

# ROZPRAWA DOKTORSKA

Badania eksperymentalne  
i numeryczne pierścienia  
dyszowego w młynach  
średniobieżnych

**mgr inż. Łukasz Zalewski**

Nr albumu: 4874

Dyscyplina naukowa: Inżynieria  
środowiska, górnictwo i energetyka

Promotor:

dr hab. inż. Bartłomiej Hernik, prof. PŚ

Opiekun:

dr inż. Mateusz Tymoszuik

FPM S.A.

oraz

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
Zespół Kotłów i Wytwornic Pary

Gliwice, 2025



Politechnika  
Śląska



Składam serdeczne podziękowania Zarządowi FPM S.A., Panu Tomaszowi Zysce oraz Panu Marianowi Januskiewiczowi, Promotorowi, Panu dr hab. inż. Bartłomiejowi Hernikowi prof. PŚ, Opiekunowi, Panu dr inż. Mateuszowi Tymoszułkowi, Współpracownikom FPM S.A., Zespołu Kotłów i Wytwornic Pary oraz Katedry Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej.

Badania przedstawione w niniejszej pracy zostały zrealizowane w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy” finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, projekt: 32/014/SDW/003-74.

## Spis treści

Spis treści .....	4
Spis oznaczeń i skrótów .....	5
1. Wprowadzenie .....	7
2. Cel, zakres i tezy pracy .....	23
3. Metodologia .....	24
3.1 Badania obiektowe pierścienia dyszowego .....	24
3.2 Badania laboratoryjne pierścienia dyszowego .....	26
3.3 Badania numeryczne pierścienia dyszowego .....	27
3.3.1 Bazowa geometria pierścienia dyszowego.....	28
3.3.2 Zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego .....	29
4. Wyniki badań bazowej geometrii pierścienia dyszowego oraz ich dyskusja .....	29
4.1 Wyniki badań obiektowych pierścienia dyszowego .....	29
4.2 Wyniki badań laboratoryjnych pierścienia dyszowego .....	45
4.3 Wyniki badań numerycznych pierścienia dyszowego.....	49
4.3.1 Walidacja modelu numerycznego .....	49
4.3.2 Badań numeryczne alternatywnych wariantów podstawowej geometrii pierścienia dyszowego.....	63
5. Wyniki badań zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego oraz ich dyskusja .....	97
5.1 Wyniki badań laboratoryjnych pierścienia dyszowego .....	97
5.2 Wyniki badań numerycznych pierścienia dyszowego.....	117
6. Wnioski.....	165
7. Literatura.....	167
8. Spis rysunków i tabel.....	172
Streszczenie .....	194
Summary.....	195

## Spis oznaczeń i skrótów

### Oznaczenia

$\dot{V}_{1r}$	Wentylacja młyna	$m^3_n/h$
$\dot{V}_1$	Wentylacja młyna (badania numeryczne)	$m^3_n/h$
$\dot{V}_{wlot}$	Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji (badania laboratoryjne)	$m^3/h$
$\dot{V}_{pom}$	Wentylacja zmierzona (badania laboratoryjne)	$m^3_n/h$
$\dot{V}_{przem\_obl}$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej (badania laboratoryjne)	$m^3_n/h$
$\dot{V}_{obj}$	Wentylacja w skali przemysłowej (badania obiektowe)	$m^3_n/h$
$N_{el}$	Moc bloku	MW
$N_m$	Moc silnika młyna	kW
$I_m$	Prąd silnika młyna	A
$\eta_{pw}$	Wysterowanie podajnika węgla	%
$\eta_{pd}$	Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	obr/min
$p_{ot}$	Ciśnienie otoczenia	Pa
$p_{st}$	Ciśnienie statyczne	Pa
$p_d$	Ciśnienie dynamiczne	Pa
$p_{1r}$	Nadciśnienie powietrza przed młynem	kPa
$p_2$	Nadciśnienie statyczne w komorze powietrza	kPa
$p_3$	Nadciśnienie statyczne w komorze młyna	kPa
$p_{31}$	Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (badania numeryczne)	kPa
$p_4$	Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	kPa
$p_5$	Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej na wylocie z młyna	kPa
$\Delta p_{mł-u}$	Różnica ciśnienia pomiędzy wentylatorem młynowym, a uszczelniającym	kPa
$\Delta p_{2-3}$	straty ciśnienia na pierścieniu dyszowym	kPa
$\Delta p_{4-5}$	Straty ciśnienia przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej przez odsiewacz	kPa
$\Delta p_{2-5}$	Straty ciśnienia przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej przez młyn	kPa
$\Delta p_{1-5}$	Miejscowe straty ciśnienia przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej przez młyn (badania numeryczne)	kPa
$\Delta p_{2-3pom}$	Strata ciśnienia zmierzona (badania laboratoryjne)	Pa
$\Delta p_{2-3przem\_obl}$	Obliczona strata ciśnienia (badania laboratoryjne)	Pa
$\Delta p_{2-3obj}$	Obliczona strata ciśnienia na pierścieniu dyszowym (badania obiektowe)	Pa
$\Delta p_{2-31}$	Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy (badania numeryczne)	kPa
$p_{3Pitota}$	Pomiar nadciśnienia rurką Pitota w komorze młyna	Pa
$p_{3U}$	Pomiar nadciśnienia U – rurką w komorze młyna	Pa
$\Delta p_3$	Różnica pomiaru nadciśnienia rurką Pitota i U – rurką w komorze młyna	%
$p_{3m}$	Średnie nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	Pa
$p_{4m}$	Średnie nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	Pa
$t_{ot}$	Temperatura otoczenia	°C

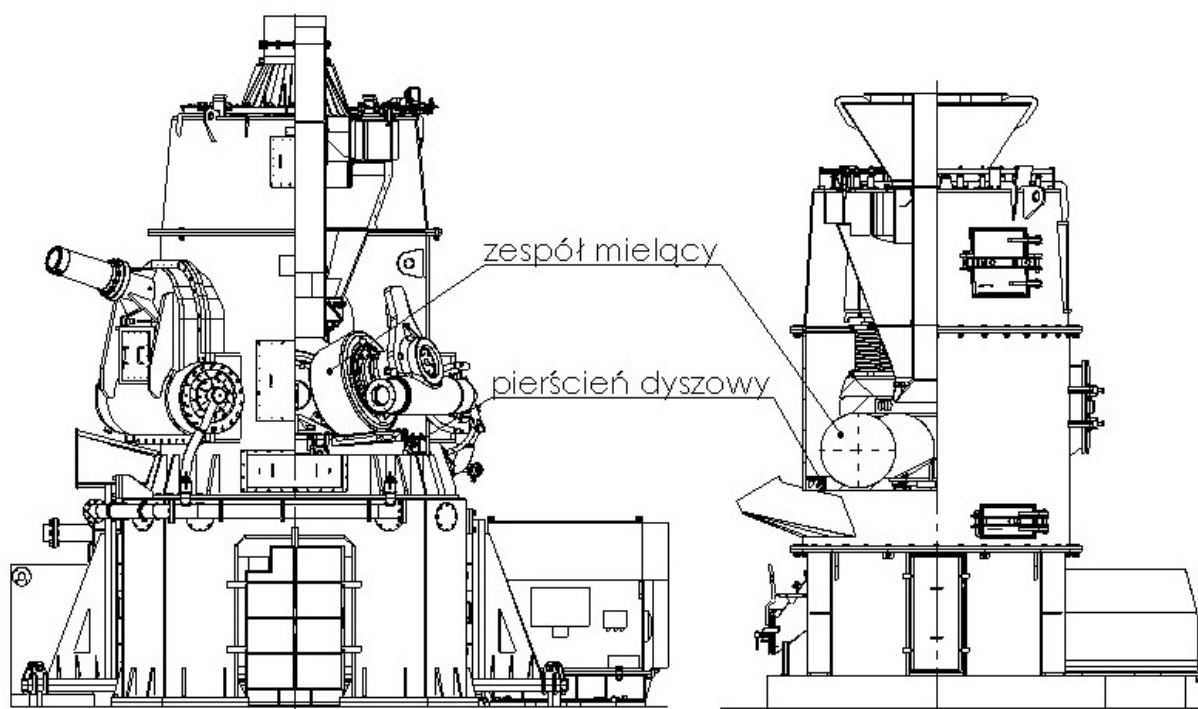
$t_{1r}$	Temperatura powietrza przed młynem	°C
$t_2$	Temperatura powietrza w komorze powietrza	°C
$t_3$	Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	°C
$t_{31}$	Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (badania numeryczne)	°C
$t_{3m}$	Średnia temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	°C
$t_4$	Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	°C
$t_{4m}$	Średnia temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	°C
$t_{5r}$	Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem (badania obiektowe)	°C
$t_5$	Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem (badania numeryczne)	°C
$w$	Prędkość	m/s
$w_3$	Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	m/s
$w_{31}$	Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (badania numeryczne)	m/s
$w_{3m}$	Średnia prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	m/s
$w_4$	Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	m/s
$w_{4m}$	Średnia prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	m/s
$w_{obj}$	Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej zmierzona w komorze młyna podczas badań obiektowych	m/s
$w_{obj\_sr}$	Średnia prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej zmierzona w komorze młyna podczas badań obiektowych	m/s
$w_{3\_pom}$	Prędkość przepływającego powietrza zmierzona w komorze młyna (badania laboratoryjne)	m/s
$w_{3\_pom\_sr}$	Prędkość średnia przepływającego powietrza zmierzona w komorze młyna (badania laboratoryjne)	m/s
$w_{3\_przem\_obl}$	Obliczona prędkość przepływającego powietrza w komorze młyna (badania laboratoryjne)	m/s
$w_{3\_przem\_obl\_sr}$	Średnia obliczona prędkość przepływającego powietrza w komorze młyna (badania laboratoryjne)	m/s
$w_{a3III}$	Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna obliczona analitycznie, odnosząca się do III dnia pomiarowego badań obiektowych	m/s
$Ma_{a3III}$	Liczba Macha mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna obliczona analitycznie, odnosząca się do III dnia pomiarowego badań obiektowych	-
$Re_{a3III}$	Liczba Reynoldsa mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna obliczona analitycznie, odnosząca się do III dnia pomiarowego badań obiektowych	-
$\rho$	Gęstość mieszanki pyłowo – powietrznej	kg/m <sup>3</sup>
$\zeta_{pd}$	Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia dyszowego	-
<b>Skróty</b>		
CFD	(ang. Computational Fluid Dynamics) numeryczna mechanika płynów – badania numeryczne	

# 1. Wprowadzenie

Według [1] zwiększone wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w światowej energetyce oraz rozwój niskoemisyjnych technik spalania spowodowały znaczące zmiany w eksploatacji istniejących bloków energetycznych opalanych węglem kamiennym. Wydajność pyłowego kotła energetycznego opalanego węglem jest obniżana, gdy dostępna jest energia z źródeł ekologicznych. W związku z tym zmniejsza się ilość powietrza susząco-transportującego podawanego do młyna. W połączeniu z niskoemisyjnymi technikami spalania, ograniczającymi ilość powietrza podawanego do kotła, może dochodzić do sytuacji, w których zdolność strumienia czynnika do wnoszenia cząstek z komory mielenia młyna będzie niewystarczająca. Elementem kształtującym prędkość i profil przepływu powietrza doprowadzanego do młyna jest pierścień dyszowy (Rys. 1.1). Jego konstrukcja wpływa na parametry pracy młyna, istotne z punktu widzenia klienta FPM S.A. Do tych parametrów należą m.in. dynamika młyna, rozkład prędkości po obwodzie młyna, wydajność młyna, jakość przemiału i zużycie energii na przemiał oraz ilość przesypów do komór parytowych.

Młyn misowo - rolkowy

Młyn pierścieniowo - kulowy



Rys. 1.1. Położenie pierścienia dyszowego na tle młynów średniobieżnych produkowanych w FPM S.A.

Młyny miażdżące wyposażone w pierścień dyszowy są także szeroko stosowane w przemyśle mineralnym na przykład do produkcji proszków przeznaczonych na spieki czy sorbentów stosowanych w instalacjach oczyszczania spalin. Istniejące konstrukcje pierścieni dyszowych nie były optymalizowane pod względem uzyskania możliwie niskiego oporu przepływu czynnika oraz optymalnej zdolności wnoszenia cząstek produktu, dla szerokiego zakresu wentylacji młyna. Istnieje rynkowa potrzeba opracowania nowych konstrukcji pierścieni dyszowych. Zagadnienie jest także interesujące pod względem naukowym ze względu na złożoność zagadnień przepływu mieszaniny dwufazowej i małą liczbę publikacji związanych z młynami miażdżącymi, wynikającą z dużej pracochłonności badań.

Zanim przystąpiono do przedmiotowych badań przeprowadzono analizę stanu wiedzy technicznej nt. badań rzeczywistych oraz modelowych pierścieni dyszowych młynów miażdżących. Planowanym efektem tego etapu projektu było określenie aktualnego stanu wiedzy nt. podejmowanego problemu badawczego wraz z zaprezentowaniem innowacyjności tego rozwiązania dla firmy, nauki, gospodarki naszego państwa. W ramach tego etapu projektu przeprowadzono studium literatury, m.in. artykułów naukowych, dostępnych podręczników akademickich, monografii, prac naukowych oraz innych publikacji. W wyniku przeprowadzonych działań wykazano styczność z publikacjami dotyczącymi młynów średniobieżnych, w tym dotyczących procesu mielenia, transportu zmielonego materiału, odsiewaczy czy bilansu energii młyna.

W pracy [1] przedstawiono badania obiektowe wybranego pierścienia dyszowego zainstalowanego w przemysłowym młynie miażdżącym oraz będący owocem wspomnianych badań, wstępny model CFD pierścienia dyszowego, reprezentujący ówczesne postępy badań numerycznych.

W ramach badań modelowych (badania laboratoryjne) procesu mielenia w młynach węglowych [2] badano kształt bryły mieliwa na misie, ruch mieliwa oraz efekt rozdrabniania dla różnych prędkości obrotowych misy, przy różnych obciążeniach układu mielącego, dla dwóch wysokości pierścienia spiętrzającego.

W pracy [3] przedstawiono teoretyczną – eksperymentalną analizę zjawiska rozdrobnienia w pierścieniowo – kulowym układzie mielącym. Na podstawie eksperymentu w skali półtechnicznej i laboratoryjnej wytypowano istotne elementy procesu (efektywność rozdrobnienia, strumienie węgla w kierunku promieniowym i mielony przez kule).

Natomiast w wyniku przeprowadzonych badań modelowych układu mielącego młyna pierścieniowo – kulowego [4 i 5] określono, że wydajność pierścieniowo – kulowego układu mielącego rośnie wraz z prędkością kątową pierścienia do pewnej granicy, po czym wykazuje tendencję do stabilizacji. Z kolei jednostkowe zużycie energii na przemiał spada wraz ze wzrostem prędkości kątowej, osiągając przy pewnej wartości granicznej wartość stałą.

W pracy [6] przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań wpływu wybranych cech geometrycznych układu mielącego młyna pierścieniowo-kulowego na jego wydajność, jednostkowe zużycie energii na przemiał, opory przepływu przez młyn i inne wyniki pracy. Ponadto można zauważyć, że stanowisko badawcze zastosowane do przeprowadzenia badań [6] nie posiada pierścienia dyszowego w rzeczywistej postaci konstrukcyjnej. Przedmiotowy pierścień zamodelowany jest jako szczelina między pierścieniem przelotowym a pierścieniem miażdżącym wynoszącą dla tych badań – 3,5 mm.

Odnosnie do badań obiektowych przedstawionych w [2] badano między innymi wpływ parametrów eksploatacyjnych młyna na zużycie energii na przemiał i wentylację. Badania wykonano na młynie RP 1043x, w którym pierścień dyszowy wykonuje ruch obrotowy. W wyniku badań opublikowanych w [2] stwierdzono m.in., że ciśnienie powietrza przed młynem i opory przepływu na szczelinie przelotowej malały wraz z obniżaniem prędkości obrotowej misy.

Innym przykładem badań obiektowych są badania przedstawione w [7] gdzie przedstawiono analizę zagadnienia i metodykę wyznaczania charakterystyk młynów pierścieniowo – kulowych i misowo – rolkowych. Ze względu na złożony charakter prezentowanego tematu, w zakresie charakterystyk młynów skupiono się na następujących młynach: MKM-33 i RP 1043x. W publikacji [7] umieszczono charakterystyki oporów przepływu przez szczelinę przelotową i wentylacji jednostkowej w zależności od obciążenia młyna. Niemniej jednak na wspomnianej charakterystyce nie znajduje się charakterystyka dla

młyna, na którym przeprowadzono badania przedstawione w niniejszej rozprawie doktorskiej.

W [8] przedstawiono i omówiono urządzenia służące do separacji kamieni i pirytów z obrębu zespołu młynowego poprzez dysze na obwodzie misy miażdżącej oraz urządzenie do separacji pirytów i nawrotu węgla do przemiału. Można, wobec tego dostrzec, że już w przeszłości próbowano zoptymalizować konstrukcję pierścienia dyszowego, lecz koncepcje przedstawione w [8] były zoptymalizowane w kierunku usuwania kamieni i pirytów z komory młyna oraz ograniczenia ilości przesypów. Natomiast badania przedstawione w prezentowanej rozprawie doktorskiej są ukierunkowane na opracowanie nowej konstrukcji pierścienia dyszowego pod kątem minimalnych strat przepływu czynnika przez przedmiotowy pierścień, lecz bodźcem do poszukiwania odmiennego rozwiązania jest polityka energetyczna Unii Europejskiej i co za tym idzie, naszego państwa.

W obszarze badań numerycznych można w pewnym zakresie przywołać pracę [9], w której przedstawiono teoretyczny model układu mielącego młyna pierścieniowo – kulowego, służący do obliczeń wpływu prędkości obrotowej pierścienia miażdżącego oraz wybranych cech geometrycznych na wydajność młyna.

Badania opublikowane w [10] ukazują prototypowy system oprzyrządowania, który pobiera próbki, dokonuje pomiaru parametrów, gromadzi wyniki pomiarów i zbiera pobrany pył. Urządzenie to służy do pomiaru jakości przemiału w trybie On – Line.

Przedmiotem badań opublikowanych w [11] są obliczenia numeryczne złożonych geometrii stosowanych w elektrowniach konwencjonalnych opalanych pyłem pochodzącym z węgla kamiennego, przy czym w skupiono się na modelu numerycznym odsiewacza młyna misowo – rolkowego. W wyniku przeprowadzonych badań [11] stwierdzono, że obecność ciał stałych w młynie jest spowodowana nierównomiernym profilem przepływu mieszaniny pyłowo – powietrznej.

W artykule [12] badano wpływ ruchu cząstek powietrza i węgla na ścieranie elementów młyna, skupiając się na komorze młyna. Badania przeprowadzono za pomocą analizy CFD. W wyniku przeprowadzonych badań zaproponowano rozwiązanie umożliwiające korzystniejszy rozdział powietrza w komorze młyna, umożliwiające zmniejszenie erozji elementów młyna.

W pracy [13] przeprowadzono badania numeryczne odsiewacza polegające na optymalizacji jego warunków pracy pod kątem równomiernego rozdziału mieszaniny pyłowo – powietrznej, obniżenia emisji SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> oraz CO oraz obniżenia jednostkowego zużycia energii na przemiał. Uzyskanie powyższych efektów postanowiono osiągnąć poprzez zmianę kąta ustawienia łopatek odsiewacza. Najkorzystniejsze wyniki otrzymano przy otwarciu łopatek odsiewacza w stopniu 65%.

Z kolei w artykule [14] przedstawiono wyniki badań nad modelem młyna, który za pomocą algorytmu ewolucyjnego ma możliwość poprawy kontroli nad parametrami ruchowymi młyna, otrzymując odpowiednią wydajność młyna w stosunku do zapotrzebowania energii jaki musi pokryć blok elektrowni konwencjonalnej.

Natomiast w pracy [15] ukazano metodę szacowania wilgotności węgla opartą na dynamicznym modelu młyna węglowego. Algorytm szacuje wilgotność węgla na podstawie parametrów ruchowych młyna, wykorzystując bilans energii młyna. Model został pozytywnie zweryfikowany na rzeczywistym młynie typu Babcock MPS 212.

Ponadto w artykule [16] przedstawiono algorytm oparty na modelu ukazanym w [15], umożliwiający monitoring parametrów pracy młyna w celu wykrycia usterek podczas jego eksploatacji.

W ramach badań CFD przeprowadzonych i zaprezentowanych w [17] opracowano model młyna typu MPS. W przywołanej pozycji literaturowej skupiono się na wyrównaniu profilu przepływu w poszczególnych króćcach wylotowych głowicy wylotowej odsiewacza wspomnianego młyna.

W zaprezentowanych badaniach [18] wzbogacono model o proces odparowania wilgoci z mielonego węgla. Ponadto model CFD umożliwia określenie m.in. jaka powinna być wentylacja młyna, aby ograniczyć ilość przesypów podczas mielenia węgla. Model ten umożliwia również identyfikację obszarów o wysokiej temperaturze i dużej koncentracji pyłu węglowego, gdzie występuje wysokie prawdopodobieństwo zainicjowania pożaru młyna.

Natomiast autorzy pracy [19] przeprowadzili badania wpływu zastosowania przegród wykonujących ruch obrotowy na profil przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu, jego straty ciśnienia oraz uzyskiwaną jakość przemiału pyłu węglowego. Badania przeprowadzono przy pomocy analizy CFD.

Ciekawą pozycją jest artykuł [20], ponieważ autorzy przymierzają się do osiągnięcia identycznych celów jak autor niniejszej pracy, lecz odmienną drogą. Natomiast impuls do przeprowadzenia badań autorów jednej i drugiej pozycji jest taki sam, tzn. duży udział energii odnawialnej w KSE wymuszający zwiększenie dynamiki pracy młynów w celu wygenerowania odpowiednio szybkiej odpowiedzi na dynamiczną zmianę zapotrzebowania energii w wspomnianym KSE. Autorzy niniejszego artykułu planują osiągnąć to poprzez zmianę geometrii pierścienia dyszowego natomiast autorzy pracy [20] proponują podejście od strony automatyki poprzez zastosowanie kontrolera MPC sterujący pracą młyna bądź zespołu młynowego uzyskując optymalne parametry pracy młynów przy odpowiedniej dynamice odpowiedzi na zmianę obciążenia sieci.

Z kolei w pracy [21] zaprezentowano również kontroler pracy młyna bazujący na równaniach bilansu masy i energii młyna wraz z zastosowaniem algorytmu genetycznego, mogącego oszacować nieznane parametry dla walidacji modelu młyna.

W artykule [22] zbadano przydatność analizy obrazu do szczegółowego badania przesianego mieliwa na przykładzie kości bydłowej. Wyniki badań potwierdzają przydatność tej metody jako metody pomocniczej – uzupełniającej w stosunku do tradycyjnej metody przesiewania za pomocą sit.

Z kolei badania przedstawione w [23] obrazują pomiary obiektowe rozkładu powietrza przepływającego przez pierścień dyszowy młyna MKM – 33 przy nominalnej wentylacji. Badania obiektowe zostały przeprowadzone pneumatyczną pięciootworową sondą. Ponadto na podstawie wyników badań obiektowych została zaproponowana nowa konstrukcja pierścienia dyszowego młyna MKM – 33.

W artykule [24] ukazano przegląd rozwiązań konstrukcyjnych młynów średniobieżnych, zaprezentowano model mielenia w skali półtechnicznej oraz wpływ niektórych parametrów mielenia na wysokość warstwy wytwarzanej w układzie mielącym młyna średniobieżnego.

W pracy [25] przedstawiono instalację badawczą o skali półtechnicznej służącą do badań zespołów mielących pierścieniowo-kulowych młynów średniobieżnych do przemiału węgla kamiennego. Sformułowano metodykę i założenia przyjęte do badań. Zbadano wpływ cech geometrycznych zespołu mielącego, tj. liczby i średnicy kul przy zachowaniu stałej w każdym przypadku zewnętrznej średnicy zespołu mielącego, jednakowym odsiewaczu, stałej prędkości kątowej pierścienia miażdżącego, jednakowych naciskach jednostkowych na powierzchnię miażdżenia i tej samej charakterystyce węgla na wydajność młyna.

Badania opublikowane w [26] obrazują wyniki pomiarów współczynników tarcia kinematycznego i statycznego po stali oraz współczynnika tarcia wewnętrznego węgla

kamiennego zastosowanego w badaniach modelowych układu mielącego młyna pierścieniowo-kulowego. Ponadto opisano również stanowisko pomiarowe, metodykę i wyniki badań quasi statycznego miażdżenia warstwy węgla kamiennego o różnym składzie ziarnowym. Sprecyzowano warunki podobieństwa miażdżenia warstwy węgla przydatne do celów modelowania przemiału węgla w średniobieżnych układach mielących.

W artykule [27] przedstawiono zarys metod doboru optymalnej prędkości kątowej młynów pierścieniowo-kulowych. Porównano wyniki obliczeń dla typowej geometrii pierścienia miażdżącego i wyznaczonych współczynników tarcia. Omówiono współzależność optymalna prędkość- nacisk elementów mielących. Przedstawiono wyniki pomiarów wpływu prędkości mielenia i nacisku na pracę młyna przemysłowego.

W pracy [28] przeanalizowano warunki fizycznego modelowania rozdziału (separacji) pyłu, a na ich podstawie określono cechy geometryczne (skalę) i parametry solgazu w modelu urządzenia rozdzielającego. Opisano instalację badawczą i podano metodykę pomiarów. Przedstawiono wyniki pomiarów wpływu kąta ustawienia łopatek żaluzji i parametrów solgazu na rozdział pyłu i gazu w rozdzielaczu trójkowym oraz określono optymalną nastawę żaluzji. Dla rozdzielacza kolanowego przedstawiono wyniki pomiarów wpływu promienia gięcia i usytuowania przegrody oraz parametrów solgazu na przebieg procesu separacji.

Z kolei w artykule [29] podjęto próbę określenia przebiegu prędkości cząstki wzdłuż kanału o zmiennym przekroju poprzez rozwiązanie uproszczonego równania Basseta – Boussinesq’a – Oseena. Ponadto przebieg ten porównano z przebiegiem rzeczywistym otrzymanym na drodze przeprowadzonych badań przepływu solgazu przez zwężkę Venturi.

W artykule [30] stwierdzono, że konieczność poprawy jakości przemiału prowadzi do wzrostu krotności cyrkulacji wewnętrznej w młynie, co na ogół niekorzystnie oddziałuje na dynamikę układu młynowo-paleniskowego. Ponadto przedstawiono sposób eliminowania tego zjawiska.

Z kolei badania [31] dotyczą przedstawienia nowej konstrukcji odsiewacza dynamicznego, zastosowanego w krajowej energetyce w młynach MKM-25, dla znacznej poprawy jakości przemiału w związku ze stosowaniem w kotle palników o obniżonej emisji NOx. Omówiono badania tego odsiewacza i przedstawiono uzyskane granulacje pyłu w funkcji wydajności młyna i parametrów eksploatacyjnych.

W artykule [32] przedstawiono ówczesne tendencje zaobserwowane w rozwoju młynów pierścieniowo – kulowych. Ponadto zaproponowano obniżenie jednostkowego zużycia energii przez optymalizację przepływu czynnika suszącego – transportującego poprzez modyfikację konstrukcji pierścienia dyszowego. Co więcej, przedstawiona w artykule konstrukcja pierścienia dyszowego nie jest jeszcze zoptymalizowana.

W pracy [33] przedstawiono wymagania stawiane instalacjom młynowo – paleniskowym kotłów pyłowych, wynikające z potrzeby obniżenia tlenków azotu. Omówiono zatem przedsięwzięcia mające spełnić te wymagania, w tym optymalizację konstrukcji pierścienia dyszowego.

Z kolei w [34] opisano rozwój opartego na wiedzy operatora młyna systemu wsparcia/kontroli dla młynów węglowych. Opisana praca jest wykonywana jako część projektu badawczego. Celem projektu jest opracowanie opartego na wiedzy eksperta systemu wsparcia/sterowania operatora młyna (KBOSS), który nie tylko jest w stanie monitorować on-line proces i dostarczać operatorowi niezbędnych informacji i porad dotyczących sterowania młynem, ale także jest w stanie bezpośrednio interweniować w sterowanie młynem, dzięki czemu młyn i cała elektrownia działają wydajniej i ekonomiczniej.

W artykule [35] przedstawiono sterowanie PID, które jest stosowane głównie jako metoda sterowania młynem węglowym w celu utrzymania stabilnej pracy kotła przy różnych obciążeniach. Konwencjonalne sterowanie PID pogarsza się, gdy obciążenie odbiega od wartości zadanej. W niniejszym artykule zaproponowano rozmyte sterowanie PID z dalszą poprawą dzięki samouczącej się metodzie. Rzeczywiste zastosowanie w elektrowni Yantai w prowincji Shandong pokazuje, że sugerowana metoda jest prosta i skuteczna.

Z kolei badania [36] przedstawiają procedurę obliczania optymalnej sekwencji sterowania z malejącym horyzontem dla młyna węglowego elektrowni, którego dynamiczne zachowanie jest opisane przez zestaw nieliniowych równań różniczkowych. Wyprowadzenie algorytmu sekwencji sterowania opiera się na lokalnej linearyzacji modelu opisującego elektrownię i jego aproksymacji przez rozwinięcie szeregowo w postaci jąder odpowiedzi impulsowej. Przedstawiono szereg wyników testów symulacyjnych, które demonstrują skuteczność zaprezentowanej techniki.

W artykule [37] porównano trzy różne podejścia do wykrywania błędów na przykładzie młyna węglowego, w którym pojawia się błąd w systemie sterowania młyna. Porównywane metody opierają się na: optymalnym monitoringu nieznanymi danymi wejściowymi, statycznym i dynamicznym modelu regresji. Wniosek z porównania jest taki, że schemat oparty na monitoringu wykrywa usterkę 13 próbek wcześniej niż metoda oparta na modelu regresji dynamicznej, a metoda oparta na regresji statycznej nie jest użyteczna ze względu na generowanie zbyt wielu fałszywych wykryć.

W artykule [38] zaproponowano nowatorski sterownik cyrkulacji węgla i przepływu pyłu węglowego w młynie węglowym. Projekt opiera się na teorii optymalnego sterowania dla układów dwuliniowych z dodatkowym działaniem całkującym. Stany są szacowane na podstawie zużycia mocy mielenia i ilości węgla zgromadzonego w młynie poprzez zastosowanie specjalnego wariantu obserwatora stanu Luenbergera. Regulator wykorzystuje odsiewacz dynamiczny do poprawy wydajności dynamicznej całego systemu. Proponowany regulator jest porównywany z regulatorem typu PID z dostępnymi pomiarami przepływu pyłu węglowego w warunkach nominalnych, a także w przypadku występowania niepewności parametrów i szumów. Proponowany kontroler obniża zużycie energii podczas mielenia, wykazując w większości przypadków lepszą wydajność w porównaniu z kontrolerem PID.

Z kolei w [39] opisano wyniki analizy charakterystyk dynamicznych młynów węglowych stosowanych w dużej elektrowni węglowej. Opisano również rozwój opartego na wiedzy operatora młyna systemu wsparcia/kontroli dla młynów węglowych. Celem pracy jest opracowanie opartego na wiedzy eksperckiego systemu wsparcia/sterowania operatora elektrowni (KBOSS) w celu poprawy monitorowania i sterowania procesami w elektrowni. Aby to osiągnąć, konieczne jest opracowanie modelu młyna, który jest dokładny w szerokim zakresie warunków dynamicznych. Ponieważ testy modelowania młyna zostały przeprowadzone w różnych warunkach pracy, w tym w warunkach anormalnych, uzyskane wyniki testów dostarczają bardzo ważnych informacji dla sterowania młynem, modelowania i rozwoju bazy wiedzy systemu.

W ramach badań [40] utworzono nieliniowy model dynamiczny procesu mielenia, który uwzględnia wpływ wilgotności węgla na bilans energetyczny młyna węglowego. Następnie skonstruowano szacunkowy sygnał przepływu proszku węglowego na wylocie z młyna węglowego jako nowy cel sterowania wyjściowego układu proszkowania. Wreszcie, na podstawie tego sygnału zaprojektowano metodę optymalizacji sterowania wyjściowego dla systemu proszkowania. Wyniki symulacji wykazały, że model skutecznie odzwierciedla charakterystykę dynamiczną systemu pulweryzacji. Ponadto wyniki symulacji były zgodne z wynikami pomiarów online.

W artykule [41] W celu uzyskania informacji na temat charakterystyki odsiewacza młyna i zwiększenia jego wydajności separacji, pole przepływu i wydajność klasyfikacji klasyfikatora zbadano za pomocą symulacji numerycznej i pomiarów eksperymentalnych. Trajektoria cząstek została przeanalizowana przy użyciu modelu fazy dyskretnej. Prędkości styczne odgrywały dominującą rolę w rozkładzie promieniowym cząstek, głównie w postaci wiru Rankine'a. Prędkości osiowe determinują pionowy rozkład cząstek. Rozkłady prędkości i turbulencje wpływają głównie na wielkość cząstek tnących i skuteczność separacji. Najbardziej odpowiednie warunki to kąt przegrody  $20^\circ$  i prędkość wlotowa  $19,3$  m/s, biorąc pod uwagę obciążenie młyna i rozdrobnienie pyłu węglowego na wlocie do odsiewacza.

W artykule [42] badano efektywność klasyfikowania modelowych odsiewaczy młynów węglowych w zależności od pierścienia dyszowego. Ogólna skuteczność separacji klasyfikatora z stałym pierścieniem dyszowym była niższa niż w przypadku pierścienia dyszowego wykonującego ruch obrotowy i monotonicznie wzrastała wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika. W przypadku wlotu wirowego ogólna skuteczność separacji najpierw wzrastała wraz z prędkością obrotową wirnika, a następnie malała.

W pracy [43] zbadano wpływ różnych mechanizmów rozdrabniania dla szerokiej gamy peletów z biomasy, aby zapewnić kompleksową analizę zachowania mielenia biomasy do spalania pyłowego. Kształt rozdrobnionych cząstek zależy od struktury materiału z której wykonany jest pelet. Dławienie młyna wystąpiło w przypadku prób zmielenia kilku próbek drzewiastych i zielnych, co spowodowało znaczną stratę energii. Stwierdzono, że mechanizmy dławienia się młyna są nierozzerwalnie związane z krytycznym rozmiarem cząstek rozdrabniania poprzez miażdżenie, współczynnikami kształtu cząstek oraz warunków określonych dla odsiewacza i palników w pyłowych systemach spalania, wynikającymi z Prawa Stokesa. Badanie wykazało, że w celu uzyskania optymalnej wydajności mielenia, pelety z biomasy powinny składać się z cząstek spełniających wymagania wynikające z Prawa Stokesa, dla odsiewacza młyna. Pozwoliłoby to zminimalizować ryzyko dławienia się młyna i strat energii związanych z procesem mielenia, a także zapewnić maksymalną wydajność młyna.

Wg [44] aby zoptymalizować charakterystykę ruchu cząstek w pionowym młynie walcowym (VRM), w niniejszym badaniu zaproponowano umieszczenie spiralnych łopatek na zewnętrznych ścianach pojemnika na popiół i na zewnątrz separatora. Konstrukcja ta wykorzystuje przestrzeń między kubtem popiołu, separatorem, środkowym płaszczem i górnym płaszczem, aby utworzyć określone kanały do odprowadzania cząstek na zewnątrz młyna. W badaniu wykorzystano metody obliczeniowej dynamiki płynów i klasyfikacji proszków w celu przeprowadzenia kompleksowej analizy numerycznej nowego VRM. Oceniając rozkład pola przepływu, charakterystykę ruchu cząstek i wykorzystując kryterium  $Q$ , badania identyfikują trzy krytyczne parametry, które poprawiają wydajność młyna: szerokość, kąt i liczbę spiralnych łopatek. Wyniki analizy numerycznej pokazują, że wraz ze wzrostem szerokości spiralnych łopatek poprawia się zarówno trajektoria przepływu powietrza, jak i rozkład pola przepływu, co ułatwia transport cząstek. Gdy kąt nachylenia spiralnych łopatek maleje, trajektoria przepływu powietrza jest bardziej zbliżona do kierunku obrotu łopatek, co bardziej sprzyja odprowadzaniu cząstek z VRM. Ponadto wraz ze wzrostem liczby spiralnych łopatek wzrasta prędkość przepływu powietrza w kanale spiralnym, co prowadzi do poprawy charakterystyki ruchu cząstek pod wpływem płynu. Gdy spiralne łopatki są w pełni zamknięte, z dwoma obrotami i ośmioma łopatkami, rozkład wirów staje się bardziej regularny, a pole przepływu stabilizuje się, co zmniejsza niepotrzebne koszty. Co więcej, wraz ze wzrostem liczby spiralnych łopatek wzrasta prędkość przepływu powietrza w kanale spiralnym, co prowadzi do poprawy charakterystyki ruchu

cząstek pod wpływem płynu. Gdy spiralne łopatki są całkowicie zamknięte, z dwoma obrotami i ośmioma łopatkami, rozkład wirów staje się bardziej regularny, a pole przepływu stabilizuje się, co zmniejsza niepotrzebną recyrkulację materiału. Badanie to dostarcza cennych wskazówek dotyczących optymalizacji struktury VRM i oferuje odniesienia do poprawy jego wewnętrznych pól przepływu, poprawy wydajności separacji i zmniejszenia zużycia energii.

Wg [45] pionowe młyny rolkowe (VRM) znalazły zastosowanie głównie w operacjach mielenia cementu, gdzie były używane do mielenia mączki wapiennej oraz w elektrowniach do mielenia węgla. Zrównoważone operacje i udowodnione korzyści technologii w zastosowaniach mielenia cementu przyciągnęły zainteresowanie przemysłu mineralnego. W ramach badania zbadano wydajność mielenia rudy VRM za pomocą mobilnej szlifierni i zidentyfikowano zależności między parametrami operacyjnymi. W tym kontekście rudę złota mielono w różnych warunkach procesowych. Próbkę zebrano po zakończeniu prac testowych i rozkłady wielkości zostały określone. W wyniku badania zbadano wpływ parametrów operacyjnych, takich jak ciśnienie robocze i prędkość wirnika klasyfikatora, na przepływ masowy produktu i rozmiar produktu. Ponadto przedstawiono korelacje jednostkowego zużycia energii w obwodzie mieląco-klasyfikującym z ilością produktu i rozmiarem produktu. Celem było opracowanie modelu przewidywania wydajności VRM, który opiera się na danych wejściowych z charakterystyki w połączeniu ze znajomością interakcji pojedynczych parametrów mielenia.

W artykule [46] zbadano zachowanie się mielenia dwóch przemysłowych gatunków peletów drzewnych w wielkoskalowych młynach węglowych, z których każdy wyposażony jest w odsiewacz dynamiczny. Celem badania było sprawdzenie, czy na rozdrobnienie peletu i późniejszą klasyfikację cząstek ma wpływ wewnętrzny rozkład wielkości cząstek peletu uzyskany po rozkładzie peletu w gorącej wodzie. Ponadto zidentyfikowano optymalne warunki rozdrabniania peletów. Zachowanie podczas mielenia oceniono poprzez określenie zużycia energii podczas mielenia i różnicy ciśnień w młynie. Rozmiar i kształt rozdrobnionych peletów pobranych z rur palnika analizowano odpowiednio za pomocą dynamicznej analizy obrazu i analizy sitowej. Wyniki wykazały, że wewnętrzny rozkład wielkości cząstek peletu wpływał zarówno na zachowanie podczas mielenia, jak i na wielkość cząstek. Pelety z grubszymi cząstkami wewnętrznymi wymagały więcej energii do mielenia, prowadziły do wyższego spadku ciśnienia w młynie i wykazywały większy rozmiar cząstek. Rozdrobnione cząstki peletu pobrane z rur palnika były znacznie drobniejsze niż wewnętrzne cząstki peletu (nadawy). W podobnych warunkach młyna-odsiewacza uzyskano charakterystyczne rozmiary cząstek wynoszące odpowiednio 0,50 mm dla rozdrobnionego peletu (w porównaniu do granulacji nadawy wynoszącej 0,83 mm) i 0,56 mm dla rozdrobnionego peletu (w porównaniu do granulacji nadawy wynoszącej 1,09 mm). Rozdrabnianie peletu przy niższym obciążeniu młyna i niższym natężeniu przepływu powietrza pierwotnego zmniejszyło zużycie energii przez młyn, spadek ciśnienia w młynie i rozmiar cząstek pyłu. Odbiło się to jednak kosztem wyższego zużycia energii podczas mielenia. Uzyskane parametry kształtu 2D dla rozdrobnionych i wewnętrznych cząstek peletu były podobne. Zmiany w pracy młyna miały znikomy wpływ na pierwotny wydłużony kształt cząstek drewna. Aby osiągnąć pożądane rozdrobnienie produktu (tj. jakość przemiału) przy niższym zużyciu energii, operatorzy elektrowni muszą wybierać pelety o drobniejszym wewnętrznym rozkładzie wielkości cząstek.

W artykule [47] przedstawiono analizy energii i egzergii dla pionowego młyna walcowego (VRM) w skali przemysłowej w Kerman Momtazan Cement Company (KMCC) w Iranie. Analizy bilansu energii i egzergii wykazały, że sprawność energetyczna VRM wynosi

62,1%, podczas gdy sprawność egzergetyczna VRM wynosi 34,6%. W porównaniu do powszechnie stosowanego młyna kulowego, sprawność egzergetyczna jest o 16,4% wyższa dla VRM niż młyna kulowego. Wyniki wykazały również, że gdy prędkość wirnika odsiewacza wzrasta z 53 do 65 obr/min, wielkość cząstek produktu zmniejsza się z  $R_{90\mu m} = 18,2\%$  do  $R_{90\mu m} = 10,8\%$ , ale zużycie energii przez jednostkę VRM wzrasta z 19,7 do 22,3 kWh/t surowców. Wreszcie, zużycie energii przez jednostkę VRM porównano z 14 jednostkami młynów surowcowych w Iranie i najlepszą dostępną technologią międzynarodową (IBAT). Wyniki wykazały, że jednostka VRM zużywa około 81% (9,75 kWh/t surowca) i 36% (5,8 kWh/t surowca) więcej energii do zmielenia surowca niż odpowiednio jednostka IBAT i najlepszy krajowy młyn surowcowy (DBRM).

W artykule [48] przedstawiono wyniki analizy mechanizmu sprzężenia wielu pól fizycznych w działaniu dużego młyna pionowego, skonstruowano metodę symulacji numerycznej za pomocą sprzężonego modelu CFD-DPM w celu obliczenia jakości gotowego produktu, wyniki symulacji były w dobrej zgodności z rzeczywistymi wynikami operacji. W oparciu o model zastępczy Kriging zaproponowano warianty optymalizacji dla dużych młynów pionowych. Na koniec przeprowadzono projekt optymalizacji wielocelowej dużych młynów pionowych LGM. W połączeniu z metodą sprzężenia CFD-DPM opracowano dane wejściowe i określono dane wyjściowe. Do analizy korelacji wykorzystano metodę Kriging. Ustalono funkcję optymalizacji po kątem zdefiniowanych celów. Algorytm optymalizacji NSGA-II. został użyty do aktualizacji modelu zastępczego i uzyskania optymalnego rozwiązania, a zoptymalizowane parametry operacyjne zwiększyły wydajność młyna pionowego o 5,34% i powierzchnię właściwą o 9,07%. Maksymalny błąd względny między wartością symulowaną a wartością zoptymalizowaną wynosi 2,02% w obliczeniach numerycznych, co potwierdza wyższość metody optymalizacji dużego młyna pionowego w celu poprawy wydajności.

W artykule [49] przypomniano, że optymalizacja i kontrola obwodów pionowego młyna walcowego (VRM) ma kluczowe znaczenie dla procesów przemysłowych, jednak ograniczenia modelowanie spowolniło postęp w szkoleniu operatorów, minimalizacji błędów i oszczędności kosztów laboratoryjnych. Aby przezwyciężyć ograniczenia, wprowadzono innowacyjne „Conscious Lab” (CL), wykorzystujące przemysłowe zbiory danych i techniki sztucznej inteligencji (XAI). Po raz pierwszy CL łączy Shapley Additive Explanations (SHAP) z modelami uczenia maszynowego, takimi jak XGBoost i Random Forest, w celu optymalizacji operacji VRM. Różnica ciśnień i prędkość podajnika zostały zidentyfikowane jako najbardziej wpływowe parametry ciśnienia roboczego, niezbędnego do utrzymania stabilnej pracy młyna. Solidne korelacje liniowe (współczynniki: 0,94 dla prędkości podajnika, 0,84 dla mocy napędu głównego i 0,83 dla ciśnienia różnicowego) i nieliniowe wykresy brzegowe (0,95, 0,81 i 0,81) podkreśliły, jak wzrost tych parametrów ma wpływ na ciśnienie robocze. Model XGBoost osiągnął niezwykłą dokładność przewidywania (0,99 dla trybu szkoleniowego i 0,98 dla testowania/walidacji) przy niskim RMSE (0,01), potwierdzonym przez 5-krotną walidację krzyżową. Ponadto analiza SHAP umożliwiła zweryfikowanie związku między ciśnieniem roboczym a kluczowymi parametrami, dostosowując się do zasad szlifowania VRM. Podejście CL wprowadza system sterowania oparty na danych, umożliwiającą podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym, optymalizację procesu i poprawę wydajności produkcji, pokazując transformacyjny potencjał zaawansowanej analizy danych w zastosowaniach przemysłowych.

W pracy [50] zwrócono uwagę, że pionowe młyny rolkowe (VRM) są bardzo popularne w przemyśle cementowym ze względu na niskie zużycie energii, zwiększoną wydajność i uproszczenie procesu. Proces mielenia w VRM obejmuje szereg parametrów

operacyjnych, w tym zmienne kontrolowane i sterowane przez proces. Dlatego zrozumienie interakcji między zmiennymi operacyjnymi a zużyciem energii byłoby niezbędne dla zrównoważonego transportu materiału mielonego podczas procesu wentylacji w młynie. Przeprowadzono kilka badań w celu modelowania wentylacji i zużycia energii przez VRM. Wykorzystanie modelu sztucznej sieci neuronowej (ANN) do rozwiązywania problemów przemysłowych na dużą skalę mogłoby pomóc zrozumieć, w jaki sposób zmienne VRM oddziałują na siebie i zachęcić do kontrolowania wentylacji w celu zapewnienia długoterminowej pracy i zmienionej produkcji. Ocena MLP wykazała, że najbardziej wpływowymi kontrolowanymi zmiennymi były prędkość podawania, ciśnienie robocze, wtrysk wody i stopień otwarcia klap gorącego powietrza wentylatora młynowego na różnicę ciśnień i moc wentylatora młyna. Wyniki te są zgodne z rzeczywistym stanem wiedzy nt. procesu mielenia w VRM. Taki model ANN dla VRM może szkolić operatorów, kontrolować proces, oszczędzać czas i energię, ograniczać badania laboratoryjne i kwestie skali oraz zwiększać trwałość operacji.

W ramach badań przedstawionych w [51] pobrano próbki węgla z różnych punktów młyna typu ZGM95, w różnych warunkach pracy. Przeanalizowano właściwości materiału pobranego z młyna, stosując test pływakowy, analizę liczby polidispersji, analizę proksymalną itp. Wykazano, że frakcja +250  $\mu\text{m}$  w sproszkowanym paliwie stanowiła zaledwie 0,02%, podczas gdy w nowej paszy było to 83,2%. Współczynnik cyrkulacji i przepływ węgla w separatorze i strefie stożka obliczono na podstawie bilansu masowego ładunku cyrkulacyjnego. Tak więc współczynnik cyrkulacji w separatorze młyna wynosił od 8 do 13, a współczynnik cyrkulacji, przepływ zasilania separatora i strefy stożka wzrastały wraz ze wzrostem objętości powietrza. Ponadto parametry funkcji separacji uzyskano w oparciu o metodę dopasowania. Wykazano, że średnia wartość liczby mielenia  $b$  wynosiła 0,7617, a parametr  $D$ , który jest wielkością cząstek przy 50% skumulowanej wydajności w separatorze, prawie się nie zmienił.

W artykule [52] stwierdzono, że w elektrowniach węglowych pierwszym ważnym elementem jest młyn, którego wydajność dyktuje całkowitą wydajność bloku parowego. W ramach badań przeprowadzono symulację ruchu powietrza i cząstek węgla wewnątrz młyna. Symulację przepływu wielofazowego w modelu młyna przeprowadzono przy użyciu podejścia granular Euler – Euler. Wyniki przedstawione w artykule stanowią impuls do opracowania złożonego modelu młyna, który może okazać się cenny dla projektantów w celu optymalizacji komponentów młyna.

W pracy [53] Przedstawiono ciąg dalszy badań przedstawionych w artykułach [49 i 50]. Modele sztucznej inteligencji, w szczególności podejście CL, oferują ramy oparte na wiedzy, pozwalające na identyfikację liniowych i nieliniowych korelacji między zmiennymi. Modele te umożliwiają operatorom podejmowanie bardziej racjonalnych decyzji w różnych warunkach operacyjnych. Badania wykazały silną dodatnią korelację między prędkością podawania a mocą napędu głównego (0,81), z dodatkowymi znaczącymi korelacjami zaobserwowanymi dla ciśnienia roboczego (0,94), wtrysku wody (0,83) i różnicy ciśnień (0,80). Analiza SHAP pozwoliła zidentyfikować kluczowe parametry wpływające na szybkość podawania (ciśnienie robocze, DP, przeciwcisnienie) i moc napędu głównego (ciśnienie robocze, moc wentylatora, szybkość podawania). LightGBM przewyższył inne modele, osiągając najwyższą dokładność przewidywania dla prędkości posuwu (test: 0,97, szkolenie: 0,98) i mocy napędu głównego (test: 0,91, szkolenie: 0,97). Integracja modelu SHAP-lightGBM umożliwia operatorom optymalizację zużycia energii i poprawę wydajności operacyjnej VRM.

W artykule [54] wskazano, że mielenie jest podstawową operacją w zakładach przetwórstwa minerałów. Młyny półautogeniczne (SAG) są szeroko stosowane w tych aplikacjach. Zwiększenie wydajności młynów SAG ma kluczowe znaczenie ze względu na jego znaczący wpływ na aspekt ekonomiczny. Jednak kontrola jakości przemiału młyna jest również niezbędna. Jeśli cząstki na wylocie są zbyt duże, znaczna część produktu młyna SAG jest ponownie kierowana do kruszarek kamiennych. W związku z tym wyzwaniem poruszonym w niniejszym badaniu jest ustalenie kontrolowanych parametrów procesu, aby osiągnąć zarówno maksymalną wydajność młyna, jak i minimalny stopień recyrkulacji zmielonego materiału kierowanego do kruszarek. W niniejszym badaniu problem ten został sformułowany jako problem optymalizacji wielokryterialnej z ograniczeniami. Wykorzystano zbiór danych przemysłowych składający się z 66 776 rekordów. Początkowo porównano trzy metody wzmacniania gradientu, w tym CatBoost, XGBoost i HGBM, w celu modelowania obu celów. Następnie najdokładniejsze modele prognozowania zostały zastosowane w czterech algorytmach optymalizacji wielokryterialnej, składających się z NSGA-II, MOEA/D, RVEA i SPEA2. Wyniki porównawcze wykazały, że CatBoost jest modelem prognozowania o najlepszej wydajności, ze średnią wynoszącą odpowiednio 0,9304 i 0,9031 dla wydajności młyna i obciążenia cyrkulacyjnego. NSGA-II został również uznany za najlepszy optymalizator, osiągając najwyższą średnią objętość wynoszącą 291 489. Za pomocą analizy wrażliwości wykazano, w jaki sposób zmiany cech wejściowych wpływają na cele i potwierdzono optymalne rozwiązania. Na podstawie analizy rozwiązań pod kątem najlepszej wydajności przedstawiono zalecenia dotyczące ustawienia parametrów procesu. Dodatkową zaletą opracowanej w ramach niniejszych badań struktury jest dostarczenie zestawu rozwiązań optymalnych w sensie Pareto, co pozwala ekspertom wybrać najbardziej odpowiednie ustawienia w oparciu o warunki procesu w czasie rzeczywistym.

W pracy [55] wyartykułowano, że młyny rolkowe (VRM) są kluczowym urządzeniem do produkcji cementu, a różnica ciśnień (DP) jest kluczowym parametrem operacyjnym wpływającym na stabilność i wydajność. Niniejsze badania dotyczą prognozowania DP w cementowych młynach VRM przy użyciu algorytmów uczenia maszynowego. Aby wypełnić lukę w zrozumieniu zależności zmiennych operacyjnych od DP, porównano algorytmy RandomForest, Gradient Boosting Machine (GBM) i LightGBM, wykorzystując 1026 godzin danych operacyjnych z cementowni VRM. Metoda ShapleyAdditiveExplanations (SHAP) zidentyfikowała prędkość wentylatora młyna, ciśnienie robocze i szybkość podawania jako kluczowe czynniki wpływające na DP, przy czym ciśnienie robocze było czynnikiem dominującym. Model został zweryfikowany za pomocą walidacji krzyżowej K-fold, a algorytm GBM osiągnął najlepsze wyniki ( $R^2 = 0,9684$ , RMSE = 0,1637). Wykresy marginalne ujawniły nieliniowe zależności między zmiennymi operacyjnymi a DP. Stabilność pracy VRM zależy w znacznym stopniu od prędkości obrotowej wirnika wentylatora młyna, ciśnienia roboczego iysterowania podajnika, przy czym ciśnienie robocze ma największy wpływ na wydajność systemu, zgodnie z analizą SHAP. Stabilny DP zapewnia stabilną warstwę materiału pod rolkami i wydajną pracę VRM. Badania te są zgodne z koncepcją Conscious Lab, wykorzystującą wyjaśniające algorytmy AI oparte na danych z sterowni zakładu w celu optymalizacji parametrów operacyjnych i poprawy efektywności energetycznej w produkcji cementu.

W pracy [56] zaprezentowano zastosowania Horomill i hybrydowego HPGR/dwukomorowego młyna kulowego na skalę przemysłową w produkcji cementu portlandzkiego z pułżanem, kładąc nacisk na ogólną charakterystykę operacyjną konfiguracji instalacji, rozdrabnianie i efektywność energetyczną Horomill oraz warunki mielenia w dwukomorowym młynie kulowym. Konfiguracja instalacji Horomill wykazała przewagę w

zakresie produkcji cementu o wysokiej wytrzymałości w porównaniu z hybrydowym młynem HPGR/dwukomorowym młynem kulowym, w zależności od wydajności klasyfikacji separatorów wpływających na wydajność instalacji.

Z kolei w artykule [57] celem badań było zwrócenie uwagi na potrzebę optymalizacji procesu mielenia cementu w celu zminimalizowania zużycia energii i osiągnięcia wyższej wydajności. W pracy omówiono zalety pionowego młyna rolkowego (VRM) w porównaniu z młynami bębnowo – kulowymi. Omówiono konstrukcję VRM, jego proces i parametry, które wpływają na wydajność i produktywność pionowego młyna rolkowego. Wyjaśniono również konsekwencje zmian parametrów pracy młyna. Dzięki odpowiedniej optymalizacji tych parametrów można poprawić wydajność pionowego młyna rolkowego i osiągnąć stabilność działania poprzez wyeliminowanie przyczyn źródłowych. Badania te mogą przynieść korzyści podmiotom gospodarczym korzystającym z VRM, które nie są w stanie w pełni wykorzystać jego wydajności z powodu pewnych ograniczeń lub utrudnień.

Z kolei w pracy [58] przeanalizowano model matematyczny przemysłowego młyna rolkowego (VRM) w cementowni Ilam w Iranie. Model został skalibrowany na podstawie danych z wstępnych badań, a następnie obliczono wskaźniki kruszenia klinkieru. Wyniki modelowania i walidacji wykazały, że zgodnie z mechanizmem kruszenia warstwy w VRM cząstki klinkieru pozostają w VRM tylko przez krótki czas. W VRM nie można uzyskać wystarczającej krotności (od 1 do 3 lub wyższej) mielenia do rozdrobnienia klinkieru ze względu na krótki czas przebywania w VRM. Wyniki modelu macierzowego zapewniają bardziej wiarygodną prognozę opartą na liczbie dwukrotnych pęknięć klinkieru w VRM ( $R^2 = 0,9916$ ,  $MSE = 5,3526$ , dokładność = 94,6474). Jak pokazują również wyniki modelowania macierzowego, poślizg  $S$  wzrastał wraz ze spadkiem wielkości cząstek. Natomiast model równowagi populacyjnej wzrastał wraz ze wzrostem wielkości cząstek.

Z kolei w pracy [59] zbadano wydajność klasyfikacji odsiewacza statycznego w młynie rolkowym (VSM) wykonano otwory do pobierania próbek w korpusie młyna i opracowano metodę pobierania próbek online. Przeanalizowano skład wielkości i gęstości materiału podawanego do odsiewacza i zawracanego przez odsiewacz rozdrobnionego paliwa (PF). Przeprowadzono obliczenia dotyczące krotności cyrkulacji w młynie VSM oraz wydajności pyłowej odsiewacza na podstawie kilku pobranych próbek pyłu. Zbadano wpływ trzech parametrów, a mianowicie rodzaju węgla, strumienia powietrza i docisku rolki, na wydajność odsiewacza. Wyniki pokazują, że krotność cyrkulacji wynosi około 7 i 10. Wydajność odsiewacza spada dla cząstek o wielkości poniżej 90  $\mu\text{m}$  z 32% w materiale podawanym do odsiewacza do 24% w materiale zawróconym do ponownego mielenia, co wskazuje na słabą wydajność odsiewacza. Skład gęstości próbek w materiale podawanym do odsiewacza, materiale zawróconym przez odsiewacz i pyłem jest dość zróżnicowany. Dominujące poziomy gęstości wynoszą -1,4  $\text{g/cm}^3$  i +1,8  $\text{g/cm}^3$  w rozdrobnionym paliwie ze względu na zmniejszenie wielkości cząstek i skierowanie ich do pyłoprzewodów. Wyniki wydajności odsiewacza pokazują, że zmiana natężenia powietrza w zakresie od 62,8 t/h do 53,2 t/h ma ograniczony wpływ na wydajność, jednak wydajność ta znacznie spada, gdy strumień powietrza jest mniejszy niż 44 t/h. Ponadto zarówno rodzaj węgla, jak i docisk rolki mają pośredni wpływ na wydajność odsiewacza, wpływając na strumień paliwa kierowanego do odsiewacza.

W pracy [60] wskazano, że młyny rolkowe (VRM) są szeroko stosowane do rozdrabniania zarówno surowców cementowych, jak i minerałów, takich jak wapień, klinkier, fosforan, mangan, magnezyt, skałen i tytan. Młyny te łączą w sobie operacje kruszenia, mielenia, klasyfikacji i suszenia w jednym urządzeniu i mają przewagę nad dedykowanymi instalacjami. Literatura podaje, że w porównaniu z instalacjami zawierającymi młyny

bębnowo – kulowe można osiągnąć 15% oszczędności energii w procesie mielenia cementu. Taka poprawa wydajności w procesie mielenia cementu zachęciła do przeprowadzenia badań nad zastosowaniami mielenia rudy. W ramach badania zbadano wydajność młyna dla mielenia rudy za pomocą mobilnej instalacji pilotażowej. W tym kontekście rudę chalkopiryty z zakładu wyposażonego w instalacje młynów prętowego i bębnowo – kulowego zmielono w różnych trybach pracy, np. z przedmuchiwaniem powietrzem i przelewem, oraz w różnych warunkach procesowych, a następnie pobrano próbki z całej instalacji. Zebrane próbki scharakteryzowano pod względem rozkładu ziarnowego pyłu, a następnie wykorzystano do porównania wydajności instalacji dedykowanych i VRM. W badaniu tym stwierdzono, że możliwe jest osiągnięcie 18% oszczędności w jednostkowym zużyciu energii przy mniejszym zużyciu elementów wewnętrznych.

W artykule [61] przypomniano, że młyny pierścieniowo – kulowe (VSMs) są szeroko stosowane w elektrowniach węglowych, które odpowiadają za ponad 40% energii elektrycznej wytwarzanej na całym świecie. Opracowano nowy model VSMs, który umożliwił wzajemnie powiązaną symulację procesów rozdrabniania i klasyfikacji zachodzących w młynie. Modele wieloskładnikowe uwzględniają wpływ wielkości i zawartości popiołu podawanego węgla, natężenia przepływu powietrza i węgla oraz mocy pobieranej przez młyn. Oba modele wykorzystują rozkład gęstości strumieni węgla według wielkości cząstek. Model krzywej wydajności oparty na zmiennej gęstości składników w trzech obszarach klasyfikacji. Model matrycowy rozdrabniania z funkcją selekcji, która zależy wyłącznie od wielkości, oraz funkcją kruszenia zdefiniowaną w trzech wymiarach, która zależy od wielkości, gęstości i energii, aby uwzględnić różnice w rozdrabnianiu poszczególnych składników nadawy. Wykazano, że rozkłady wielkości cząstek i natężenia przepływu odpowiadające strumieniom w młynie i jego produkcji można oszacować z bardzo dużą dokładnością. Można również uzyskać dokładną estymację dla rozkładów gęstości w tych strumieniach.

W artykule [62] podkreślono, że nowy model mechaniczny dla młynów pionowych (VSM) został opracowany przez Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) na Uniwersytecie Queensland. W odróżnieniu od poprzednich prac naukowych, które traktowały VSM jako „czarną skrzynkę”, niniejsza praca uwzględnia w modelu dwa zestawy zmiennych: (1) właściwości specyficzne dla węgla oraz (2) zmienne specyficzne dla maszyny. Model VSM został przedstawiony w dwóch częściach/artykułach. Pierwsza część przedstawia podmodele rozdrabniania i klasyfikacji w VSM. Druga część [63] opisuje integrację pod modeli w celu symulacji młynów E-Mill, MPS i CKP na skalę przemysłową. Podmodele obejmują prognozowanie mocy młyna, obliczanie jednostkowego zużycia energii, funkcji rozdrabniania zależną od rozmiaru, szacowanie rozkładu ziarnowego pyłu, klasyfikację elutriacyjną i klasyfikację cyklonową. Właściwości kruszenia węgla zostały zmierzone za pomocą urządzenia mielącego JKFCB i zamodelowane przy użyciu funkcji rozdrabniania zależnej od wielkości. Zmienne specyficzne dla maszyny obejmują geometrię młyna, geometrię klasyfikatora powietrznego, prędkość obrotową podajnika węgla, wentylację młyna, temperaturę powietrza pierwotnego, ciśnienie powietrza, prędkość obrotową stołu mielącego, ciśnienie hydrauliczne docisku pierścienia dociskowego i pobór mocy młyna. Zmienne te są uwzględnione w funkcjach rozdrabniania i klasyfikacji w oparciu o zasady fizyki.

W pracy [63] stwierdzono, że podmodele rozdrabniania i klasyfikacji dla młyna pionowego (VSM) przedstawione [62] zostały zintegrowane z modelami symulacyjnymi VSM dla młyna E-mill, MPS i CKP. Do kalibracji parametrów podmodelu VSM dla każdego urządzenia wykorzystano dane z badań zakładowych młynów E-mill (kulowych) i MPS

(walcowych), obejmujące zarówno strumienie wewnętrzne, jak i próbkowanie zewnętrzne, oraz młynów CKP (walcowych bez klasyfikacji wewnętrznej). Stwierdzono, że dopasowane parametry modelu rozdrabniania i klasyfikacji były ściśle związane z natężeniem przepływu powietrza pierwotnego w pracy VSM. Ustalono zależności między parametrami podmodelu a natężeniem przepływu powietrza. Po skalibrowaniu modeli nie jest wymagane dalsze dopasowywanie parametrów modelu. Modele VSM zostały zaimplementowane w programie Microsoft Excel za pomocą protokołu MDK (Model Development Kits). Omówiono szereg potencjalnych zastosowań modeli VSM JKMRC w elektrowniach węglowych i innych gałęziach przemysłu.

W zakresie pracy [64] były badania aerodynamiki w zmniejszonym modelu statycznego klasyfikatora pionowego młyna węglowego, aby uzyskać dane służące do poprawy prognoz dotyczących separacji cząstek w klasyfikatorze oraz walidacji symulacji obliczeniowych. Dane ilościowe do tych celów uzyskano poprzez pomiar prędkości za pomocą trójwymiarowego anemometru laserowego Dopplera. W celu uzyskania jakościowego zrozumienia zastosowano również wizualizację przepływu. Wyniki pokazują, że przepływ w głównej objętości klasyfikatora jest bardzo podobny do przepływu opisanego w literaturze dla cyklonów. Jednak przepływ w górnej części klasyfikatora jest wysoce trójwymiarowy. Wykazano, że zmiana kąta łopatek wlotowych w zakresie kątów łopatek stosowanych w przemyśle wpływa zasadniczo tylko na wielkość prędkości stycznej.

W artykule [65] wykazano, że mielenie polimerów w młynie kulowym (BMG) ma długą historię, która rozpoczęła się w latach 30. XX wieku, kiedy to Staudinger wskazał, że polistyren ulega rozszczepieniu łańcuchów podczas mielenia w młynie kulowym. Jednak dopiero w ostatniej dekadzie BMG znacznie rozszerzyło swoje zastosowanie z wyłącznie degradacji polimerów do narzędzia syntetycznego o szerokim zakresie zastosowań. Obecnie BMG stało się obiecującą techniką mechanochemii dla kilku niezwykle ważnych technologii polimerowych, takich jak recykling i upcykling, i często zapewnia nową lub zwiększoną reaktywność mechanochemiczną. Jako technika w stanie stałym, w której rozpuszczalniki są często minimalizowane lub eliminowane, BMG zapewnia bardziej ekologiczną i zrównoważoną drogę do różnych zastosowań. Ponadto, w przeciwieństwie do wielu innych technik mechanochemicznych powszechnie stosowanych w przypadku polimerów, BMG ma potencjał do skalowania do poziomów istotnych z przemysłowego punktu widzenia.

Artykuł [66] dotyczy optymalizacji pracy młyna misowo – rolkowego, który wytwarza równolegle dwa strumienie sorbentu wapiennego o różnej wielkości cząstek. Analiza wyników otrzymanych podczas kilkudziesięciu testów pozwoliła stwierdzić, że możliwe jest zmieszanie części masy sorbentu drobnego z sorbentem grubym w celu uzyskania wyższej produkcji sorbentu grubego, o wymaganej przez proces odsiarczania granulacji. W związku z tym zaimplementowano dodatkową instalację mieszania pneumatycznego wyposażoną w układ sterowania, która łączyła strumienie obydwu sorbentów w założonych proporcjach. Doprowadziło to do spełnienia wymogu, aby 65% całkowitej produkcji stanowił sorbent gruby. Głównymi przeszkodami w uzyskaniu wymaganej granulacji sorbentu grubego była bardzo wysoka podatność przemiałowa nadawy kamienia wapiennego 80-100 HGI, ograniczenia wentylacji młyna oraz wysoka zawartość drobnych frakcji w materiale podawanym do młyna. Wytwarzanie 100% sorbentu grubego osiągnięto poprzez znaczne zmniejszenie siły docisku rolek i zablokowanie ruchu separatora dynamicznego. Podjęte działania doprowadziły do znacznego obniżenia jakości przemiału kamienia wapiennego, a tym samym dowiodły technicznej możliwości produkcji wysokich udziałów piasku wapiennego w młynie misowo-roлковym.

W pracy [67] stwierdzono, że wydajność dwóch nowych młynów pionowych (VRM) została przeanalizowana przy zastosowaniu komputerowej mechaniki płynów (CFD). Wyniki pokazują znaczny napływ powietrza od spodu młyna, spowodowany ruchomymi elementami w młynie. Ma to negatywny wpływ na wydajność młyna, ponieważ zmielony proszek jest ponownie wprowadzany do obszaru mielenia, co zmniejsza ogólną wydajność mielenia. Optymalizacja konstrukcji młyna została przeprowadzona na podstawie wyników modelowania CFD. Zaproponowane zmiany konfiguracji powodują powstanie nadciśnienia przed młynem, co ogranicza przedostawanie się powietrza. Modyfikacje konstrukcji zostały wdrożone w młynie pilotażowym, co rozwiązało problem przedostawania się powietrza. Dodatkowo obliczono wzorce erozji dla geometrii młyna i potwierdzono je jakościowo poprzez oględziny młyna.

W artykule [68] wskazano, że w celu poprawy charakterystyki ruchu cząstek w pionowych młynach rolkowych (VRM) wysunięto hipotezę, że różne konstrukcje spiralnych łopatek prowadzących wpływają na wewnętrzne pole przepływu w VRM. Przeanalizowano rozkład prędkości i wiru płynów w VRM oraz zbadano mechanizm wpływający na ruch cząstek i wydajność separacji. W badaniu jako obiekt badań przyjęto VRM MMLM2550 (dostarczony przez Jiangsu DahuanGroup, Chiny; średnica stołu mielącego 2550 mm), którego konstrukcję zmodyfikowano poprzez dodanie spiralnych łopatek prowadzących. Wyniki badań wykazały, że wraz ze wzrostem szerokości łopatek poprawiała się trajektoria przepływu powietrza i rozkład wirów, co sprzyjało transportowi cząstek. Jednak zmiana grubości łopatek miała niewielki wpływ na wewnętrzne pole fizyczne VRM i charakterystykę ruchu cząstek. W związku z tym wpływ grubości łopatek na te czynniki został pominięty. Wraz ze wzrostem liczby zwojów spiralnych łopatek kierunkowych kierunek spiralnych łopatek kierunkowych pozostawał zgodny z trajektorią ruchu cząstek, co sprzyjało ich wyrzucaniu z VRM. Wysokość spiralnych łopatek kierunkowych miała duży wpływ na pole przepływu i charakterystykę ruchu cząstek. Im mniejsza wysokość łopatek, tym większy stopień separacji w strefie separacji pierwotnej i silniejszy nieregularny ruch cząstek, co wydłuża czas ruchu i odległość cząstek. Wraz ze wzrostem liczby łopatek prędkość przepływu powietrza w kanale przepływowym wzrosła, dzięki czemu cząstki poruszały się wraz z przepływem powietrza z dużą prędkością, a czas ruchu został skutecznie skrócony. Badanie dostarcza cennych wskazówek dotyczących ulepszenia konstrukcji VRM i służy jako punkt odniesienia dla charakteryzowania ruchu cząstek i poprawy wewnętrznego pola przepływu w VRM.

W artykule [69] przedstawiono badania W niniejszym artykule przedstawiamy metodę, która pozwala na szybką i wydajną symulację procesu rozdrabniania w młynach szybkoobrotowych. Metoda ta wymaga jedynie makroskopowych danych materiałowych nadawy oraz geometrii maszyny. Składa się ona z dwóch etapów i łączy obliczeniową dynamikę płynów (CFD) z metodą elementów dyskretnych (DEM) w celu uzyskania kątów natarcia i prędkości reprezentatywnej grupy cząstek przechodzących przez maszynę. Dzięki temu połączeniu można symulować każdy młyn, w którym cząstki rudy są poddane oddziaływaniu razem z płynem. Po uzyskaniu tych wartości rozpoczyna się drugi etap, w którym pojedyncza cząstka rudy składająca się z elementów DEM zderza się z sztywną powierzchnią. Dane uzyskane na tym etapie są następnie wykorzystywane do określenia minimalnych wymaganych parametrów roboczych wybranej maszyny w celu uzyskania odpowiedniej jakości przemiału rudy. Proponowaną metodologię zastosowano do analizy nowatorskiej koncepcji wykorzystania młynów bijakowych do rozdrabniania rudy miedzi.

Z kolei w artykule [70] zaakcentowano, że młyn misowo – rolkowy (VRM) jest powszechnie stosowany w procesach rozdrabniania wtórnego i docelowego w wielu

gałęziach przemysłu. W niniejszym artykule przedstawiono metodę elementów dyskretnych (DEM) w celu zbadania procesu rozdrabniania w młynie VRM z przepływem przelewowym bez udziału powietrza, przy użyciu modelu cząstek związanych (BPM). Badania eksperymentalne kruszenia cząstek w laboratorium VRM porównano z wynikami symulacji i uzyskano dobrą zgodność, co wskazuje na dokładność modelu numerycznego. Następnie systematycznie zbadano wpływ właściwości materiału i warunków pracy na wydajność VRM z przelewem. Stwierdzono, że trendy w rozkładzie wielkości cząstek produktu oraz zmiany wydajności i szybkości kruszenia można zidentyfikować wraz ze zmianami właściwości materiału i warunków pracy. Te dwa aspekty mają ogromne znaczenie dla wydajności urządzenia. Zwiększenie prędkości obrotowej powoduje skrócenie czasu przebywania, co pomaga zwiększyć wydajność młyna. Prowadzi to jednak do zwiększenia udziału cząstek gruboziarnistych w gotowych produktach. Zachowanie materiałów podczas kruszenia jest związane z ich rozmiarem fizycznym, a także kształtem. Badania nad właściwościami rozdrabniania w VRM są niezbędne do optymalizacji procesu i parametrów pracy urządzeń rozdrabniających.

Z kolei w artykule [71] przeprowadzono symulacje numeryczne z wykorzystaniem obliczeniowej dynamiki płynów (CFD) i metod klasyfikacji pyłu w celu zbadania charakterystyki ruchu cząstek i poprawy rozkładu pola przepływu wewnątrz młyna. Pozwala to zwiększyć wydajność transportu i separacji cząstek. Wyniki te porównano następnie z wynikami eksperymentalnymi, wykazując błąd mniejszy niż 5%, co świadczy o tym, że przyjęty model dokładnie przewiduje charakterystykę przepływu i wydajność separacji młyna EM. Następnie analizowany jest ruch cząstek wewnątrz młyna w oparciu o metodę sprzężenia Fluent 2022R2 i EDEM 2022. Na koniec badany jest wpływ wysokości stożka nawrotu oraz liczby łopatek separatora na rozkład pola przepływu wewnętrznego i wydajność separacji cząstek. Uzyskane wyniki pokazują, że na ruch cząstek znaczący wpływ ma pole przepływu. Ponadto zwiększenie liczby łopatek separatora powoduje zmniejszenie przepływu wirowego między nimi w pewnym zakresie, co znacznie poprawia rozdrobnienie pyłu węglowego, kosztem wysokiej wydajności usuwania dużych cząstek. Zmniejszenie wysokości stożka nawrotu ogranicza powstawanie przepływu wirowego w strefie separacji wtórnej, co znacznie zwiększa wydajność separacji pyłu węglowego. Badanie to stanowi cenne wskazówki dotyczące zmiany konstrukcji stożka nawrotu i dostosowania liczby łopatek separatora, służy jako punkt odniesienia dla poprawy wydajności separacji cząstek i wzmocnienia wewnętrznego pola przepływu w młynie typu EM.

Z kolei w pracy [72] podjęto próbę opracowania podstaw konstrukcji i eksploatacji wybranej grupy młynów specjalnych przeznaczonych do mielenia materiałów trudno mielących się i umożliwiających uzyskanie produktu o ściśle określonych wymaganiach technicznych. W zakresie publikacji postanowiono umieścić podstawy różnych metod mielenia materiałów, podstawy konstrukcji, budowy i eksploatacji stosowanych w tych metodach specjalnych urządzeń technologicznych: szybkobieżnych młynów kulowych z kierownicą, młynów wibracyjnych, młynów obrotowo – wibracyjnych i młynów tocznych. W zakresie młynów tocznych, zebrane doświadczenia dotyczą głównie rozdrabniania minerałów w tym kamienia wapiennego. Brak informacji nt. pierścienia dyszowego.

W ramach przeglądu literaturowego stwierdzono niewielką styczność z publikacjami dotyczącymi pierścienia dyszowego, co jest czołowym wskaźnikiem innowacyjności podejmowanego problemu badawczego. Obecnie zastosowanie analizy CFD jest atutem przeprowadzanych obecnie badań.

## 2. Cel, zakres i tezy pracy

Cele niniejsze pracy są następujące:

1. Rozpowszechnienie wykorzystania zielonej energii w gospodarce naszego kraju,
2. Uzyskanie wyrobów spełniających założenia polityki energetycznej kraju – dostarczanie przez FPM S.A. młynów umożliwiających płynną regulację mocy konwencjonalnego bloku energetycznego wynikającej z współpracy tego bloku ze źródłami odnawialnymi,
3. Opracowanie geometrii pierścienia dyszowego, którego zastosowanie wspiera wyżej wymienione cele.

W zakres pracy doktorskiej wchodziło przeprowadzenie badań obiektowych, laboratoryjnych i numerycznych pierścienia dyszowego. Wspomniane badania obiektowe polegały na wyznaczeniu profilu przepływu przez standardowy pierścień dyszowy zainstalowany w przemysłowym młynie miazdzącym, co wiązało z przeprowadzeniem pomiarów przepływowych, tj. rozkładu ciśnienia i prędkości czynnika w poszczególnych elementach młyna, mających na celu wyznaczenie wspomnianego profilu przepływu. Dane uzyskane na tym etapie badań stanowiły punkt odniesienia do dalszych analiz w ramach zaplanowanych badań. Ponadto dane te również stanowiły dane wejściowe do skonstruowania stanowiska badawczego do badania pierścieni dyszowych.

Po zbudowaniu stanowiska badawczego przeprowadzono badania profilu przepływowego standardowego pierścienia dyszowego dla skali laboratoryjnej. Badania przeprowadzono za pomocą zimnego powietrza bez udziału nadawy. Badania te miały na celu określenie parametrów przepływu w skali laboratoryjnej oraz dostarczenia danych wejściowych do zastosowania zasad podobieństwa przepływów.

Na podstawie powyższych badań utworzono model numeryczny standardowego pierścienia dyszowego. Odtworzono geometrię, a następnie siatkę numeryczną pierścienia dyszowego. W dalszej kolejności wprowadzono warunki brzegowe i pozostałe dane wejściowe do analizy przepływowej, pochodzące z badań obiektowych. Przeprowadzono obliczenia numeryczne modelu pierścienia dyszowego w celu walidacji założonych modeli numerycznych. Efektem na tym etapie projektu jest możliwość przewidywania profilu przepływu przemysłowego pierścienia, dyszowego pracującego na gorąco, z mieszką pyłowo – powietrzną, na podstawie badań laboratoryjnych modelowego pierścienia dyszowego.

Po przeprowadzeniu badań dotyczących standardowego pierścienia dyszowego, przeprowadzono badania kilku wariantów pierścienia dyszowego na stanowisku laboratoryjnym o zmienionej geometrii w stosunku do standardowego rozwiązania. Po zakończeniu badań laboratoryjnych, zaimplementowano otrzymane wyniki do modelu numerycznego (badania numeryczne pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią), a następnie dokonano wyboru optymalnej geometrii pierścienia dyszowego.

Końcowym etapem badań jest skonstruowanie pierścienia dyszowego o nowej geometrii i sporządzenie projektu pierścienia dyszowego, który charakteryzuje się zmienioną geometrią w stosunku do standardowego rozwiązania.

Natomiast teza niniejszej pracy jest następująca:

1. Istnieje techniczna możliwość modyfikacji konstrukcji pierścienia dyszowego pod kątem zmniejszenia oporów przepływu czynnika, a przez to zapewnienia równomiernego profilu prędkości przepływu na obwodzie komory młyna.

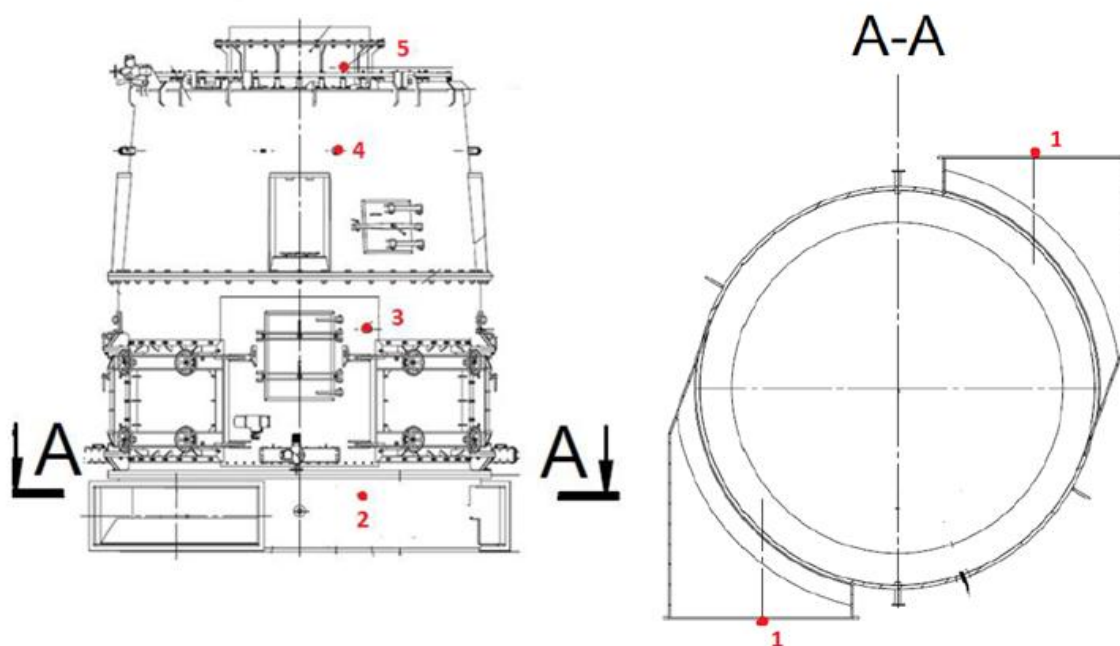
### 3. Metodologia

#### 3.1 Badania obiektowe pierścienia dyszowego

W ramach działań przewidzianych dla tego etapu projektu doktorskiego wytypowano młyn, na którym przeprowadzono pomiary. Następnie przygotowano młyn do pomiarów poprzez umiejscowienie króćców pomiarowych w poszczególnych elementach młyna równomiernie (tam, gdzie była techniczna możliwość) na ich obwodzie. Wspomniane króćce pomiarowe umieszczono na jednakowym poziomie w każdym elemencie młyna. Przygotowanie młyna do pomiarów odbyło się w wydziale produkcyjnym FPM S.A., ponieważ procesy produkcji/modernizacji młyna są właściwie jedyną możliwością na umieszczenie króćców pomiarowych. Po przekazaniu urządzenia do eksploatacji jest to prawie niemożliwe.

