

POLITECHNIKA KRAKOWSKA im. T. Kościuszki

Wydział Inżynierii Środowiska
i Energetyki



**Katedra Procesów Ciepłych,
Ochrony Powietrza i Utylizacji
Odpadów**

Optymalizacja pracy pomp cyrkulacyjnych instalacji mokrego odsiarczania spalin pod kątem eksploatacji bloków energetycznych w pełnym zakresie obciążeń

Rozprawa doktorska

mgr inż. Szymon Wielgus

Promotor:

dr hab. inż. Marcin Trojan, prof. PK

Kraków, 2024

Spis treści

WAŻNE OZNACZENIA I SYMBOLE	5
1. Dotychczasowy stan zagadnienia	7
2. Cel, zakres pracy, teza pracy.....	12
3. Emisja z bloków energetycznych oraz jej ograniczanie na przykładzie kotła OP-430 w PGE Energia Ciepła S.A. Oddział nr 1 w Krakowie.....	14
3.1. Rodzaje powstałych podczas spalania zanieczyszczeń	14
3.2. Redukcja tlenków azotu.....	15
3.3. Redukcja pyłu.....	18
3.4. Redukcja tlenków siarki	19
3.4.1. Opis metody mokrej wapiennej	21
3.4.2. Przedstawienie metody mokrej wapiennej jako technologii redukcji SO _x	22
3.4.3. Przystosowanie IMOS do konkluzji BAT:	25
4. Modelowanie CFD	32
5. Opis i charakterystyka kotła OP-430	41
5.1. Budowa kotła OP-430	41
5.2. Urządzenia pomocnicze kotła	42
5.2.1. Zespoły młynowe.....	43
5.2.2. Palniki pyłowe.....	44
6. Analiza rzeczywistych parametrów pracy kotła	45
6.2. Analiza ilości dostarczonego paliwa.....	47
6.2.1. Obciążenie 90%	47
6.2.2. Obciążenie minimalne 60%	49
6.3. Analiza ilości dostarczanego powietrza	51
6.3.1. Powietrze podawane wraz z paliwem	51
6.3.2. Powietrze podawane do komory paleniskowej	52
7. Powstawanie produktów spalania podczas pracy kotła.....	56
8. Elastyczna praca bloków energetycznych	58
9. Model matematyczny komory paleniskowej kotła OP-430	60
9.1. Rejon zabudowy palników.....	60
9.1.1. Rejon zabudowy dysz OFA.....	62
9.1.2. Komora paleniskowa	62
9.2. Siatka numeryczna.....	64
9.3. Preprocesor	65
9.5. Solver	69
9.5.1. Praca bloku przy obciążeniu 90%	70

9.5.2. Praca bloku przy minimum technicznym.....	72
9.6. Analiza uzyskanych wyników	74
10. Porównanie wyników symulacji z rzeczywistą emisją SOx.....	86
11. Dobór optymalnej konfiguracji pracy pomp cyrkulacyjnych IMOS.....	88
11.1. Scenariusz 1.....	92
11.2. Scenariusz 2.....	93
12. Omówieni możliwości dalszego rozwoju metody mokrej wapiennej	97
12.1. Zwiększenie efektywności odsiarczania.....	97
12.2. Redukcja kosztów eksploatacyjnych.....	97
12.3. Minimalizacja wpływu na środowisko	98
13. Wnioski i uwagi końcowe	99
14. Bibliografia.....	101

WAŻNE OZNACZENIA I SYMBOLE

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ:

Symbol	Opis	Jednostka
NO _x	zawartość tlenków azotu w spalinach	mg/Nm ³
SO _x	zawartość tlenków siarki w spalinach	mg/Nm ³
Hg	zawartość rtęci w spalinach	mg/Nm ³
HCl	zawartość chlorowodoru w spalinach	mg/Nm ³
HF	zawartość fluorowodoru w spalinach	mg/Nm ³
NH ₃	zawartość amoniaku w spalinach	mg/Nm ³
O ₂	zawartość tlenu w spalinach	mg/Nm ³
N ₂	zawartość azotu w spalinach	mg/Nm ³
H ₂ O	zawartość wody w spalinach	mg/Nm ³
V_x, V_y, V_z	składowe wektora prędkości	m/s
x, y, z	współrzędne kartezjańskie	
t	czas	s
P	ciśnienie	Pa
R	stała gazowa	J/mol · K
T	temperatura	K
u	prędkości ortogonalne	m/s
g_x, g_y, g_z	składowe przyspieszenia grawitacyjnego	m/s ²
C_p	ciepło właściwe	J/kgK
T	temperatura	K, C
K	przewodność cieplna	W/mK
W^v	praca przepływającego płynu	J
Q_v	objętościowe źródło ciepła	W/m ³
E^k	energia kinetyczna	J
V	prędkość płynu	m/s
g	wektor przyspieszenia ziemskiego	m/s ²
P_{abs}	ciśnienie absolutne	Pa
P_{rel}	ciśnienie relatywne	Pa
r	wektor położenia cząstki płynu względem obracającego się układu współrzędnych	m
v	wektorowe pole prędkości	m/s

SYMBOLE GRECKIE:

