościowy współczynnik ujemnego źródła ciepła i położenie wzdłuż osi suszarki. Tak otrzymany profil zużycia energii zastosowano w modelu CFD procesu suszenia rozpryskowego. W celu uzyskania zadawalającej zbieżności doświadczalnego i obliczonego rozkładu temperatur wykonano obliczenia dopasowując iteracyjnie parametry funkcji rozkładu objętościowego współczynnika zużycia energii (zgodność uzyskano w 24-tej iteracji).

Po wykonaniu obliczeń modelowych stwierdzono, że w żadnym przekroju poprzecznym suszarki nie występuje jednorodny profil temperatury powietrza co było

skutkiem niestabilnego przepływu powietrza Rys. 8. Obszary gorącego jak i chłodniejszego powietrza można znaleźć powyżej wlotów gorącego powietrza, co oznacza, że ściany suszarki miały kontakt z powietrzem o zmiennej temperaturze. Obliczenia CFD potwierdziły dużą zmienność prędkości i kierunku przepływu powietrza zaobserwowaną w czasie pomiarów wykonanych podczas pracy instalacji. Dynamika tych zmian wynikała z konstrukcji suszarki i budowy układu dostarczającego gorące powietrze Rys. 9.



Rys.9 Kontury temperatury powietrza na pionowych i poziomych przekrojach w kolejnych krokach czasowych (Fig10 w [4])

Powstały model CFD wymiany ciepła w przeciwnąprądowej suszarce rozpryskowej dobrze odwzorował rzeczywisty proces. Należy zauważyć, że zaproponowany model opisuje proces suszenia rozpryskowego badanego materiału jedynie w analizowanej instalacji, ale zaproponowana metodologia jest uniwersalna i może być zastosowana do innego procesu suszenia pod warunkiem posiadania wiarygodnych informacji o rozkładzie temperatury w suszarce w trakcie jej pracy.

Doświadczenie zdobyte w trakcie budowy modelu przedstawionego w pracy [4] i zebrane dane procesowe z przeciwnąprądowego suszenia rozpryskowego pozwoliły opracować predykcyjny model suszenia rozpryskowego. Zaproponowano metodykę modelowania CFD procesu przeciwnąprądowego suszenia rozpryskowego w przypadku braku doświadczalnych danych, które mogłyby

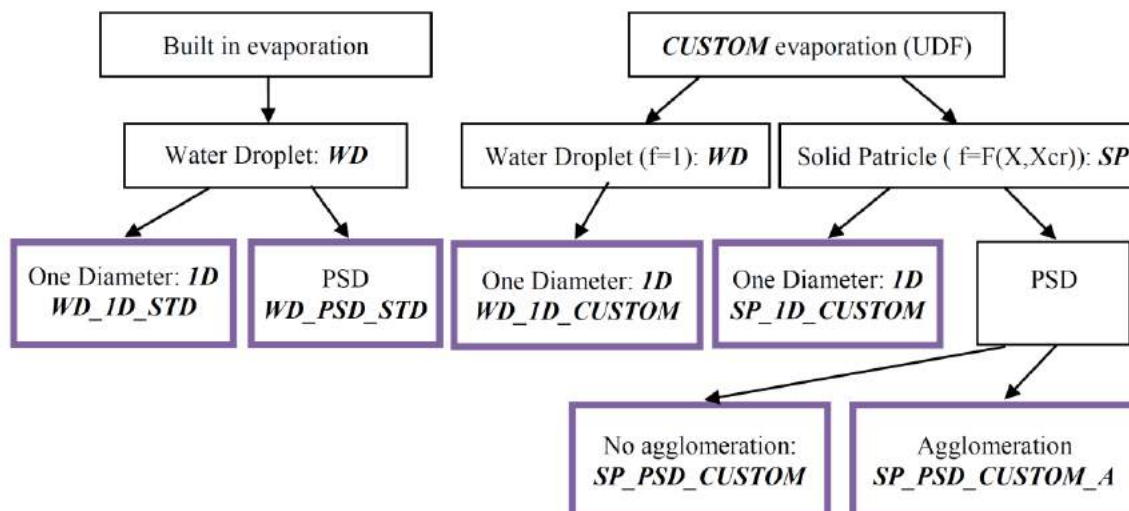
posłużyć do jego weryfikacji.

Predykcyjny model procesu suszenia w przeciwnąprądowej suszarce rozpryskowej

W publikacji [5] przedstawiono wieloetapową metodykę postępowania pozwalającą zbudować dokładny model CFD procesu suszenia rozpryskowego, dla którego dostępne są jedynie podstawowe dane eksploatacyjne. Zaproponowana procedura postępowania jest oparta o budowanie kolejnych modeli CFD procesu suszenia rozpryskowego o stopniowo rosnącej złożoności. Najprostszy opis suszenia monodispersyjnych kropeł wody oparty na równaniu Ranza Marshalla, weryfikowanym opisywanymi w literaturze zastosowaniami posłużył jako przypadek referencyjny. W kolejnych modelach wprowadzono: rozkład średnic

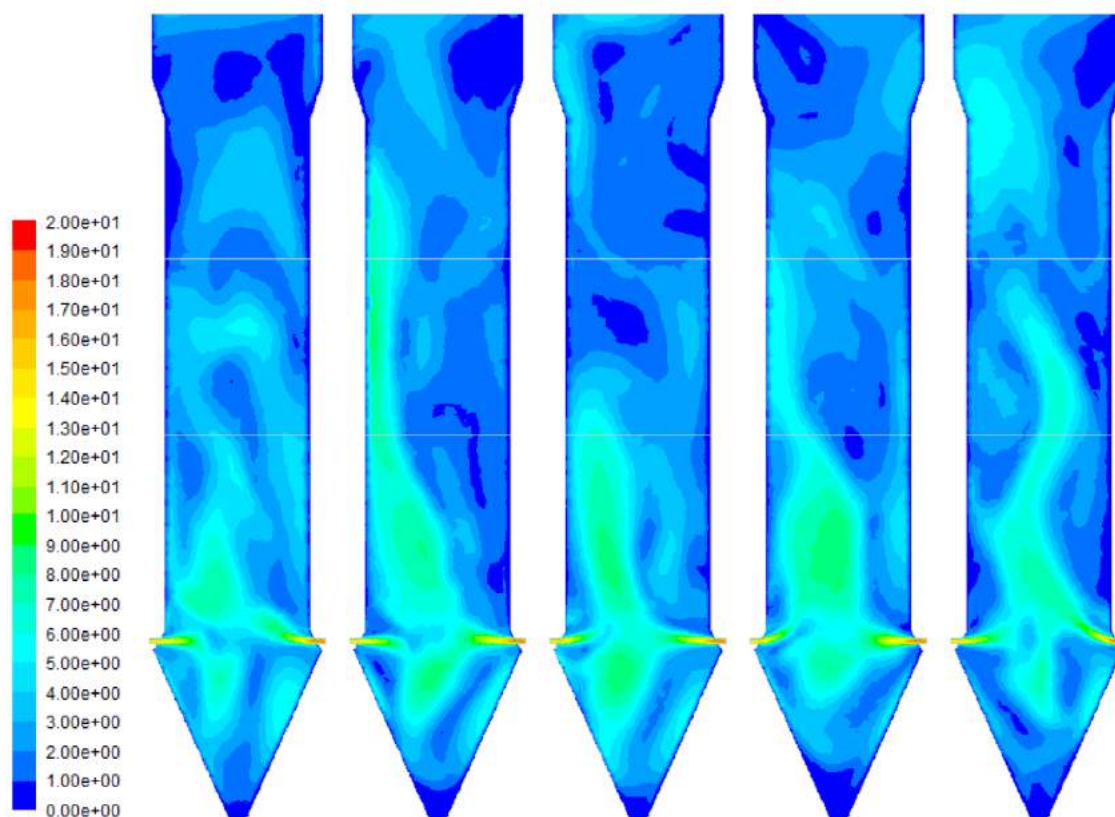
kropel, następnie własny opis mechanizmu suszenia i każdorazowo porównywano wyniki z uzyskanymi z poprzednich modeli Rys. 10. Każdy etap budowy modelu kończył się analizą

dokładności obliczeń i testem zgodności wyników z ogólnymi bilansami masy i energii. W każdym kolejnym modelu uśredniona w czasie temperatura powietrza opuszczającego



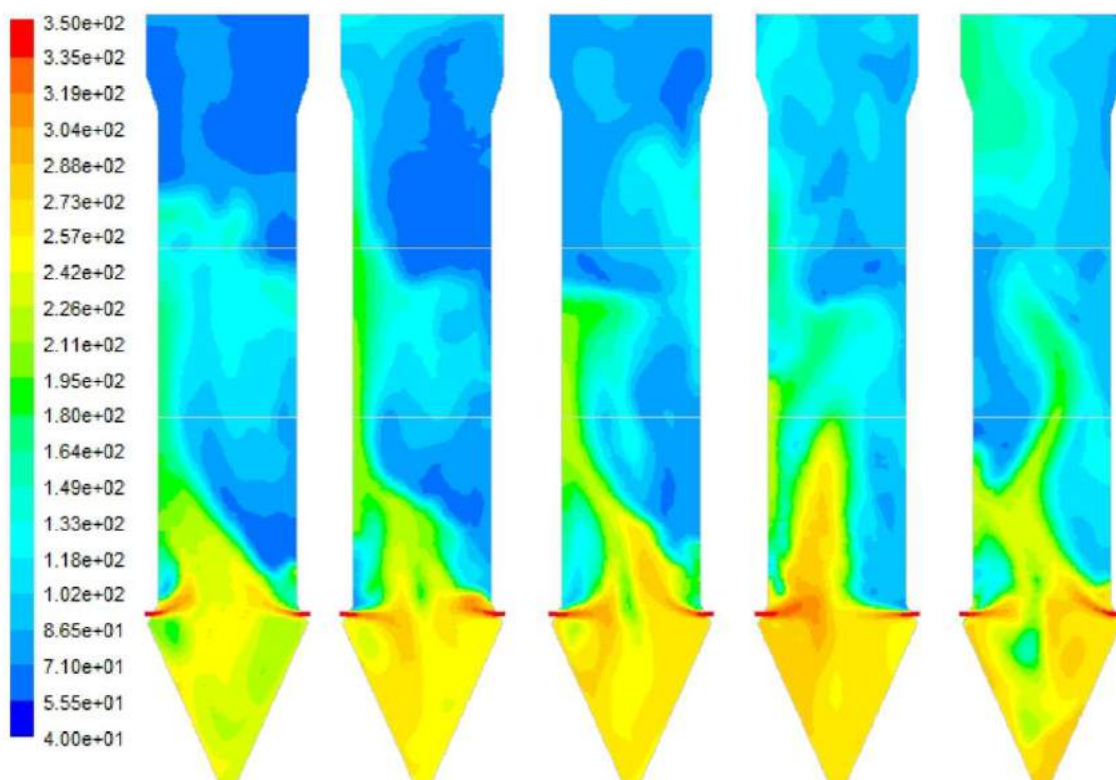
Rys.10. Zestawienie modeli prowadzących do otrzymania wiarygodnego modelu suszenia rozpryskowego. (Fig5 w [5]).

suszarkę była porównywana z wartościami zmierzonymi w czasie pracy instalacji przemysłowej.



Rys.11. Kontury prędkości powietrza w kolejnych krokach czasowych (co 2 sek.) (Fig7 w [5])

Obliczenia wykonane z wykorzystaniem modeli o rosnącej złożoności opisu ilustrują znaczące zmiany charakteru przepływu w aparacie suszarniczym. Stabilny przepływ powietrza w warunkach izotermicznych po wprowadzeniu odparowania stawał się niestabilny z tendencją do gwałtownych oscylacji kierunku i prędkości powietrza. Obserwowano, że wraz ze złożonością opisu suszenia kropeł rosła niestabilność przepływu (Rys. 11) i dynamiczne zmiany pola temperatury (Rys. 12). Ostatni model CFD pozwolił na pełny opis procesu suszenia rozpryskowego zawiesiny detergentu łącznie z odwzorowaniem przepływu fazy ciągłej i rozproszonej, wymianą ciepła, masy i pędu pomiędzy fazami oraz uproszczonym



Rys.12. Kontury temperatury powietrza w kolejnych krokach czasowych (co 2 sek.) (Fig9 w [5])

modelem aglomeracji cząstek.

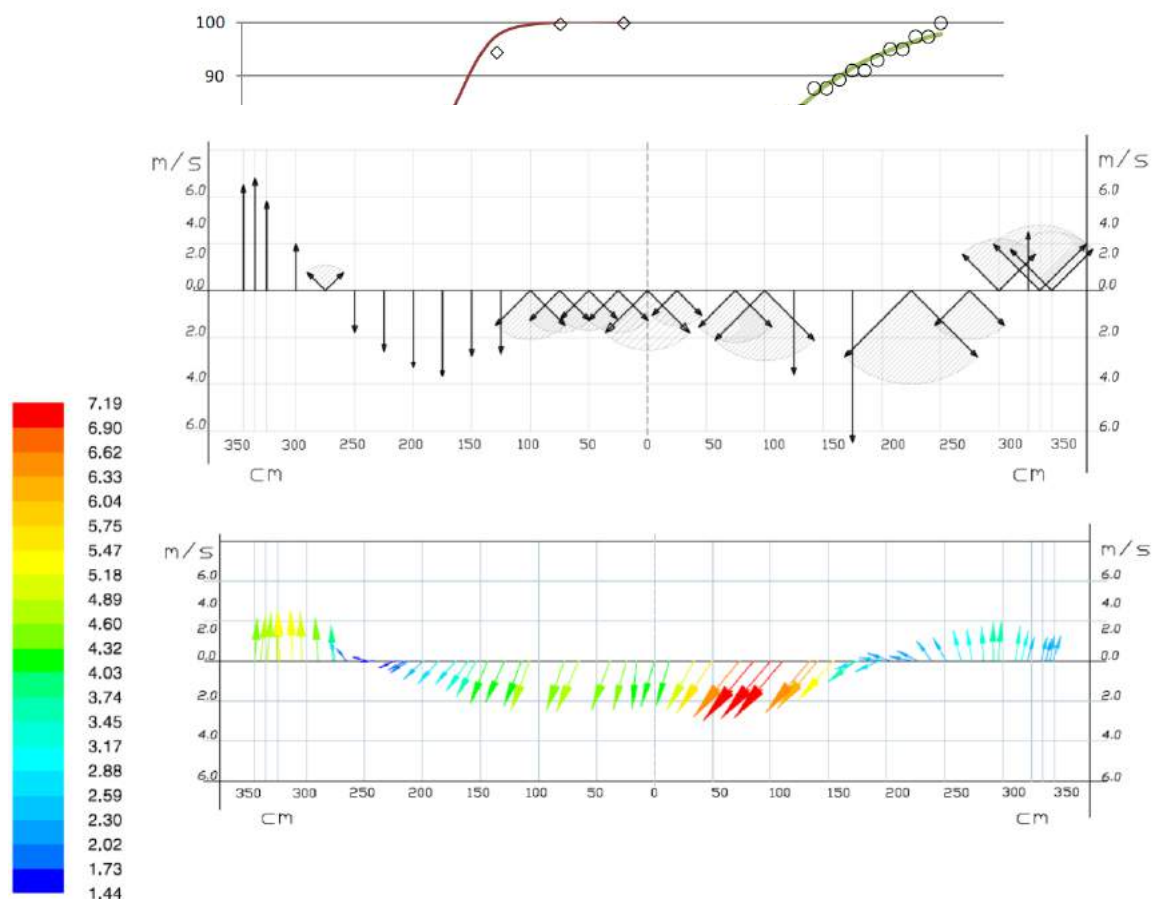
W oparciu o dane eksploatacyjne z procesu przemysłowego, wszechstronnie zweryfikowane modele odparowania kropeł cieczy zaimplementowane w pakiet obliczeniowy CFD oraz własne procedury suszenia kropeł zawiesiny sprawdzone w trakcie pracy przedstawionej w artykułach [1, 4], zaproponowano metodykę postępowania pozwalającą stworzyć dokładny model przemysłowego procesu suszenia rozpryskowego.

W podsumowaniu można stwierdzić, że jeśli model procesu suszenia rozpryskowego przedstawiony w pracy [4] można stosować jedynie do zbadanej doświadczalnie instalacji to przedstawione w pracy [5] podejście pozwala dokonać ekstrapolacji zweryfikowanego modelu procesu na nową instalację, dla której znane są jedynie podstawowe dane eksploatacyjne. W kolejnej pracy [6] przedstawiono model wykorzystujący eksperymentalnie

określoną kinetykę suszenia materiału oraz uproszczony model aglomeracji suszonych kropeł/cząstek.