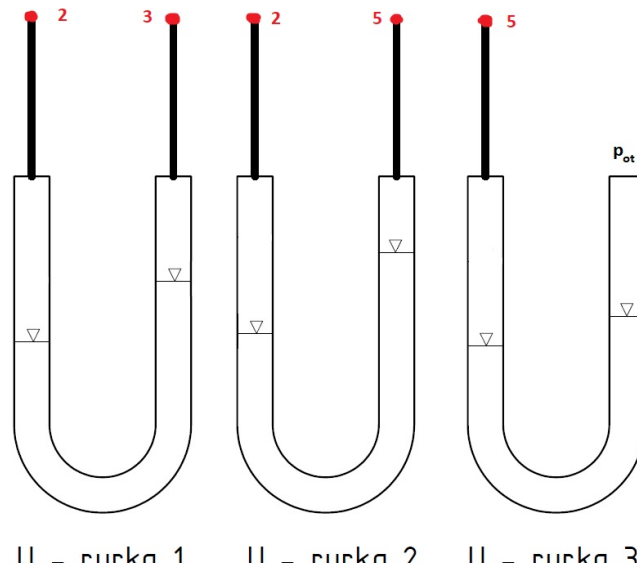
Króćce pomiarowe w punkcie pomiarowym nr 3 (Rys. 3.1) umieszczono wyżej, ponieważ obawiano się zbyt wysokiej koncentracji pyłu w dolnej części komory młyna co mogłoby uniemożliwić przeprowadzenie pomiarów poprzez zatkanie otworów w rurce Pitota. Ponadto umieszczenie króćców wyżej eliminowało niebezpieczeństwo zniszczenia rurki Pitota podczas pomiarów poprzez uniknięcie kolizji rurki z kulą będącą częścią układu mielącego przedmiotowego młyna. Badania obiektowe przeprowadzono przy niskim obciążeniu bloku, stałej wydajności i minimalnym zakresie wentylacji młyna. Warunki w których przeprowadzano pomiary są zgodne z założeniami projektu doktorskiego, ponieważ mogą symulować pracę bloku przy wysokim udziale energii odnawialnej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym. Pomiary obiektowe polegały na określeniu ciśnień oraz prędkości przepływu czynnika w poszczególnych elementach młyna.

Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych przedstawiono na Rys. 3.1. Przyjęty na schemacie system oznaczeń jest kompatybilny z indeksami parametrów zestawionych w tabelach 1-4, 10-12, 16-19.



Rys. 3.1. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych młyna

Ponadto zdecydowano się zastosować dodatkowe opomiarowanie młyna za pomocą trzech dodatkowych U – rurek. Schemat połączenia U – rurek z punktami pomiarowymi przedstawia Rys. 3.2.



Rys. 3.2. Schemat połączenia U – rurek z punktami pomiarowymi

Przedstawione w pracy wyniki badań obiektowych pochodzą z dwóch serii pomiarowych zrealizowanych z tygodniowym odstępem czasowym oraz dodatkowych trzech serii pomiarowych, podczas których zmieniano przekrój dysz pierścienia dyszowego i zarejestrowano zmiany poszczególnych parametrów pracy młyna. Pomiary ciśnienia dynamicznego oraz statycznego przepływającego czynnika na komorze młyna wykonywano na ściśle określonych średnicach pomiarowych zarówno dla komory młyna jak i dla odsiewacza.

Dla każdej z serii pomiarowych przebieg badań był następujący:

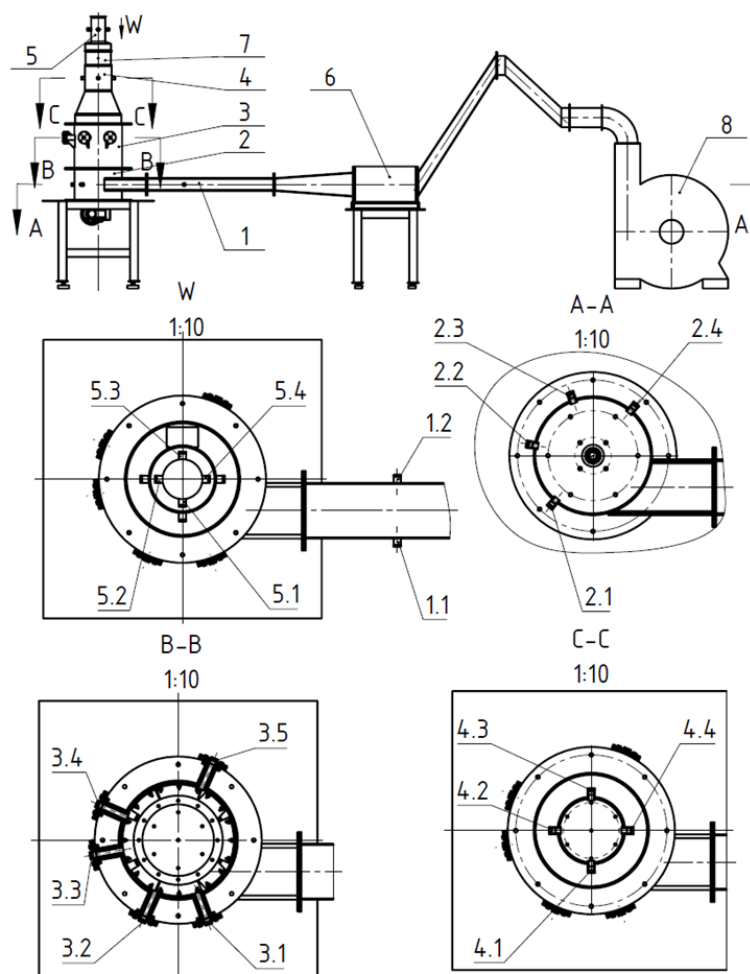
1. Udrożnienie wszystkich króćców pomiarowych;
2. Oględziny oraz sprawdzenie poprawności działania aparatury pomiarowej;
3. Upewnienie się, czy parametry pracy młyna są stabilne;
4. Odczytanie parametrów pracy młyna z nastawni blokowej;
5. Odczytanie wartości ciśnień z wszystkich trzech U – rurek;
6. Przyporządkowanie numerów porządkowych dla poszczególnych króćców pomiarowych;
7. Umieszczenie rurki Pitota wewnątrz króćca pomiarowego u ustawienie rurki w odpowiedniej odległości od ścianki mierzonego elementu młyna;
8. Po ustabilizowaniu się mierzonej temperatury dokonano odczytu dziesięciu wartości ciśnienia dynamicznego;
9. Następnie usunięto przewód z miernika ciśnienia, aby dokonać pomiaru ciśnienia statycznego (również dziesięć wartości);
10. Usunięcie rurki Pitota z króćca pomiarowego;
11. Kroki od 7 – 10 powtórzono dla każdego pomiaru z króćców pomiarowych;
12. Ponowne odczytanie parametrów pracy młyna z nastawni blokowej;
13. Ponowne odczytanie wartości ciśnień z wszystkich trzech U – rurek;
14. Zakończenie pomiarów lub zmiana parametrów ruchowych młyna;
15. W przypadku zmiany parametrów ruchowych młyna, odczekano 20 min w celu stabilizacji pozostałych parametrów.

W pierwszym dniu pomiarowym doszło do uszkodzenia rurki Pitota. W związku z powyższym pomiary powtórzono przy zastosowaniu innej rurki Pitota, dla każdego króćca umiejscowionego na komorze młyna. Ponadto okazało się, że nie było możliwości zmiany przekroju dysz pierścienia dyszowego. W związku z powyższym dokonano czynności

wymienionych w punktach 12 – 14 i pomiary zakończono. Pomiarów dokonano tylko na komorze młyna. Natomiast w drugim dniu pomiarowym wykonano czynności opisane w krokach od 1 do 14 zarówno dla komory młyna jak i odsiewacza. Następnie próbowano zmniejszyć przekrój dysz pierścienia dyszowego, lecz tym razem się również nie udało. Prawdopodobnie zbyt duża ilość elementów metalowych została zgromadzona w komorze młyna co uniemożliwiło ruch przysłon pierścienia dyszowego. Po ponownym wykonaniu kroków od 1 do 5 uznano, że parametry przepływowe nie zmieniły się, stąd dalsze prowadzenie pomiarów nie przyniosłoby pozyskania nowych informacji. W związku z tym pomiary zakończono. Ponadto w trzecim dniu pomiarowym wykonano trzy serie pomiarowe tylko na komorze młyna. Parametrem zmienianym był przekrój pierścienia dyszowego. Pierwsza seria pomiarowa charakteryzowała się stopniem otwarcia przekroju na poziomie 95%. W kolejnej serii pomiarowej stopień otwarcia przekroju pierścienia dyszowego wynosił 77%. Z kolei w ostatniej serii pomiarowej, pomiary wykonano przy 50% przysłonięciu przekroju pierścienia dyszowego. Przebieg pomiarów każdej z serii pomiarowych wykonano według powyższego algorytmu, realizując czynności wymienione w punktach od 1 do 15.

### 3.2 Badania laboratoryjne pierścienia dyszowego

Na podstawie danych uzyskanych w wyniku przeprowadzenia badań obiektowych pierścienia dyszowego zaprojektowano i skonstruowano stanowisko badawcze do badania pierścieni dyszowych (Rys. 3.3). Ponadto na Rys. 3.3 przedstawiono rozmieszczenie punktów pomiarowych (widok W oraz przekroje A-A, B-B i C-C).



Rys. 3.3. Budowa stanowiska do badania pierścieni dyszowych

gdzie:

- 1 – Kanał doprowadzający powietrze;
- 2 – Komora powietrza;
- 3 – Komora młyna;
- 4 – Punkt pomiarowy na wlocie do „odsiewacza młyna”;
- 5 – Wylot powietrza z instalacji badawczej;
- 6 – Przepustnica regulacyjna I;
- 7 – Przepustnica regulacyjna II – „odsiewacz młyna”;
- 8 – Wentylator powietrza.

Czynnikiem przepływającym przez każdy z badanych pierścieni dyszowych było wyłącznie zimne powietrze. Badania te miały na celu określenie parametrów przepływu strumienia powietrza przez pierścień dyszowy w skali laboratoryjnej oraz dostarczenia danych wejściowych do zastosowania zasad podobieństwa przepływów. Ponadto powyższe dane zastosowano do porównania z wynikami badań obiektowych i numerycznych pierścieni dyszowych.

Badania przeprowadzono przyjmując stałą wentylację instalacji badawczej. Zanim wykonano pomiary, uruchomiono wentylator instalacji badawczej, uruchomiono silnik napędzający piastę, na której przymocowano pierścień dyszowy i ustabilizowano parametry pracy instalacji. Pomiary wykonano po 1,5h od uruchomienia instalacji badawczej. Temperaturę oraz prędkość przepływającego przez instalację powietrza mierzono rurką spiętrzącą z możliwością pomiaru temperatury. Natomiast ciśnienia statyczne oraz wentylację instalacji mierzono za pomocą miernika ciśnienia. Pomiar był realizowany przechodząc od punktu pomiarowego 1.1 do punktu pomiarowego 5.1. Pomiar nie był zsynchronizowany we wszystkich punktach pomiarowych jednocześnie. Wykonano po 3 serie pomiarowe na każdy badany wariant. Badania pierścienia dyszowego charakteryzującego się bazową oraz zmienioną geometrią wykonano przy otwarciu przekroju wylotu pierścienia dyszowego wynoszącego 95%. Ponadto przebadano warianty z pierścieniem dyszowym wykonującym ruch obrotowy oraz niewykonyjącym ruchu obrotowego.

### 3.3 Badania numeryczne pierścienia dyszowego

Do stworzenia modelu geometrycznego i siatki numerycznej wykorzystano komercyjny program CFD Ansys Fluent. Dla dyskretyzacji ciśnienia wybrano schemat PRESTO. W celu oszacowania gradientu wybrano podejście least squares cell-based. Natomiast sprzężenie ciśnienie-prędkość zostało zamodelowane przy użyciu schematu SIMPLE. Ponadto do opisu fazy gazowej wykorzystano układ współrzędnych Eulera. Biorąc pod uwagę wpływ gradientów ciśnienia, zastosowano model turbulencji k-ε real z opcją dla warstwy przyściennej enhance wall treatment. Równania transportu dla modelu k-ε przedstawiono poniżej:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b^- + S_\varepsilon, \quad (2)$$

gdzie:  $G_k$  energia kinetyczna turbulencji spowodowana gradientem prędkości,  $G_b$  to energia kinetyczna turbulencji spowodowana siłą wyporu,  $Y_M$  jest wynikiem fluktuacji dylatacyjnych w turbulencji ściśliwej,  $C_2$  i  $C_{1\varepsilon}$  to stałe,  $\sigma_k$  i  $\sigma_\varepsilon$  są liczbami Prandtla dla k i ε.

Podejście Lagrang'a zostało zastosowane do przepływu poruszającej się cząstki. W tym podejściu możliwe jest określenie wielkości fizycznych, takich jak temperatura i prędkość w dowolnym punkcie ruchu. W przypadku przepływu turbulentnego równanie ruchu cząstek oblicza ścieżki ruchu przy użyciu średniej prędkości płynu  $\bar{u}$ :

$$\frac{du_p}{dt} = F_d(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (3)$$

Pierwsza część równania odnosi się do siły tarcia, natomiast druga część równania odnosi się do siły grawitacji.

$$F_d = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho d_p (u_p - u)}{\mu}, \quad (5)$$

gdzie:  $u$  – prędkość przepływu,  $u_p$  – prędkość cząstek,  $\mu$  - lepkość dynamiczna płynu,  $\rho$  – gęstość płynu,  $\rho_p$  – gęstość cząstek,  $d_p$  – średnica cząstek,  $Re$  – liczba Reynoldsa,  $C_D$  – współczynnik oporu zależny od kształtu cząstek.

Obliczenia nie obejmowały interakcji między cząstkami (interakcji cząstka-cząstka). Jednak ze względu na dwukierunkowe podejście, interakcja między cząstką, a powietrzem została uwzględniona poprzez wymianę masy, energii i pędu. Model stochastyczny został zastosowany do obliczenia rozproszenia cząstek wynikającego z efektów turbulencji gazu. Rozkład ziarnowy pyłu został określony poprzez zastosowanie rozkładu Rosina – Rammlera – Sperlinga. W obliczeniach przyjęto sferyczny kształt cząstek pyłu. Założono, że rozdrobnione cząstki pyłu są odbijane po zderzeniu ze ścianą. W Tab. 3.1 przedstawia parametry nadawy wykorzystanej w modelu numerycznym.

Tab. 3.1 Parametry nadawy wprowadzonej do młyna

Parametr	Jednostka	Wartość
Pozostałość na sicie 88 (90) $\mu\text{m}$	%	23,15
Pozostałość na sicie 200 $\mu\text{m}$	%	3,1
Średnia średnica ziarna	$\mu\text{m}$	61
Liczba polidispersji	-	1,05

### 3.3.1 Bazowa geometria pierścienia dyszowego

Po przeprowadzeniu analizy dotychczas zgromadzonych danych, badania numeryczne w głównej mierze oparto na danych pozyskanych w trzecim dniu pomiarowym badań obiektowych. Ponadto brakujące dane do modelu numerycznego w zakresie przepływów przez odsiewacz młyna pozyskano na podstawie wyników badań obiektowych, uzyskanych w drugim dniu pomiarowym.

W zakresie przeprowadzonych badań numerycznych było zaimplementowanie wyników badań obiektowych do modelu numerycznego dla trzech wymienionych wyżej stopni otwarcia przekroju pierścienia dyszowego, uwzględniając dane pomiarowe dla odsiewacza przeprowadzonych w drugim dniu pomiarowym. Ponadto przebadano dziewięć wariantów alternatywnych odnoszących się do podstawowej geometrii pierścienia dyszowego, pozwalających określić wpływ pozostałych czynników towarzyszących przepływowi strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej przez młyn na wynik przeprowadzonych obliczeń.

### 3.3.2 Zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego

W ramach badań numerycznych pierścienia dyszowego przebadano XI wariantów różniących się różnymi parametrami konstrukcyjnymi. W ramach tych badań porównano wyniki badań numerycznych z wynikami badań laboratoryjnych pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią. Po analizie otrzymanych wyników badań nastąpił wybór optymalnej geometrii pierścienia dyszowego.

## 4. Wyniki badań bazowej geometrii pierścienia dyszowego oraz ich dyskusja

### 4.1 Wyniki badań obiektowych pierścienia dyszowego

W ramach działań przewidzianych dla tego etapu projektu doktorskiego wytypowano młyn, na którym przeprowadzono pomiary. W Tab. 4.1. zestawiono wyniki pomiarów odczytane z nastawni blokowej pochodzące z dwóch dni, w których przeprowadzono pomiary.

Tab. 4.1. Wyniki parametrów odczytanych z nastawni blokowej

Parametr	Symbol	Jednostka	I dzień		II dzień	
			godz. 22.30	godz. 1.15	godz. 22.40	godz. 0.42
1	2	3	4	5	6	7
Ustawienie łopatek odsiewacza		%	65	65	65	65
1	2	3	4	5	6	7
Ustawienie przysłon ruchomych pierścienia dyszowego (stopień otwarcia przekroju)		%	100	100	100	100
Ustawienie przysłon stałych pierścienia dyszowego (stopień otwarcia)		%	50	50	50	50
Wysterowanie podajnika węgla	$n_{pw}$	%	35	35	43,2	41,6
Temperatura powietrza przed młynem	$t_{1r}$	°C	247	247	272	272
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_{5r}$	°C	112	111	100	100
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_{1r}$	kPa	5,02	5,95	6,07	6,62
Różnica ciśnienia pomiędzy wentylatorem młynowym a uszczelniającym	$\Delta p_{mt-u}$	kPa	8,85	9,11	8,14	8,30
Wentylacja młyna	$\dot{V}_{1r}$	m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h	54000	53000	59000	59000
Moc bloku	$N_{el}$	MW	-	-	146	141
Moc silnika młyna	$N_m$	kW	-	-	178	191
Prąd silnika młyna	$I_m$	A	30,1	31,1	31,3	31,7

W Tab. 4.2. zestawiono wyniki pomiarów odczytane z nastawni blokowej pochodzące z trzeciego dnia pomiarowego.

Tab. 4.2. Wyniki parametrów odczytanych z nastawni blokowej

Parametr	Symbol	Jednostka	III dzień		
			godz. 22.20	godz. 0.30	godz. 2.00
Ustawienie łopatek odsiewacza		%	65	65	65
Ustawienie przysłon ruchomych pierścienia dyszowego (stopień otwarcia przekroju)		%	100	80	50
Ustawienie przysłon stałych pierścienia dyszowego (stopień otwarcia)		%	50	50	50
Wysterowanie podajnika węgla	$n_{pw}$	%	37	36,8	36,3
Temperatura powietrza przed młynem	$t_{1r}$	°C	274	273	274
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_{5r}$	°C	101	102	110
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_{1r}$	kPa	6,52	6,55	7,3
Różnica ciśnienia pomiędzy wentylatorem młynowym a uszczelniającym	$\Delta p_{mł-u}$	kPa	7,97	7,57	7,0
Wentylacja młyna	$\dot{V}_{1r}$	$m^3_n/h$	55000	57000	56000
Moc bloku	$N_{el}$	MW	140	140	142
Moc silnika młyna	$N_m$	kW	198	184	172
Prąd silnika młyna	$I_m$	A	32,5	31,2	33,2

Analizując wyniki odczytanych parametrów umieszczonych w Tab. 4.1. i Tab. 4.2. można dojść do wniosku, że pomiary przeprowadzono w warunkach ustalonych przy stosunkowo niskim obciążeniu bloku (w porównaniu z maksymalną mocą elektryczną bloku, która wynosi 223 MW<sub>e</sub>), a co za tym idzie, przy niskim obciążeniu młyna (maksymalna moc silnika młyna wynosi 630 kW) oraz stosunkowo niskiej wentylacji młyna (nominalna wentylacja młyna wynosi od 70 000 – 90 000 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h). Dlatego takie warunki pomiarów mogą odzwierciedlać warunki pracy bloku przy wysokim udziale źródeł odnawialnych bilansie energetycznym Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, co jest jednym z założeń realizacji projektu doktorskiego. Ponadto należy zwrócić uwagę na zarejestrowane godziny przeprowadzania pomiarów można zauważyć, że pomiary obiektowe są charakteryzują się wysokim stopniem czasochłonności (od 1,5h do 2,5h na serię pomiarową), co w zestawieniu z bardzo ograniczonym czasem na przeprowadzenie pomiarów powoduje, że ilość przedstawionych pomiarów nie będzie bardzo wysoka, lecz wystarczająca do utworzenia projektu stanowiska badawczego oraz modelu numerycznego standardowego pierścienia dyszowego.

W Tab. 4.3. zestawiono wyniki pomiarów ciśnienia za pomocą U – rurek. Przedstawione pomiary pochodzą z dwóch serii pomiarowych.

Tab. 4.3. Wyniki pomiarów ciśnienia za pomocą U – rurek

Parametr	Symbol	Jednostka	I dzień		II dzień	
			godz. 22.30	godz. 1.15	godz. 22.40	godz. 0.42
U - rurka 1: straty ciśnienia na pierścieniu dyszowym	$\Delta p_{2-3}$	kPa	2,94	2,94	3,21	3,48
U - rurka 2: straty ciśnienia całego młyna	$\Delta p_{2-5}$	kPa	3,62	3,55	4,22	4,17
U - rurka 3: nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej na wylocie z młyna	$p_5$	kPa	1,29	1,27	1,72	1,62
Straty ciśnienia przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej przez odsiewacz	$\Delta p_{4-5}$	kPa	0,68	0,61	1,01	0,69
Stosunek strat ciśnienia przepływu powietrza przez pierścień dyszowy do strat ciśnienia całego młyna		%	79	63	74	70
Nadciśnienie statyczne w komorze młyna	$p_3$	kPa	1,97	1,88	2,73	2,31
Nadciśnienie statyczne w komorze powietrza	$p_2$	kPa	4,91	4,82	5,94	5,79

W Tab. 4.4. zestawiono wyniki pomiarów ciśnienia za pomocą U – rurek. Przedstawione pomiary pochodzą z trzeciego dnia pomiarowego.

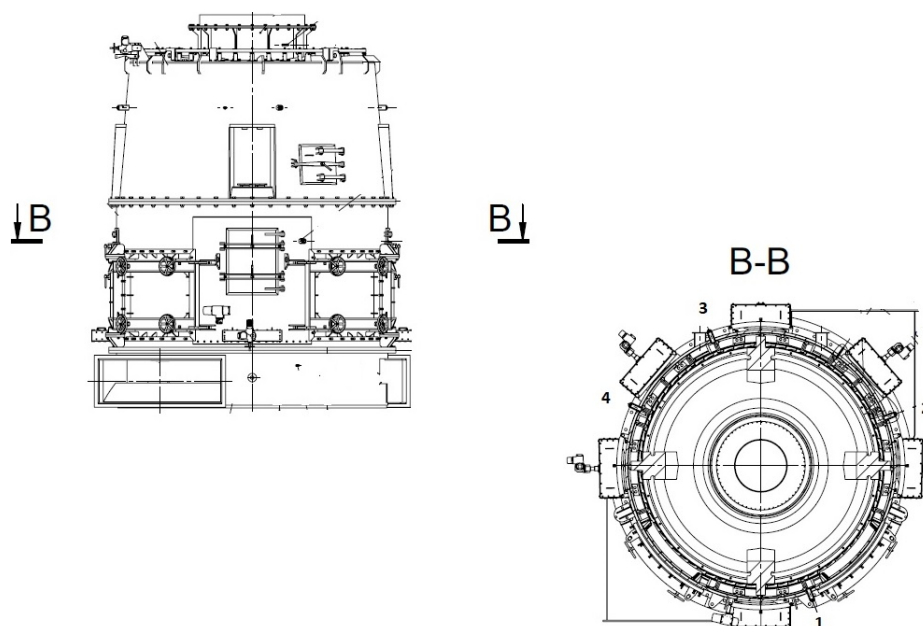
Tab. 4.4. Wyniki pomiarów ciśnienia za pomocą U – rurek

Parametr	Symbol	Jednostka	III dzień		
			godz. 22.20	godz. 0.30	godz. 2.00
U - rurka 1: straty ciśnienia na pierścieniu dyszowym	$\Delta p_{2-3}$	kPa	3,73	3,85	4,64
U - rurka 2: straty ciśnienia całego młyna	$\Delta p_{2-5}$	kPa	4,32	4,41	5,20
U - rurka 3: nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej na wylocie z młyna	$p_5$	kPa	1,42	1,57	1,42
Straty ciśnienia przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej przez odsiewacz	$\Delta p_{4-5}$	kPa	0,59	0,56	0,56
Stosunek strat ciśnienia przepływu powietrza przez pierścień dyszowy do strat ciśnienia całego młyna		%	73	77	79
Nadciśnienie statyczne w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,01	2,13	1,98
Nadciśnienie statyczne w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,73	5,98	6,62

Analizując wyniki odczytanych parametrów umieszczonych w Tab. 4.3. i Tab. 4.4. można dojść do wniosku, że straty miejscowe przepływu powietrza przez pierścień dyszowy stanowią od 70% do 79% strat ciśnienia całego młyna. W przypadku zmniejszania przekroju pierścienia dyszowego straty ciśnienia na pierścieniu dyszowym wzrastają. Otrzymane wyniki dowodzą zasadność prowadzenia rozważań w tym kierunku oraz postawionych też w ramach projektu doktorskiego. Natomiast otrzymane parametry również

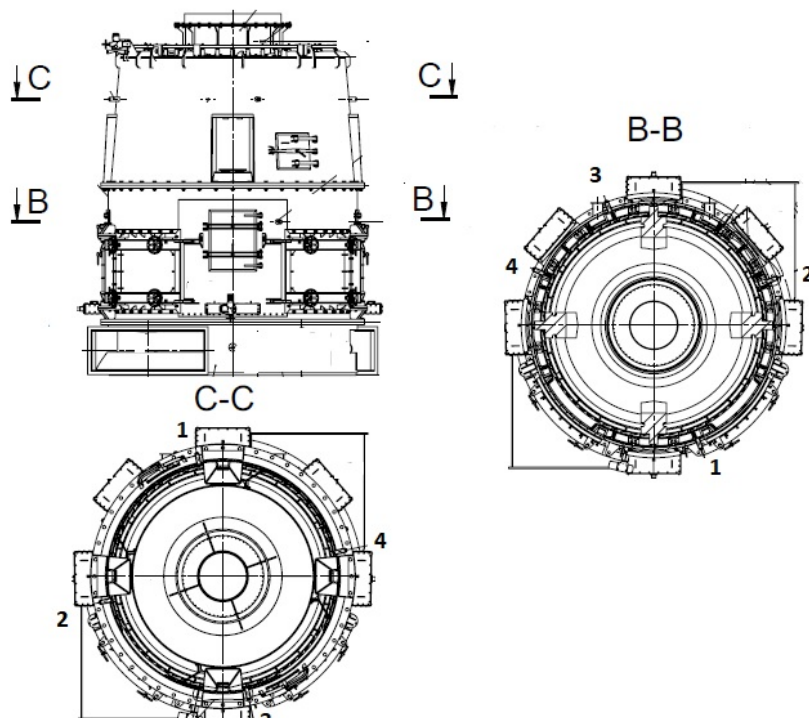
zestawione w powyższych tabelach będą stanowiły dane sprawdzające do projektu stanowiska badawczego oraz modelu numerycznego standardowego pierścienia dysowego.

Na Rys. 4.1 przedstawiono schemat rozmieszczenia króćców pomiarowych wraz z przyporządkowanymi do nich numerami.



Rys. 4.1. Schemat rozmieszczenia króćców pomiarowych na komorze młynna

Na Rys. 4.2 przedstawiono schemat rozmieszczenia króćców pomiarowych wraz z przyporządkowanymi do nich numerami zarówno dla komory młynna jak i odsiewacza. Króćce pomiarowe zostały ponumerowane tak że króciec nr 1 komory młynna jest umiejscowiony pod króćcem nr 1 odsiewacza. Zasada ta jest analogiczna dla pozostałych króćców pomiarowych. Schemat przyporządkowania numerów króćców w drugim dniu pomiarowym jest identyczny jak dla pierwszego dnia pomiarowego.



Rys. 4.2. Schemat rozmieszczenia króćców pomiarowych na komorze młynna oraz odsiewaczu

W Tab. 4.5. przedstawiono wyniki pomiarów ciśnienia dynamicznego oraz statycznego w komorze młyna dla pierwszego dnia pomiarowego. Numer króćca w Tab. 4.5. odpowiada numerowi króćca na schemacie przedstawionym na Rys. 4.1.

Tab. 4.5. Wyniki pomiarów ciśnienia i prędkości dla komory młyna w pierwszym dniu pomiarowym

Nr króćca pomiarowego	Ciśnienie dynamiczne $p_d$ , Pa	Ciśnienie statyczne $p_{st}$ , Pa	Temperatura $t$ , °C	Gęstość $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Prędkość $w$ , m/s
1	-20	1850	89	0,975	-6,4
	4	1800	90,4	0,971	2,9
	-21	1779	92,4	0,966	-6,6
	-9	1763	94,4	0,961	-4,3
	-10	1745	98,3	0,951	-4,6
	-4	1810	101,3	0,943	-2,9
	-11	1784	103	0,939	-4,8
	-2	1823	105	0,934	-2,1
2	-7	1995	90,6	0,971	-3,8
	-3	1923	107	0,929	-2,5
	-10	1982	108,4	0,926	-4,7
	-4	1903	111,4	0,918	-3,0
	-12	1955	110	0,922	-5,1
	-3	1920	108,8	0,925	-2,6
	-15	1992	109	0,924	-5,7
	-13	1910	110,1	0,921	-5,3
	-14	1988	111	0,919	-5,5
	-27	1985	111	0,919	-7,7
	-6	1970	111	0,919	-3,6
	-14	1976	111	0,919	-5,5
3	-7	1767	73	1,020	-3,7
	-9	1748	77	1,009	-4,2
	-4	1774	79	1,003	-2,8
	1	1700	86	0,983	1,4
	-11	1801	88	0,978	-4,8
	4	1774	91	0,970	2,9
	16	1800	84,2	0,988	5,7
	-2	1770	97,5	0,953	-2,1
	-2	1756	99,5	0,948	-2,1
	-14	1764	102,8	0,939	-5,5
	-10	1792	104,6	0,935	-4,6
4	4	1805	78	1,006	2,8
	-11	1804	87	0,981	-4,7
	-23	1835	93,4	0,963	-6,9
	2	1857	99	0,949	2,1
	-11	1855	101,2	0,943	-4,8
	-11	1828	104,5	0,935	-4,9
	-6	1813	107,4	0,928	-3,6
	-10	1810	104	0,936	-4,6
-8	1806	111	0,919	-4,2	

W Tab. 4.6. i Tab. 4.7. przedstawiono wyniki pomiarów ciśnienia dynamicznego oraz statycznego odpowiednio dla komory młyna i odsiewacza w drugim dniu pomiarowym.

Tab. 4.6. Wyniki pomiarów ciśnienia i prędkości dla komory młyna w drugim dniu pomiarowym

Nr króćca pomiarowego	Ciśnienie dynamiczne $\rho_d$ , Pa	Ciśnienie statyczne $\rho_{st}$ , Pa	Temperatura $t$ , °C	Gęstość $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Prędkość $w$ , m/s
1	5	2301	101,7	0,942	3,3
	10	2261	101,7	0,942	4,6
	14	2375	101,7	0,942	5,5
	-6	2175	101,7	0,942	-3,6
	11	2223	101,7	0,942	4,8
	-3	2300	101,7	0,942	-2,5
	2	2257	101,7	0,942	2,1
	8	2268	101,7	0,942	4,1
	12	2282	101,7	0,942	5,1
	-3	2326	101,7	0,942	-2,5
2	-7	2300	102,7	0,940	-3,9
	2	2261	102,7	0,940	2,1
	11	2294	102,7	0,940	4,8
	-10	2264	102,7	0,940	-4,6
	6	2305	102,7	0,940	3,6
	11	2341	102,7	0,940	4,8
	-9	2195	102,7	0,940	-4,4
	4	2233	102,7	0,940	2,9
3	2	2231	102,7	0,940	2,1
	9	2230	102,7	0,940	4,4
	1	2232	101,7	0,942	1,5
	7	2238	101,7	0,942	3,9
	3	2240	101,7	0,942	2,5
	13	2251	101,7	0,942	5,3
	1	2228	101,7	0,942	1,5
	2	2157	101,7	0,942	2,1
	5	2250	101,7	0,942	3,3
	-4	2237	101,7	0,942	-2,9
4	3	2253	101,7	0,942	2,5
	-5	2295	101,7	0,942	-3,3
	-12	2309	100,5	0,945	-5,0
	11	2328	100,5	0,945	4,8
	12	2257	100,5	0,945	5,0
	13	2179	100,5	0,945	5,3
	4	2190	100,5	0,945	2,9
	6	2238	100,5	0,945	3,6
	9	2315	100,5	0,945	4,4
	14	2303	100,5	0,945	5,5
4	-3	2206	100,5	0,945	-2,5
	4	2240	100,5	0,945	2,9

Tab. 4.7. Wyniki pomiarów ciśnienia i prędkości dla odsiewacza w drugim dniu pomiarowym

Nr króćca pomiarowego	Ciśnienie dynamiczne $\rho_d$ , Pa	Ciśnienie statyczne $\rho_{st}$ , Pa	Temperatura $t$ , °C	Gęstość $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Prędkość $w$ , m/s
1	-6	2188	100,1	0,946	-3,6
	7	2087	100,1	0,946	3,9
	11	2121	100,1	0,946	4,8
	-10	2133	100,1	0,946	-4,6
	-20	2098	100,1	0,946	-6,5
	-18	2161	100,1	0,946	-6,2
	-9	2175	100,1	0,946	-4,4
	-6	2049	100,1	0,946	-3,6
	2	2154	100,1	0,946	2,1
	-11	2130	100,1	0,946	-4,8
2	6	2155	101,2	0,943	3,6
	10	2146	101,2	0,943	4,6
	-13	2151	101,2	0,943	-5,3
	8	2206	101,2	0,943	4,1
	16	2135	101,2	0,943	5,8
	-2	2157	101,2	0,943	-2,1
	33	2190	101,2	0,943	8,4
	15	2147	101,2	0,943	5,6
	28	2137	101,2	0,943	7,7
	13	2185	101,2	0,943	5,3
3	13	2154	101,3	0,943	5,3
	17	2129	101,3	0,943	6,0
	12	2178	101,3	0,943	5,1
	14	2146	101,3	0,943	5,5
	2	2198	101,3	0,943	2,1
	-1	2182	101,3	0,943	-1,5
	13	2163	101,3	0,943	5,3
	26	2183	101,3	0,943	7,4
	7	2121	101,3	0,943	3,9
	9	2129	101,3	0,943	4,4
10	2209	101,3	0,943	4,6	
4	5	2144	101,9	0,942	3,3
	8	2217	101,9	0,942	4,1
	10	2122	101,9	0,942	4,6
	19	2146	101,9	0,942	6,4
	13	2150	101,9	0,942	5,3
	11	2156	101,9	0,942	4,8
	13	2121	101,9	0,942	5,3
	30	2140	101,9	0,942	8,0
	26	2142	101,9	0,942	7,4
	20	2161	101,9	0,942	6,5

W wyniku analizy danych, w celu ustalenia wartości poszczególnych parametrów uznano medianę wyspecyfikowanych wskazań. W Tab. 4.8. i Tab. 4.9. zestawiono ostateczne wartości parametrów przyjęte do dalszej analizy odpowiednio dla komory młyna oraz odsiewacza.

Tab. 4.8. Mediana ciśnienia i prędkości przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej dla komory młyna

Nr króćca pomiarowego	Dzień pomiarowy	Ciężnienie dynamiczne	Ciężnienie statyczne	Temperatura	Gęstość	Prędkość
		$p_d$ , Pa	$p_{st}$ , Pa	$t$ , °C	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$w$ , m/s
1	I	9,5	1781,5	105	0,934	4,5
	II	6,5	2275	101,7	0,942	3,7
2	I	11	1982	111,4	0,918	4,9
	II	2	2263	102,7	0,940	2,1
3	I	4	1770	104,6	0,935	2,9
	II	2,5	2239	101,7	0,942	2,3
4	I	9,5	1828	113	0,914	4,6
	II	7,5	2248,5	100,5	0,945	4,0

Tab. 4.9. Mediana ciśnienia i prędkości przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej dla odsiewacza w drugim dniu pomiarowym

Nr króćca pomiarowego	Ciężnienie dynamiczne	Ciężnienie statyczne	Temperatura	Gęstość	Prędkość
	$p_d$ , Pa	$p_{st}$ , Pa	$t$ , °C	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$w$ , m/s
1	7,5	2131,5	100,1	0,946	4,0
2	11,5	2153	101,2	0,943	4,9
3	12	2182	100,1	0,946	5,0
4	12	2145	101,9	0,942	5,1

W celu podjęcia próby sprawdzenia wielkości mierzonych postanowiono analitycznie obliczyć prędkości, liczbę  $Ma$  oraz liczbę  $Re$ . W Tab. 4.10. zestawiono wyniki obliczeń wybranych parametrów dla komory młyna oraz odsiewacza dla każdego dnia pomiarowego.

Tab. 4.10. Wyniki obliczeń analitycznych wybranych parametrów

Dzień pomiarowy	Komora młyna				Odsiewacz	
	$w_{a3}$ , m/s	$Ma_{a3}$	$Re_{a3}$	$w_{a4}$ , m/s	$Ma_{a4}$	$Re_{a4}$
I	2,6 – 6,4	0,01 – 0,02	563 243	-	-	-
II	2,9 – 7,0	0,01 – 0,02	608 069	4,6 – 5,8	0,01	556 590

W Tab. 4.11. zestawiono ciśnienia statyczne panujące w komorze młyna oraz odsiewaczu wynikające zarówno z pomiarów U – rurką oraz zmierzone bezpośrednio za pomocą rurki Pitota. Dane zestawione w Tab. 4.11. stanowiąc będą dane sprawdzające dla modelu numerycznego standardowego pierścienia dyszowego.

Tab. 4.11. Porównanie ciśnień statycznych otrzymanych z odmiennych metod pomiarowych

Dzień pomiarowy	Miejsce pomiaru	Komora młyna				Odsiewacz	
		$p_{3Pitota}$ , Pa	$p_{3U}$ , Pa	$\Delta p_3$ , %	$p_{4Pitota}$ , Pa	$p_{4U}$ , Pa	$\Delta p_4$ , %
I	Króciec 1	1781,5		11	-		-
	Króciec 2	1982	1971	1	-		-
	Króciec 3	1770		11	-		-
	Króciec 4	1828		8	-		-
Króciec 1	2275	20		2131,5		-	
II	Króciec 2	2263	2726	20	2153		-
	Króciec 3	2239		22	2182		-
	Króciec 4	2248,5		21	2145		-

Analizując pomiary ciśnienia statycznego przeprowadzone na komorze młyna można zauważyć, że rząd otrzymanych wartości z wyżej wymienionych metod pomiarowych jest na porównywalnym poziomie, lecz wskazania mogą wahać się od 1 do 22% w zależności od obciążenia oraz wentylacji młyna. W przypadku pomiarów na odsiewaczu U – rurka nie była podłączona w miejscu, gdzie dokonywano pomiarów rurką Pitota, stąd nie ma w tym miejscu pomiarów porównawczych. W Tab. 4.12. zestawiono parametry charakteryzujące przepływ czynnika przez każdy element młyna w poszczególnych punktach pomiarowych.

Tab. 4.12. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn

Parametr	Symbol	Jednostka	I dzień		II dzień	
			godz. 22.30	godz. 1.15	godz. 22.40	godz. 0.42
Wentylacja młyna	$\dot{V}_{1r}$	$m^3_n/h$	54000	53000	59000	59000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_{1r}$	kPa	5,02	5,95	6,07	6,62
Temperatura powietrza przed młynem	$t_{1r}$	°C	247	247	272	272
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	4,91 3	4,82 5	5,93 3	5,78 6
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	1,97 1	1,88 3	2,72 6	2,30 4
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	105	-	101, 7	-
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	-	-	2,14 9	-
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	-	-	100, 7	-
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,29 4	1,27 5	1,71 6	1,61 8
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_{5r}$	°C	112	111	100	100

W Tab. 4.13.do Tab. 4.15przedstawiono wyniki pomiarów ciśnienia dynamicznego oraz statycznego dla komory młyna w trzecim dniu pomiarowym odpowiednio dla każdej z trzech serii pomiarowych.

Tab. 4.13. Wyniki pomiarów ciśnienia i prędkości dla komory młyna w trzecim dniu pomiarowym – I seria pomiarowa

Nr króćca pomiarowego	Ciśnienie dynamiczne $p_d$ , Pa	Ciśnienie statyczne $p_{st}$ , Pa	Temperatura $t$ , °C	Gęstość $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Prędkość $w$ , m/s
1	4	1912	102,8	0,939	2,9
	4	1927	102,8	0,939	2,9
	5	1944	102,8	0,939	3,3
	6	1946	102,8	0,939	3,6
	6	1953	102,8	0,939	3,6
	6	1954	102,8	0,939	3,6
	7	1955	102,8	0,939	3,9
	8	1970	102,8	0,939	4,1
	9	1985	102,8	0,939	4,4
	9	1996	102,8	0,939	4,4
2	12	1928	107,3	0,928	5,1
	12	1934	107,3	0,928	5,1
	12	1940	107,3	0,928	5,1
	13	1948	107,3	0,928	5,3
	13	1949	107,3	0,928	5,3
	13	1952	107,3	0,928	5,3
	14	1965	107,3	0,928	5,5
	15	1965	107,3	0,928	5,7
	19	1973	107,3	0,928	6,4
	24	1999	107,3	0,928	7,2
3	10	1926	105,2	0,933	4,6
	10	1935	105,2	0,933	4,6
	13	1940	105,2	0,933	5,3
	14	1940	105,2	0,933	5,5
	14	1942	105,2	0,933	5,5
	16	1942	105,2	0,933	5,9
	17	1943	105,2	0,933	6,0
	18	1946	105,2	0,933	6,2
	18	1947	105,2	0,933	6,2
	19	1948	105,2	0,933	6,4
4	24	1900	110,3	0,921	7,2
	27	1910	110,3	0,921	7,7
	30	1962	110,3	0,921	8,1
	37	1990	110,3	0,921	9,0
	41	1991	110,3	0,921	9,4
	43	1997	110,3	0,921	9,7
	48	1999	110,3	0,921	10,2
	48	2012	110,3	0,921	10,2
	51	2016	110,3	0,921	10,5
	53	2019	110,3	0,921	10,7

Tab. 4.14. Wyniki pomiarów ciśnienia i prędkości dla komory młyna w trzecim dniu pomiarowym – II seria pomiarowa

Nr króćca pomiarowego	Ciśnienie dynamiczne $p_d$ , Pa	Ciśnienie statyczne $p_{st}$ , Pa	Temperatura $t$ , °C	Gęstość $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Prędkość $w$ , m/s
1	5	2055	104,4	0,935	3,3
	6	2058	104,4	0,935	3,6
	6	2059	104,4	0,935	3,6
	-7	2063	104,4	0,935	3,9
	-8	2065	104,4	0,935	4,1
	-8	2069	104,4	0,935	4,1
	11	2069	104,4	0,935	4,9
	12	2076	104,4	0,935	5,1
	13	2080	104,4	0,935	5,3
	13	2087	104,4	0,935	5,3
	2	17	1980	106,8	0,930
17		1982	106,8	0,930	6,1
17		1989	106,8	0,930	6,1
17		1996	106,8	0,930	6,1
19		1997	106,8	0,930	6,4
-21		2001	106,8	0,930	6,7
22		2013	106,8	0,930	6,9
23		2024	106,8	0,930	7,0
24		2035	106,8	0,930	7,2
27	2040	106,8	0,930	7,6	
3	22	1976	106,4	0,931	6,9
	23	1982	106,4	0,931	7,0
	25	1990	106,4	0,931	7,3
	26	1991	106,4	0,931	7,5
	33	1995	106,4	0,931	8,4
	35	2009	106,4	0,931	8,7
	41	2012	106,4	0,931	9,4
	-42	2013	106,4	0,931	9,5
	45	2022	106,4	0,931	9,8
49	2028	106,4	0,931	10,3	
4	23	1986	111,3	0,919	7,1
	23	1990	111,3	0,919	7,1
	24	1997	111,3	0,919	7,2
	25	1998	111,3	0,919	7,4
	26	2000	111,3	0,919	7,5
	28	2000	111,3	0,919	7,8
	28	2019	111,3	0,919	7,8
	28	2029	111,3	0,919	7,8
	29	2038	111,3	0,919	8,0
	29	2039	111,3	0,919	8,0

Tab. 4.15. Wyniki pomiarów ciśnienia i prędkości dla komory młyna w trzecim dniu pomiarowym – III seria pomiarowa

Nr króćca pomiarowego	Ciśnienie dynamiczne $\rho_d$ , Pa	Ciśnienie statyczne $\rho_{st}$ , Pa	Temperatura $t$ , °C	Gęstość $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Prędkość $w$ , m/s
1	-11	1904	110,4	0,921	4,9
	-12	1906	110,4	0,921	5,1
	-13	1917	110,4	0,921	5,3
	13	1918	110,4	0,921	5,3
	16	1921	110,4	0,921	5,9
	17	1924	110,4	0,921	6,1
	18	1924	110,4	0,921	6,3
	-19	1933	110,4	0,921	6,4
	-20	1943	110,4	0,921	6,6
	20	1947	110,4	0,921	6,6
2	11	1856	111,8	0,917	4,9
	11	1865	111,8	0,917	4,9
	11	1875	111,8	0,917	4,9
	12	1880	111,8	0,917	5,1
	13	1883	111,8	0,917	5,3
	13	1894	111,8	0,917	5,3
	13	1895	111,8	0,917	5,3
	14	1896	111,8	0,917	5,5
	14	1899	111,8	0,917	5,5
	14	1908	111,8	0,917	5,5
3	13	1880	113,2	0,914	5,3
	14	1880	113,2	0,914	5,5
	16	1900	113,2	0,914	5,9
	17	1908	113,2	0,914	6,1
	17	1910	113,2	0,914	6,1
	17	1916	113,2	0,914	6,1
	20	1920	113,2	0,914	6,6
	20	1944	113,2	0,914	6,6
	22	1964	113,2	0,914	6,9
	24	1974	113,2	0,914	7,3
4	14	1904	116,3	0,907	5,6
	15	1911	116,3	0,907	5,8
	15	1912	116,3	0,907	5,8
	16	1913	116,3	0,907	5,9
	16	1923	116,3	0,907	5,9
	17	1925	116,3	0,907	6,1
	18	1940	116,3	0,907	6,3
	20	1945	116,3	0,907	6,7
	20	1947	116,3	0,907	6,7
	25	1948	116,3	0,907	7,4

Analogicznie jak dla dwóch pierwszych serii pomiarowych, w celu ustalenia wartości poszczególnych parametrów uznano również medianę wyspecyfikowanych wskazań. W Tab. 4.16. zestawiono ostateczne wartości parametrów przyjęte do dalszej analizy dla komory młyna w trzecim dniu pomiarowym.

Tab. 4.16. Mediana ciśnienia i prędkości przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej dla komory młyna – III dzień pomiarowy

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Ciśnienie dynamiczne	Ciśnienie statyczne	Temperatura $t, ^\circ\text{C}$	Gęstość $\rho, \text{kg/m}^3$	Prędkość $w, \text{m/s}$
		$\rho_d, \text{Pa}$	$\rho_{st}, \text{Pa}$			
1	I	6,0	1954	102,8	0,939	3,6
	II	8,0	2067	104,4	0,935	4,1
	III	8,5	1922	110,4	0,921	4,3
2	I	13,0	1951	107,3	0,928	5,3
	II	20,0	1999	106,8	0,930	6,6
	III	13,0	1889	111,8	0,917	5,3
3	I	15,0	1942	105,2	0,933	5,7
	II	34,0	2002	106,4	0,931	8,6
	III	17,0	1913	113,2	0,914	6,1
4	I	42,0	1994	110,3	0,921	9,6
	II	27,0	2000	111,3	0,919	7,7
	III	16,5	1924	116,3	0,907	6,0

Również w tym przypadku w celu podjęcia próby sprawdzenia wielkości mierzonych postanowiono analitycznie obliczyć prędkości, liczbę  $Ma$  oraz liczbę  $Re$ . W Tab. 4.17. zestawiono wyniki obliczeń wybranych parametrów dla komory młyna dla każdej z serii pomiarowej w III dniu pomiarowym.

Tab. 4.17. Wyniki obliczeń analitycznych wybranych parametrów – III dzień pomiarowy

Seria pomiarowa	Komora młyna		
	$w_{a3III}, \text{m/s}$	$Ma_{a3III}$	$Re_{a3III}$
I	2,7 – 6,5	0,01 – 0,02	567 603
II	2,8 – 6,7	0,01 – 0,02	589 815
III	2,8 – 6,9	0,01 – 0,02	601 565

W Tab. 4.18. zestawiono ciśnienia statyczne panujące w komorze młyna wynikające zarówno z pomiarów U – rurką oraz zmierzone bezpośrednio za pomocą rurki Pitota. Wyniki pomiarów odnoszą się do III dnia pomiarowego

Tab. 4.18. Porównanie ciśnień statycznych otrzymanych z odmiennych metod pomiarowych dla III dnia pomiarowego

Seria pomiarowa	Miejsce pomiaru	Komora młyna		
		$p_{3Pitota}, \text{Pa}$	$p_{3U}, \text{Pa}$	$\Delta p_3, \%$
I	Króciec 1	1954	2010	3
	Króciec 2	1951		3
	Króciec 3	1942		4
	Króciec 4	1994		1
II	Króciec 1	2067	2128	3

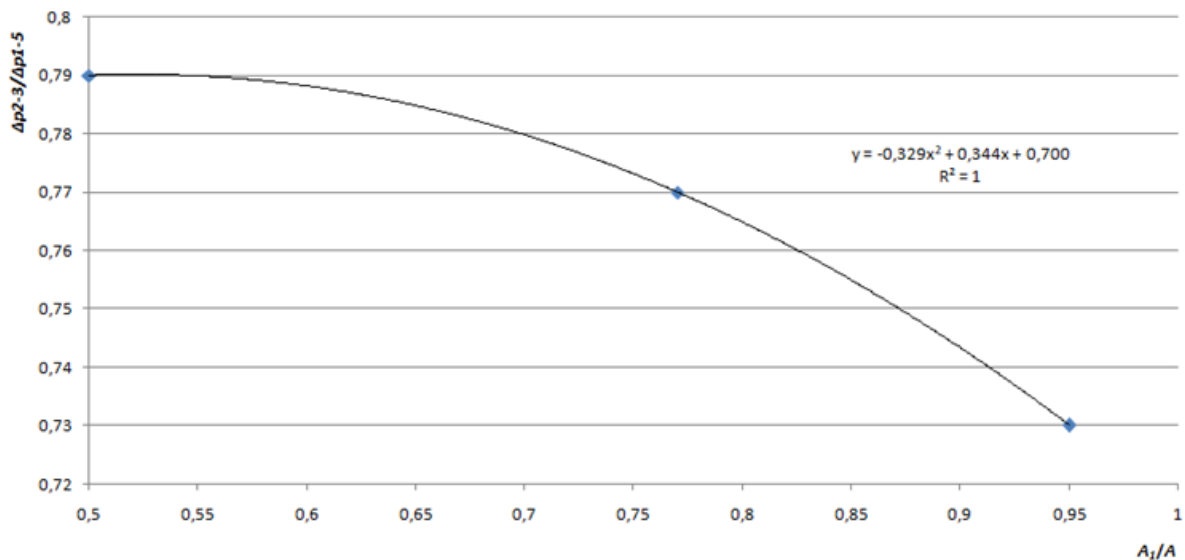
	Króciec 2	1999		6
	Króciec 3	2002		6
	Króciec 4	2000		6
III	Króciec 1	1922	1981	3
	Króciec 2	1889		5
	Króciec 3	1913		4
	Króciec 4	1924		3

Analizując pomiary ciśnienia statycznego przeprowadzone na komorze młynna w III dniu pomiarowym można zauważyć, że rząd otrzymanych wartości z wyżej wymienionych metod pomiarowych jest na porównywalnym poziomie i wskazania wahają się od 1 do 6% w zależności od obciążenia oraz wentylacji młynna. Jest to lepszy wynik niż w poprzednich dniach pomiarowych. Oznacza to, że pomiary charakteryzowały się większą stabilnością, a przepływająca struga charakteryzowała się mniejszym stopniem zawirowania. Potwierdzają to również wyniki pomiarów zestawionych w Tab. 4.13. do Tab. 4.15 oraz Tab. 4.17. Dane zestawione w Tab. 4.18. również stanowią będą dane sprawdzające dla modelu numerycznego standardowego pierścienia dyszowego. W Tab. 4.19. zestawiono parametry charakteryzujące przepływ czynnika przez każdy element młynna w poszczególnych punktach pomiarowych, zmierzonych w III dniu pomiarowym.

Tab. 4.19. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – III dzień pomiarowy

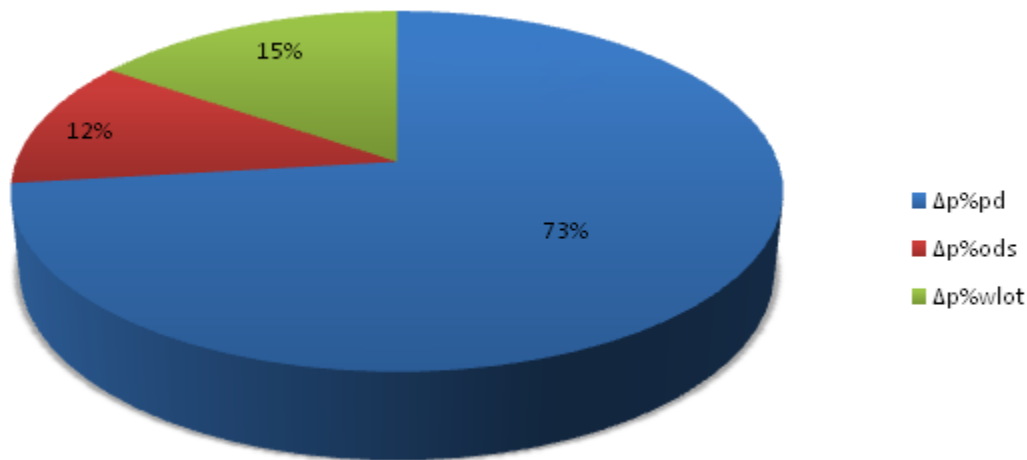
Parametr	Symbol	Jednostka	III dzień		
			godz. 22.20	godz. 0.30	godz. 2.00
Wentylacja młynna	$\dot{V}_{1r}$	$m^3_n/h$	55000	57000	56000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_{1r}$	kPa	6,52	6,55	7,3
Temperatura powietrza przed młynem	$t_{1r}$	°C	274	273	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,73	5,98	6,62
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młynna	$p_3$	kPa	2,01	2,13	1,98
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młynna	$t_3$	°C	106,4	107,2	112,9
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	-	-	-
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	-	-	-
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,42	1,57	1,42
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_{5r}$	°C	101	102	110

Na Rys. 4.3 przedstawiono wykres zależności stopnia otwarcia przekroju pierścienia dyszowego do stosunku strat ciśnienia przepływu powietrza przez pierścień dyszowy odniesionego do całkowitych strat przepływu czynnika przez młyn. Wyznaczony trend jest funkcją kwadratową. Jest to kolejna dana do weryfikacji modelu numerycznego.



Rys. 4.3. Wykres zależności stopnia otwarcia przekroju pierścienia dyszowego do stosunku strat ciśnienia przepływu powietrza przez pierścień dyszowy odniesionego do całkowitych strat przepływu czynnika przez młyn

Na Rys. 4.4 przedstawiono wykres rozkładu strat ciśnienia w poszczególnych elementach młyna. Jest to kolejna dana do weryfikacji modelu numerycznego. Wykres powstał na podstawie wyników zestawionych w Tab. 4.3. i Tab. 4.4.



Rys. 4.4. Wykres rozkładu strat ciśnienia w poszczególnych elementach młyna

Badany młyn jest częścią układu młynowego, który należy do grupy układów nadciśnieniowych, stąd ujemne ciśnienia dynamiczne zestawione w Tab. 4.5. do Tab. 4.7. i od Tab. 4.13. do Tab. 4.15. nie oznaczają podciśnienia, lecz ujemne prędkości przepływającego czynnika. Ponadto zmieniający się w czasie znak prędkości przepływów oznaczają zmieniający się zwrot wektora mierzonych prędkości przepływu czynnika. Takie zachowanie się strugi czynnika oznacza jej zawirowanie poprzez zastosowanie pierścienia dyszowego wykonującego ruch obrotowy. Występowanie zawirowań w przepływającej przez komorę młyna strumieniu czynnika potwierdzają również stosunkowo wysokie liczby  $Re$  (Tab. 4.10. i Tab. 4.17.), które wskazują, że badany przepływ ma charakter turbulentny.

Analizując otrzymane prędkości czynnika przepływającego przez komorę młyna zestawione w tabelach Tab. 4.8., Tab. 4.9. i Tab. 4.16. można zauważyć, że w przypadku komory młyna otrzymano równomierny profil prędkości przepływu czynnika co najmniej na

połowie obwodu młyna w zależności od panujących warunków przepływowych podczas pomiarów. W każdej z serii pomiarowych zarejestrowano miejsca, gdzie prędkość przepływu czynnika była blisko o połowę niższa w stosunku do pozostałych miejsc pomiarowych. Należy nadmienić, że w obszarach zainstalowanych króćców pomiarowych nie istnieją żadne przeszkody, które mogłyby zaburzyć dodatkowo przepływ czynnika. Dlatego autor uważa, że w tym miejscu mogą wystąpić podwyższone opory przepływu, które powodują lokalne zmniejszenie prędkości przepływu. Takie zjawisko może być spowodowane czynnikami zewnętrznymi, takimi jak nagromadzenie lokalne niepożądanych ciał obcych w komorze młyna. Dodatkowym argumentem, który mógłby poprzeć wyżej opisany pogląd była ograniczona możliwość zmiany przekroju wylotowego dysz pierścienia dyszowego podczas pomiarów.

W przypadku pomiarów ciśnienia dynamicznego na odsiewaczu, można przyjąć, że otrzymany profil prędkości czynnika jest równomierny na obwodzie odsiewacza. Ponadto podjęto próbę weryfikacji otrzymanych prędkości przepływu czynnika zarówno na komorze młyna jak i na odsiewaczu. W tabeli Tab. 4.10. umieszczono obliczone liczby  $Ma$  dla obu serii pomiarowych natomiast w Tab. 4.17. zestawiono obliczone liczby  $Ma$  dla trzech serii pomiarowych wykonanych w III dniu pomiarowym. Otrzymane wartości spełniają warunek  $Ma < 0,3$ ; więc płyn można potraktować jako nieściśliwy, stąd można zastosować równanie ciągłości przepływu. Porównując otrzymane w ten sposób prędkości przepływów czynnika (Tab. 4.10. i Tab. 4.17.) z prędkościami zmierzonymi rurką Pitota stwierdzono, że rząd otrzymanych wielkości jest na porównywalnym poziomie, co może oznaczać, że pomiary obiektowe zostały przeprowadzone w prawidłowy sposób, natomiast w III dniu pomiarowym stopień zawirowania strugi był mniejszy w stosunku do pozostałych pomiarów.

W Tab. 4.12. i Tab. 4.19. zestawiono parametry przepływu czynnika w punktach pomiarowych wyszczególnionych na Rys. 3.1. Dane te również stanowią będą dane wejściowe jak i sprawdzające do projektu stanowiska badawczego oraz modelu numerycznego standardowego pierścienia dyszowego.

Reasumując, w wyniku przeprowadzonych badań otrzymano równomierny profil prędkości przynajmniej na połowie obwodu młyna (prawdopodobnie ze względu na nagromadzenie lokalne niepożądanych ciał obcych w komorze młyna) wraz z zawirowaniem strugi przepływającego czynnika wskutek ruchu obrotowego pierścienia dyszowego. Ponadto otrzymano rozkład ciśnień statycznych panujących w poszczególnych elementach młyna podczas przepływu czynnika. Określono opory przepływu poszczególnych elementów młyna, w tym standardowego pierścienia dyszowego zainstalowanego w przemysłowym młynie miazdzącym. W związku z powyższym osiągnięto wszystkie założenia przedmiotowych badań.

## 4.2 Wyniki badań laboratoryjnych pierścienia dyszowego

Na Rys. 4.5 przedstawiono bazową geometrię pierścienia dyszowego badanego na stanowisku laboratoryjnym. Warto podkreślić, że prezentowana na poniższym rysunku geometria odpowiada geometrii pierścienia dyszowego zastosowanego w badanym młynie, w skali przemysłowej. W celu sprowadzenia zmierzonych na stanowisku laboratoryjnym wielkości do warunków przemysłowych, zastosowano kryterium Ma. Natomiast niepewności obliczono na podstawie specyfikacji technicznej zastosowanych mierników.



Rys. 4.5. Pierścień dyszowy – stanowisko laboratoryjne – bazowa geometria

W Tab. 4.20 ukazano warunki w jakich wykonano pomiary laboratoryjne pierścienia dyszowego charakteryzującego się bazową geometrią. Badany pierścień dyszowy wykonywał ruch obrotowy.

Tab. 4.20. Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – bazowa geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość
Stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego	-	%	95
Stopień otwarcia przepustnicy na wylocie	-	%	100
Ciśnienie atmosferyczne	$p_{ot}$	Pa	98259
Temperatura otoczenia	$t_{ot}$	°C	27,3
Temperatura powietrza przepływającego przez młyn	$t_1$	°C	37,5 – 37,8
Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	$n_{pd}$	obr/min	96
Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji	$\dot{V}_{wlot}$	m <sup>3</sup> /h	200

W Tab. 4.21 zestawiono straty ciśnienia pomiędzy punktem 2 a 3 instalacji badawczej podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się bazową geometrią.

Tab. 4.21 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych

Seria pomiarowa	Wentylacja zmierzona $\dot{V}_{pom}, m_n^3/h$	Strata ciśnienia zmierzona $\Delta p_{2-3pom}, Pa$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\_obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\_obl}, Pa$
I	$178 \pm 1$	$230 \pm 73$	54 808	$3670 \pm 202$
II	$178 \pm 1$	$215 \pm 69$	54 808	$3654 \pm 198$
III	$178 \pm 1$	$209 \pm 68$	54 808	$3647 \pm 198$
Średnia	$178 \pm 1$	$218 \pm 70$	54 808	$3657 \pm 199$

W Tab. 4.22 zestawiono zmierzone prędkości przepływu powietrza w pkt. 3 instalacji badawczej (komora młyna) podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się bazową geometrią oraz obliczone, odpowiadające im prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej.

Tab. 4.22 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Prędkość zmierzona $w_{3\_pom}, m/s$	Prędkość zmierzona średnia $w_{3\_pom\_sr}, m/s$	Obliczona prędkość $w_{3\_przem\_obl}, m/s$	Obliczona prędkość średnia $w_{3\_przem\_obl\_sr}, m/s$
1	I	$1,52 \pm 0,18$	$1,47 \pm 0,19$	$4,19 \pm 0,45$	$4,14 \pm 0,49$
	II	$1,47 \pm 0,20$		$4,17 \pm 0,52$	
	III	$1,41 \pm 0,19$		$4,07 \pm 0,51$	
2	I	$1,49 \pm 0,18$	$1,43 \pm 0,19$	$4,11 \pm 0,45$	$4,06 \pm 0,49$
	II	$1,41 \pm 0,20$		$4,01 \pm 0,52$	
	III	$1,40 \pm 0,19$		$4,05 \pm 0,51$	
3	I	$1,22 \pm 0,18$	$1,14 \pm 0,19$	$3,38 \pm 0,45$	$3,22 \pm 0,49$
	II	$1,11 \pm 0,19$		$3,14 \pm 0,52$	
	III	$1,08 \pm 0,19$		$3,13 \pm 0,51$	
4	I	$1,09 \pm 0,17$	$1,10 \pm 0,18$	$3,01 \pm 0,45$	$3,12 \pm 0,49$
	II	$1,09 \pm 0,19$		$3,08 \pm 0,52$	
	III	$1,13 \pm 0,19$		$3,28 \pm 0,51$	
5	I	$0,89 \pm 0,17$	$1,00 \pm 0,18$	$2,45 \pm 0,45$	$2,84 \pm 0,49$
	II	$1,24 \pm 0,19$		$3,52 \pm 0,52$	
	III	$0,88 \pm 0,19$		$2,55 \pm 0,51$	

W Tab. 4.23 zestawiono oszacowane straty ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy charakteryzujący się bazową geometrią oraz odpowiadające straty, zmierzone podczas badań obiektowych.

Tab. 4.23 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym sprowadzonych do warunków przemysłowych oraz zmierzonych podczas badań obiektowych

Seria pomiarowa	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\_obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\_obl}, Pa$	Wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{obj}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia (badania obiektowe) $\Delta p_{2-3obj}, Pa$
I	54 808	3670 ± 202	55 000	3720
II	54 808	3654 ± 198	57 000	3850
III	54 808	3647 ± 198	56 000	4640
Średnia	54 808	3657 ± 199	56 000	4070

W Tab. 4.24 zestawiono obliczone oraz zmierzone prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej.

Tab. 4.24 Zestawienie obliczonych (sprowadzonych do warunków przemysłowych) oraz zmierzonych prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna podczas badań obiektowych

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Obliczona prędkość	Obliczona prędkość średnia	Prędkość $w_{obj}, m/s$	Prędkość średnia $w_{obj\_śr}, m/s$
		$w_{3\_przem\_obl}, m/s$	$w_{3\_przem\_obl\_śr}, m/s$		
1	I	4,19 ± 0,45		3,6	
	II	4,17 ± 0,52	4,14 ± 0,49	4,1	4,00
	III	4,07 ± 0,51		4,3	
2	I	4,11 ± 0,45		5,3	
	II	4,01 ± 0,52	4,06 ± 0,49	6,6	5,73
	III	4,05 ± 0,51		5,3	
3	I	3,38 ± 0,45		5,7	
	II	3,14 ± 0,52	3,22 ± 0,49	8,6	6,80
	III	3,13 ± 0,51		6,1	
4	I	3,01 ± 0,45		9,6	
	II	3,08 ± 0,52	3,12 ± 0,49	7,7	7,76
	III	3,28 ± 0,51		6,0	
5	I	2,45 ± 0,45		-	
	II	3,52 ± 0,52	2,84 ± 0,49	-	-
	III	2,55 ± 0,51		-	

Analizując dane w Tab. 4.20 do Tab. 4.24 można wywnioskować, że w przypadku pomiarów strat ciśnienia uzyskano bardzo wysokie podobieństwo przepływu porównując wyniki pomiarów oraz ich niepewności uzyskanych w ramach badań obiektowych i laboratoryjnych. Niestety w przypadku pomiarów prędkości przepływu wystąpiły większe odstępstwa. Dlatego na podstawie zestawionych powyżej wyników badań można przyjąć straty przepływu czynnika przez pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy powinny zawierać się w przedziale od 3457 Pa do 4070 Pa. Wyznaczone straty ciśnienia będą porównywane z stratami przepływu uzyskanymi w wyniku badań numerycznych przedmiotowego pierścienia dyszowego.

W Tab. 4.25 ukazano warunki w jakich wykonano pomiary laboratoryjne pierścienia dyszowego charakteryzującego się bazową geometrią. Badany pierścień dyszowy nie wykonywał ruchu obrotowy.

Tab. 4.25 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – bazowa geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość
Stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego	-	%	95
Stopień otwarcia przepustnicy na wylocie	-	%	100
Ciśnienie atmosferyczne	$p_{ot}$	Pa	98 259
Temperatura otoczenia	$t_{ot}$	°C	27,3
Temperatura powietrza przepływającego przez młyn	$t_1$	°C	40,1
Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	$n_{pd}$	obr/min	0
Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji	$\dot{V}_{wlot}$	m <sup>3</sup> /h	200

W Tab. 4.26 zestawiono straty ciśnienia pomiędzy punktem 2 a 3 instalacji badawczej podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się bazową geometrią. Pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego.

Tab. 4.26 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego

Seria pomiarowa	Wentylacja zmierzona $\dot{V}_{pom}, m_n^3/h$	Strata ciśnienia zmierzona $\Delta p_{2-3pom}, Pa$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\_obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\_obl}, Pa$
I	178 ± 1	196 ± 64	54 808	3632 ± 192
II	178 ± 1	179 ± 60	54 808	3616 ± 188
III	178 ± 1	188 ± 63	54 808	3626 ± 190
Średnia	178 ± 1	188 ± 62	54 808	3625 ± 190

W Tab. 4.27 zestawiono zmierzone prędkości przepływu powietrza w pkt. 3 instalacji badawczej (komora młyna) podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się bazową geometrią oraz obliczone, odpowiadające im prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej. Pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego.

Tab. 4.27 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Prędkość zmierzona $w_{3\_pom}, m/s$	Prędkość zmierzona średnia $w_{3\_pom\_sr}, m/s$	Obliczona prędkość $w_{3\_przem\_obl}, m/s$	Obliczona prędkość średnia $w_{3\_przem\_obl\_sr}, m/s$
1	I	0,87 ± 0,16	0,86 ± 0,15	2,60 ± 0,45	2,63 ± 0,45
	II	0,84 ± 0,15		2,61 ± 0,45	
	III	0,88 ± 0,15		2,67 ± 0,44	
2	I	1,01 ± 0,16	1,03 ± 0,16	3,00 ± 0,45	3,12 ± 0,45
	II	1,09 ± 0,15		3,39 ± 0,45	
	III	0,98 ± 0,16		2,98 ± 0,44	

3	I	$0,99 \pm 0,16$	$1,03 \pm 0,16$	$2,95 \pm 0,45$	$3,12 \pm 0,45$
	II	$1,04 \pm 0,15$		$3,23 \pm 0,45$	
	III	$1,05 \pm 0,16$		$3,17 \pm 0,44$	
4	I	$1,11 \pm 0,16$	$0,98 \pm 0,16$	$3,30 \pm 0,45$	$2,98 \pm 0,45$
	II	$0,90 \pm 0,15$		$2,79 \pm 0,45$	
	III	$0,94 \pm 0,16$		$2,86 \pm 0,44$	
5	I	$1,12 \pm 0,16$	$1,12 \pm 0,16$	$3,33 \pm 0,45$	$3,41 \pm 0,45$
	II	$1,10 \pm 0,15$		$3,43 \pm 0,45$	
	III	$1,14 \pm 0,16$		$3,47 \pm 0,44$	

Analizując dane w Tab. 4.25 do Tab. 4.27 trudno wywnioskować (biorąc również pod uwagę niepewności uzyskanych wyników badań), czy pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy charakteryzuje się wyższymi oporami przepływu niż pierścienie dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego. Ponadto uzyskane prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna są niższe niż w przypadku zastosowania pierścienia dyszowego wykonującego ruch obrotowy. Aby rozstrząsnąć sporne kwestie konieczne jest przeprowadzenie badań numerycznych.

Wyniki niniejszych badań będą punktem odniesienia dla wyników badań laboratoryjnych pierścieni dyszowych charakteryzujących się zmienioną geometrią oraz będą stanowić dane sprawdzające dla badań numerycznych zmodyfikowanych pierścieni dyszowych.

### 4.3 Wyniki badań numerycznych pierścienia dyszowego

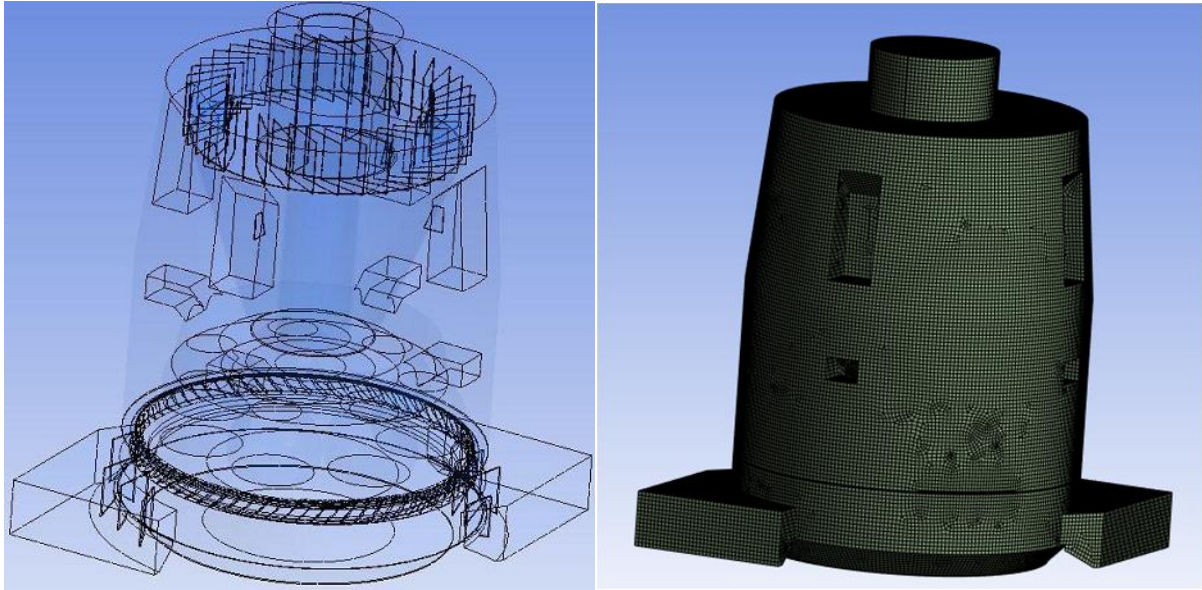
#### 4.3.1 Walidacja modelu numerycznego

Na Rys. 4.6 przedstawiono model numeryczny oraz siatkę przemysłowego młyna miazdzącego, na którym dokonano badań numerycznych.

W Tab. 4.28 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantów referencyjnych.

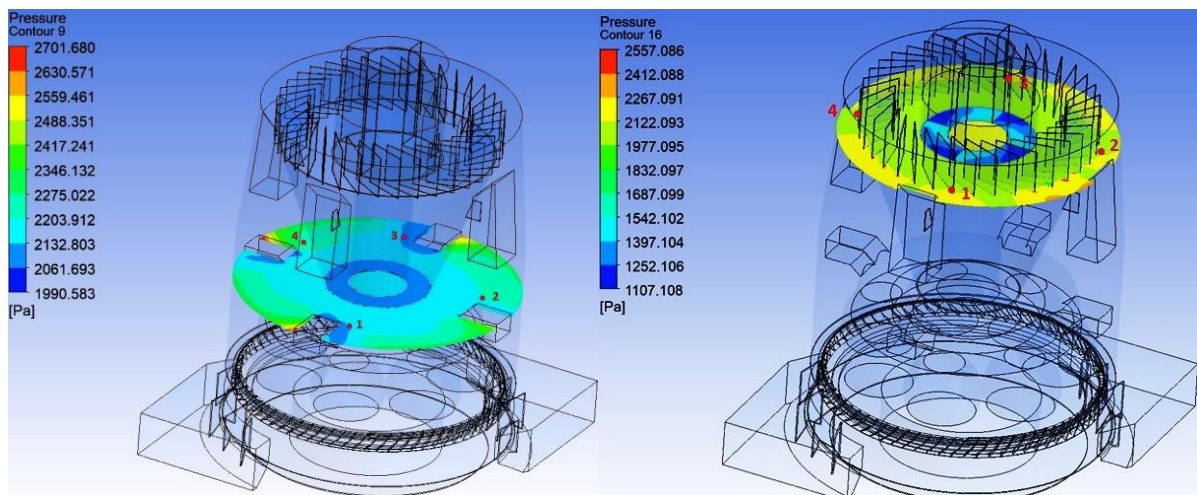
Tab. 4.28. Parametry siatki modelu numerycznego – warianty referencyjne

Stopień otwarcia przekroju pierścienia dyszowego: 95%	Liczba elementów siatki	1 402 975
	Liczba węzłów siatki	1 114 512
Stopień otwarcia przekroju pierścienia dyszowego: 77%	Liczba elementów siatki	1 709 510
	Liczba węzłów siatki	1 323 641
Stopień otwarcia przekroju pierścienia dyszowego: 50%	Liczba elementów siatki	1 744 013
	Liczba węzłów siatki	1 353 912

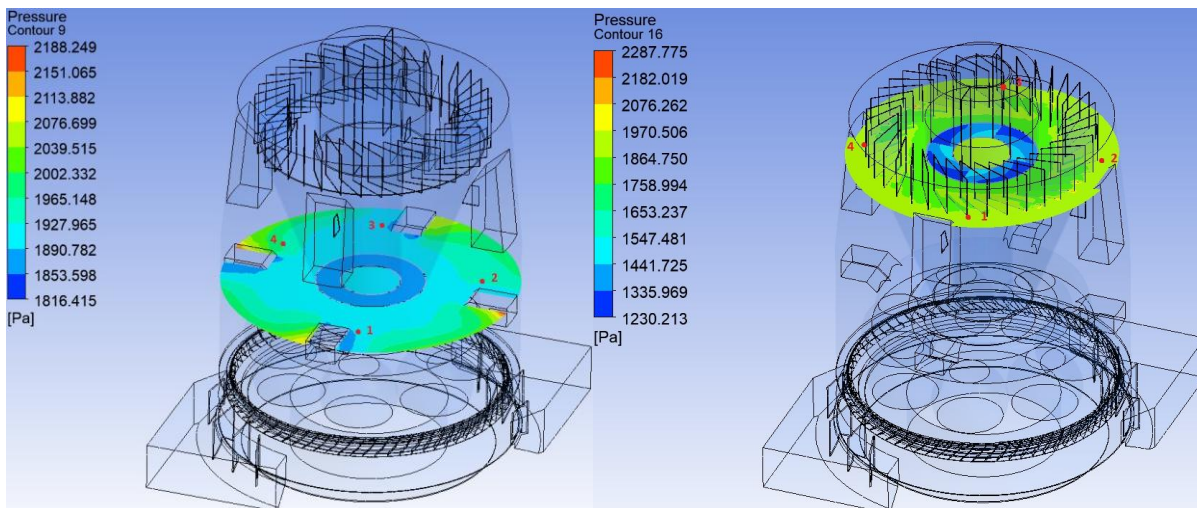


Rys. 4.6. Model geometryczny oraz siatka numeryczna przemysłowego młyna miazdzącego-warianty referencyjne

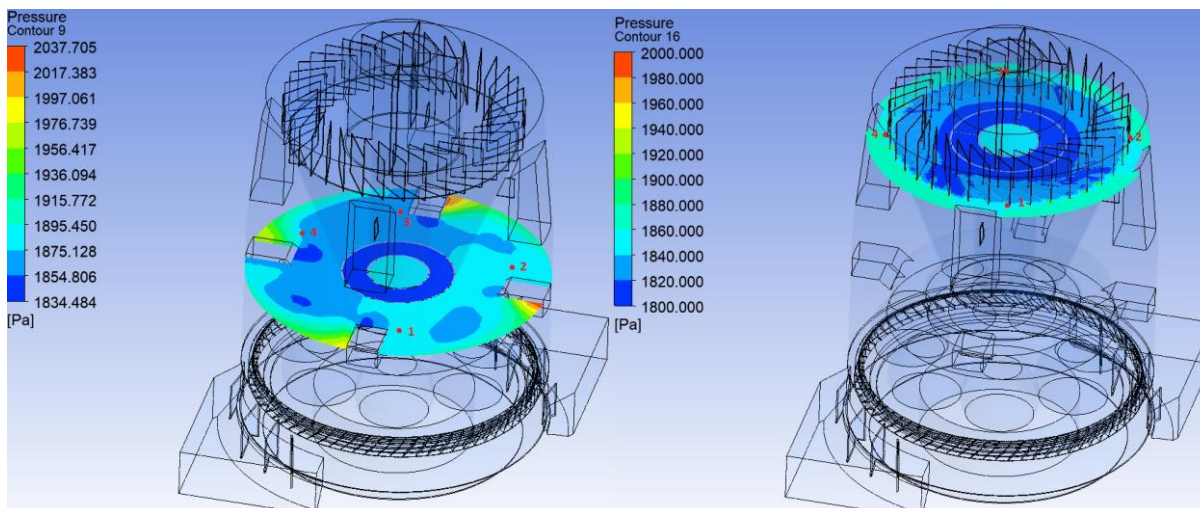
Do modelu numerycznego wariantu referencyjnego młyna wprowadzono część z danych zestawionych w Tab. 4.12 i Tab. 4.19. Dane te są następujące: strumień masy powietrza doprowadzonego do młyna (określony na podstawie wentylacji młyna), nadciśnienie powietrza przed młynem, temperatura powietrza przed młynem, nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem i temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem. Pozostałe dane mają charakter sprawdzający poprawność obliczeń modelu numerycznego. Na Rys. 4.7 zestawiono rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna odpowiednio dla komory młyna i odsiewacza dla stopnia otwarcia przekroju pierścienia dyszowego wynoszącego 95%. Natomiast wyniki przedstawione na Rys. 4.8 i Rys. 4.9 dotyczą następujących stopni otwarcia przekroju pierścienia dyszowego: 77% i 50%.