Model kinetyczny procesu wymiany ciepła i masy w procesie suszenia w przeciwprądowej suszarce rozpryskowej

Większość opublikowanych prób modelowania przeciwprądowego suszenia rozpryskowego prawidłowo przewiduje zachowanie fazy ciągłej (pola prędkości, temperatury), natomiast trudności sprawia przewidywanie zachowania fazy rozproszonej czyli suszonego materiału. Najważniejszą przyczyną tych trudności są uproszczenia stosowane przy budowie modeli; np. rzeczywisty początkowy rozkład cząstek, masowe natężenia przepływu fazy rozproszonej w suszarce czy rzeczywista kinetyka odparowania są w modelach pomijane bądź nadmiernie upraszczane. We wcześniej omówionej publikacji [4] przedstawiono model procesu suszenia z ujemnym źródłem ciepła wykorzystujący dane eksperymentalne do przewidywania suszenia fazy rozproszonej. W artykułach [6, 7] zaproponowano model przeciwprądowego suszenia rozpryskowego, w którym do opisu kinetyki odparowania wilgoci z suszonego materiału wykorzystano koncepcję charakterystycznej krzywej suszenia. Współczynniki wymiany ciepła i masy oszacowano na podstawie równań korelacyjnych.



Rys.15. Zmierzone (powyżej) i obliczone (poniżej) rozkłady prędkości powietrza w suszarce rozpryskowej (m/s) (Fig7 w [6]).

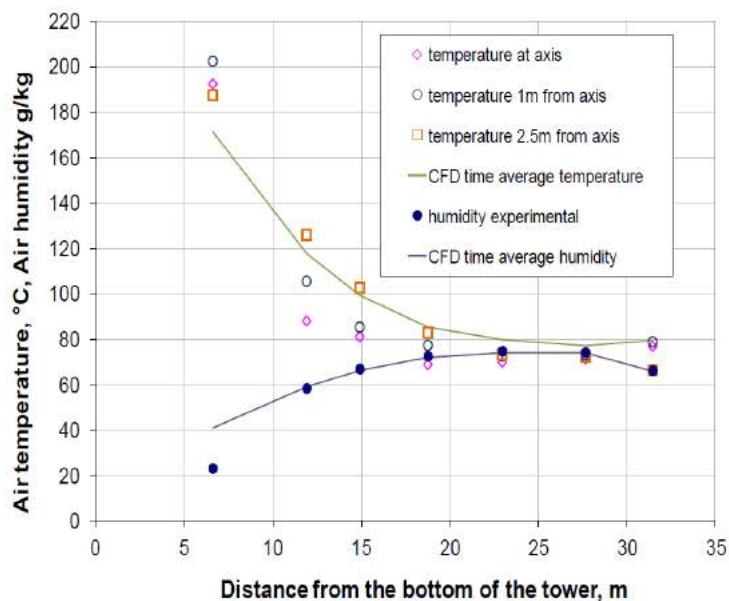
W publikacjach [6 i 7] uwzględniono w obliczeniach aglomerację cząstek. produktu. Ponieważ brak jest teorii opisującej proces aglomeracji w tak złożonym układzie, model procesów zachodzących w fazie rozproszonej oparto na analizie rozkładu średnic kropeł PSD (*Particle Size Distribution*) rozpylanej zawiesiny i średnic cząstek wysuszonego produktu. Do opisu wzrostu średnicy suszonych cząstek zaproponowano, dobraną arbitralnie, ale o eksperymentalnie wyznaczonych parametrach, funkcję przejścia przekształcającą PSD rozpylanej zawiesiny w PSD końcowego produktu. Krzywą kumulacyjną dla początkowego i końcowego rozkładu średnic cząstek produktu przedstawiono na Rys.13.

Zgromadzone dane eksperymentalne pozyskane podczas przemysłowego, przeciuprądowego procesu suszenia w aparacie rozpryskowym pozwoliły na weryfikację poprawności przewidywań modelu. Obliczone i eksperymentalne profile temperatury przedstawiono na Fig. 3 (praca [6]). Niestabilność pola temperatur w suszarce ilustruje Fig. 4 w pracy [6] gdzie przedstawiono kontury temperatury z krokiem 10 sekund. Mimo dużej dynamiki zmian procesu zarówno uśrednione wartości temperatury jak i wilgotności powietrza w osi suszarki są bliskie wartościom doświadczalnym Rys. 14.

Chwilowe wartości wektorów prędkości wzdłuż średnicy suszarki obliczone w modelu CFD zestawiono z wcześniej uzyskanymi pomiarami prędkości przepływu powietrza Rys.15. Porównanie obu rozkładów wskazuje na podobieństwo tak wartości bezwzględnych prędkości

jak i kierunków przepływu. Uwzględniając wysoką niestabilność przepływu powietrza w suszarce, zgodność zarówno wartości prędkości obu rozkładów jak i kierunków przepływu jest bardzo dobra, co potwierdza jakość zbudowanego modelu CFD.

Porównanie wyników obliczeń modelowych z pomiarami wykonanymi w warunkach przemysłowych wskazuje, że zaproponowany model pozwala na dokładne trójwymiarowe obliczenia CFD procesu suszenia rozpryskowego.



Rys.14. Doświadczalne i obliczone z modelu CFD profile temperatury i wilgotności powietrza wzdłuż osi suszarki (Fig5 w [6])

Zastosowany w modelu prosty opis zmian średnic suszonych cząstek za pomocą funkcji przejścia pomiędzy rozkładem średnic kropeł rozpylanych przez dyszę, a rozkładem średnic wysuszonego produktu umożliwia uzyskanie poprawnego opisu procesu suszenia rozpryskowego, choć pomija całą złożoność zjawisk towarzyszących aglomeracji. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że zaproponowany model CFD procesu suszenia rozpryskowego dobrze przewiduje zachowanie zarówno fazy ciągłej jak i rozproszonej.

Suszeniu rozpryskowemu zawsze towarzyszy aglomeracja kropeł/cząstek materiału wilgotnego. Zjawisko to szczególnie wyraźnie występuje w procesie przeciwprądowym. Dynamiczne zmiany kierunku przepływu powietrza prowadzą do segregacji cząstek, cięższe opadają, lżejsze unoszone strumieniem powietrza mogą się znaleźć ponownie w strefie atomizacji. Prowadzi to do aglomeracji cząstek suszonego materiału i zmiany rozkładu ich średnic co z kolei wpływa na proces suszenia. W kolejnej pracy [8] zaproponowano własny model zjawiska aglomeracji w suszeniu rozpryskowym.

Budowa modelu suszenia rozpryskowego w aparacie przeciuprądowym z modelem aglomeracji suszonego produktu

W artykule [8] przedstawiono opis procesu suszenia rozpryskowego z wbudowanym modelem aglomeracji cząstek suszonego produktu. Model aglomeracji suszonych cząstek powstał w ramach pracy doktorskiej, którą konsultowałem (Maciej Jaskulski 2016⁵). Koncepcję modelu aglomeracji oparto na rozwiązaniach stosowanych w kinetycznej teorii gazów. Rozpylaną chmurę cząstek suszonej zawiesiny podzielono na 1375 monodyspersyjnych indywidualnie śledzonych strumieni. Dla pojedynczej cząstki w strumieniu prawdopodobieństwo kolizji z innymi cząstkami obliczano na podstawie równania:

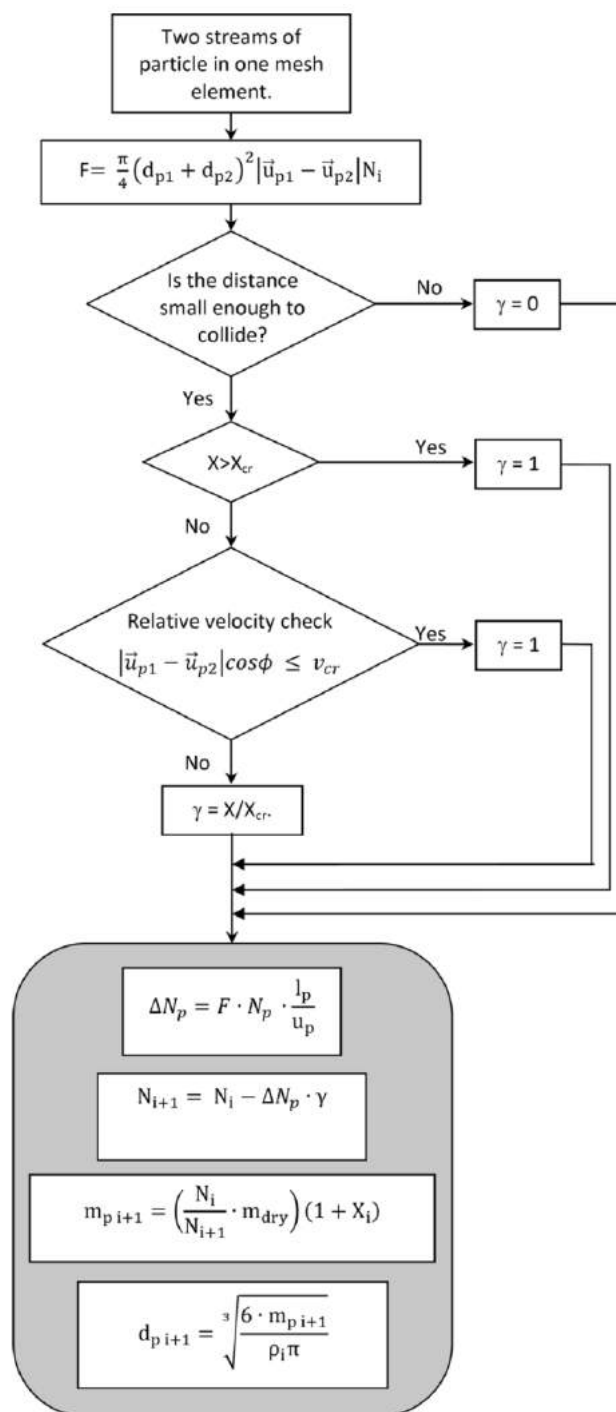
$$F = \frac{\pi}{4} (d_{p1} + d_{p2})^2 |\vec{u}_{p1} - \vec{u}_{p2}| N_p$$

gdzie:

d_{p1}, d_{p2} średnice rozważanych cząstek,

$\vec{u}_{p1}, \vec{u}_{p2}$ prędkości rozważanych cząstek

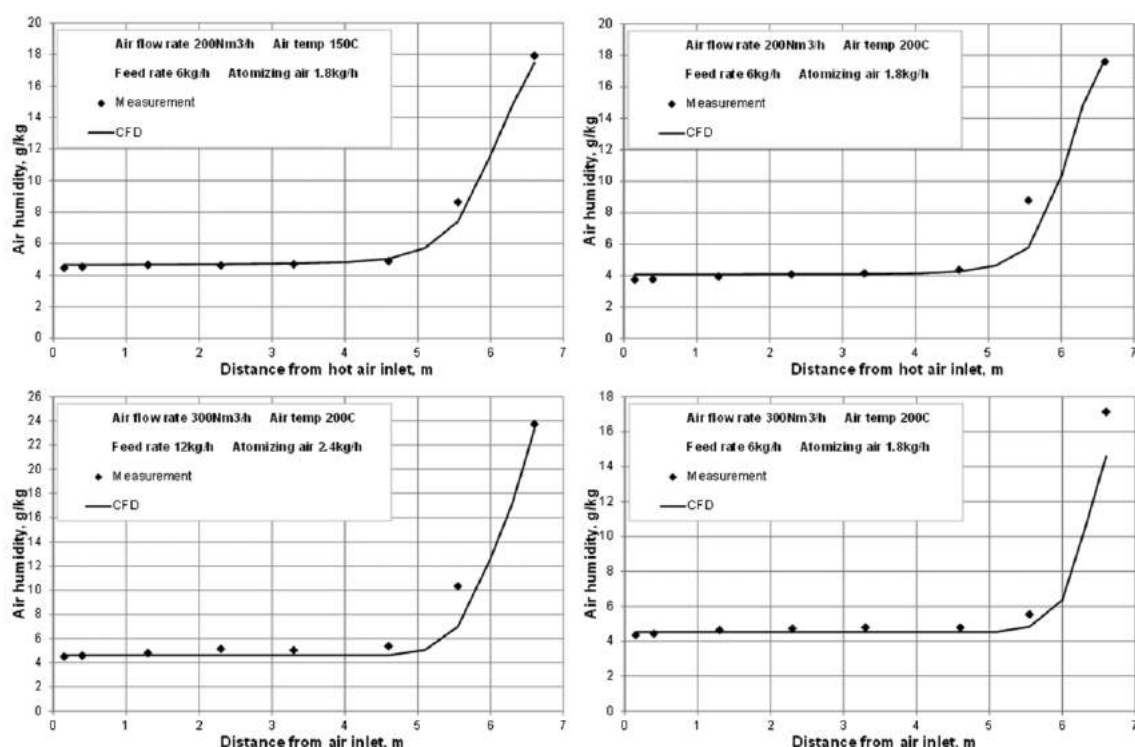
Skutek zderzenia cząstek w modelu jest ustalany na podstawie analizy zawartości wilgoci, wzajemnej odległości cząstek i względnej prędkości. Opracowano własny moduł DPM (*Discrete Phase Model*), który wykorzystywano w modelowaniu CFD. Schemat obliczeniowy modelu przedstawiono na Rys. 16.



Rys.16. Algorytm modelu fazy rozproszonej z modelem aglomeracji (Fig5 w [8]).

⁵ Maciej Jaskulski: CFD modeling of particle agglomeration in counter-current spray drying proces, praca doktorska, Politechnika Łódzka 2016.

W pierwszym etapie pracy, wyniki obliczeń modelu zweryfikowano w przeciwwądowej suszarce pilotowej zbudowanej na Wydziale Inżynierii Procesowej i

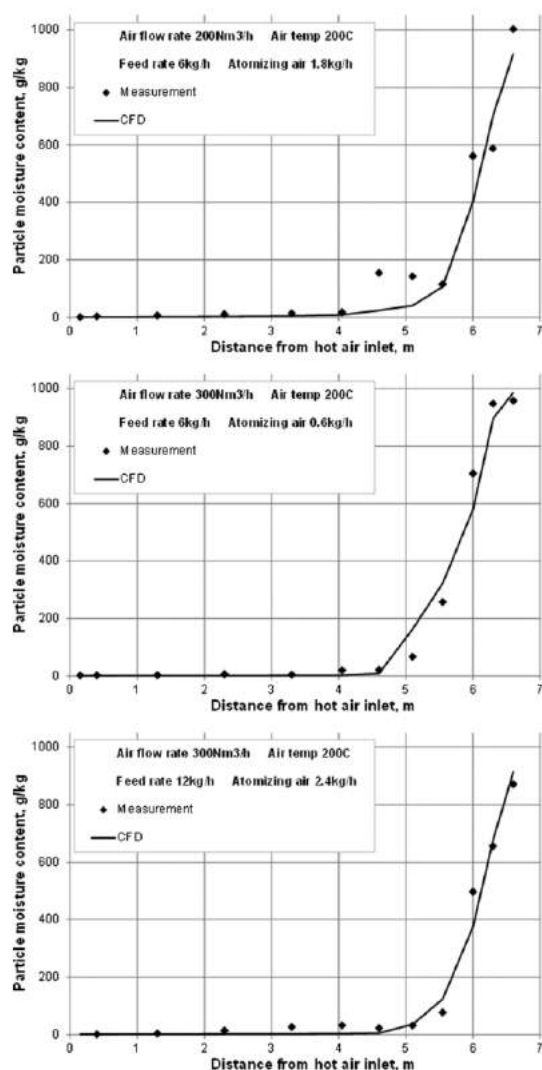


Rys.17. Zmiany temperatury powietrza i cząstek wzdłuż wysokości suszarki (Fig7 w [8]).

Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Wykorzystano dane eksperymentalne zebrane wcześniej na potrzeby pracy doktorskiej wykonanej na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej (Marcin Piątkowski, 2011⁶). W celu weryfikacji dokładności wyników obliczeń analizowano pięć parametrów procesu: temperaturę i zawartość wilgoci obu faz oraz zmiany średniej średnicy cząstek. Wyniki obliczeń wilgotności powietrza i zawartości wilgoci w suszonych cząstkach proszku były zgodne z wartościami ustalonymi doświadczalnie (Rys. 17 i 18).

Zawartość wilgoci w cząstkach materiału zmniejszała się wraz odległością od układu rozpylającego by w najniższej części suszarki osiągnąć wartości równowagowe. Jednocześnie obserwowano wzrost wilgotności powietrza w funkcji odległości od dyszy rozpylającej. Obserwowane zależności pozwalają skutecznie identyfikować granice obszaru strefy atomizacji, strefę efektywnej pracy suszarki i ustalić optymalną wysokość suszarki rozpryskowej.

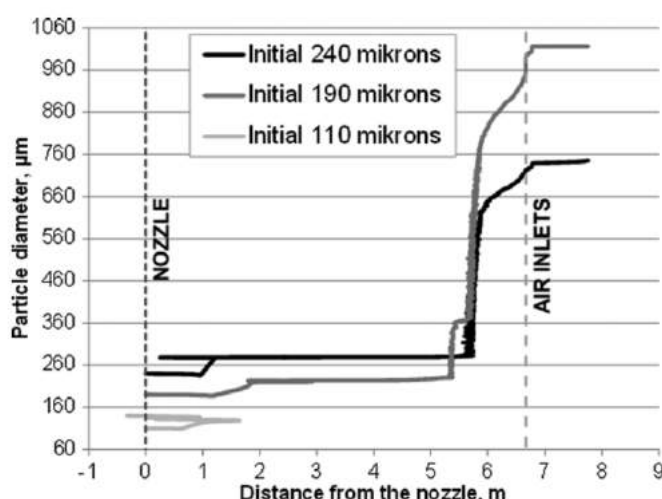
⁶ Marcin Piątkowski: Kinetyka suszenia rozpryskowego w układzie przeciwwądowym, praca doktorska, Politechnika Łódzka, 2011



Rys.18. Zmiany wilgotności cząstek wzdłuż wysokości suszarki (Fig8 w [8]).

Zmiany średnicy suszonych cząstek wzdłuż wysokości suszarki ilustruje Rys. 19, natomiast zależność średnicy cząstek od czasu przebywania w aparacie przedstawiona jest na Rys 20. Analiza trajektorii cząstek o różnych średnicach wskazuje na silną segregację aerodynamiczną suszonych cząstek. Zaobserwowano dwie główne strefy wzrostu średnicy cząstek. Pierwsza to strefa atomizacji gdzie wilgotne cząstki początkowo się kurczą na skutek odparowania, a jednocześnie łączą się z innymi wilgotnymi cząstkami. Drugą strefą wzrostu średnicy cząstek jest poziom wlotów powietrza suszącego. Intensywne mieszanie strumieni cząstek zwiększa prawdopodobieństwo ich zderzeń. Wzrost średnic cząstek, ze względu na niską zawartość wilgoci, jest powolny jednakże długi czas przebywania i liczne zderzenia mają istotny wpływ na końcowy rozkład średnic cząstek produktu.

Porównanie zmian średnich średnic cząstek w wyniku aglomeracji i łączenia się



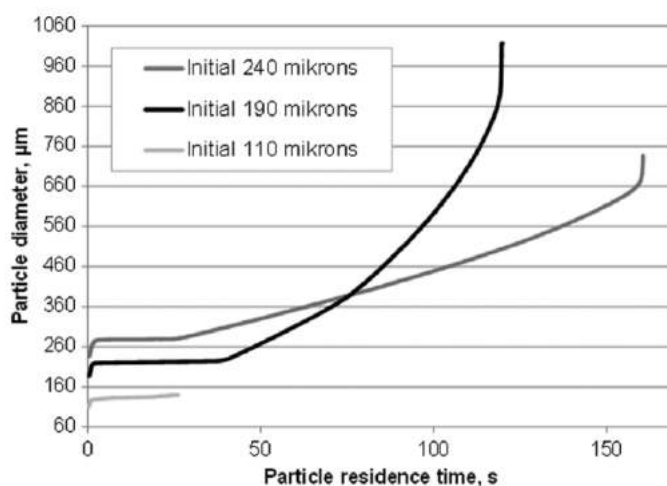
Rys.19. Zmiany średnicy cząstek wzdłuż wysokości suszarki dla wybranych strumieni cząstek (Fig10 w [8]).

w procesie przeciwwądowego suszenia rozpryskowego obliczonych z modelu CFD z wartościami doświadczalnymi przedstawiono na Fig. 21 w pracy [8]. Średnice cząstek uzyskane z modelu CFD są zgodne z wynikami pomiarów wykonanych za pomocą laserowego sytemu analizy średnicy cząstek w trakcie suszenia.

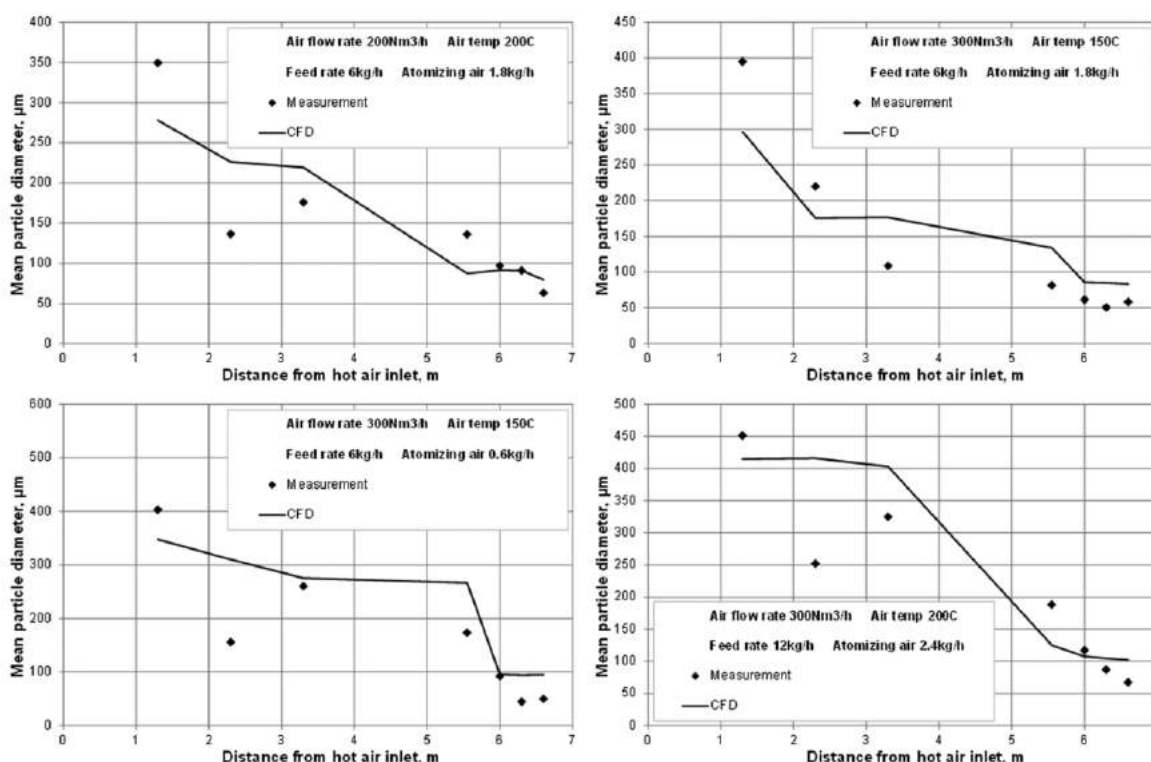
Powstał dokładny model aglomeracji w przeciwwądowym procesie suszenia rozpryskowego uwzględniający kinetykę

suszenia, aerodynamiczną segregację cząstek, kurczenie się kropeł zawiesiny, wzrost porowatości, łączenie się rozpylanych kropeł i cząstek suszonego materiału. Jest to pierwszy opublikowany w literaturze model przeciwwądowego procesu suszenia rozpryskowego z eksperymentalnie zweryfikowanym mechanizmem aglomeracji.

Zaprezentowany model procesu zastosowano następnie do obliczeń procesu suszenia rozpryskowego w instalacji przemysłowej weryfikując wyniki obliczeń za pomocą danych doświadczalnych (pracy [2]). Wyniki obliczeń przedstawiono w prezentacji wygłoszonej na konferencji IDS 2016 [8].



Rys.20. Zmiany średnicy cząstek w funkcji czasu przebywania (Fig11 w [8]).



Rys.21. Zmiany średnicy cząstek wzdłuż wysokości suszarki (Fig12 w [8]).

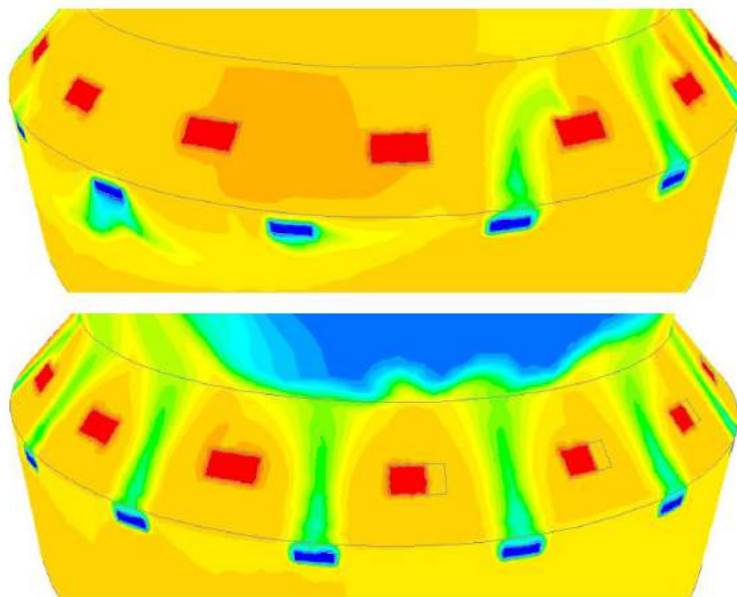
Kontrola temperatury strefy zagrożonej przegrzewaniem w suszarce rozpryskowej za pomocą nawiewu chłodnego powietrza.

Proces przeciwpądowego suszenia rozpryskowego przy stosunkowo niskim zapotrzebowaniu na energię umożliwia dodatkowo połączenie kilku operacji jednostkowych, tzn., suszenia, aglomeracji i segregacji, w jednym aparacie. Złożony charakter przepływu powietrza i suszonych cząstek sprzyja intensywnemu odkładaniu się produktu na ścianach suszarek. Depozyty proszków na ścianach w pobliżu wlotów gorącego powietrza poddane działaniu wysokiej temperatury mogą ulec przegrzaniu, pirolizie lub zapłonowi. Zastosowanie lokalnego chłodzenia powietrzem zagrożonych przegrzaniem obszarów ścian suszarki może obniżyć ich temperaturę co pozwoli na zwiększenie temperatury powietrza wlotowego i co za tym idzie zwiększy wydajność instalacji.

Raport [9] wykonany na zamówienie operatora rozpryskowych suszarek detergentów stanowi obszerną analizę możliwości zastosowania chłodzenia powietrzem najbardziej zagrożonych przegrzaniem powierzchni ścian suszarek rozpryskowych. Identyfikacji stref zagrożonych w badanej suszarce dokonano za pomocą kamery termowizyjnej. Stwierdzono, że depozyty produktu na ścianach aparatu w otoczeniu otworów doprowadzających gorące powietrze osiągały lokalnie maksymalną dopuszczalną temperaturę. Zaprojektowano pięć, technicznie wykonalnych, wlotów powietrza chłodzących zagrożone obszary. W modelu procesu suszenia przedstawionym w pracy [4] uwzględniono dodatkowe przepływy zimnego powietrza i wykonano obliczenia rozkładów temperatury ścian aparatu dla każdej konfiguracji

wlotu zimnego powietrza Wyniki obliczeń modelowych posłużyły do analizy skuteczności kontroli temperatury za pomocą strumieni chłodnego powietrza.

Praca [10] prezentuje część wyników projektu zamieszczonych w raporcie [9]. Zmodyfikowany model CFD procesu suszenia rozpryskowego z ujemnym źródłem ciepła zastosowanym do symulacji odparowania wilgoci (praca [4]) uzupełniając model o przepływy zimnego powietrza. Lokalizację i budowę wlotów powietrza chłodzącego ustalono na drodze



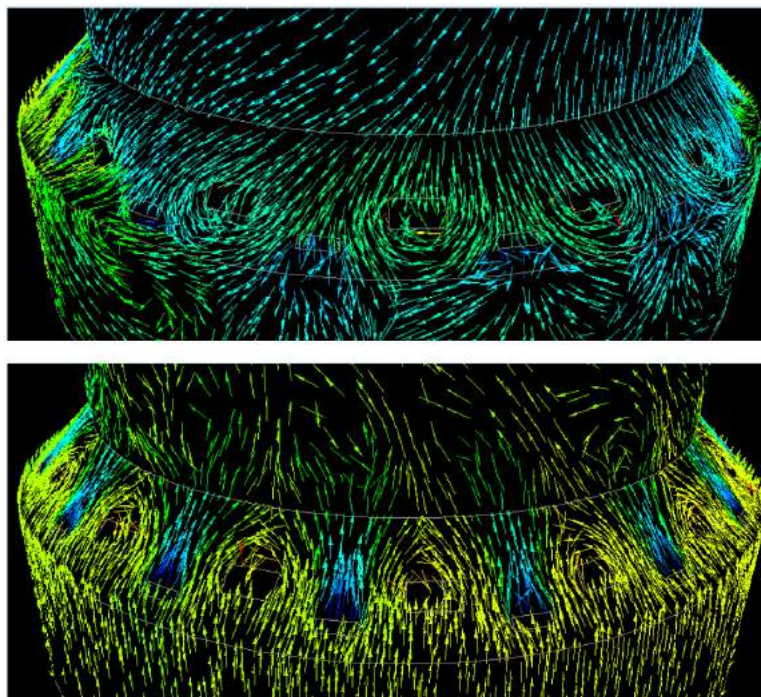
Rys.22. Temperatura ścian suszarki dla wlotów powietrza chłodzącego zlokalizowanych pomiędzy wlotami powietrza gorącego. (Fig10 w [10]).

analizy technicznych możliwości doprowadzenia zimnego powietrza (Fig. 3, w pracy [10]). W trakcie obliczeń zdolność odparowania wilgoci w suszarce utrzymywano na stałym poziomie tak aby można było porównać wyniki i oszacować skuteczność chłodzenia dla każdej konfiguracji. Również strumień powietrza chłodzącego w każdym przypadku był identyczny i równy 10% całkowitego masowego przepływu powietrza.

Obliczone pola temperatury ścian suszarki dla konfiguracji wlotów strumieni powietrza chłodzącego ilustrujące skuteczność chłodzenia przedstawiono na Rys 22. (oraz Fig. 6 ÷ 13 w pracy [10]). Dynamiczne zmiany prędkości i kierunku przepływu powietrza suszącego powodowały, że skuteczność chłodzenia ścian suszarki przez zimne powietrze wprowadzane poniżej, powyżej jak i pomiędzy wlotami powietrza gorącego była ograniczona. Gwałtownie zmieniające kierunek przepływu powietrze suszące oddziaływało na strumień powietrza chłodzącego i ograniczało chłodzenie ściany suszarki. Mapy wektorów prędkości w pobliżu wlotów powietrza dla wybranych konfiguracji przedstawiono na Rys.23 (oraz Fig. 14 i 17 w pracy [10]).

Analiza wyników symulacji wykazała, że kontrola temperatury i skuteczne chłodzenie powietrzem zagrożonych przegrzaniem ścian suszarki przy niestabilnym przepływie fazy ciągłej w całym aparacie jest bardzo trudne. Skuteczność chłodzenia ścian wymaga stabilnego

przepływu głównego strumienia powietrza w aparacie. Jak wykazano wcześniej w pracy [1], wprowadzenie powietrza suszącego stycznie na całym obwodzie suszarki indukuje powstanie wiru stabilizującego przepływ powietrza. W takich warunkach zastosowanie strumieni powietrza chłodzącego najprawdopodobniej umożliwiłoby kontrolę temperatury ścian suszarki w pobliżu wlotów gorącego powietrza.