Rys. 4.7. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%



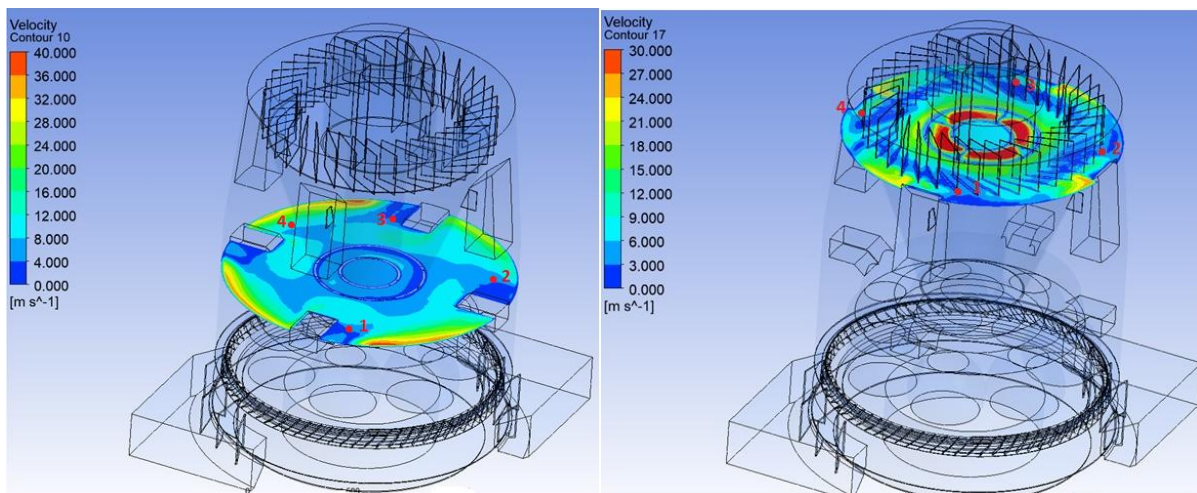
Rys. 4.8. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 77%



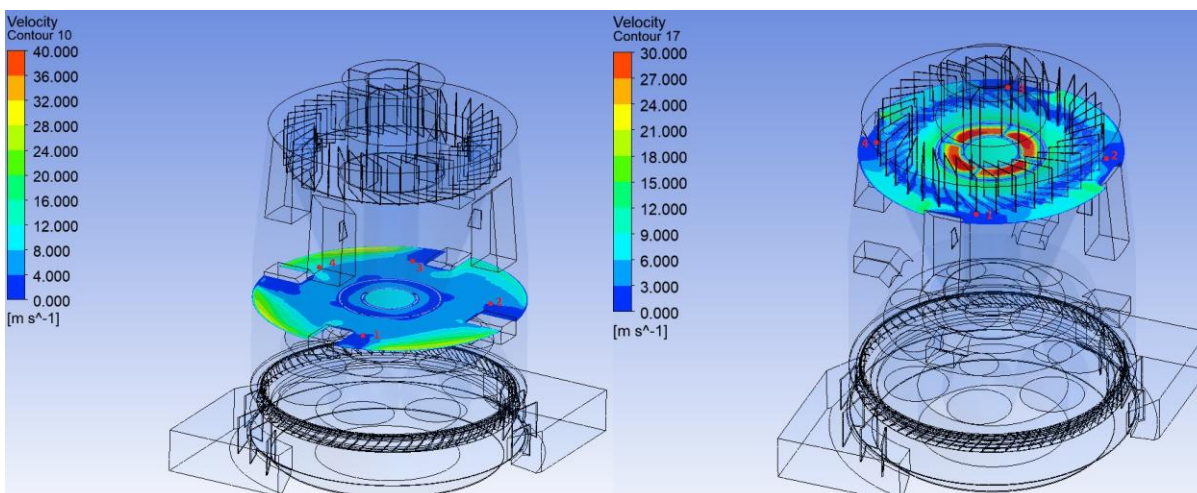
Rys. 4.9. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%

Punkty zaznaczone kolorem czerwonym odpowiadają położeniu króćców pomiarowych usytuowanych na młynie w skali przemysłowej. Natomiast numery przyporządkowane dla poszczególnych punktów pomiarowych odpowiadają tym, zdefiniowanym uprzednio w badaniach obiektowych.

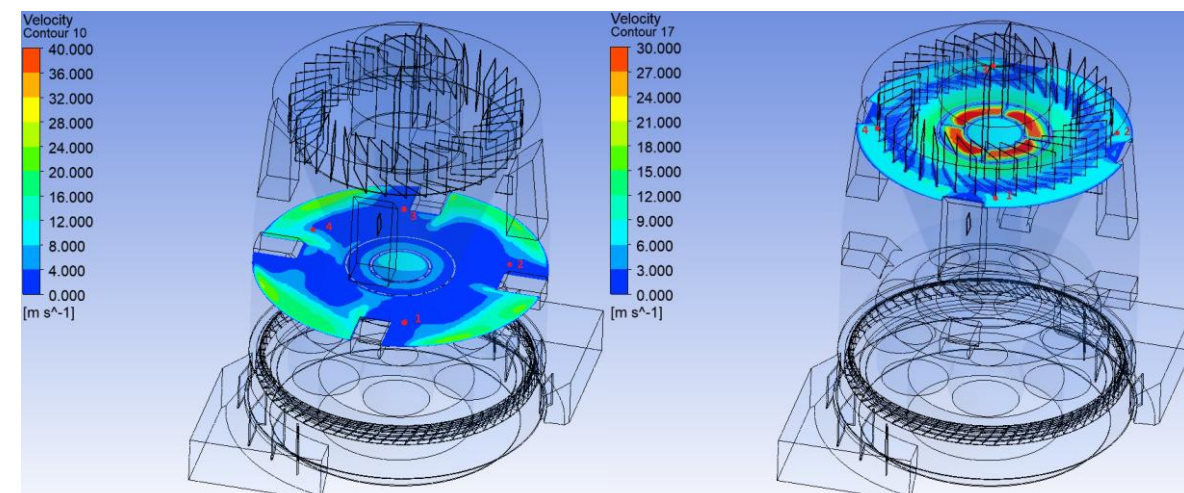
Na Rys. 4.10 przedstawiono rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna odpowiednio dla komory młyna i odsiewacza dla stopnia otwarcia przekroju pierścienia dyszowego wynosi 95%. Natomiast wyniki przedstawione na Rys. 4.11 i Rys. 4.12 i dotyczą następujących stopni otwarcia przekroju pierścienia dyszowego: 77% i 50%.



Rys. 4.10. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%

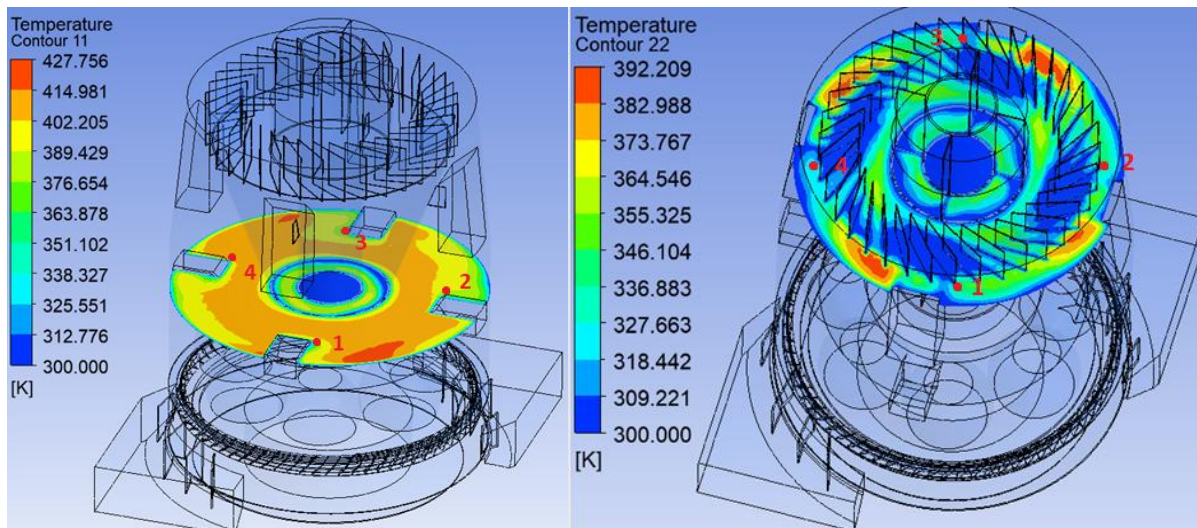


Rys. 4.11. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 77%

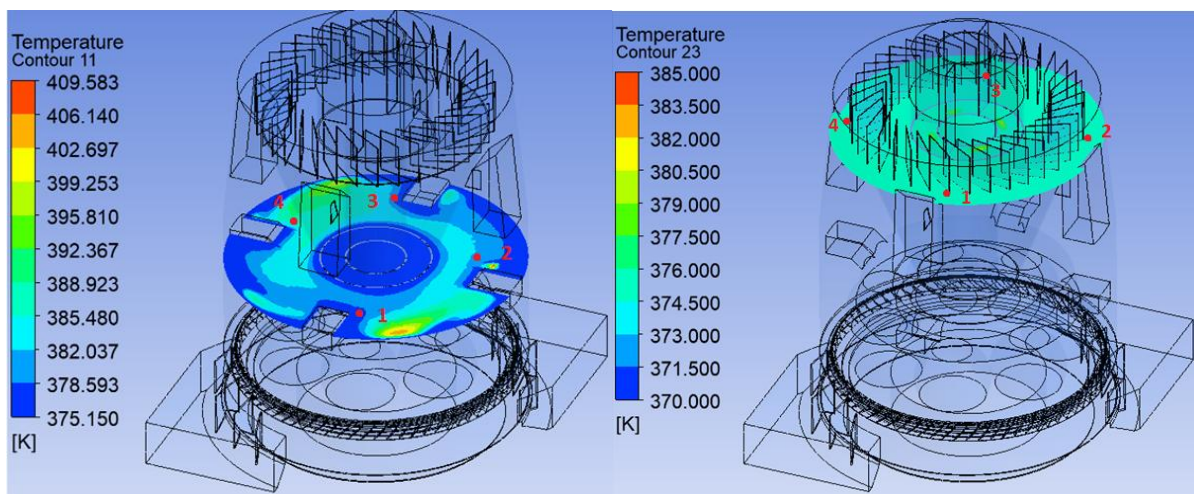


Rys. 4.12. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%

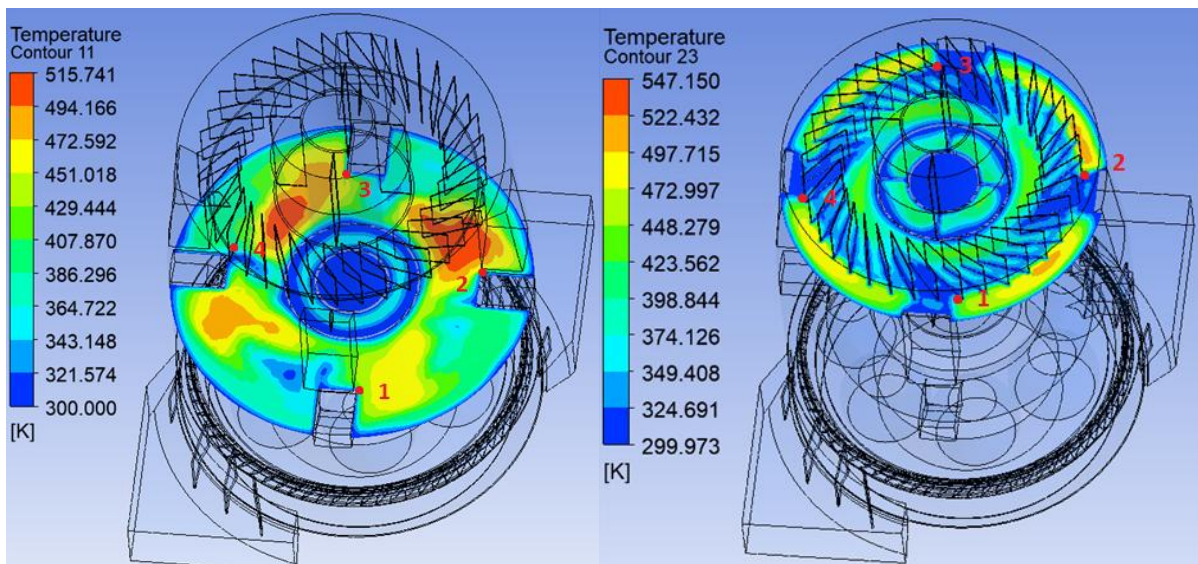
Natomiast na Rys. 4.13 i przedstawiono rozkład temperatur czynnika na obwodzie młyna odpowiednio dla komory młyna i odsiewacza dla stopnia otwarcia przekroju pierścienia dyszowego wynosi 95%. Natomiast wyniki przedstawione na Rys. 4.14 i Rys. 4.15 dotyczą następujących stopni otwarcia przekroju pierścienia dyszowego: 77% i 50%.



Rys. 4.13. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%

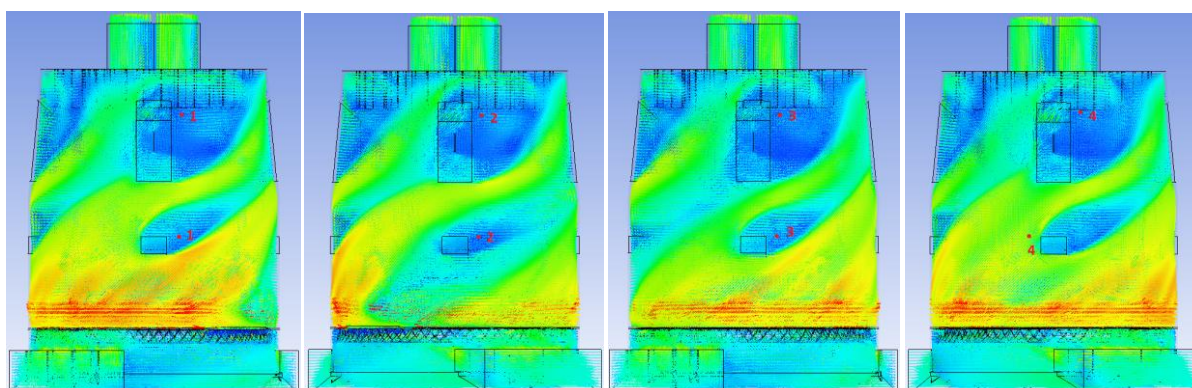


Rys. 4.14. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 77%

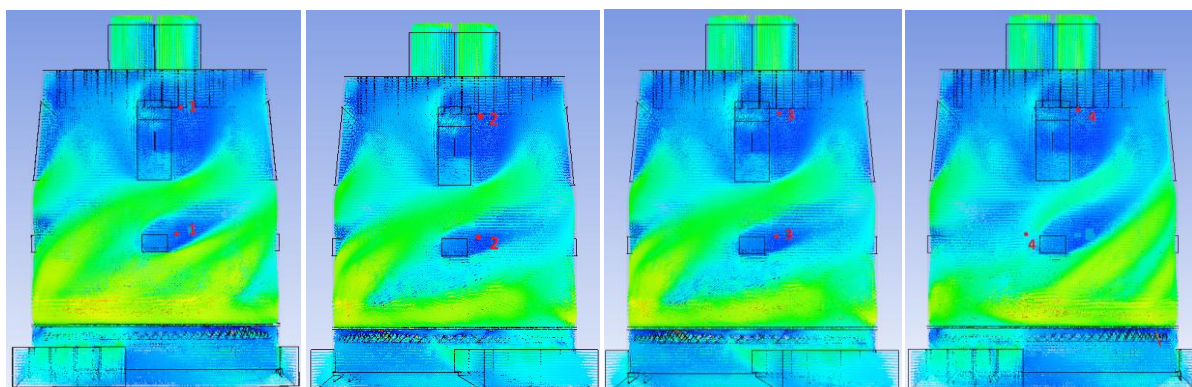


Rys. 4.15. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%

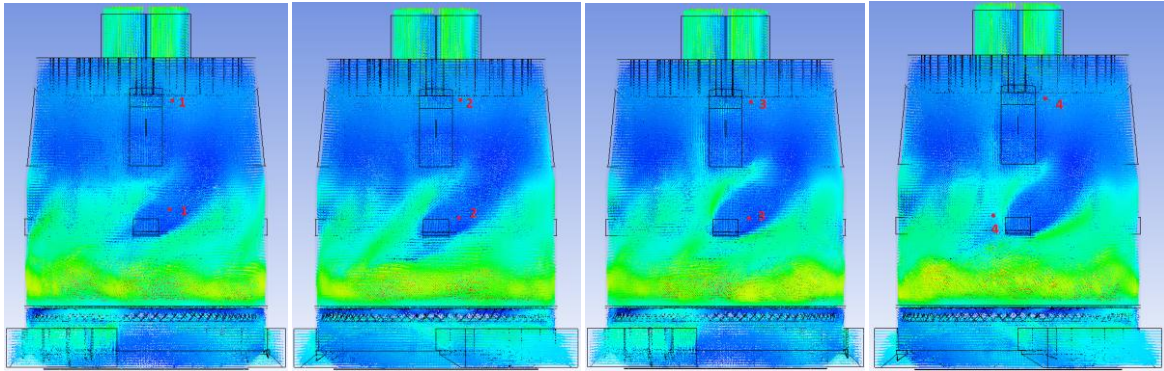
Ponadto na Rys. 4.16 do Rys. 4.18 ukazano przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi.



Rys. 4.16. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%

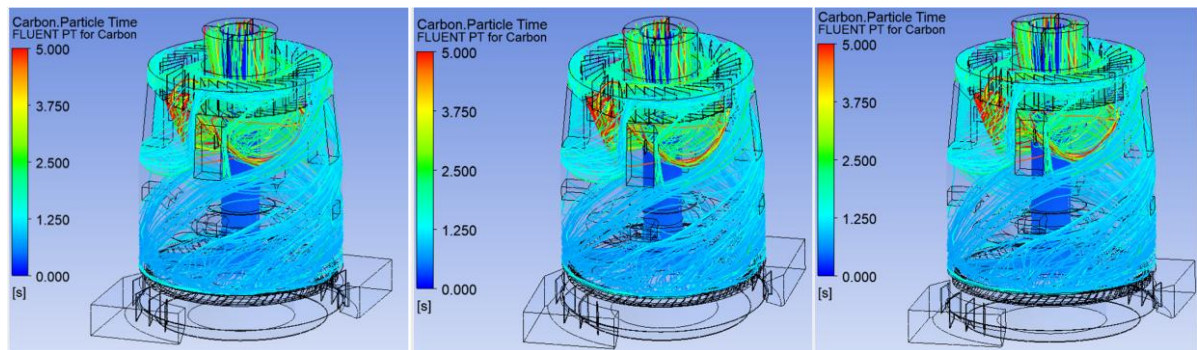


Rys. 4.17. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 77%



Rys. 4.18. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%

Z kolei na Rys. 4.19 przedstawiono ścieżki przepływu pyłu węglowego dla poszczególnych stopni otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego.



Rys. 4.19. Ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% (z lewej), 77% (środek), 50% (z prawej)

Analizując przedstawione na powyższym rysunku (Rys. 4.19) ścieżki przepływu pyłu węglowego stwierdzono, że ich przebieg jest zbliżony niezależnie od stopnia otwarcia pierścienia dyszowego, natomiast zauważono, że im niższy stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego tym czas przepływu cząstki pyłu przez młyn jest krótszy, ponieważ prędkość wylotowa powietrza z pierścienia dyszowego jest coraz wyższa.

W Tab. 4.29 zestawiono parametry charakteryzujące przepływ czynnika przez każdy element młyna w poszczególnych punktach pomiarowych, wynikających z analizy CFD.

Tab. 4.29. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn w zależności od stopnia otwarcia przekroju poprzecznego pierścienia dyszowego [%] – warianty bazowe

Parametr	Symbol	Jednostka	95	77	50
Wentylacja młyna	$\dot{V}_1$	$\text{m}^3_{\text{n}}/\text{h}$	55000	57000	56000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,52	6,55	7,3
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	$^{\circ}\text{C}$	274	273	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	5,6	7,1
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,15	1,96	1,88
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	$^{\circ}\text{C}$	106,4	107,2	112,9
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,15	1,88	1,87

Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	100,1	102,0	112,0
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,38	1,40	1,39
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	102	110
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,14	5,15	5,91

W Tab. 4.30 zestawiono ciśnienia statyczne odczytane z utworzonego modelu *CFD* (od Rys. 4.7 do Rys. 4.9) oraz zmierzone podczas badań obiektowych dla komory młyna.

Tab. 4.30. Zestawienie ciśnień statycznych w komorze młyna otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz badań obiektowych

Stopień otwarcia przekroju pierścienia dyszowego, %	Miejsce pomiaru	Badania <i>CFD</i>		Badania obiektowe	
		$p_3$ , Pa	$p_{3m}$ , Pa	$p_3$ , Pa	$p_{3m}$ , Pa
95	Króciec 1	2150	2150	2275	2156
	Króciec 2	2144		2263	
	Króciec 3	2150		2239	
	Króciec 4	2275		2249	
77	Króciec 1	1971	1965	2067	1878
	Króciec 2	1976		1999	
	Króciec 3	1951		2002	
	Króciec 4	1958		2000	
50	Króciec 1	1900	1880	1922	1923
	Króciec 2	1880		1889	
	Króciec 3	1852		1913	
	Króciec 4	1880		1924	

Z kolei w Tab. 4.31 zestawiono ciśnienia statyczne odczytane z utworzonego modelu *CFD* (od Rys. 4.7 do Rys. 4.9) oraz zmierzone podczas badań obiektowych dla odsiewacza.

Tab. 4.31. Zestawienie ciśnień statycznych w odsiewaczu otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz badań obiektowych

Stopień otwarcia przekroju pierścienia dyszowego, %	Miejsce pomiaru	Badania <i>CFD</i>		Badania obiektowe	
		$p_4$ , Pa	$p_{4m}$ , Pa	$p_4$ , Pa	$p_{4m}$ , Pa
95	Króciec 1	2168	2156	2132	2149
	Króciec 2	2157		2153	
	Króciec 3	2155		2182	
	Króciec 4	2150		2145	
77	Króciec 1	1882	1878	-	-
	Króciec 2	1879		-	
	Króciec 3	1883		-	
	Króciec 4	1877		-	
50	Króciec 1	1875	1874	-	-
	Króciec 2	1874		-	
	Króciec 3	1870		-	
	Króciec 4	1874		-	

W Tab. 4.32 z kolei zestawiono prędkości przepływu czynnika odczytane z utworzonego modelu CFD (od Rys. 4.10 do Rys. 4.12) oraz zmierzonych w ramach badań obiektowych dla komory młyna.

Tab. 4.32. Zestawienie prędkości czynnika w komorze młyna otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz badań obiektowych

Stopień otwarcia przekroju pierścienia dyszowego, %	Miejsce pomiaru	Badania CFD		Badania obiektowe	
		$w_3$ , m/s	$w_{3m}$ , m/s	$w_3$ , m/s	$w_{3m}$ , m/s
95	Króciec 1	6		5	
	Króciec 2	6	6	5	5,0
	Króciec 3	6		5	
	Króciec 4	10		12	
Króciec 1	4	4,1			
77	Króciec 2	4	4	6,6	7,1
	Króciec 3	4		8,6	
	Króciec 4	8		7,7	
	Króciec 1	4		4,3	
50	Króciec 2	4	4	5,3	5,7
	Króciec 3	4		6,1	
	Króciec 4	8		6,0	

W Tab. 4.33 zestawiono prędkości przepływu czynnika odczytane z utworzonego modelu CFD (od Rys. 4.10 do Rys. 4.12) oraz zmierzonych w ramach badań obiektowych dla odsiewacza.

Tab. 4.33. Zestawienie prędkości czynnika w odsiewaczu otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz otrzymanych w ramach badań obiektowych

Stopień otwarcia przekroju pierścienia dyszowego, %	Miejsce pomiaru	Badania CFD		Badania obiektowe	
		$w_4$ , m/s	$w_{4m}$ , m/s	$w_4$ , m/s	$w_{4m}$ , m/s
95	Króciec 1	6		4,0	
	Króciec 2	6	6	4,1	4,5
	Króciec 3	6		4,8	
	Króciec 4	6		5,1	
Króciec 1	3	-			
77	Króciec 2	3	3	-	-
	Króciec 3	3		-	
	Króciec 4	3		-	
	Króciec 1	9		-	
50	Króciec 2	9	9	-	-
	Króciec 3	9		-	
	Króciec 4	9		-	

W Tab. 4.34 z kolei zestawiono temperatury czynnika odczytane z utworzonego modelu CFD (Rys. 4.13, Rys. 4.14 i Rys. 4.15) oraz zmierzonych w ramach badań obiektowych dla komory młyna.

Tab. 4.34. Zestawienie temperatur czynnika w komorze młyna otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz badań obiektowych

Stopień otwarcia przekroju pierścienia dyszowego, %	Miejsce pomiaru	Badania CFD		Badania obiektowe	
		$t_3, ^\circ\text{C}$	$t_{3m}, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$t_{3m}, ^\circ\text{C}$
95	Króciec 1	105,0	106,4	105,0	108,2
	Króciec 2	106,0		111,4	
	Króciec 3	106,8		104,6	
	Króciec 4	110,0		113,0	
77	Króciec 1	107,2	107,2	104,4	106,6
	Króciec 2	107,2		106,8	
	Króciec 3	107,2		106,4	
	Króciec 4	112,3		111,3	
50	Króciec 1	113,2	112,9	110,4	112,5
	Króciec 2	114,0		111,8	
	Króciec 3	112,6		113,2	
	Króciec 4	110,0		116,3	

W Tab. 4.35 zestawiono temperatury czynnika odczytane z utworzonego modelu *CFD* (Rys. 4.13, Rys. 4.14 i Rys. 4.15) oraz zmierzonych w ramach badań obiektowych dla odsiewacza.

Tab. 4.35. Zestawienie temperatur czynnika w odsiewaczu otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz otrzymanych w ramach badań obiektowych

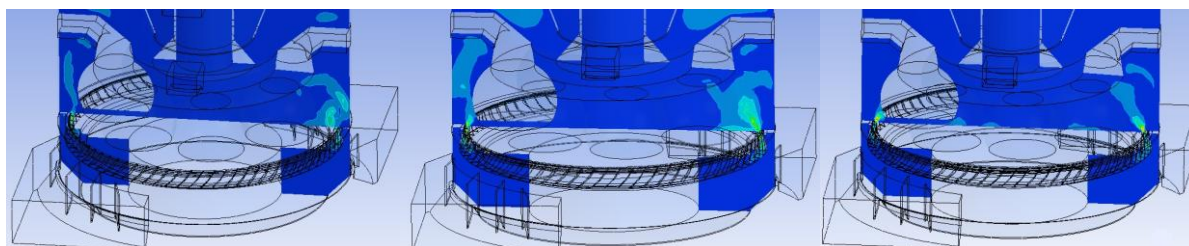
Stopień otwarcia przekroju pierścienia dyszowego, %	Miejsce pomiaru	Badania CFD		Badania obiektowe	
		$t_4, ^\circ\text{C}$	$t_{4m}, ^\circ\text{C}$	$t_4, ^\circ\text{C}$	$t_{4m}, ^\circ\text{C}$
95	Króciec 1	100,1	100,1	100,1	101,5
	Króciec 2	100,1		101,2	
	Króciec 3	100,1		100,1	
	Króciec 4	100,7		101,9	
77	Króciec 1	102,0	102,0	-	-
	Króciec 2	102,0		-	
	Króciec 3	102,0		-	
	Króciec 4	102,0		-	
50	Króciec 1	112,1	112,0	-	-
	Króciec 2	112,0		-	
	Króciec 3	112,0		-	
	Króciec 4	112,0		-	

Analizując dane umieszczone w Tab. 4.29. do Tab. 4.35 oraz ich wizualizację na Rys. 4.7 do Rys. 4.18, można zauważyć, że wielkości otrzymane w wyniku badań numerycznych są zbliżone do tych, wyznaczonych w wyniku przeprowadzenia badań obiektowych.

W wyniku przeprowadzonych badań wywnioskowano, że króćce pomiarowe w przypadku pomiarów ciśnienia statycznego muszą być usytuowane na tym samym poziomie. Natomiast w przypadku pomiarów prędkości i temperatury rozmieszczenie króćców pomiarowych ma bardzo istotne znaczenie z punktu widzenia otrzymanych wyników pomiarów. Analizując Rys. 4.7 do Rys. 4.18, trzy spośród czterech króćców pomiarowych było umieszczonych poza obszarem zawirowanego strumienia mieszanki

pyłowo – powietrznej, czego skutkiem było otrzymanie w wyniku pomiarów dużo niższych wartości prędkości czynnika niż występują w modelu numerycznym. Ponadto w takich okolicznościach określono, że profil prędkości i temperatury czynnika jest równomierny na  $\frac{3}{4}$  obwodu młyna, ponieważ jedna z wartości prędkości i temperatury (Króciec 4 – Tab. 4.32 i Tab. 4.34) były inne niż pozostałe (Króćce od 1 do 3 – Tab. 4.32 i Tab. 4.34), co może doprowadzić do błędów podczas formułowania wniosków. Taka okoliczność miała miejsce w tym przypadku. Dlatego zastosowanie badań numerycznych pozwoliło na zweryfikowanie tych wniosków oraz ich modyfikacje. Mianowicie w przypadku komory młyna, gdy stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego wynosi 95%, można zauważyć, że profil prędkości przepływającego czynnika jest równomierny na całym obwodzie młyna, lecz największe wartości prędkości występują przy ścianie komory młyna i maleją w kierunku promieniowym do środka młyna. Natomiast nie można tego stwierdzić w przypadku odsiewacza. Prędkości wahają się od 3 do 12 m/s wzdłuż każdej z  $\frac{1}{4}$  obwodu ściany odsiewacza. Ponadto rozkład prędkości przepływu czynnika ulega poprawie wraz z zmniejszaniem stopnia otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego osiągając najlepszy rezultat przy wartości wynoszącej 50%. W takim przypadku zdolność wynoszenia cząsteczek pyłu jest wyższa niż w pozostałych przypadkach, co w połączeniu z odsunięciem strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej od ścian poszczególnych elementów młyna, uzyskano wyrównany profil prędkości zarówno na obwodzie komory młyna jak i odsiewacza oraz w pewnym pasie szerokości na obwodzie młyna w kierunku promieniowym do środka młyna (od Rys. 4.10 do Rys. 4.12). Dlatego należy uważać, aby na podstawie Rys. 4.16 do Rys. 4.18 nie popełnić błędu podczas formułowania wniosków w sprawie zdolności strumienia do wynoszenia cząsteczek pyłu węglowego. Mianowicie przysłanianie przekroju wylotowego pierścienia dyszowego nie powoduje zmniejszenia zdolności wynoszenia cząsteczek, lecz powoduje jej wzrost a ponadto powoduje odsunięcie strumienia od ścianek elementów młyna, co jest elementem pożądanym, ponieważ powoduje mniejsze zużycie erozyjne ścian komory młyna i odsiewacza. Niestety efekt ten charakteryzuje się największymi stratami miejscowymi ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy. Natomiast pomimo zauważonej prawidłowości związanej z rozkładem temperatury na obwodzie młyna można uznać, że zmiana przekroju wylotowego pierścienia dyszowego ma znikomy wpływ na rozkład temperatury na obwodzie młyna w poszczególnych elementach młyna.

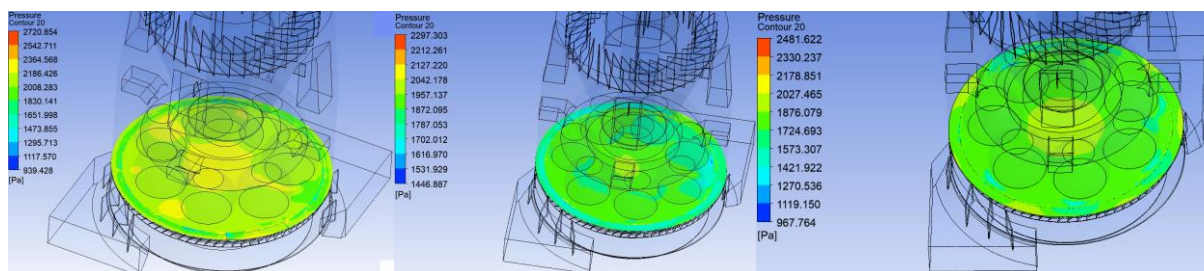
Na Rys. 4.20 ukazano wpływ przysłaniania przekroju wylotowego pierścienia dyszowego na kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej.



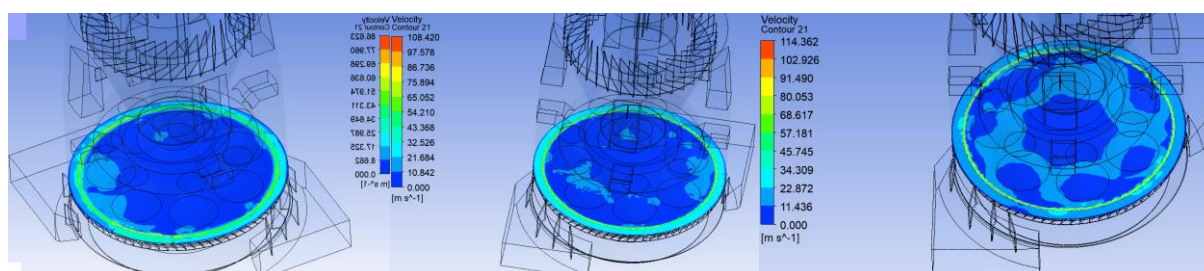
Rys. 4.20. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% (z lewej), 77% (środek), 50% (z prawej)

Analizując Rys. 4.20 można zauważyć, że przysłanianie przekroju wylotowego pierścienia dyszowego ma wpływ na kierunek przepływu strugi mieszanki pyłowo – powietrznej. Ponadto im bardziej przekrój wylotowy pierścienia dyszowego jest przysłonięty tym bardziej struga jest skierowana do środka młyna.

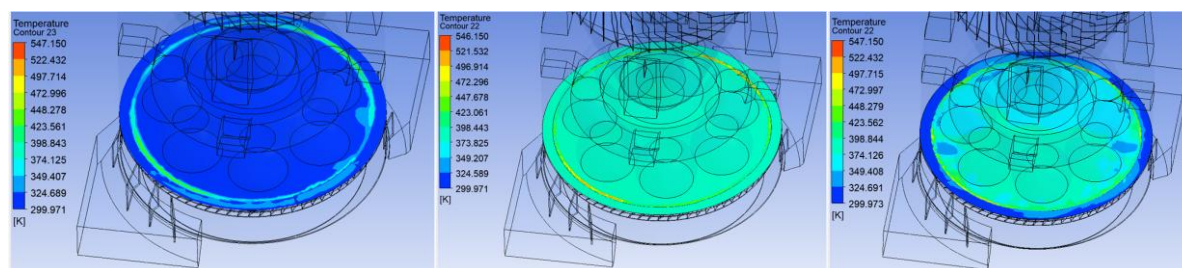
Na Rys. 4.21 przedstawiono ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym. Na Rys. 4.22 przedstawiono z kolei prędkości czynnika. Natomiast na Rys. 4.23 temperaturę.



Rys. 4.21. Ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% (z lewej), 77% (środek), 50% (z prawej)



Rys. 4.22. Prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% (z lewej), 77% (środek), 50% (z prawej)



Rys. 4.23. Temperatura czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% (z lewej), 77% (środek), 50% (z prawej)

W Tab. 4.36 zestawiono parametry charakteryzujące przepływ czynnika przez pierścień dyszowy, wynikających z analizy CFD.

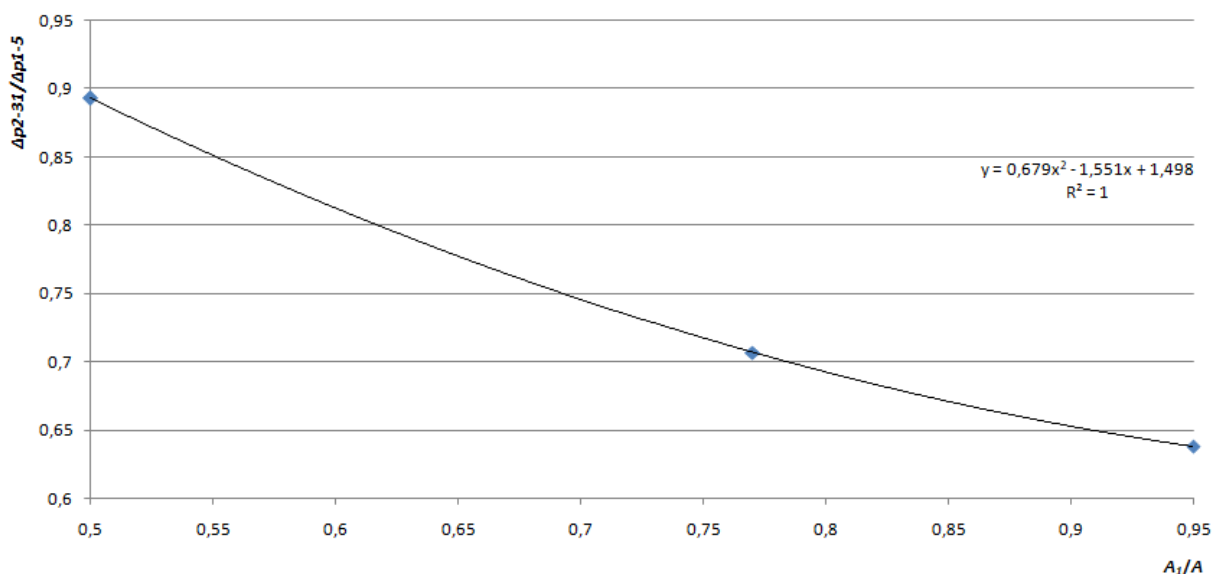
Tab. 4.36. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez pierścień dyszowy w zależności od stopnia otwarcia przekroju poprzecznego pierścienia dyszowego [%] – warianty bazowe

Parametr	Symbol	Jednostka	95	77	50
Wentylacja młyna	$\dot{V}_1$	$\text{m}^3/\text{h}$	55000	57000	56000
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	5,6	7,1
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$p_{31}$	kPa	2,3	1,96	1,82
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$t_{31}$	$^{\circ}\text{C}$	106,4	107,2	112,9
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$w_{31}$	m/s	54 – 60	65 – 75	91 – 102
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,28	3,64	5,28

pierścień dyszowy					
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia dyszowego	$\zeta_{pd}$	-	3,13	2,30	1,74

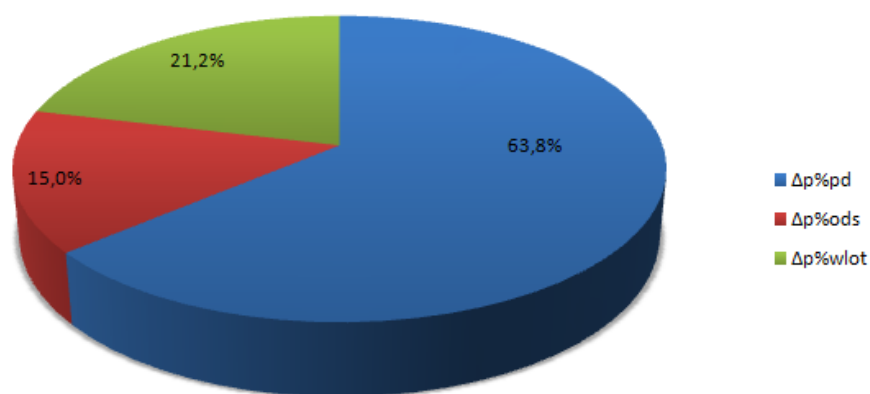
Analizując dane umieszczone w Tab. 4.36 można zauważyć, że wraz z przystaniem (zmniejszaniem) przekroju wylotowego pierścienia dyszowego wzrasta prędkość wylotowa czynnika z pierścienia dyszowego, a co za tym idzie, wzrasta zdolność wynoszenia cząsteczek pyłu węglowego, natomiast wraz z wzrostem prędkości wylotowej czynnika wzrastają również opory przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej przez pierścień dyszowy. Wyznaczono również bazowe współczynniki oporów miejscowych w celu porównania ich z tymi, wyznaczonymi po zmianie geometrii pierścienia dyszowego, oceniając w ten sposób efekty modyfikacji.

Na Rys. 4.24 przedstawiono wykres zależności stopnia otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego do stosunku strat ciśnienia przepływu powietrza przez pierścień dyszowy odniesionego do całkowitych strat przepływu czynnika przez młyn. Wyznaczony trend opisuje najlepiej funkcja kwadratowa, lecz ma inny przebieg niż w przypadku badań obiektowych.



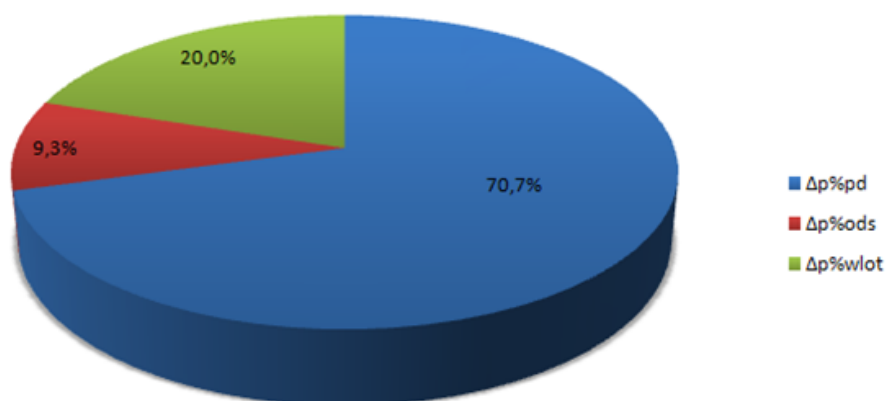
Rys. 4.24. Wykres zależności stopnia otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego do stosunku strat ciśnienia przepływu powietrza przez pierścień dyszowy odniesionego do całkowitych strat przepływu czynnika przez młyn

Na Rys. 4.25 przedstawiono wykres rozkładu strat ciśnienia w poszczególnych elementach młyna dla stopnia otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego, wynoszącego 95%. Wykres powstał na podstawie wyników zestawionych w Tab. 4.29.

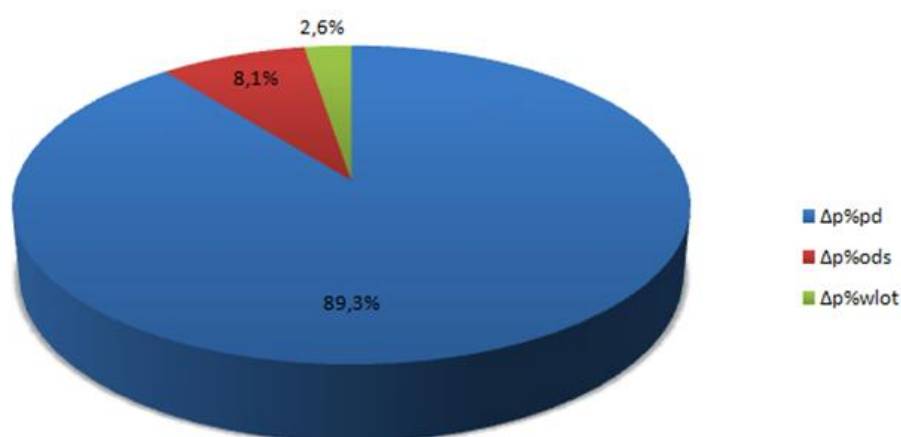


Rys. 4.25. Wykres rozkładu strat ciśnienia w poszczególnych elementach młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%

Natomiast na Rys. 4.26 i Rys. 4.27 przedstawiono wykres rozkładu strat ciśnienia w poszczególnych elementach młyna dla stopni otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego, wynoszących odpowiednio: 77% i 50%.



Rys. 4.26. Wykres rozkładu strat ciśnienia w poszczególnych elementach młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 77%



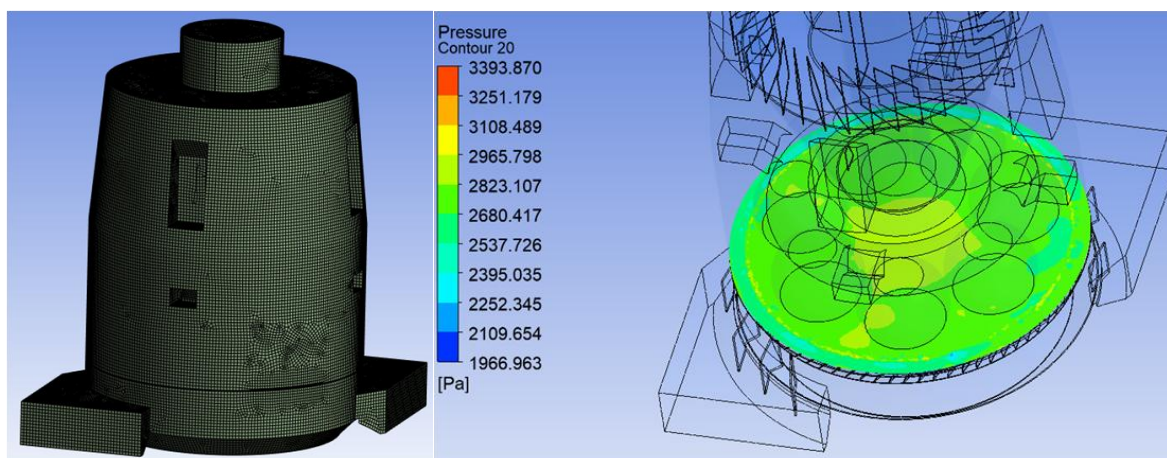
Rys. 4.27. Wykres rozkładu strat ciśnienia w poszczególnych elementach młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%

Poddając analizie wyniki zestawione w Tab. 4.29 i Tab. 4.36 oraz wyniki wizualizowane na Rys. 4.24 do Rys. 4.27 można zauważyć zarówno wzrastające opory przepływu czynnika przez pierścień dyszowy wraz z zmniejszaniem stopnia otwarcia przekroju pierścienia dyszowego, jak i można zauważyć jak zachowuje się model *CFD* przy

zmianie wspomnianego parametru. Mianowicie gdy stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego maleje do 77%, następuje niewielki wzrost oporów przepływu czynnika przez młyn a udziały strat przepływu dzielą się głównie pomiędzy pierścieniem dyszowym a odsiewaczem. Natomiast jeżeli stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego w dalszym ciągu maleje do 50%, następuje znaczny wzrost oporów przepływu czynnika przez młyn. Największy udział strat przepływu przypada na przepływ czynnika przez pierścień dyszowy, udział strat miejscowych przepływu przez odsiewacz jest zbliżony do poprzedniego wariantu, ponadto ciśnienie na wlocie do młyna znacznie wzrosło. Dlatego można wywnioskować, że w przypadku pierwszych dwóch ustawień przekroju wylotowego pierścienia dyszowego, wzrost całkowitych strat przepływu czynnika przez młyn jest nieznaczny w przeciwieństwie do ostatniego wariantu. Może to oznaczać, że w przypadku eksploatacji młyna przy 50% przysłonięciu przekroju wylotowego pierścienia dyszowego konieczne jest zwrócenie uwagi, czy zastosowany wentylator młynowy jest odpowiednio dobrany do instalacji młynowej. Ponadto należy zwrócić uwagę czy punkt pracy instalacji młynowej oraz wentylatora znajduje się w zakresie stabilnej pracy charakterystyki przepływowej wentylatora młynowego. Co miało potwierdzenie podczas badań obiektowych, ponieważ przy tym ustawieniu przekroju wylotowego pierścienia dyszowego młyn pracował niestabilnie, dlatego przeprowadzono pomiary tak szybko jak to było możliwe i powrócono do stabilnych warunków pracy młyna.

#### 4.3.2 Badań numeryczne alternatywnych wariantów podstawowej geometrii pierścienia dyszowego

Dalszą część opracowania poświęcono alternatywnym wariantom badań numerycznych dotyczących podstawowej geometrii pierścienia dyszowego, niezbędnych do ustalenia wpływu innych czynników na wynik badań *CFD*. Wspomniane czynniki to: ruch obrotowy i kierunek obrotu pierścienia dyszowego, brak ruchu obrotowego pierścienia dyszowego, sposób przysłaniania przekroju wylotowego pierścienia dyszowego, kierunek ustawienia łopatek pierścienia dyszowego, geometria wlotu gorącego powietrza do młyna oraz jej modyfikacje. Warunki brzegowe wprowadzone do modelu numerycznego pozostają bez zmian. Na Rys. 4.28 przedstawiono siatkę modelu numerycznego przemysłowego młyna miazdzącego, stanowiącą warianty alternatywne I i II badań numerycznych.



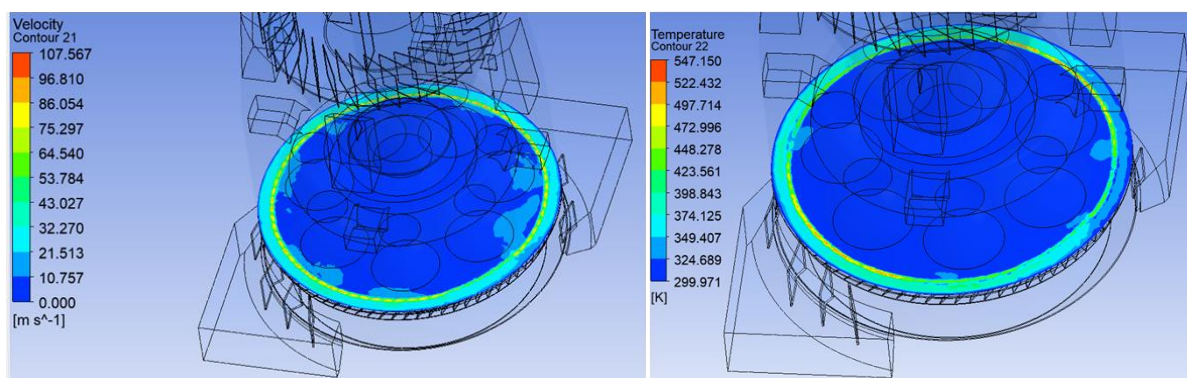
Rys. 4.28. Siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (z lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant I (z prawej) – warianty alternatywne I i II

W Tab. 4.37 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantów alternatywnych I i II.

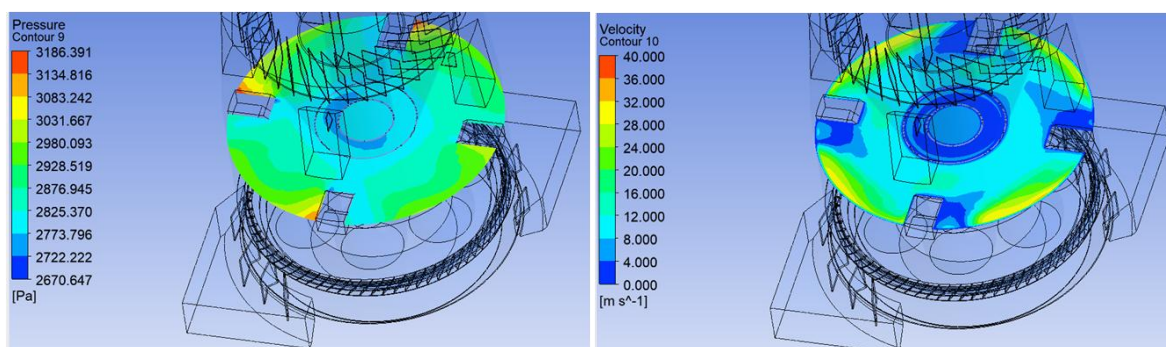
Tab. 4.37. Parametry siatki modelu numerycznego – warianty alternatywne I i II

Wariant I	Liczba elementów siatki	1 152 257
	Liczba węzłów siatki	924 685
Wariant II	Liczba elementów siatki	1 187 445
	Liczba węzłów siatki	939 146

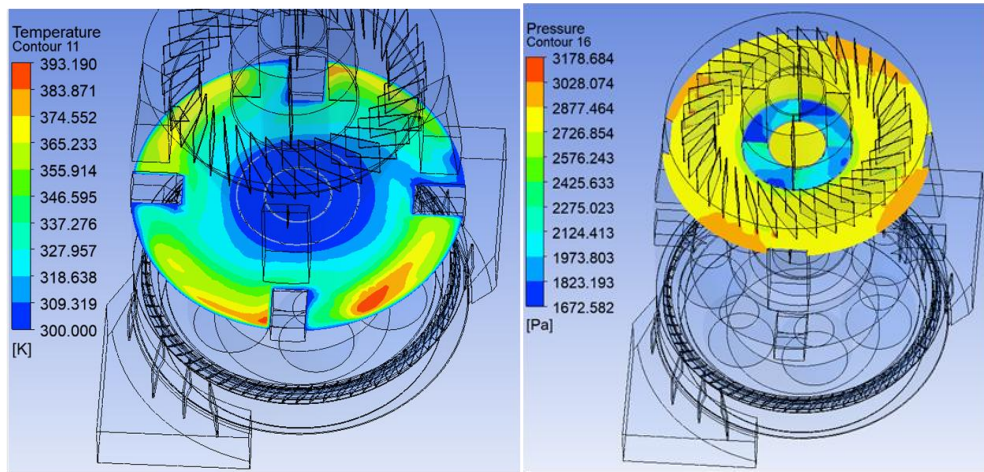
Na Rys. 4.28 do Rys. 4.41 ukazano parametry charakteryzujące przepływ czynnika przez każdy element młyna w poszczególnych punktach pomiarowych, wynikających z analizy *CFD*. Zwizualizowane wyniki obliczeń *CFD* na poniższych rysunkach dotyczą pierścienia dyszowego niewykonywającego ruchu obrotowego, który charakteryzuje się stopniem otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego na poziomie 95%. Wariant I dotyczy geometrii pierścienia dyszowego charakteryzującej się ustawieniem łopatek I, natomiast wariant II dotyczy geometrii pierścienia dyszowego charakteryzującej się ustawieniem łopatek II. Ponadto wspomniane wyżej warianty wizualizowano na Rys. 4.28–Rys. 4.41 gdzie Rys. 4.28–Rys. 4.34 dotyczą wariantu I, natomiast Rys. 4.35–Rys. 4.41 dotyczą z kolei wariantu II.



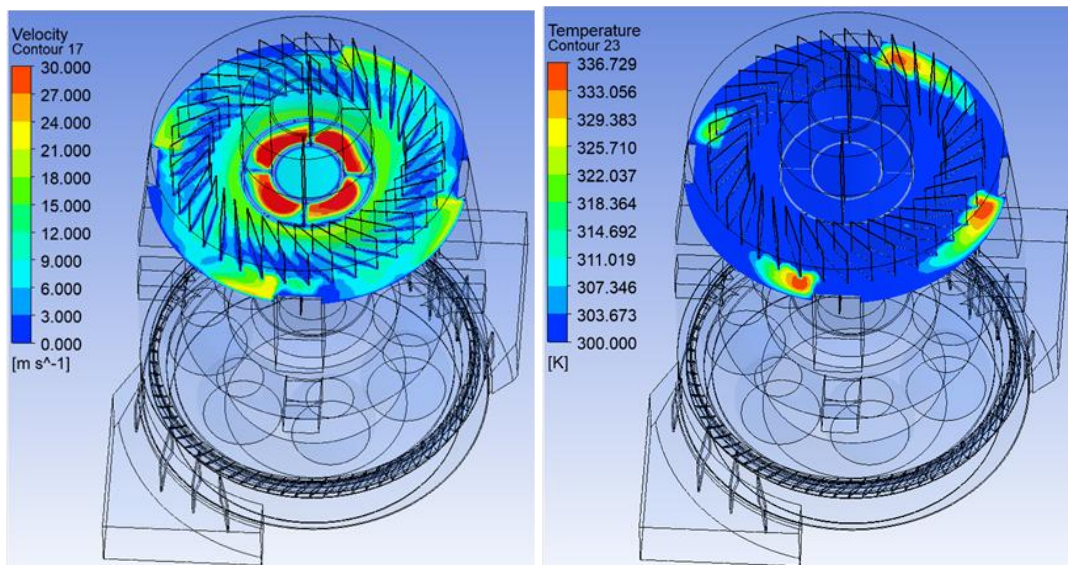
Rys. 4.29. Prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (z lewej), rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant I (z prawej) – warianty alternatywne



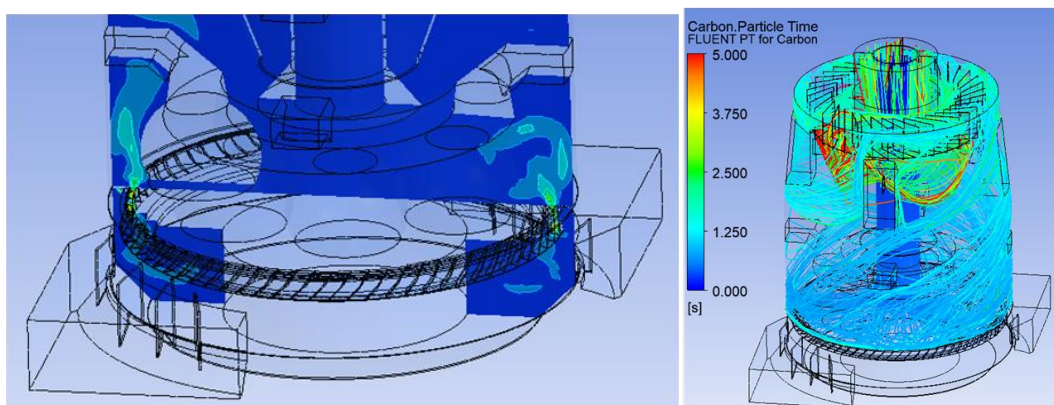
Rys. 4.30. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej), rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%- wariant I (z prawej) – warianty alternatywne



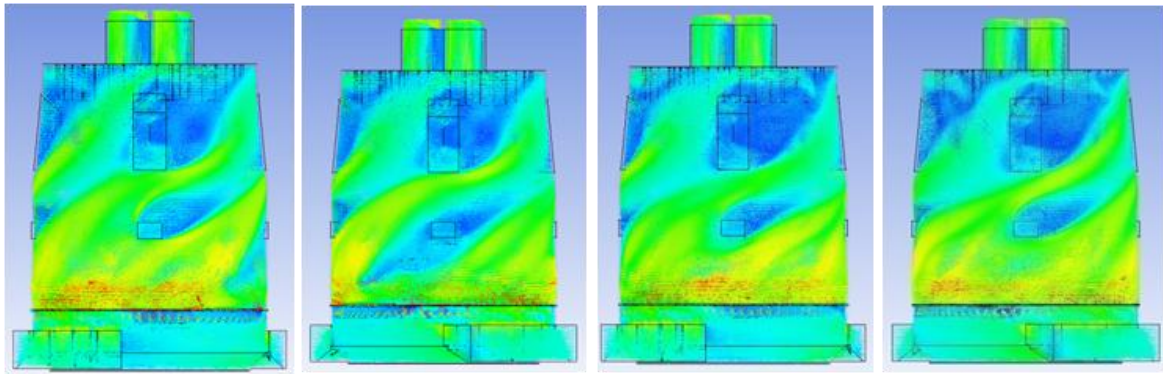
Rys. 4.31. Rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%- wariant I (z prawej) – warianty alternatywne



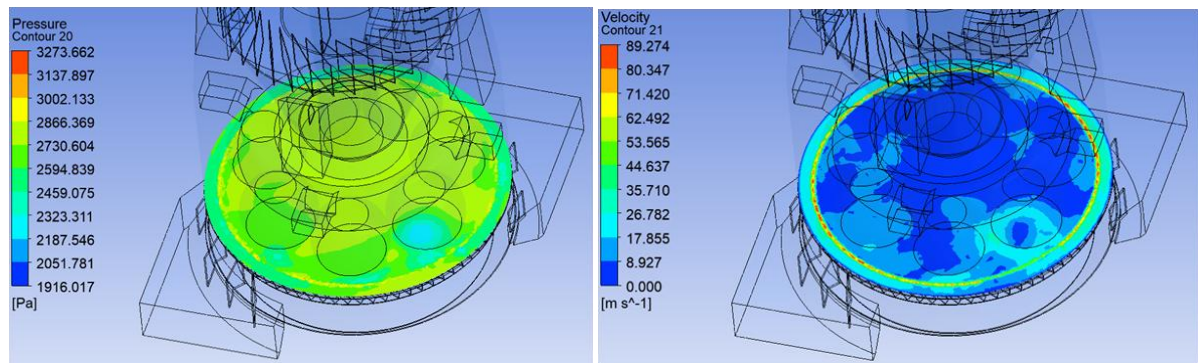
Rys. 4.32. Rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (z lewej), rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%- wariant I (z prawej) – warianty alternatywne



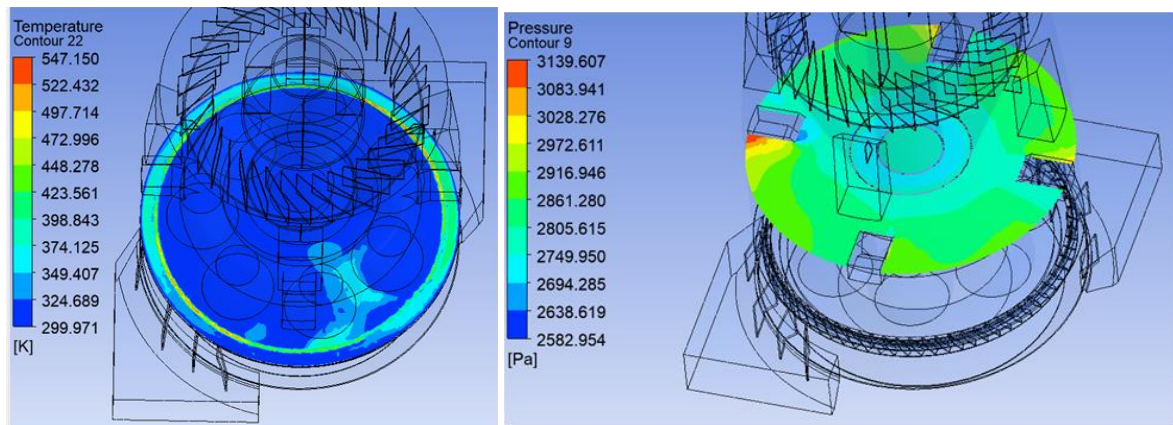
Rys. 4.33. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (z lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant I (z prawej) – warianty alternatywne



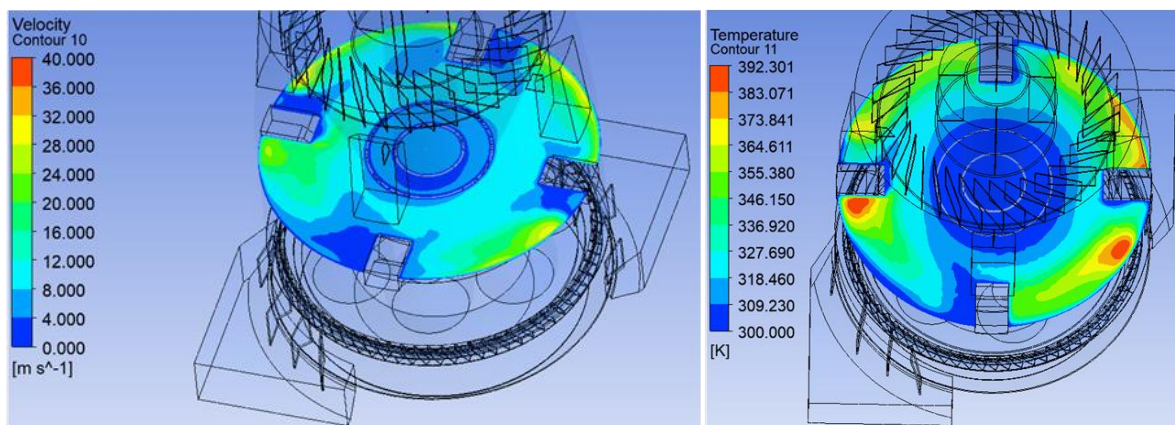
Rys. 4.34. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant I – warianty alternatywne



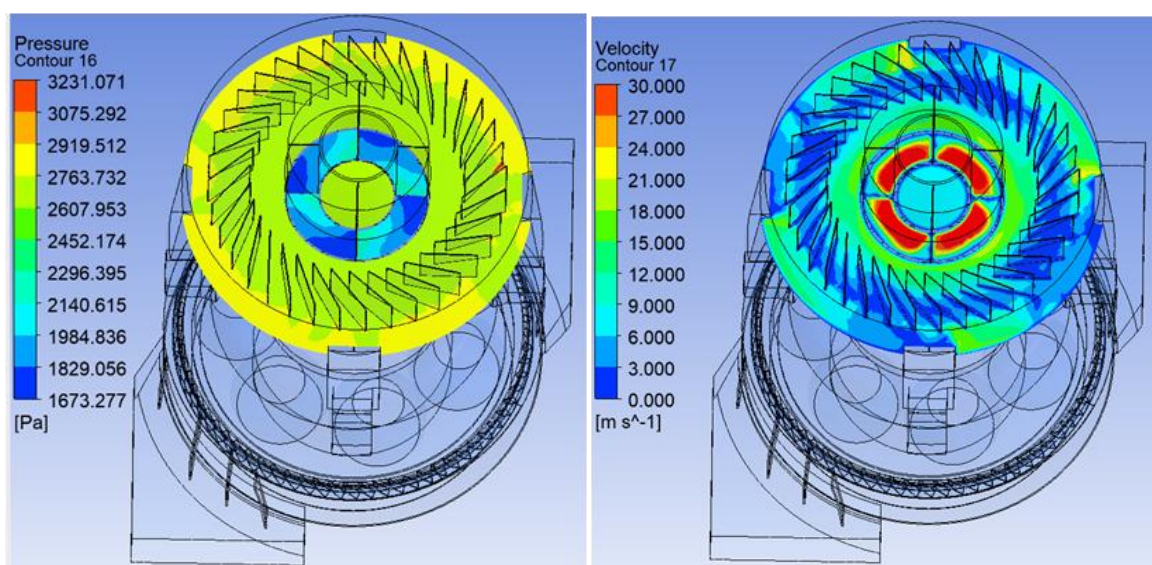
Rys. 4.35. Rozkład ciśnienia statycznego panującego w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (z lewej), rozkład prędkości czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant II (z prawej) – warianty alternatywne



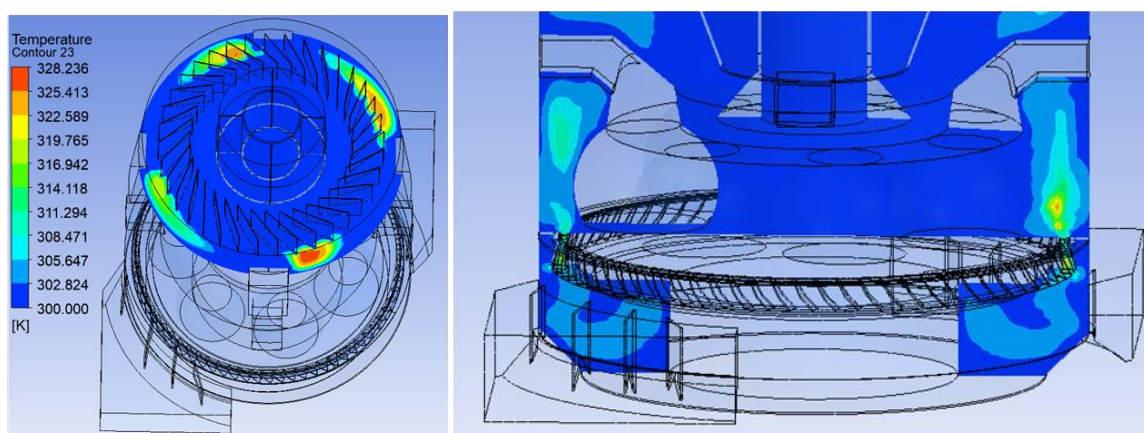
Rys. 4.36. Rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (z lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%- wariant II (z prawej) – warianty alternatywne



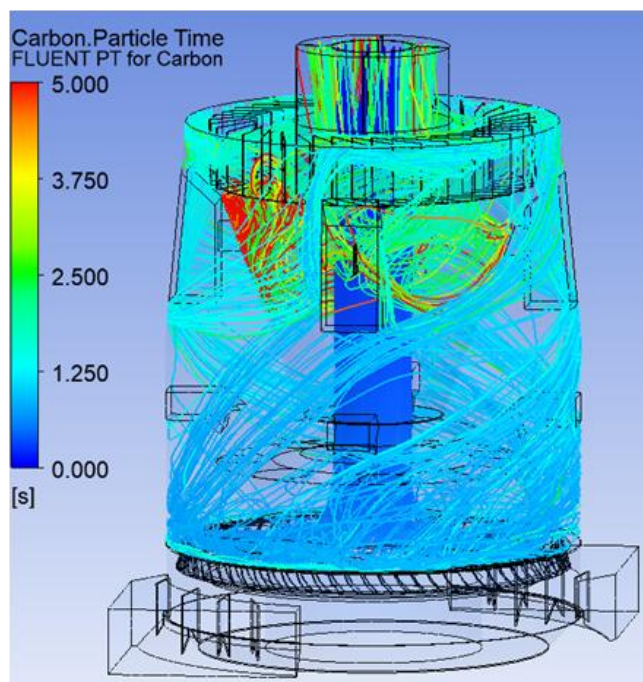
Rys. 4.37. Rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej), rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%- wariant II (z prawej) – warianty alternatywne



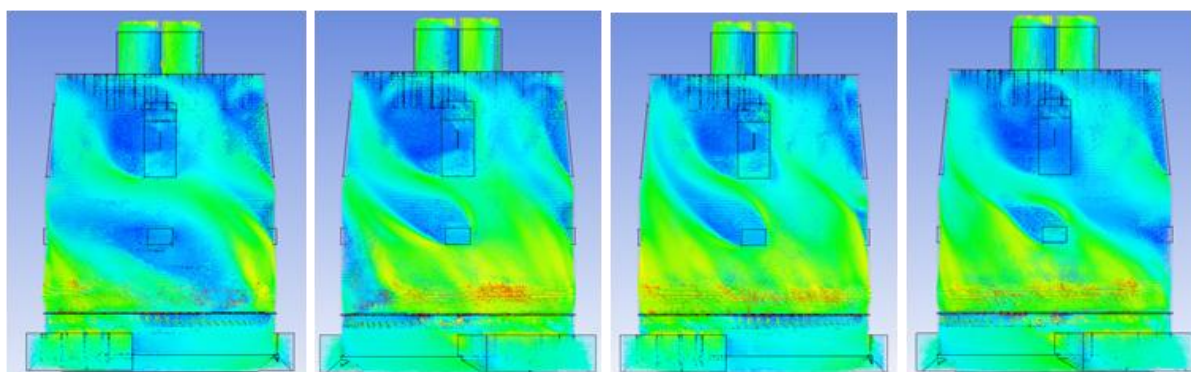
Rys. 4.38. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (z lewej), rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%- wariant II (z prawej) – warianty alternatywne



Rys. 4.39. Rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze (z lewej), kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant II (z prawej) – warianty alternatywne



Rys. 4.40. Ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant II – warianty alternatywne



Rys. 4.41. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant II – warianty alternatywne

W Tab. 4.38 zestawiono parametry charakteryzujące przepływ czynnika przez każdy element młyna w poszczególnych punktach pomiarowych, wynikających z analizy *CFD* dla wariantów I i II.

Tab. 4.38. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania *CFD* – pierścień dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego 95% – warianty alternatywne

Parametr	Symbol	Jednostka	I	II
Wentylacja młyna	$\dot{V}_1$	$\text{m}^3/\text{h}$	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,7	5,7
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	°C	274	273
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	6,25	5,4
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$p_{31}$	kPa	2,98	2,5

Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$w_{31}$	m/s	67 – 95 (80)	70 – 90
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$t_{31}$	°C	177 – 247	185-272
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,27	2,9
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia dyszowego	$\zeta_{pd}$	-	1,58	1,6
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,92	2,89
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	102	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,8	2,85
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	102	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	2,0	1,92
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	4,7	3,8

Ze względu na obszerny zasób otrzymanych wyników badań ukazanych w tej części niniejszej pracy, postanowiono przejść do podsumowania i usystematyzowania wniosków i tez, które wynikają z otrzymania wyżej wspomnianych wyników badań CFD. Na podstawie Rys. 4.16 do Rys. 4.18, Rys. 4.34 i Rys. 4.41 wywnioskowano, że za zawirowanie strumienia głównie odpowiada geometria pierścienia dyszowego. Stąd od geometrii pierścienia dyszowego również zależy kierunek zawirowania wspomnianego strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej, który wpływa na powstałe ścieżki dla cząstek pyłu węglowego. Natomiast ruch obrotowy pierścienia dyszowego jest czynnikiem wspomagającym. Ponadto ruch obrotowy pierścienia dyszowego wpływa pozytywnie na wyrównanie profilu prędkości strumienia na obwodzie młyna (różnice prędkości wylotowej na poziomie 11% - Rys. 4.22 (po lewej), lecz prędkości wylotowe strumienia są niższe niż dla pierścienia dyszowego niewykonywanego ruchu obrotowego (wariant I i II) – Rys. 4.29 (z lewej) i Rys. 4.35 (z prawej). Dla porównania różnice prędkości wylotowej z pierścienia dyszowego dla wariantów I i II wynoszą odpowiednio: ~19% i 29%. Jest to spowodowane zróżnicowaniem profilu ciśnienia na obwodzie młyna. Najbardziej równomierny profil ciśnienia statycznego występuje dla wariantu bazowego i stopnia otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego równym 95% (Rys. 4.21 z lewej). Natomiast dla pierścieni dyszowych niewykonywujących ruchu obrotowego, rozkład ciśnienia jest mniej korzystny w porównaniu z wyżej omówionym przypadkiem – Rys. 4.28 (z prawej) i Rys. 4.35 (z lewej). Najmniej korzystny profil ciśnienia statycznego na obwodzie młyna występuje dla wariantu II Rys. 4.35 (z lewej). Należy zwrócić również uwagę, że straty przepływu strumienia przez pierścień dyszowy dla wariantu II są najniższe, natomiast dla wariantu I są niemal identyczne jak dla wariantu bazowego i stopnia otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego równym 95%. Ruch obrotowy pierścienia dyszowego wpływa również na kierunek wylotu strumienia czynnika z pierścienia dyszowego (Rys. 4.33 z lewej i Rys. 4.39 z prawej), którego wektory prędkości skierowane są promieniowo, na zewnątrz komory młyna. Nie jest to również czynnik decydujący, ponieważ większy wpływ na kierunek strumienia mieszanki ma przysłanianie przekroju wylotowego

pierścienia dyszowego (Rys. 4.20). Dlatego ruch obrotowy pierścienia dyszowego nie jest również czynnikiem decydującym o stratach przepływu strumienia przez pierścień dyszowy. Świadczą o tym również wyniki obliczeń tych strat dla pierścienia bazowego oraz dwóch wariantów alternatywnych. Dla wariantu bazowego i wariantu I – alternatywnego – straty ciśnienia przepływu strumienia są niemal identyczne. Natomiast w przypadku wariantu II (rozwiązanie FPM S.A.) straty ciśnienia są niższe niż dla wariantów bazowego i wariantu I, co prowadziło do nieprawidłowości w sformułowaniu założenia, że pierścienie dyszowe niewykonujące ruchu obrotowego charakteryzują się zawsze mniejszymi oporami przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej w stosunku do pierścieni dyszowych wykonujących ruch obrotowy. To dowodzi, że znaczny wpływ na straty przepływu strumienia czynnika przez pierścień dyszowy ma ustawienie łopatek na obwodzie pierścienia dyszowego, który stanowi jeden z czynników wpływający na geometrię wspomnianego pierścienia. Tak sformułowana teza nie oznacza, że jest to jedyny i decydujący czynnik, wpływający na wyniki obliczeń *CFD* pierścienia dyszowego. Należy również zauważyć, że zmiana strat przepływu strumienia czynnika przez pierścień dyszowy nie oznacza wprost zmiany całkowitych strat przepływu strumienia czynnika przez młyn. Porównując rozkład ciśnienia statycznego i prędkości na obwodzie komory młyna zarówno dla wariantu bazowego i stopnia otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego równym 95% z wariantem I – alternatywnym, rozkład ciśnienia i prędkości na obwodzie komory młyna ma identyczną tendencję (Rys. 4.7 z lewej, Rys. 4.10 z lewej i Rys. 4.30), lecz prędkości są o 30% wyższe w porównaniu wariantem bazowym. Natomiast ciśnienia statyczne występujące w komorze młyna dla wariantu I są o ~39% wyższe niż w przypadku wariantu bazowego. Z kolei w przypadku wariantu II, ciśnienia statyczne występujące w komorze młyna są niemal identyczne jak dla wariantu I (Rys. 4.30 z lewej i Rys. 4.36 z prawej). Rozkład ciśnienia dla wariantu II jest skierowany przeciwnie w porównaniu z wariantem I. Natomiast rozkład prędkości na obwodzie komory młyna jest najmniej korzystny niż w przypadku wariantu bazowego oraz wariantu I. Prędkości występujące na obwodzie komory młyna są niższe odpowiednio o 50% i 30% lecz najwyższe wartości prędkości występują przy ścianie komory młyna. Dlatego można zauważyć, że w przypadku wariantu II zdolność wnoszenia cząsteczek pyłu węglowego jest najmniejsza spośród omawianych dotąd wariantów. Wektory prędkości strumienia są również skierowane przeciwnie w stosunku do wariantów bazowego oraz wariantu I (Rys. 4.37 z lewej). Natomiast porównując rozkład ciśnienia statycznego i prędkości na obwodzie odsiewacza zarówno dla wariantu bazowego i stopnia otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego równym 95% z wariantem I – alternatywnym, rozkład ciśnienia i prędkości na obwodzie komory młyna ma identyczną tendencję (Rys. 4.7 z prawej, Rys. 4.10 z prawej, Rys. 4.32 z lewej i Rys. 4.38 z prawej), lecz najlepszy rozkład prędkości wraz z najlepszą zdolnością wnoszenia cząsteczek występuje w przypadku zastosowania wariantu I. Prędkości występujące w tym przypadku są o 50% wyższe w stosunku do wariantu I. Natomiast w przypadku wariantu II prędkości występujące w odsiewaczu są najwyższe ale tylko na części obwodu każdej z ćwiertci obwodu odsiewacza (Rys. 4.38 z prawej). Z kolei rozkład ciśnienia statycznego w odsiewaczu jest analogiczny jak w przypadku rozkładu ciśnienia w komorze młyna (Rys. 4.7 z prawej, Rys. 4.31 z prawej i Rys. 4.38 z prawej). Podsumowując tą część pracy, profile przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej przepływającej przez pierścień dyszowy dotyczące zarówno ciśnienia statycznego i prędkości zależą głównie od ustawienia łopatek (kąt i zwrot ustawienia łopatek) na obwodzie pierścienia dyszowego, czyli od jego geometrii. Natomiast ruch obrotowy pierścienia dyszowego wpływa pozytywnie na równomierność profili przepływu uzyskanych na obwodzie młyna. Wpływ ten na wynik obliczeń *CFD* ma niższą wagę niż

geometria pierścienia dyszowego. Ponadto ruch obrotowy pierścienia dyszowego wpływa niekorzystnie na kierunek przepływu strumienia, ponieważ składowa odśrodkowa powoduje skierowanie strumienia w kierunku ściany komory młyna, co jest zjawiskiem niekorzystnym, ponieważ powoduje to wzrost zużycia erozyjnego elementów młyna, w tym komory młyna. Należy przy tym zwrócić uwagę, że zastosowanie elementów przysłaniających przekrój wylotowy pierścienia dyszowego neutralizuje efekt działania siły odśrodkowej na strumień czynnika kierując strumień do środka komory młyna.