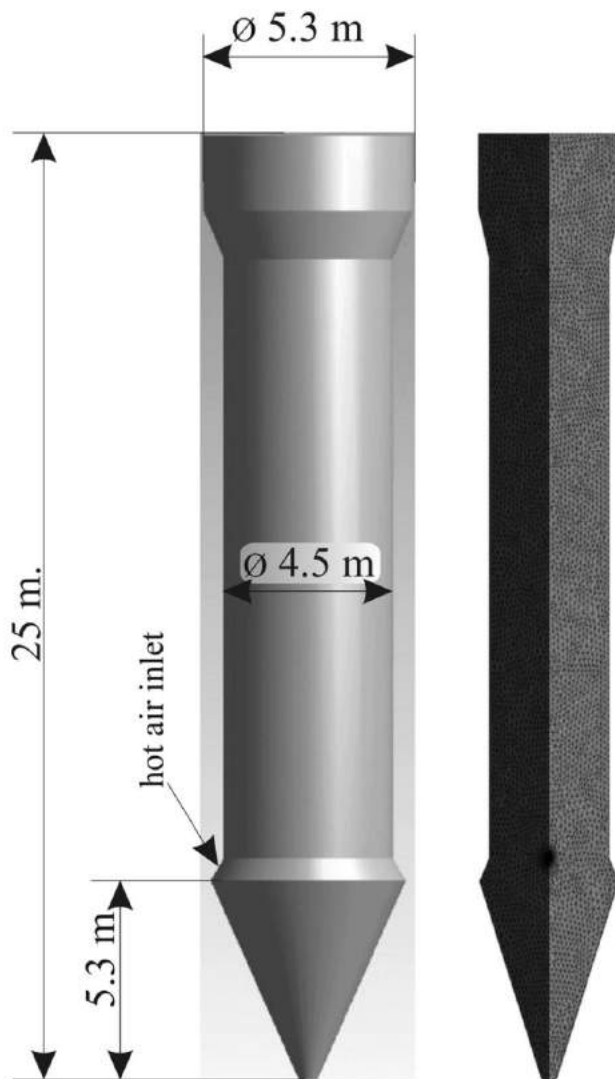


Rys.23. Wektory prędkości powietrza w pobliżu ściany suszarki.
(Fig15 w [10]).

Opracowana na potrzeby tej pracy metodologia symulacji CFD znacząco obniżyła koszty analizy rozwiązania, pozwoliła na wybór najlepszej konstrukcji wlotów powietrza chłodzącego i ustalenie optymalnego ich położenia. Wyniki symulacji skłoniły operatora instalacji do rezygnacji ze stosowania chłodzenia ścian suszarki zimnym powietrzem.

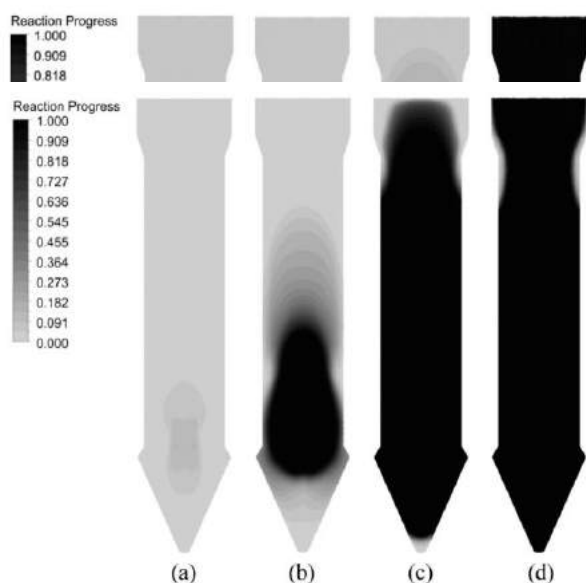
Bezpieczeństwo instalacji suszarniczej. Redukcja ciśnienia eksplozji pyłu w suszarce.

Większość procesów suszenia w aparatach rozpryskowych prowadzi do powstawania pyłu, co oznacza że zazwyczaj instalacje suszenia rozpryskowego są zagrożone wybuchem. Podjęto próbę wykonania analizy zjawisk zachodzących w czasie wybuchu pyłu materiału suszonego w suszarce i oszacowanie dynamiki zmian pola ciśnienia powstającego w czasie eksplozji za pomocą standardowego oprogramowania CFD. W publikacji [11] zaprezentowano metodykę postępowania pozwalającą wiarygodnie oszacować siłę eksplozji i maksymalne ciśnienie podczas ewentualnego wybuchu.



Rys.24. Geometria suszarki i domena obliczeniowa po dyskretyzacji. (Fig1 w [11]).

W modelu CFD proces eksplozji suszonego pyłu zastąpiono wybuchem metanu o stężeniu dobranym tak by główny wskaźnik siły eksplozji był identyczny dla pyłu i mieszaniny metanu z powietrzem. W Głównym Instytucie Górnictwa wykonano eksperymenty polegające na doborze stężenia mieszaniny metanu i powietrza, która w czasie eksplozji symulowała wybuch pyłu o indeksie wybuchu (*Dust Explosion Index*) odpowiadającym suszonemu materiałowi. Eksperymenty wykonano zgodnie z zaleceniami normy EN14034 prezentującej metodykę badania parametrów wybuchowych. Wykonane równoległe obliczenia modelowe CFD eksplozji mieszaniny metanu w powietrzu w warunkach odpowiadających przeprowadzonym eksperymentom prezentowały bardzo dobrą zgodność wyników doświadczalnych z modelowymi. Sposób wykonywania pomiarów, analizy wyników i porównanie rezultatów eksperymentu z obliczeniami modelowymi CFD zostało również przedstawione na konferencji *NDC 2011* [11].



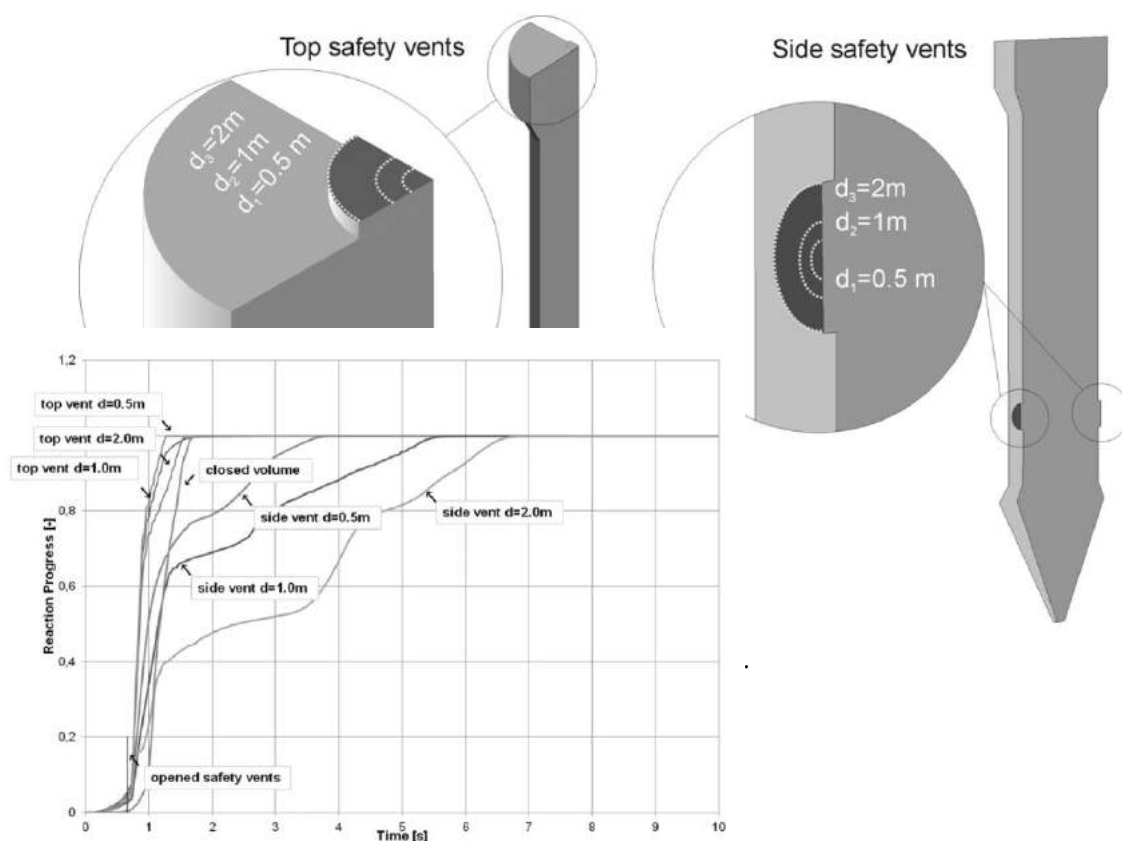
Rys.26. Kontury stopnia przereagowania w suszarce przy zmiennym stężeniu metanu, dla kolejnych kroków czasowych: (a) 0.40s, (b) 0.80s, (c) 1.20s, (d) 1.60s. (Fig5 w [11]).

Publikacja [11] prezentuje symulację eksplozji pyłu w przemysłowej suszarce rozpryskowej przedstawionej na Rys.24. W trakcie wykonywania obliczeń modelowych CFD pył suszonego materiału zastąpiono mieszaniną metanu i powietrza dla której indeks wybuchowości (*Dust Explosion Index*) odpowiadał analogicznej wartości dla suszonego materiału. W obliczeniach zastosowano dwa modele spalania

mieszaniny gazu i powietrza. *Sparc Initon Model* (SIM) stosowano w otoczeniu punktu zapłonu aż do osiągnięcia przez strefę wybuchu średnicy krytycznej, następnie korzystając z modelu *Burning Velocity Model* (BMV) obliczano rozwój eksplozji. W każdej suszarce rozpryskowej istnieje strefa o niższej temperaturze gazu i jednocześnie wyższej zawartości wilgoci w cząstkach produktu (np. strefa atomizacji), w której prawdopodobieństwo eksplozji jest istotnie niższe. Obliczenia modelowe wykonano dla najbardziej niekorzystnego scenariusza eksplozji dla aparatu całkowicie wypełnionego wybuchową mieszaniną oraz dla stężenia gazu malejącego zgodnie z występowaniem stref wilgotnego materiału (Fig. 2 w pracy [11]).

Postęp reakcji wybuchu ilustrują Rys 25 i 26 odpowiednio dla stałego i malejącego stężenia eksplodującej mieszaniny. Analogicznie rozwój pola temperatury i prędkości przedstawiają odpowiednio Fig. 8 i 9 oraz Fig. 14 i 15 w pracy [11]. Ustalono szybkość propagacji reakcji, czas trwania wybuchu, a także maksymalne wartości ciśnienia występujące w obu scenariuszach eksplozji. W pracy wykazano możliwość zastosowania standardowego oprogramowania CFD (Ansys Fluent) do modelowania eksplozji pyłu w suszarce rozpryskowej. Zaproponowane podejście polegające na zastąpieniu, w obliczeniach modelowych, rzeczywistego pyłu mieszaniną metanu i powietrza, wsparte starannie przeprowadzonym eksperymentem pozwala stosunkowo szybko i wiarygodnie przewidywać dynamikę eksplozji w instalacji suszenia rozpryskowego.

Artykuł [12] przedstawia kontynuację badań modelowych rozwoju eksplozji w przeciwprądowej suszarce rozpryskowej. Wcześniej zbudowany i zweryfikowany model CFD wybuchu pyłu w suszarce wykorzystano do analizy lokalizacji upustu bezpieczeństwa w przemysłowej instalacji suszarniczej. Położenie systemu redukującego ciśnienie powstałe w wypadku eksplozji pyłu ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa obsługi suszarki

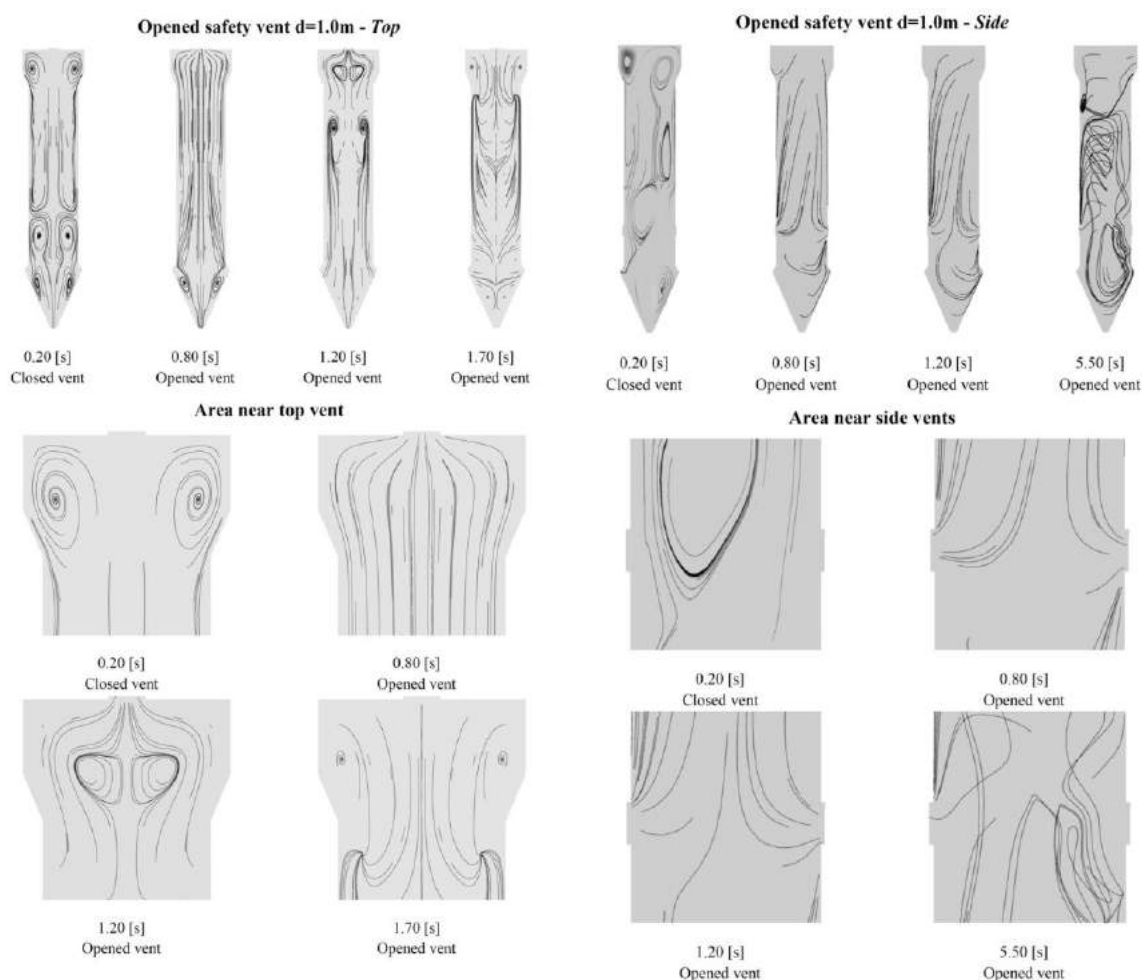


Rys.28. Postęp reakcji w suszarce bez i z upustami bezpieczeństwa (na szczycie i na ścianach bocznych) (Fig3 w [12]).

i minimalizacji szkód. Głównym celem pracy była ocena przydatności analizowanych przestrzennych konfiguracji upustów bezpieczeństwa w komorze aparatu dla zmniejszenia ryzyka zniszczenia suszarki. Przeanalizowano skuteczność działania układu bezpieczeństwa zainstalowanego na szczycie suszarki oraz na jej bocznej ścianie w pobliżu wlotu gorącego powietrza suszącego. Wszystkie upusty bezpieczeństwa miały kształt koła, rozważano trzy wielkości upustów powietrza. Rys.27 prezentuje szczegóły rozważanych lokalizacji układu redukującego ciśnienie w aparacie suszącym.

Obliczenia prowadzono niezależnie dla każdej konfiguracji upustu bezpieczeństwa. We wszystkich przypadkach punkt zapłonu zlokalizowano w osi suszarki na poziomie wlotów gorącego powietrza. W tej strefie powietrze ma najwyższą temperaturę a produkt najniższą zawartość wilgoci. W celu oceny skuteczności działania upustu bezpieczeństwa w obliczeniach CFD (Ansys Fluent) analizowano następujące parametry: narastanie ciśnienia w suszarce, temperaturę wewnątrz suszarki, stopień przereagowania, skład obłoku gazów reakcyjnych, oraz prędkość gazów. Wyniki porównywano z rozwiązaniem referencyjnym dla suszarki bez układu obniżającego ciśnienie. Stwierdzono znaczący wpływ położenia upustu bezpieczeństwa na przebieg eksplozji. Lokalizacja upustu na bocznej ścianie suszarki w pobliżu punktu zapłonu powodowała spowolnienie przebiegu eksplozji. Rys.28 ilustruje postęp przereagowania gazów w czasie eksplozji dla wszystkich analizowanych przypadków. Przestrzenną ilustrację rozwoju eksplozji dla dwóch analogicznych upustów bezpieczeństwa zainstalowanych na szczycie i bocznej ścianie suszarki przedstawiono na Rys 29. Profile wzrostu średniej temperatury miały podobny charakter jak krzywe stopnia przereagowania (Fig. 6 w pracy [12]). Upust bezpieczeństwa zainstalowany na bocznej ścianie powodował uwolnienie nieprzereagowanego materiału z suszarki, dzięki czemu skuteczniej obniżał średnią temperaturę w suszarce niż upust umieszczony na szczycie aparatu.