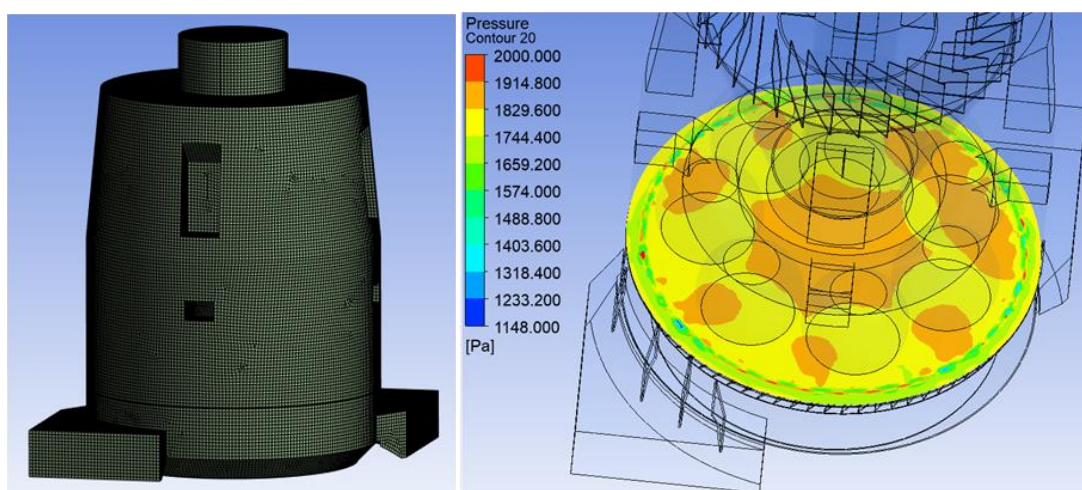
Następnie postanowiono przeanalizować kolejne trzy warianty związane z innym sposobem przysłaniania przekroju wylotowego pierścienia dyszowego. Na Rys. 4.42 do Rys. 4.62 przedstawiono wyniki badań CFD wariantów alternatywnych dla następujących możliwości: wariant III – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – ustawienie łopatek I, stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% (Rys. 4.42 do Rys. 4.48); wariant IV – nieruchomy pierścień dyszowy, a łopatki są ułożone identycznie jak w poprzednim wariantcie, stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% (do Rys. 4.55) oraz wariant V – nieruchomy pierścień dyszowy, – ustawienie łopatek II, stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%(Rys. 4.56 do Rys. 4.62).

W Tab. 4.39 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantów alternatywnych III, IV i V.

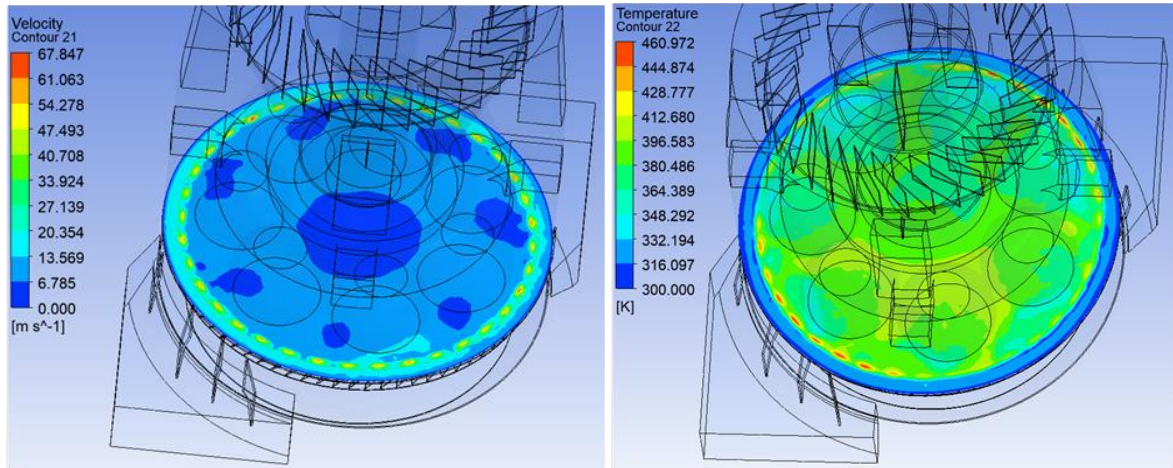
Tab. 4.39. Parametry siatki modelu numerycznego – warianty alternatywne III, IV i V

Wariant III	Liczba elementów siatki	1 465 068
	Liczba węzłów siatki	1 296 461
Wariant IV	Liczba elementów siatki	1 465 068
	Liczba węzłów siatki	1 296 461
Wariant V	Liczba elementów siatki	1 122 293
	Liczba węzłów siatki	899 500

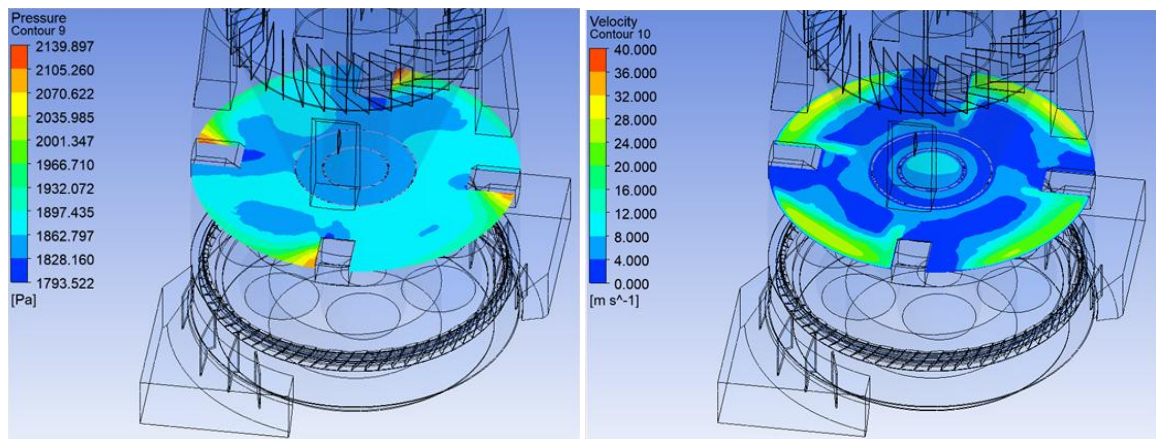
Na Rys. 4.42 przedstawiono siatkę modelu CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po lewej) i ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) dla III wariantu alternatywnego.



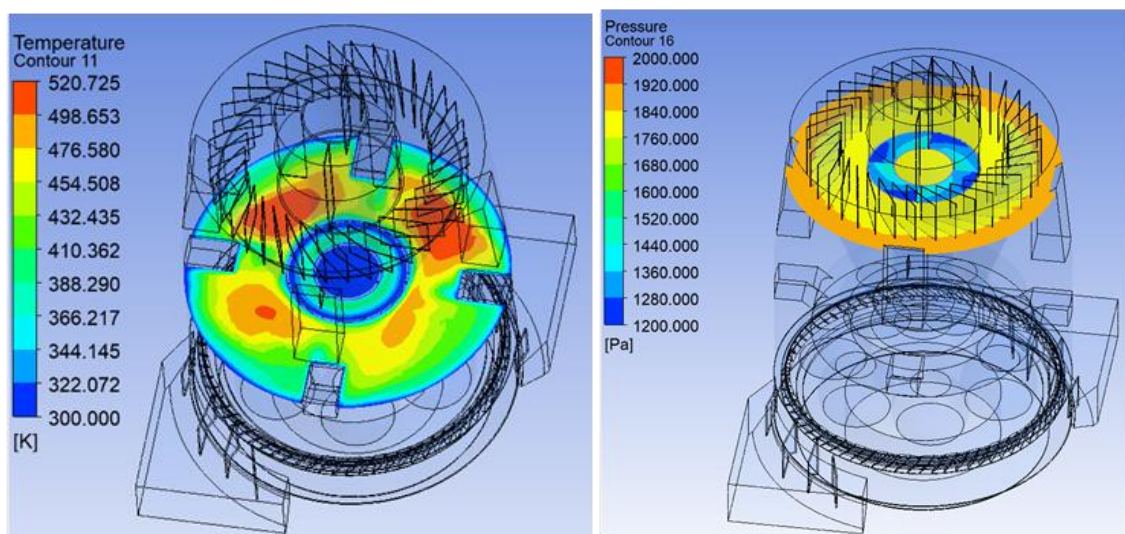
Rys. 4.42. Siatka modelu CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne



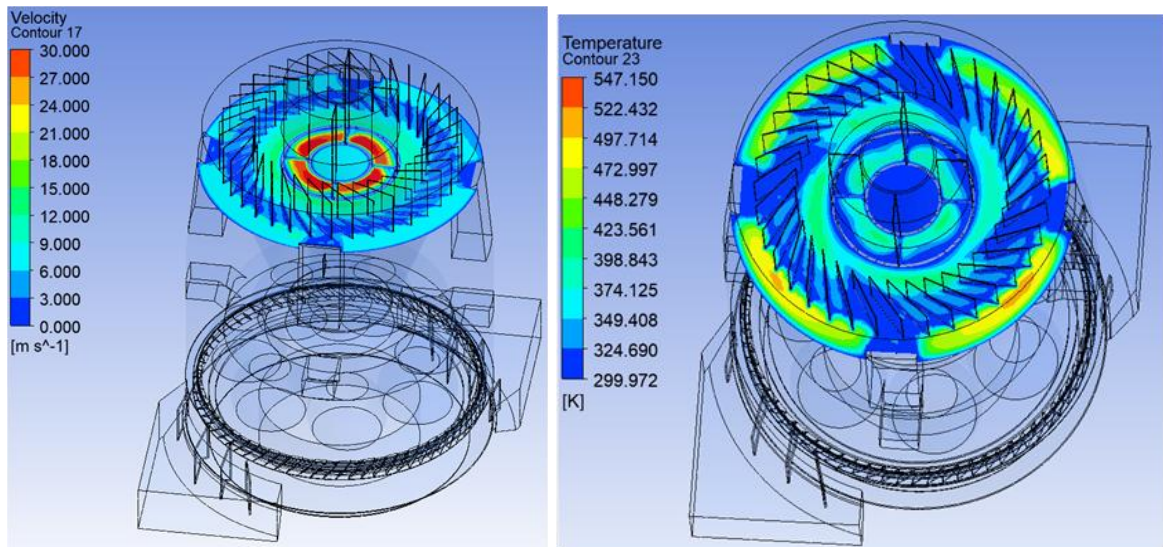
Rys. 4.43. Prędkość czynnika panująca w komorze młyn nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyn nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne



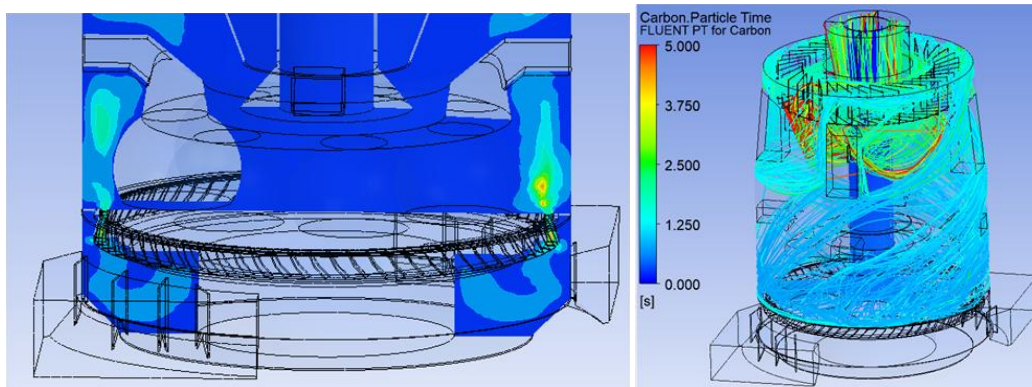
Rys. 4.44. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne



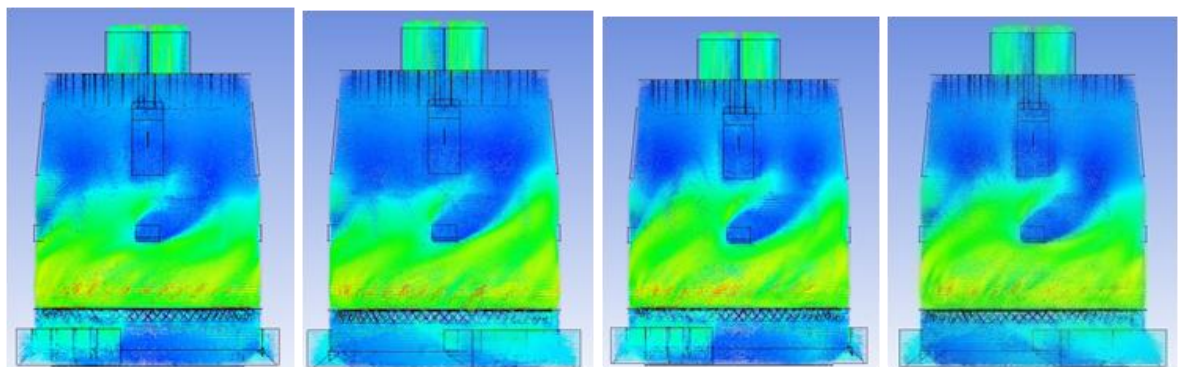
Rys. 4.45. Rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne



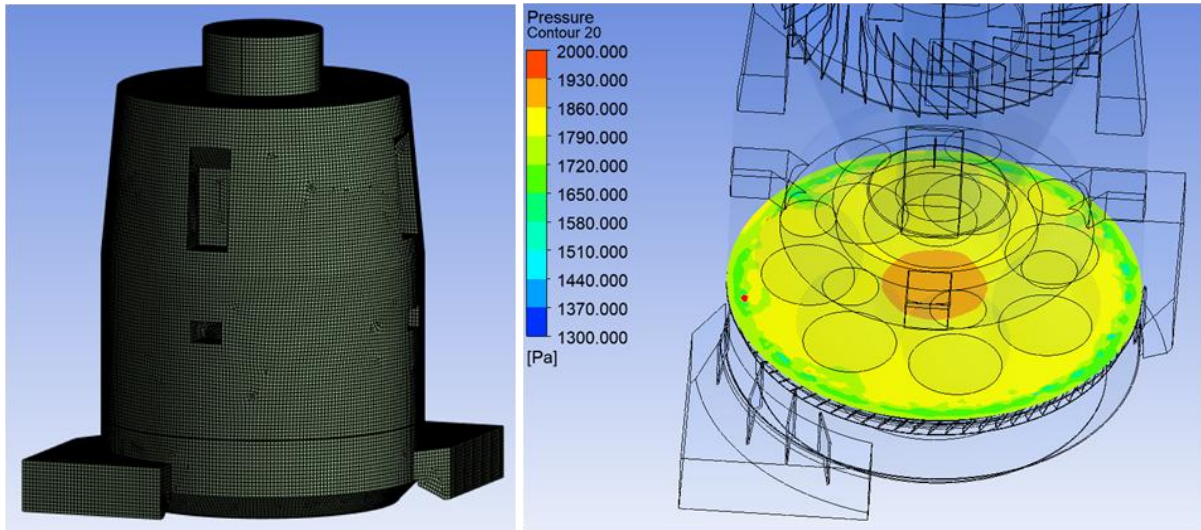
Rys. 4.46. Rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%- wariant III – warianty alternatywne



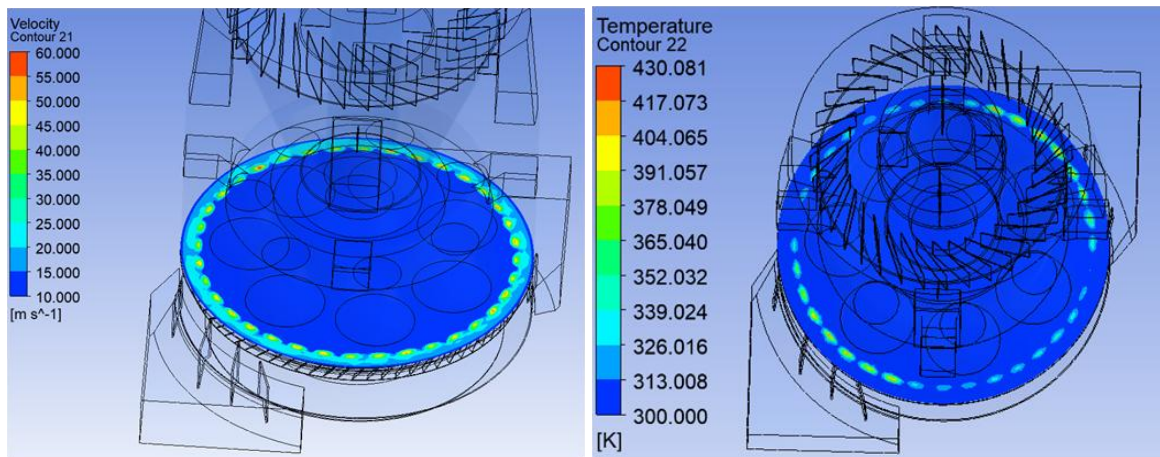
Rys. 4.47. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne



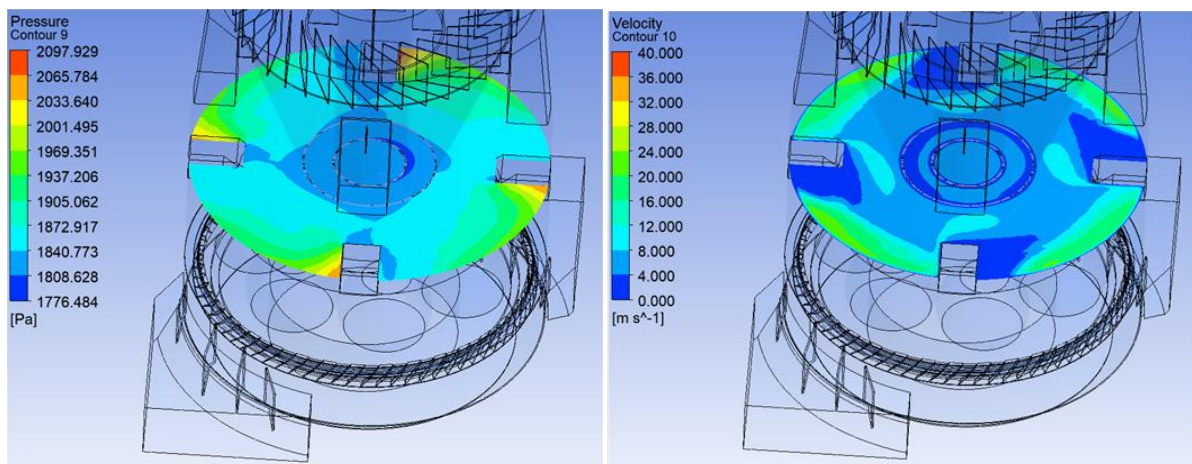
Rys. 4.48. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne



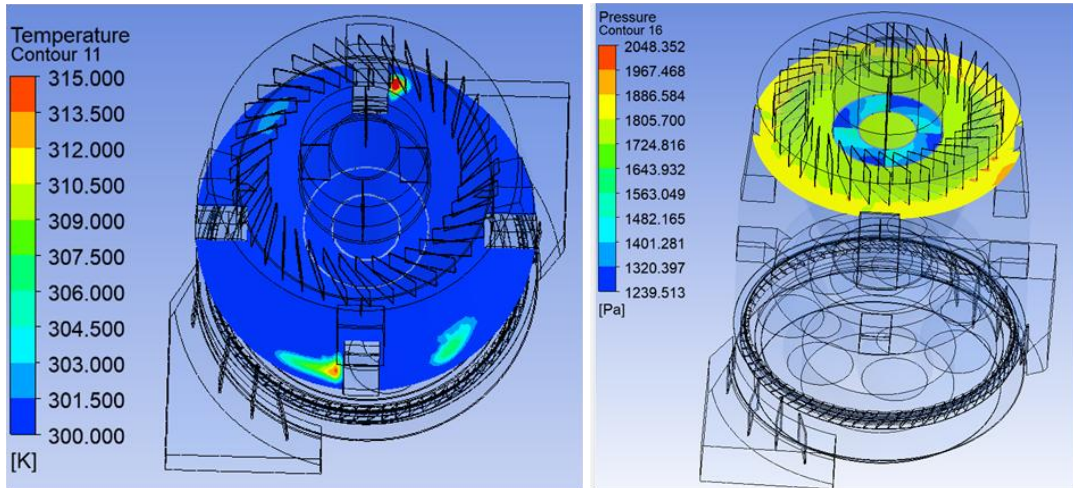
Rys. 4.49. Siatka modelu CFD przemysłowego młyna miążdzącego (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant IV – warianty alternatywne



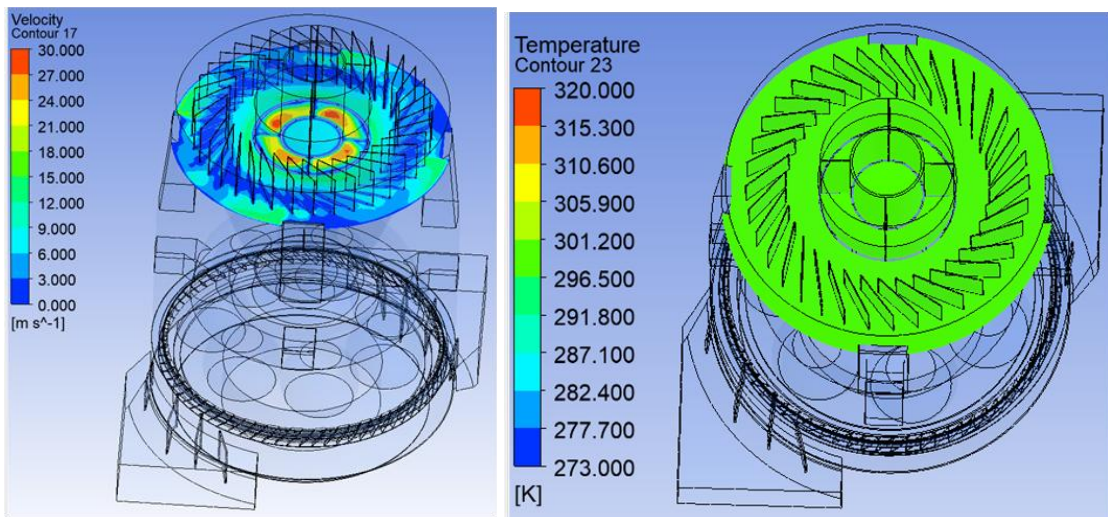
Rys. 4.50. Prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant IV – warianty alternatywne



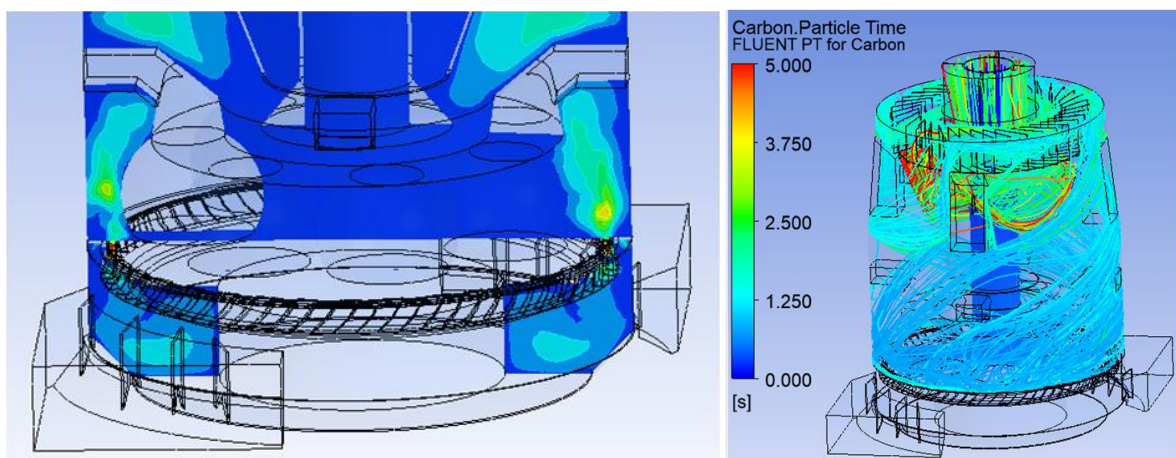
Rys. 4.51. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%- wariant IV – warianty alternatywne



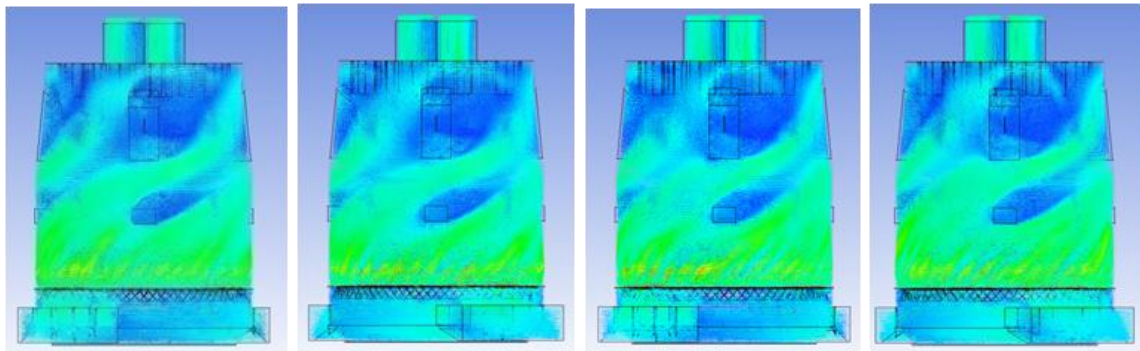
Rys. 4.52. Rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%- wariant IV – warianty alternatywne



Rys. 4.53. Rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%- wariant IV – warianty alternatywne

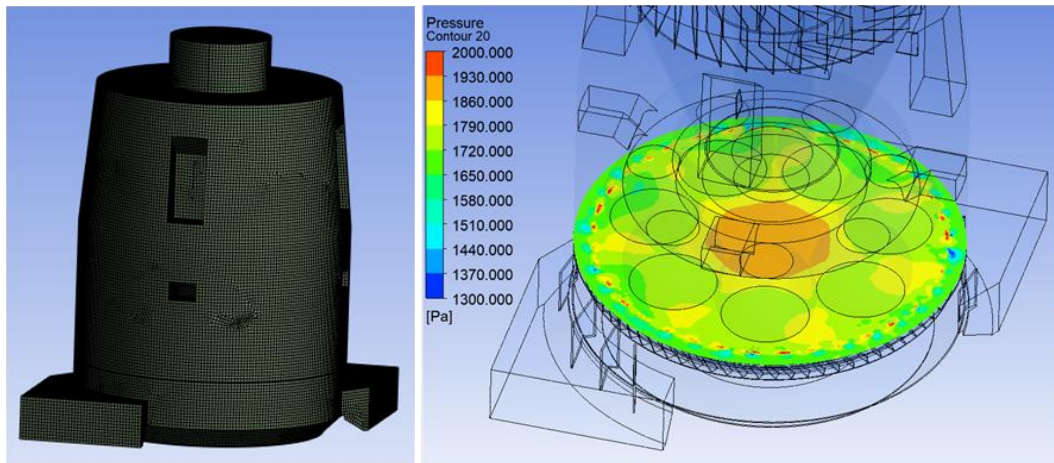


Rys. 4.54. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant IV – warianty alternatywne

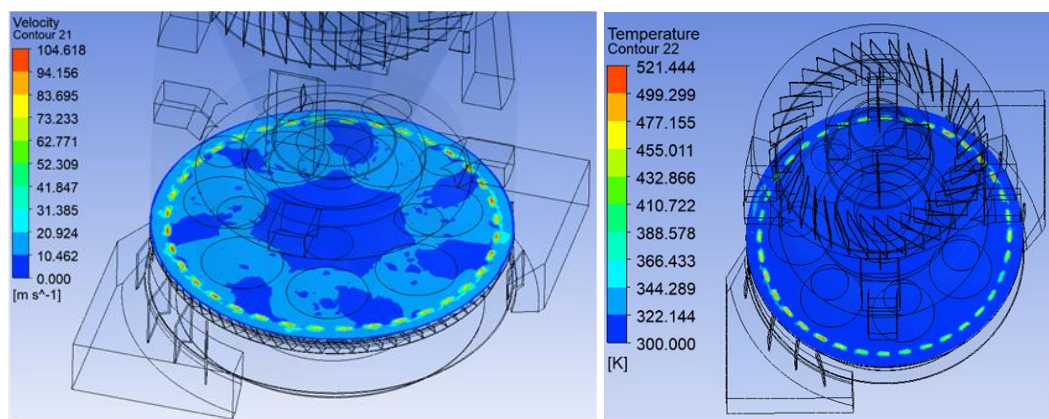


Rys. 4.55. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant IV – warianty alternatywne

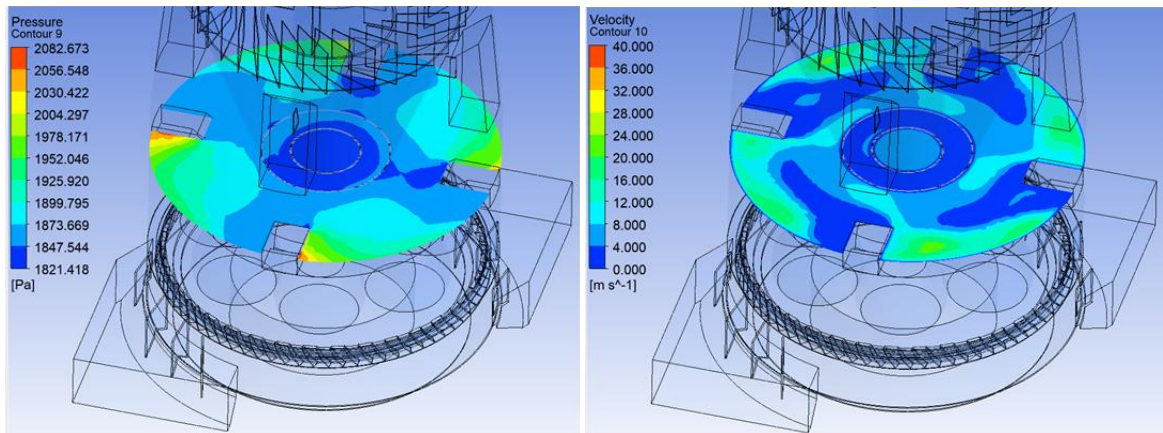
Na Rys. 4.56 przedstawiono siatkę modelu *CFD* przemysłowego młyna miążdżącego oraz rozkład ciśnienia statycznego nad pierścieniem dyszowym dla V wariantu alternatywnego.



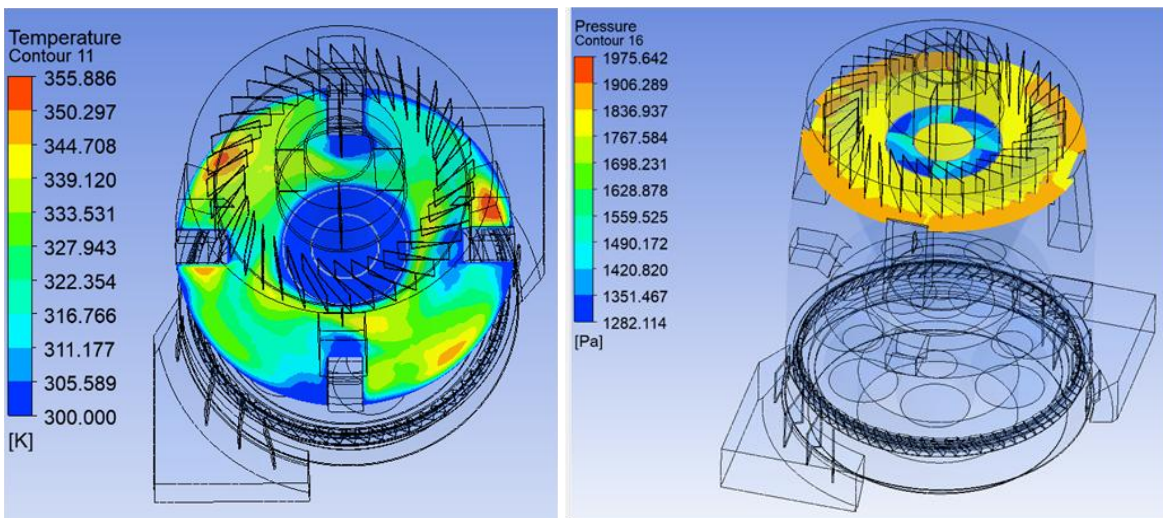
Rys. 4.56. Siatka modelu *CFD* przemysłowego młyna miążdżącego (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant V – warianty alternatywne



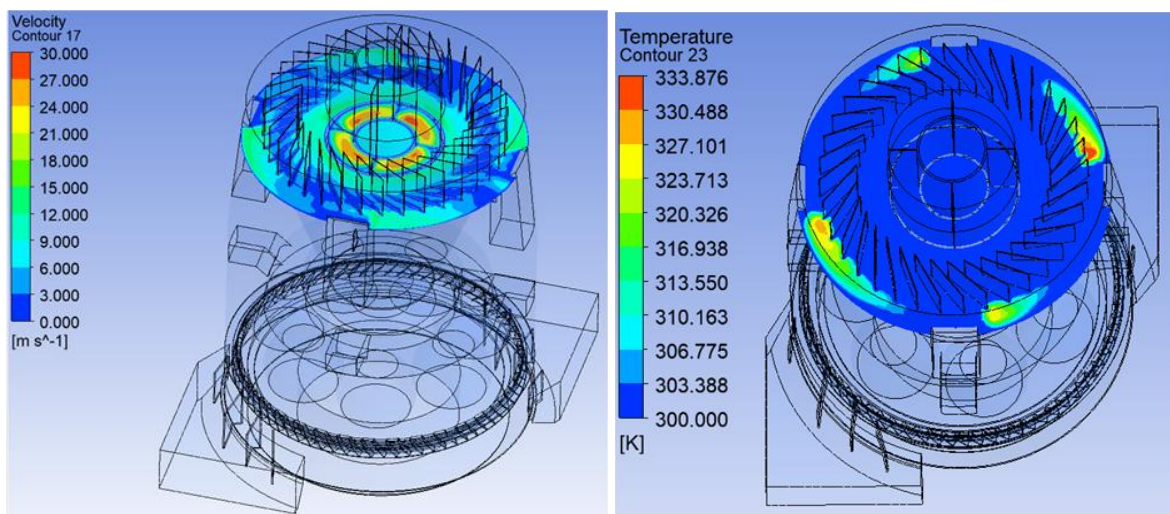
Rys. 4.57. Prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), Rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant V – warianty alternatywne



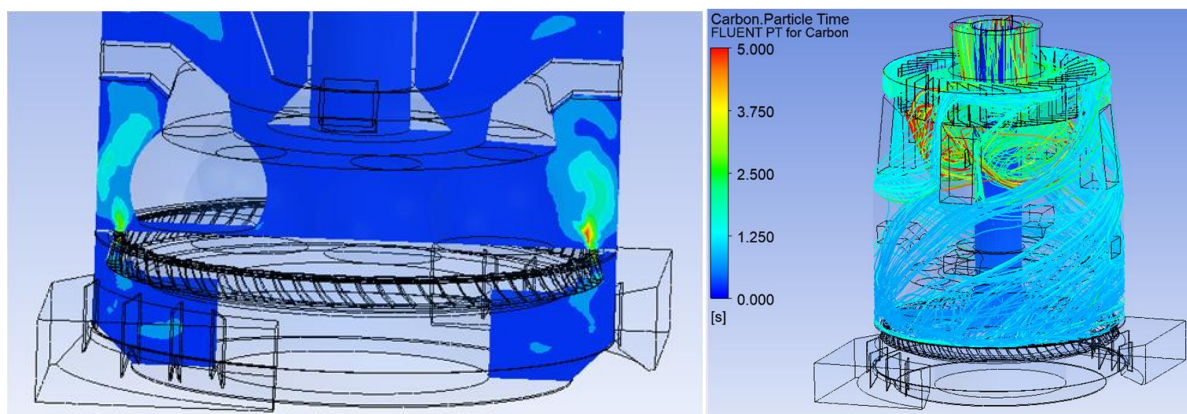
Rys. 4.58. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%- wariant V – warianty alternatywne



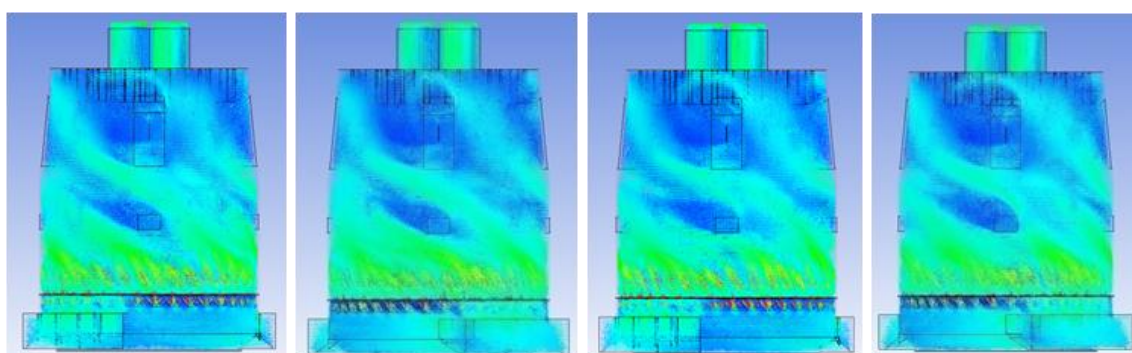
Rys. 4.59. Rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%- wariant V – warianty alternatywne



Rys. 4.60. Rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%- wariant V – warianty alternatywne



Rys. 4.61. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszewnego – 50% - wariant V – warianty alternatywne



Rys. 4.62. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszewnego – 50% - wariant V – warianty alternatywne

W Tab. 4.40 zestawiono parametry charakteryzujące przepływ czynnika przez każdy element młyna w poszczególnych punktach pomiarowych, wynikających z analizy CFD dla wariantów III, IV i V.

Tab. 4.40. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania CFD – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszewnego – 50% - alternatywne warianty

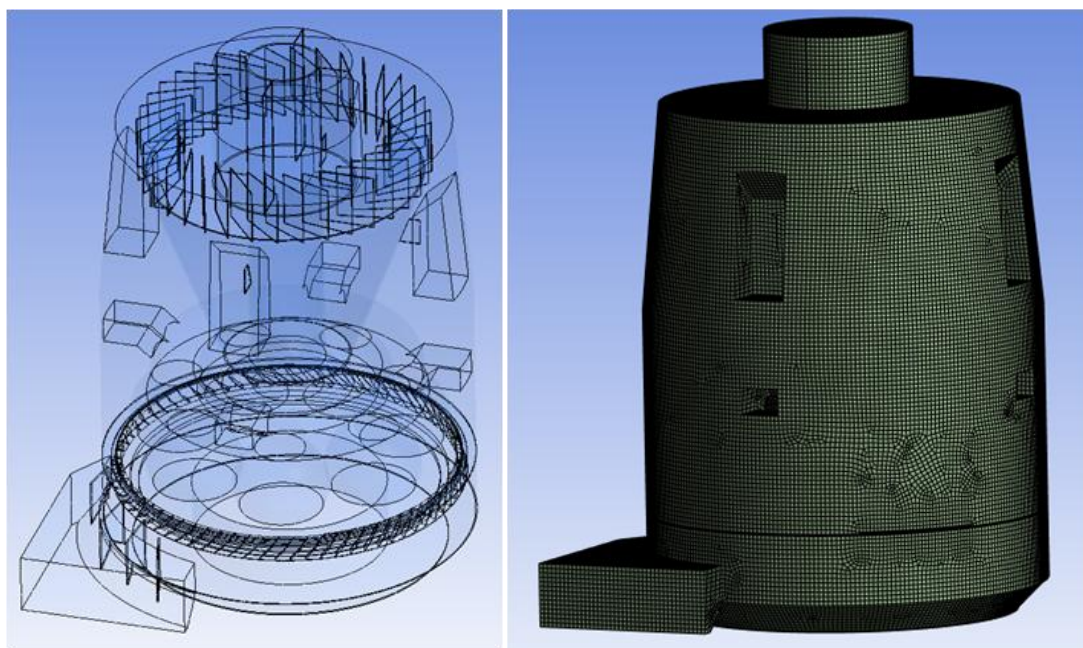
Parametr	Symbol	Jednostka	III	IV	V
Wentylacja młyna	$\dot{V}_1$	$\text{m}^3/\text{h}$	56000	56000	56000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,86	6,27	5,97
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	°C	274	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	6,7	6,1	5,8
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym	$p_{31}$	kPa	1,7	1,7	1,6
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym	$w_{31}$	m/s	55 – 60	42 – 54 (48)	84 – 105 (95)
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym	$t_{31}$	°C	107 – 187	67 – 144	182 – 248

Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	5,0	4,4	4,2
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia dyszowego	$\zeta_{pd}$	-	4,49	4,3	1,25
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	1,89	1,86	1,95
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	112,9	112,9	112,9
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	1,87	1,87	1,85
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	112	112	112
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,4	1,42	1,42
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	110	110	110
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,46	4,85	4,55

Omawiając tą część badań, można zauważyć, że zachowanie się pierścienia dyszowego w przypadku wariantów III, IV i V jest nieco inne niż w poprzednio omawianych wariantach. Miejscowe straty ciśnienia wynikające z przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej przez pierścień dyszowy dla wariantów III, IV i V są od 6% do 19% niższe w porównaniu z bazowym wariantem i stopniem otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego wynoszącego 50%. Natomiast całkowite straty ciśnienia statycznego przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej przez młyn również są niższe i wynoszą od 19 do 30% w stosunku do wariantu bazowego. Prędkości wylotowe z pierścienia dyszowego dla wariantów III i IV są około o 50% niższe w stosunku do wariantu bazowego. Najbardziej wyrównany profil ciśnień statycznych oraz prędkości wynikających z przepływu czynnika przez młyn otrzymano dla wariantu III i jest zbliżony do wariantu bazowego pomimo występujących blisko o połowę niższych prędkości wylotowych z pierścienia dyszowego. W przypadku wariantów IV i V (brak ruchu obrotowego pierścienia dyszowego) uzyskano równomierny profil przepływu strumienia zarówno dla ciśnienia statycznego jak i prędkości tylko w komorze młyna. Natomiast w odsiewaczu wspomniane profile były mniej korzystne w stosunku do wariantu bazowego. Co oznacza, że wpływ ruchu obrotowego pierścienia dyszowego na profile przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej w tym rozwiązaniu konstrukcyjnym był większy niż w przypadku omawiania poprzednich wariantów, w tym wariantu bazowego. Z kolei wpływ ruchu obrotowego pierścienia dyszowego na kierunek przepływu mieszanki na wylocie z pierścienia dyszowego jest niższy niż w poprzednich wariantach. W związku z powyższym można zauważyć, że wpływ ruchu obrotowego pierścienia dyszowego na profil przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej w tym jego kierunku są uzależnione od zastosowanej geometrii pierścienia dyszowego. Ponadto można również zauważyć, że wpływ prędkości wylotowej z pierścienia dyszowego na profil przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej jest również uzależniony od geometrii pierścienia dyszowego. W związku z tym można wywnioskować, że geometria pierścienia dyszowego jest decydującym czynnikiem wpływającym na profil

przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej w całym młynie, natomiast wpływ pozostałych wspomnianych w niniejszej analizie parametrów na wynik obliczeń *CFD* jest jej funkcją.

Następnym aspektem badań *CFD*, który powinien być przeanalizowany to wpływ zmiany geometrii wlotu powietrza do młyna na wynik obliczeń *CFD* mieszanki pyłowo – powietrznej przepływającej przez młyn. Na Rys. 4.63 po lewej przedstawiono model *CFD* młyna z jednym wlotem, natomiast po prawej przedstawiono siatkę modelu *CFD* przemysłowego młyna miażdżącego dla VI wariantu alternatywnego.



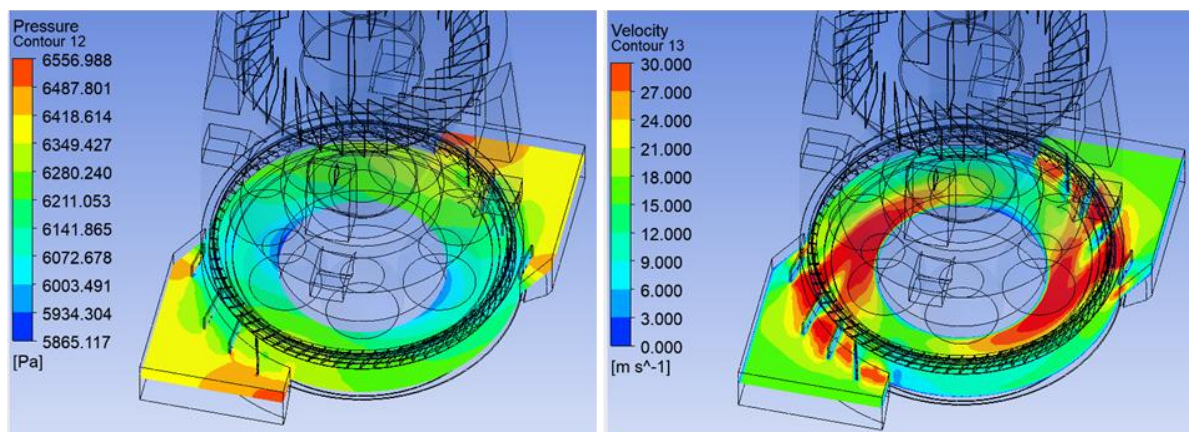
Rys. 4.63. Model *CFD* przemysłowego młyna miażdżącego z jednym wlotem powietrza (po lewej), siatka modelu *CFD* przemysłowego młyna miażdżącego (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne

W Tab. 4.41 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu alternatywnego VI.

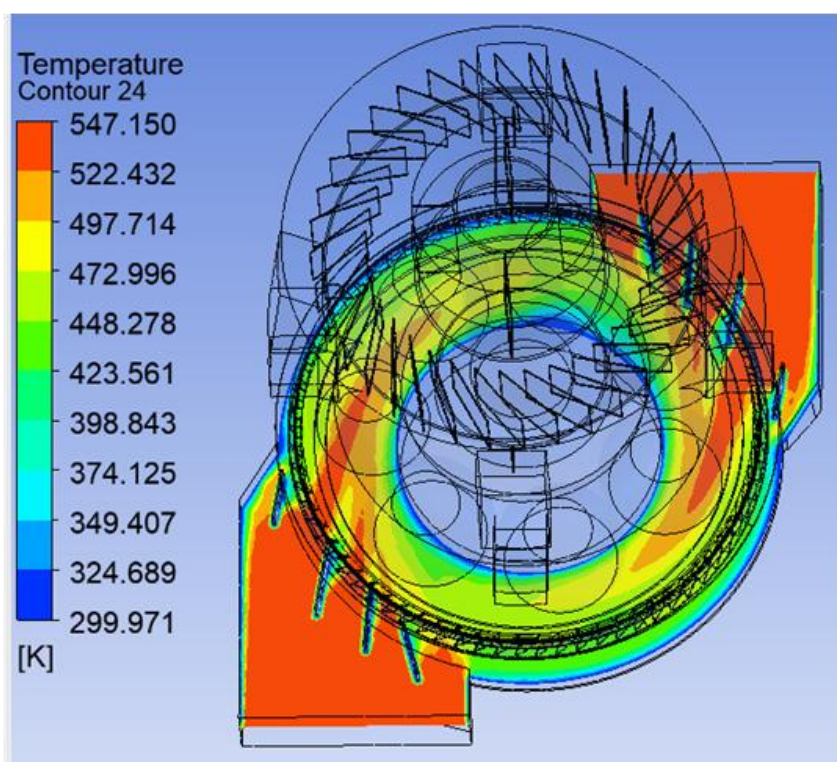
Tab. 4.41. Parametry siatki modelu numerycznego – wariant alternatywny VI

Liczba elementów siatki	1 381 862
Liczba węzłów siatki	1 101 764

Na Rys. 4.64 przedstawiono odpowiednio rozkład ciśnienia statycznego (po lewej) i profil prędkości przepływu (po prawej). Natomiast na Rys. 4.65 przedstawiono rozkład temperatury czynnika na wlocie do młyna dla wariantu bazowego, przy stopniu otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego, wynoszącego 95%.

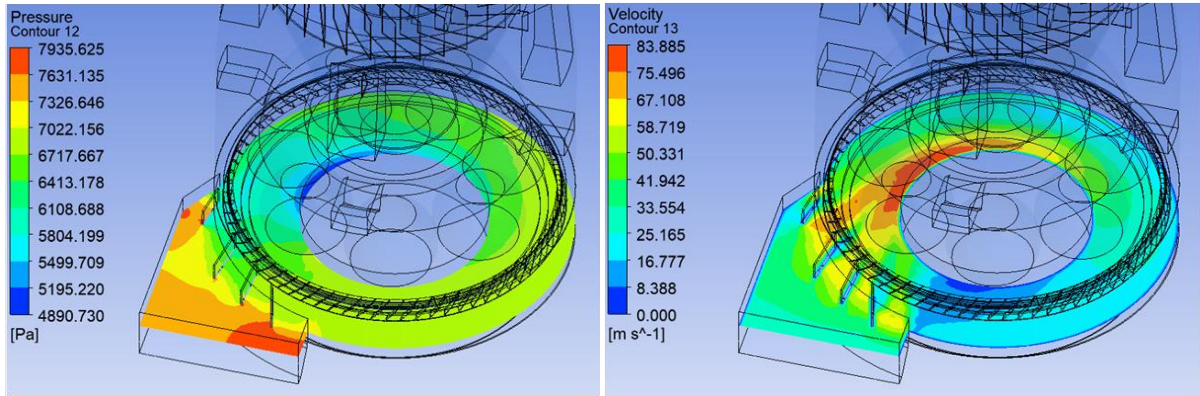


Rys. 4.64. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant bazowy

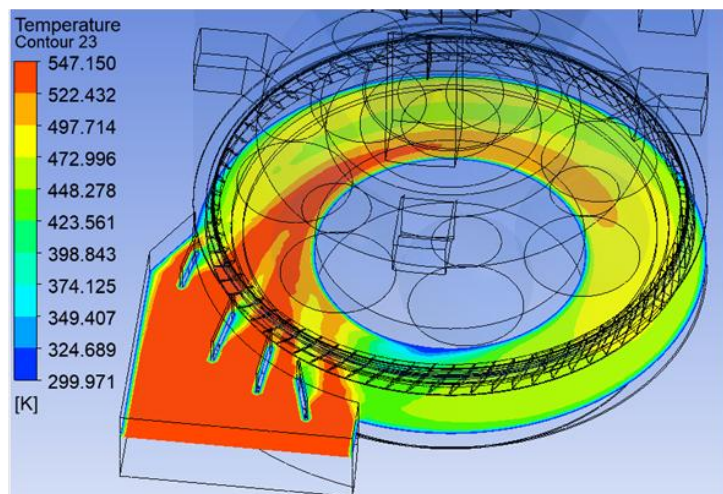


Rys. 4.65. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant bazowy

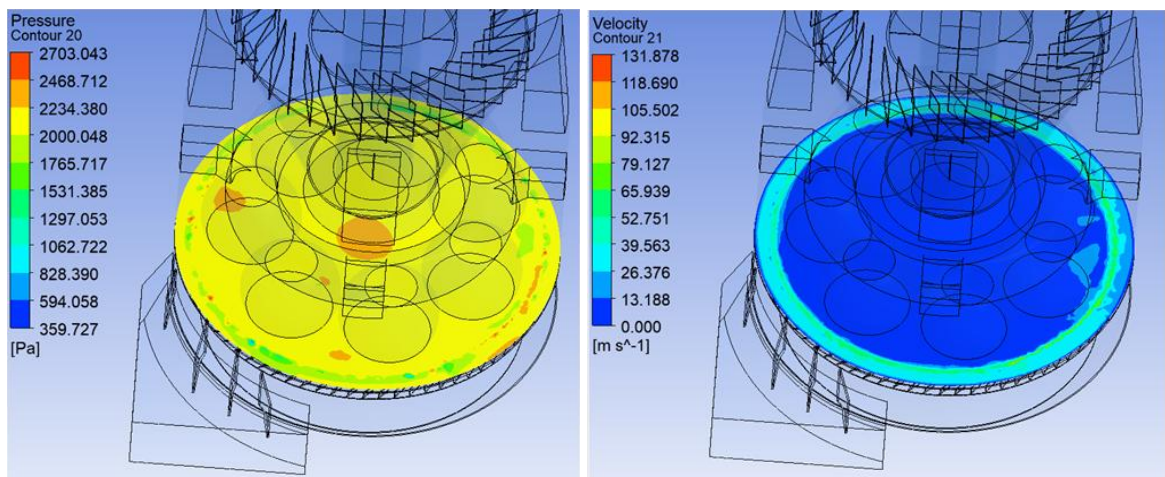
Z kolei na Rys. 4.66 przedstawiono odpowiednio rozkład ciśnienia statycznego (po lewej) i profil prędkości przepływu (po prawej). Natomiast na Rys. 4.67 przedstawiono rozkład temperatury czynnika na wlocie do młyna dla wariantu alternatywnego, przy stopniu otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego, wynoszącego 95% - wariant VI. Na pozostałych Rys. 4.68 do Rys. 4.74 ukazano ponadto parametry przepływu przez młyn dla aktualnie prezentowanego wariantu.



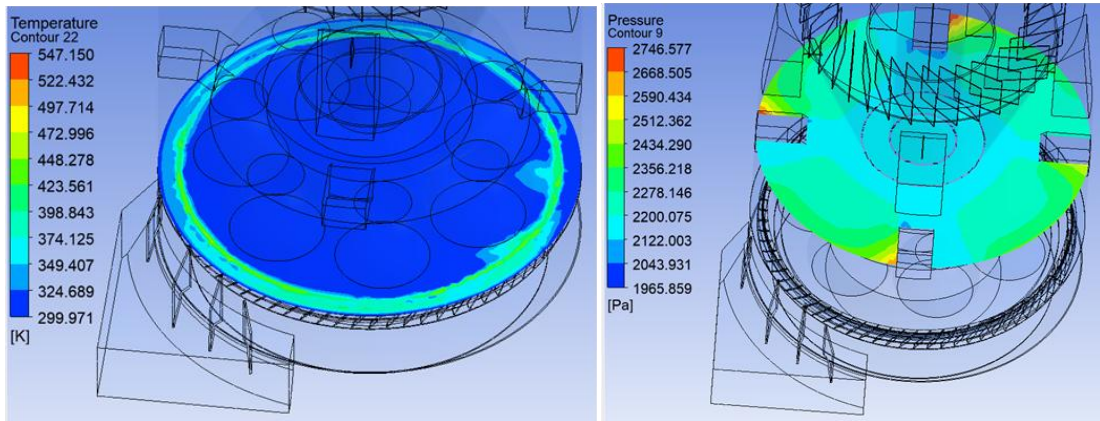
Rys. 4.66. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne



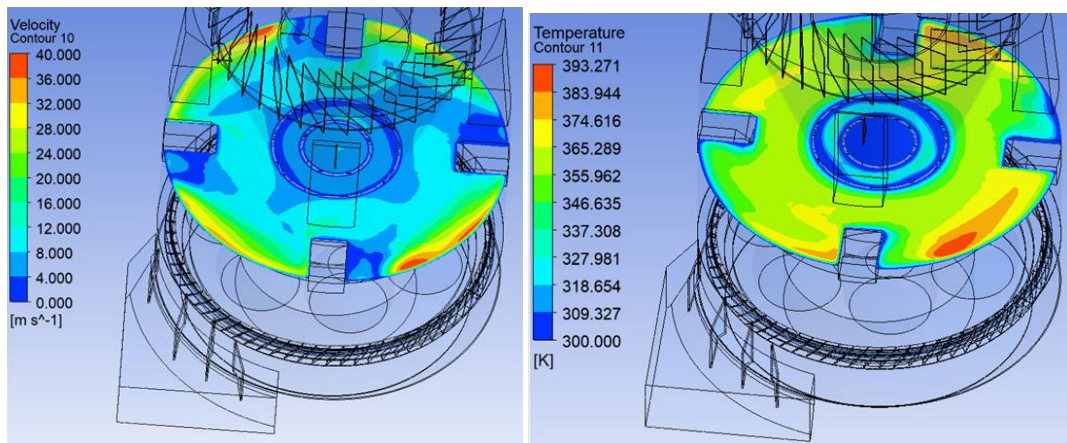
Rys. 4.67. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne



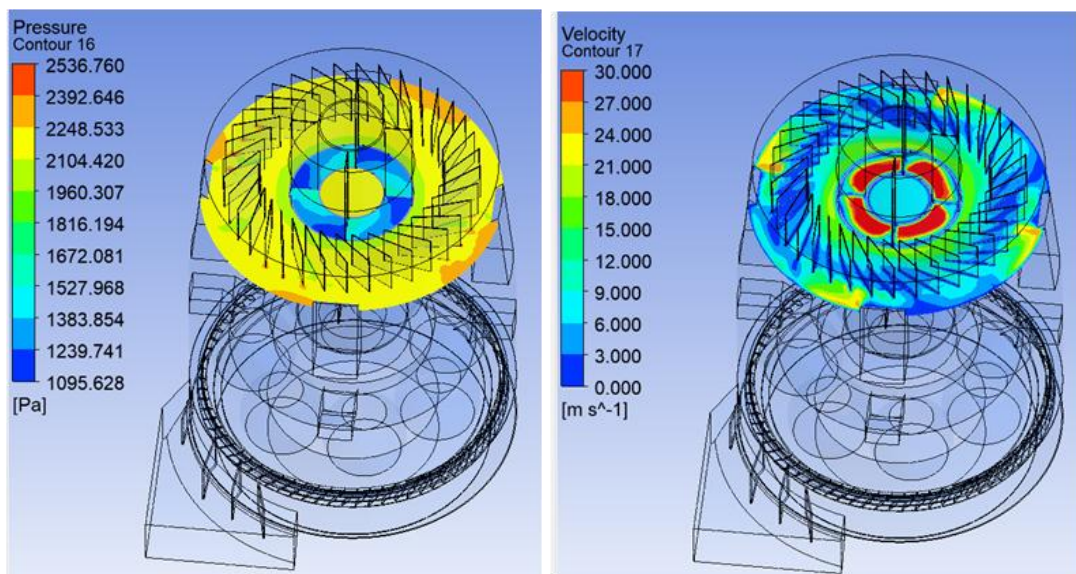
Rys. 4.68. Ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne



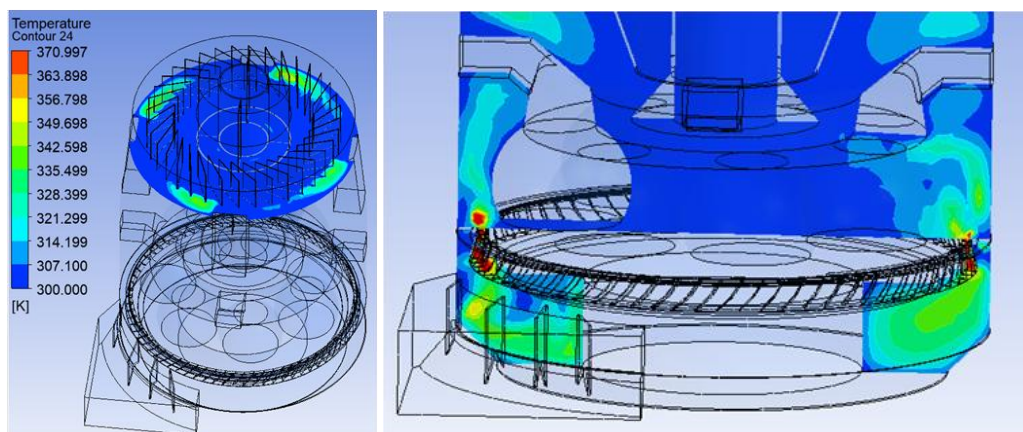
Rys. 4.69. Rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne



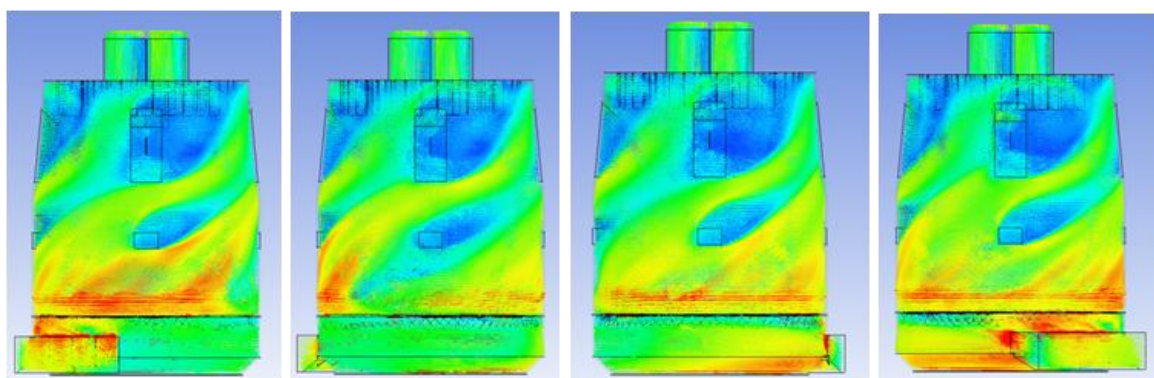
Rys. 4.70. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne



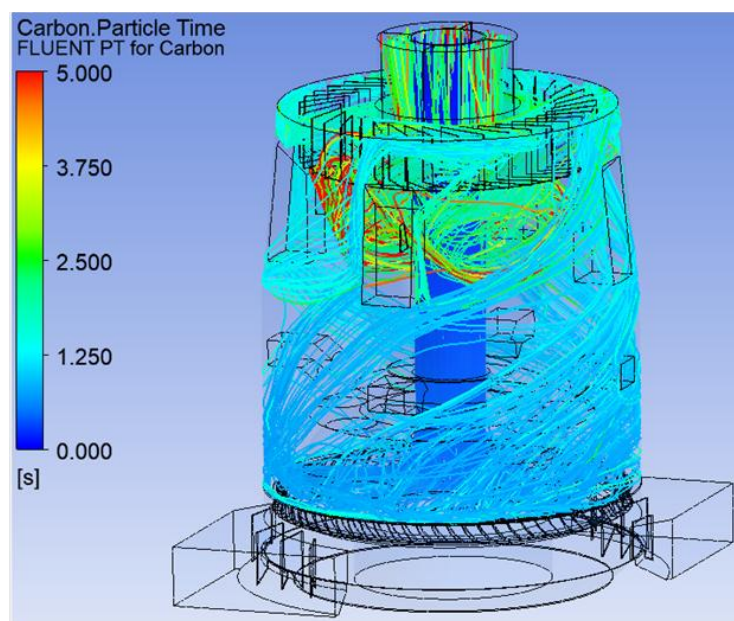
Rys. 4.71. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne



Rys. 4.72. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), kierunku przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne



Rys. 4.73. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne



Rys. 4.74. Ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne

Analizując wyniki obliczeń *CFD* przedstawione na Rys. 4.64 do Rys. 4.74 można zauważyć że profil przepływu strumienia mieszanki przez poszczególne elementy młyna jest zbliżony do tego, prezentowanego w wariantcie bazowym dla stopnia otwarcia przekroju

wylotowego pierścienia dyszowego wynoszącego 95% lecz charakteryzuje się wyższymi prędkościami i najwyższymi stratami przepływu spośród prezentowanych do tej pory wariantów. Ponadto w przypadku prezentowanego wariantu rozkład ciśnienia statycznego i prędkości w komorze powietrza (Rys. 4.64, Rys. 4.66 oraz od Rys. 4.68 do Rys. 4.70) jest dużo mniej korzystny w stosunku do wariantu bazowego. Dlatego zastosowanie dwóch wlotów powietrza umiejscowionych stycznie do obwodu komory powietrza jest uzasadnione, co znajduje potwierdzenie w przedstawionych powyżej wynikach obliczeń *CFD*. Zbyt wysokie prędkości przepływu strumienia czynnika powodują w przypadku wariantu VI podwyższenie strat przepływu na wlocie do młyna i przez badany pierścień dyszowy (Rys. 4.72 po prawej). Co przekłada się na wyższe straty przepływu przez młyn, nie otrzymując poprawy parametrów przepływu w porównaniu do wariantu bazowego. Dlatego projektując młyn należy starannie podejść do projektu wlotu powietrza do młyna, ponieważ ten czynnik może mieć znaczny wpływ na wielkość całkowitych strat przepływu przez młyn.

W Tab. 4.42 zestawiono parametry charakteryzujące przepływ czynnika przez każdy element młyna w poszczególnych punktach pomiarowych, wynikających z analizy *CFD* dla wariantu VI.

Tab. 4.42. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania *CFD* — stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego 95% – wariant VI

Parametr	Symbol	Jednostka	Wariant VI
Wentylacja młyna	$\dot{V}_1$	$\text{m}^3/\text{h}$	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	7,6
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	°C	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	6,3 – 7,0 (6,6)
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$p_{31}$	kPa	2,5
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$w_{31}$	m/s	50 – 80 (65)
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$t_{31}$	°C	102 – 226
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	4,1
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia dyszowego	$\zeta_{pd}$	-	3,0
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,4
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,2
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,4
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	6,2

W kolejnych trzech wariantach zostanie przedstawiony wpływ wstawienia blachy przegrodowej umiejscowionej w komorze powietrza w osi głównej młyna. Modyfikacji ulegnie prezentowany w niniejszej pracy wariant bazowy charakteryzujący się stopniem otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego na poziomie 95%.

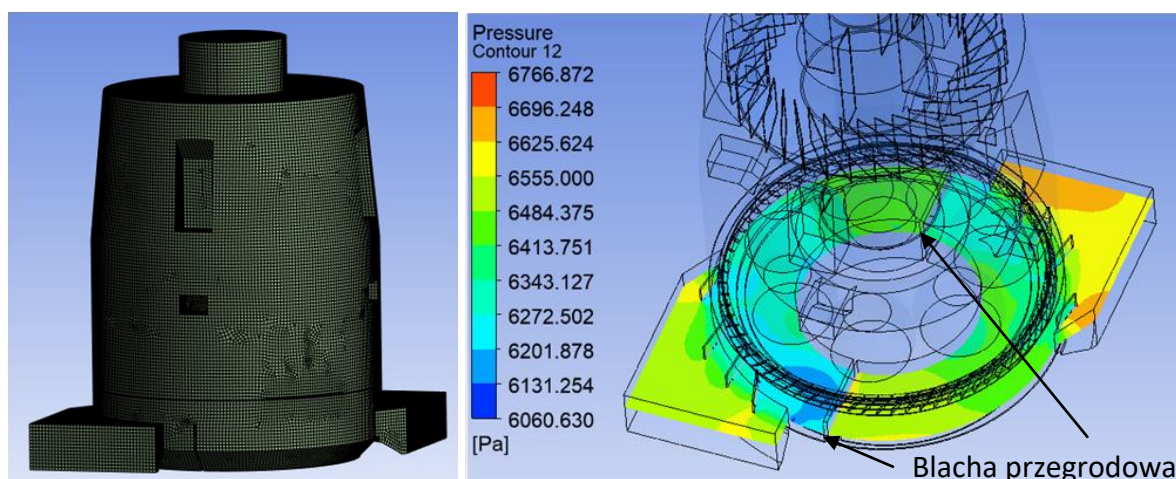
Na Rys. 4.75 do Rys. 4.100 przedstawiono wyniki obliczeń *CFD* dla trzech ostatnich wariantów: wariant VII – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – ustawienie łopatek I (Rys. 4.75 do Rys. 4.83); wariant VIII – nieruchomy pierścień dyszowy, łopatki położone identycznie jak w poprzednim wariantcie (Rys. 4.84 do Rys. 4.92) oraz wariant IX – nieruchomy pierścień dyszowy – ustawienie łopatek II (Rys. 4.93 do Rys. 4.100).

W Tab. 4.43 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu alternatywnego VII.

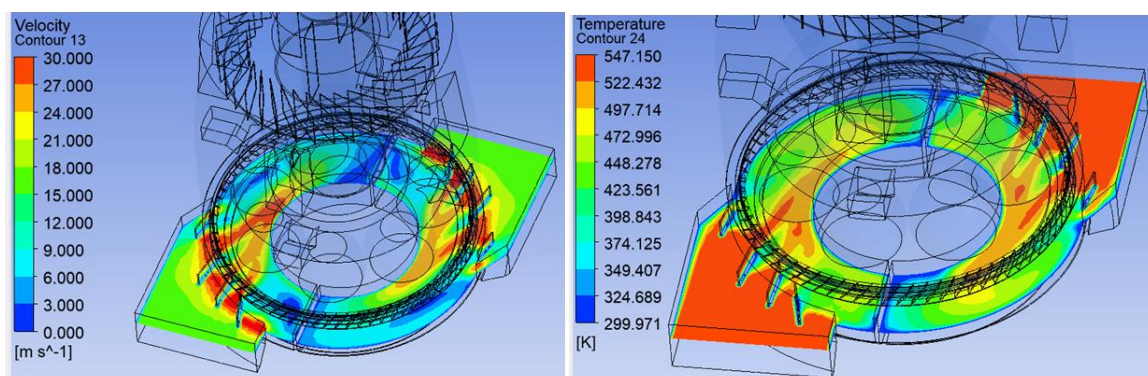
Tab. 4.43. Parametry siatki modelu numerycznego – wariant alternatywny VII

Liczba elementów siatki	1 648 994
Liczba węzłów siatki	1 324 764

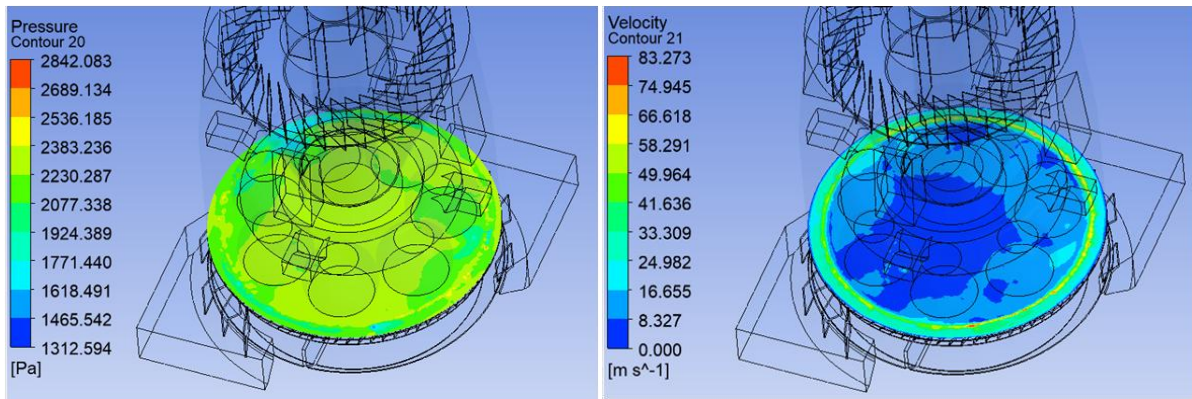
Na Rys. 4.75 po lewej przedstawiono siatkę modelu *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego, natomiast po prawej rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu powietrza do młyna – VII wariant alternatywny.



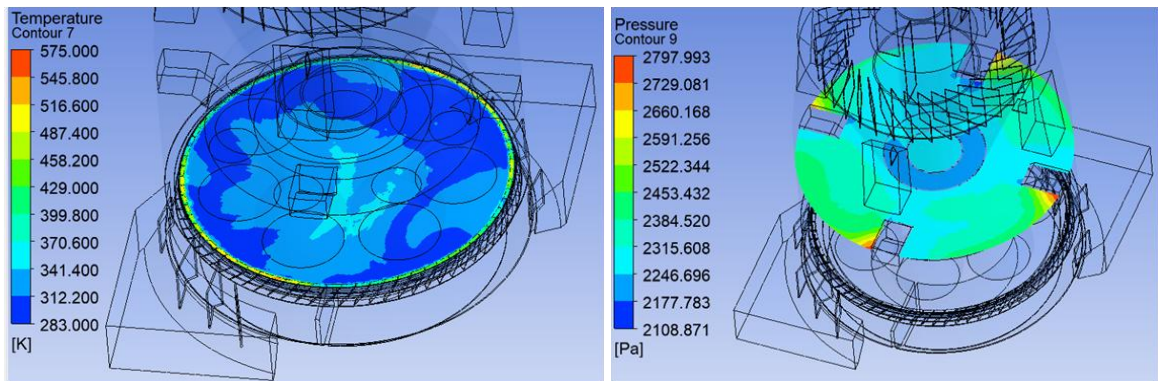
Rys. 4.75. Siatka modelu *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne



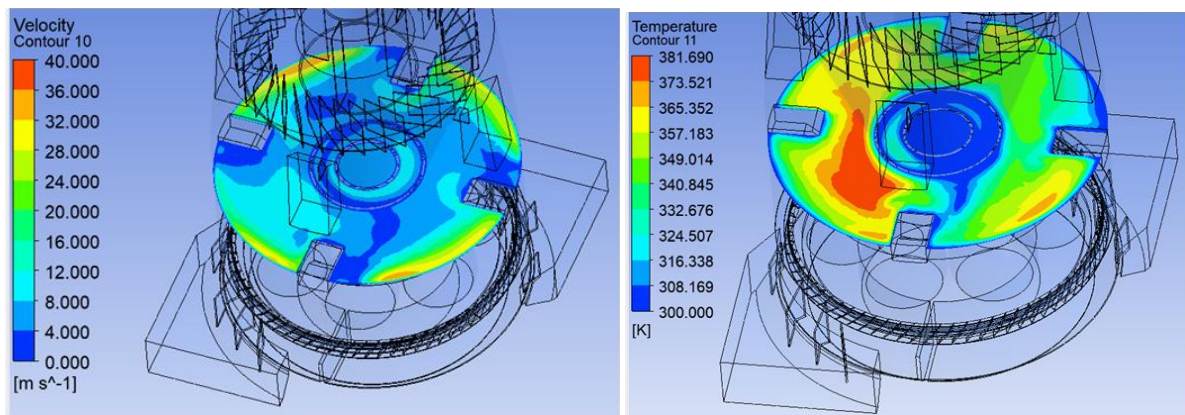
Rys. 4.76. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne



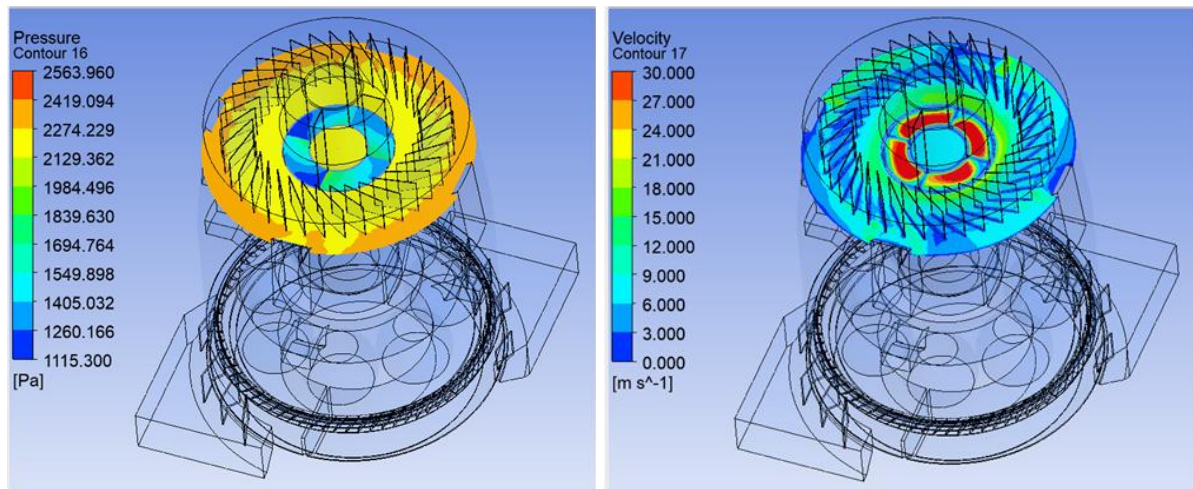
Rys. 4.77. Ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne



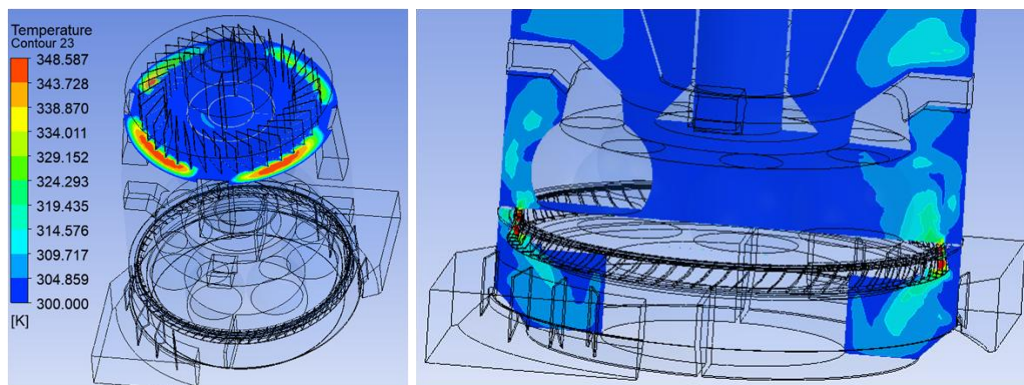
Rys. 4.78. Rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne



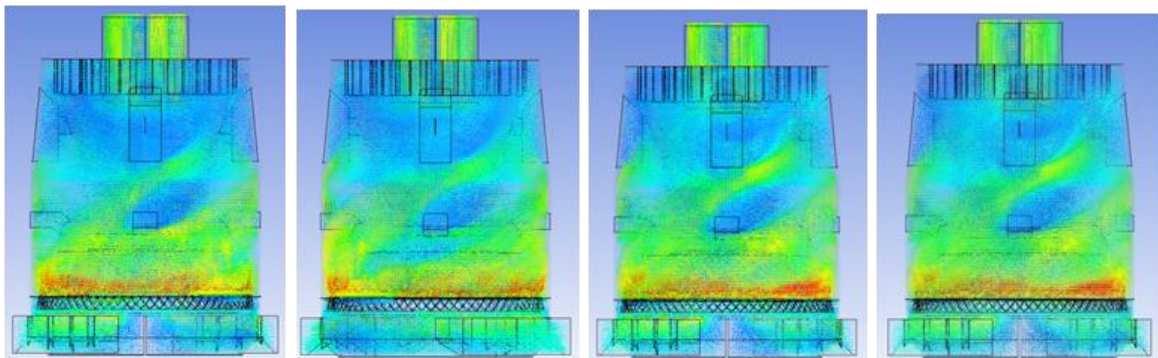
Rys. 4.79. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne



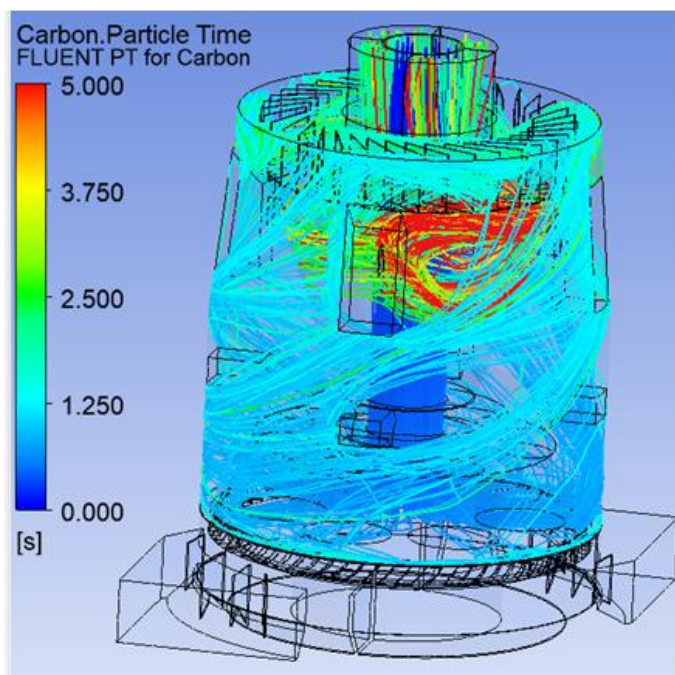
Rys. 4.80. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne



Rys. 4.81. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne



Rys. 4.82. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne



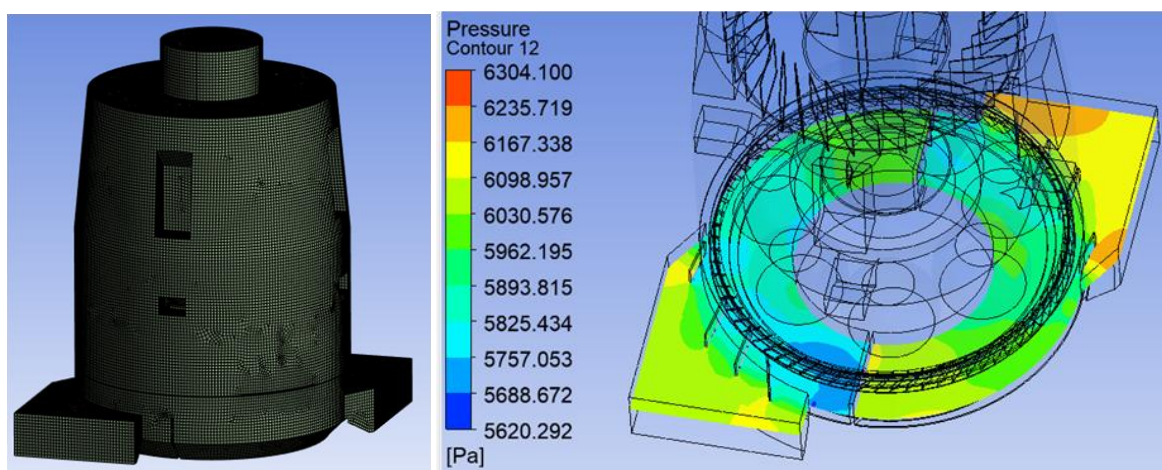
Rys. 4.83. Ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne

W Tab. 4.44 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu alternatywnego VIII.

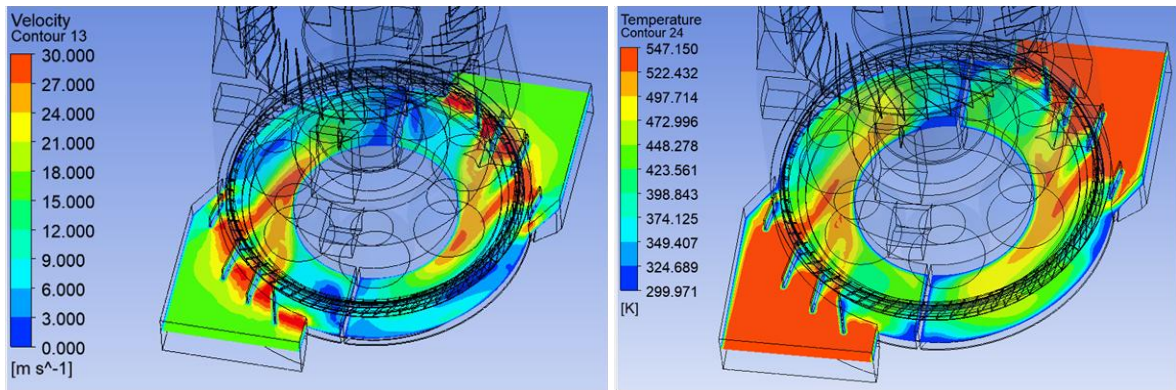
Tab. 4.44. Parametry siatki modelu numerycznego – wariant alternatywny VIII

Liczba elementów siatki	1 648 994
Liczba węzłów siatki	1 324 764

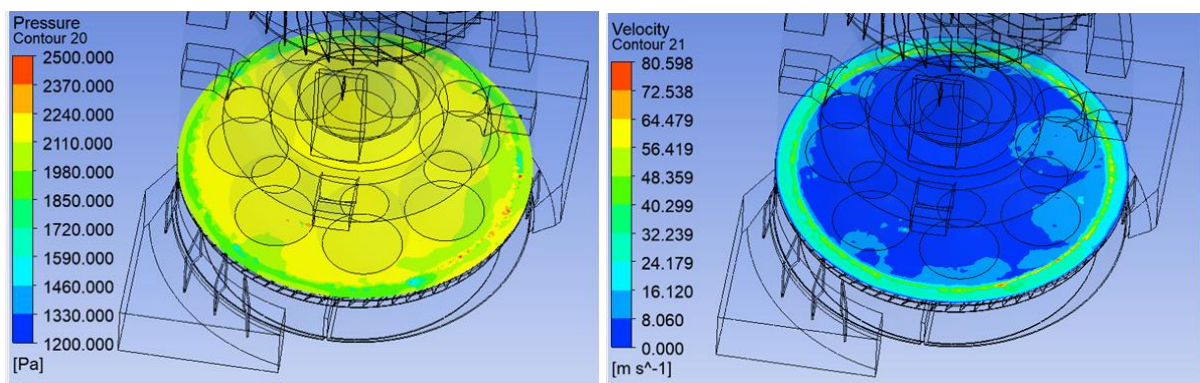
Na Rys. 4.84 po lewej przedstawiono siatkę modelu *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego, natomiast po prawej rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu powietrza do młyna – VIII wariant alternatywny.



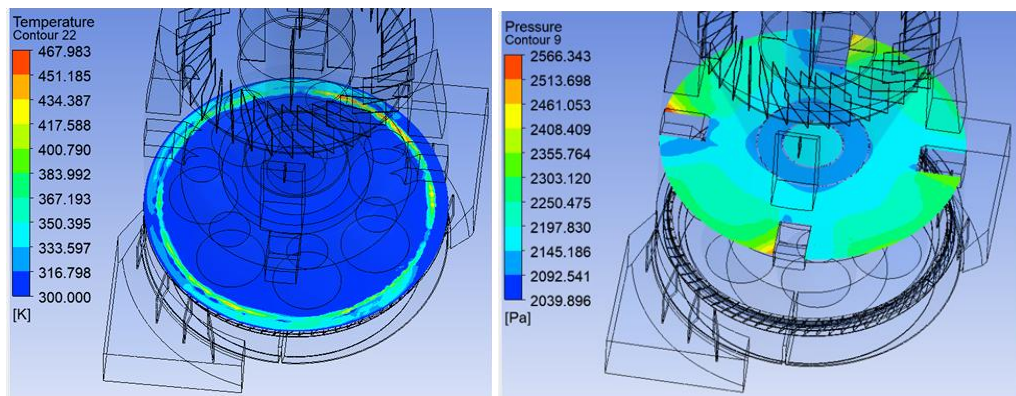
Rys. 4.84. Siatka modelu *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne



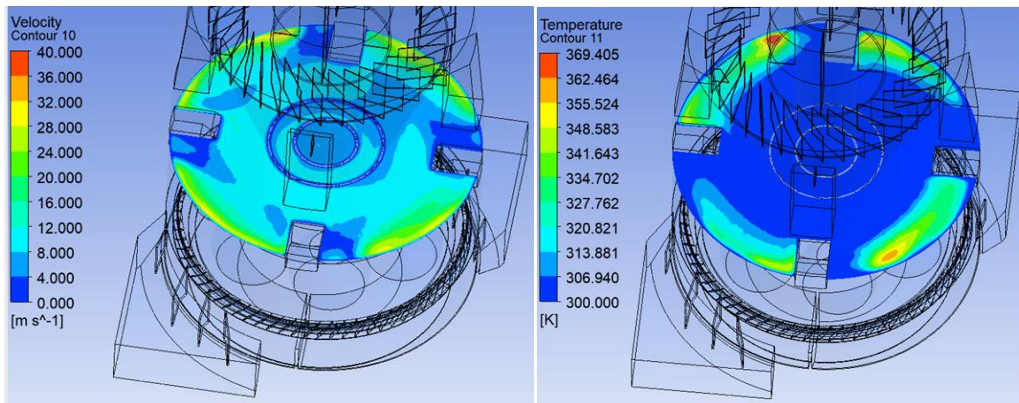
Rys. 4.85. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne



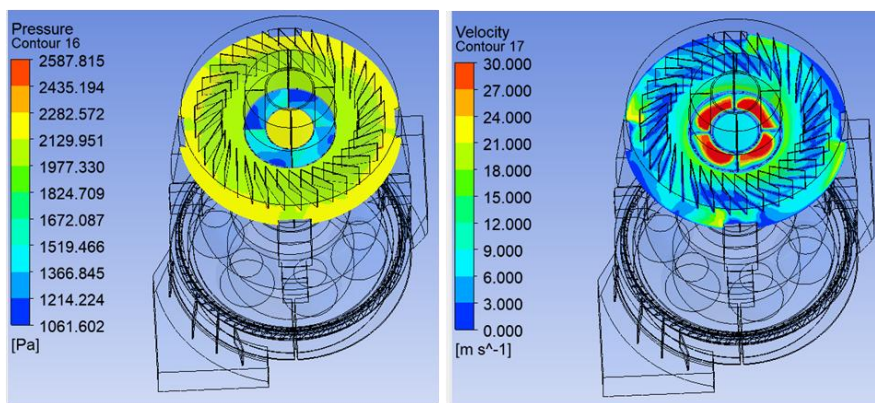
Rys. 4.86. Ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład prędkości czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne



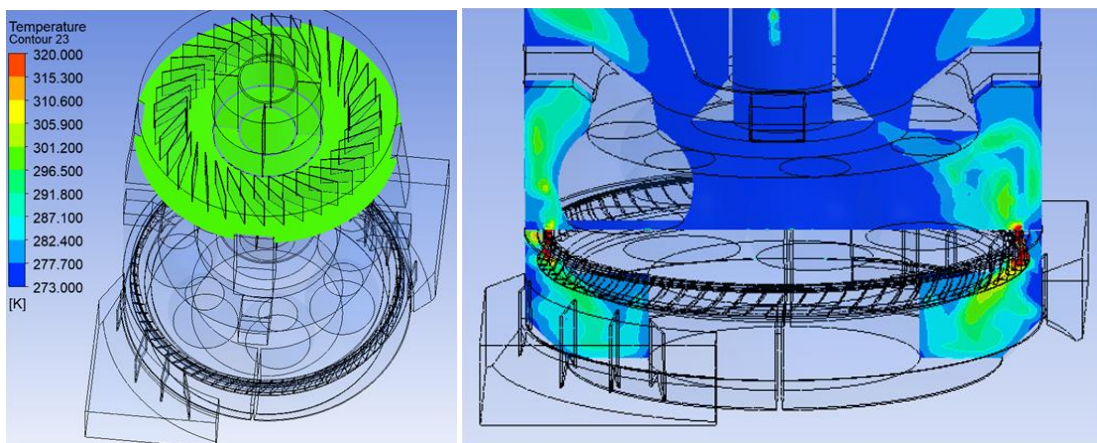
Rys. 4.87. Rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne



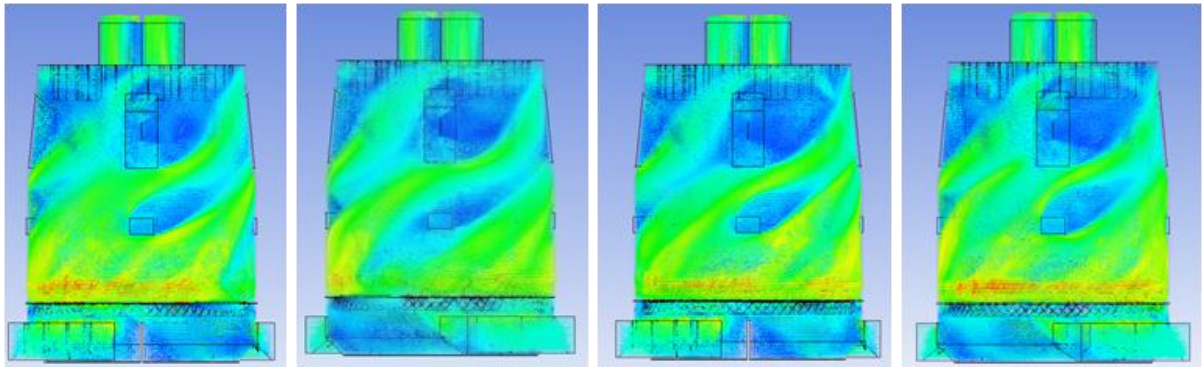
Rys. 4.88. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne



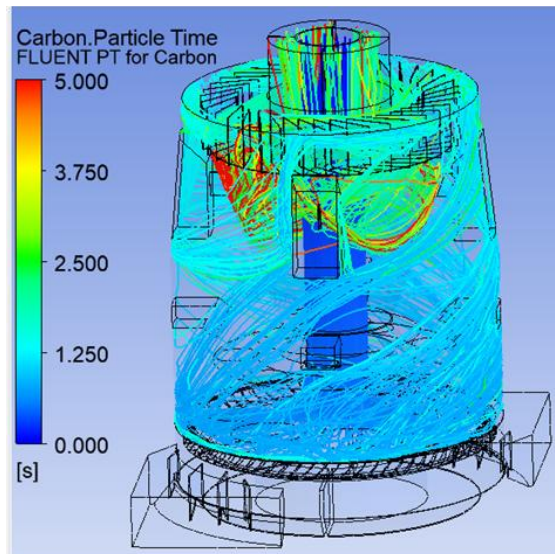
Rys. 4.89. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne



Rys. 4.90. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne



Rys. 4.91. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne



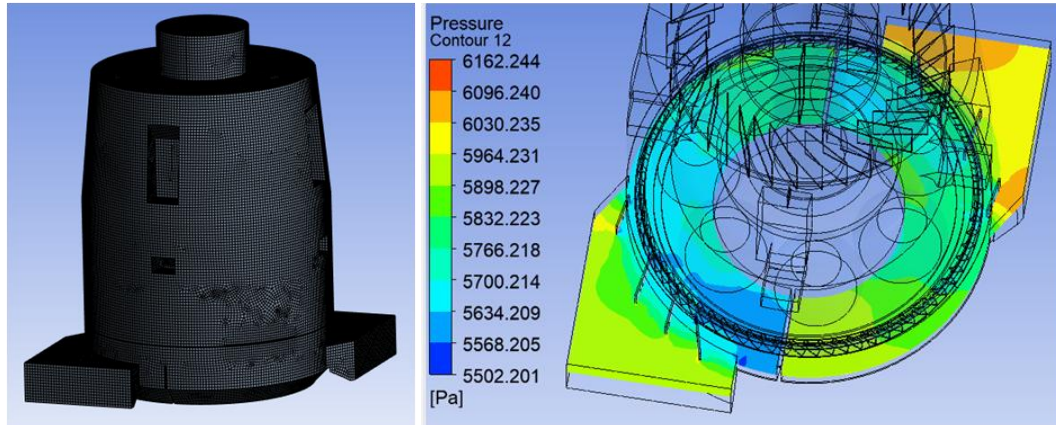
Rys. 4.92. Ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne

W Tab. 4.45 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu alternatywnego IX.

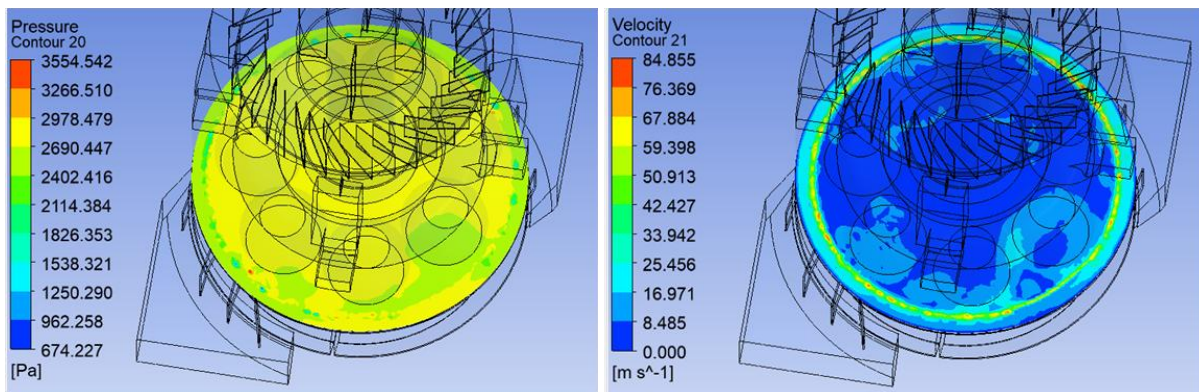
Tab. 4.45. Parametry siatki modelu numerycznego – wariant alternatywny IX

Liczba elementów siatki	886 794
Liczba węzłów siatki	733 572

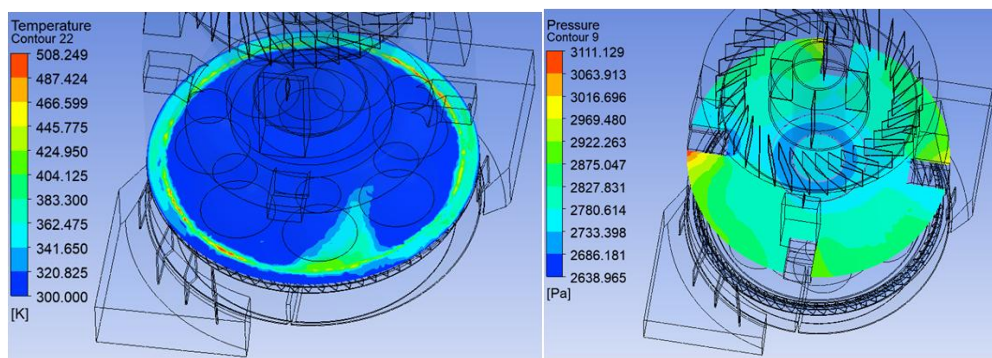
Na Rys. 4.93 po lewej przedstawiono siatkę modelu *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego, natomiast po prawej, rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu powietrza do młyna – IX wariant alternatywny.



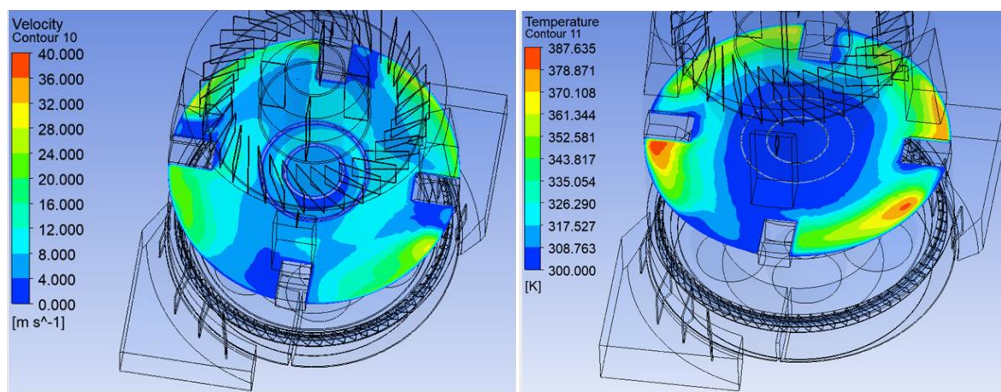
Rys. 4.93. Siatka modelu CFD przemysłowego młyna miążdżącego( po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne



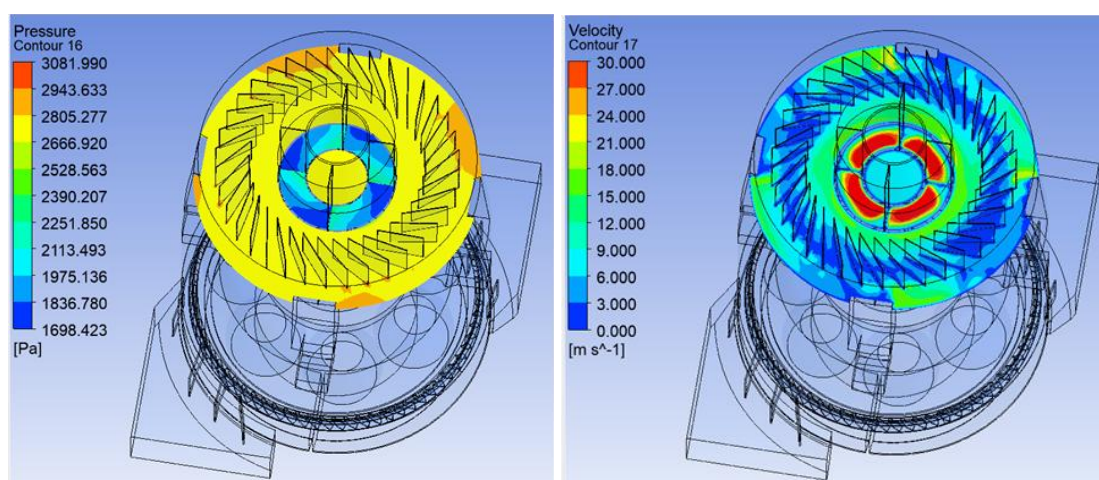
Rys. 4.94. Ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne



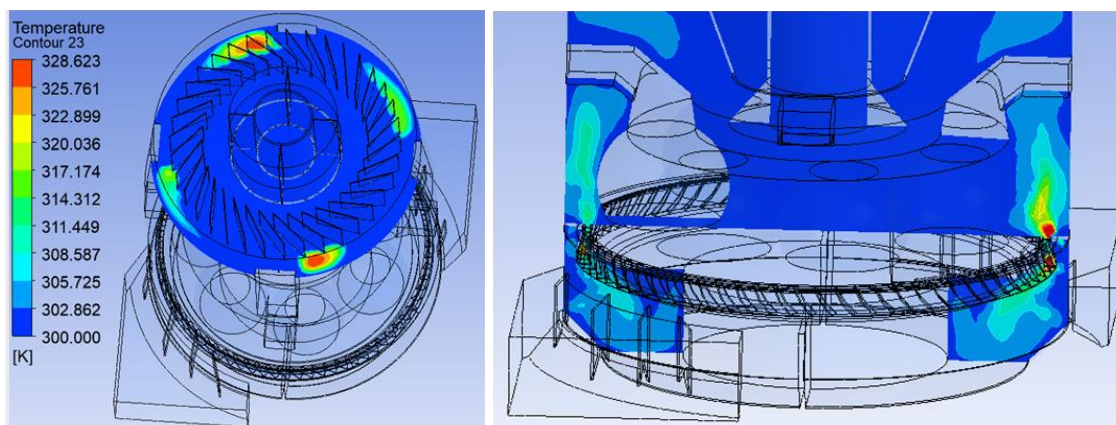
Rys. 4.95. Rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne



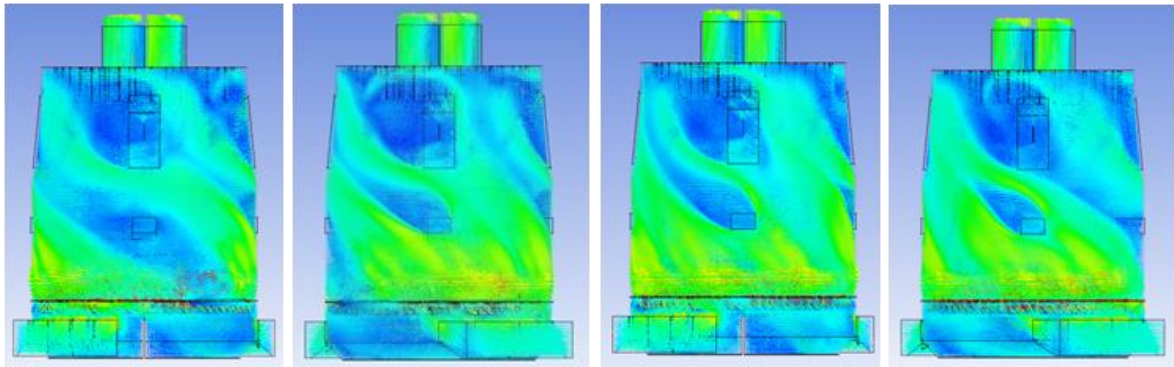
Rys. 4.96. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dysowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne



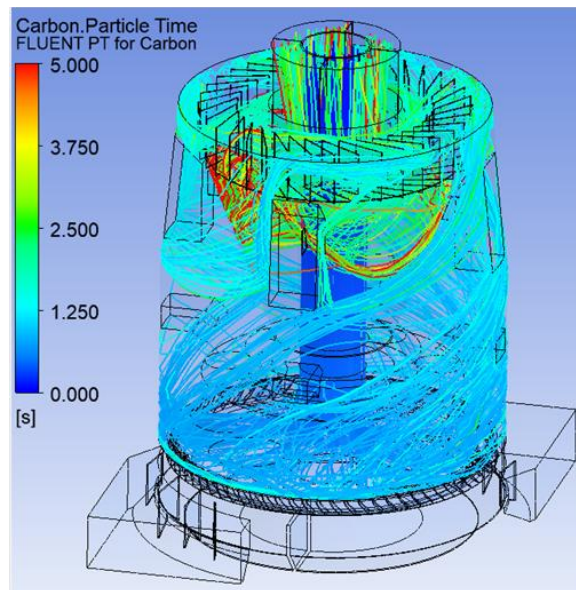
Rys. 4.97. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dysowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne



Rys. 4.98. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dysowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne



Rys. 4.99. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne



Rys. 4.100. Ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne

W Tab. 4.46 zestawiono parametry charakteryzujące przepływ czynnika przez każdy element młyna w poszczególnych punktach pomiarowych, wynikających z analizy CFD dla wariantów VII, VIII oraz IX.

W Tab. 4.46 Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania CFD – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - warianty: VII, VIII i IX

Parametr	Symbol	Jednostka	VII	VIII	IX
Wentylacja młyna	$\dot{V}_1$	$\text{m}^3/\text{h}$	55000	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,6	6,2	6,0
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	$^{\circ}\text{C}$	274	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	6,5	6,0	5,8
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$p_{31}$	kPa	2,5	2,0	3,0
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$w_{31}$	m/s	50 – 80 (60)	48 – 65 (57)	50 – 70 (60)
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$t_{31}$	$^{\circ}\text{C}$	150 – 200	127– 194	110– 235

Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	4,0	4,0	3,0
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia dyszowego	$\zeta_{pd}$	-	3,4	3,4	2,6
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,4	2,3	2,9
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	102	102	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,3	2,2	2,7
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	102	102	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,42	1,42	2,0
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,2	4,8	4,0

Porównując ze sobą otrzymane wyniki obliczeń *CFD* dla wariantów alternatywnych od VI do IX z wariantem bazowym można dojść do wniosku, że wariant bazowy jest optymalnym wariantem projektu kanału wlotowego do młyna. Dlatego można przyjąć, że w tym kontekście wpływ konstrukcji wlotu do młyna na wyniki analizy przepływowej *CFD* mieszanki pyłowo – powietrznej przedstawianych w większości badanych wariantów będzie niewielki i można go pominąć w dalszych etapach analizy. Analizując wyniki ukazane na Rys. 4.75 do Rys. 4.100 można zauważyć, że prezentowane profile przepływu są analogiczne jak dla wariantu bazowego. Niemniej jednak blacha przegrodowa umieszczona w komorze powietrza nie spełnia swojego zadania i utrudnia wyrównanie profilu przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej na obwodzie młyna, przez co otrzymano niższe prędkości przepływu na obwodzie komory powietrza w stosunku do poprzednio prezentowanych wariantów. Ponadto za wyjątkiem dla wariantów od VI do VIII opory przepływu przez pierścień dyszowy są wyższe w stosunku do wariantu IX i wariantu bazowego. Natomiast prędkości wylotowe strumienia gorącego powietrza z pierścienia dyszowego dla wariantów od VI do IX oraz dla wariantu bazowego są na porównywalnym poziomie, lecz wariant bazowy charakteryzuje się najlepszym profilem przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej przez młyn spośród wymienionych powyżej wariantów.

Reasumując, w wyniku przeprowadzonych badań wykazano w jakich warunkach jest możliwe otrzymanie równomiernego profilu prędkości przepływu strumienia przez poszczególne elementy młyna. Ponadto otrzymano rozkład ciśnień statycznych panujących w poszczególnych elementach młyna podczas przepływu czynnika. Określono opory przepływu poszczególnych elementów młyna, w tym standardowego pierścienia dyszowego zainstalowanego w przemysłowym młynie miazdzącym. Określono również wpływ wybranych parametrów na wynik funkcji celu, co pozwoliło lepiej poznać i zrozumieć mechanizm działania rozwiązania konstrukcyjnego pierścienia dyszowego badanego w ramach niniejszego projektu doktorskiego. W związku z powyższym osiągnięto wszystkie założenia tej części badań oraz potwierdzono, że obecne rozwiązanie konstrukcyjne pierścienia dyszowego spełnia dotychczasowe wytyczne projektowe pierścieni dyszowych w FPM S.A.

## 5. Wyniki badań zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego oraz ich dyskusja

### 5.1 Wyniki badań laboratoryjnych pierścienia dyszowego

Po przeprowadzeniu badań związanych z pierścieniem dyszowym charakteryzującym się bazową geometrią, przeprowadzono badania laboratoryjne pięciu modeli pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią.

Na Rys. 5.1 przedstawiono model 2.1 zmienionej geometrii pierścienia dyszowego badanego na stanowisku laboratoryjnym.



Rys. 5.1 Pierścień dyszowy – stanowisko laboratoryjne – zmodyfikowana geometria – model 2.1

Opisując badany model, zastosowano łopatki płaskie położone pod kątem wyższym jak w modelu bazowym, zorientowane są tak samo w stosunku do modelu bazowego i położone są pod identycznym kątem w stosunku do kierunku promieniowego do środka młyna jak w modelu bazowym.

W Tab. 5.1 ukazano warunki w jakich wykonano pomiary laboratoryjne pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.1). Badany pierścień dyszowy wykonywał ruch obrotowy.

Tab. 5.1 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.1

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość
Stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego	-	%	95
Stopień otwarcia przepustnicy na wylocie	-	%	100
Ciśnienie atmosferyczne	$p_{ot}$	Pa	98 392
Temperatura otoczenia	$t_{ot}$	°C	26,0
Temperatura powietrza przepływającego przez młyn	$t_1$	°C	37,0 – 38,0
Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	$n_{pd}$	obr/min	96
Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji	$\dot{V}_{wlot}$	m <sup>3</sup> /h	200

W Tab. 5.2 zestawiono straty ciśnienia pomiędzy punktem 2 a 3 instalacji badawczej podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią – model 2.1.

Tab. 5.2 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.1

Seria pomiarowa	Wentylacja zmierzona $\dot{V}_{pom}, m_n^3/h$	Strata ciśnienia zmierzona $\Delta p_{2-3pom}, Pa$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\_obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\_obl}, Pa$
I	195± 1	273± 88	57 327	4169± 102
II	195± 1	338± 102	57 327	4153± 99
III	195± 1	273 ± 88	57 327	4156± 101
Średnia	195± 1	273 ± 88	57 327	4159 ± 101

W Tab. 5.3 zestawiono zmierzone prędkości przepływu powietrza w pkt. 3 instalacji badawczej (komora młyna) podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.1) oraz obliczone, odpowiadające im prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej.

Tab. 5.3 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.1

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Prędkość zmierzona $w_{3\_pom}, m/s$	Prędkość zmierzona średnia $w_{3\_pom\_sr}, m/s$	Obliczona prędkość $w_{3\_przem\_obl}, m/s$	Obliczona prędkość średnia $w_{3\_przem\_obl\_sr}, m/s$
1	I	2,71± 0,15	2,88± 0,16	7,30± 0,33	7,48± 0,33
	II	3,10± 0,17		7,49 ± 0,33	
	III	2,85 ± 0,15		7,66 ± 0,33	
2	I	2,85± 0,15	3,05± 0,16	7,68 ± 0,33	7,89± 0,33
	II	3,37± 0,17		8,13 ± 0,33	
	III	2,92 ± 0,15		7,86 ± 0,33	
3	I	2,21± 0,15	2,42± 0,15	5,97 ± 0,33	6,28± 0,33
	II	2,64± 0,16		6,37 ± 0,33	
	III	2,41 ± 0,15		6,49 ± 0,33	

4	I	2,81± 0,15	2,89± 0,16	7,56 ± 0,33	7,49± 0,33
	II	3,05± 0,17		7,36 ± 0,33	
	III	2,81 ± 0,15		7,56 ± 0,33	
5	I	2,95± 0,15	2,92± 0,16	7,95 ± 0,33	7,57± 0,33
	II	3,08 ± 0,17		7,45 ± 0,33	
	III	2,72 ± 0,15		7,31 ± 0,33	

W Tab. 5.4 ukazano warunki w jakich wykonano pomiary laboratoryjne pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.1). Badany pierścień dyszowy nie wykonywał ruchu obrotowego.

Tab. 5.4 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego – model 2.1

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość
Stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego	-	%	95
Stopień otwarcia przepustnicy na wylocie	-	%	100
Ciśnienie atmosferyczne	$p_{ot}$	Pa	98 392
Temperatura otoczenia	$t_{ot}$	°C	27,8
Temperatura powietrza przepływającego przez młyn	$t_1$	°C	38,1 – 38,5
Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	$n_{pd}$	obr/min	0
Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji	$\dot{V}_{wlot}$	m <sup>3</sup> /h	200

W Tab. 5.5 zestawiono straty ciśnienia pomiędzy punktem 2 a 3 instalacji badawczej podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią – model 2.1.

Tab. 5.5 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego – model 2.1

Seria pomiarowa	Wentylacja zmierzona $\dot{V}_{pom}, m_n^3/h$	Strata ciśnienia zmierzona $\Delta p_{2-3pom}, Pa$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\ obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\ obl}, Pa$
I	195 ± 1	341± 103	57 327	4176± 100
II	195 ± 1	283± 90	57 327	4181± 100
III	195 ± 1	298± 93	57 327	4232± 99
Średnia	195 ± 1	312± 95	57 327	4196± 100

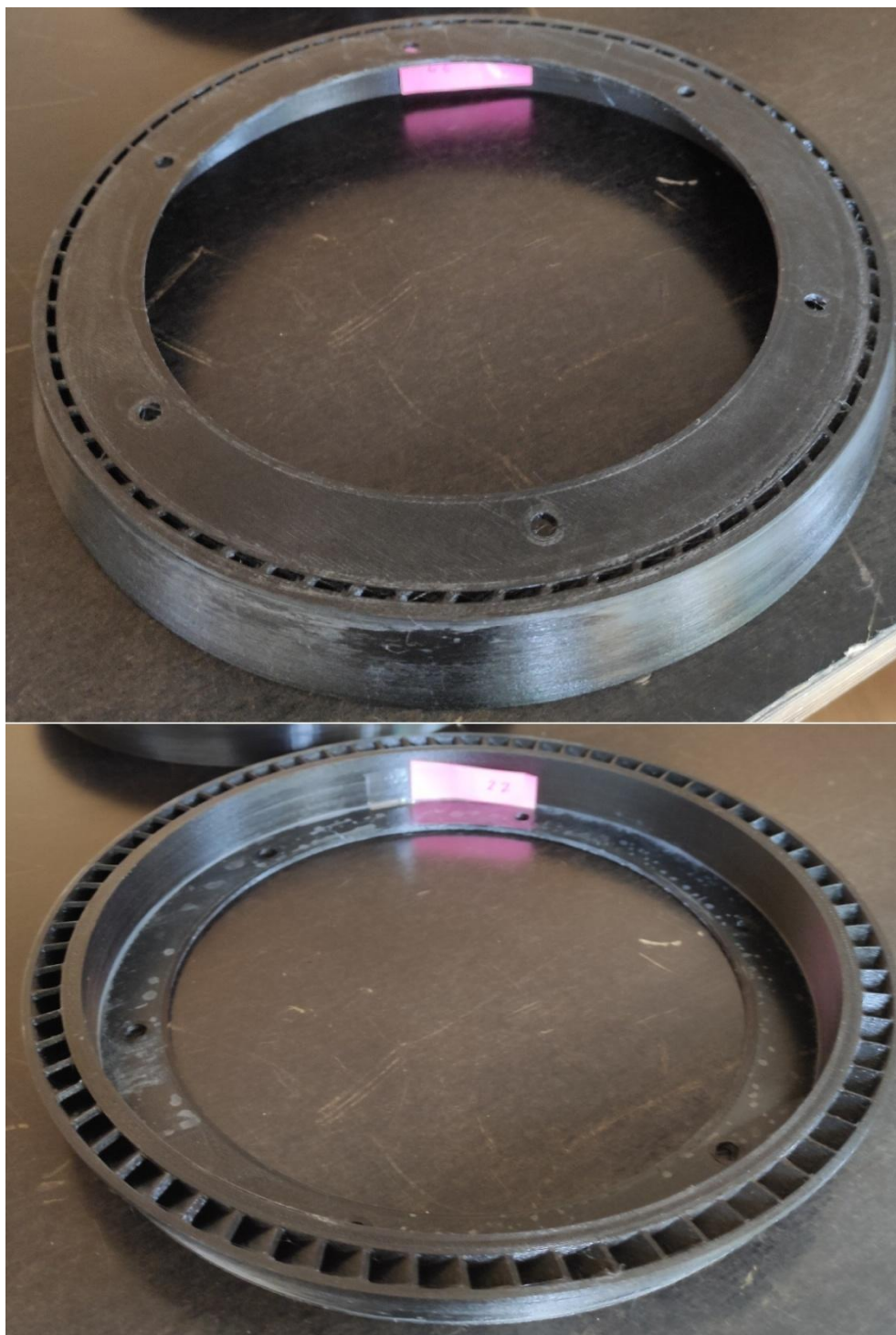
W Tab. 5.6 zestawiono zmierzone prędkości przepływu powietrza w pkt. 3 instalacji badawczej (komora młyna) podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.1) oraz obliczone, odpowiadające im prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej.

Tab. 5.6 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.1

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Prędkość zmierzona $w_{3\_pom}$ , m/s	Prędkość zmierzona średnia $w_{3\_pom\_sr}$ , m/s	Obliczona prędkość $w_{3\_przem\_obl}$ , m/s	Obliczona prędkość średnia $w_{3\_przem\_obl\_sr}$ , m/s
1	I	2,68± 0,17	2,56± 0,16	6,48± 0,34	6,55± 0,35
	II	2,48± 0,16		6,58± 0,35	
	III	2,53± 0,16		6,59± 0,36	
2	I	2,59 ± 0,17	2,53 ± 0,16	6,26± 0,34	6,46± 0,35
	II	2,47± 0,16		6,55± 0,35	
	III	2,53 ± 0,16		6,58 ± 0,36	
3	I	1,20± 0,15	1,28± 0,15	2,91± 0,34	3,28 ± 0,35
	II	1,25± 0,14		3,31± 0,35	
	III	1,39± 0,15		3,61± 0,36	
4	I	2,69± 0,17	2,53± 0,16	6,49± 0,34	6,46± 0,35
	II	2,39± 0,16		6,34± 0,35	
	III	2,52± 0,16		6,56± 0,36	
5	I	1,16± 0,15	1,00± 0,14	2,79± 0,34	2,57 ± 0,35
	II	1,07± 0,14		2,85± 0,35	
	III	0,79± 0,14		2,07 ± 0,36	

Porównując otrzymane wyniki modelu 2.1 z wynikami badań otrzymanymi dla wariantu bazowego, można zauważyć, że opory przepływu przez pierścień dyszowy są wyższe. Ponadto obliczone prędkości przepływu czynnika transportującego w pkt. 3 również są wyższe w stosunku do wariantu bazowego. Należy zauważyć również, że obliczona wentylacja młyna jest nieco wyższa w stosunku do wariantu bazowego.

Na Rys. 5.2 przedstawiono model 2.2 zmienionej geometrii pierścienia dyszowego badanego na stanowisku laboratoryjnym.



Rys. 5.2 Pierścień dyszowy – stanowisko laboratoryjne – zmodyfikowana geometria – model 2.2

Opisując badany model, zastosowano łopatki płaskie położone pod kątem identycznym jak w modelu bazowym, zorientowane są tak samo w stosunku do modelu bazowego i położone są pod identycznym kątem w stosunku do kierunku promieniowego do środka młyna jak w modelu bazowym.

W Tab. 5.7 ukazano warunki w jakich wykonano pomiary laboratoryjne pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.2). Badany pierścień dyszowy wykonywał ruch obrotowy.

Tab. 5.7 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.2

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość
Stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego	-	%	95
Stopień otwarcia przepustnicy na wylocie	-	%	100
Ciśnienie atmosferyczne	$p_{ot}$	Pa	98 925
Temperatura otoczenia	$t_{ot}$	°C	26,5
Temperatura powietrza przepływającego przez młyn	$t_1$	°C	37,3 – 37,8
Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	$n_{pd}$	obr/min	96
Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji	$\dot{V}_{wlot}$	m <sup>3</sup> /h	200

W Tab. 5.8 zestawiono straty ciśnienia pomiędzy punktem 2 a 3 instalacji badawczej podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią – model 2.2.

Tab. 5.8 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.2

Seria pomiarowa	Wentylacja zmierzona $\dot{V}_{pom}, m_n^3/h$	Strata ciśnienia zmierzona $\Delta p_{2-3pom}, Pa$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\ obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\ obl}, Pa$
I	200± 1	299± 95	57 328	4275± 83
II	200± 1	282± 91	57 328	4245± 83
III	200± 1	291± 93	57 328	4156± 83
Średnia	200± 1	291± 93	57 328	4225± 83

W Tab. 5.9 zestawiono zmierzone prędkości przepływu powietrza w pkt. 3 instalacji badawczej (komora młyna) podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.2) oraz obliczone, odpowiadające im prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej.

Tab. 5.9 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.2

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Prędkość zmierzona $w_{3\ pom}, m/s$	Prędkość zmierzona średnia $w_{3\ pom\ śr}, m/s$	Obliczona prędkość $w_{3\ przem\ obl}, m/s$	Obliczona prędkość średnia $w_{3\ przem\ obl\ śr}, m/s$
1	I	2,06± 0,16	2,02± 0,16	5,36± 0,37	5,29± 0,37
	II	2,04± 0,16		5,45± 0,37	
	III	1,95± 0,17		5,07± 0,38	
2	I	2,10± 0,16	2,16± 0,16	5,45± 0,37	5,65± 0,37
	II	2,13± 0,16		5,69± 0,37	
	III	2,24± 0,17		5,81± 0,38	

3	I	1,88± 0,16	1,65± 0,16	4,89± 0,37	4,94± 0,37
	II	1,19± 0,16		5,07± 0,37	
	III	1,87± 0,16		4,85± 0,38	
4	I	2,29± 0,17	2,24± 0,17	5,96± 0,37	5,86± 0,37
	II	2,16± 0,16		5,75± 0,37	
	III	2,26± 0,17		5,87± 0,38	
5	I	0,76± 0,15	0,70± 0,15	1,97± 0,37	1,84± 0,37
	II	0,72± 0,14		1,92± 0,37	
	III	0,62± 0,15		1,62± 0,38	

W Tab. 5.10 ukazano warunki w jakich wykonano pomiary laboratoryjne pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.2). Badany pierścień dyszowy nie wykonywał ruchu obrotowego.

Tab. 5.10 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego – model 2.2

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość
Stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego	-	%	95
Stopień otwarcia przepustnicy na wylocie	-	%	100
Ciśnienie atmosferyczne	$p_{ot}$	Pa	98 925
Temperatura otoczenia	$t_{ot}$	°C	28,2
Temperatura powietrza przepływającego przez młyn	$t_1$	°C	38,2 – 38,3
Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	$n_{pd}$	obr/min	0
Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji	$\dot{V}_{wlot}$	m <sup>3</sup> /h	200

W Tab. 5.11 zestawiono straty ciśnienia pomiędzy punktem 2 a 3 instalacji badawczej podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią – model 2.2.

Tab. 5.11 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego – model 2.2

Seria pomiarowa	Wentylacja zmierzona $\dot{V}_{pom}, m_n^3/h$	Strata ciśnienia zmierzona $\Delta p_{2-3pom}, Pa$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\_obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\_obl}, Pa$
I	200 ± 1	273± 89	57 330	4299± 83
II	200 ± 1	297± 95	57 330	4332± 83
III	200 ± 1	250± 84	57 330	4337± 83
Średnia	200 ± 1	273± 89	57 330	4323± 83

W Tab. 5.12 zestawiono zmierzone prędkości przepływu powietrza w pkt. 3 instalacji badawczej (komora młyna) podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.2) oraz obliczone, odpowiadające im prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej.

Tab. 5.12 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego – model 2.2

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Prędkość zmierzona $w_{3\_pom}$ , m/s	Prędkość zmierzona średnia $w_{3\_pom\_śr}$ , m/s	Obliczona prędkość $w_{3\_przem\_obl}$ , m/s	Obliczona prędkość średnia $w_{3\_przem\_obl\_śr}$ , m/s
1	I	1,51± 0,15	1,41± 0,15	4,13± 0,38	3,85± 0,38
	II	1,45± 0,16		3,80± 0,38	
	III	1,26± 0,15		3,61± 0,39	
2	I	1,39± 0,15	1,40± 0,15	3,79± 0,38	3,83± 0,38
	II	1,46± 0,16		3,84± 0,38	
	III	1,35± 0,15		3,86± 0,39	
3	I	1,66± 0,16	1,71± 0,16	4,53± 0,38	4,68± 0,38
	II	1,82± 0,16		4,79± 0,38	
	III	1,64± 0,15		4,71± 0,39	
4	I	1,85± 0,16	1,65± 0,16	5,05± 0,38	5,09± 0,38
	II	1,30± 0,16		3,42± 0,38	
	III	1,79± 0,15		5,13± 0,39	
5	I	2,13± 0,16	2,11± 0,16	5,82± 0,38	5,77± 0,38
	II	2,21± 0,17		5,81± 0,38	
	III	1,98± 0,16		5,67± 0,39	

Porównując otrzymane wyniki modelu 2.2 z wynikami badań otrzymanymi dla wariantu bazowego, można zauważyć, że opory przepływu przez pierścień dyszowy są wyższe w stosunku do wyników badań dla modeli bazowego i 2.1. Ponadto obliczone prędkości przepływu czynnika transportującego w pkt. 3 są wyższe w stosunku do wariantu bazowego. Należy zauważyć również, że obliczona wentylacja młyna jest nieco wyższa w stosunku do wariantu bazowego.

Na Rys. 5.3 przedstawiono model 2.3 zmienionej geometrii pierścienia dyszowego badanego na stanowisku laboratoryjnym.



Rys. 5.3 Pierścień dyszowy – stanowisko laboratoryjne – zmodyfikowana geometria – model 2.3

Opisując badany model, zastosowano łopatki płaskie położone pod niższym kątem w stosunku do modelu bazowego, zorientowane są tak samo w stosunku do modelu bazowego i położone są pod identycznym kątem w stosunku do kierunku promieniowego do środka młyna jak w modelu bazowym.

W Tab. 5.13 ukazano warunki w jakich wykonano pomiary laboratoryjne pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.3). Badany pierścień dyszowy wykonywał ruch obrotowy.

Tab. 5.13 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.3

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość
Stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego	-	%	95
Stopień otwarcia przepustnicy na wylocie	-	%	100
Ciśnienie atmosferyczne	$p_{ot}$	Pa	98 925
Temperatura otoczenia	$t_{ot}$	°C	28,0
Temperatura powietrza przepływającego przez młyn	$t_1$	°C	38,0 – 38,8
Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	$n_{pd}$	obr/min	96
Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji	$\dot{V}_{wlot}$	m <sup>3</sup> /h	200

W Tab. 5.14 zestawiono straty ciśnienia pomiędzy punktem 2 a 3 instalacji badawczej podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią – model 2.3.

Tab. 5.14 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.3

Seria pomiarowa	Wentylacja zmierzona $\dot{V}_{pom}, m_n^3/h$	Strata ciśnienia zmierzona $\Delta p_{2-3pom}, Pa$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\ obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\ obl}, Pa$
I	212± 1	400± 123	57 328	4941± 83
II	212± 1	373± 117	57 328	4849± 81
III	212± 1	389± 120	57 328	4919± 81
Średnia	212± 1	387± 120	57 328	4903± 82

W Tab. 5.15 zestawiono zmierzone prędkości przepływu powietrza w pkt. 3 instalacji badawczej (komora młyna) podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.3) oraz obliczone, odpowiadające im prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej.

Tab. 5.15 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.3

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Prędkość zmierzona $w_{3\_pom}, m/s$	Prędkość zmierzona średnia $w_{3\_pom\_sr}, m/s$	Obliczona prędkość $w_{3\_przem\_obl}, m/s$	Obliczona prędkość średnia $w_{3\_przem\_obl\_sr}, m/s$
1	I	1,87± 0,17	1,80± 0,19	4,51± 0,37	4,39± 0,37
	II	1,73± 0,23		4,28± 0,53	
	III	1,80± 0,17		4,38± 0,36	
2	I	1,73± 0,17	1,76 ± 0,19	4,17± 0,37	4,30± 0,37
	II	1,80± 0,23		4,46± 0,53	
	III	1,75± 0,16		4,27± 0,36	

3	I	1,67± 0,17	1,59± 0,19	4,02± 0,37	3,88± 0,37
	II	1,52± 0,23		3,76± 0,53	
	III	1,58 ± 0,16		3,86± 0,36	
4	I	1,56± 0,17	1,57± 0,19	3,76± 0,37	3,84± 0,37
	II	1,54± 0,23		3,81± 0,53	
	III	1,62± 0,16		3,96± 0,36	
5	I	1,09± 0,17	0,82± 0,18	2,62± 0,37	1,99± 0,37
	II	0,62 ± 0,22		1,54± 0,53	
	III	0,74± 0,15		1,80± 0,36	

W Tab. 5.16 ukazano warunki w jakich wykonano pomiary laboratoryjne pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.3). Badany pierścień dyszowy nie wykonywał ruchu obrotowego.

Tab. 5.16 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego – model 2.3

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość
Stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego	-	%	95
Stopień otwarcia przepustnicy na wylocie	-	%	100
Ciśnienie atmosferyczne	$p_{ot}$	Pa	98 792
Temperatura otoczenia	$t_{ot}$	°C	29,1
Temperatura powietrza przepływającego przez młyn	$t_1$	°C	39,2 – 39,7
Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	$n_{pd}$	obr/min	0
Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji	$\dot{V}_{wlot}$	m <sup>3</sup> /h	200

W Tab. 5.17 zestawiono straty ciśnienia pomiędzy punktem 2 a 3 instalacji badawczej podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią – model 2.3.

Tab. 5.17 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego – model 2.3

Seria pomiarowa	Wentylacja zmierzona $\dot{V}_{pom}, m_n^3/h$	Strata ciśnienia zmierzona $\Delta p_{2-3pom}, Pa$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\_obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\_obl}, Pa$
I	212 ± 1	387± 120	57 328	4937± 85
II	212 ± 1	353± 112	57 328	4910± 86
III	212 ± 1	343± 110	57 328	4953± 85
Średnia	212 ± 1	361± 114	57 328	4933± 85

W Tab. 5.18 zestawiono zmierzone prędkości przepływu powietrza w pkt. 3 instalacji badawczej (komora młyna) podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.3) oraz obliczone, odpowiadające im prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej.

Tab. 5.18 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.3

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Prędkość zmierzona $w_{3\_pom}$ , m/s	Prędkość zmierzona średnia $w_{3\_pom\_śr}$ , m/s	Obliczona prędkość $w_{3\_przem\_obl}$ , m/s	Obliczona prędkość średnia $w_{3\_przem\_obl\_śr}$ , m/s
1	I	1,85± 0,17	1,91 ± 0,17	4,56± 0,37	4,86± 0,38
	II	1,94± 0,16		4,98± 0,37	
	III	1,93± 0,17		5,05± 0,39	
2	I	1,71± 0,17	1,58± 0,16	4,19± 0,37	4,00± 0,37
	II	1,48± 0,16		3,81± 0,37	
	III	1,54± 0,16		4,02± 0,38	
3	I	1,21± 0,16	1,16± 0,16	2,97± 0,37	2,95± 0,37
	II	1,21± 0,16		3,11± 0,37	
	III	1,06 ± 0,16		2,77± 0,38	
4	I	1,36± 0,16	1,27± 0,16	3,34± 0,37	3,22± 0,37
	II	1,26± 0,16		3,22 ± 0,37	
	III	1,19 ± 0,16		3,10± 0,38	
5	I	0,75± 0,16	0,75± 0,15	1,84± 0,37	1,92± 0,37
	II	0,78± 0,15		2,01 ± 0,37	
	III	0,73± 0,15		1,90± 0,38	

Porównując otrzymane wyniki modelu 2.3 z wynikami badań otrzymanymi dla wariantu bazowego, można zauważyć, że opory przepływu przez pierścień dyszowy są jeszcze wyższe w stosunku do poprzednich wariantów. Ponadto obliczone prędkości przepływu czynnika transportującego w pkt. 3 również są wyższe w stosunku do wariantu bazowego. Należy zauważyć również, że obliczona wentylacja młyna jest nieco wyższa w stosunku do wariantu bazowego. Na podstawie powyższych wyników badań można wywnioskować, że zmniejszanie kąta położenia łopatek powoduje wzrost oporów przepływu przez pierścień dyszowy.

Na Rys. 5.4 przedstawiono model 2.4 zmienionej geometrii pierścienia dyszowego badanego na stanowisku laboratoryjnym.



Rys. 5.4 Pierścień dyszowy – stanowisko laboratoryjne – zmodyfikowana geometria – model 2.4

Opisując badany model, zastosowano łopatki płaskie położone pionowo i pod identycznym kątem w stosunku do kierunku promieniowego do środka młyna jak w modelu bazowym.

W Tab. 5.19 ukazano warunki w jakich wykonano pomiary laboratoryjne pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.4). Badany pierścień dyszowy wykonywał ruch obrotowy.

Tab. 5.19 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.4

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość
Stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego	-	%	95
Stopień otwarcia przepustnicy na wylocie	-	%	100
Ciśnienie atmosferyczne	$p_{ot}$	Pa	99 058
Temperatura otoczenia	$t_{ot}$	°C	27,5
Temperatura powietrza przepływającego przez młyn	$t_1$	°C	38,1 – 39,0
Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	$n_{pd}$	obr/min	96
Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji	$\dot{V}_{wlot}$	m <sup>3</sup> /h	200

W Tab. 5.20 zestawiono straty ciśnienia pomiędzy punktem 2 a 3 instalacji badawczej podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią – model 2.4.

Tab. 5.20 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.4

Seria pomiarowa	Wentylacja zmierzona $\dot{V}_{pom}, m_n^3/h$	Strata ciśnienia zmierzona $\Delta p_{2-3pom}, Pa$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\ obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\ obl}, Pa$
I	185± 1	145± 53	57 328	2818± 83
II	185± 1	164± 58	57 328	2781± 80
III	185± 1	139± 52	57 328	2797± 82
Średnia	185± 1	149± 54	57 328	2798± 82

Tab. 5.21 zestawiono zmierzone prędkości przepływu powietrza w pkt. 3 instalacji badawczej (komora młyna) podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.4) oraz obliczone, odpowiadające im prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej.

Tab. 5.21 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.4

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Prędkość zmierzona $w_{3\_pom}, m/s$	Prędkość zmierzona średnia $w_{3\_pom\_sr}, m/s$	Obliczona prędkość $w_{3\_przem\_obl}, m/s$	Obliczona prędkość średnia $w_{3\_przem\_obl\_sr}, m/s$
1	I	4,07± 0,14	3,80 ± 0,14	12,36± 0,30	11,35± 0,30
	II	3,73± 0,14		10,56± 0,30	
	III	3,61± 0,13		11,13± 0,31	
2	I	3,23± 0,13	3,24± 0,13	9,79± 0,30	9,66± 0,30
	II	3,38± 0,14		9,57± 0,30	
	III	3,12± 0,13		9,63± 0,31	

3	I	2,94± 0,13	2,97± 0,13	8,93± 0,30	8,86± 0,30
	II	3,18± 0,14		9,01 ± 0,30	
	III	2,80± 0,13		8,65± 0,31	
4	I	2,94± 0,13	3,07± 0,13	8,84± 0,30	9,12± 0,30
	II	3,42± 0,14		9,70± 0,30	
	III	2,86± 0,13		8,82± 0,31	
5	I	3,73± 0,14	3,75± 0,14	11,33± 0,30	11,18± 0,30
	II	3,99± 0,15		11,31± 0,30	
	III	3,54± 0,13		10,91± 0,31	

W Tab. 5.22 ukazano warunki w jakich wykonano pomiary laboratoryjne pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.4). Badany pierścień dyszowy nie wykonywał ruchu obrotowego.

Tab. 5.22 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego – model 2.4

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość
Stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego	-	%	95
Stopień otwarcia przepustnicy na wylocie	-	%	100
Ciśnienie atmosferyczne	$p_{ot}$	Pa	99 058
Temperatura otoczenia	$t_{ot}$	°C	29,3
Temperatura powietrza przepływającego przez młyn	$t_1$	°C	39,3 – 39,8
Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	$n_{pd}$	obr/min	0
Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji	$\dot{V}_{wlot}$	m <sup>3</sup> /h	200

W Tab. 5.23 zestawiono straty ciśnienia pomiędzy punktem 2 a 3 instalacji badawczej podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią – model 2.4.

Tab. 5.23 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego – model 2.4

Seria pomiarowa	Wentylacja zmierzona $\dot{V}_{pom}, m_n^3/h$	Strata ciśnienia zmierzona $\Delta p_{2-3pom}, Pa$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\ obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\ obl}, Pa$
I	185 ± 1	146 ± 54	57 328	2661± 82
II	185 ± 1	152 ± 55	57 328	2655± 81
III	185 ± 1	137 ± 51	57 328	2717± 81
Średnia	185 ± 1	145 ± 53	57 328	2678± 81

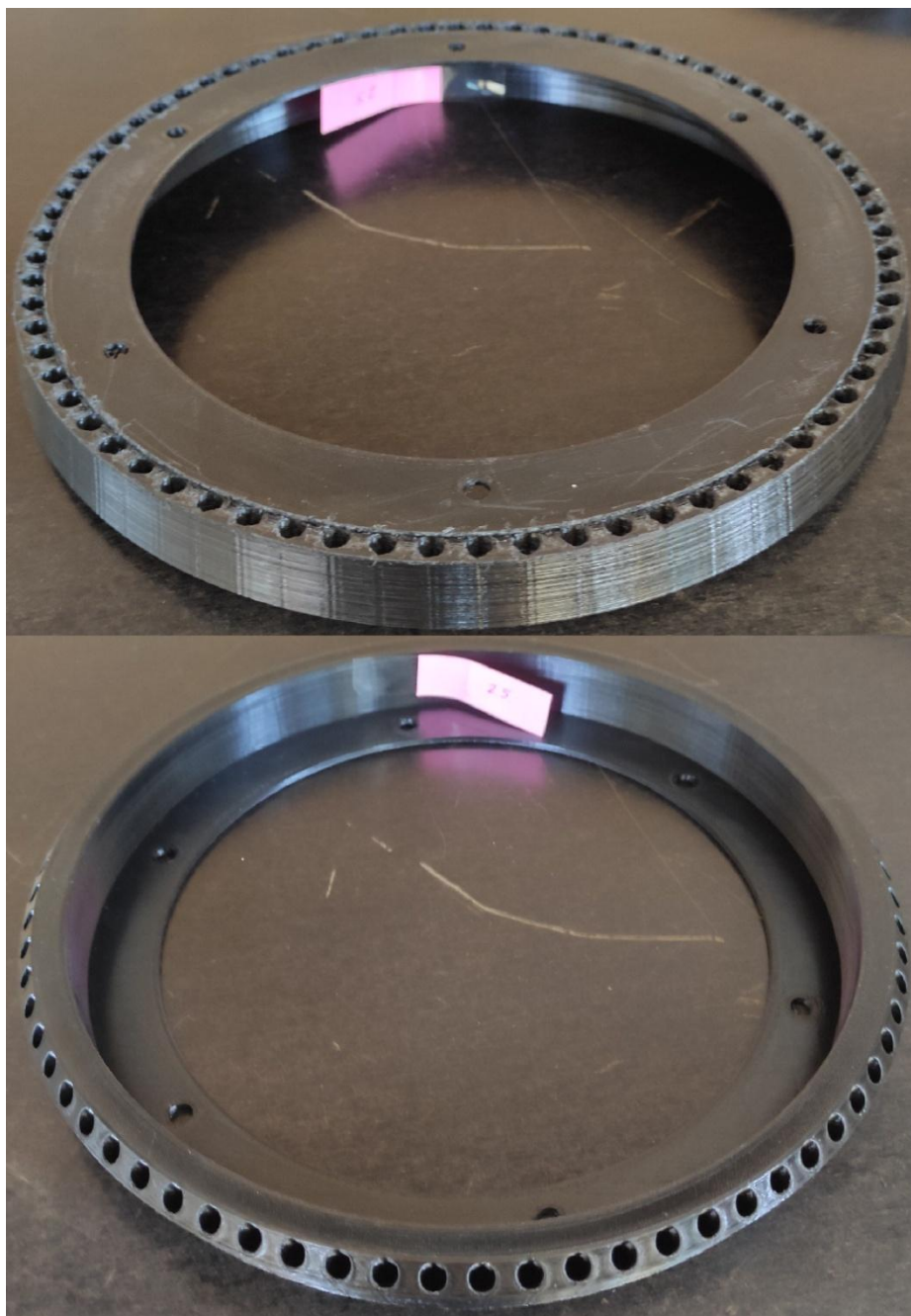
W Tab. 5.24 zestawiono zmierzone prędkości przepływu powietrza w pkt. 3 instalacji badawczej (komora młyna) podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.4) oraz obliczone, odpowiadające im prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej.

Tab. 5.24 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.4

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Prędkość zmierzona $w_{3\_pom}$ , m/s	Prędkość zmierzona średnia $w_{3\_pom\_śr}$ , m/s	Obliczona prędkość $w_{3\_przem\_obl}$ , m/s	Obliczona prędkość średnia $w_{3\_przem\_obl\_śr}$ , m/s
1	I	4,20± 0,15	4,28± 0,15	12,35± 0,31	12,68± 0,31
	II	4,52± 0,15		13,04± 0,31	
	III	4,13± 0,14		12,65± 0,31	
2	I	3,25 ± 0,14	3,27± 0,14	9,56 ± 0,31	9,69± 0,31
	II	3,14± 0,14		9,04± 0,31	
	III	3,42± 0,13		10,47± 0,31	
3	I	2,95± 0,13	3,02± 0,13	8,68± 0,31	8,94± 0,31
	II	3,06± 0,14		8,81± 0,31	
	III	3,05± 0,13		9,34± 0,31	
4	I	2,98± 0,13	3,05± 0,13	8,75± 0,31	9,01± 0,31
	II	3,21± 0,14		9,25± 0,31	
	III	2,95± 0,13		9,03± 0,31	
5	I	3,75± 0,14	3,63± 0,14	11,01± 0,31	10,73± 0,31
	II	3,64± 0,14		10,50± 0,31	
	III	3,49± 0,14		10,69± 0,31	

Porównując otrzymane wyniki modelu 2.4 z wynikami badań otrzymanymi dla wariantu bazowego, można zauważyć, że opory przepływu przez pierścień dyszowy są najniższe spośród poprzednio przedstawionych wariantów. Ponadto obliczone prędkości przepływu czynnika transportującego w pkt. 3 są najwyższe w stosunku do wszystkich przedstawionych poprzednio wariantów, w tym wariantu bazowego. Na podstawie powyższych wyników badań można wywnioskować, że kierunek zmian geometrii pierścienia dyszowego jest jak najbardziej prawidłowy.

Na Rys. 5.5 przedstawiono model 2.5 zmienionej geometrii pierścienia dyszewego badanego na stanowisku laboratoryjnym.



Rys. 5.5 Pierścień dyszowy – stanowisko laboratoryjne – zmodyfikowana geometria – model 2.5

Opisując badany model, zastosowano całkowicie nową koncepcję geometrii pierścienia dyszewego polegającą na zastąpieniu dysz uformowanych za pomocą łopatek, dyszami uzyskanymi poprzez ich uformowanie za pomocą otworów o zaokrąglonym kształcie.

W Tab. 5.25 ukazano warunki w jakich wykonano pomiary laboratoryjne pierścienia dyszewego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.5). Badany pierścień dyszowy wykonywał ruch obrotowy.

Tab. 5.25 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.5

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość
Stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego	-	%	95
Stopień otwarcia przepustnicy na wylocie	-	%	100
Ciśnienie atmosferyczne	$p_{ot}$	Pa	98 925
Temperatura otoczenia	$t_{ot}$	°C	25,5
Temperatura powietrza przepływającego przez młyn	$t_1$	°C	37,0 – 37,2
Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	$n_{pd}$	obr/min	96
Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji	$\dot{V}_{wlot}$	m <sup>3</sup> /h	200

W Tab. 5.26 zestawiono straty ciśnienia pomiędzy punktem 2 a 3 instalacji badawczej podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią – model 2.5.

Tab. 5.26 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.5

Seria pomiarowa	Wentylacja zmierzona $\dot{V}_{pom}, m_n^3/h$	Strata ciśnienia zmierzona $\Delta p_{2-3pom}, Pa$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\_obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\_obl}, Pa$
I	215 ± 1	197 ± 73	54526	2573 ± 84
II	215 ± 1	190 ± 71	54 521	2546 ± 85
III	215 ± 1	139 ± 57	54 521	2044 ± 86
Średnia	215 ± 1	194 ± 72	54524	2560 ± 85

W Tab. 5.27 zestawiono zmierzone prędkości przepływu powietrza w pkt. 3 instalacji badawczej (komora młyna) podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.5) oraz obliczone, odpowiadające im prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej.

Tab. 5.27 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.5

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Prędkość zmierzona $w_{3\_pom}, m/s$	Prędkość zmierzona średnia $w_{3\_pom\_sr}, m/s$	Obliczona prędkość $w_{3\_przem\_obl}, m/s$	Obliczona prędkość średnia $w_{3\_przem\_obl\_sr}, m/s$
1	I	5,39 ± 0,18	5,11 ± 0,16	13,42 ± 0,31	13,18 ± 0,28
	II	4,97 ± 0,17		12,52 ± 0,29	
	III	5,14 ± 0,14		13,60 ± 0,25	
2	I	4,23 ± 0,17	4,12 ± 0,15	10,52 ± 0,31	10,51 ± 0,28
	II	4,21 ± 0,16		10,62 ± 0,29	
	III	3,92 ± 0,13		10,38 ± 0,25	

3	I	4,08± 0,16	3,99± 0,15	10,16± 0,31	10,19± 0,28
	II	3,98 ± 0,16		10,03± 0,29	
	III	3,92± 0,13		10,37± 0,25	
4	I	3,98± 0,16	3,07 ± 0,13	9,90± 0,31	10,05± 0,28
	II	3,97± 0,16		10,01± 0,29	
	III	3,87± 0,13		10,23± 0,25	
5	I	4,68± 0,17	4,62± 0,15	11,64± 0,31	11,79± 0,28
	II	4,64± 0,16		11,69± 0,29	
	III	4,55± 0,13		12,04± 0,25	

W Tab. 5.28 ukazano warunki w jakich wykonano pomiary laboratoryjne pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.5). Badany pierścień dyszowy nie wykonywał ruchu obrotowego.

Tab. 5.28 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego – model 2.5

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość
Stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego	-	%	95
Stopień otwarcia przepustnicy na wylocie	-	%	100
Ciśnienie atmosferyczne	$p_{ot}$	Pa	99 058
Temperatura otoczenia	$t_{ot}$	°C	27,7
Temperatura powietrza przepływającego przez młyn	$t_1$	°C	37,4 – 37,8
Prędkość obrotowa pierścienia dyszowego	$n_{pd}$	obr/min	0
Ustawienie przepustnicy regulującej dopływ powietrza do instalacji	$\dot{V}_{wlot}$	m <sup>3</sup> /h	200

W Tab. 5.29 zestawiono straty ciśnienia pomiędzy punktem 2 a 3 instalacji badawczej podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią – model 2.5.

Tab. 5.29 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonyjący ruchu obrotowego – model 2.5

Seria pomiarowa	Wentylacja zmierzona $\dot{V}_{pom}, m_n^3/h$	Strata ciśnienia zmierzona $\Delta p_{2-3pom}, Pa$	Obliczona wentylacja w skali przemysłowej $\dot{V}_{przem\_obl}, m_n^3/h$	Obliczona strata ciśnienia $\Delta p_{2-3przem\_obl}, Pa$
I	215 ± 1	171± 65	54 520	2553± 81
II	215 ± 1	166± 64	54 520	2351± 79
III	215 ± 1	198± 73	54 520	2551± 81
Średnia	215 ± 1	178± 67	54 520	2552± 80

W Tab. 5.30 zestawiono zmierzone prędkości przepływu powietrza w pkt. 3 instalacji badawczej (komora młyna) podczas badań pierścienia dyszowego charakteryzującego się zmienioną geometrią (model 2.5) oraz obliczone, odpowiadające im prędkości przepływu czynnika w komorze młyna w skali przemysłowej.

Tab. 5.30 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.5

Nr króćca pomiarowego	Seria pomiarowa	Prędkość zmierzona $w_{3\_pom}$ , m/s	Prędkość zmierzona średnia $w_{3\_pom\_sr}$ , m/s	Obliczona prędkość $w_{3\_przem\_obl}$ , m/s	Obliczona prędkość średnia $w_{3\_przem\_obl\_sr}$ , m/s
1	I	4,38± 0,16	4,77± 0,16	11,66± 0,30	12,26± 0,30
	II	4,71± 0,16		12,22± 0,30	
	III	5,22± 0,17		12,90± 0,30	
2	I	3,29± 0,15	3,72± 0,15	8,74± 0,30	9,57± 0,30
	II	4,06± 0,15		10,53± 0,30	
	III	3,82 ± 0,16		9,45± 0,30	
3	I	3,72± 0,15	3,83± 0,15	9,89± 0,30	9,86± 0,30
	II	3,83± 0,15		9,94± 0,30	
	III	3,94± 0,16		9,75± 0,30	
4	I	3,59± 0,15	3,50± 0,15	9,54± 0,30	8,99± 0,30
	II	3,17± 0,15		8,23± 0,30	
	III	3,73± 0,16		9,21± 0,30	
5	I	4,57± 0,16	4,71± 0,16	12,16± 0,30	12,13 ± 0,30
	II	4,58± 0,16		11,90± 0,30	
	III	4,98± 0,17		12,32± 0,30	

Porównując otrzymane wyniki modelu 2.5 z wynikami badań otrzymanymi dla wariantu bazowego, można zauważyć, że opory przepływu przez pierścień dyszowy są najniższe spośród wszystkich poprzednio przedstawionych wariantów. Ponadto obliczone prędkości przepływu czynnika transportującego w pkt. 3 są najwyższe w stosunku do wszystkich przeanalizowanych poprzednio wariantów, w tym wariantu bazowego. Na podstawie powyższych wyników badań określono, że model 2.5 charakteryzuje się optymalną geometrią w świetle przyjętych kryteriów optymalizacji geometrii pierścienia dyszowego.

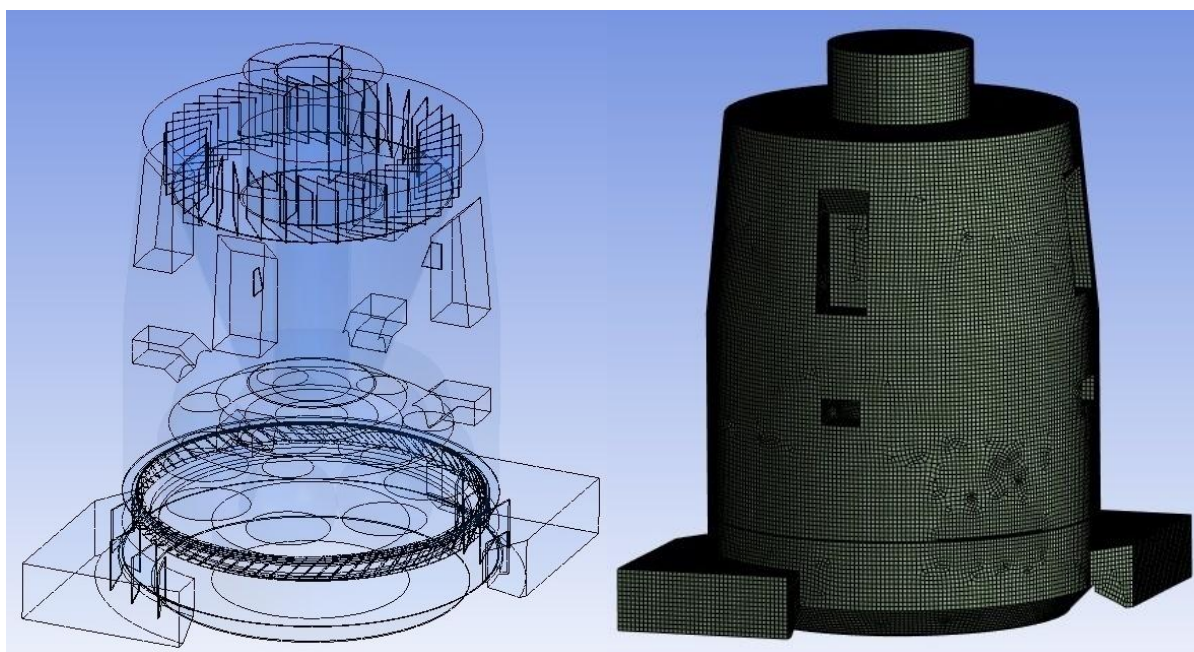
Ponadto w tym przypadku również trudno wywnioskować (biorąc również pod uwagę niepewności uzyskanych wyników badań), czy pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy charakteryzuje się wyższymi oporami przepływu niż pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego. Aby wyeliminować ograniczenia zastosowanej metody badawczej konieczne jest przeprowadzenie badań numerycznych.

## 5.2 Wyniki badań numerycznych pierścienia dyszowego

W ramach badań numerycznych nowej geometrii pierścienia dyszowego przebadano XI wariantów. Pierwsze cztery warianty dotyczyły zmiany geometrii łopatek.

Warunki brzegowe poszczególnych symulacji nie uległy zmianie, natomiast otrzymane wyniki porównano z wynikami badań numerycznych pierścienia dyszowego charakteryzującego się bazową geometrią. Ponadto podczas formułowania wniosków z tych badań uwzględniono otrzymane wyniki badań laboratoryjnych zmodyfikowanych geometrycznie pierścieni dyszowych.