Przebieg linii prądu ilustrujących przepływ powietrza wyraźnie różni się dla upustu zainstalowanego na szczycie suszarki i na bocznej ścianie. W pierwszym przypadku przepływy powietrza są osiowo symetryczne Rys. 30, maksymalna temperatura w aparacie jest wyższa, do otoczenia uwalniane są przereagowane gazy. Boczny upust bezpieczeństwa powoduje niestabilne, dynamiczne przepływy powietrza Rys 31. Stopień przereagowania jest widocznie niższy podobnie jak maksymalna temperatura w suszarce, ale do otoczenia



Rys.30. Linie prądu w suszarce z upustami bezpieczeństwa na szczycie komory w kolejnych krokach czasowych. (Fig11 w [12]).

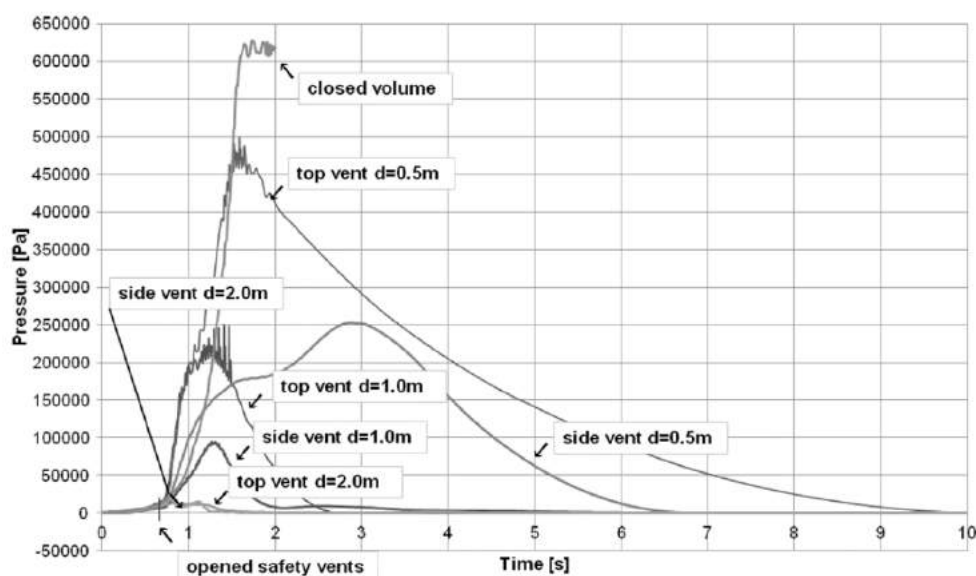
Rys.31. Linie prądu w suszarce z upustami bezpieczeństwa na ścianach bocznych komory w kolejnych krokach czasowych. (Fig. 12 w [12]).

uwalniana jest duża ilość materiału nieprzereagowanego.

Wyniki obliczeń dla wszystkich konfiguracji upustów bezpieczeństwa wykazują obniżenie maksymalnego ciśnienia w suszarce poniżej wartości uzyskiwanej dla przypadku referencyjnego (układu bez upustów). Dla układu bezpieczeństwa umieszczonego na szczycie suszarki maksymalne nadciśnienie osiągało wartości od 4.9 bar do 0.14 bar zależnie od rozmiaru upustu bezpieczeństwa. Maksymalne nadciśnienie obliczone dla eksplozji w suszarce z bocznymi upustami bezpieczeństwa osiągało wartości od 2.5 bar do 0.16 bar dla

upustów odpowiednio o najmniejszej i największej powierzchni. Rys 32 ilustruje wzrost ciśnienia w suszarce dla wszystkich analizowanych konfiguracji upustu bezpieczeństwa.

Wyniki obliczeń CFD porównano również z wynikami obliczeń maksymalnego nadciśnienia według równań korelacyjnych zawartych w normie EN 14991:2006. Wartości



Rys.32. Maksymalne ciśnienie w suszarce rozpryskowej bez i z upustami bezpieczeństwa (na szczycie i na ścianach bocznych) (Fig. 13 w [12]).

obliczone zgodnie z normą europejską były zbliżone do uzyskanych w modelowaniu CFD. Przedstawione porównanie i wyniki pozwalają uznać, że symulacja CFD eksplozji może być użyta nie tylko do ustalenia maksymalnego nadciśnienia w czasie wybuchu pyłu, ale również może być wartościowym źródłem informacji o mechanizmie eksplozji (stopień przereagowania, rozchodzenie się pola temperatury, prędkości powietrza i ciśnienia) co może się przyczynić do poprawy rozumienia przebiegu procesów eksplozji zachodzących wewnątrz zamkniętych przestrzeni z upustami bezpieczeństwa.

Publikacje dotyczące modelowania i analizy eksplozji są dostępne w literaturze, ale prac poświęconych eksplozji w pracujących suszarkach jest niewiele i wykorzystują one oprogramowanie dedykowane do modelowania wybuchów np. FLACS, DESC. Zaprezentowane w publikacjach [11] i [12] podejście do modelowania eksplozji pyłu w suszarce rozpryskowej pozwala na przewidywanie przebiegu wybuchu, projektowanie i badanie wpływu położenia upustów bezpieczeństwa na wzrost temperatury, ciśnienia i analizę ryzyka związanego z uwolnieniem pyłu oraz produktów eksplozji do otoczenia z wykorzystaniem standardowego środowiska do modelowania CFD.

Najważniejsze osiągnięcia w omawianym cyklu publikacji dotyczącym teoretycznej i eksperymentalnej analizy pracy przemysłowych instalacji suszenia rozpryskowego są następujące:

- Zebranie danych eksploatacyjnych opisujących pracę przemysłowej instalacji suszenia rozpryskowego zawierających mapy temperatur powietrza i prędkości fazy ciągłej w trakcie pracy instalacji,
- Opracowanie modelu CFD przepływu fazy ciągłej w procesie suszenia w przeciwprądowej suszarce rozpryskowej i zbudowanie modelu procesu suszenia rozpryskowego z ujemnym źródłem wewnętrznego ciepła zastosowanym do symulacji odparowania wilgoci umożliwiającego analizę pracy przemysłowej instalacji,
- Opracowanie modelu suszenia wykorzystującego charakterystyczną krzywą suszenia do modelowania procesu wymiany ciepła i masy oraz funkcję przejścia od rozkładu średnic rozpylanych kropel do średnic cząstek produktu w procesie suszenia rozpryskowego w przeciwprądowej suszarce rozpryskowej
- Współudział w opracowaniu pierwszego opublikowanego w literaturze, modelu przeciwprądowego procesu suszenia rozpryskowego z eksperymentalnie zweryfikowanym mechanizmem aglomeracji.
- Określenie, za pomocą modelu CFD procesu suszenia rozpryskowego, celowości zmian konstrukcyjnych w instalacji produkcyjnej.
- Zastosowanie typowego środowiska do modelowania CFD (Ansys - Fluent) do analizy powstawania pola ciśnienia w czasie zapłonu i eksplozji pyłu w suszarce rozpryskowej, oraz oceny możliwości redukcji maksymalnego ciśnienia.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Wykaz innych (nie wchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt I)
opublikowanych prac naukowych oraz wskaźniki dokonań naukowych

Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC)

Przed doktoratem:

1. Ewa Mitura, **Paweł Wawrzyniak**, Grzegorz Rogacki, Jan Szmidt, Andrzej Jakubowski: The properties of diamond-like carbon layers deposited onto SiO₂ aerogel, Diamond and Related Materials. 01/1994, p 868 – 870 (NR ISSN 0925-9635, pkt. 30)(IF 1997 2,017)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu metody wytwarzania aerożelu krzemionkowego i wytworzeniu próbek materiału. Brałem też aktywny udział w analizie wyników. Zredagowałem część opublikowanego materiału. Mój udział procentowy -25%.

2. Rogacki G., **Wawrzyniak P.**: “Diffusion of Ethanol–Liquid CO₂ in the Silica Aerogel Structure”, J. of Non-Cryst. Solids, 186, 73-77, 1995. (NR ISSN 0022-3093, pkt. 35) (IF 1995 1,132)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu metody wytwarzania aerożelu krzemionkowego. Byłem współautorem metody analizy dyfuzji w aerożelu. Brałem też aktywny udział w analizie wyników. Zredagowałem część opublikowanego materiału. Mój udział procentowy -50%.

3. Rogacki G., **Wawrzyniak P.**, Bartczak Z.: “Drying of Alcohols by Liquid and Supercritical CO₂”. Drying Technology, vol. 14 no. 2, 259-270, 1996. (NR ISSN 0012-7086, pkt. 35) (IF 1996 0,481)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu analizy metod wytwarzania aerożelu krzemionkowego. Przedstawiłem własną technikę produkcji aerożelu. Jestem współautorem analizy porównawczej technik wytwarzania aerożeli. Zredagowałem część opublikowanego materiału. Mój udział procentowy -45%.

4. Wawrzyniak P., Rogacki G., Pruba J., Bartczak Z.: “Diffusion of Ethanol-Carbon Dioxide in Silica Gel” J. Non-Cryst. Solids, 225 pp. 86-90, 1998. (NR ISSN 0022-3093, pkt. 35) (IF 1998 1,062)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu metody wytwarzania aerożelu krzemionkowego i metody wyznaczania współczynnika dyfuzji w aerożelu, oraz wykonaniu serii doświadczeń. Samodzielnie dokonałem analizy wyników eksperymentów. Zredagowałem większość opublikowanego materiału. Mój udział procentowy -40%.

Suma punktów 140, $\sum IF=4,692$

Po doktoracie:

5. **Paweł Wawrzyniak**, Grzegorz Rogacki: Solvents Diffusion in the Low-Temperature Process of Silica Gel Supercritical Drying, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, 48, 3, pp455-462 2000. (NR ISSN 0239-7528, pkt. 30) (IF 2000 0,386)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu analizy metod wytwarzania aerożelu krzemionkowego. Przedstawiłem własną technikę produkcji aerożelu. Jestem współautorem dyskusji porównującej poszczególne techniki. Zredagowałem część opublikowanego materiału. Mój udział procentowy -50%.

6. **Paweł Wawrzyniak**, Grzegorz Rogacki, Joanna Pruba, Zdzisław Bartczak: Effective Diffusion Coefficient in the Low Temperature Process of Silica Aerogel Production. Journal of Non-Crystalline Solids, 285, pp. 50-56, 2001 (NR ISSN 0022-3093, pkt. 30) (IF 2001 1,363)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu metody wytwarzania aerożelu krzemionkowego i metody wyznaczania współczynnika dyfuzji w aerożelu, Samodzielnie wykonałem kilka serii doświadczeń i analizę wyników eksperymentów. Zredagowałem całość opublikowanego materiału. Mój udział procentowy -60%.

7. Joanna Stasiak, Grzegorz Rogacki, **Paweł Wawrzyniak**: Numerical Simulation of Tracer Dispersion in Sub- and Supercritical Water During Laminar Tube Flow, *Chemie Ingenieur Technik*, 73/6, 2001, p. 719 (NR ISSN:0009-286X, pkt. 15) (IF 2001 0,332)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale przy budowie aparatury i wykonaniu kilku serii doświadczeń. Zredagowałem część opublikowanego materiału. Mój udział procentowy -20%.

8. Joanna Stasiak, Grzegorz Rogacki, **Paweł Wawrzyniak**: Dyspersja znacznika w wodzie okołokrystalicznej podczas laminarnego przepływu przez rurowy reaktor hydrotermiczny, *Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, t. 22, z. 3E, 1309-1314, 2001(NR ISSN:0208-6425, pkt. 15) (IF 2001 0,115)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale przy budowie aparatury i wykonaniu kilku serii doświadczeń. Zredagowałem część opublikowanego materiału. Mój udział procentowy -20%.

9. Grzegorz Rogacki, Czesław Strumillo, **Paweł Wawrzyniak**, Ireneusz Zbicinski: Pulse Combustion and Supercritical Fluid Techniques as Examples of Innovative Drying Technologies: *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, Volume 10, Issue 3-4, pages 415-428, 2002 (NR ISSN 1932-2143, pkt. 20) (IF 2008 0,141)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na dokonaniu przeglądu metod suszenia nadkrytycznego i współudziale przy opracowaniu dyskusji i redagowaniu tekstu. Mój udział procentowy -20%.

10. Grzegorz Rogacki, Zofia Modrzejewska, **Paweł Wawrzyniak**, Formation of chitosan microgranules in supercritical drying process, *Chemical and Process Engineering* 2004, 25 (2), p 375-380 (NR ISSN:0208-6425, pkt. 15) (IF 2004 0,337)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale przy opracowaniu techniki wytwarzania żelu chitozanowego i nadkrytycznym wysuszeniu tak otrzymanych próbek. . Mój udział procentowy -30%.

11. **Paweł Wawrzyniak**, Grzegorz Rogacki: Ecological Aspects of Supercritical Carbon Dioxide Applications, *Polish Journal of Environmental Studies*, 2004, vol. 13, sup. III, pp.197-202, (IF 2008 0,366), MNiSW=15

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na dokonaniu przeglądu metod suszenia nadkrytycznego i współudziale przy opracowaniu dyskusji i redagowaniu tekstu. Mój udział procentowy -50%.

12. **Paweł Wawrzyniak**, Alicja Zawadzka: Thermohydrolysis as the Method of Preliminary Wastewater Treatment, *Polish Journal of Environmental Studies*, 2004, vol. 13, sup. III, pp. 238-241, (IF 2008 0,366), MNiSW=15

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na dokonaniu przeglądu metod suszenia termohydrolyzy, współudziale przy opracowaniu techniki eksperymentalnej, analizie eksperymentów i współudziale przy opracowaniu dyskusji i redagowaniu tekstu. Mój udział procentowy -50%.

13. Karina Gurganova, Rafał Bogel-Łukasik, **Paweł Wawrzyniak**, High Pressure Vapour-Liquid Equilibrium of Volatiles in Supercritical Carbon Dioxide, *Chemical and Process Engineering* 2013, 34 (3), p 387-392 (NR ISSN:0208-6425, pkt. 15) (IF 2013 0,467)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu metodyki wyznaczania równowagi i współudziale przy redakcji tekstu. Mój udział procentowy -25%.

Suma punktów 140, $\sum IF=3,868$

Wybrane zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne
Po uzyskaniu stopnia doktora:

1. **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Pakowski, Janusz Grochowski: 2002r., Suszarka fluidyzacyjna do cukru z jednym mieszadłem, 22t/h. Cukrownia Dobre.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, nadzorze wykonawczym instalacji i nadzorze przy uruchomieniu instalacji. Mój udział procentowy w tworzeniu projektu procesowego 50%.

2. **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Pakowski, Janusz Grochowski: 2002r., Suszarko-chłodziarka fluidyzacyjna do cukru, 50t/h. Cukrownia Słuck, Białoruś

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, nadzorze wykonawczym instalacji i nadzorze przy uruchomieniu instalacji. Mój udział procentowy w tworzeniu projektu procesowego 40%.

3. Zdzisław Pakowski, **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Bartczak, Janusz Grochowski: 2002r., Instalacja suszenia i kalcynacji uwodnionego węgla potasu, 3,5 t/h. KH Verbus, Klucze

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu i instalacji, nadzorze wykonawczym instalacji i nadzorze przy uruchomieniu instalacji. Mój udział procentowy w tworzeniu projektu procesowego 25%.

4. **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Pakowski, Janusz Grochowski: 2003r., Podciśnieniowa chłodziarka fluidyzacyjna do cukru, 23t/h. Cukrownia Mała Wieś

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, nadzorze wykonawczym instalacji i nadzorze przy uruchomieniu instalacji. Mój udział procentowy 40%.

5. **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Pakowski, Janusz Grochowski: 2003r., Podciśnieniowa chłodziarka fluidyzacyjna do cukru, 23t/h. Cukrownia Gryfice

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, nadzorze wykonawczym instalacji i nadzorze przy uruchomieniu instalacji. Mój udział procentowy w tworzeniu projektu procesowego 40%.

6. **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Bartczak, Janusz Grochowski: 2003r., Modernizacja i zwiększenie wydajności instalacji CO₂ surowego. Janikowskie Zakłady Sodowe Janikosoda S.A.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu i instalacji, Mój udział procentowy 45%.

7. **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Pakowski, Janusz Grochowski: 2004r., Suszarko-chłodziarka fluidyzacyjna do cukru, 50t/h. Cukrownia Gorodieja, Białoruś

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, nadzorze wykonawczym instalacji i nadzorze przy uruchomieniu instalacji. Mój udział procentowy w tworzeniu projektu procesowego 40%.

8. Zdzisław Pakowski, **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Bartczak, Janusz Grochowski: 2005r., Suszarko-chłodziarka fluidyzacyjna do cukru z dwoma mieszadłami, 50t/h. Cukrownia Werbkowice.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, nadzorze wykonawczym instalacji i nadzorze przy uruchomieniu instalacji. Mój udział procentowy w tworzeniu projektu procesowego 25%.

9. Zdzisław Pakowski, **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Bartczak, Janusz Grochowski: 2005r., Chłodziarka fluidyzacyjna do cukru z kontaktową wymianą ciepła, 50t/h. Cukrownia Werbkowice.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, nadzorze wykonawczym instalacji i nadzorze przy uruchomieniu instalacji. Mój udział procentowy w tworzeniu projektu procesowego 25%.

10. Zdzisław Pakowski, **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Bartczak, Janusz Grochowski: 2006r., Suszarko-chłodziarka fluidyzacyjna do cukru z dwoma mieszadłami, 50t/h. Cukrownia Kruszwica.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, nadzorze wykonawczym instalacji i nadzorze przy uruchomieniu instalacji. Mój udział procentowy w tworzeniu projektu procesowego 25%.

11. Zdzisław Pakowski, **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Bartczak, Janusz Grochowski: 2005r., Chłodziarka fluidyzacyjna do cukru z kontaktową wymianą ciepła, 50t/h. Cukrownia Kruszwica.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, nadzorze wykonawczym instalacji i nadzorze przy uruchomieniu instalacji. Mój udział procentowy w tworzeniu projektu procesowego 25%.

12. Zdzisław Pakowski, **Paweł Wawrzyniak**, Janusz Grochowski: 2006r., Suszarka fluidyzacyjna do suszenia kwasu tereftalowego. Eko-PET, Kędzierzyn..

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, nadzorze wykonawczym instalacji. Mój udział procentowy 40%.

13. Zdzisław Pakowski, **Paweł Wawrzyniak**, Janusz Grochowski: 2006r., Suszarka fluidyzacyjna do suszenia siarczanu amonu. Eko-PET, Kędzierzyn..

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, nadzorze wykonawczym instalacji. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

14. **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Bartczak: 2007r., Układ separacji wykroplin z gazu cyrkulacyjnego PGH-2 na ssaniu kompresorów P GB901A/B, PKN ORLEN SA

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, nadzorze wykonawczym instalacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

15. **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Bartczak: 2007r., Instalacja kondycjonowania cukru, odpylania i wentylacji w silosie 50000 ton. Cukrownia Gorodieja, Białoruś

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu, Mój udział procentowy szacuję na 50%.

16. **Paweł Wawrzyniak**, Zdzisław Bartczak: 2011r., Instalacja kondycjonowania cukru, odpylania i wentylacji w silosie 50000 ton. Cukrownia Dobrzelin

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współprojektowaniu procesu. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne - omówienie

W latach 90 XX wieku krajowi producenci cukru zmieniali swoje zakłady wytwórcze by spełnić normy jakościowe dotyczące tak produktu jak i samego procesu wytwórczego. Rosnąca grupa odbiorców przemysłowych oczekiwała dostarczania cukru w cysternach. Zakłady cukrownicze budowały silosy do magazynowania cukru i jednocześnie zmieniały

technologię ostatnich etapów jego wytwarzania tak aby produkt nadawał się do magazynowania w silosach.

Zawartość wilgoci w cukrze podawanym do silosu nie powinna przekraczać 0.035% wagowo przy temperaturze poniżej 30°C. Do lat 90. XX wieku większość cukrowni posiadała suszarki do cukru jednego z dwóch typów: wieżowo talerzowe lub bębnowe. Czas przebywania cukru w suszarkach wieżowo talerzowych nie przekracza 90 sekund, końcowa zawartość wilgoci w produkcie jest wyższa od 0.05%, a jego temperatura przekracza 50°C. Suszarko-chłodziarki bębnowe produkcji Świdnickiej Fabryki Urządzeń Przemysłowych umożliwiały wysuszenie cukru do zawartości wilgoci 0.045% i ochłodzenie go do temperatury ~40°C. Do rzadkości należały suszarki wykonane ze stali kwasoodpornej dopuszczonej przez europejskie normy do kontaktu z produktami żywnościowymi. Większość polskich cukrowni, mimo trudnej sytuacji finansowej, planowała modernizację suszenia i chłodzenia cukru.

Pracownicy Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej od późnych lat 60 tych. XX wieku prowadzili prace nad zastosowaniem złoża fluidalnego do suszenia cukru. Cukier wprowadzany do suszarki ma zawartość wilgoci ok. 1% wagowo. Wilgotny materiał opornie fluidyzuje dlatego wspomagano fluidyzację niskoczęstotliwościowymi wibracjami, w miarę wysychania cukru fluidyzacja staje się łatwiejsza. Prototypowa suszarka wibrofluidalna o wydajności 250 t/d została zbudowana w roku 1970 w Cukrowni Miejska Górka.

Pod koniec lat 90 tych XX wieku brałem udział w pracach zespołu, który opracował prototyp suszarki fluidalnej z pionowym mieszałem ułatwiającym fluidyzację wilgotnego cukru. Utworzono też spółkę OMNIKON, która zajęła się rozwojem prototypu, technologią procesu suszenia, projektowaniem, budową urządzeń suszarniczych i uruchamianiem gotowych instalacji. W roku 1996 pierwsze dwie suszarki fluidalne z pionowym mieszałem zostały zainstalowane w Cukrowniach Brześć Kujawski i Żnin. W następnych latach suszarka została zainstalowana w kolejnych cukrowniach. Konstrukcja była ciągle rozwijana, kolejne wykonania były udoskonalane, rosła też wydajność aparatów suszarniczych. Doświadczenie zgromadzone w czasie budowy i eksploatacji pierwszych suszarek pozwoliły na opracowanie, zaprojektowanie budowę i zainstalowanie aparatów o zmienionej konstrukcji wykorzystujących złoża fluidalne do suszenia cukru.

Moim osiągnięciem naukowym w tym obszarze działalności jest udział w rozwoju i wdrożeniu rozwiązań technicznych i technologicznych wykorzystujących fluidyzację w procesie wymiany ciepła i masy podczas suszenia i chłodzenia materiałów ziarnistych.

Przed uzyskaniem stopnia doktora brałem udział w realizacji 8 wdrożeń, których tu nie opisuję:

- Cukrownia Gostyń, Suszarko-chłodziarka fluidyzacyjna do cukru. 1997 r.
- Cukrownia Miejska Górka, Suszarko-chłodziarka fluidyzacyjna do cukru. 1997 r.
- Cukrownia Wrocław, Suszarko-chłodziarka fluidyzacyjna do cukru. 1997 r.
- Cukrownia Szamotuły, Suszarko-chłodziarka fluidyzacyjna do cukru. 1998 r.
- Cukrownia Świecie, Suszarko-chłodziarka fluidyzacyjna do cukru. 1998 r.

- Cukrownia Unisław, Suszarko-chłodziarka fluidyzacyjna do cukru. 1998 r.
- Cukrownia Zbiersk, Suszarko-chłodziarka fluidyzacyjna do cukru. 1999 r.
- Cukrownia Świecie, Chłodziarka fluidyzacyjna do cukru. 1999 r.

Po uzyskaniu stopnia doktora brałem udział w zaprojektowaniu, zbudowaniu i uruchomieniu następujących instalacji:

1. Suszarka fluidyzacyjna z jednym mieszadłem do cukru:
 - Cukrownia Dobrze, 2002 r., wydajność 22 tony na godzinę
 - Cukrownia Strzyżów, 2006 r., wydajność 31 ton na godzinę
 - Cukrownia Strzelin, 2006 r., wydajność 25 ton na godzinę
 - Suszarka do kwasu tereftalowego: Zakłady Przetwórstwa Tworzyw "EKO-PET", 2006 r., wydajność 1200 kg na godzinę
 - Suszarka do siarczanu amonu: Zakłady Przetwórstwa Tworzyw "EKO-PET", 2006 r., wydajność 950 kg na godzinę
2. Suszarko-chłodziarka fluidyzacyjna do cukru (bez mieszadła)
 - Cukrownia Słuck (Białoruś), 2002 r., wydajność 50 ton na godzinę.
 - Cukrownia Gryfice, 2004 r., wydajność 23 tony na godzinę
 - Cukrownia Cerekiew Polska, 2004 r., wydajność 25 ton na godzinę
 - Cukrownia Strzelin, 2006 r., wydajność 40 ton na godzinę
3. Instalacja suszenia i kalcynacji węgla potasu:
 - Suszarka do potażu: KH „Verbus”, 2002 r., wydajność 3,5 tony na godzinę
 - Kalcynator do potażu: KH „Verbus”, 2002 r., wydajność 3,5 tony na godzinę
4. Suszarka fluidyzacyjna do cukru z dwoma mieszadłami
 - Cukrownia Werbkowice 2005 r., wydajność nominalna 50 ton na godzinę,
 - Cukrownia Kruszwica 2006 r., wydajność nominalna 50 ton na godzinę.
5. Podciśnieniowa chłodziarka fluidyzacyjna do cukru
 - Cukrownia Mała Wieś, 2003 r., wydajność 23 tony na godzinę.
 - Cukrownia Gorodieja (Białoruś), 2004 r., wydajność 50 ton na godzinę.
 - Cukrownia Małoszyn, 2004 r., wydajność 26 ton na godzinę.
 - Cukrownia Dobrzelin, 2006 r., wydajność 33 tony na godzinę
 - Cukrownia Strzyżów, 2006 r., wydajność 31 ton na godzinę
6. Chłodziarka fluidyzacyjna do cukru z kontaktową wymianą ciepła
 - Cukrownia Werbkowice, 2005 r., wydajność 50 ton na godzinę
 - Cukrownia Kruszwica, 2006 r., wydajność 50 ton na godzinę.

Wymienione instalacje zbudowano wykorzystując aparat fluidalny, który w większości przypadków był urządzeniem unikalnym, powstałym dla konkretnego wdrożenia. Wszystkie urządzenia mają jednak pewne cechy wspólne. Szkielet centralnego aparatu stanowi rama, na której zamocowana jest perforowana przegroda fluidyzacyjna. Przegrodą jest perforowane sito kierunkowe własnego projektu. Rynna fluidyzacyjna ograniczona jest pionowymi bokami suszarki. Kilkadziesiąt centymetrów nad przegrodą fluidyzacyjną aparat rozszerza się przechodząc w kształt poziomego cylindra stanowiącego komorę górną. Rozszerzenie aparatu

pozwała na zmniejszenie prędkości powietrza, „wygaszanie” fluidyzacji i wstępne oddzielenie unoszonego pyłu.

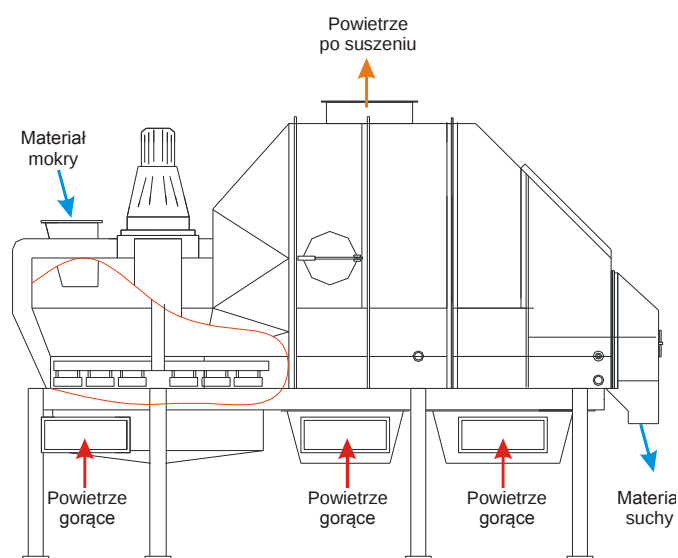
Aparaty podzielone są na sekcje niezależnie zasilane powietrzem. Każda z sekcji zaopatrzona jest w dolną komorę rozprężną umocowaną do ramy aparatu pod przegrodą fluidyzacyjną. Komora służy do równomiernego dostarczania powietrza suszącego lub chłodzącego. Na szczycie komory górnej aparatu, wspólnej dla wszystkich sekcji, znajdują się króćce odprowadzające zużyte powietrze. Poszczególne sekcje aparatu kończą się progami przelewowymi o regulowanej wysokości, pozwalającymi kontrolować wysokość złoża fluidalnego i czas przebywania materiału w suszarce.

Powietrze do suszenia i/lub chłodzenia dostarcza kilka wentylatorów. Sekcja pierwsza do której podawany jest wilgotny materiał zasilana jest przez indywidualny wentylator nadmuchowy. Pozwala to na kontrolę przepływu powietrza w tej sekcji. Kolejne wentylatory nadmuchowe zaopatrują w powietrze pozostałe sekcje aparatu. Wentylator wyciągowy jest tak dobrany, aby w górnej komorze panowało niewielkie podciśnienie uniemożliwiające wydostawanie się pyłu na zewnątrz aparatu. Silniki wszystkich wentylatorów są zasilane poprzez falowniki, co pozwala na płynną regulację ciągu wentylatorów oraz oszczędności energetyczne.

Suszarka fluidyzacyjna z mieszadłem.

Suszarka z mieszadłem jest aparatem fluidalnym do suszenia materiałów ziarnistych lub krystalicznych w poziomym, rynnowym złożu fluidalnym. Schemat aparatu jest przedstawiona na Rys. 33.

Wilgotny materiał jest wprowadzany jest do pierwszej, cylindrycznej sekcji suszarki, w której zastosowano mieszadło wolnoobrotowe wspomagające fluidyzację mokrego materiału. Kolejne sekcje mają niezależne wloty powietrza co pozwala na różnicowanie w nich warunków fluidyzacji i suszenia. Wprowadzenie do ostatnich sekcji zimnego powietrza umożliwia chłodzenie materiału.



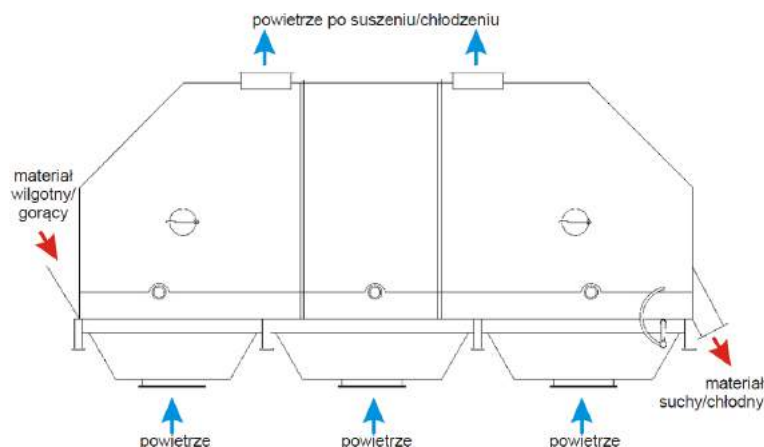
Rys.33. Suszarka fluidyzacyjna z mieszadłem o wydajności 20 t/h.

Aparat pracuje stabilnie w szerokim zakresie wydajności, można w nim suszyć cukier od początkowej zawartości wilgoci 1% wagowo do końcowej ~0,03%. Temperatura materiału opuszczającego suszarkę oscyluje wokół 50°C.

Rozwiązanie zastosowano w Cukrowniach Dobre, Strzyżów, Strzelin, i zakładach Zakłady Przetwórstwa Tworzyw "EKO-PET" w Kędzierzynie Koźlu.

Suszarka/chłodziarka fluidyzacyjna.

Omawiany aparat jest urządzeniem stosowanym do materiałów ziarnistych lub krystalicznych dobrze fluidyzujących. Może służyć do suszenia cukru o zawartości wilgoci poniżej 0.06% lub chłodzenia już wysuszonego cukru. Wymiana ciepła i masy zachodzi



Rys.34. Suszarka/chłodziarka fluidyzacyjna o wydajności od 20 do 35 t/h.

w poziomym, rynnowym złożu fluidalnym. Schemat aparatu jest przedstawiona na Rys. 34.