Na Rys. 5.6 po lewej przedstawiono model numeryczny przemysłowego młyna miazdzącego, na którym dokonano badań numerycznych. Model ten charakteryzuje się pierścieniem dyszowym z łopatkami płaskimi usytuowanymi pod pewnym kątem w stosunku do poziomu – kierunek ustawienia łopatek I. Wspomniany wyżej pierścień dyszowy wykonuje ruchu obrotowego. Natomiast po prawej przedstawiono siatkę modelu *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego dla I wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



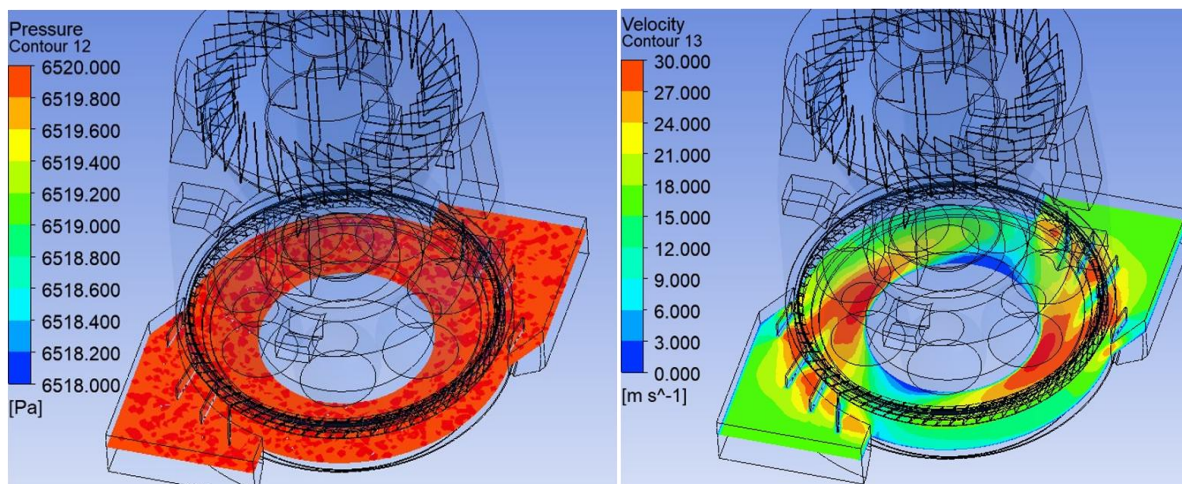
Rys. 5.6. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I

W Tab. 5.31 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu I zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

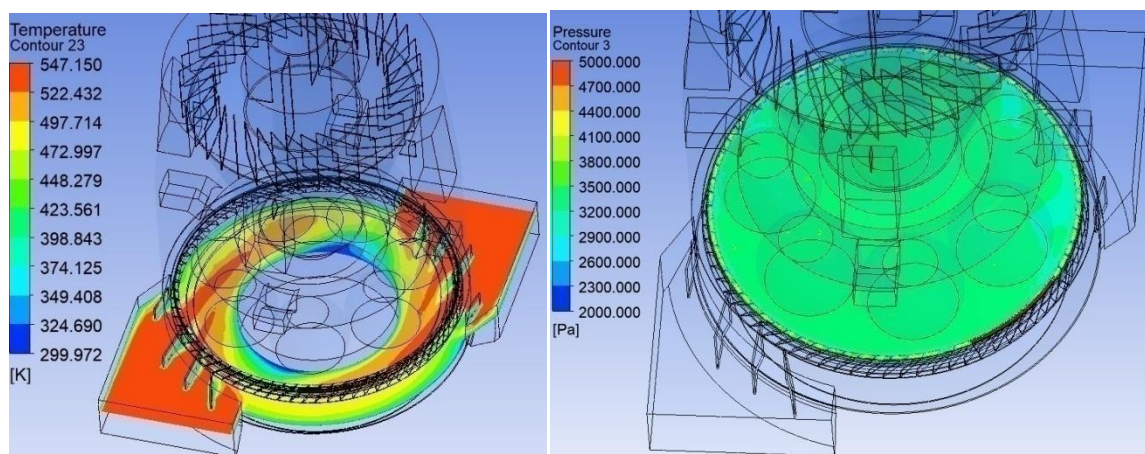
Tab. 5.31. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I

Liczba elementów siatki	1 435 490
Liczba węzłów siatki	1 114 500

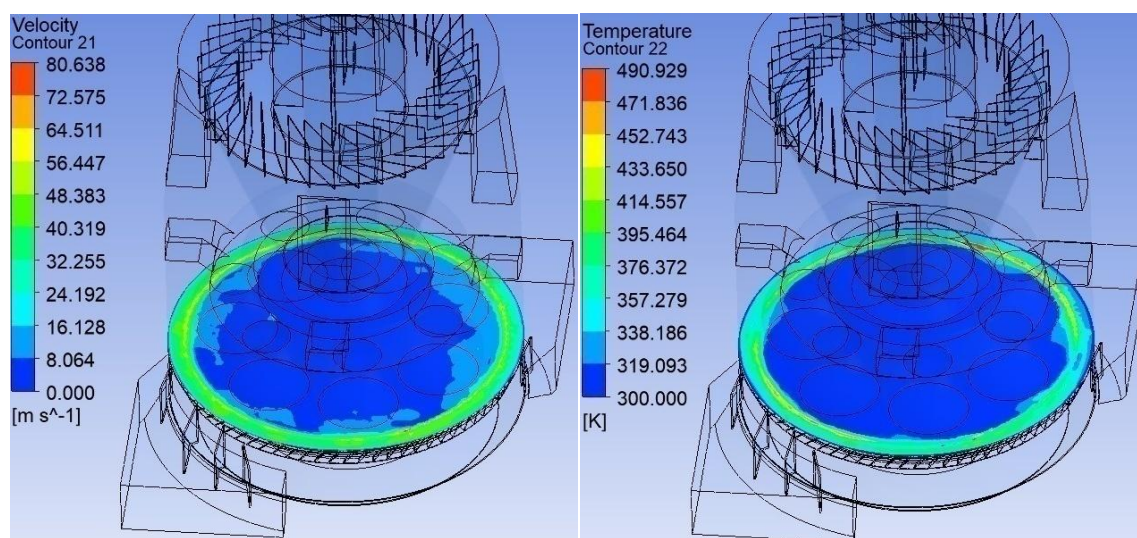
Na Rys. 5.7 do Rys. 5.14 przedstawiono wyniki badań *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego dla I wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



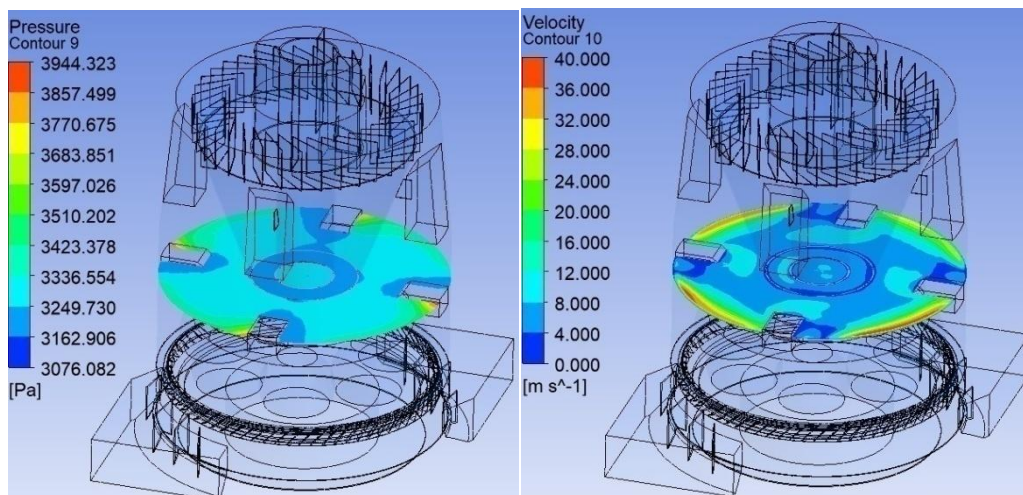
Rys. 5.7. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant I



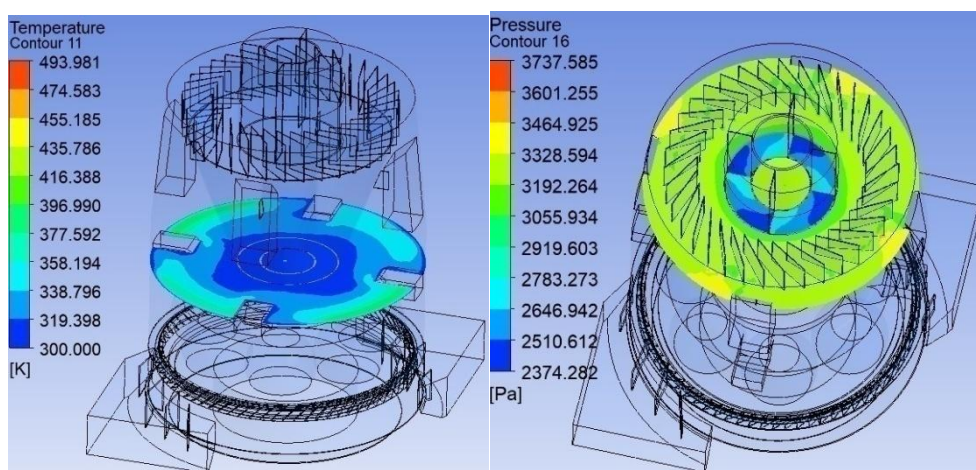
Rys. 5.8. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant I



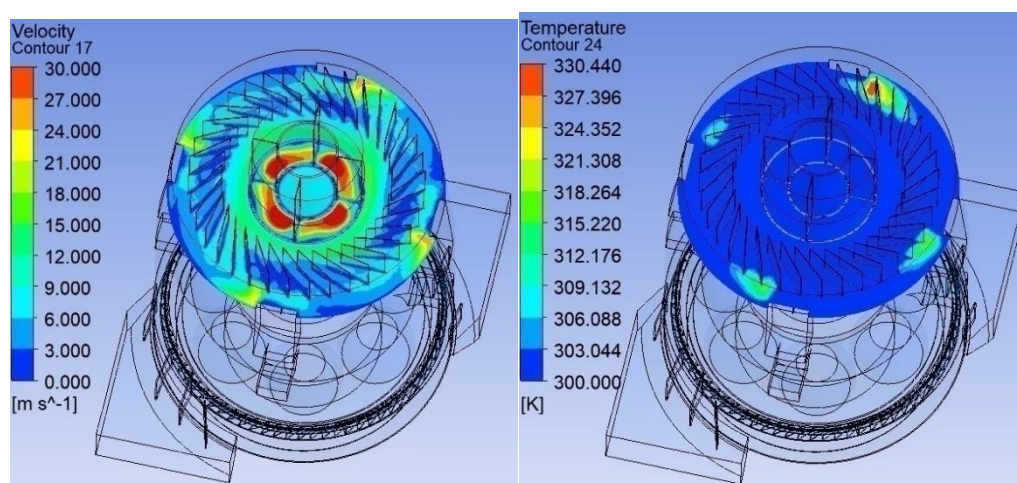
Rys. 5.9. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant I



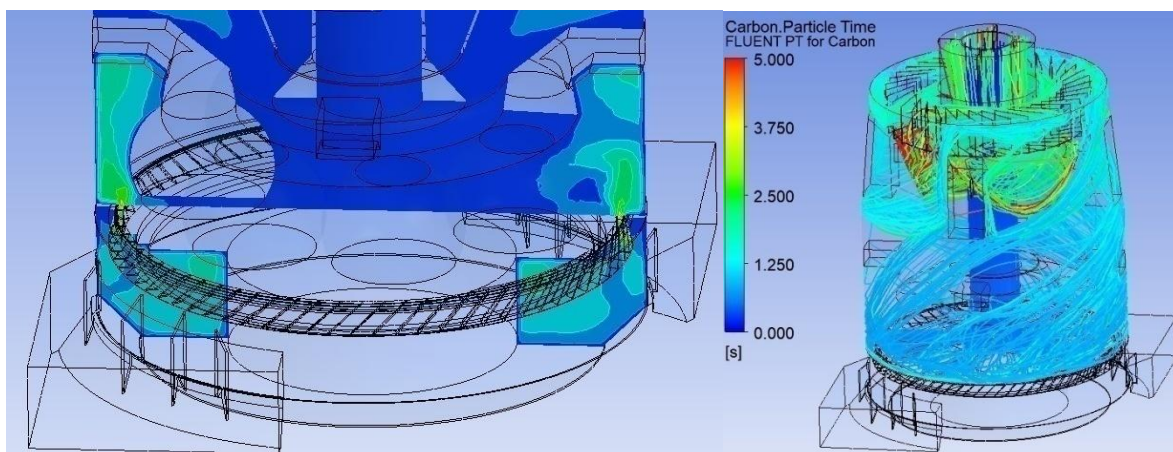
Rys. 5.10. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I



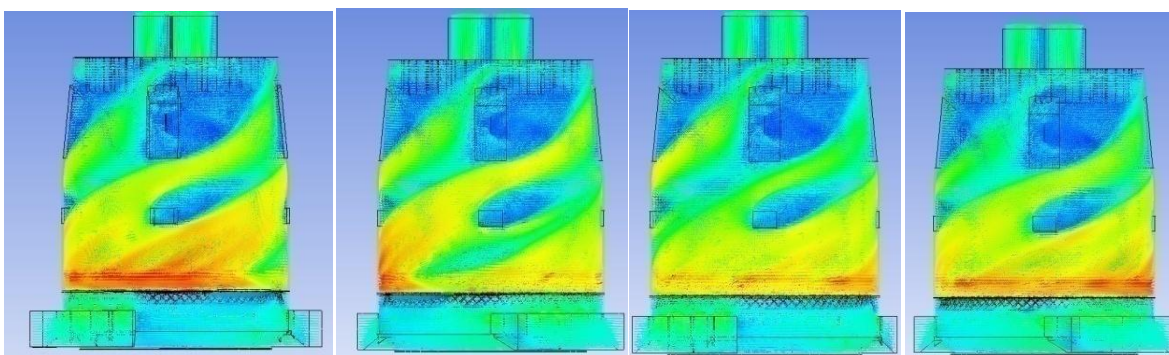
Rys. 5.11. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I



Rys. 5.12. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I



Rys. 5.13. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant I



Rys. 5.14. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant I

W Tab. 5.32 zestawiono wyniki badań *CFD* przepływu czynnika przez młyn dla następujących wariantów: wariantu bazowego i wariantu I modyfikacji geometrii pierścienia dyszewego.

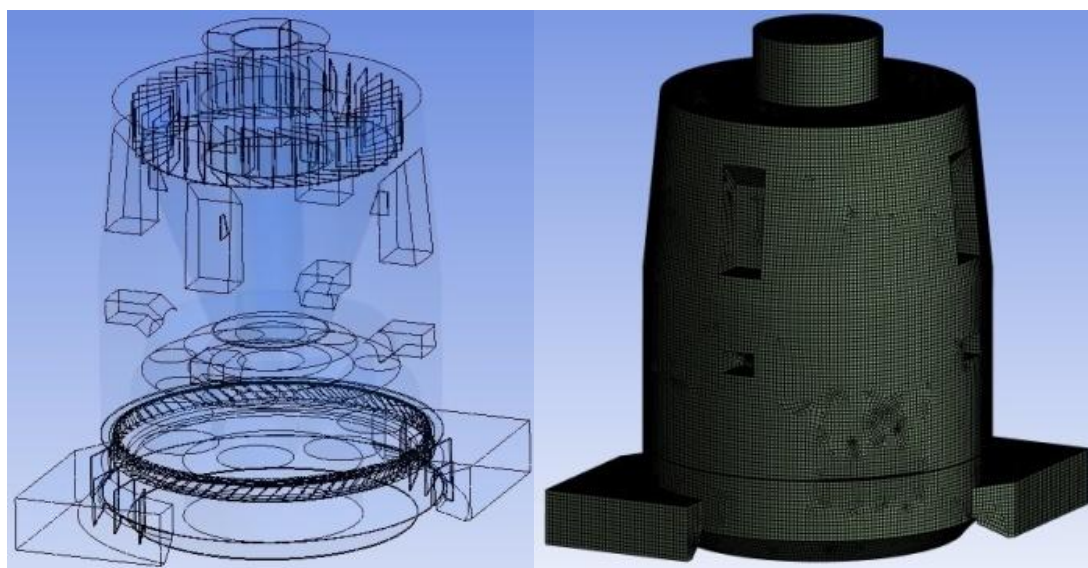
Tab. 5.32. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu I charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszewego

Parametr	Symbol	Jednostka	bazowy	I
Wentylacja młyna	$V_1$	$\text{m}^3/\text{h}$	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,52	6,52
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	$^{\circ}\text{C}$	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	6,52
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym	$p_{31}$	kPa	2,3	3,35
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym	$w_{31}$	m/s	54 – 60	56 – 64
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym	$t_{31}$	$^{\circ}\text{C}$	106,4	104-180
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszewy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,28	3,17

Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia dyszowego	$\zeta_{pd}$	-	3,13	1,96
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,15	3,2
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	106,4	104
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,15	3,1
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	100,1	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,38	2,6
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,14	3,9

Zastosowanie pierścienia dyszowego z płaskimi łopatkami nie zmienia znacznie oporów przepływu czynnika przez pierścień dyszowy w stosunku do wariantu bazowego, lecz przełożyło się na zmniejszenie sumarycznych strat przepływu czynnika przez młyn. Ponadto jest to dowód potwierdzający postawioną w niniejszej pracy tezę, z której wynika, że istnieje techniczna możliwość zmniejszenia stopnia zaawansowania konstrukcji pierścienia dyszowego uzyskując przy tym pożądaną efekt dotyczący zmniejszenia oporów przepływu czynnika przez młyn oraz uzyskania równomiernego profilu przepływu czynnika w poszczególnych elementach młyna.

Na Rys. 5.15 po lewej przedstawiono kolejny wariant modelu numerycznego przemysłowego młyna miazdzącego. Model ten charakteryzuje się pierścieniem dyszowym z łopatkami płaskimi usytuowanymi pod pewnym kątem w stosunku do poziomu – kierunek ustawienia łopatek I. Wspomniany wyżej pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego. Natomiast po prawej przedstawiono siatkę modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego dla II wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



Rys. 5.15. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II

W Tab. 5.33 ukazano założenia modelu numerycznego dla wariantu II zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

Tab. 5.33. Założenia modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II

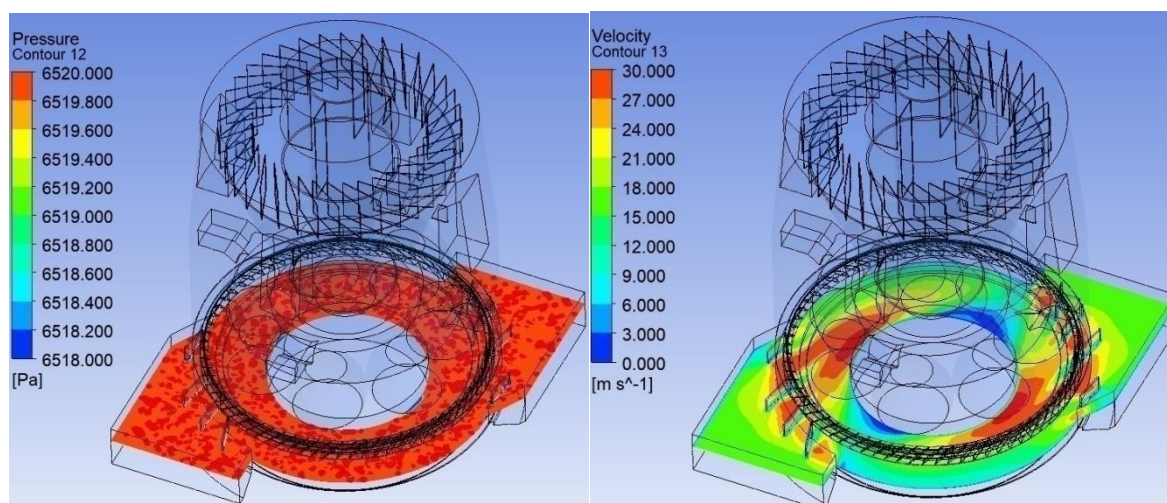
Model turbulencji	k – ε real
Model przepływu pyłu węglowego	Discrete phase model – Lagrangian approach (DPM)
Pozostałe	Równanie energii

W Tab. 5.34 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu II zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

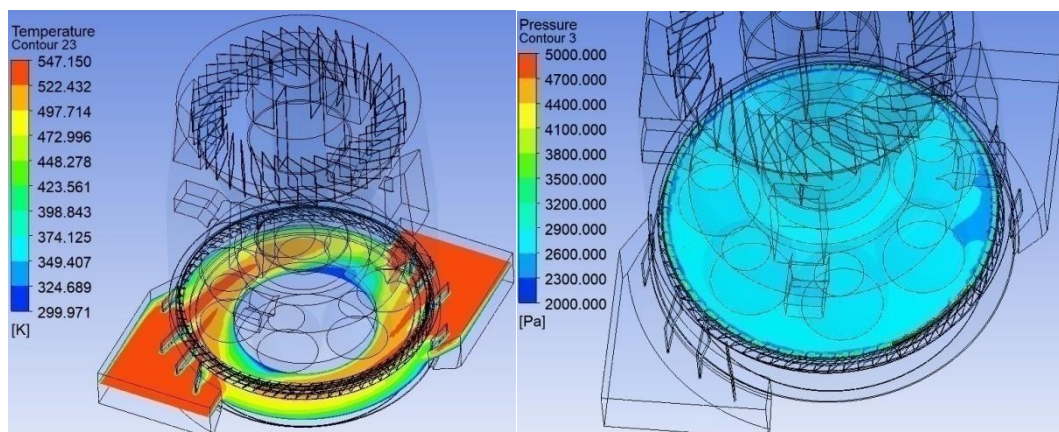
Tab. 5.34. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II

Liczba elementów siatki	1 435 490
Liczba węzłów siatki	1 114 500

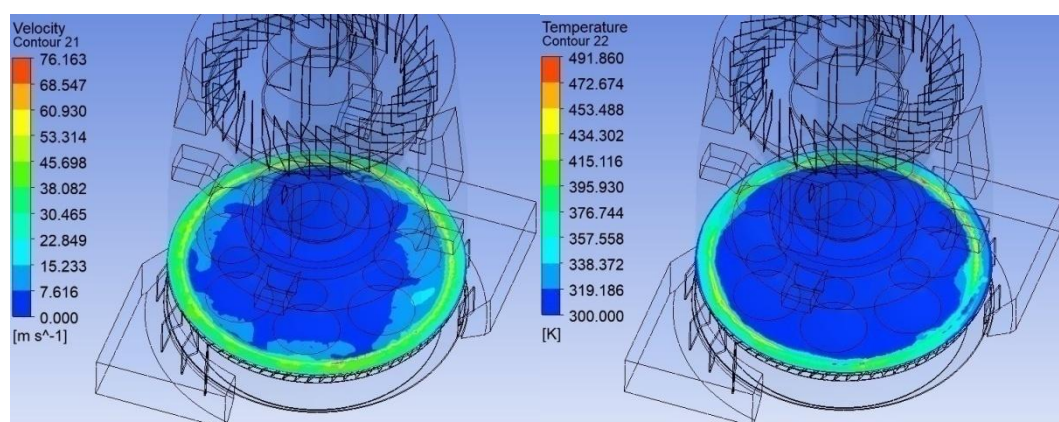
Na Rys. 5.16 do Rys. 5.23 przedstawiono wyniki badań *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego dla II wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



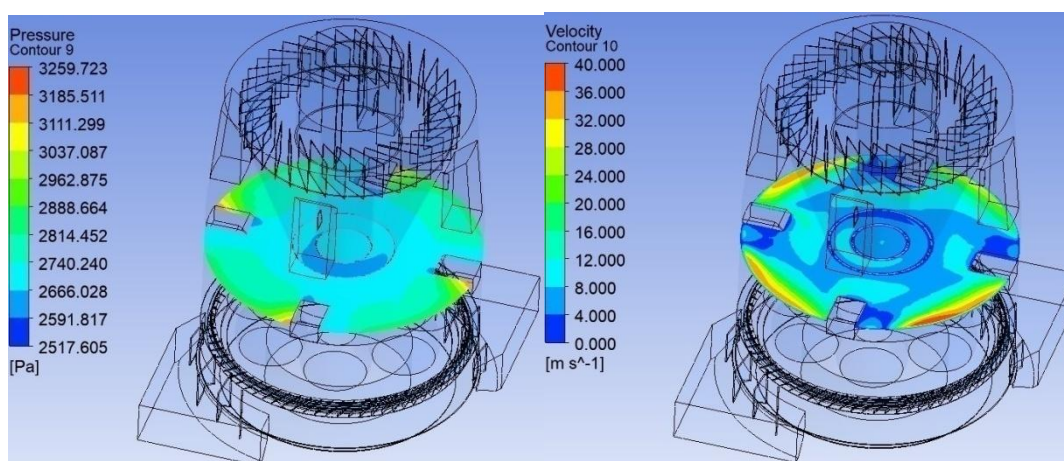
Rys. 5.16. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), Rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II



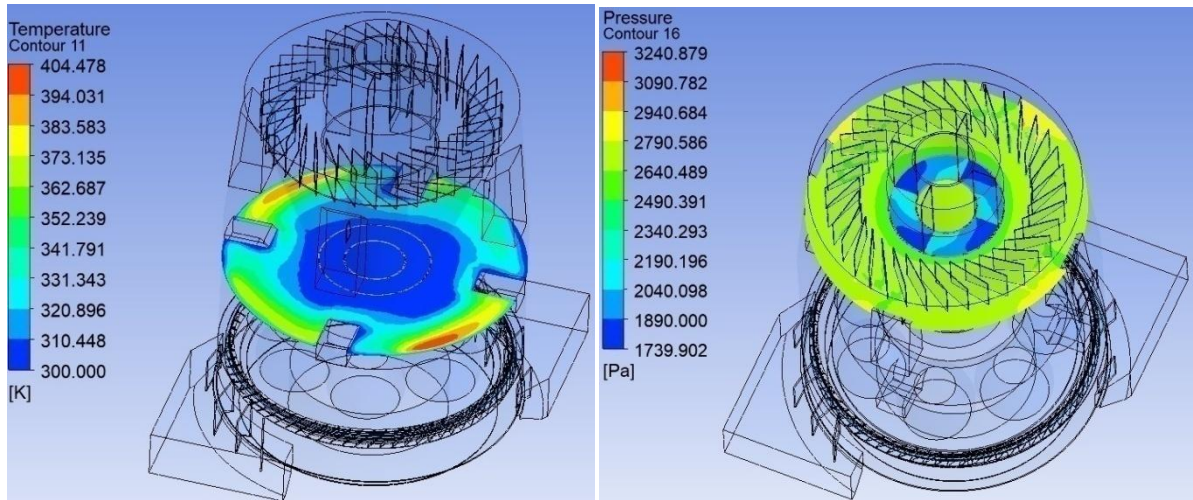
Rys. 5.17. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II



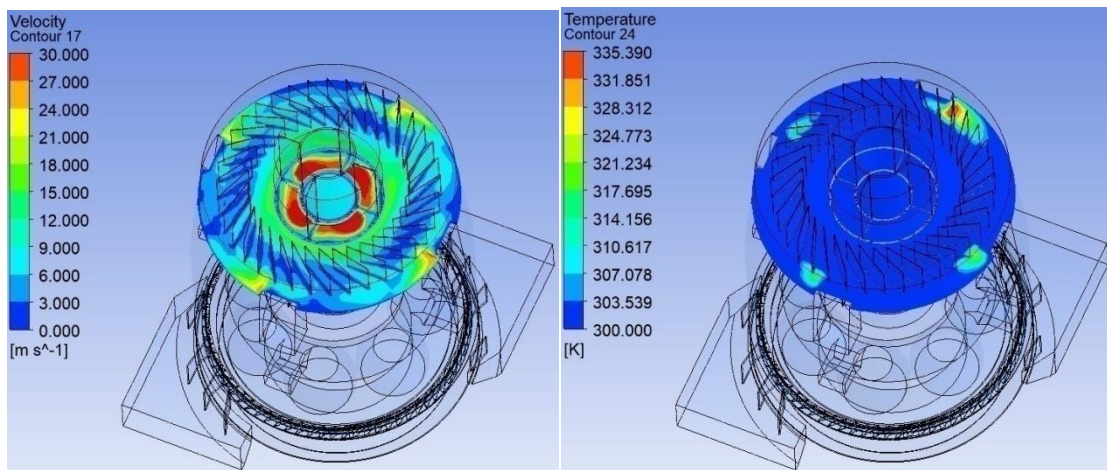
Rys. 5.18. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II



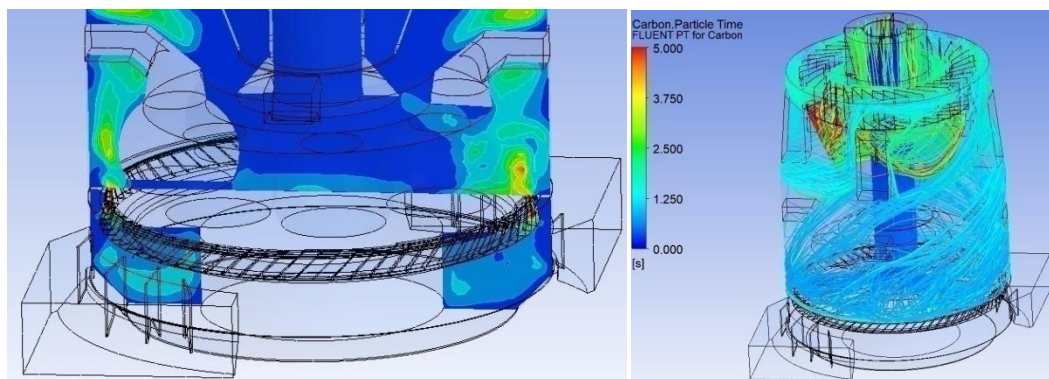
Rys. 5.19. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II



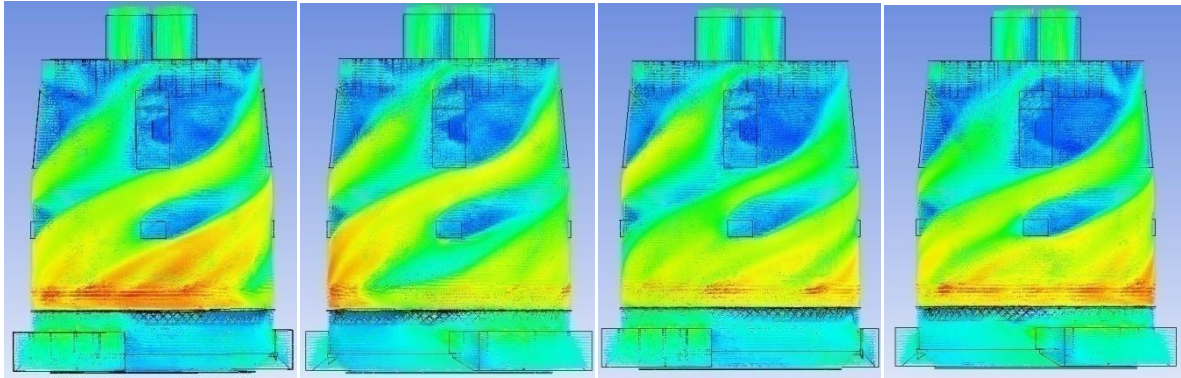
Rys. 5.20. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II



Rys. 5.21. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II



Rys. 5.22. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo– powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II



Rys. 5.23. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II

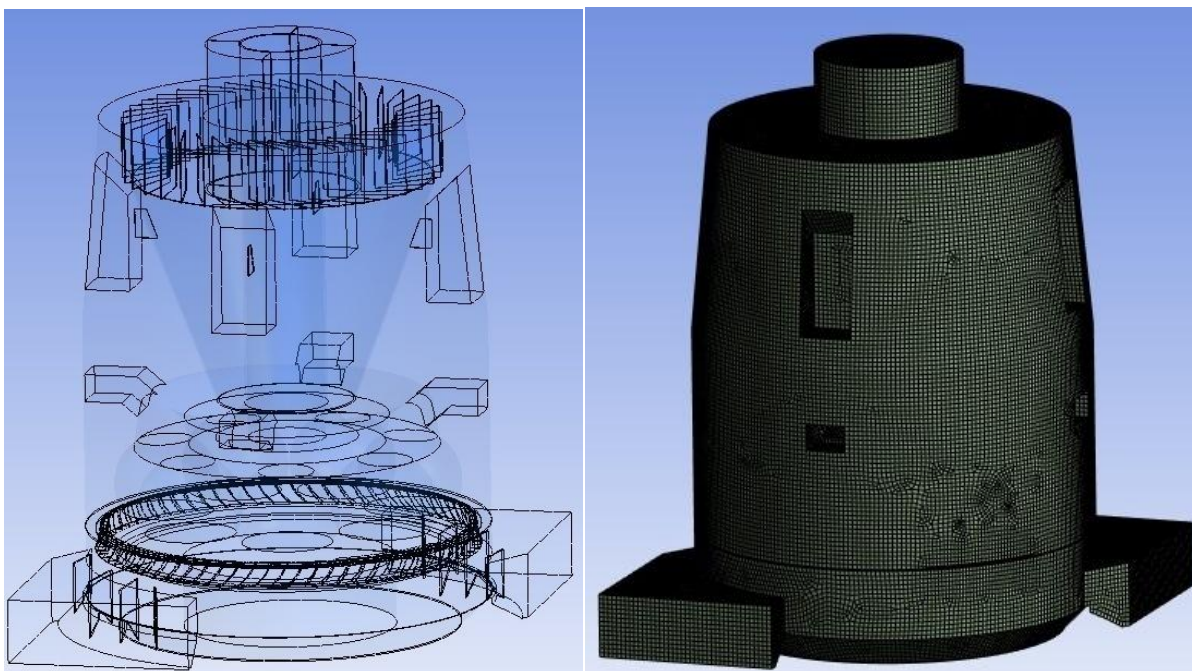
W Tab. 5.35 zestawiono wyniki badań *CFD* przepływu czynnika przez młyn dla następujących wariantów: wariantu bazowego i wariantu II modyfikacji geometrii pierścienia dyszowego.

Tab. 5.35. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu II charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego

Parametr	Symbol	Jednostka	bazowy	II
Wentylacja młyna	$V_1$	$\text{m}^3/\text{h}$	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,52	6,52
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	$^{\circ}\text{C}$	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	6,52
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$p_{31}$	kPa	2,3	3,52
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$w_{31}$	m/s	54 – 60	50 – 60
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$t_{31}$	$^{\circ}\text{C}$	106,4	108-180
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,28	3,0
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia dyszowego	$\zeta_{pd}$	-	3,13	2,2
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,15	2,8
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	$^{\circ}\text{C}$	106,4	104
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,15	2,7
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	$^{\circ}\text{C}$	100,1	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,38	2,03
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	$^{\circ}\text{C}$	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,14	4,49

Zastosowanie niewykonującego ruchu obrotowego pierścienia dyszowego z płaskimi łopatkami nie zmienia znacznie oporów przepływu czynnika przez pierścień dyszowy w stosunku do wariantu bazowego, lecz przełożyło się na zmniejszenie sumarycznych strat przepływu czynnika przez młyn. Ponadto jest to kolejny dowód potwierdzający postawioną w niniejszej pracy tezę, z której wynika że istnieje techniczna możliwość zmniejszenia stopnia zaawansowania konstrukcji pierścienia dyszowego uzyskując przy tym pożądany efekt dotyczący zmniejszenia oporów przepływu czynnika przez młyn oraz uzyskania równomiernego profilu przepływu czynnika w poszczególnych elementach młyna. W stosunku do poprzedniego wariantu ten charakteryzuje się nieco niższą prędkością wylotową i mniejszymi oporami przepływu czynnika przez pierścień dyszowy.

Na Rys. 5.24 przedstawiono kolejny wariant modelu numerycznego przemysłowego młyna miazdzącego. Model ten charakteryzuje się pierścieniem dyszowym z łopatkami zakrzywionymi, usytuowanymi promieniowo – kierunek ustawienia łopatek I. Wspomniany wyżej pierścień dyszowy wykonuje ruch obrotowy. Natomiast na po prawej przedstawiono siatkę modelu *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego dla III wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



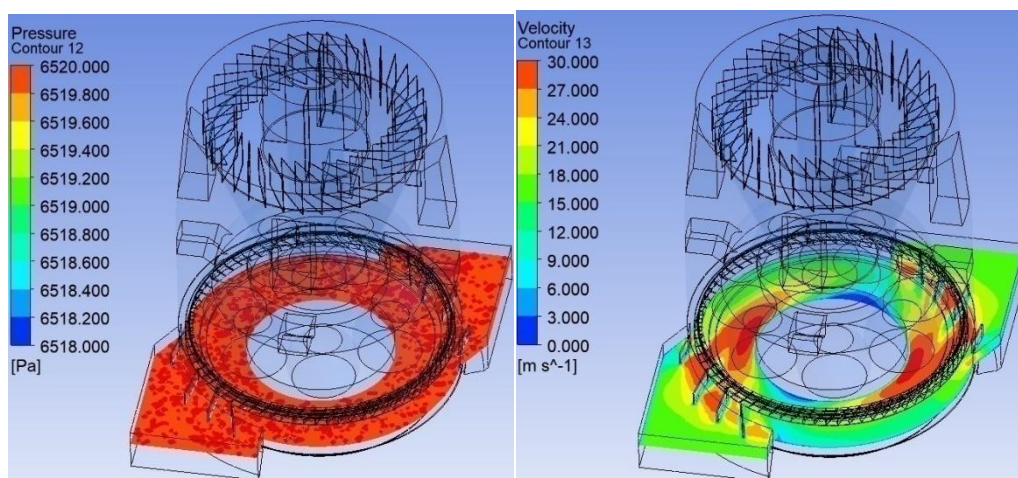
Rys. 5.24. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III

W Tab. 5.36 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu III zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

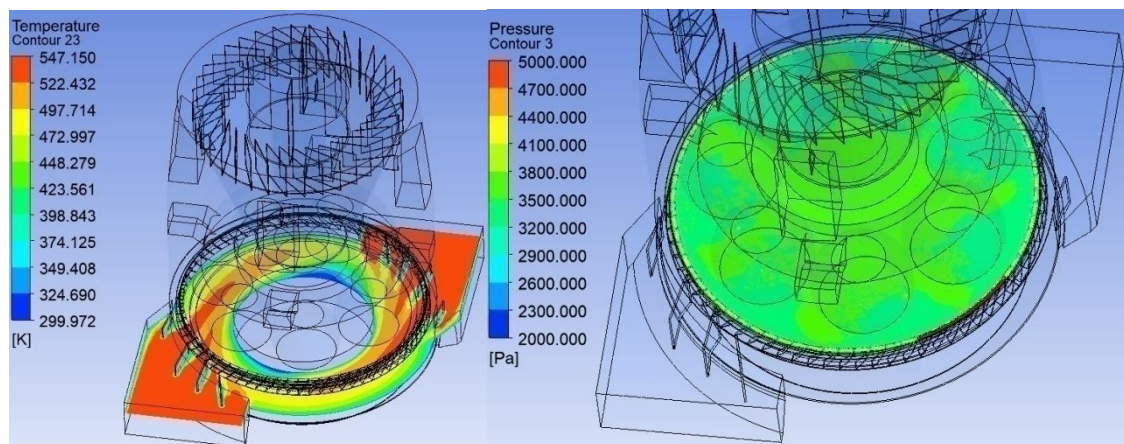
Tab. 5.36. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III

Liczba elementów siatki	1 383008
Liczba węzłów siatki	1 111416

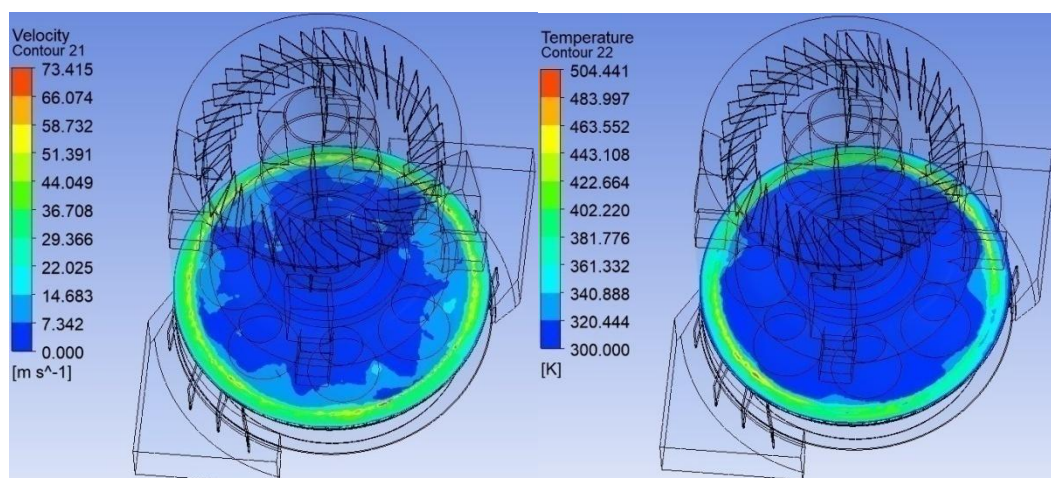
Na Rys. 5.25 do Rys. 5.32 przedstawiono wyniki badań *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego dla III wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



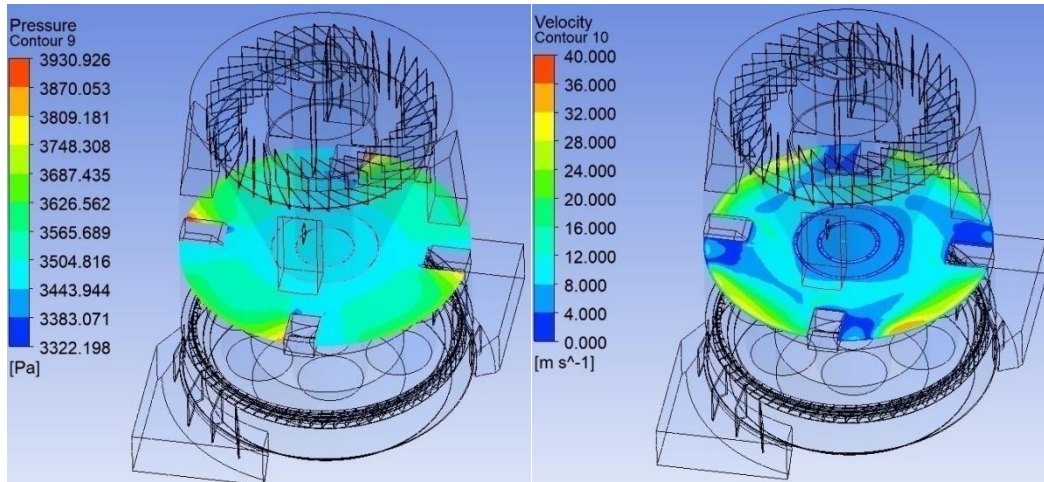
Rys. 5.25. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III



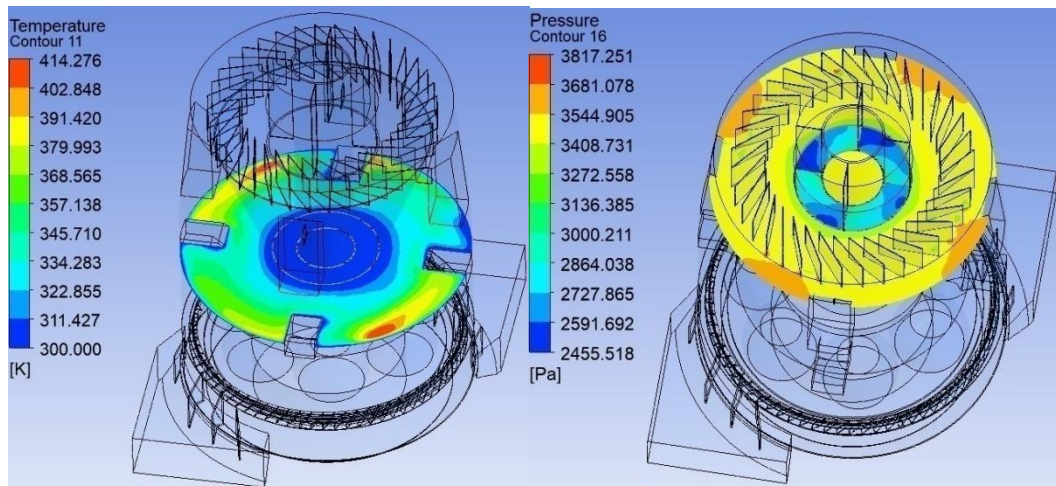
Rys. 5.26. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III



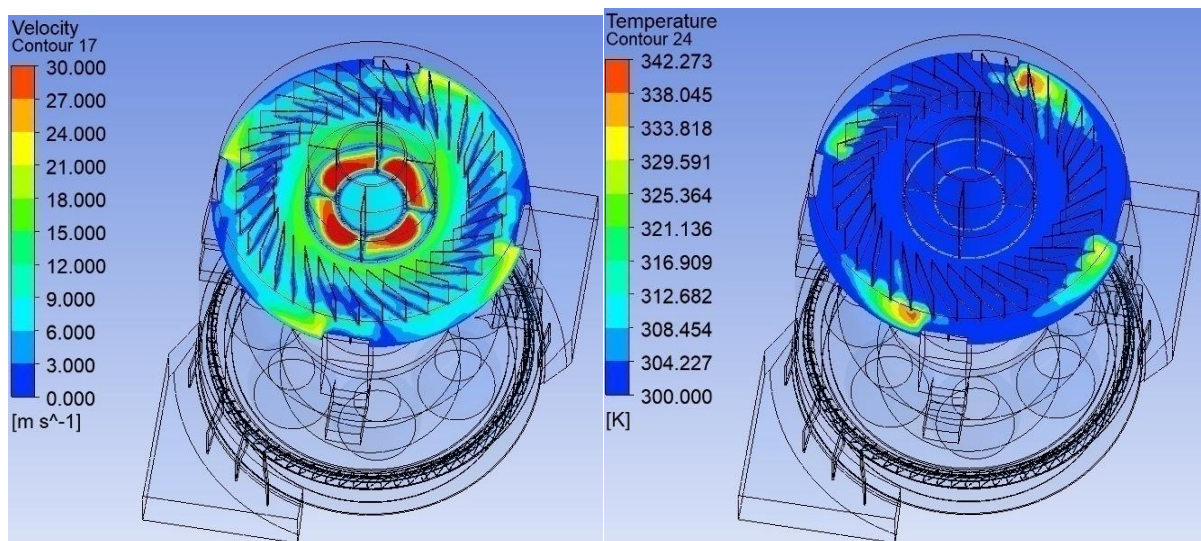
Rys. 5.27. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III



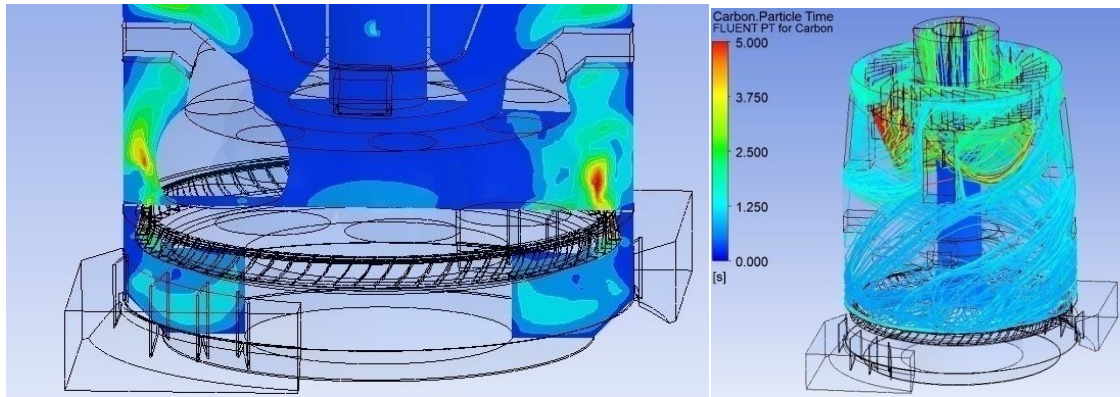
Rys. 5.28. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III



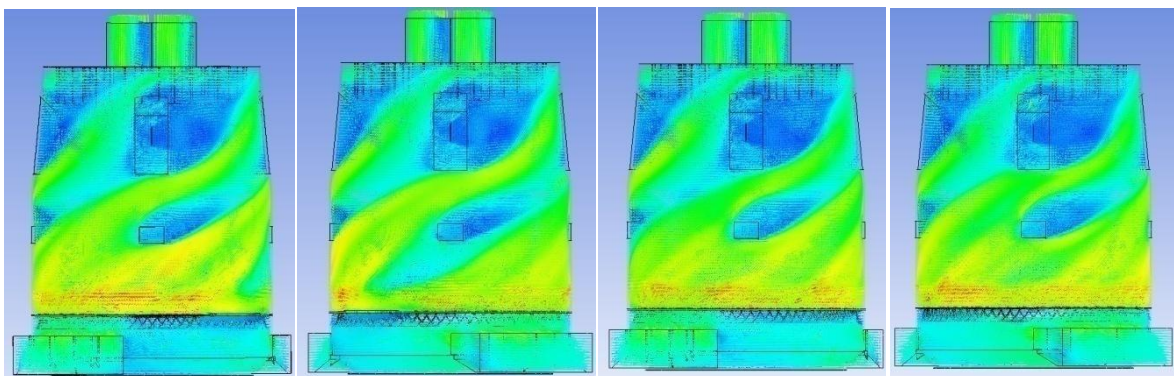
Rys. 5.29. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III



Rys. 5.30. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III



Rys. 5.31. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant III



Rys. 5.32. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant III

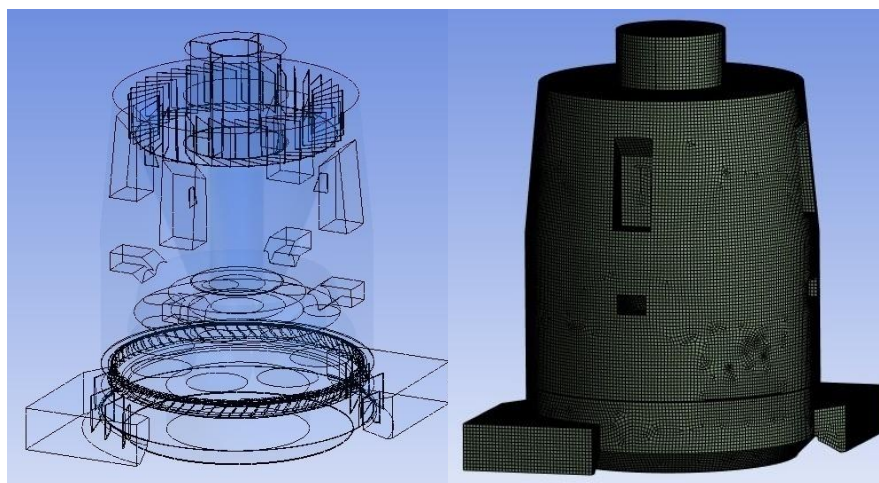
W Tab. 5.37 zestawiono wyniki badań *CFD* przepływu czynnika przez młyn dla następujących wariantów: wariantu bazowego i wariantu III modyfikacji geometrii pierścienia dyszewego.

Tab. 5.37. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu III charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszewego

Parametr	Symbol	Jednostka	bazowy	III
Wentylacja młyna	$V_1$	$\text{m}^3/\text{h}$	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,52	6,52
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	$^{\circ}\text{C}$	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	6,52
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym	$p_{31}$	kPa	2,3	3,65
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym	$w_{31}$	m/s	54 – 60	54 – 66
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym	$t_{31}$	$^{\circ}\text{C}$	106,4	108-129
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszewy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,28	2,9
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia	$\zeta_{pd}$	-	3,13	1,79

dyszowego				
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,15	3,46
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	106,4	106
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,15	3,46
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	100,1	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,38	2,75
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,14	3,77

Zastosowanie wykonującego ruch obrotowy pierścienia dyszowego z łopatkami zakrzywionymi, usytuowanymi promieniowo zmniejsza opory przepływu czynnika przez pierścień dyszowy w stosunku do wariantu bazowego oraz wpłynęło na zmniejszenie sumarycznych strat przepływu czynnika przez młyn. Ponadto jest to następny dowód potwierdzający postawioną w niniejszej pracy tezę, z której wynika, że istnieje techniczna możliwość zmniejszenia stopnia zaawansowania konstrukcji pierścienia dyszowego uzyskując przy tym pożądany efekt dotyczący zmniejszenia oporów przepływu czynnika przez młyn oraz uzyskania równomiernego profilu przepływu czynnika w poszczególnych elementach młyna. Ten wariant charakteryzuje się niższymi oporami przepływu czynnika przez pierścień dyszowy oraz przez cały młyn w stosunku do wariantu bazowego i przedstawionych wariantów od I do III. Natomiast wariant ten charakteryzuje się wyższą zdolnością do unoszenia cząsteczek pyłu węglowego w stosunku do poprzednich wariantów przedstawionych w tym rozdziale z wariantem bazowym włącznie. Na Rys. 5.33 po lewej przedstawiono następny wariant modelu numerycznego przemysłowego młyna miazdzącego. Model ten charakteryzuje się pierścieniem dyszowym z łopatkami zakrzywionymi, usytuowanymi promieniowo – kierunek ustawienia łopatek I. Wspomniany wyżej pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego. Natomiast po prawej przedstawiono siatkę modelu *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego dla IV wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



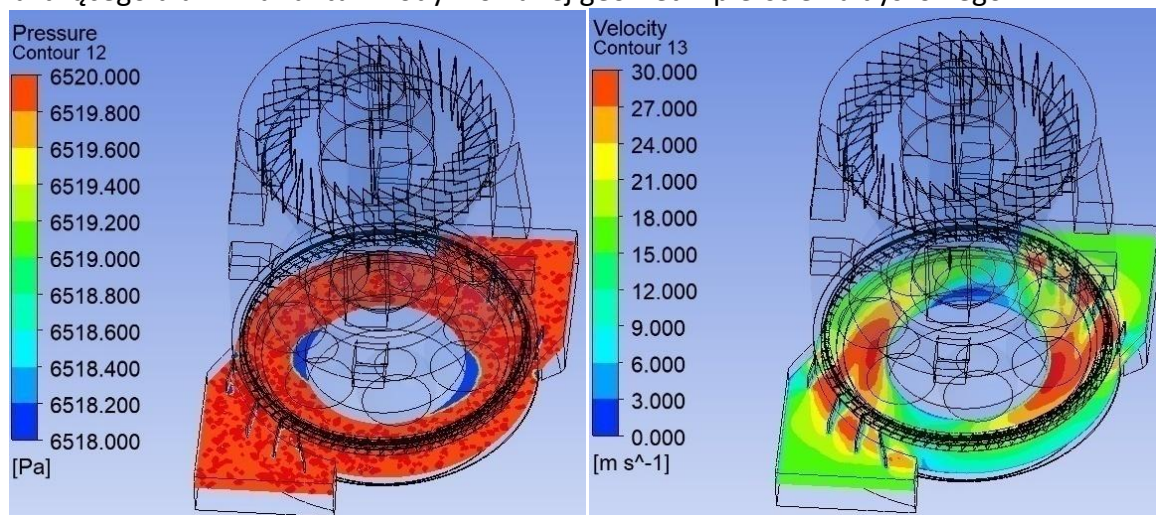
Rys. 5.33. Model *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV

W Tab. 5.38 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu IV zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

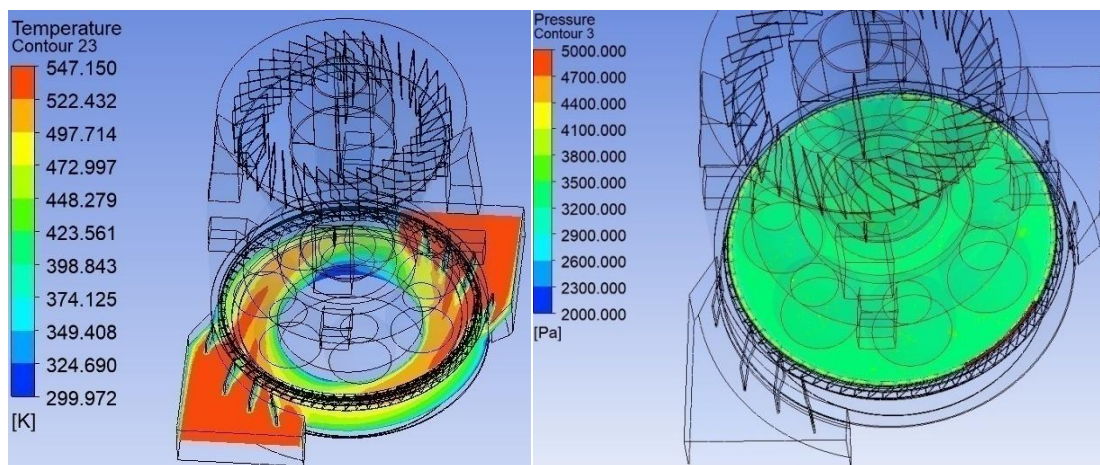
Tab. 5.38. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV

Liczba elementów siatki	1 383 008
Liczba węzłów siatki	1 111 416

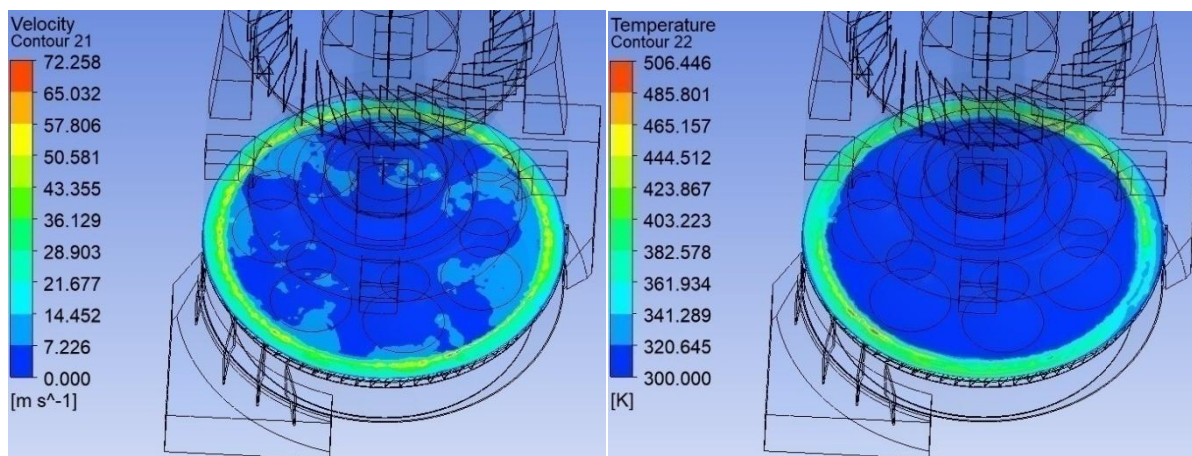
Na Rys. 5.34 do Rys. 5.41 przedstawiono wyniki badań *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego dla IV wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



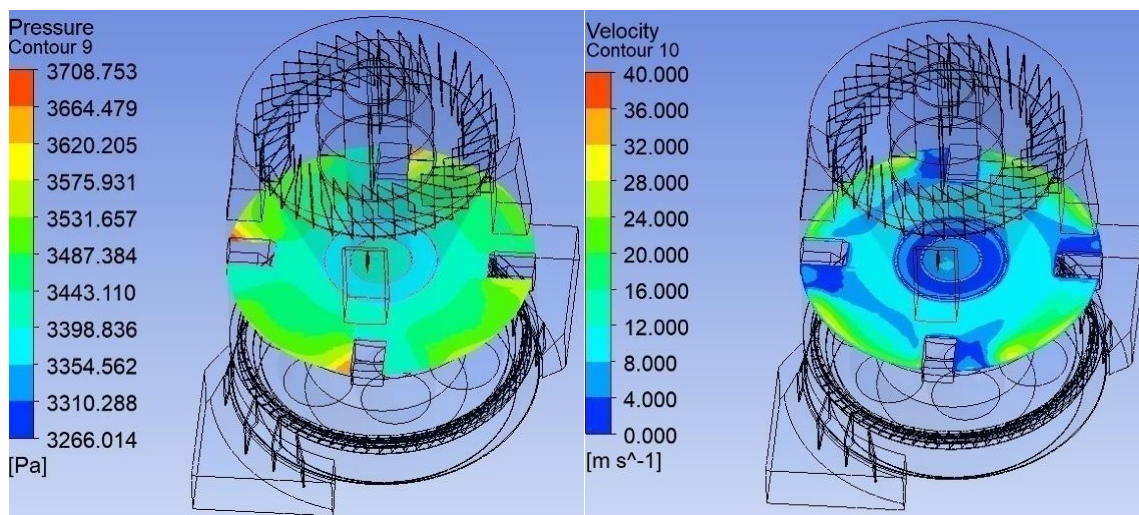
Rys. 5.34. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV



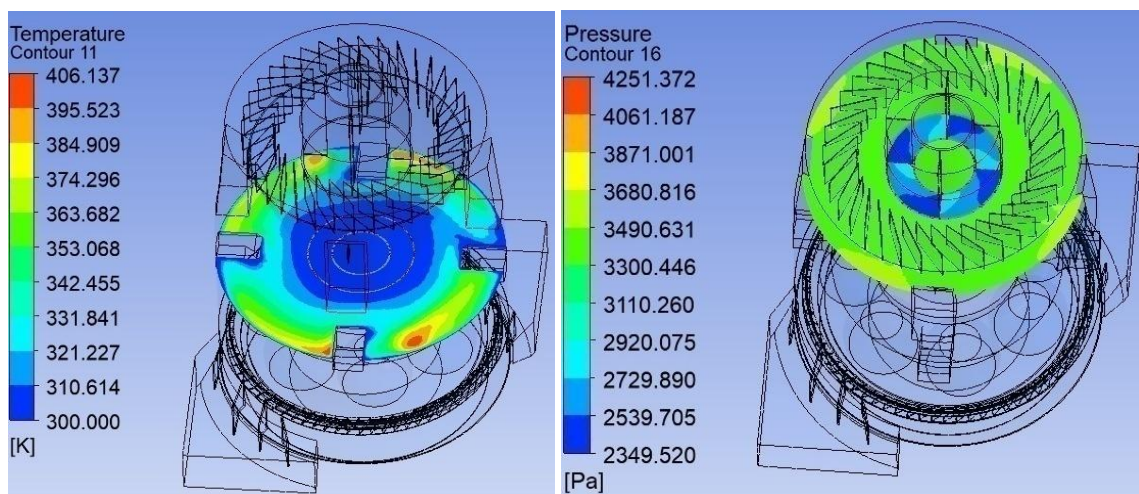
Rys. 5.35. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV



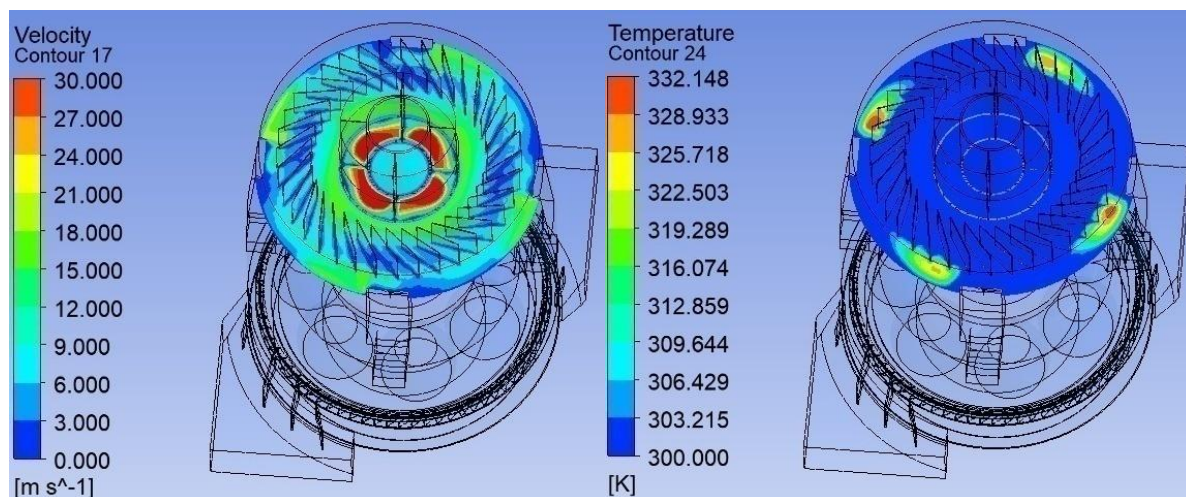
Rys. 5.36. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dysowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dysowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dysowego – wariant IV



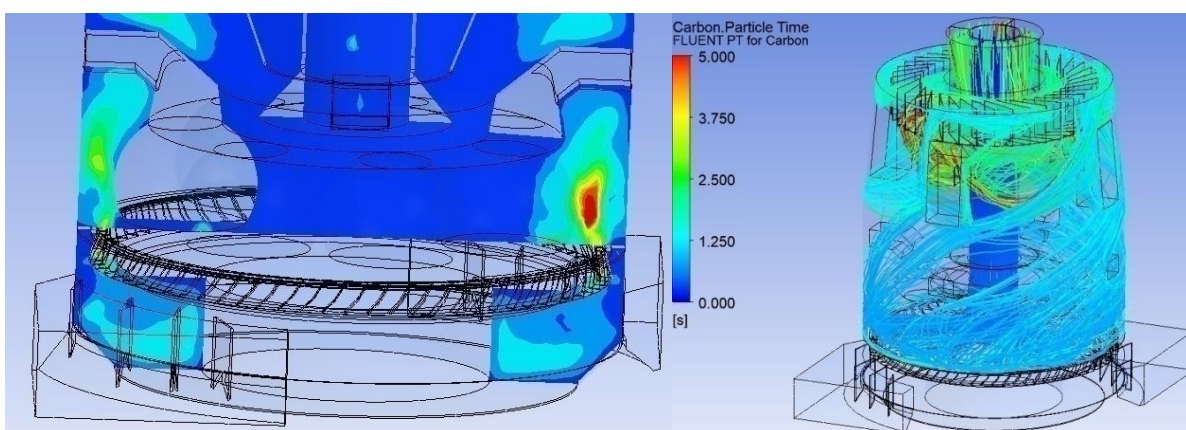
Rys. 5.37. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dysowego – wariant IV



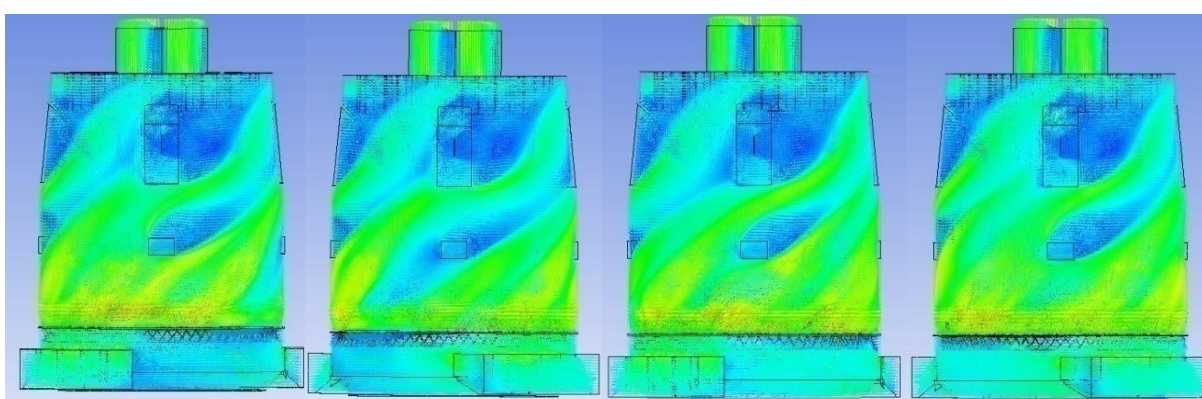
Rys. 5.38. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dysowego – wariant IV



Rys. 5.39. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV



Rys. 5.40. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV



Rys. 5.41. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV

W

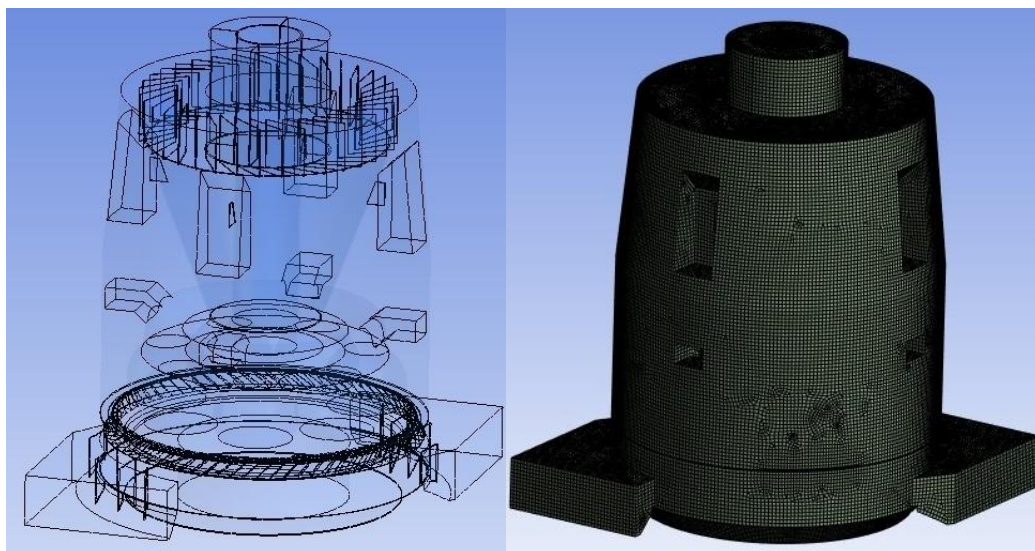
Tab. 5.39 zestawiono wyniki badań *CFD* przepływu czynnika przez młyn dla następujących wariantów: wariantu bazowego i wariantu IV modyfikacji geometrii pierścienia dyszowego.

Tab. 5.39. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu IV charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego

Parametr	Symbol	Jednostka	bazowy	IV
Wentylacja młyna	$V_1$	$m^3_n/h$	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,52	6,52
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	°C	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	6,52
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$p_{31}$	kPa	2,3	3,72
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$w_{31}$	m/s	54 – 60	50 – 57
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$t_{31}$	°C	106,4	109-150
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,28	2,8
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia dyszowego	$\zeta_{pd}$	-	3,13	2,13
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,15	3,42
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	106,4	106
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,15	3,40
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	100,1	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,38	2,6
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,14	3,92

Zastosowanie niewykonującego ruchu obrotowego pierścienia dyszowego z łopatkami zakrzywionymi, usytuowanymi promieniowo zmniejsza opory przepływu czynnika przez pierścień dyszowy w stosunku do wariantu bazowego oraz wpłynęło na zmniejszenie sumarycznych strat przepływu czynnika przez młyn. Ponadto jest to następny dowód na potwierdzenie postawionej tezy w niniejszej pracy. Opory przepływu strumienia powietrza przez pierścień dyszowy są niższe niż w poprzednim wariantcie natomiast uzyskane prędkości przepływu w przekroju wylotowym pierścienia dyszowego są niższe, zbliżone do określonych w ramach badań wariantu bazowego geometrii pierścienia dyszowego.

Na Rys. 5.42 przedstawiono kolejny wariant modelu numerycznego przemysłowego młyna miazdzącego, na którym dokonano badań numerycznych.



Rys. 5.42. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V

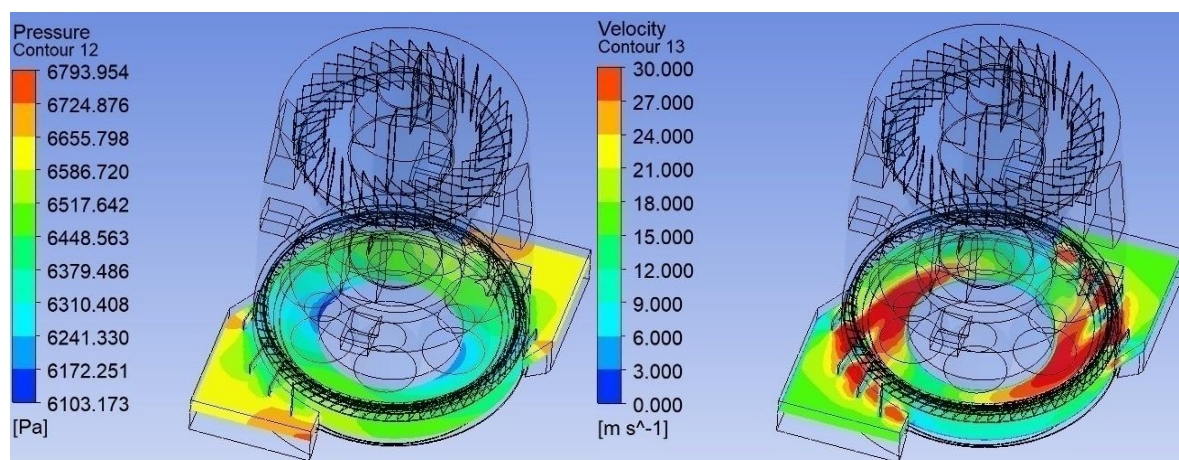
Model ten charakteryzuje się pierścieniem dyszowym z łopatkami płaskimi usytuowanymi pod pewnym kątem w stosunku do poziomu – kierunek ustawienia łopatek I. Ponadto powiększono kąt rozwarcia dyszy w przekroju wlotowym pierścienia dyszowego o 67% w stosunku do wariantu bazowego. Wspomniany wyżej pierścień dyszowy wykonuje ruch obrotowy. Natomiast po prawej przedstawiono siatkę modelu *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego dla V wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

W Tab. 5.40 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu V zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

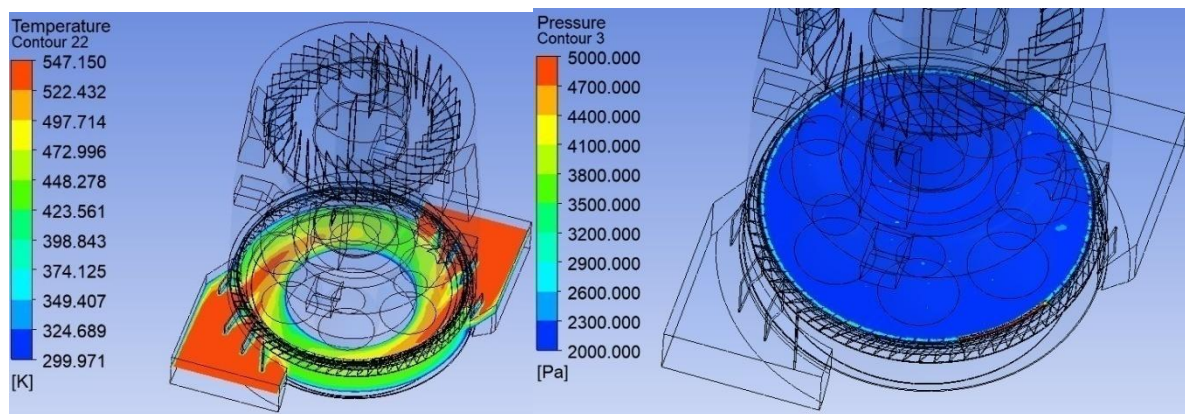
Tab. 5.40. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V

Liczba elementów siatki	1 896 296
Liczba węzłów siatki	1 409 372

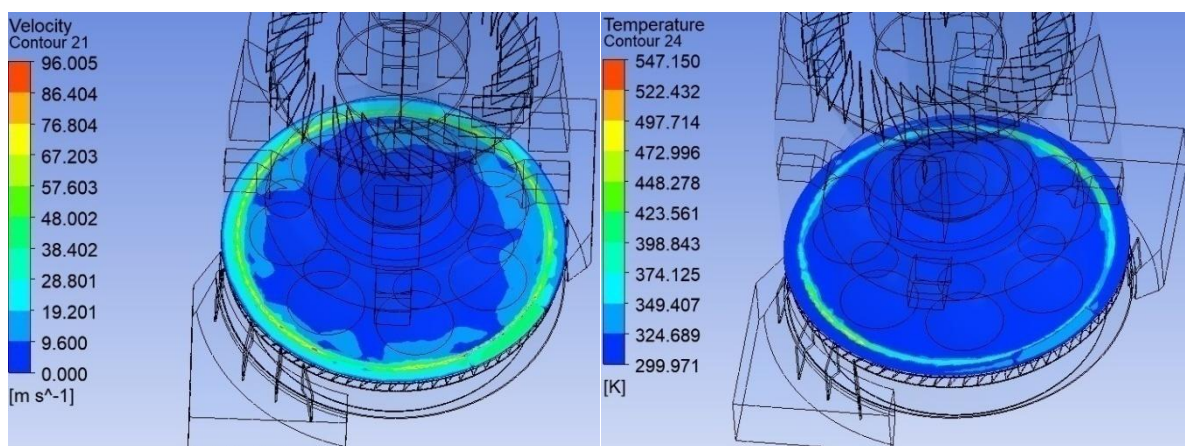
Na Rys. 5.43 do Rys. 5.50 przedstawiono wyniki badań *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego dla V wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



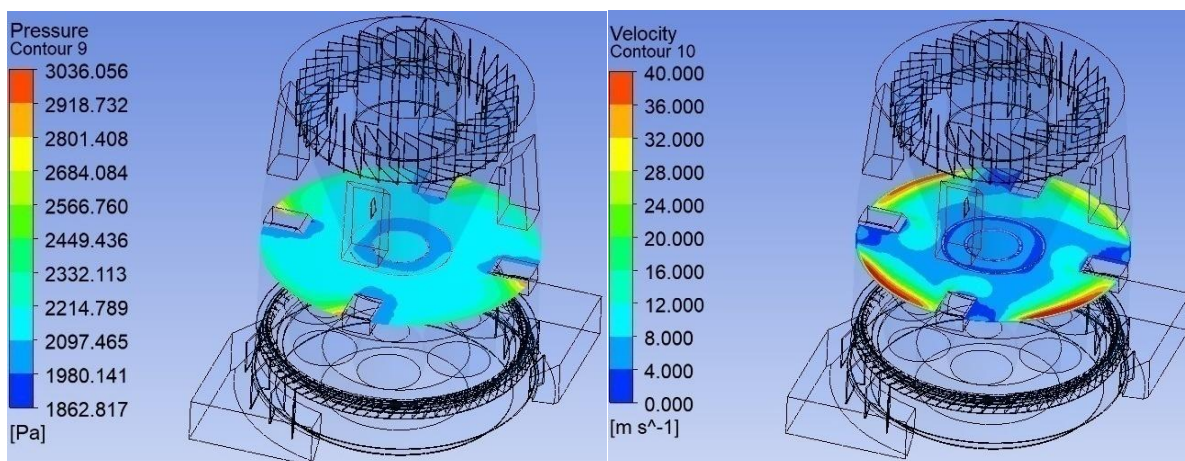
Rys. 5.43. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V



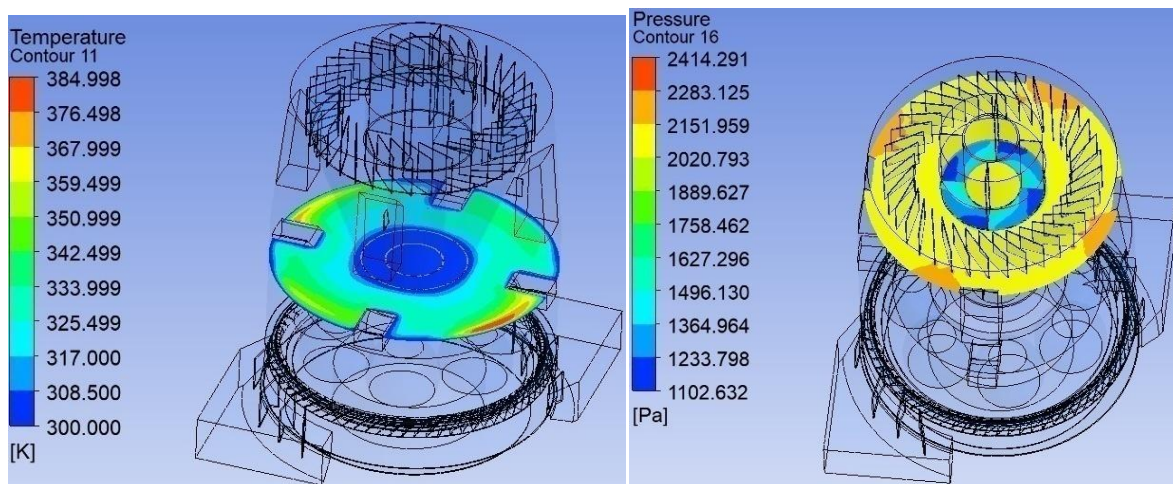
Rys. 5.44. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna( po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V



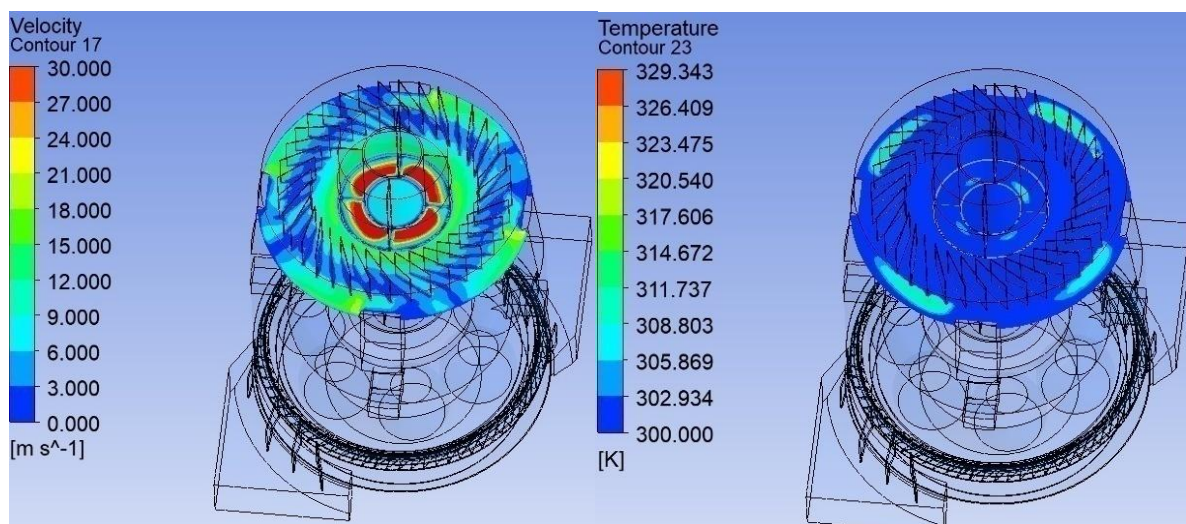
Rys. 5.45. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V



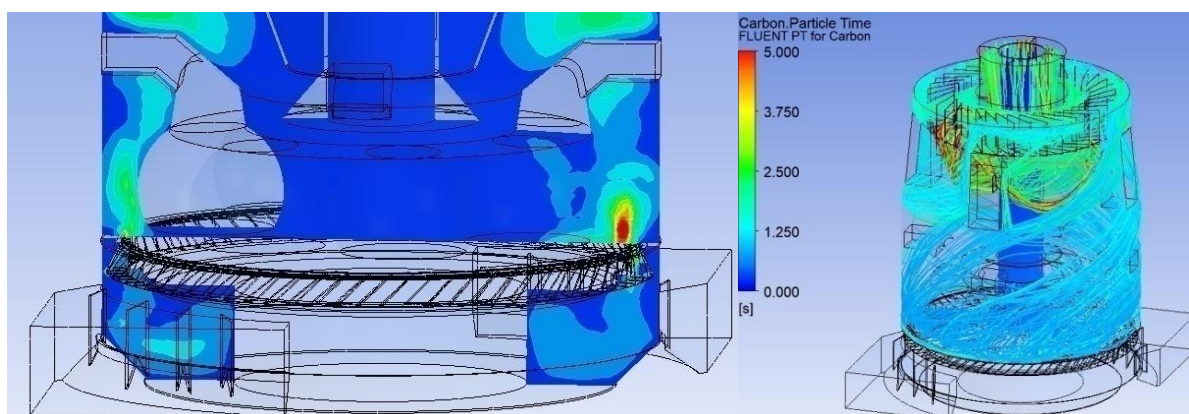
Rys. 5.46. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V



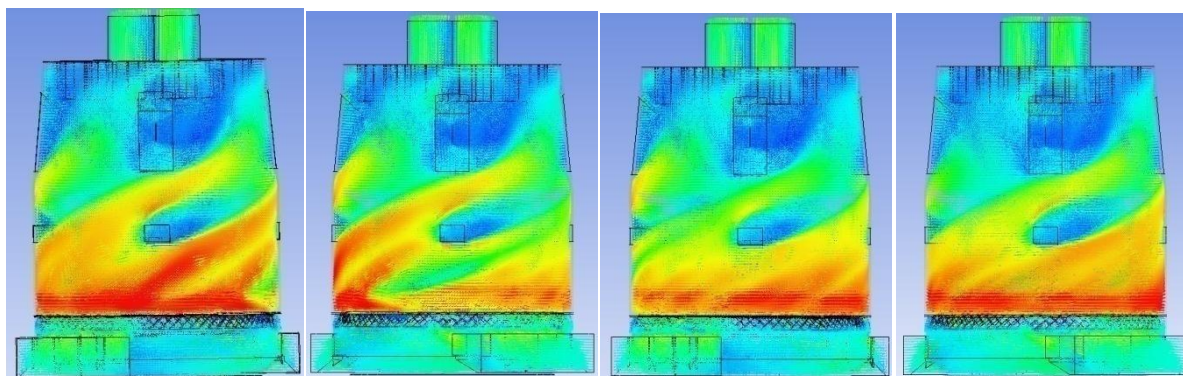
Rys. 5.47. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant V



Rys. 5.48. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant V



Rys. 5.49. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant V



Rys. 5.50. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V

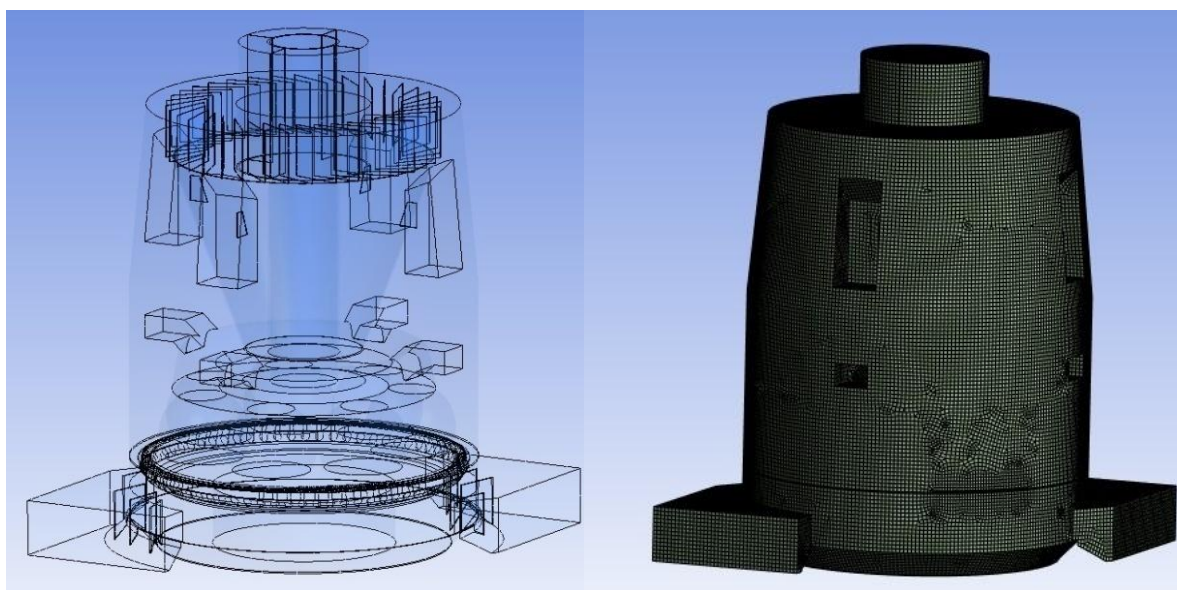
W Tab. 5.41 zestawiono wyniki badań *CFD* przepływu czynnika przez młyn dla następujących wariantów: wariantu bazowego i wariantu V modyfikacji geometrii pierścienia dyszowego.