Materiał jest wprowadzany jest do pierwszej, sekcji aparatu, w której można zastosować dosuszanie gorącym powietrzem. Kolejne sekcje mając niezależne wloty powietrza mogą służyć zarówno do suszenia jak i chłodzenia.

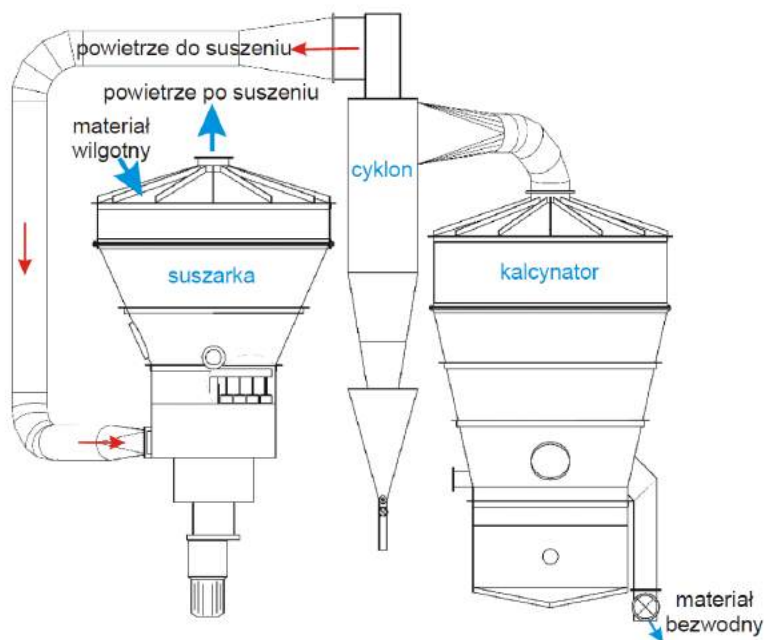
Aparat ma prostą konstrukcję pozbawioną ruchomych elementów, pracuje stabilnie w szerokim zakresie wydajności, można w nim chłodzić cukier od początkowej temperatury 55°C do 30°C. Rozwiązanie zastosowano w kilku Cukrowniach Słuck (Białoruś), Gryfice, Cerekiew Polska, Strzelin.

Instalacja suszenia i kalcynacji węglanu potasu

Instalacja wykorzystuje spaliny o temperaturze 420°C do usunięcia wody krystalicznej z węglanu potasu. Gorące powietrze po kalcynacji (180°C) po oddzieleniu pyłu jest wykorzystywane w procesie suszenia wilgotnego węglanu potasu. W suszarce zainstalowano wolnoobrotowe mieszadło do wspomagania fluidyzacji. Powietrze po suszeniu jest ochładzane i odpylane w odpylaczu mokrym własnej konstrukcji. Materiał wilgotny jest wprowadzany do suszarki przez zawór celkowy, a po wysuszeniu za pomocą przenośnika ślimakowego jest wprowadzany do kalcynatora. W ten sposób straty energii są minimalizowane.

Ze względu na wysokie temperatury spalin cała instalacja pracuje wykorzystując tylko jeden wentylator wyciągowy. Instalacja pracowała prawidłowo przez kilka lat pozwalając

wytwarzać bezwodny węglan potasu z założoną wydajnością. Schemat instalacji jest przedstawiony na Rys. 35.

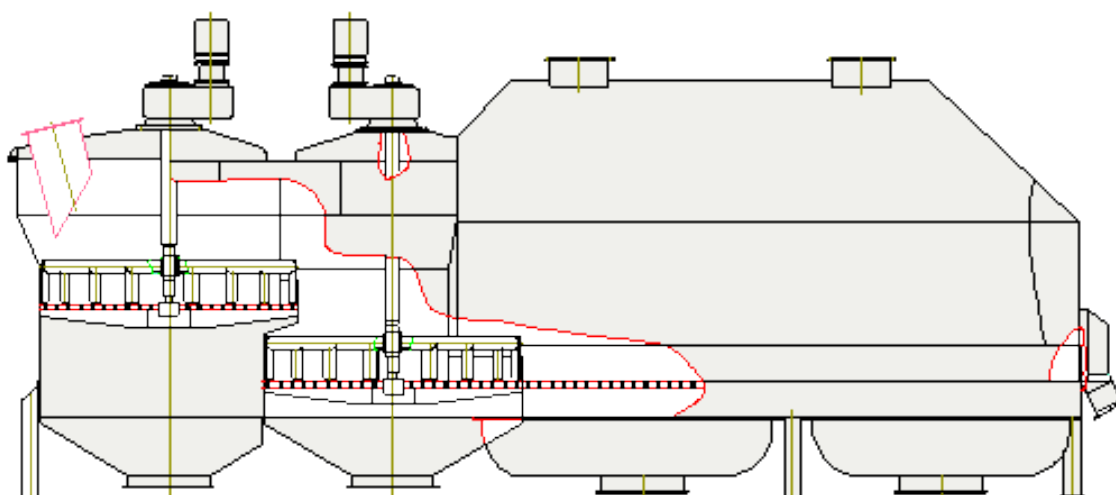


Rys.35. Fluidyzacyjna instalacja suszenia i kalcynacji węglanu potasu o wydajności 3.5 t/h.

Suszarka fluidyzacyjna do cukru z dwoma mieszadłami

Od lat 90 XX wieku postępuje proces konsolidacji polskich cukrowni. Liczba działających zakładów maleje, podczas gdy zdolności przerobowe poszczególnych cukrowni rosną. Dla cukrowni przerabiających ok. 8000 ton buraków cukrowych na dobę zaprojektowano suszarkę fluidalną o wydajności 50 ton/h.

Suszarka z dwoma mieszadłami jest aparatem fluidalnym do suszenia materiałów ziarnistych lub krystalicznych w poziomym, rynnowym złożu fluidalnym. Budowa aparatu jest przedstawiona na Rys. 36.



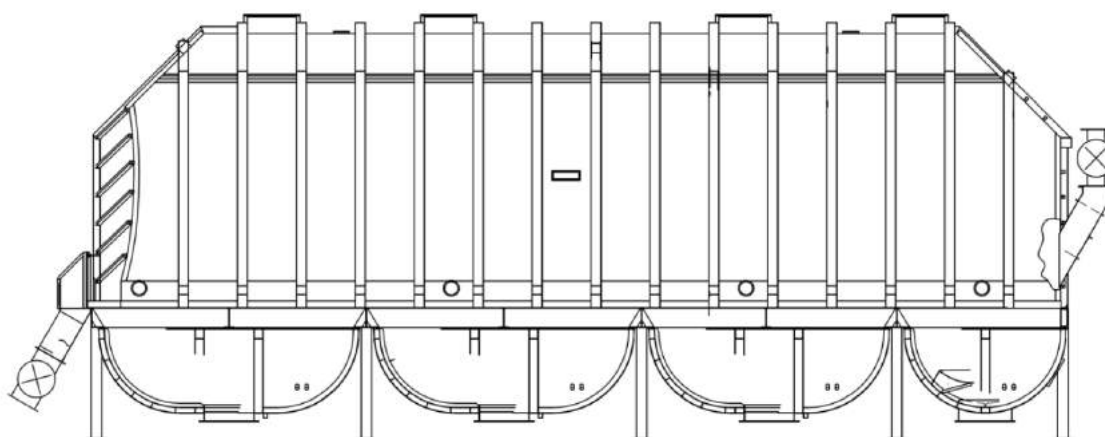
Rys.36. Schemat budowy suszarki fluidalnej z dwoma mieszadłami o wydajności 50 t/h.

Wilgotny cukier wprowadzany jest do początkowej cylindrycznej sekcji suszarki, w której zastosowano mieszadło wolnoobrotowe wspomagające fluidyzację mokrego materiału. Kolejna sekcja suszarki jest również cylindryczna i zaopatrzona w wolnoobrotowe mieszadło. Obie cylindryczne sekcje umieszczone są na różnych poziomach pozwalając na kaskadowy przepływ cukru z części pierwszej do drugiej.

W dwóch następnych, prostokątnych sekcjach cukier jest dosuszany i ewentualnie chłodzony. Aparat pracuje stabilnie w szerokim zakresie wydajności, można w nim suszyć cukier od początkowej zawartości wilgoci 1% wagowo do końcowej 0,025 – 0,03% odpowiednio przy wydajności 35 - 55 ton/h. Suszarkę zainstalowano w Cukrowni Werbkowice i w Cukrowni Kruszwica. W trakcie kampanii 2005 roku, 26 i 27 listopada dokonano pomiarów końcowej zawartości wilgoci w zależności od wydajności. Wszystkie założenia projektowe zostały spełnione. Suszarki pracują bezawaryjnie od chwili uruchomienia.

Podciśnieniowa chłodziarka fluidyzacyjna

Suszarki ze złożem fluidalnym i mieszadłami rozwiązały problem stabilnego suszenia cukru do zawartości wilgoci poniżej 0.030% wagowo. Stało się to możliwe nawet w dużych cukrowniach o wydajności do 50 ton cukru na godzinę. Do rozwiązania pozostał problem schłodzenia cukru poniżej temperatury 30°C. Na terenie Polski kampania cukrownicza rozpoczyna się już w połowie września. W tym okresie często temperatury powietrza zewnętrznego przekraczają jeszcze 20°C. Zastosowanie takiego powietrza do chłodzenia nie pozwala zadawalająco obniżyć temperatury cukru. Opory przepływu przy oczyszczeniu powietrza i tłoczeniu go pod przegrodę fluidyzacyjną sprawiają, że koniecznym się staje zastosowanie wentylatorów o spiętrzeniu całkowitym nawet 5000Pa. Taki wentylator może ogrzać powietrze nawet o 8°C. W rezultacie temperatura powietrza chłodzącego w pierwszych tygodniach kampanii cukrowniczej, okresowo, może przekraczać temperaturę 28°C co praktycznie uniemożliwia ochłodzenia cukru do 30°C.



Rys.37. Schemat budowy podciśnieniowej chłodziarki fluidalnej o wydajności 30 t/h.>`

Zaproponowano rozwiązanie polegające na budowie chłodziarki ze złożem fluidalnym pracującej wyłącznie z wentylatorem wyciągowym.

Chłodziarka jest aparatem fluidalnym do chłodzenia materiałów ziarnistych lub krystalicznych w poziomym, rynnowym złożu fluidalnym. Schemat budowy aparatu jest przedstawiony na Rys. 37.

Chłodziarka jest czterokomorowym aparatem ze złożem fluidalnym pracującym z jednym wentylatorem wyciągowym. W komorze górnej chłodziarki panuje ciśnienie niższe o około 1800 Pa od ciśnienia otoczenia. Dla utrzymania podciśnienia cukier jest podawany i odbierany przez zawory celkowe. Ciepły cukier jest podawany do chłodziarki przez zawór celkowy do pierwszej najkrótszej sekcji chłodziarki. Zastosowanie skróconej sekcji pozwala na interwencyjne zwiększenie przepływu powietrza w celu rozprowadzenia w złożu dużej ilości podawanego cukru. Kolejne sekcje mają jednakową długość. Przygotowanie powietrza dla poszczególnych sekcji odbywa się w indywidualnie projektowanych pasywnych (bez własnego wentylatora) centralach klimatyzacyjnych, w których powietrze jest filtrowane i może być, w razie potrzeby, dodatkowo ogrzewane lub ochładzane. Powietrze po przefiltrowaniu oraz wstępnym podgrzaniu/ochłodzeniu przepływa do kolektorów zasilających kolejne komory chłodziarki.

Przepływ powietrza w komorach jest regulowany za pomocą przemiennika częstotliwości sterującego silnikiem wentylatora wyciągowego oraz przepustnic na rurociągach wlotowych do kolejnych komór naporowych chłodziarki. Przepustnice pozwalają dostosować natężenie przepływu powietrza w poszczególnych komorach do aktualnych warunków pracy chłodziarki.

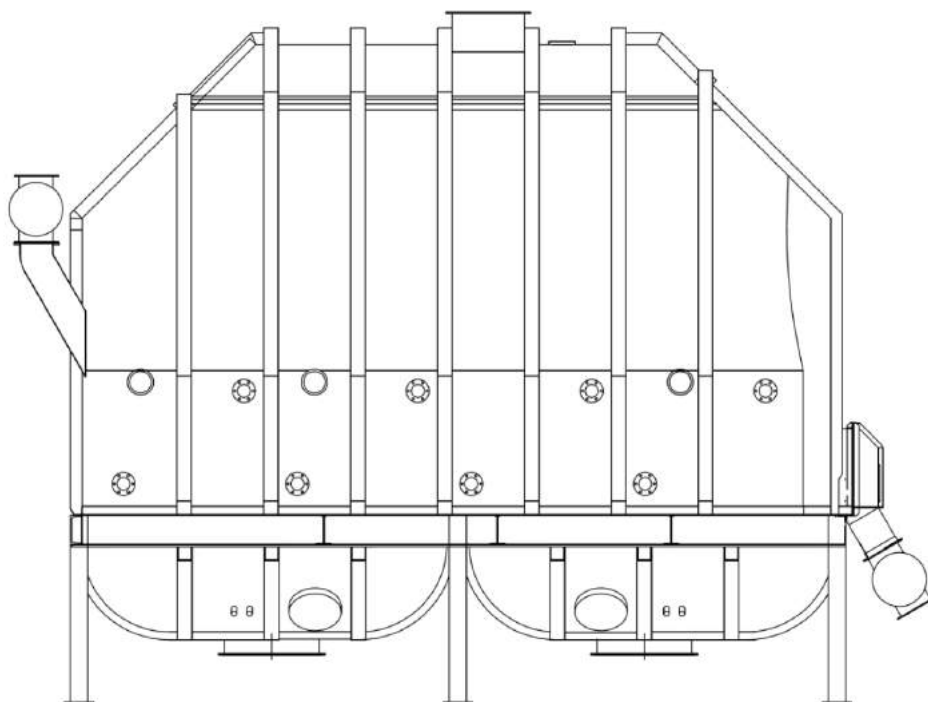
Zapylone powietrze po przejściu przez przegrodę fluidyzacyjną i złożę chłodzonego materiału opuszcza chłodziarkę czterema króćcami płynąc do kolektorów wyciągowych. Po odpyleniu w skruberze (Cukrownia Gorodieja) lub mokrym filtrze labiryntowym (Cukrownia Strzelin) jest usuwane do atmosfery za pomocą wentylatora wyciągowego.

Fluidalna chłodziarka do cukru z kontaktową wymianą ciepła.

Chłodziarka fluidalna do cukru jest urządzeniem prostym i stosunkowo tanim. W cukrowniach rozpoczynających kampanię produkcyjną pod koniec września doskonale wypełnia swą funkcję. Duże cukrownie, które rozpoczynają kampanię dużo wcześniej lub nawet planują wydłużenie okresu produkcji cukru przez magazynowanie soku gęstego potrzebują skutecznej chłodziarki działającej niezależnie od pogody. W przypadku tych zakładów chłodzenie cukru jedynie za pomocą powietrza nie umożliwia rozwiązania problemu. Opracowano zatem aparat fluidalny z wymiennikami ciepła zanurzonymi w złożu fluidalnym. Kontaktowa wymiana ciepła w intensywnie mieszanym złożu fluidalnym umożliwia chłodzenie cukru ze znakomitą wydajnością.

Chłodziarka fluidalna z kontaktową wymianą ciepła przeznaczona jest do chłodzenia materiałów ziarnistych lub krystalicznych w głębokim złożu fluidalnym. Schemat budowy aparatu jest przedstawiony na Rys. 38.

Chłodziarka fluidyzacyjna z kontaktową wymianą ciepła wykorzystuje zanurzone w złożu fluidalnym, zasilane zimną wodą, pakiety rur. Znaczna wysokość złoża i dobra wydajność chłodnicza pozwoliły na zmniejszenie wymiarów chłodziarki w porównaniu z chłodziarką fluidalną. Powietrze do fluidyzacji pobierane jest z czepni a następnie po trzystopniowej filtracji wentylator dostarcza je do chłodziarki. Rozdział powietrza między dwiema komorami chłodziarki regulowany jest przepustnicami. Powietrze odebrane z komory górnej chłodziarki z uwagi na niską zawartość wilgoci i odpowiednią temperaturę (ok. 35°C) po odpyleniu w baterii cyklonów może być wykorzystane w suszarce. Powietrze odbierane jest z chłodziarki wentylatorem wyciągowym. Dla utrzymania podciśnienia w chłodziarce komora górna zamknięta jest przez zawory celkowe dostarczające i odbierające cukier. Podobny zawór celkowy zamyka również wylot pyłu z cyklonów.



Rys.38. Schemat budowy kontaktowej chłodziarki fluidalnej o wydajności 50 t/h.

Woda chłodząca, z uwagi na duże jej zapotrzebowanie krąży w obiegu zamkniętym. Pompa przetłacza ją przez płytowy wymiennik ciepła gdzie wymienia ciepło z wodą technologiczną. Przepływ wody technologicznej w obiegu zewnętrznym jest wymuszany kolejną pompą. Dla prawidłowej pracy instalacji utrzymanie temperatury wody chłodzącej na właściwym poziomie ma kluczowe znaczenie. Zbyt wysoka temperatury nie pozwoli na uzyskanie dostatecznego schłodzenia cukru, zbyt niska grozi przekroczeniem punktu rosy na płytach wymiennika i w konsekwencji oklejeniem wymiennika kontaktowego cukrem.

Aparat pracuje stabilnie w znacznym zakresie wydajności, można w nim chłodzić cukier od początkowej temperatury 55°C do końcowej <30°C przy maksymalnej wydajności 50 ton/h. Chłodziarkę w 2005 roku zainstalowano w Cukrowni Werbkowice i w 2006 roku w Cukrowni Kruszwica. Aparat po niewielkich zmianach konstrukcyjnych polegających na

skróceniu zasypu cukru wewnątrz chłodziarki przepracował bezawaryjnie już kilka kampanii cukrowniczych. Cukier opuszczający chłodziarkę ma stabilną temperaturę niezależnie od warunków pogodowych.

Udział autora w realizacji osiągnięć

Wdrożenie instalacji suszarniczych opartych o aparat ze fluidalny, przeznaczonej dla konkretnego zakładu przemysłowego było realizowane przez kilkusobowy zespół. Zadanie obejmowało opracowanie koncepcji technologicznej i procesowej suszenia, wykonanie projektów: procesowego instalacji, wykonawczego projektu aparatu, instalacji przygotowania i doprowadzenia powietrza.

Działając ramach tego zespołu brałem aktywny udział w opracowaniu koncepcji technologicznej i procesowej suszenia, przygotowaniu projektów procesowych, tworzeniu unikalnej dla każdej cukrowni strategii technologicznej, oraz w uzgodnieniach dotyczących lokalizacji poszczególnych elementów instalacji. Zajmowałem się również projektowaniem instalacji przygotowania powietrza do suszenia w tym: oczyszczania w trzystopniowej stacji filtrów, ogrzewania za pomocą układu wymienników ciepła wykorzystujących dostępne nośniki energii parę technologiczną i gorącą wodę, przebiegu układu rurociągów doprowadzających powietrze oraz odbierających powietrze z suszarki, układu odpylania i układu regulacji przepływu powietrza niezależnie dla każdej sekcji suszarki.

Mój średni udział procentowy w przygotowaniu koncepcji technologicznej i projektów procesowych szacuję na 30%. W trakcie realizacji inwestycji brałem udział w nadzorowaniu budowy instalacji, testach poszczególnych urządzeń i pierwszym uruchomieniu całej instalacji w warunkach normalnej produkcji.

Udział w realizacji projektów badawczych finansowanych ze środków budżetowych na naukę przez KBN.

Przed doktoratem:

1. Projekt nr 3 P405 056 06 – Utlenianie odpadów i zanieczyszczeń organicznych w wodzie nadkrytycznej– główny wykonawca, projekt zakończono w 1996 roku,
2. Projekt nr 3 P405 014 07 – Optymalizacja procesu otrzymywania monolitów aerożelowych metodą suszenia nadkrytycznego – główny wykonawca, projekt zakończono w 1997 roku,
3. Projekt nr 3 T09C 017 12 - promotorski – Dyfuzja okołokrytycznego dwutlenku węgla w alkożelu krzemionkowym –wykonawca, projekt zakończono w 1999 roku,
4. Projekt nr 3 T09C 013 13 – Utlenianie odpadów i zanieczyszczeń organicznych w wodnym nadkrytycznym reaktorze rurowym. - główny wykonawca, projekt zakończono w 2000 roku,

Po uzyskaniu stopnia doktora:

1. Projekt nr 3 T09C 024 20 – Dyfuzyjny transport masy w płynach gęstych. - główny wykonawca, projekt zakończono w 2004 roku,
2. Projekt nr 3 T09C 032 26; „Przenoszenie masy podczas impregnacji w środowisku nadkrytycznego CO₂”; główny wykonawca, projekt zakończono w 2007 roku,

Udział w realizacji projektów badawczych zlecanych przez zakłady przemysłowe.

Po uzyskaniu stopnia doktora:

1. Zlecenie firmy Henkel GmbH – “Optimization of the Spray Drying Process in term of energy consumption reduction of hazards and selected product properties”, główny wykonawca, czas trwania projektu 6 miesięcy, projekt zakończono w 2008 roku.
2. Zlecenie firmy Henkel GmbH – “Optimal air cooling of ATEX areas in spray drying tower and determination of discrete phase flow in spray area”, główny wykonawca, czas trwania projektu 6 miesięcy, projekt zakończono w 2009 roku.
3. Zlecenie firmy Henkel GmbH – “Model of air, energy flow and dust explosion process in counter - current spray drying tower” - główny wykonawca, czas trwania projektu 8 miesięcy, projekt zakończono w 2010 roku.
4. Zlecenie firmy EuroCopter – „Concept of light, efficient heat exchanger” – kierownik projektu, czas trwania projektu 12 miesięcy, projekt zakończono w 2011 roku
5. Zlecenie firmy PSA Group (*Peugeot Société Anonyme Group*)– „Analiza systemu odzysku energii cieplnej w silniku spalinowym” – kierownik projektu, czas trwania projektu 10 miesięcy, projekt zakończono w 2013 roku
6. Zlecenie firmy TetraPak – „Investigation of temperature profile in a spray dryer” – kierownik projektu, czas trwania projektu 5 miesięcy, projekt zakończono w 2013 roku
7. Zlecenie firmy EuroCopter – „Design and construction of light, efficient heat exchanger” – kierownik projektu, czas trwania projektu 36 miesięcy, projekt zakończono w 2014 roku

8. Zlecenie firmy Mars GmbH – „Fundamental kibble understanding, structural and mechanical characterization” – kierownik projektu, czas trwania projektu 12 miesięcy, projekt zakończono w 2014 roku
9. Zlecenie firmy Grupa Azoty – „Opracowanie metody suszenia grafenu płatkowego” – kierownik projektu, czas trwania projektu 18 miesięcy, projekt zakończono w 2015 roku
10. Zlecenie firmy Royal Canine Polska – „Analiza właściwości transportowych składników sypkich” – kierownik projektu, czas trwania projektu 10 miesięcy, projekt zakończono w 2016 roku
11. Zlecenie firmy Airbus Helicopters – „Construction and investigation of light, efficient heat exchanger” – kierownik projektu, czas trwania projektu 32 miesięcy, projekt w realizacji od 2015

Udzielone patenty międzynarodowe i krajowe

1. Grzegorz Rogacki, Zofia Modrzejewska, Paweł Wawrzyniak, Roman Zarzycki, P-354337 (7.06.2002), Sposób wytwarzania mikrogranulek chitozanowych., Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej

Mój wkład w powstanie tego patentu polegał na współudziale przy opracowaniu techniki wytwarzania mikrogranulek żelu chitozanowego i zdefiniowaniu sposobu nadkrytycznego suszenia, Mój udział procentowy szacuję na 25%.

2. Grzegorz Rogacki, Zofia Modrzejewska, Paweł Wawrzyniak, Roman Zarzycki, P-354338 (7.06.2002), Sposób wytwarzania membran chitozanowych, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej

Mój wkład w powstanie tego patentu polegał na współudziale przy opracowaniu techniki wytwarzania membran chitozanowych i zaproponowaniu sposobu nadkrytycznego suszenia, Mój udział procentowy szacuję na 25%.

3. Olivier Honnorat; Delphine Allehaux; Paweł Wawrzyniak, FR2988822-A (2012r.), Heat exchanger for gas turbine of rotary wing aircraft i.e. helicopter, has set of plates stacked such that two sets of plates are adjacent in upper plane, where ridges and hollow sections of adjacent plates form acute angle., French Patent Office

Mój wkład w powstanie tego patentu polegał na opracowaniu koncepcji wymiennika, zdefiniowaniu kształtu płyt i sposobu doprowadzenia mediów., Mój udział procentowy szacuję na 40%.

Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie, o której mowa w pkt II A:

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

1. Zdzisław Bartczak, **Paweł Wawrzyniak**: Ohmic Heating: in Thermal Processing of Bio-Materials, Editors: Kudra T., Strumiłło C. Publisher: Gordon & Breach Sci. Publ., Amsterdam 1998, p 533-550

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na dokonaniu przeglądu metod ogrzewania oporowego, współudziale przy opracowaniu dyskusji i redagowaniu tekstu. Mój udział procentowy 50%.

Po uzyskaniu stopnia doktora:

2. **Paweł Wawrzyniak**, Własności wody w warunkach około krytycznych. w Zaawansowane utlenianie w wodzie pod- i nadkrytycznej, Redakcja: Zarzycki R., PAN O/Łódź, Łódź 2002

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na analizie własności, krytycznym porównaniu źródeł, opracowaniu dyskusji i zredagowaniu tekstu. Mój udział procentowy 100%.

3. **Paweł Wawrzyniak**, Maria Sobulska, Ireneusz Zbicinski: Drying of materials in CRC Handbook of Thermal Engineering, Second Edition, Editor: Raj Chabra, Taylor & Francis, (w druku) 2016

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na analizie literatury, krytycznym porównaniu źródeł, opracowaniu dyskusji i zredagowaniu tekstu. Mój udział procentowy 40%.

Referaty na konferencjach:

Po uzyskaniu stopnia doktora:

1. **Paweł Wawrzyniak**, Grzegorz Rogacki, Zdzisław Bartczak, European Science Foundation Workshop, Invited lecture: "Diffusion in near critical CO₂ with application to aerogel production", Valladolid (Spain) 2001,
2. Grzegorz Rogacki, **Paweł Wawrzyniak**, European Science Foundation Workshop, Invited lecture: "Chemical Engineering Processes in Supercritical Water", Valladolid (Spain) 2001,
3. **Paweł Wawrzyniak**, Grzegorz Rogacki, "Supercritical carbon dioxide in environment protection" International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering 23 – 27 May, 2005
4. Karina Gurganova, **Paweł Wawrzyniak**, „Ekstrakcja nadkrytyczna nasion Czarnuszki Siewnej”(Nigella Sativa L.) XIX Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Rzeszów 3-7 września 2007
5. **Paweł Wawrzyniak**, Maciej Jaskulski, Marek Podyma, Andrzej Polańczyk, Julia Rabaeva, Ireneusz Zbiciński. "3D Simulation of dust explosion in the industrial drying tower", 5th Nordic Drying Conference. Helsinki. (Finland). 19-21 June 2011
6. **Paweł Wawrzyniak**, Ireneusz Zbiciński, Zdzisław Bartczak, Julia Rabaeva: Advanced experimental analysis of industrial counter current spray drying process 18th International Drying Symposium (IDS'2012) Xiamen (China) 3-6 October 2011
7. **Paweł Wawrzyniak**, Marek Podyma, Ireneusz Zbiciński, Zdzisław Bartczak, Andrzej Polańczyk, Julia Rabaeva; Heat sink CFD model of counter current spray drying process. 18th International Drying Symposium (IDS'2012) Xiamen (China) 3-6 October 2011
8. **Paweł Wawrzyniak**, Maciej Jaskulski, Marek Podyma, Ireneusz Zbiciński: "Indirect validation in CFD modeling of spray drying process", 6th Nordic Drying Conference, Copenhagen (Denmark) 5 – 7 June, 2013
9. **Paweł Wawrzyniak**, Maciej Jaskulski, , Marek Podyma; Two phase CFD model of counter current spray drying process. 19th International Drying Symposium (IDS'2014) Lyon (France) 24-27 August 2014
10. Maciej Jaskulski, **Paweł Wawrzyniak**, Ireneusz Zbiciński; CFD model of particle agglomeration in spray drying. 19th International Drying Symposium (IDS'2014) Lyon (France) 24-27 August 2014
11. **Paweł Wawrzyniak**, Marek Podyma, Ireneusz Zbiciński; Industrial spray tower hot air inlets temperature control, International Drying Symposium (IDS'16), Gifu, Japan, August 7-10, 2016

Referaty keynote:

1. **Paweł Wawrzyniak**, Innovation and growth through university and industry collaboration., Nordic Baltic Drying Conference (NBDC'2015), Gdańsk (Poland), June 17-19, 2015

6. Działalność dydaktyczna

W ramach prowadzonej działalności dydaktycznej prowadziłem następujące zajęcia:

Wykłady:

1. Ruch ciepła i wymienniki
2. Procesy rozdzielania
3. Procesy nadkrytyczne
4. Symulatory procesów technologicznych
5. Wentylacja i klimatyzacja
6. Wentylacja ogólna
7. Wentylacja przemysłowa

Ćwiczenia projektowe:

1. Komputerowe techniki projektowania
2. Symulacja procesów technologicznych
3. Procesy rozdzielania
4. Procesy cieplne i wymienniki

Ćwiczenia laboratoryjne:

1. Operacje jednostkowe w inżynierii chemicznej
2. Wentylacja i klimatyzacja
3. Informatyka
4. Procesy nadkrytyczne

Samodzielnie opracowałem treści prowadzonych przeze mnie przedmiotów. Byłem pomysłodawcą i współtwórcą laboratorium dydaktycznego Wentylacja i Klimatyzacja funkcjonującego w ramach programu kształcenia do chwili obecnej na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska PŁ.

Byłem promotorem 53 prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich, dotyczących tematyki, którą zajmuję się w swojej pracy naukowo-badawczej.

Byłem recenzentem pracy doktorskiej zatytułowanej "Intensification of Mass Transfer Processes by means of Power Ultrasound. Application to Convective Drying and Supercritical Extraction" przedstawionej na Universitat de les Illes Balears przez Óscar Alberto Rodríguez Barragán, 1 grudnia 2014 r.

Od 2010 roku regularnie uczestniczę, jako ekspert, w seminariach dla studentów i doktorantów organizowanych przez Baltic University Program, Uppsala, Szwecja (PhD student Conference 2013, 2014, 2015, Rogów).

7. Działalność organizacyjna

- | | |
|--|-------------|
| 1. Członek Senatu Politechniki Łódzkiej | 2008 - 2012 |
| 2. Zastępca przewodniczącego komitetu organizacyjnego konferencji
Polish Drying Symposium, Lodz September 14–16, | - 2009 |
| 3. Zastępca przewodniczącego komitetu organizacyjnego konferencji
Nordic Baltic Drying Conference, Gdansk, June 17–19 | - 2015 |
| 4. Zastępca przewodniczącego komitetu organizacyjnego konferencji
Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Spała, wrzesień 6–9,- | - 2016 |
| 5. Członek Wydziałowej Komisji Wyborczej | - 2016 |

Nagrody

1. Nagroda Ministra Edukacji – zespołowa – 1999
2. Nagroda Rektora Politechniki Łódzkiej – zespołowa, Top lista, III miejsce PL – 2010
3. Nagroda Rektora Politechniki Łódzkiej za najwartościowsze wdrożenie – zespołowa – 2011
4. Nagroda Rektora Politechniki Łódzkiej za najwartościowsze wdrożenie – zespołowa – 2012
5. Nagroda Rektora Politechniki Łódzkiej za najwartościowsze wdrożenie – zespołowa – 2013
6. Nagroda Rektora Politechniki Łódzkiej za najwartościowsze wdrożenie – zespołowa – 2014

8. Podsumowanie dorobku

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

Liczba publikacji w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC)	4
Liczba rozdziałów w monografiach	1
Liczba referatów na konferencjach	8
Liczba wdrożeń	8
Liczba projektów KBN (główny wykonawca)	4

Po uzyskaniu stopnia doktora:

Liczba publikacji w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC)	16
Liczba rozdziałów w monografiach	2
Liczba patentów	3
Liczba referatów na konferencjach	24
Liczba referatów <i>keynote</i>	1
Liczba wdrożeń	20
Liczba rozdziałów w monografiach	2
Liczba projektów KBN (główny wykonawca)	2
Liczba projektów zleconych przez przemysł (główny wykonawca)	2
Liczba projektów zleconych przez przemysł (kierownik projektu)	9

Sumaryczny <i>impact factor</i> według bazy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania: ...	20,414
Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS):	57
Łączny dorobek naukowy, zgodnie z kryteriami MNiSW (pkt.):	544
Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS): ...	5