Tab. 5.41. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu V charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego

Parametr	Symbol	Jednostka	bazowy	V
Wentylacja młyna	$V_1$	$m^3_n/h$	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,52	6,63
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	°C	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	5,83
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$p_{31}$	kPa	2,3	2,93
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$w_{31}$	m/s	54 – 60	57 – 83
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$t_{31}$	°C	106,4	106-150
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,28	2,9
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia dyszowego	$\zeta_{pd}$	-	3,13	1,39
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,15	2,1
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	106,4	106
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,15	2,08
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	100,1	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,38	1,42
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,14	5,21

Zastosowanie wykonującego ruch obrotowy pierścienia dyszowego z łopatkami płaskimi usytuowanymi pod pewnym kątem w stosunku do poziomu – kierunek ustawienia łopatek I oraz z powiększonym kątem rozwarcia dyszy w przekroju wlotowym pierścienia dyszowego o 67% w stosunku do wariantu bazowego zmniejsza opory przepływu czynnika przez pierścień dyszowy w stosunku do wariantu bazowego, lecz nie przełożyło się na zmniejszenie sumarycznych strat przepływu czynnika przez młyn. Ponadto jest to następny dowód potwierdzający postawioną w niniejszej pracy tezę, z której wynika, że istnieje techniczna możliwość modyfikacji konstrukcji pierścienia dyszowego uzyskując przy tym pożądany efekt dotyczący zmniejszenia oporów przepływu czynnika przez pierścień dyszowy (i co za tym idzie przez młyn) oraz uzyskania równomiernego profilu przepływu czynnika nie tylko w komorze młyna, ale również w poszczególnych elementach młyna. Natomiast w odniesieniu do poprzedniego wariantu wzrosły opory przepływu powietrza przez pierścień dyszowy oraz wynikowo również przez cały młyn. Jest to spowodowane uzyskaniem wyższych prędkości przepływu strumienia powietrza przez pierścień dyszowy w stosunku do poprzedniego wariantu oraz wariantu bazowego.

Zmieniając dotychczasową prezentowaną geometrię pierścienia dyszowego wpływało na zmianę prędkości przepływu strumienia powietrza przez pierścień dyszowy w jego przekroju wylotowym, natomiast współczynnik miejscowego oporu przepływu przez wspomniany pierścień dyszowy zmieniał się w stopniu niewystarczającym, aby jednoznacznie stwierdzić, że podjęte działania były skuteczne. Konsekwencją tego był znaczny wzrost oporów przepływu przez pierścień dyszowy, gdy uzyskano wyższą zdolność do wynoszenia cząsteczek pyłu. Dlatego w kolejnych wariantach skupiono się na zminimalizowaniu współczynnika oporów miejscowych przepływu powietrza przez pierścień dyszowy. Na Rys. 5.51 po lewej, przedstawiono kolejny wariant modelu numerycznego przemysłowego młyna miazdzącego. Model ten charakteryzuje się umieszczeniem pierścienia dyszowego z całkowicie odmienną koncepcją geometryczną niż prezentowaną do tej pory i odpowiada modelowi 2.5, który został poddany badaniom na stanowisku laboratoryjnym. Wspomniany wyżej pierścień dyszowy wykonuje ruch obrotowy. Natomiast po prawej przedstawiono siatkę modelu *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego dla VI wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



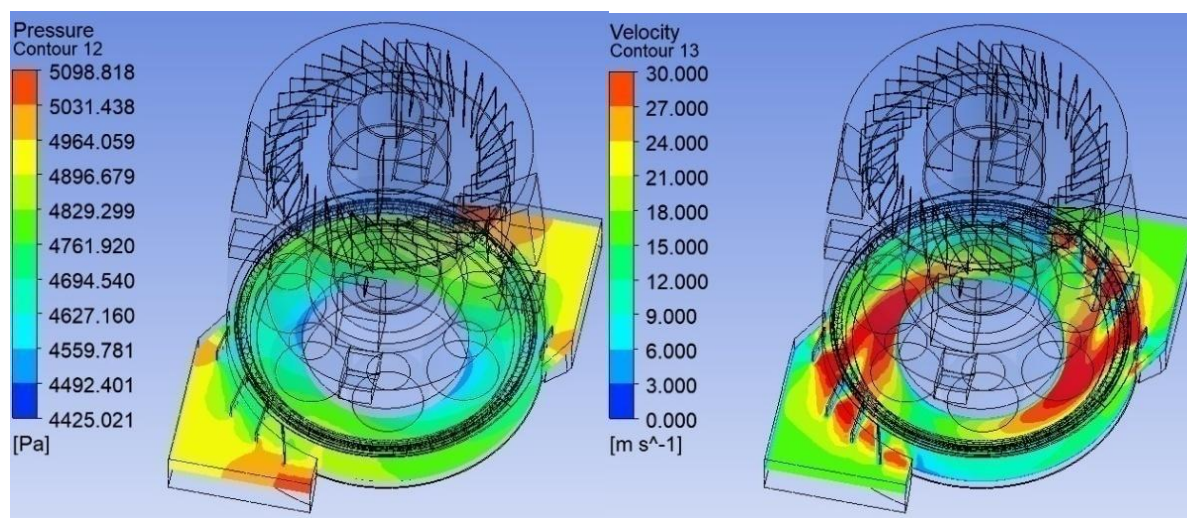
Rys. 5.51. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI

W Tab. 5.42 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu VI zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

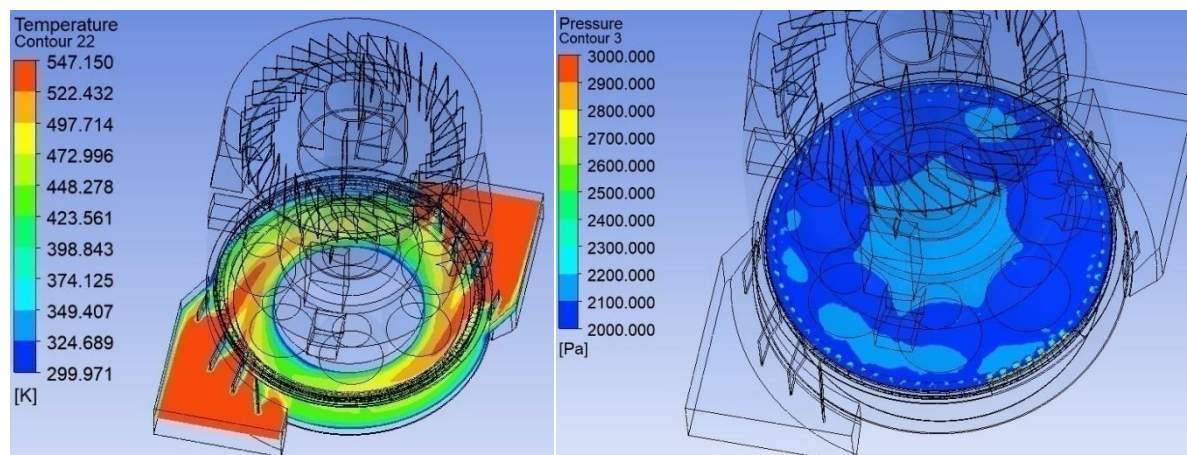
Tab. 5.42. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI

Liczba elementów siatki	1 779940
Liczba węzłów siatki	1 630099

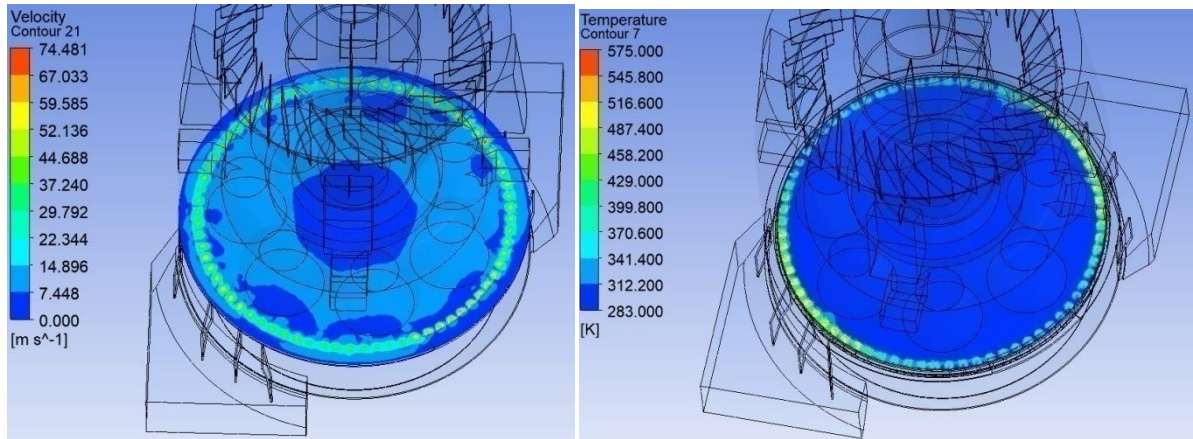
Na Rys. 5.52 do Rys. 5.59 przedstawiono wyniki badań *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego dla VI wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



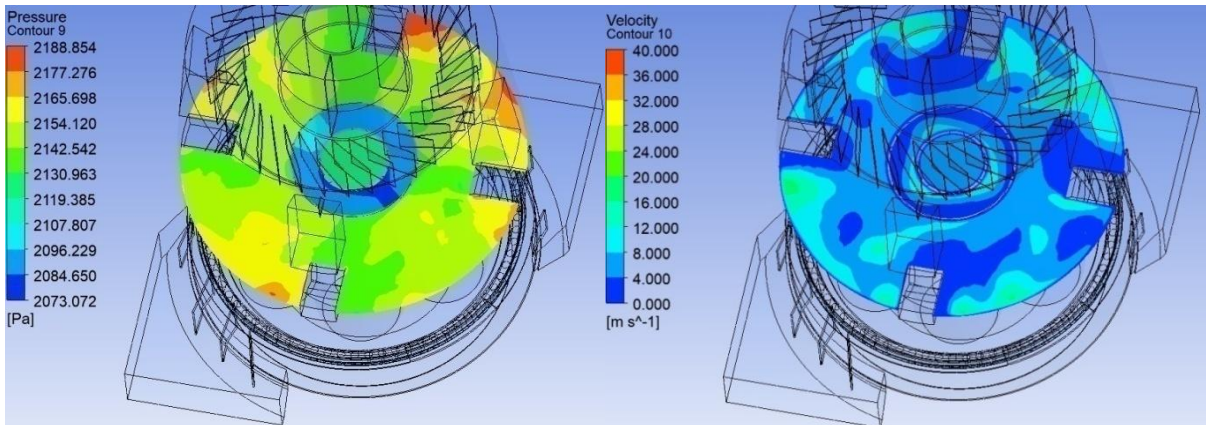
Rys. 5.52. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI



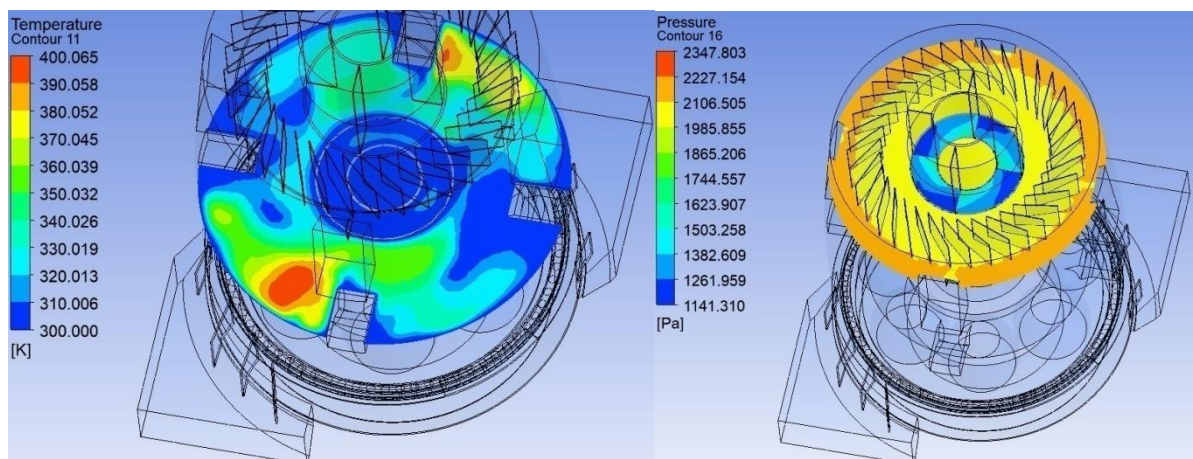
Rys. 5.53. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI



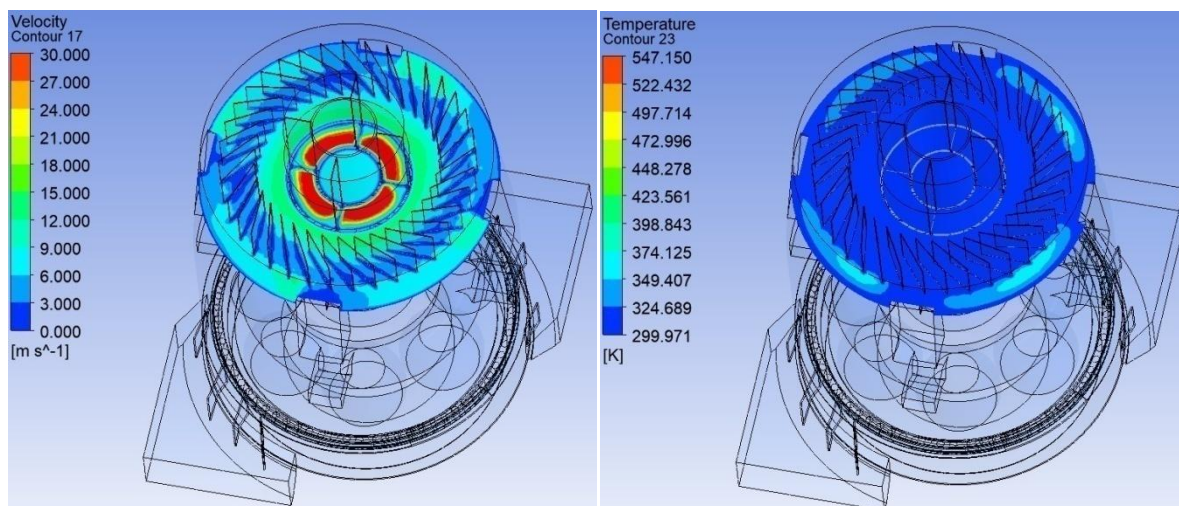
Rys. 5.54. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI



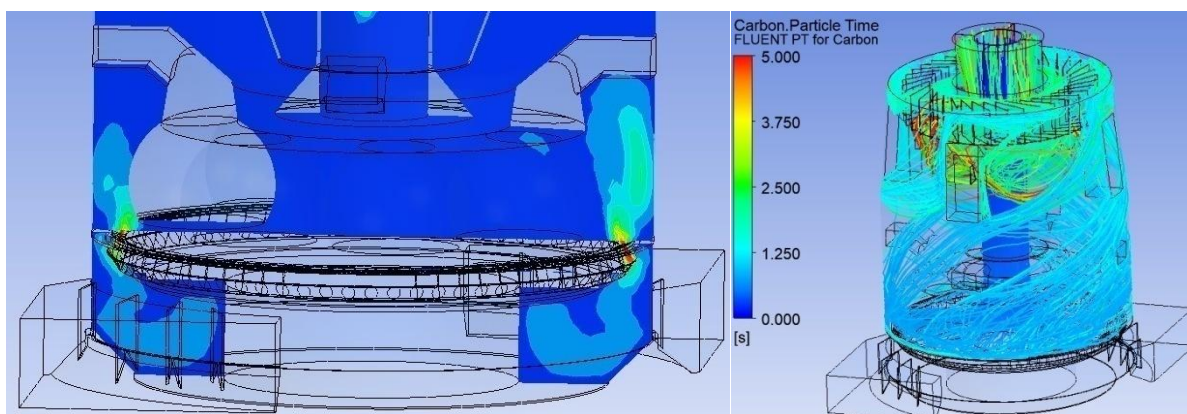
Rys. 5.55. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI



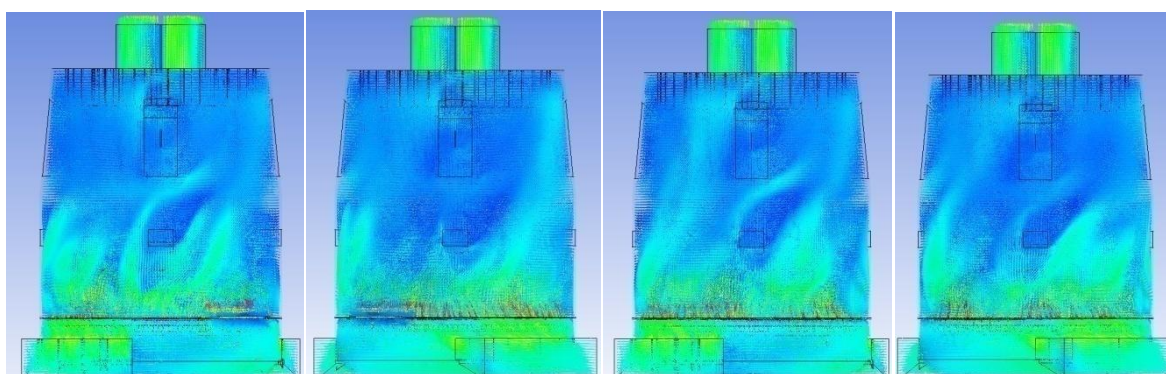
Rys. 5.56. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI



Rys. 5.57. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI



Rys. 5.58. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI



Rys. 5.59. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI

W Tab. 5.43 zestawiono wyniki badań *CFD* przepływu czynnika przez młyn dla następujących wariantów: wariantu bazowego i wariantu VI modyfikacji geometrii pierścienia dyszowego.

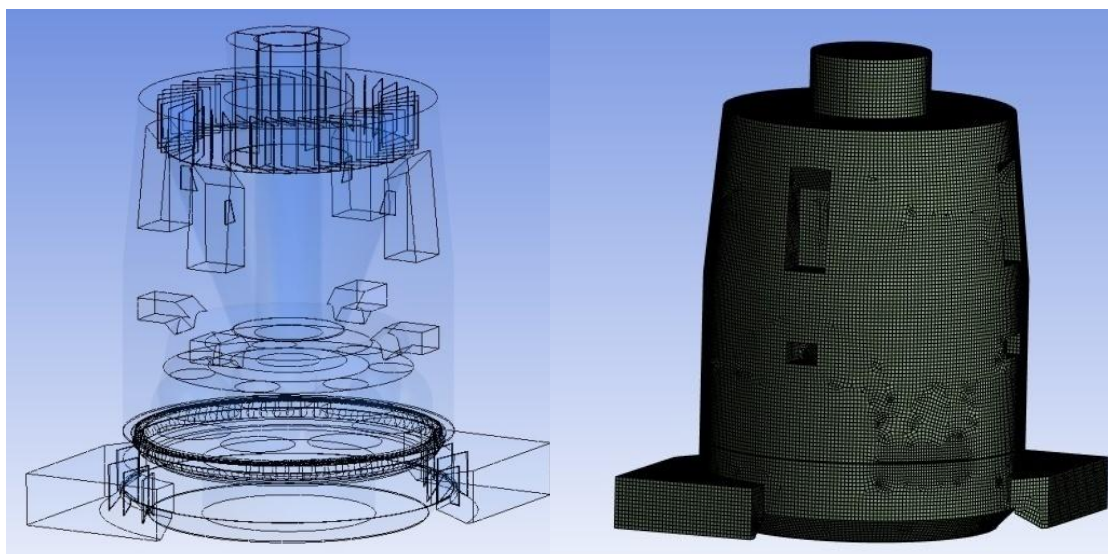
Tab. 5.43. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu VI charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego

Parametr	Symbol	Jednostka	bazowy	VI
Wentylacja młyna	$V_1$	$m^3_n/h$	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,52	4,98
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	°C	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	4,41
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$p_{31}$	kPa	2,3	2,3
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$w_{31}$	m/s	54 – 60	52 – 59
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$t_{31}$	°C	106,4	106-134
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,28	2,11
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia dyszowego	$\zeta_{pd}$	-	3,13	1,50
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,15	2,15
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	106,4	106
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,15	2,14
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	100,1	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,38	1,38
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,14	3,60

Zastosowanie wykonującego ruch obrotowy pierścienia dyszowego z całkowicie odmienną koncepcją geometryczną znacznie zmniejsza opory przepływu czynnika przez pierścień dyszowy oraz przez cały młyn w stosunku do wariantu bazowego. Ponadto obniżono współczynnik oporu miejscowego przepływu powietrza przez pierścień dyszowy, natomiast prędkości przepływu powietrza w przekroju wylotowym pierścienia dyszowego są na zbliżonym poziomie w porównaniu do prezentowanego wcześniej wariantu bazowego. Z kolei profile przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej na obwodzie młyna i odsiewacza są bardziej korzystne zarówno dla ciśnienia jak i prędkości w stosunku do wyjściowego wariantu. Dlatego wyniki badań wariantu VI również potwierdzają postawioną w niniejszej pracy tezę, z której wynika, że istnieje techniczna możliwość zmniejszenia stopnia zaawansowania konstrukcji pierścienia dyszowego uzyskując przy tym pożądaną efekt dotyczący zmniejszenia oporów przepływu czynnika przez młyn oraz uzyskania równomiernego profilu przepływu czynnika w poszczególnych elementach młyna.

Na Rys. 5.60 po lewej przedstawiono kolejny wariant modelu numerycznego przemysłowego młyna miazdzącego. Model ten charakteryzuje się umieszczeniem pierścienia dyszowego z koncepcją geometryczną jak w poprzednim wariantcie. Natomiast

pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego. Z kolei po prawej przedstawiono siatkę modelu *CFD* przemysłowego młyna miażdżącego dla VII wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



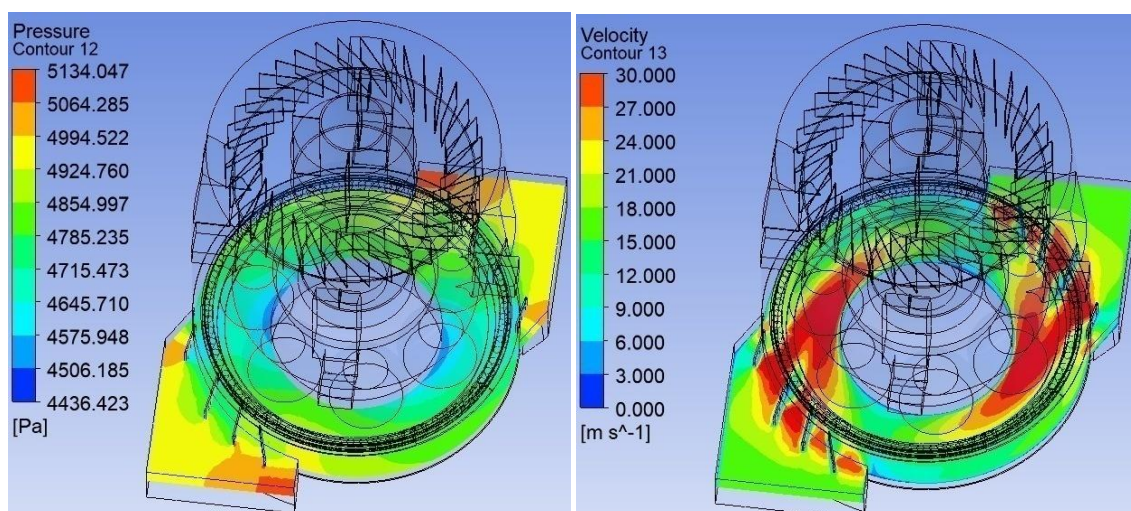
Rys. 5.60. Model *CFD* przemysłowego młyna miażdżącego (po lewej), siatka modelu *CFD* przemysłowego młyna miażdżącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII

W Tab. 5.44 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu VII zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

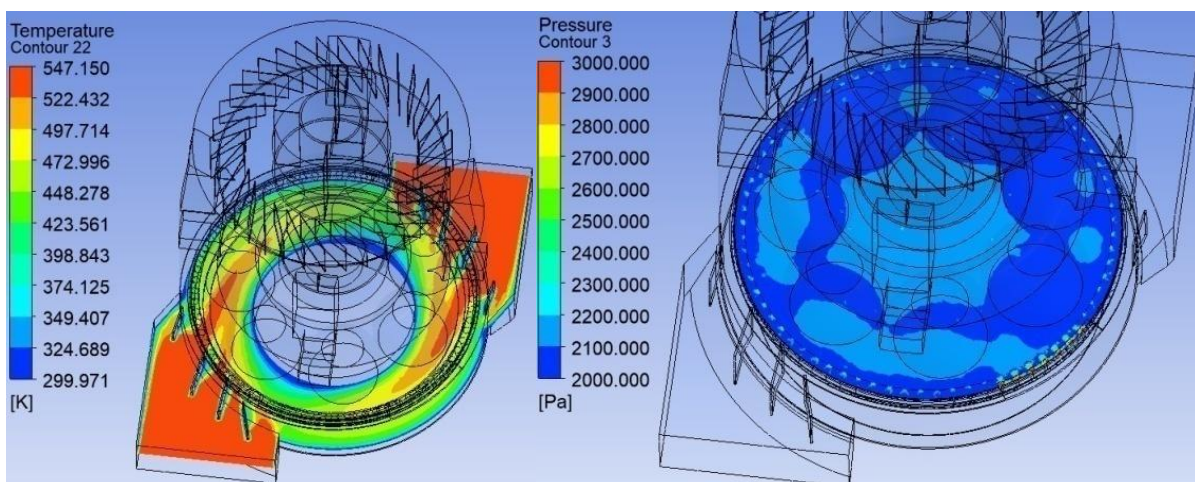
Tab. 5.44. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII

Liczba elementów siatki	1 779 940
Liczba węzłów siatki	1 630 099

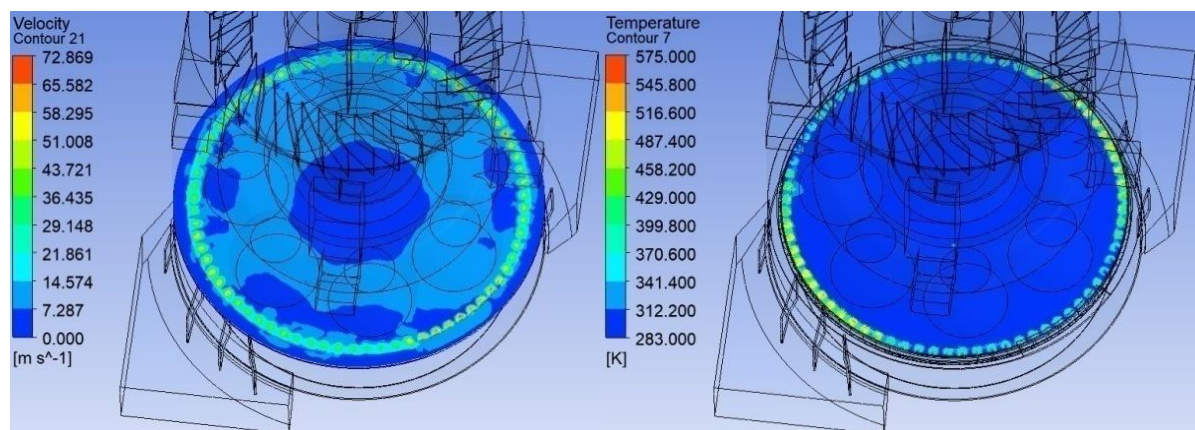
Na Rys. 5.61 do Rys. 5.68 przedstawiono wyniki badań *CFD* przemysłowego młyna miażdżącego dla VII wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



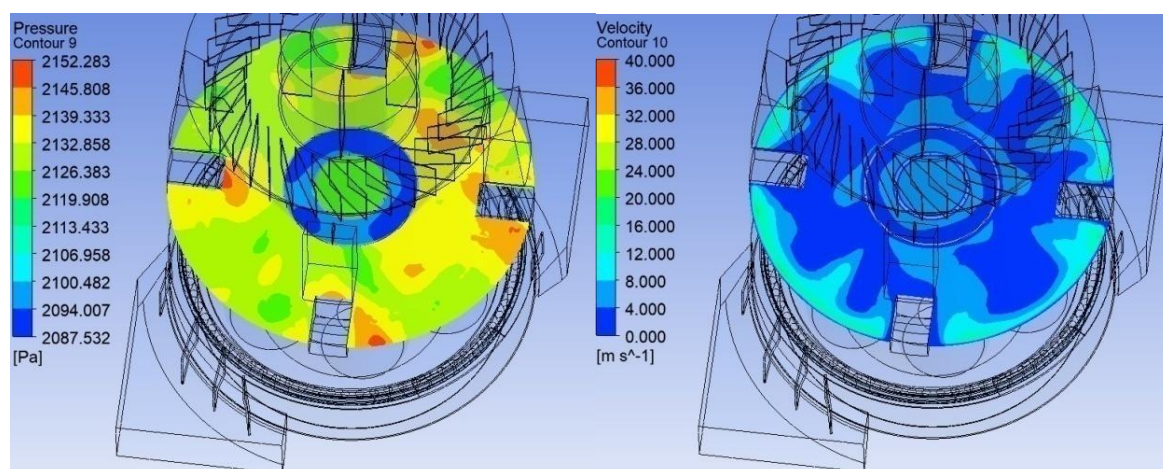
Rys. 5.61. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII



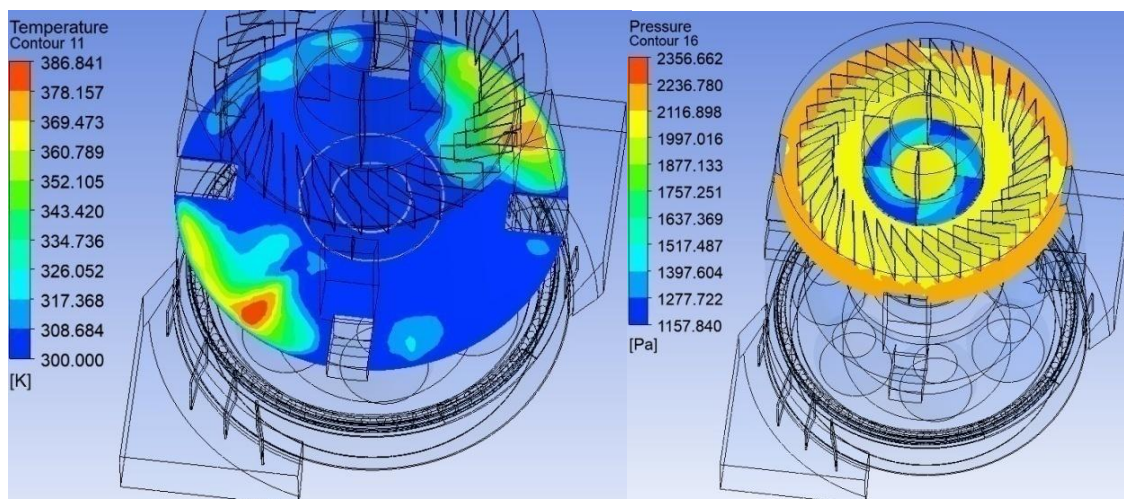
Rys. 5.62. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII



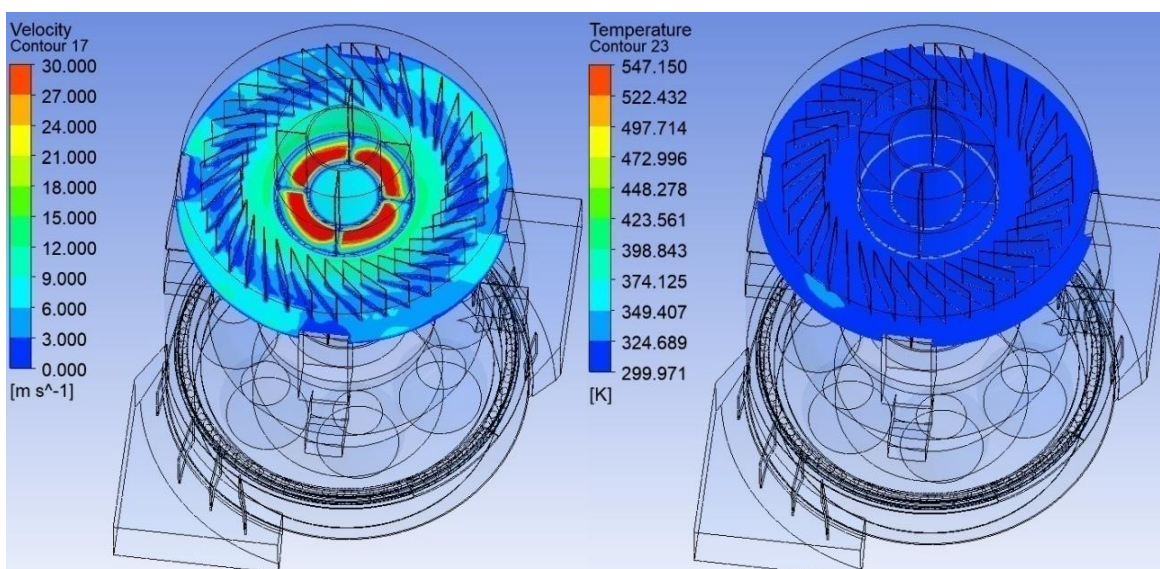
Rys. 5.63. Rozkład prędkości czynnika panujący w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panujący w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII



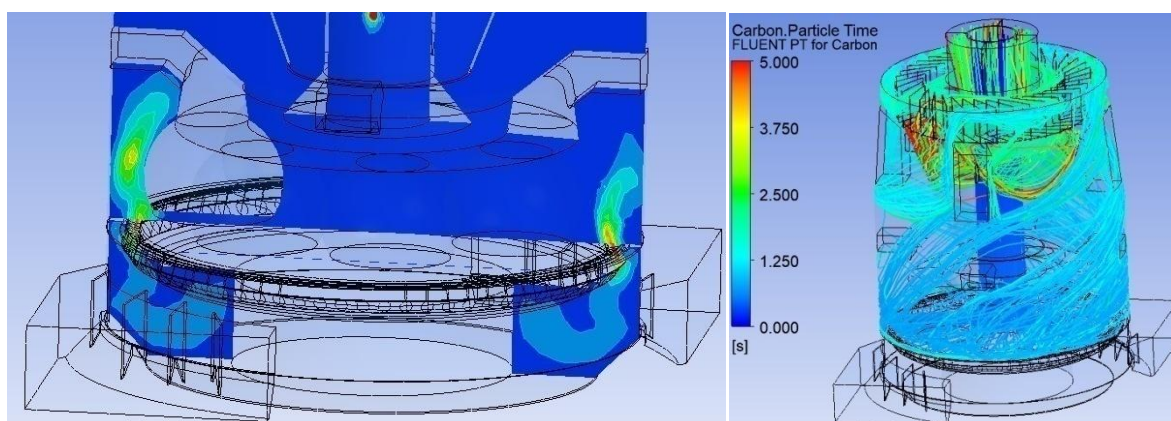
Rys. 5.64. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII



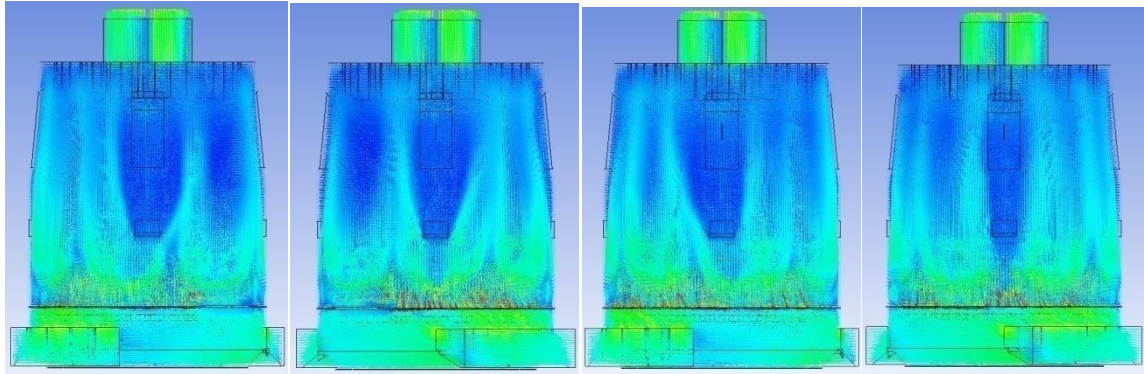
Rys. 5.65. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant VII



Rys. 5.66. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant VII



Rys. 5.67. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant VII



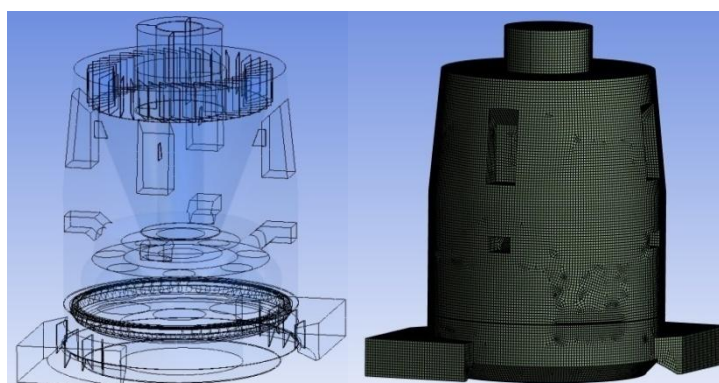
Rys. 5.68. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII

W Tab. 5.45 zestawiono wyniki badań *CFD* przepływu czynnika przez młyn dla następujących wariantów: wariantu bazowego i wariantu VII modyfikacji geometrii pierścienia dyszowego.

Tab. 5.45. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu VII charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego

Parametr	Symbol	Jednostka	bazowy	VII
Wentylacja młyna	$V_1$	$m^3_n/h$	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,52	4,98
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	°C	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	4,50
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$p_{31}$	kPa	2,3	2,5
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$w_{31}$	m/s	54 – 60	51 – 58
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$t_{31}$	°C	106,4	106-134
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,28	2,00
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia dyszowego	$\zeta_{pd}$	-	3,13	1,47
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,15	2,15
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	106,4	106
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,15	2,12
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	100,1	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,38	1,38
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,14	3,60

Zastosowanie niewykonującego ruchu obrotowego pierścienia dyszowego z całkowicie odmienną koncepcją geometryczną znacznie zmniejsza opory przepływu czynnika przez pierścień dyszowy oraz przez cały młyn w stosunku do wariantu bazowego. Ponadto udało się również znacznie obniżyć współczynnik oporu miejscowego przepływu powietrza przez pierścień dyszowy, natomiast prędkości przepływu powietrza w przekroju wylotowym pierścienia dyszowego są na zbliżonym poziomie w porównaniu do prezentowanego wcześniej wariantu bazowego, lecz nieco niższe niż w przypadku rozważań dotyczących poprzedniego wariantu. Z kolei profile przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej na obwodzie młyna i odsiewacza są bardziej korzystne zarówno dla ciśnienia jak i prędkości w stosunku do wyjściowego wariantu, lecz mniej korzystne w porównaniu z poprzednim wariantem. Dlatego wyniki badań wariantu VII również potwierdzają postawioną w niniejszej pracy tezę, z której wynika, że istnieje techniczna możliwość modyfikacji konstrukcji pierścienia dyszowego uzyskując przy tym pożądany efekt dotyczący zmniejszenia oporów przepływu czynnika przez pierścień dyszowy (i co za tym idzie przez młyn) oraz uzyskania równomiernego profilu przepływu czynnika nie tylko w komorze młyna, ale również w poszczególnych elementach młyna. Ponadto potwierdzono wyniki badań laboratoryjnych modelu 2.5 i rozstrzygnięto, że ruch obrotowy pierścienia dyszowego powoduje niewielki wzrost oporów przepływu w stosunku do pierścienia dyszowego niewykonującego ruchu obrotowego. Natomiast zastosowanie metod numerycznych pozwoliło ponadto dokładniejsze wyznaczenie profilu przepływu strumienia czynnika susząco – transportującego pył przez poszczególne elementy młyna, eliminując słabe strony zastosowanych badań laboratoryjnych pierścienia dyszowego. Na Rys. 5.69 po lewej przedstawiono kolejny wariant modelu numerycznego przemysłowego młyna miazdzącego. Model ten charakteryzuje się umieszczeniem pierścienia dyszowego z koncepcją geometryczną inną w stosunku do poprzedniego wariantu. Wyloty dysz pierścienia dyszowego leżą na jego górnej płaszczyźnie. Ponadto pierścień dyszowy wykonuje ruch obrotowy. Natomiast po prawej przedstawiono siatkę modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego dla VIII wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



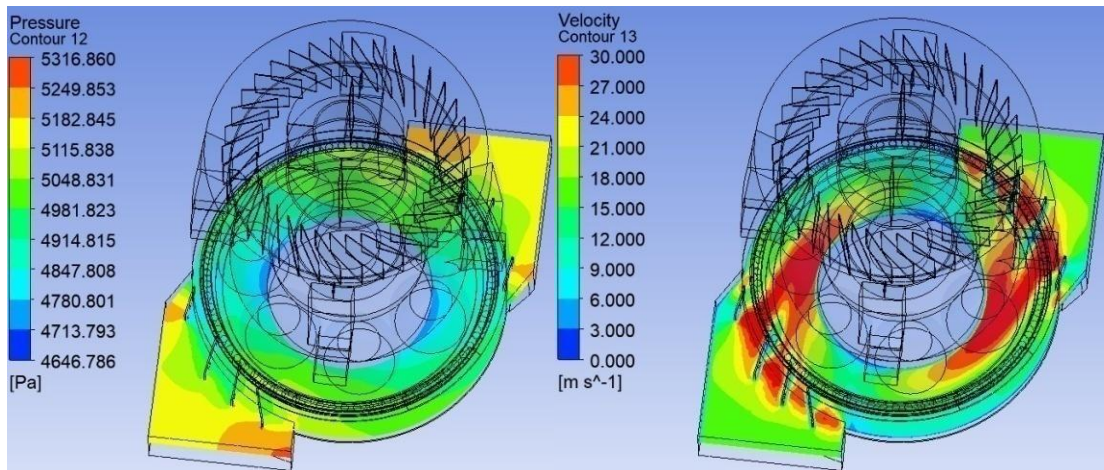
Rys. 5.69. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII

W Tab. 5.46 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu VIII zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

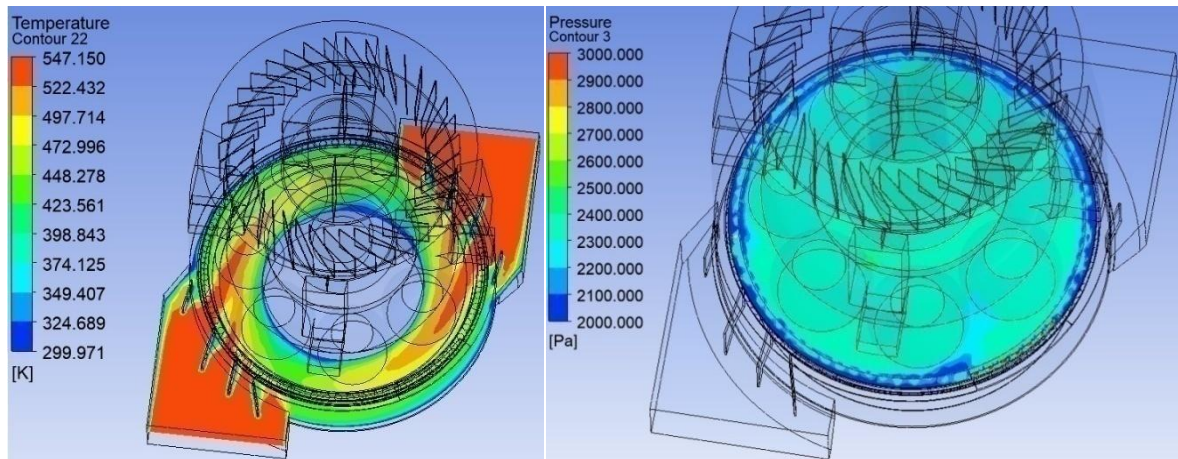
Tab. 5.46. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII

Liczba elementów siatki	1 784605
Liczba węzłów siatki	1 613694

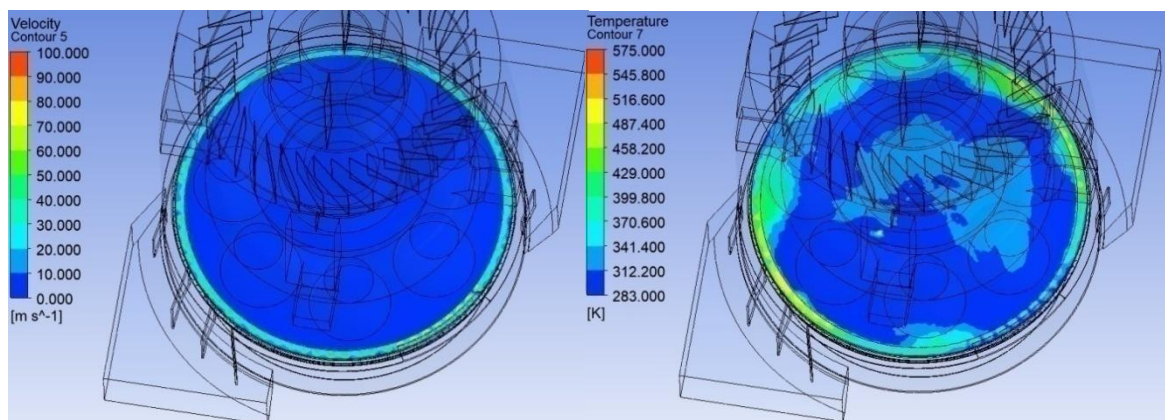
Na Rys. 5.70 do Rys. 5.77 przedstawiono wyniki badań *CFD* przemysłowego młyna miążdżącego dla VIII wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



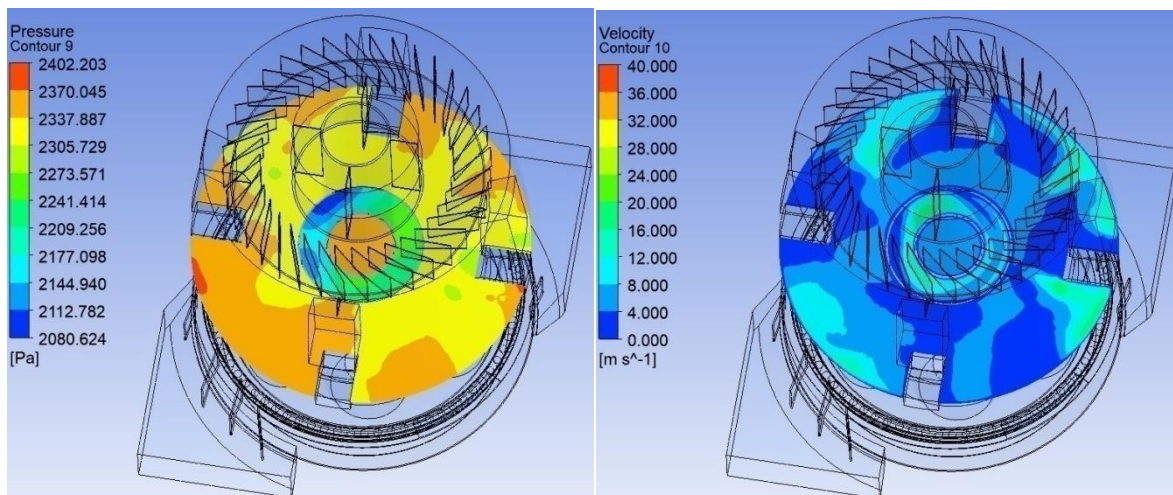
Rys. 5.70. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII



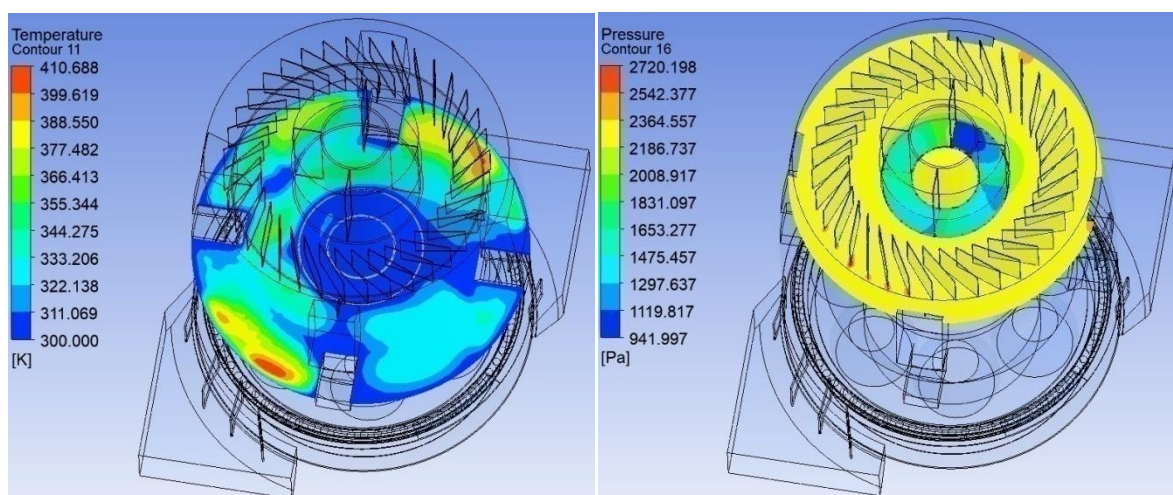
Rys. 5.71. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego czynnika panujący w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII



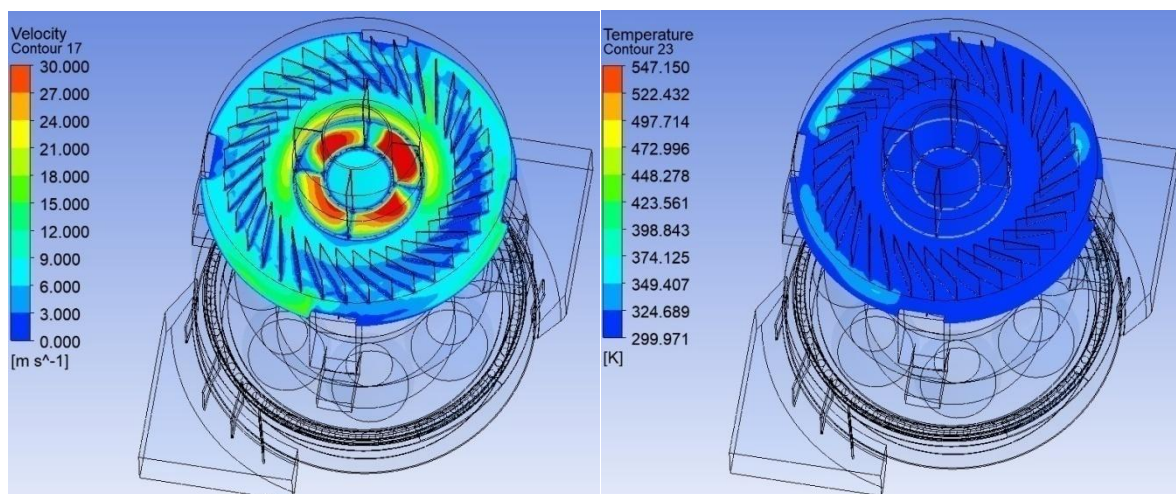
Rys. 5.72. Rozkład prędkości czynnika panujący w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panujący w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII



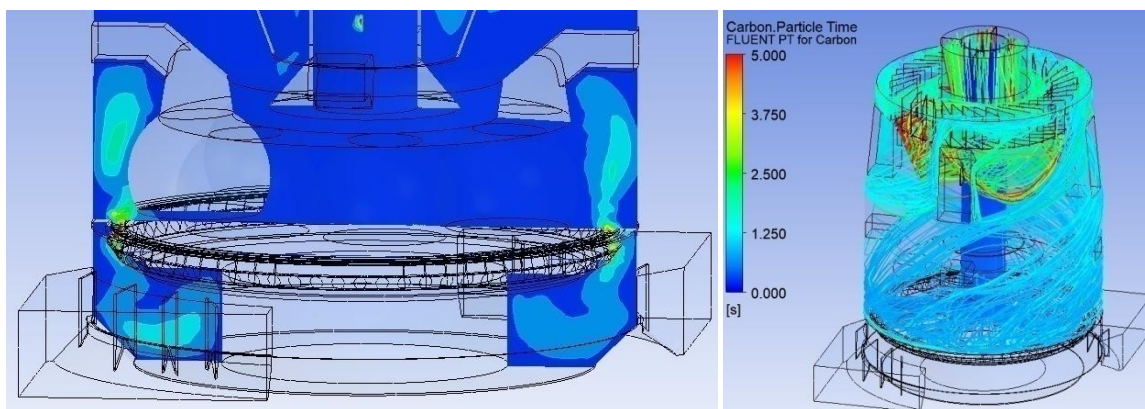
Rys. 5.73. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewnego – wariant VIII



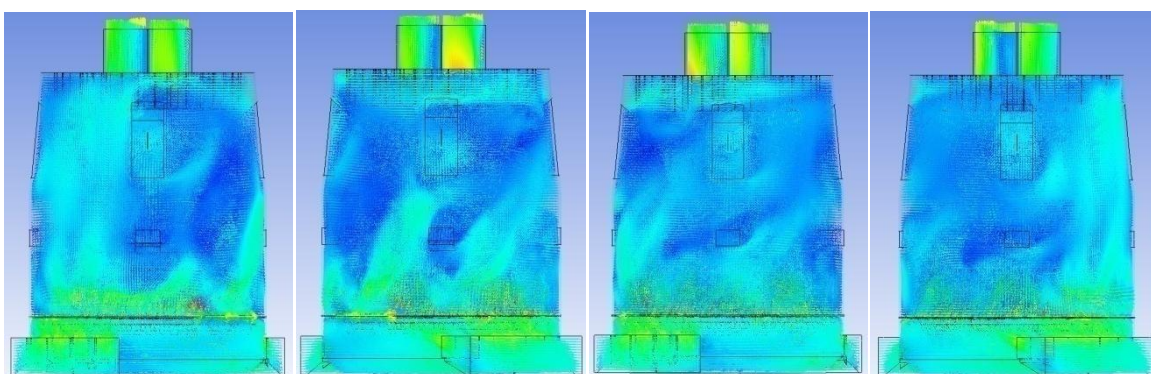
Rys. 5.74. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewnego – wariant VIII



Rys. 5.75. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewnego – wariant VIII



Rys. 5.76. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII



Rys. 5.77. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII

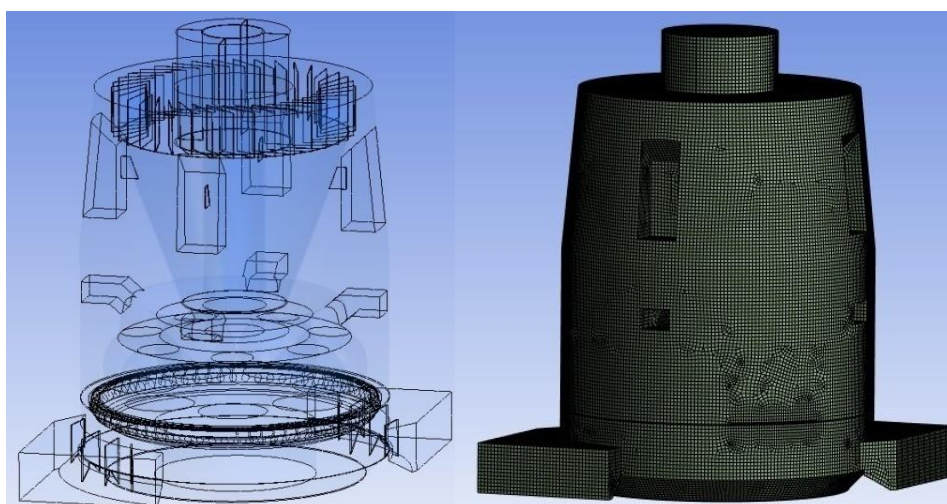
W Tab. 5.47 zestawiono wyniki badań *CFD* przepływu czynnika przez młyn dla następujących wariantów: wariantu bazowego i wariantu VIII modyfikacji geometrii pierścienia dyszowego.

Tab. 5.47. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu VIII charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego

Parametr	Symbol	Jednostka	bazowy	VIII
Wentylacja młyna	$V_1$	$m^3/h$	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,52	5,24
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	°C	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	4,69
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$p_{31}$	kPa	2,3	2,3
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$w_{31}$	m/s	54 – 60	40 – 54
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$t_{31}$	°C	106,4	106-126
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,28	2,39
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia	$\zeta_{pd}$	-	3,13	2,40

dyszowego				
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,15	2,3
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	106,4	106
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,15	2,3
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	100,1	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,38	1,38
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,14	3,86

Zastosowanie pierścienia dyszowego zdefiniowanego w niniejszym wariantie znacznie zmniejsza opory przepływu czynnika przez pierścień dyszowy oraz przez cały młyn w stosunku do wariantu bazowego. Natomiast nie udało się uzyskać wyrównanego profilu przepływowego ciśnienia, prędkości i temperatury na obwodzie młyna. Korzystny profil przepływowy uzyskano w odsiewaczu badanego młyna. Ponadto prędkość przepływu powietrza w przekroju wylotowym pierścienia dyszowego była niższa o około 18% w stosunku do wariantu bazowego oraz poprzednio prezentowanych wariantów. Natomiast współczynnik strat miejscowych przepływu powietrza przez pierścień dyszowy jest niższy w porównaniu z wariantem bazowym, lecz jest wyższy w stosunku do prezentowanych wyżej wariantów odnoszących się do nowego podejścia w sprawie kształtowania geometrii pierścienia dyszowego. Na Rys. 5.78 po lewej, przedstawiono kolejny wariant modelu numerycznego przemysłowego młyna miazdzącego. Model ten charakteryzuje się umieszczeniem pierścienia dyszowego z koncepcją geometryczną identyczną jak w wariantie VIII. Pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego. Natomiast po prawej przedstawiono siatkę modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego dla IX wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



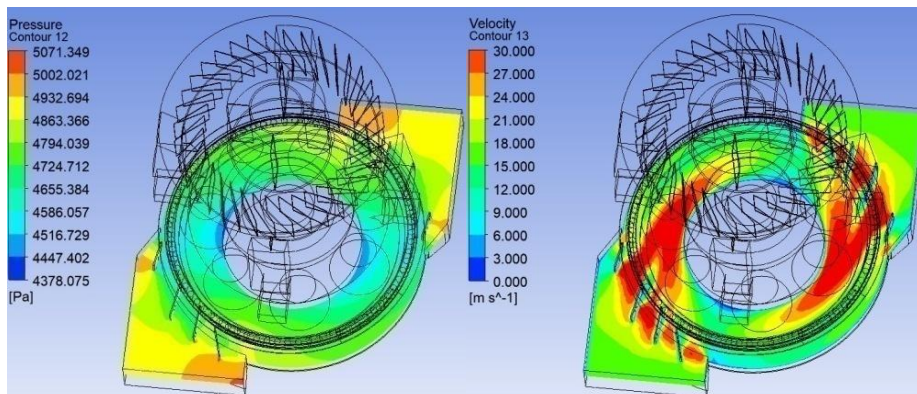
Rys. 5.78. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX

W Tab. 5.48 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu IX zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

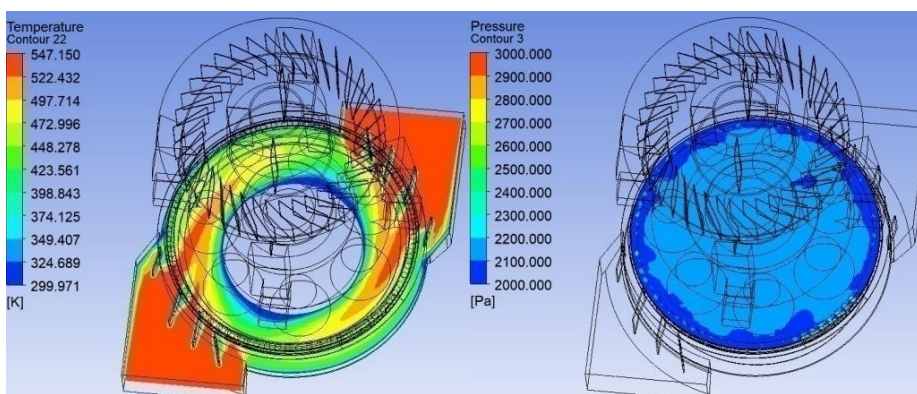
Tab. 5.48. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewnego – wariant IX

Liczba elementów siatki	1 784 605
Liczba węzłów siatki	1 613 694

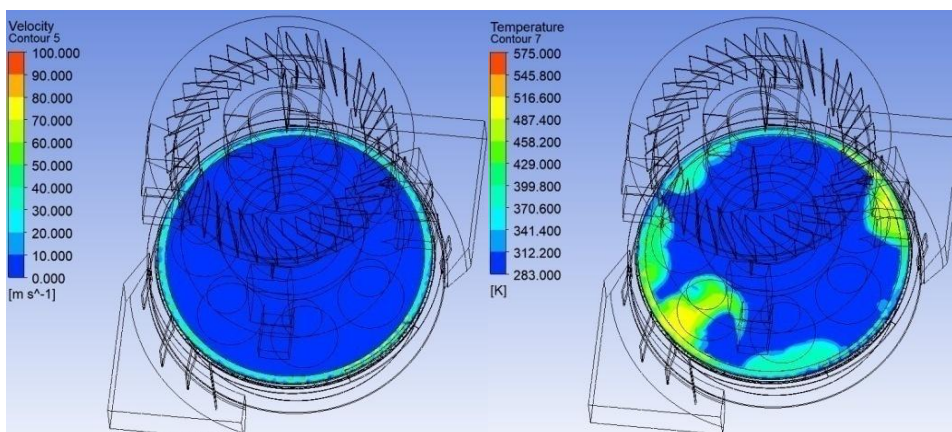
Na Rys. 5.79 do Rys. 5.86 przedstawiono wyniki badań CFD przemysłowego młyna miazdzącego dla IX wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszewnego.



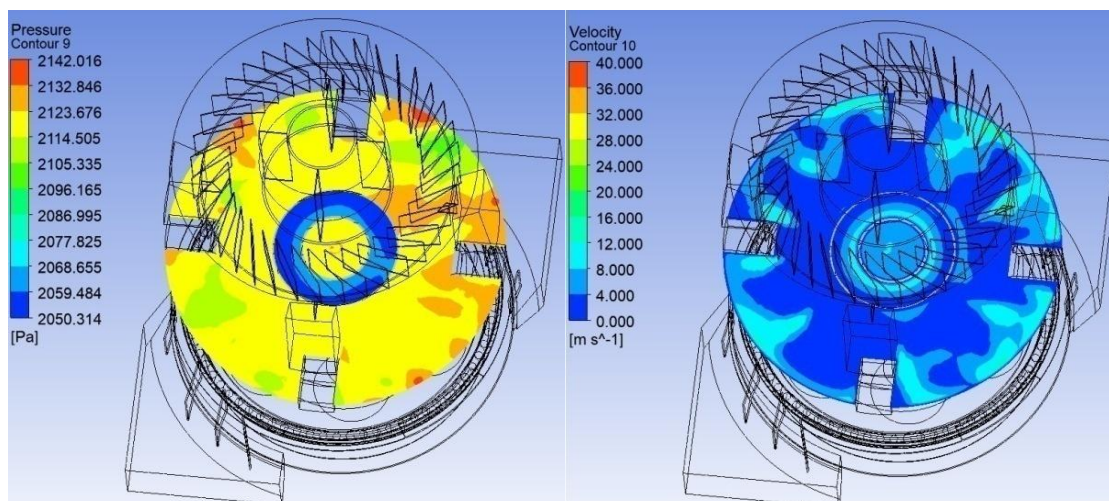
Rys. 5.79. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewnego – wariant IX



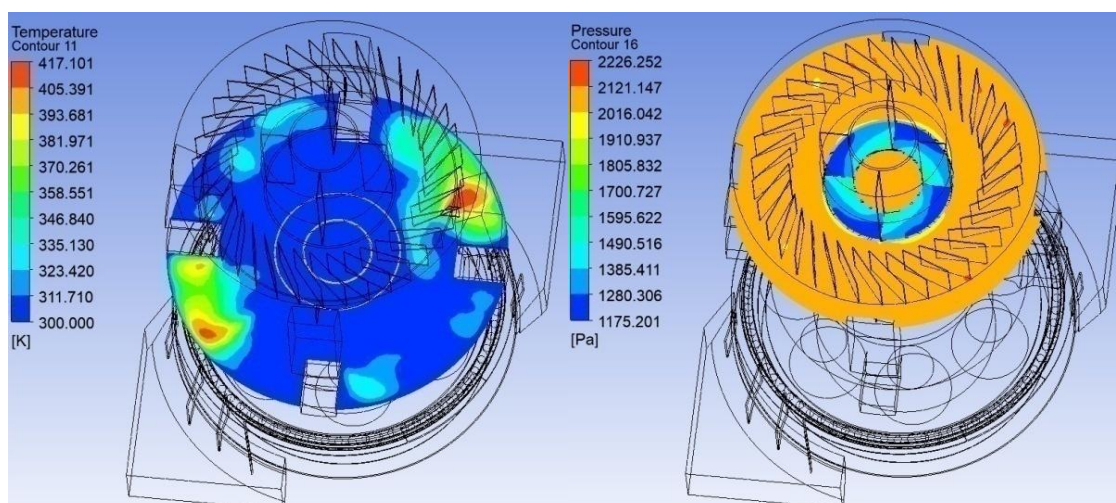
Rys. 5.80. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszewnym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewnego – wariant IX



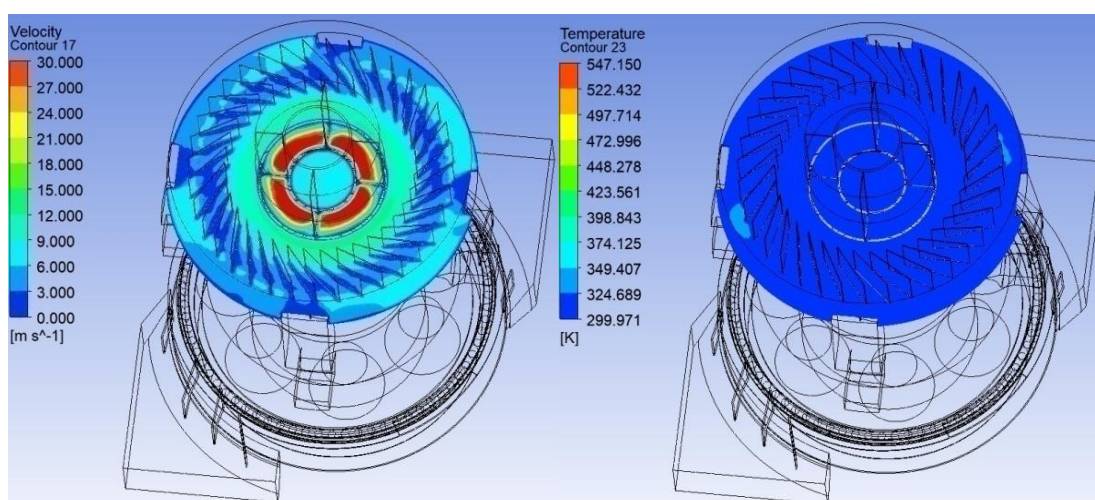
Rys. 5.81. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszewnym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszewnym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewnego – wariant IX



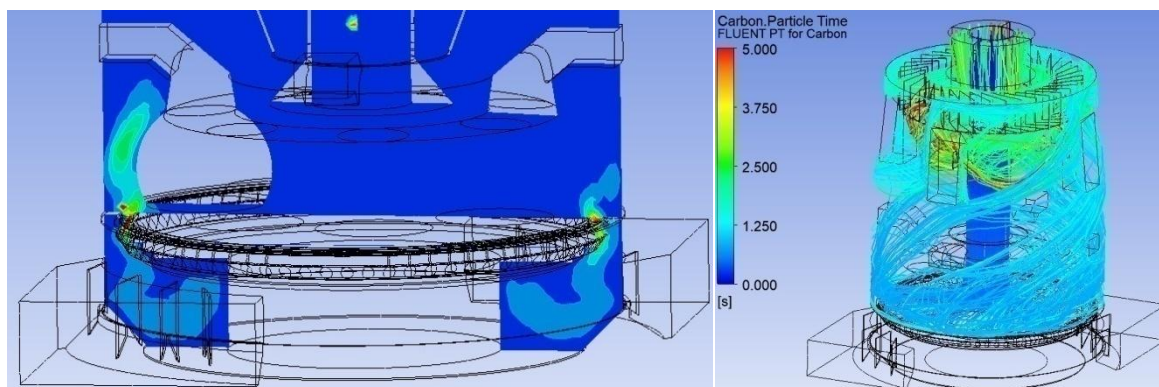
Rys. 5.82. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX



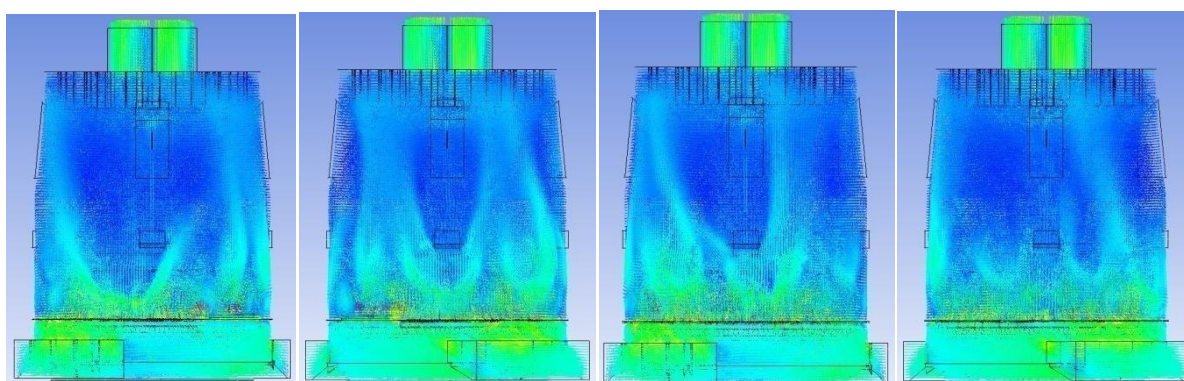
Rys. 5.83. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX



Rys. 5.84. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX



Rys. 5.85. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX



Rys. 5.86. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX

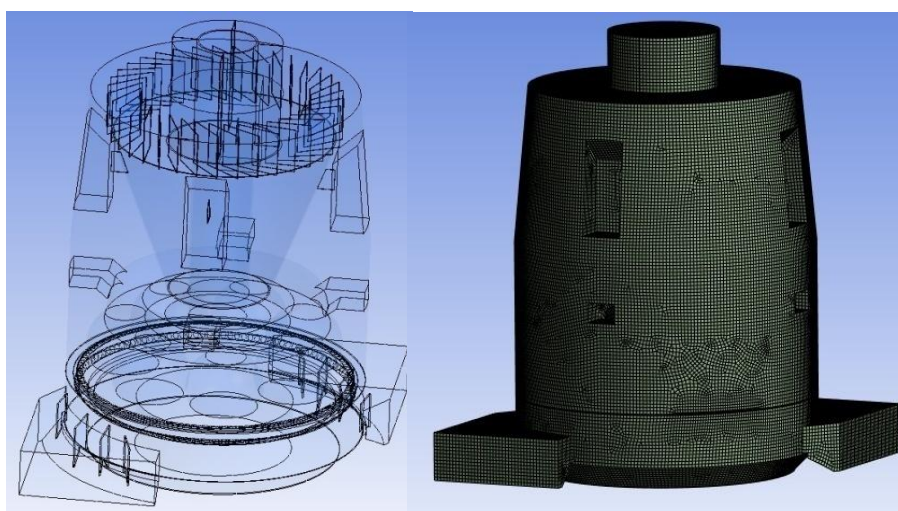
W Tab. 5.49 zestawiono wyniki badań *CFD* przepływu czynnika przez młyn dla następujących wariantów: wariantu bazowego i wariantu IX modyfikacji geometrii pierścienia dyszowego.

Tab. 5.49. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu IX charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego

Parametr	Symbol	Jednostka	bazowy	IX
Wentylacja młyna	$V_1$	$\text{m}^3/\text{n}/\text{h}$	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,52	4,94
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	$^{\circ}\text{C}$	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	4,43
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$p_{31}$	kPa	2,3	2,3
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$w_{31}$	m/s	54 – 60	40 – 50
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$t_{31}$	$^{\circ}\text{C}$	106,4	106-126
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,28	2,13
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia	$\zeta_{pd}$	-	3,13	2,34

dyszowego				
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,15	2,12
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	106,4	106
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,15	2,1
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	100,1	102
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,38	1,38
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,14	3,56

Zastosowanie pierścienia dyszowego zdefiniowanego w niniejszym wariancie znacznie zmniejsza opory przepływu czynnika przez pierścień dyszowy oraz przez cały młyn w stosunku do wariantu bazowego. Natomiast w tym wariancie również nie udało się uzyskać wyrównanego profilu przepływowego ciśnienia, prędkości i temperatury na obwodzie młyna. Korzystny profil przepływowy uzyskano w odsiewaczu badanego młyna, lecz jest nieco mniej korzystny w stosunku do poprzedniego wariantu. Ponadto prędkość przepływu powietrza w przekroju wylotowym pierścienia dyszowego była jeszcze niższa w stosunku do wariantu bazowego oraz poprzednio prezentowanych wariantów. Natomiast współczynnik strat miejscowych przepływu powietrza przez pierścień dyszowy jest niższy w porównaniu z wariantem bazowym oraz niższy w porównaniu z poprzednim wariantem. Na Rys. 5.87 po lewej przedstawiono kolejny wariant modelu numerycznego przemysłowego młyna miażdżącego. Model ten charakteryzuje się umieszczeniem pierścienia dyszowego z koncepcją geometryczną analogiczną do wariantu VI lecz zwiększono ilość dysz o 75% i zmniejszono kąt pochylenia dyszy o 33%. Ponadto pierścień dyszowy wykonuje ruch obrotowy. Natomiast po prawej przedstawiono siatkę modelu CFD przemysłowego młyna miażdżącego dla X wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



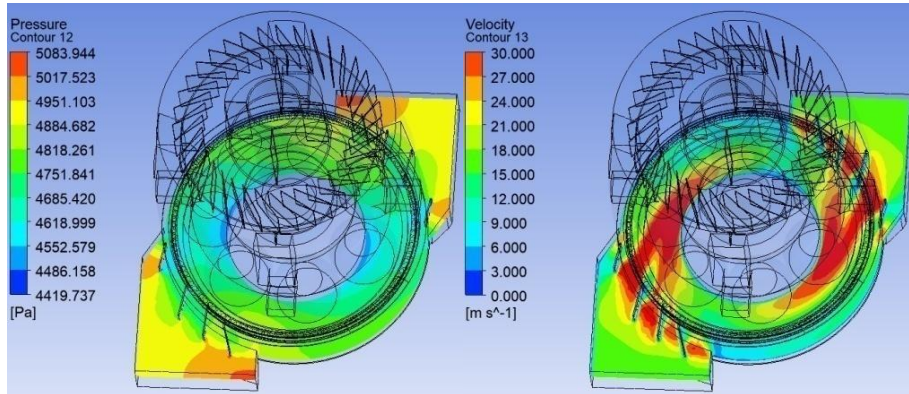
Rys. 5.87. Model CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X

W Tab. 5.50 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu X zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

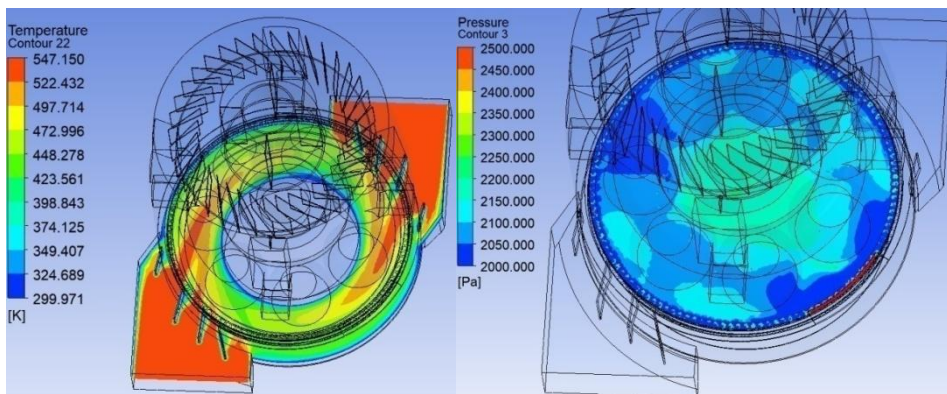
Tab. 5.50. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant X

Liczba elementów siatki	2 078822
Liczba węzłów siatki	1 823741

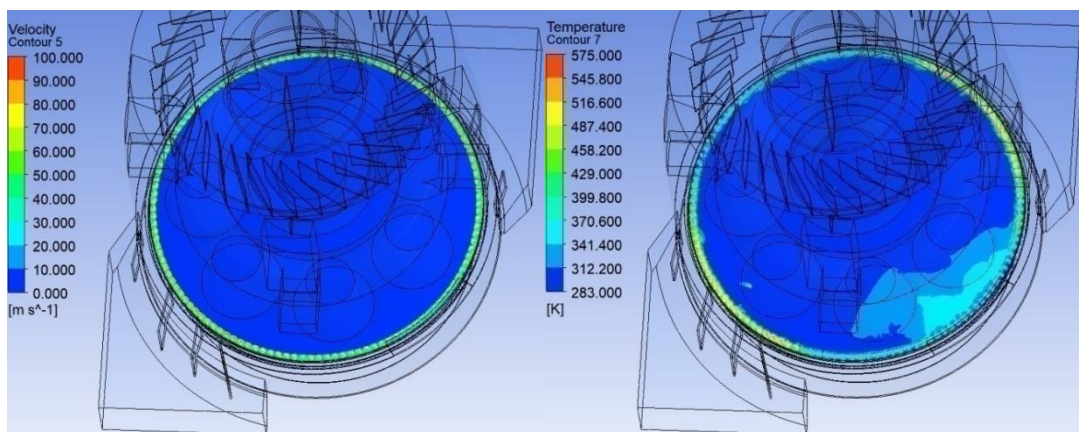
Na Rys. 5.88 do Rys. 5.95 przedstawiono wyniki badań *CFD* przemysłowego młyna miazdzącego dla X wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszewego.



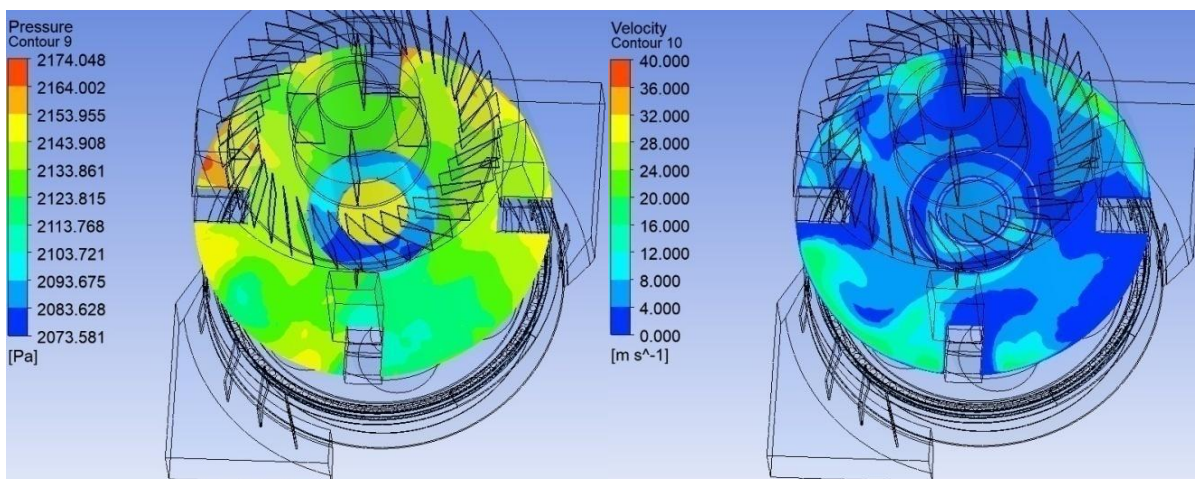
Rys. 5.88. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), Rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant X



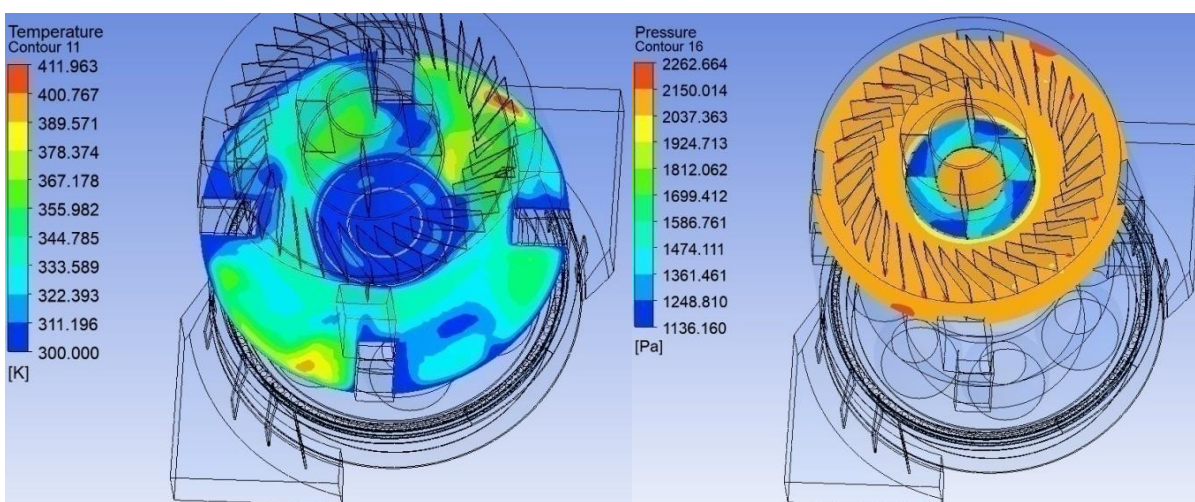
Rys. 5.89. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant X



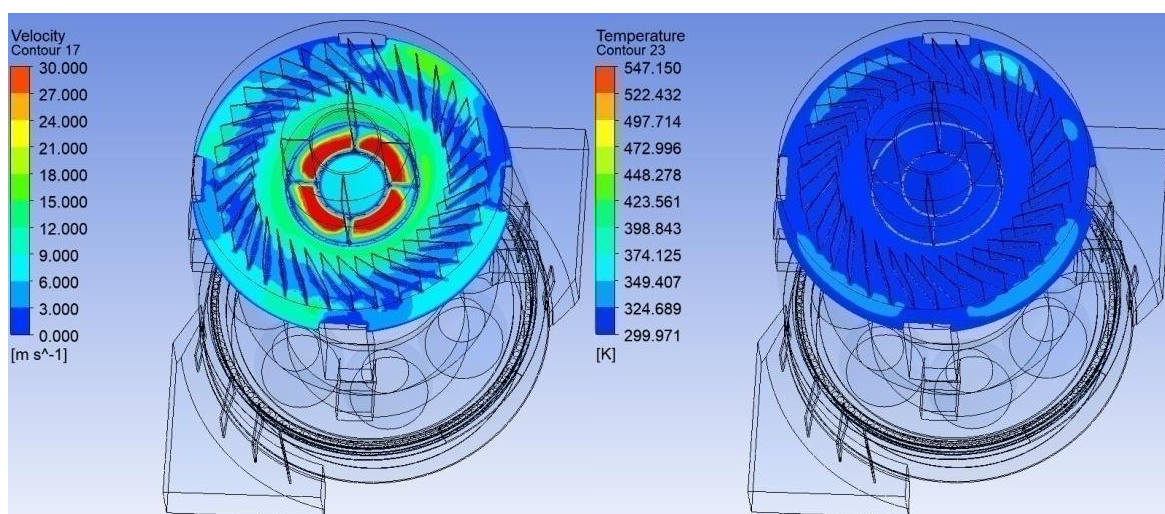
Rys. 5.90. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant X



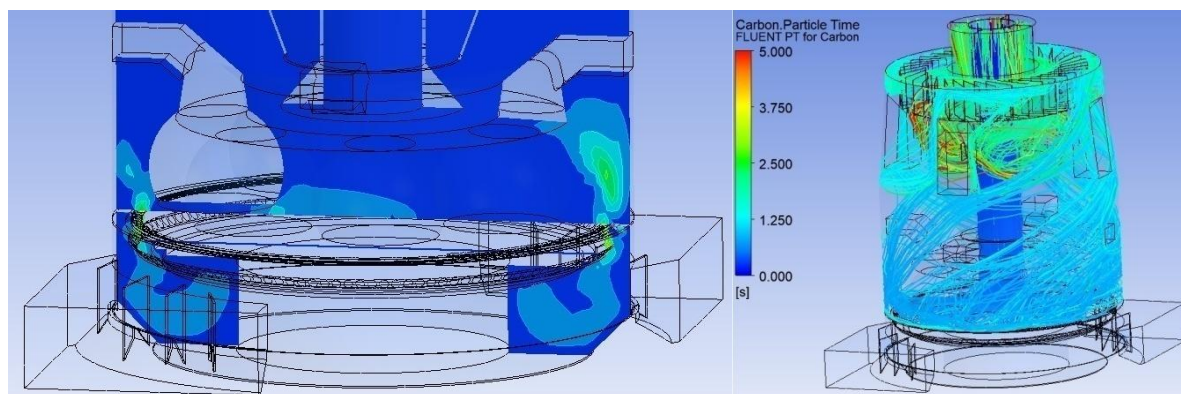
Rys. 5.91. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X



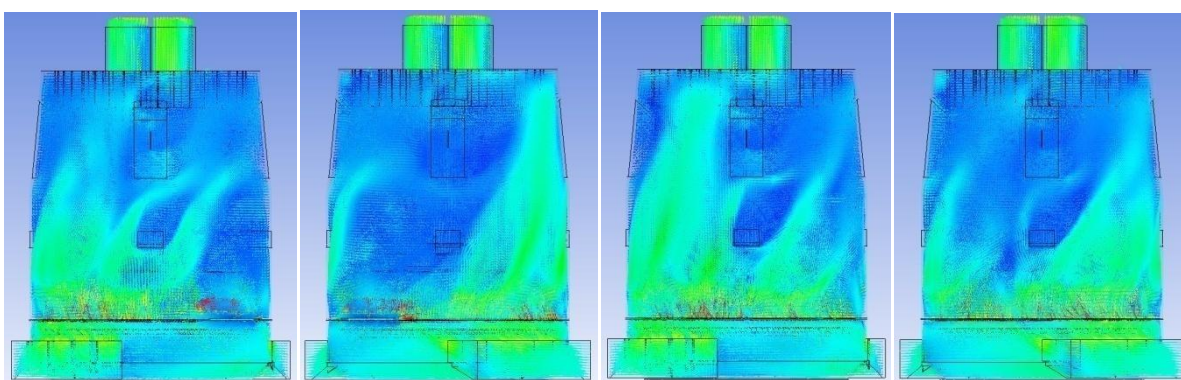
Rys. 5.92. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X



Rys. 5.93. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X



Rys. 5.94. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant X



Rys. 5.95. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewego – wariant X

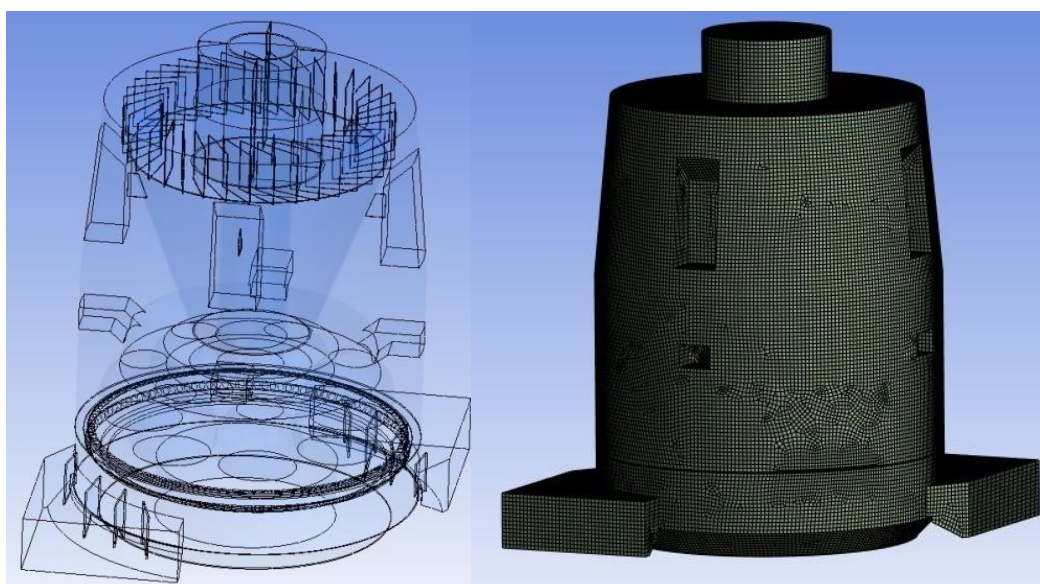
W Tab. 5.51 zestawiono wyniki badań *CFD* przepływu czynnika przez młyn dla następujących wariantów: wariantu bazowego i wariantu X modyfikacji geometrii pierścienia dyszewego.

Tab. 5.51. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu X charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszewego

Parametr	Symbol	Jednostka	bazowy	X
Wentylacja młyna	$V_1$	$\text{m}^3/\text{h}$	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,52	5,00
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	$^{\circ}\text{C}$	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	4,70
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym	$p_{31}$	kPa	2,3	2,2
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym	$w_{31}$	m/s	54 – 60	70 – 86
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszewym	$t_{31}$	$^{\circ}\text{C}$	106,4	119-249
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,28	2,50
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia	$\zeta_{pd}$	-	3,13	1,00

dyszowego				
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,15	2,12
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	106,4	105,0
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,15	2,10
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	100,1	101,0
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,38	1,40
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,14	3,60

Zastosowanie pierścienia dyszowego zdefiniowanego w niniejszym wariantcie znacznie zmniejsza opory przepływu czynnika przez pierścień dyszowy oraz przez cały młyn w stosunku do wariantu bazowego. Natomiast w tym wariantcie udało się uzyskać wyrównany profil przepływowy ciśnienia, prędkości i temperatury na obwodzie młyna zarówno w komorze młyna jak i w odsiewaczu. Ponadto prędkość przepływu powietrza w przekroju wylotowym pierścienia dyszowego jest wyższa w stosunku do wariantu bazowego oraz poprzednio prezentowanych wariantów. Natomiast współczynnik strat miejscowych przepływu powietrza przez pierścień dyszowy jest dużo niższy w porównaniu do wszystkich uprzednio prezentowanych wariantów. Na Rys. 5.96 po lewej przedstawiono kolejny wariant modelu numerycznego przemysłowego młyna miażdżącego. Model ten charakteryzuje się umieszczeniem pierścienia dyszowego z koncepcją geometryczną identyczną w stosunku do poprzedniego wariantu. Ponadto pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego. Natomiast po prawej siatkę modelu *CFD* przemysłowego młyna miażdżącego dla XI wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.



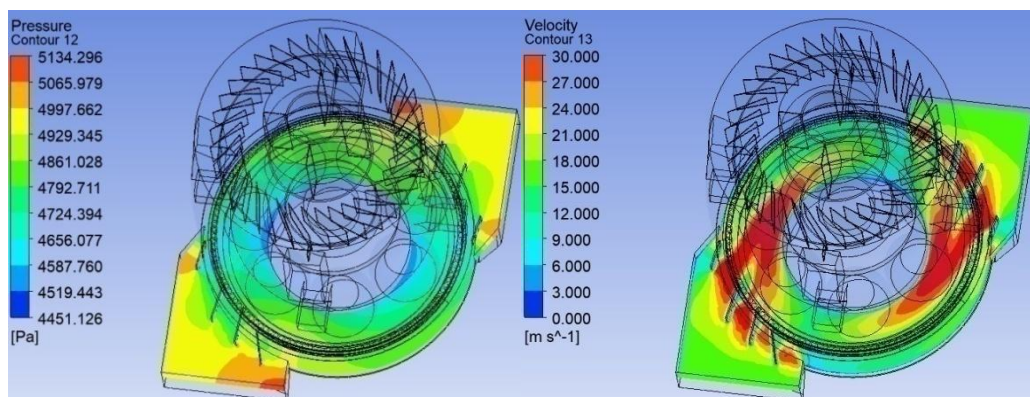
Rys. 5.96. Model *CFD* przemysłowego młyna miażdżącego (po lewej), siatka modelu *CFD* przemysłowego młyna miażdżącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI

W Tab. 5.52 ukazano informacje dotyczące utworzonej siatki modelu numerycznego dla wariantu XI zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego.

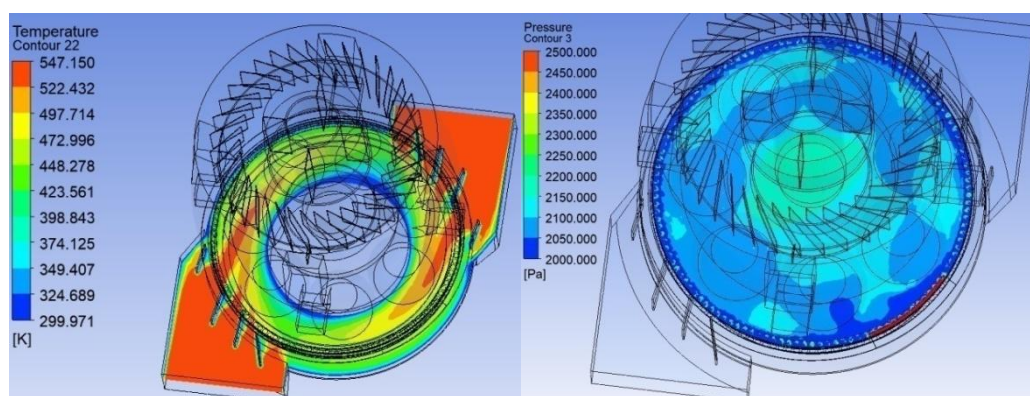
Tab. 5.52. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewnego – wariant XI

Liczba elementów siatki	2 078 822
Liczba węzłów siatki	1 823 741

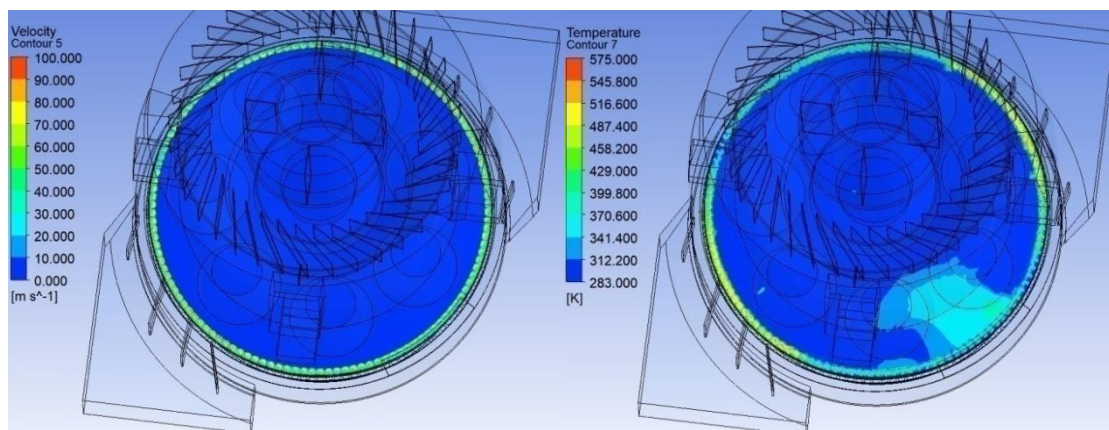
Na Rys. 5.97 do Rys. 5.104 przedstawiono wyniki badań CFD przemysłowego młyna miazdzącego dla XI wariantu zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszewnego.



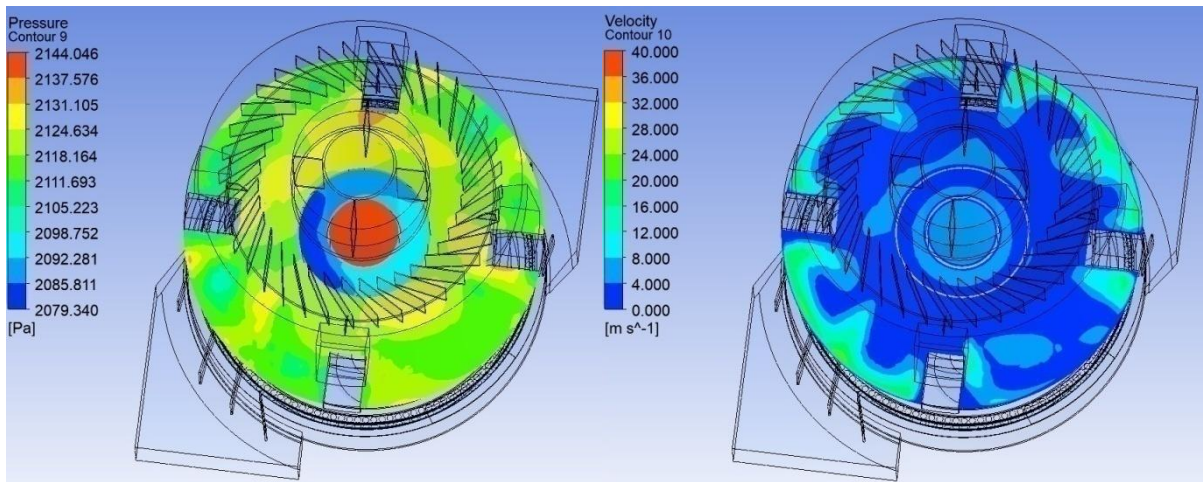
Rys. 5.97. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewnego – wariant XI



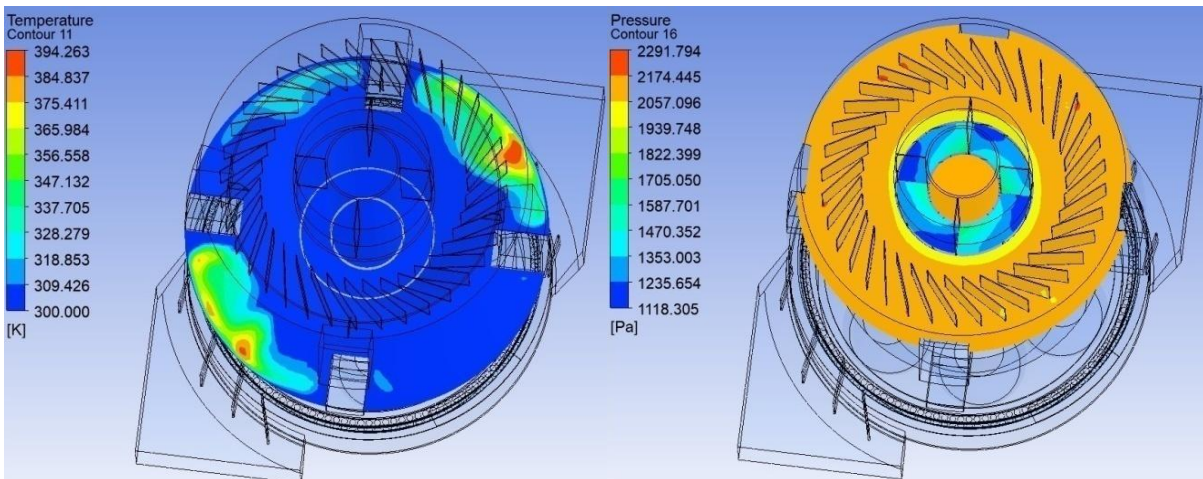
Rys. 5.98. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszewnym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewnego – wariant XI



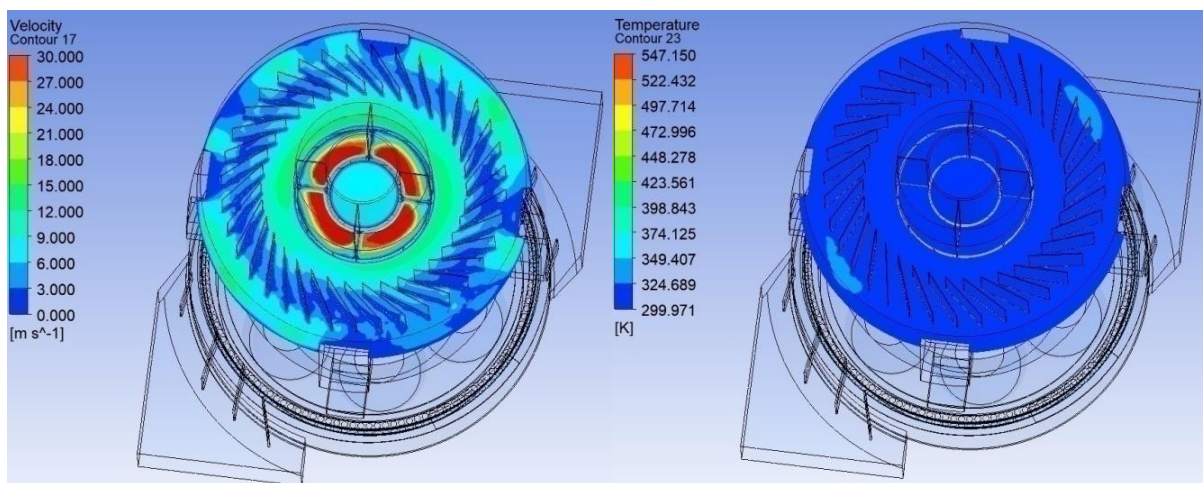
Rys. 5.99. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszewnym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszewnym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszewnego – wariant XI



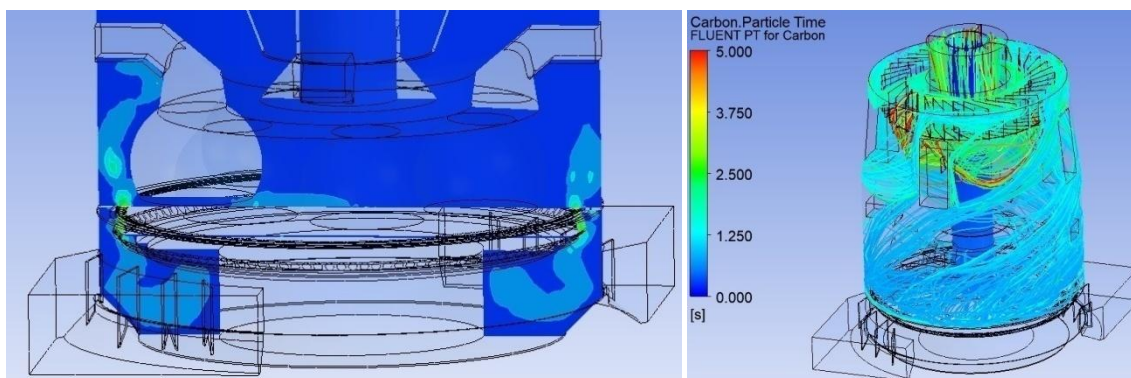
Rys. 5.100. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI



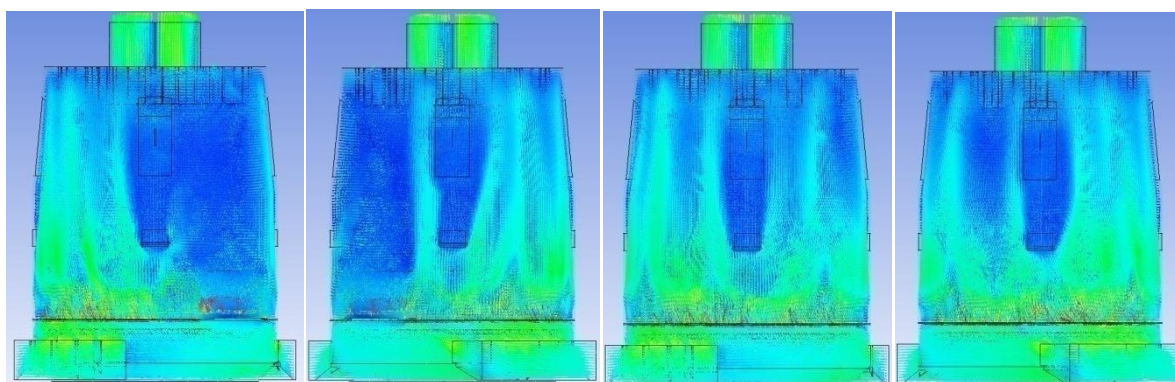
Rys. 5.101. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI



Rys. 5.102. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI



Rys. 5.103. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI



Rys. 5.104. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI

W Tab. 5.53 zestawiono wyniki badań CFD przepływu czynnika przez młyn dla następujących wariantów: wariantu bazowego i wariantu XI modyfikacji geometrii pierścienia dyszowego.

Tab. 5.53. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu XI charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego

Parametr	Symbol	Jednostka	bazowy	XI
Wentylacja młyna	$V_1$	$\text{m}^3/\text{h}$	55000	55000
Nadciśnienie powietrza przed młynem	$p_1$	kPa	6,52	5,00
Temperatura powietrza przed młynem	$t_1$	$^{\circ}\text{C}$	274	274
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze powietrza	$p_2$	kPa	5,58	4,59
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$p_{31}$	kPa	2,3	2,2
Prędkość mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$w_{31}$	m/s	54 – 60	70 – 86
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym	$t_{31}$	$^{\circ}\text{C}$	106,4	113-272
Miejscowe straty ciśnienia przepływu przez pierścień dyszowy	$\Delta p_{2-31}$	kPa	3,28	2,39
Oszacowany współczynnik strat miejscowych pierścienia	$\zeta_{pd}$	-	3,13	0,96

dyszowego				
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$p_3$	kPa	2,15	2,16
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w komorze młyna	$t_3$	°C	106,4	102,0
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$p_4$	kPa	2,15	2,10
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej w odsiewaczu	$t_4$	°C	100,1	101,0
Nadciśnienie mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$p_5$	kPa	1,38	1,40
Temperatura mieszanki pyłowo – powietrznej za młynem	$t_5$	°C	101	101
Miejscowe straty ciśnienia przepływu czynnika przez młyn	$\Delta p_{1-5}$	kPa	5,14	3,60

Zastosowanie pierścienia dyszowego zdefiniowanego w niniejszym wariantcie również znacznie zmniejsza opory przepływu czynnika przez pierścień dyszowy oraz przez cały młyn w stosunku do wariantu bazowego. W tym wariantcie udało się uzyskać wyrównany profil przepływowy ciśnienia, prędkości i temperatury na obwodzie młyna zarówno w komorze młyna jak i w odsiewaczu, lecz jest nieco mniej korzystny niż w poprzednim wariantcie. Natomiast prędkość przepływu powietrza w przekroju wylotowym pierścienia dyszowego jest zbliżona do poprzedniego wariantu. Współczynnik strat miejscowych przepływu powietrza przez pierścień dyszowy jest niższy w porównaniu z poprzednim wariantcie. Ponadto można zauważyć, że ruch obrotowy pierścienia dyszowego charakteryzującego się nowym podejściem do modyfikacji geometrii ma większe znaczenie dla uzyskania równomiernego profilu przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej przez poszczególne elementy młyna w porównaniu z pierścieniem dyszowym charakteryzującym się bazową geometrią.

Wyniki badań numerycznych wariantu X i XI wskazują dodatkową przewagę metod numerycznych nad metodami laboratoryjnymi, mianowicie zastosowanie metod numerycznych pozwoliło na dalszą optymalizację konstrukcji pierścienia dyszowego znajdując jeszcze lepsze rozwiązanie w stosunku do wariantów VI i VII oraz modelu 2.5, co z kolei jeszcze mocniej uzasadnia zastosowanie tej metody badawczej w celu rozwiązania problemu badawczego postawionego w ramach niniejszej pracy doktorskiej. Wyniki badań wariantu X i XI również potwierdzają postawioną w niniejszej pracy tezę, z której wynika że istnieje techniczna możliwość modyfikacji konstrukcji pierścienia dyszowego uzyskując przy tym pożądaną efekt dotyczący zmniejszenia oporów przepływu czynnika przez pierścień dyszowy (i co za tym idzie, przez młyn) oraz uzyskania równomiernego profilu przepływu czynnika nie tylko w komorze młyna ale również w poszczególnych elementach młyna.

## 6. Wnioski

Wyniki uzyskane w toku rozważań prowadzonych podczas realizacji pracy pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- otrzymane wyniki badań numerycznych są zbliżone do tych, otrzymanych w wyniku przeprowadzonych badań obiektowych i laboratoryjnych;
- przysłanianie przekroju wylotowego pierścienia dyszowego ma wpływ na kierunek przepływu strumienia czynnika. Im bardziej przekrój wylotowy pierścienia dyszowego jest przysłonięty tym bardziej strumień jest skierowany do środka młyna. Ponadto wraz z przysłanianiem przekroju wylotowego pierścienia dyszowego wzrasta zdolność strumienia do wynoszenia cząsteczek, a co za tym idzie, wzrastają również opory przepływu strumienia przez pierścień dyszowy;
- rozkład prędkości przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej przez poszczególne elementy młyna ulega poprawie wraz z zmniejszaniem stopnia otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego, osiągając najlepszy rezultat przy wartości wynoszącej 50%, natomiast efekt ten charakteryzuje się największymi stratami miejscowymi ciśnienia statycznego strumienia przepływającego przez pierścień dyszowy;
- zmiana oporów przepływu strumienia czynnika przez pierścień dyszowy nie zawsze przekłada się na zmianę całkowitych oporów przepływu przez młyn. Może się zdarzyć taka sytuacja, że w wyniku zmiany całkowitych oporów przepływu przez młyn, opory przepływu przez pierścień dyszowy i odsiewacz pozostaną niezmienione a wzrośnie poziom strat przepływu na wlocie do młyna. Dlatego jakkolwiek modyfikację układu przepływowego młyna należy starannie przeanalizować, aby uniknąć sytuacji gdy punkt pracy instalacji przypadnie w obszarze niestabilnej pracy wentylatora;
- kierunek ustawienia łopatek wpływa na kierunek zawirowania strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej;
- profile przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej przepływającej przez pierścień dyszowy dotyczące zarówno ciśnienia statycznego, prędkości i temperatury oraz kierunek jego przepływu zależą głównie od geometrii pierścienia dyszowego;
- ruch obrotowy pierścienia dyszowego wpływa pozytywnie na równomierność profili przepływu uzyskanych na obwodzie młyna. Ponadto ruch obrotowy pierścienia dyszowego wpływa niekorzystnie na kierunek przepływu strumienia, ponieważ składowa odśrodkowa powoduje skierowanie strumienia w kierunku ściany komory młyna. Należy przy tym zwrócić uwagę, że zastosowanie elementów przysłaniających przekrój wylotowy pierścienia dyszowego neutralizuje efekt działania siły odśrodkowej na strumień czynnika kierując strumień do środka komory młyna. Niemniej jednak wpływ ruchu obrotowego pierścienia dyszowego na wynik obliczeń *CFD* ma w każdym z badanych przypadków niższą wagę niż geometria pierścienia dyszowego. Ponadto zmiana wpływu ruchu obrotowego pierścienia dyszowego na wyniki obliczeń *CFD* jest uzależniona od geometrii pierścienia dyszowego;
- najbardziej optymalnym wariantem projektu kanału wlotowego do młyna jest wariant bazowy. Dlatego można przyjąć, że wpływ konstrukcji wlotu do młyna na wyniki analizy przepływowej *CFD* mieszanki pyłowo – powietrznej dla przedstawionych w pracy wyników analizy będzie niewielki i można go pominąć;
- geometria pierścienia dyszowego jest decydującym czynnikiem wpływającym na profil przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej w całym młynie,

natomiast wpływ pozostałych wspomnianych w niniejszej analizie parametrów na wynik obliczeń *CFD* jest jej funkcją;

- aby otrzymać równomierny rozkład prędkości czynnika zarówno w komorze młyna jak i odsiewaczu konieczne jest spełnienie następujących warunków: prędkość przepływu czynnika musi być stosunkowo wysoka oraz strumień wspomnianego czynnika powinien być skierowany w kierunku promieniowym do środka młyna;
- w wyniku przeprowadzonych badań wykazano w jakich warunkach jest możliwe otrzymanie równomiernego profilu prędkości przepływu strumienia i jego temperatury przez poszczególne elementy młyna. Ponadto otrzymano rozkład ciśnień statycznych panujących w poszczególnych elementach młyna podczas przepływu czynnika. Określono opory przepływu poszczególnych elementów młyna, w tym standardowego pierścienia dyszowego zainstalowanego w przemysłowym młynie miazdzącym. Określono również wpływ wybranych parametrów na wynik funkcji celu, co pozwoliło lepiej poznać i zrozumieć mechanizm działania rozwiązania konstrukcyjnego pierścienia dyszowego badanego w ramach niniejszego projektu doktorskiego. W związku z powyższym osiągnięto wszystkie założenia badań bazowej geometrii pierścienia dyszowego oraz potwierdzono, że obecne rozwiązanie konstrukcyjne spełnia dotychczasowe wytyczne projektowe pierścieni dyszowych w FPM S.A.;
- przy zastosowaniu obecnej konstrukcji pierścienia dyszowego nie jest możliwe jednoczesne spełnienie następujących kryteriów: otrzymanie równomiernego profilu prędkości przepływu czynnika na obwodzie młyna oraz uzyskanie jak najniższych strat przepływu czynnika przez pierścień dyszowy. Konieczna jest zatem optymalizacja w kierunku jednego z wymienionych wyżej kryteriów. Aby podjąć próbę pogodzenia powyższych kryteriów należy wpłynąć na wartość współczynnika strat miejscowych, innymi słowy, dokonać modyfikacji geometrii pierścienia dyszowego. W wyniku badań laboratoryjnych wykazano, że model 2.5 pierścienia dyszowego charakteryzuje się najbardziej optymalną geometrią w świetle przyjętych kryteriów optymalizacji i postawionej tezy w niniejszej pracy doktorskiej, lecz w wyniku ograniczeń wynikających z zastosowania metod laboratoryjnych aby rozwiązać postawiony problem badawczy należało zastosować metody numeryczne. Wyniki badań numerycznych zmodyfikowanej geometrii pierścienia dyszowego według wariantów VI i VII potwierdzają wyniki badań laboratoryjnych modelu 2.5 pierścienia dyszowego, ponadto uzyskano profil przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej w poszczególnych elementach młyna i umożliwiło określenie wpływu ruchu obrotowego pierścienia dyszowego na wynik rozważań. Wyniki badań numerycznych wariantu X i XI wskazują że metody numeryczne są efektywnym narzędziem, ponieważ ich zastosowanie pozwoliło na dalszą optymalizację konstrukcji pierścienia dyszowego znajdując jeszcze lepsze rozwiązanie w stosunku do wariantów VI i VII oraz modelu 2.5, co z kolei jeszcze mocniej uzasadnia zastosowanie tej metody badawczej w celu rozwiązania problemu badawczego postawionego w ramach niniejszej pracy doktorskiej. Wyniki badań wariantu X i XI również potwierdzają postawioną w niniejszej pracy tezę, z której wynika że istnieje techniczna możliwość modyfikacji konstrukcji pierścienia dyszowego uzyskując przy tym pożądaną efekt dotyczący zmniejszenia oporów przepływu czynnika przez pierścień dyszowy (i co za tym idzie przez młyn) oraz uzyskania równomiernego profilu przepływu czynnika nie tylko w komorze młyna ale również w poszczególnych elementach młyna.

## 7. Literatura

1. Zalewski Ł., Tymoszek M., Hernik B.: *Badania obiektowe pierścienia dyszowego wybranego młyna średniobieżnego – wstęp do badań numerycznych*. Prace Naukowe KMiUE Politechniki Śląskiej Z. 52 (2022), 269-270. Międzynarodowa XIV Konferencja Kottłowa ICBT. Poland 2022. ISBN 978-83-64497-05-6
2. Pospolita J.: *Wybrane zagadnienia eksploatacyjne średniobieżnych młynów węglowych*. Opole (2007). ISBN 978-83-60716-20-5.
3. Mroczek K.: *Analiza wpływu geometrii układu mielącego na wydajność młyna*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Energetyka Z. 113 (1990), 79-92.
4. Czepiel J., Mroczek K.: *Badania modelowe układu mielącego młyna pierścieniowo – kulowego. Część I. Przyjęte założenia, opis stanowiska doświadczalnego, metodyka badań*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Seria: Energetyka z. 104 (1988), 113-126.
5. Czepiel J., Mroczek K.: *Badania modelowe układu mielącego młyna pierścieniowo – kulowego. Część II. Wpływ prędkości kątowej układu mielącego na wydajność i zużycie energii na przemiał*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Z. 104 (1988), 127-137.
6. Chmielniak T., Czepiel J.: *Wpływ cech geometrycznych bieżni miażdżącej na wydajność młyna pierścieniowo – kulowego – wyniki badań konwencjonalnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Energetyka z. 126 (1995), 133-147.
7. Korzuch S.: *Zbiornicze charakterystyki młynów pierścieniowo – kulowych i misowo – rolkowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Energetyka z. 94 (1986), 143-153.
8. Grucza G., Marszał R.: *Urządzenia separacji pirytów i kamieni z młynów kulowo – misowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Energetyka z. 113 (1990), 591-596.
9. Czepiel J.: *Zależność wydajności młyna pierścieniowo – kulowego od prędkości obrotowej układu mielącego – model teoretyczny*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Energetyka z. 114 (1993), 87-104.
10. Qiwen J., Xijiong Ch., Pei L., Yonggang Z., Yingchung W., Xuecheng W.: *On – Line measurement of pulverised coal fineness on a 300 MWe power plant with pulsed digital inline holography*. Powder Technology 385 (2021), 242 – 249.
11. Bhasker C.: *Numerical simulation of turbulent flow in complex geometries used in power plants*. Advances in Engineering Software 33 (2002), 71 – 83.
12. Vuthaluru R, Kruger O., Abhishek M, Pareek V.K., Vuthaluru H.B.: *Investigation of wear pattern in a complex coal pulveriser using CFD modelling*. Fuel Processing Technology. Volume 87, Issue8, (2006), 687 – 694.
13. Shah V.K., Vuthaluru R., Vuthaluru H.B.: *CFD based investigations into optimization of coal pulveriser performance: Effect of classifier vane settings*. Fuel Processing Technology. Volume 90, Issue9, (2009), 1135 – 1141.
14. Niemczyk P., Andresen P., Bendtsen J. D., Pedersen T. S., Ravn P. S.: *Derivation and validation of a coal mill model for control*. Control Engineering Practice. Volume 20. Issue5, (2012), 519 – 530.
15. Odgaard P. F., Mataji B.: *Estimation of moisture content in coal in coal mills*. IFAC Proceedings Volumes. Volume 39. Issue 7. (2006). 89 – 94.
16. Odgaard P. F., Mataji B.: *Fault detection in coal mills used in power plants*. IFAC Proceedings Volumes. Volume 39. Issue 7. (2006). 177 – 182.

17. Bhambare K. S., Ma Z, Lu P.: *CFD modelling of MPS Coal Mill for improved performance and safety*. ([https://www.researchgate.net/profile/KamaleshBhambare/publication/311103714\\_CFD\\_Modeling\\_of\\_MPS\\_Coal\\_Mill\\_for\\_Improved\\_Performance\\_and\\_Safety](https://www.researchgate.net/profile/KamaleshBhambare/publication/311103714_CFD_Modeling_of_MPS_Coal_Mill_for_Improved_Performance_and_Safety)) (2009) (Dostęp 26.09.2022).
18. Bhambare K. S., Ma Z, Lu P.: *CFD modelling of MPS Coal Mill with moisture evaporation*. Fuel Processing Technology. Volume 91. Issue 5. (2010). 566 – 571.
19. Betz M., Gleiss M., Nirschl H.: *Effects of flow baffles on flow profile, pressure drop and classification performance in classifiers*. (2021) (<https://www.mdpi.com/22279717/9/7/1213>) (Dostęp 26.09.2022)
20. Mercangoez M., Poland J.: *Coal Mill Modelling for Monitoring and Control (Extended Abstract)*. IFAC ProceedingsVolumes. Volume 44. Issue 1. (2011). 13163 – 13166.
21. Pradeebha P., Pappa N., Vasanthi D.: *Modelling and Control of Coal Mill*. IFAC Proceedings Volumes. Volume 46. Issue 32. (2013). 797 – 802.
22. Wei T., Hishikawa A., Shimizu Y., Akazawa T., Murata M., Kimura I.: *Particulate characterization of bovine bone granules pulverized with a high – speed blade mill*. Powder Technology 261 (2014), 147 – 153.
23. Kalotka J., Wiśniewski M., Wagner – Kalotka Krystyna T., Skąła A.: *Struktura strumienia w młynie węglowym MKM – 33 z wirującym pierścieniem dyszowym dla bloków energetycznych o mocy 200 MW*. III Konferencja Naukowo – Techniczna. Budowa i eksploatacja młynów do przemiału węgla i innych minerałów (1998), 43 – 53.
24. Mateuszuk S.: *Wybrane zagadnienia mielenia materiałów w pionowych młynach rolkowo – misowych*. Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Wydawnictwo Instytut Śląski. Tom R5, nr 9 (2012), 113 – 124.
25. Czepiel J., Mroczek K.: *Wpływ cech konstrukcyjnych młyna pierścieniowo – kulowego na jego wydajność w oparciu o badania na stanowisku doświadczalnym IMiUE Politechniki Śląskiej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Energetyka z. 94 (1986), 121-131.
26. Czepiel J.: *Badania właściwości fizycznych węgla kamiennego – dane do modelowania procesu przemiału*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Energetyka z. 107 (1989), 11-29.
27. Mroczek K.: *Wpływ prędkości kątowej i nacisku elementów mielących na pracę młyna pierścieniowo – kulowego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Energetyka z. 121 (1994), 177-186.
28. Czepelak J., Mroczek K.: *Badania modelowe separatorów pyłu do palników niskoemisyjnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Energetyka z. 127 (1996), 187-204.
29. Gołąbek J.: *Przebieg prędkości cząstek solidusu przy przepływie sol gazu przez kanał o zmiennym przekroju poprzecznym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Mechanika z. 66 (1978), 5-18.
30. Bobiec E., Krupa M.: *Konieczność poprawy jakości przemiału węgla kamiennego dla potrzeb obniżenia emisji NOx a dynamika instalacji paleniskowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Energetyka z. 122 (1994), 255-257. VII Konferencja Kotlewa: Aktualne Problemy Budowy i Eksploatacji Kociołów: Szczyrk, 7-10 listopada 1994 r. ; 50-lecie Politechniki Śląskiej ; 40 lat działalności Wydziału Mechanicznego Energetycznego.
31. Chowaniec G.: *Młyn MKM-25 z odsiewaczem dynamicznym. Wstępne wyniki pomiarów*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Energetyka z. 122 (1994), 259-262. VII Konferencja Kotlewa: Aktualne Problemy Budowy i Eksploatacji Kociołów:

- Szczyrk, 7-10 listopada 1994 r.; 50-lecie Politechniki Śląskiej; 40 lat działalności Wydziału Mechanicznego Energetycznego.
32. Chowaniec G.: *Aktualne tendencje w rozwoju młynów pierścieniowo – kulowych produkcji FPM S.A.* III Konferencja Naukowo – Techniczna. Budowa i eksploatacja młynów do przemiału węgla i innych minerałów (1998), 189 – 203.
  33. Krupa M.: *Wymagania stawiane instalacjom młynowym w związku ze stosowaniem w kotłach pyłowych technik spalania ograniczających emisję tlenków azotu.* III Konferencja Naukowo – Techniczna. Budowa i eksploatacja młynów do przemiału węgla i innych minerałów (1998), 205 – 217.
  34. Fan G.Q., Rees N.W.: *A knowledge based operator support/control system (KBOSS) for coal mills used in Power plants.* IFAC Control of Power Plants and Power Systems. Cuncun. Mexico (1995), 129-134.
  35. Cai J., Lu D., Wng P.: *Advanced control algorithm for coal mill.* 14<sup>th</sup>Trennial World Congress. IFAC Control of Power Plants and Power Systems. Beijing. P.R. China (1999), 7433-7437.
  36. Palizban H.A., O’Kelly P.A., Rees N.W.: *Practical optima predictive control of Power plant coal mills.*IFAC Control of Power Plants and Power Systems. Cuncun. Mexico (1995), 269-274.
  37. Odgaard P.F., Lin B., Jørgensen S.B.: *Observer – based and regression model – based detection of emerging faults in coalmills.*IFAC 2006, 687-692.
  38. Niemczyk P., Bendtsen J.D.: *Improved coal grinding and fuel flow control in thermal Power plants.*18<sup>th</sup>World Congress. IFAC Control of Power Plants and Power Systems. Milano (Italy), 2011, 7018-7023.
  39. Fan G.Q., Rees N.W., Parker D.: *Analysis of coal Mill dynamic characteristics under normal and ab normal operating conditions.*IFAC Control of Power Plants and Power Systems. Beijing. P.R. China (1997), 451-457.
  40. Gao Y., Zeng D.,Liu J.,Jian Y.: *Optimization control of a pulverizing system on the basis of the estimation of the outlet coal powderflow of a coal Mill.*Control Engineering Practise 63(2017), 69-80.
  41. Li H., Song Z., Sun Z., Zhanga A., Si H., Hu R., Yang C., Zhang S., Jina L.: *Operational performance characteristics of anaxial double baffles Tyree channel classifier for coarse pulverized coal.* Powder Technology400 (2022), 1-14.
  42. Feng L., Zhang H., Lilin H. Zhang Y., Wu Y., Wang Y., Yang H.: *Classification performance of model coal mill classifiers with swirling and non-swirlinginlets.* Chinese Journal of Chemical Engineering. Volume28, Issue 3 (2020), 777-784.
  43. Williams O., Newbolt G., Eastwick C. Kingman S., Giddings D., Lormor S., Lester E.: *Influence of milltype on densified biomass comminution.* Applied Energy. Volume182,(2016), 219-231.
  44. Hu H., Li Y., Lu Y., Wang X., SongG.: *Study of influencing factors of performance in novel vertical Toller mills.* Advances in engineering software, Volume 202,(2025), 103858.
  45. Altun D., Benzer H., Aydogan N., Gerold C.: *Operational parameters affecting the vertical rolle rmill performance.* Minerals Engineering, Volumes 103 - 104, (2017), 67 - 71.
  46. Masche M., Puig – Arnavat M., WadenbäckJ., Clausen S., Jensen P.A., Ahrenfeldt J., Henriksen U.B.: *Wood pellet milling tests in a suspension-firedpower plant.*Fuel Processing Technology, Volume 173, (2018), 89 - 102.

47. Ghalandari V., Esmailpour M., Payvar N., Toufic Reza M.: A case study on energy and exergy analyses for an industrial-scale vertical Toller mill assisted grinding in cement plant. *Advanced Powder Technology*, Volume 32, Issue2, (2021), 480 - 491.
48. Huang R., MaY., LiH., Sun C., Liu J., Zhang S., Wang H., Hao B.: Operation parameters multi-objective optimization method of large vertical mill based on CFD-DPM. *Advanced Powder Technology*, Volume 34, Issue6, (2023), 104014.
49. Fatahi R., Abdollahi H., Noaparast M., Hadizadeh M.: Modeling the working pressure of a cement vertical roller mill using SHAP-XGBoost: A “conscious lab of grinding principle” approach. *Powder Technology*, Volume 457, (2025), 120923.
50. Fatahi R., Abdollahi H., Noaparast M., Hadizadeh M.: Unoperational variable of cement vertical roller mill modeling: Forecast process control variables by neural network RBF-MLP-GMDH. *Particuology*, Volume 103, (2025), 55 - 56.
51. Hua W., Yaqun H., Fengnian S., Nianxing Z., Shuai W., Linhan G.: Breakage and separation mechanism of ZGM coal mill based on parameters optimization model. *International Journal of Mining Science and Technology*, Volume 24, Issue2, (2014), 285 - 289.
52. Vuthaluru H.B., Pareek V.K., Vuthaluru R.: Multi chase flow simulation of a simplified coal pulveriser. *Fuel Processing Technology*, Volume 86, Issue11, (2005), 1195 - 1205.
53. Fatahi R., Abdollahi H., Noaparast M., Hadizadeh M.: Modeling process control variables of a cement vertical roller mill using LightGBM. *Chemical Engineering Research and Design*, Volume 219, (2025), 595 - 610.
54. Ghasemi Z., Neshat M., Aldrich C., Zanin M., Chen L.: Optimising SAG mill through put and circulating load using machine learning models: A multi-objective approach for identifying optima process parameters. *Minerals Engineering*, Volume 232, (2025), 109551.
55. Fatahi R., Abdollahi H., Noaparast M., Hadizadeh M.: Investigating the impact of key variables on differential pressure in cement vertical roller mills, using the GBM algorithm. *Powder Technology*, Volume 463, (2025), 121168.
56. Genç Ö., Benzer A.H.: Horizontal roller mill (Horomill®) application versus hybrid HPGR/ball milling in finish grinding of cement. *Minerals Engineering*, Volume 22, Issue 15 (2009), 1344 – 1349.
57. Pareek P., Sankhla V.S.: Review on vertical roller mill in cement industry&its performance parameters. *Materials Today Proceedings*. Volume 44. Part 6. (2021), 4621 - 4627.
58. Fatahi R., Pournazali A., Shah M.P.: A cement Vertical Roller Mill modeling based on the number of breakages. *Advanced Powder Technology*. Volume 33, Issue10, (2022), 103750.
59. Li H., He Y., Shi F., Zuo W., Zhou N., Wei H., Wang S., Xie W.: Performance of the static airclassifier in a Vertical Spindle Mill. *Fuel*. Volume 177, (2016), 8-14.
60. Altun D., Gerold C., Benzer H., Altun O., Aydogan N.: Copper ore grinding in a mobile vertical roller mill pilot plant. *International Journal of Mineral Processing*, Volume 136, (2015), 32 – 36.
61. Özer C.E., Whiten W.J., Lynch A.J.: A multi-component model for the vertical spindle mill. *International Journal of Mineral Processing*, Volume 148, (2016), 155 – 165.
62. Fengnian S., Kojovic T., Brennan M.: Modelling of vertical spindle mills. Part 1: Sub-models for comminution and classification. *Fuel*, Volume 143, (2015), 595 – 601.
63. Fengnian S., Kojovic T., Brennan M.: Modelling of vertical spindle mills. Part 2: Integrated models for E-mill, MPS i CKP mills. *Fuel*, Volume 143, (2015), 602 – 611.

64. Parham J.J., Easson W.J.: Flow visualisation and velocity measurements in a vertical spindle coal mill static classifier. *Fuel*, Volume 82, (2003), 2115 – 2123.
65. Rizzo A., Peterson G.I.: Progress toward sustainable polymer technologies with ball-mill grinding. *Progress in Polymer Science*, Volume 159, (2024), 101900.
66. Tymoszek M., Pospolita J., Merchut A.: *Optimization of limestone comminution process in a roller – bowl mill*. *Prace Naukowe KMiUE Politechniki Śląskiej Z. 52* (2022), 267-268. Międzynarodowa XIV Konferencja Kociołowa ICBT. Poland 2022. ISBN 978-83-64497-05-6
67. Ali M., López A., Pasha M., Ghadiri M.: Optimisation of the performance of a New vertical roller mill by computational fluid dynamics simulations. *Powder Technology*, Volume 433, (2024), 119282.
68. Hu H., Li Y., Lu Y., Li Y., Song G., Wang X.: Numerical Study of Flow Field and Particle Motion Characteristics on Raw Coal Vertical Roller Mill Circuits. *Minerals Engineering*, Volume 218, (2024), 108997.
69. Marijnissen M.J., Graczykowski C., Rojek J.: Simulation of the comminution process in a high-speed rotor mill based on the feed's macroscopic material data. *Minerals Engineering*, Volume 163, (2021), 106746.
70. Liu C., Chen Z., Zhang W., Mao Y., Xu P., Xie Q.: Analysis of vertical roller mill performance with changes in material properties and operating conditions using DEM. *Minerals Engineering*, Volume 182, (2022), 107573.
71. Hu H., Li Y., Jin H., Lin B., Song G.: Analysis of the gas-solid two-phase flow characteristics and the impact of key structural parameters on the separation performance of medium-speed coal mills. *Advances in Engineering Software*, Volume 204, (2025), 103896.
72. Drzymała Z., Dzik T., Guzik J., Kaczmarczyk S., Kurek B., Sidor J.: *Badania i podstawy konstrukcji młynów specjalnych*. PWN. Warszawa (1992).

## 8. Spis rysunków i tabel

Rys. 1.1. Położenie pierścienia dyszowego na tle młynów średniobieżnych produkowanych w FPM S.A. ....	7
Rys. 3.1. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych młyna .....	24
Rys. 3.2. Schemat połączenia U – rurek z punktami pomiarowymi .....	25
Rys. 3.3. Budowa stanowiska do badania pierścieni dyszowych .....	26
Rys. 4.1. Schemat rozmieszczenia króćców pomiarowych na komorze młyna.....	32
Rys. 4.2. Schemat rozmieszczenia króćców pomiarowych na komorze młyna oraz odsiewaczu .....	32
Rys. 4.3. Wykres zależności stopnia otwarcia przekroju pierścienia dyszowego do stosunku strat ciśnienia przepływu powietrza przez pierścień dyszowy odniesionego do całkowitych strat przepływu czynnika przez młyn .....	43
Rys. 4.4. Wykres rozkładu strat ciśnienia w poszczególnych elementach młyna .....	43
Rys. 4.5. Pierścień dyszowy – stanowisko laboratoryjne – bazowa geometria .....	45
Rys. 4.6. Model geometryczny oraz siatka numeryczna przemysłowego młyna miazdzącego – warianty referencyjne .....	50
Rys. 4.7. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% .....	50
Rys. 4.8. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 77% .....	51
Rys. 4.9. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% .....	51
Rys. 4.10. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% .....	52
Rys. 4.11. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 77% .....	52
Rys. 4.12. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% .....	52
Rys. 4.13. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% .....	53
Rys. 4.14. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 77% .....	53

Rys. 4.15. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej) oraz odsiewacza (z prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% .....	54
Rys. 4.16. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% .....	54
Rys. 4.17. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 77% .....	54
Rys. 4.18. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% .....	55
Rys. 4.19. Ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% (z lewej), 77% (środek), 50% (z prawej).....	55
Rys. 4.20. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% (z lewej), 77% (środek), 50% (z prawej) .....	59
Rys. 4.21. Ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% (z lewej), 77% (środek), 50% (z prawej) .....	60
Rys. 4.22. Prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% (z lewej), 77% (środek), 50% (z prawej) .....	60
Rys. 4.23. Temperatura czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%(z lewej), 77% (środek), 50% (z prawej) .....	60
Rys. 4.24. Wykres zależności stopnia otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego do stosunku strat ciśnienia przepływu powietrza przez pierścień dyszowy odniesionego do całkowitych strat przepływu czynnika przez młyn .....	61
Rys. 4.25. Wykres rozkładu strat ciśnienia w poszczególnych elementach młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%.....	62
Rys. 4.26. Wykres rozkładu strat ciśnienia w poszczególnych elementach młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 77%.....	62
Rys. 4.27. Wykres rozkładu strat ciśnienia w poszczególnych elementach młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%.....	62
Rys. 4.28. Siatka modelu CFD przemysłowego młyna miażdżącego (z lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant I (z prawej) – warianty alternatywne I i II.....	63
Rys. 4.29. Prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (z lewej), rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant I (z prawej) – warianty alternatywne .....	64
Rys. 4.30. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej), rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna – stopień	

otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%- wariant I( z prawej) – warianty alternatywne .....	64
Rys. 4.31. Rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%- wariant I (z prawej) – warianty alternatywne .....	65
Rys. 4.32. Rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (z lewej), rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%- wariant I (z prawej) – warianty alternatywne .....	65
Rys. 4.33. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (z lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant I (z prawej) – warianty alternatywne .....	65
Rys. 4.34. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant I – warianty alternatywne .....	66
Rys. 4.35. Rozkład ciśnienia statycznego panującego w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (z lewej), rozkład prędkości czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant II (z prawej) – warianty alternatywne .....	66
Rys. 4.36. Rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (z lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%- wariant II (z prawej) – warianty alternatywne .....	66
Rys. 4.37. Rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (z lewej), rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%- wariant II (z prawej) – warianty alternatywne .....	67
Rys. 4.38. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (z lewej), rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95%- wariant II (z prawej) – warianty alternatywne .....	67
Rys. 4.39. Rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze (z lewej), kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant II (z prawej) – warianty alternatywne ..	67
Rys. 4.40. Ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant II – warianty alternatywne .....	68
Rys. 4.41. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant II – warianty alternatywne .....	68
Rys. 4.42. Siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne .....	71

Rys. 4.43. Prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne .....	72
Rys. 4.44. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne .....	72
Rys. 4.45. Rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne .....	72
Rys. 4.46. Rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne .....	73
Rys. 4.47. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne .....	73
Rys. 4.48. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant III – warianty alternatywne .....	73
Rys. 4.49. Siatka modelu CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant IV – warianty alternatywne .....	74
Rys. 4.50. Prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant IV – warianty alternatywne .....	74
Rys. 4.51. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant IV – warianty alternatywne .....	74
Rys. 4.52. Rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant IV – warianty alternatywne .....	75
Rys. 4.53. Rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant IV – warianty alternatywne .....	75
Rys. 4.54. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant IV – warianty alternatywne .....	75

Rys. 4.55. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant IV – warianty alternatywne.....	76
Rys. 4.56. Siatka modelu CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant V – warianty alternatywne .....	76
Rys. 4.57. Prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), Rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant V – warianty alternatywne .....	76
Rys. 4.58. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%- wariant V – warianty alternatywne .....	77
Rys. 4.59. Rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%- wariant V – warianty alternatywne .....	77
Rys. 4.60. Rozkład prędkości czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza( po lewej), rozkład temperatury czynnika na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50%- wariant V – warianty alternatywne .....	77
Rys. 4.61. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant V – warianty alternatywne.....	78
Rys. 4.62. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - wariant V – warianty alternatywne.....	78
Rys. 4.63. Model CFD przemysłowego młyna miażdżącego z jednym wlotem powietrza (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne .	80
Rys. 4.64. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant bazowy.....	81
Rys. 4.65. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant bazowy.....	81
Rys. 4.66. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne .....	82
Rys. 4.67. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne .....	82

Rys. 4.68. Ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne .....	82
Rys. 4.69. Rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne .....	83
Rys. 4.70. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne .....	83
Rys. 4.71. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne .....	83
Rys. 4.72. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne .....	84
Rys. 4.73. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne.....	84
Rys. 4.74. Ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VI – warianty alternatywne.....	84
Rys. 4.75. Siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne .....	86
Rys. 4.76. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne .....	86
Rys. 4.77. Ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), prędkość czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne .....	87
Rys. 4.78. Rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne.....	87
Rys. 4.79. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne .....	87

Rys. 4.80. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne .....	88
Rys. 4.81. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne .....	88
Rys. 4.82. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne.....	88
Rys. 4.83. Ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VII – warianty alternatywne.....	89
Rys. 4.84. Siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne .....	89
Rys. 4.85. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne .....	90
Rys. 4.86. Ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład prędkości czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne .....	90
Rys. 4.87. Rozkład temperatury czynnika panującej w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)– stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne .....	90
Rys. 4.88. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)– stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne .....	91
Rys. 4.89. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne .....	91
Rys. 4.90. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne .....	91
Rys. 4.91. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne.....	92

Rys. 4.92. Ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant VIII – warianty alternatywne.....	92
Rys. 4.93. Siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego( po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne .....	93
Rys. 4.94. Ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne .....	93
Rys. 4.95. Rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne .....	93
Rys. 4.96. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne .....	94
Rys. 4.97. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne .....	94
Rys. 4.98. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po prawej)– stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne .....	94
Rys. 4.99. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne .....	95
Rys. 4.100. Ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 95% - wariant IX – warianty alternatywne .....	95
Rys. 5.1 Pierścień dyszowy – stanowisko laboratoryjne – zmodyfikowana geometria – model 2.1 .....	97
Rys. 5.2 Pierścień dyszowy – stanowisko laboratoryjne – zmodyfikowana geometria – model 2.2 .....	101
Rys. 5.3 Pierścień dyszowy – stanowisko laboratoryjne – zmodyfikowana geometria – model 2.3 .....	105
Rys. 5.4 Pierścień dyszowy – stanowisko laboratoryjne – zmodyfikowana geometria – model 2.4 .....	109
Rys. 5.5 Pierścień dyszowy – stanowisko laboratoryjne – zmodyfikowana geometria – model 2.5 .....	113

Rys. 5.6. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I .....	117
Rys. 5.7. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I .....	118
Rys. 5.8. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I .....	118
Rys. 5.9. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I .....	118
Rys. 5.10. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I .....	119
Rys. 5.11. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I .....	119
Rys. 5.12. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I .....	119
Rys. 5.13. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I .....	120
Rys. 5.14. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I .....	120
Rys. 5.15. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II .....	121
Rys. 5.16. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), Rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II .....	122
Rys. 5.17. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II .....	123
Rys. 5.18. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II .....	123
Rys. 5.19. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II .....	123

Rys. 5.20. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II .....	124
Rys. 5.21. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej),rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II .....	124
Rys. 5.22. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo– powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II .....	124
Rys. 5.23. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II.....	125
Rys. 5.24. Model CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III .....	126
Rys. 5.25. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III .....	127
Rys. 5.26. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III .....	127
Rys. 5.27. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III.....	127
Rys. 5.28. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III .....	128
Rys. 5.29. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III .....	128
Rys. 5.30. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III .....	128
Rys. 5.31. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III .....	129
Rys. 5.32. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III.....	129
Rys. 5.33. Model CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po lewej),siatka modelu CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV.....	130

Rys. 5.34. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV.....	131
Rys. 5.35. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV.....	131
Rys. 5.36. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV.....	132
Rys. 5.37. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV.....	132
Rys. 5.38. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV.....	132
Rys. 5.39. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV.....	133
Rys. 5.40. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej(po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV.....	133
Rys. 5.41. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV.....	133
Rys. 5.42. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V.....	135
Rys. 5.43. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V.....	135
Rys. 5.44. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna( po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V.....	136
Rys. 5.45. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V.....	136
Rys. 5.46. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V.....	136
Rys. 5.47. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V.....	137

Rys. 5.48. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V.....	137
Rys. 5.49. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V.....	137
Rys. 5.50. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V .....	138
Rys. 5.51. Model CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI.....	139
Rys. 5.52. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI.....	140
Rys. 5.53. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI.....	140
Rys. 5.54. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI.....	141
Rys. 5.55. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI .....	141
Rys. 5.56. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI.....	141
Rys. 5.57. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI.....	142
Rys. 5.58. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI.....	142
Rys. 5.59. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI .....	142
Rys. 5.60. Model CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miażdżącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII.....	144
Rys. 5.61. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII.....	144

Rys. 5.62. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII .....	145
Rys. 5.63. Rozkład prędkości czynnika panujący w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panujący w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII.....	145
Rys. 5.64. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII .....	145
Rys. 5.65. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII .....	146
Rys. 5.66. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII.....	146
Rys. 5.67. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII.....	146
Rys. 5.68. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII .....	147
Rys. 5.69. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII.....	148
Rys. 5.70. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII.....	149
Rys. 5.71. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego czynnika panujący w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII .....	149
Rys. 5.72. Rozkład prędkości czynnika panujący w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panujący w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII.....	149
Rys. 5.73. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII .....	150
Rys. 5.74. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII .....	150
Rys. 5.75. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII.....	150

Rys. 5.76. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej) –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII.....	151
Rys. 5.77. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII .....	151
Rys. 5.78. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX.....	152
Rys. 5.79. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX.....	153
Rys. 5.80. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX .....	153
Rys. 5.81. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej),rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX.....	153
Rys. 5.82. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX .....	154
Rys. 5.83. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX .....	154
Rys. 5.84. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)– zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX.....	154
Rys. 5.85. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX.....	155
Rys. 5.86. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX.....	155
Rys. 5.87. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X.....	156
Rys. 5.88. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), Rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X.....	157
Rys. 5.89. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X .....	157

Rys. 5.90. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X.....	157
Rys. 5.91. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X .....	158
Rys. 5.92. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X .....	158
Rys. 5.93. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X.....	158
Rys. 5.94. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X.....	159
Rys. 5.95. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X.....	159
Rys. 5.96. Model CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po lewej), siatka modelu CFD przemysłowego młyna miazdzącego (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI.....	160
Rys. 5.97. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze wlotu do młyna (po lewej), rozkład prędkości czynnika w obszarze wlotu do młyna (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI.....	161
Rys. 5.98. Rozkład temperatury czynnika w obszarze wlotu do młyna (po lewej), ciśnienie statyczne panujące w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI .....	161
Rys. 5.99. Rozkład prędkości czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po lewej), rozkład temperatury czynnika panująca w komorze młyna nad pierścieniem dyszowym (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI.....	161
Rys. 5.100. Rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI .....	162
Rys. 5.101. Rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze komory młyna (po lewej), rozkład ciśnienia statycznego na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI .....	162
Rys. 5.102. Rozkład prędkości na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po lewej), rozkład temperatury na obwodzie młyna w obszarze odsiewacza (po prawej) – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI.....	162
Rys. 5.103. Kierunek przepływu strumienia mieszanki pyłowo – powietrznej (po lewej), ścieżka przepływu cząstek pyłu węglowego (po prawej)–zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI.....	163

Rys. 5.104. Przebieg wektorów prędkości na obwodzie młyna –zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI.....	163
Tab. 3.1 Parametry nadawy wprowadzonej do młyna.....	28
Tab. 4.1. Wyniki parametrów odczytanych z nastawni blokowej.....	29
Tab. 4.2. Wyniki parametrów odczytanych z nastawni blokowej.....	30
Tab. 4.3. Wyniki pomiarów ciśnienia za pomocą U – rurek.....	31
Tab. 4.4. Wyniki pomiarów ciśnienia za pomocą U – rurek.....	31
Tab. 4.5. Wyniki pomiarów ciśnienia i prędkości dla komory młyna w pierwszym dniu pomiarowym.....	33
Tab. 4.6. Wyniki pomiarów ciśnienia i prędkości dla komory młyna w drugim dniu pomiarowym.....	34
Tab. 4.7. Wyniki pomiarów ciśnienia i prędkości dla odsiewacza w drugim dniu pomiarowym.....	35
Tab. 4.8. Mediana ciśnienia i prędkości przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej dla komory młyna.....	36
Tab. 4.9. Mediana ciśnienia i prędkości przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej dla odsiewacza w drugim dniu pomiarowym.....	36
Tab. 4.10. Wyniki obliczeń analitycznych wybranych parametrów.....	36
Tab. 4.11. Porównanie ciśnień statycznych otrzymanych z odmiennych metod pomiarowych.....	37
Tab. 4.12. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn.....	37
Tab. 4.13. Wyniki pomiarów ciśnienia i prędkości dla komory młyna w trzecim dniu pomiarowym – I seria pomiarowa.....	38
Tab. 4.14. Wyniki pomiarów ciśnienia i prędkości dla komory młyna w trzecim dniu pomiarowym – II seria pomiarowa.....	39
Tab. 4.15. Wyniki pomiarów ciśnienia i prędkości dla komory młyna w trzecim dniu pomiarowym – III seria pomiarowa.....	40
Tab. 4.16. Mediana ciśnienia i prędkości przepływu mieszanki pyłowo – powietrznej dla komory młyna – III dzień pomiarowy.....	41
Tab. 4.17. Wyniki obliczeń analitycznych wybranych parametrów – III dzień pomiarowy.....	41
Tab. 4.18. Porównanie ciśnień statycznych otrzymanych z odmiennych metod pomiarowych dla III dnia pomiarowego.....	41
Tab. 4.19. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – III dzień pomiarowy.....	42
Tab. 4.20. Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – bazowa geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy.....	45

Tab. 4.21 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych .....	46
Tab. 4.22 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych .....	46
Tab. 4.23 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym sprowadzonych do warunków przemysłowych oraz zmierzonych podczas badań obiektowych .....	47
Tab. 4.24 Zestawienie obliczonych (sprowadzonych do warunków przemysłowych) oraz zmierzonych prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna podczas badań obiektowych .....	47
Tab. 4.25 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – bazowa geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego .....	48
Tab. 4.26 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego .....	48
Tab. 4.27 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – pierścień dyszowy nie wykonuje ruchu obrotowego.....	48
Tab. 4.28. Parametry siatki modelu numerycznego – warianty referencyjne .....	49
Tab. 4.29. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn w zależności od stopnia otwarcia przekroju poprzecznego pierścienia dyszowego [%] – warianty bazowe.....	55
Tab. 4.30. Zestawienie ciśnień statycznych w komorze młyna otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz badań obiektowych .....	56
Tab. 4.31. Zestawienie ciśnień statycznych w odsiewaczu otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz badań obiektowych .....	56
Tab. 4.32. Zestawienie prędkości czynnika w komorze młyna otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz badań obiektowych .....	57
Tab. 4.33. Zestawienie prędkości czynnika w odsiewaczu otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz otrzymanych w ramach badań obiektowych .....	57
Tab. 4.34. Zestawienie temperatur czynnika w komorze młyna otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz badań obiektowych.....	58
Tab. 4.35. Zestawienie temperatur czynnika w odsiewaczu otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz otrzymanych w ramach badań obiektowych .....	58
Tab. 4.36. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez pierścień dyszowy w zależności od stopnia otwarcia przekroju poprzecznego pierścienia dyszowego [%] – warianty bazowe .....	60
Tab. 4.37. Parametry siatki modelu numerycznego – warianty alternatywne I i II .....	64

Tab. 4.38. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania CFD – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego 95% – warianty alternatywne .....	68
Tab. 4.39. Parametry siatki modelu numerycznego – warianty alternatywne III, IV i V.....	71
Tab. 4.40. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania CFD – stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego – 50% - alternatywne warianty .....	78
Tab. 4.41. Parametry siatki modelu numerycznego – wariant alternatywny VI.....	80
Tab. 4.42. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania CFD — stopień otwarcia przekroju wylotowego pierścienia dyszowego 95% – wariant VI.....	85
Tab. 4.43. Parametry siatki modelu numerycznego – wariant alternatywny VII.....	86
Tab. 4.44. Parametry siatki modelu numerycznego – wariant alternatywny VIII.....	89
Tab. 4.45. Parametry siatki modelu numerycznego – wariant alternatywny IX.....	92
W Tab. 4.46 zestawiono parametry charakteryzujące przepływ czynnika przez każdy element młyna w poszczególnych punktach pomiarowych, wynikających z analizy CFD dla wariantów VII, VIII oraz IX.....	95
Tab. 5.1 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.1 .....	98
Tab. 5.2 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.1 .....	98
Tab. 5.3 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.1 .....	98
Tab. 5.4 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.1.....	99
Tab. 5.5 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.1 .....	99
Tab. 5.6 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.1 .....	100
Tab. 5.7 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.2 .....	102

Tab. 5.8 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.2 .....	102
Tab. 5.9 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.2 .....	102
Tab. 5.10 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.2 .....	103
Tab. 5.11 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.2 .....	103
Tab. 5.12 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.2 .....	104
Tab. 5.13 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.3 .....	106
Tab. 5.14 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.3 .....	106
Tab. 5.15 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.3 .....	106
Tab. 5.16 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.3 .....	107
Tab. 5.17 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścień dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.3 .....	107
Tab. 5.18 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.3 .....	108
Tab. 5.19 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścień dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.4 .....	110

Tab. 5.20 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścien dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścien dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.4 .....	110
Tab. 5.21 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścien dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.4 .....	110
Tab. 5.22 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścien dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.4 .....	111
Tab. 5.23 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścien dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścien dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.4 .....	111
Tab. 5.24 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścien dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.4 .....	112
Tab. 5.25 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścien dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.5 .....	114
Tab. 5.26 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścien dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścien dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.5 .....	114
Tab. 5.27 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścien dyszowy wykonujący ruch obrotowy – model 2.5 .....	114
Tab. 5.28 Zestawienie warunków w jakich wykonano pomiary laboratoryjne – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścien dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.5 .....	115
Tab. 5.29 Zestawienie strat ciśnienia przepływu czynnika przez pierścien dyszowy zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścien dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.5 .....	115
Tab. 5.30 Zestawienie prędkości przepływu czynnika przez komorę młyna zmierzonych na stanowisku badawczym oraz sprowadzonych do warunków przemysłowych – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – pierścien dyszowy niewykonujący ruchu obrotowego – model 2.5 .....	116
Tab. 5.31. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant I .....	117

Tab. 5.32. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu I charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego.....	120
Tab. 5.33. Założenia modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II.....	122
Tab. 5.34. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant II.....	122
Tab. 5.35. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu II charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego.....	125
Tab. 5.36. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant III.....	126
Tab. 5.37. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu III charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego.....	129
Tab. 5.38. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IV.....	131
Tab. 5.39. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu IV charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego.....	134
Tab. 5.40. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant V.....	135
Tab. 5.41. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu V charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego.....	138
Tab. 5.42. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VI.....	140
Tab. 5.43. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu VI charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego.....	143
Tab. 5.44. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VII.....	144
Tab. 5.45. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu VII charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego.....	147
Tab. 5.46. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant VIII.....	148
Tab. 5.47. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu VIII charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego.....	151

Tab. 5.48. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant IX.....	153
Tab. 5.49. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu IX charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego.....	155
Tab. 5.50. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant X.....	157
Tab. 5.51. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu X charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego.....	159
Tab. 5.52. Parametry siatki modelu numerycznego – zmodyfikowana geometria pierścienia dyszowego – wariant XI.....	161
Tab. 5.53. Zestawienie parametrów charakteryzujących przepływ czynnika przez młyn – badania numeryczne – porównanie wariantu bazowego i wariantu XI charakteryzującego się zmodyfikowaną geometrią pierścienia dyszowego.....	163

## Streszczenie

Zwiększone wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w światowej energetyce oraz rozwój niskoemisyjnych technik spalania spowodowały znaczące zmiany w eksploatacji istniejących bloków energetycznych opalanych węglem kamiennym. Wydajność pyłowego kotła energetycznego opalanego węglem jest obniżana, gdy dostępna jest energia z źródeł ekologicznych. W związku z tym zmniejsza się ilość powietrza susząco-transportującego podawanego do młyna. W połączeniu z niskoemisyjnymi technikami spalania, ograniczającymi ilość powietrza podawanego do kotła, może dochodzić do sytuacji, w których zdolność strumienia czynnika do wynoszenia cząstek z komory mielenia młyna będzie niewystarczająca. Elementem kształtującym prędkość i profil przepływu powietrza doprowadzanego do młyna jest pierścień dyszowy. W ramach niniejszej pracy zastosowano trzy metody badawcze pozwalające spojrzeć na zagadnienie przepływu powietrza susząco – transportującego przez pierścień dyszowy głębiej niż dotychczas. Mianowicie wykonano badania obiektowe, laboratoryjne i numeryczne przepływu strumienia powietrza susząco – transportującego przez pierścień dyszowy. Ponadto wykazano, że przepływ czynnika przez pierścień dyszowy charakteryzuje się największym udziałem strat ciśnienia w odniesieniu do całkowitych strat ciśnienia wynikających z przepływu czynnika przez młyn oraz przedstawiono pozostałe wnioski z przeprowadzonych badań. Dane uzyskane z badań obiektowych i laboratoryjnych stanowią dane wejściowe do utworzenia modelu numerycznego (*CFD*) pierścienia dyszowego w skali przemysłowej. Określono również wpływ wybranych parametrów na wynik funkcji celu, jaką jest zminimalizowanie oporów przepływu powietrza przez pierścień dyszowy i uzyskanie równomiernego rozptyłu mieszanki pyłowo – powietrznej na obwodzie elementów młyna. Ponadto obniżenie oporów przepływu pierścienia dyszowego może być sposobem na podwyższenie dynamiki pracy młyna pożądanej przy wysokim udziale mocy pochodzącej z źródeł odnawialnych w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (*KSE*) i stosunkowo niskim obciążeniu bloku konwencjonalnego. Dlatego opracowywana konstrukcja ma umożliwić zachowanie optymalnej zdolności wynoszenia cząsteczek w szerokim zakresie wentylacji młyna oraz ograniczyć ilość przesypów, szczególnie przy stosunkowo niskim obciążeniu młyna, co jest ważne nie tylko dla młynów pracujących w sektorze energetycznym, lecz również dla młynów eksploatowanych w sektorze przemysłowym.

## Summary

The increasing application of renewable energy sources in the global energy sector with the combination of the development of low-emission combustion techniques has resulted in significant changes in the operation of existing power units fired with pulverized coal. The efficiency of a pulverized coal-fired boiler is reduced when energy from renewable energy sources is available. Therefore, the amount of drying, hot air supplied to the mill is reduced. In combination with low-emission combustion techniques that limit the amount of air supplied to the boiler, a situation may occur in which the ability of the medium stream to carry particles from the grinding zone of the mill will be insufficient. The element that shapes the speed and profile of the air flow supplied to the mill is the nozzle ring. Within the scope of this project, three research methods were used to look at the issue of drying and transport air flow through the nozzle ring in greater accuracy than before. Namely, flow research, laboratory research and CFD research were carried out into the flow of drying and transport air through the nozzle ring. Moreover, this research gives the observation that the medium of the flow through the nozzle ring is characterized by the highest share of pressure losses in relation to total pressure losses, which are resulted by the flow of the medium through the mill and other conclusions were demonstrated. The data obtained from flow and laboratory research were statement input data to prepare *CFD* model of the nozzle ring on an industrial scale. The influence of the selected parameters on the outcome of the objective function, which is to minimise the resistance to air flow through the nozzle ring and to achieve a uniform distribution of the pulver-air mixture around the perimeter of the mill elements, was also determined. Moreover, reducing the pressure loses by medium flow through the nozzle ring could be a way to increase the dynamics of the mill's operation, which is required under the current assumptions of conventional power plants, that is with a high share of power from renewable sources in the National Power System with a relatively low power load on a conventional power unit. In addition, the design under development is to enable the maintenance of the optimal ability to remove dust particles in a wide range of mill ventilation and to reduce the number of overfills, especially with a relatively low load of the mill, which is important not only for mills operated in the power engineering sector but also for mills operated in the industrial sector to.