ρ	gęstość	kg/m^3
τ	tensor naprężeń	Pa
μ	lepkość dynamiczna	$Pa \cdot s$
λ	lepkość objętościowa (druga lepkość)	$Pa \cdot s$
μ_e	lepkość efektywna	$Pa \cdot s$
Φ	dyssypacja energii w płynie na skutek lepkości	W
σ^R	wartości naprężeń Reynoldsa	Pa
ρ_0	gęstość referencyjna	kg/m^3
ω	wektor prędkości kątowej ruchu obrotowego	rad/s

1. Dotychczasowy stan zagadnienia

W dobie rosnącego udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) i liberalizacji rynku energetycznego, dynamiczne i elastyczne działanie bloków energetycznych opartych na kotłach staje się kluczowe. Bilde i in. [1] stworzył własny model matematyczny kotła z parownikiem o obiegu naturalnym w celu analizy jego pracy od momentu rozruchu ze stanu ziemnego a Wang i in. [2] opracowali model elektrowni węglowej, który następnie wykorzystali do analizy możliwości szybkiego wznowienia dostaw energii elektrycznej wkrótce po usunięciu awarii. Modelowanie CFD (obliczeniowa dynamika płynów) odgrywa zatem zasadniczą rolę w optymalizacji procesów spalania, poprawie wydajności energetycznej oraz minimalizacji emisji szkodliwych substancji do atmosfery, co przekłada się na ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko. Oko [3] opisał rolę modelowania w działaniach mających na celu poprawę projektowania, działania i kontroli istniejących lub nowo powstałych jednostek pod kątem ochrony środowiska.

Różnorodność badań w tym obszarze pokazuje kompleksowe podejście do problematyki. Badania obejmują modelowanie dynamicznego kotłów parowych pracujących w różnych warunkach obciążeniowych. Chapela i in. [4] opisał wpływ paliwa na zanieczyszczenia i związaną z tym zmiennością obciążenia i wydajnością energetyczną. Analizę wpływu zmiany obciążenia na procesy w kotłach fluidalnych prezentują badania dotyczące kotłów fluidalnych przeprowadzone przez Huttunen i in. [5]. W artykule zilustrowano za pomocą symulacji, jakie zmiany zachodzą podczas pracy kotła. Z kolei, szczegółowe badania nad kontrolą emisji poprzez zastosowanie zaawansowanych technologii wychwytywania CO₂ ze spalin za pomocą „pętli wapiennej” przedstawił w pracy Haff i in. [6]. Z kolei Hilz i in. [7] omawia sposób ulepszenia tego procesu i wyskalowania go do rozmiarów przemysłowych. Dodatkowo, prace nad ograniczeniem emisji szkodliwych substancji do atmosfery pokazują znaczenie zaawansowanych technologii w ochronie środowiska. Zheng i in. [8] wykorzystał oprogramowanie ANSYS FLUENT w celu przewidywania ilości popiołu powstałego przy spalaniu węgla dla różnych warunków pracy. Jednym z głównych wyzwań jest dostosowanie działania tradycyjnych kotłów węglowych do potrzeb rynku wymagającego szybszych zmian mocy i niższych dopuszczalnych minimalnych obciążeń [1] [5]. Opracowanie efektywnych modeli CFD umożliwiających precyzyjne prognozowanie zachowania bloków energetycznych podczas zmian obciążenia przedstawione przez Chalepa i in. [9] oraz Huttunen i in. [5] oraz uruchomień i wyłączeń [10] [11] [12] jest odpowiedzią na te wymagania. Taler i in. [10] opisał nową metodę pozwalającą na skrócenia czasu rozruchu do około 2 godzin co pozwala na znaczne zmniejszenie straty związanej z rozruchem. Madejski [12] zbadał proces spalania pyłu węglowego w bloku elektrowni o mocy 225 MWe i zaprezentował wyniki mechanizmu spalania w celu zbadania zachodzących podczas spalania procesów. Ponadto, modele te przyczyniają się do poprawy bezpieczeństwa operacyjnego, zmniejszenia zużycia paliw, wsparcia oraz optymalizacji procesów spalania w celu minimalizacji emisji CO₂ i innych szkodliwych substancji [6] [7] [8]. Dodatkowo w literaturze można znaleźć modele analityczne kotłów opalanych pyłem węglowym. Trojan [40] zaproponował nieliniowy model

matematyczny kotła o parametrach rozłożonych pozwalający na symulację jego pracy. Należy jednak zauważyć, że obliczenia przy wykorzystaniu tego rodzaju modeli pozwalają na wyznaczenie średnich wartości parametrów pracy kotła, bez możliwości określenia rozkładów tych parametrów.

Modele CFD odgrywają również kluczową rolę w badaniach nad zjawiskami takimi jak osadzanie popiołu [8] [9]. Gómez i in. [13] opisał model przejściowy spalania biomasy w stałym złożu kotła. Zachodzące interakcje pomiędzy fazą stałą i gazową mają z kolei bezpośredni wpływ na proces osadzania popiołu w kotłach. Opisana przez Laubscher i in [14] korozja rur przegrzewaczy, również ma znaczący wpływ na efektywność i niezawodność kotłów. Badania te pozwalają na lepsze zrozumienie procesów zachodzących wewnątrz kotła oraz opracowanie skutecznych strategii ich zapobiegania.

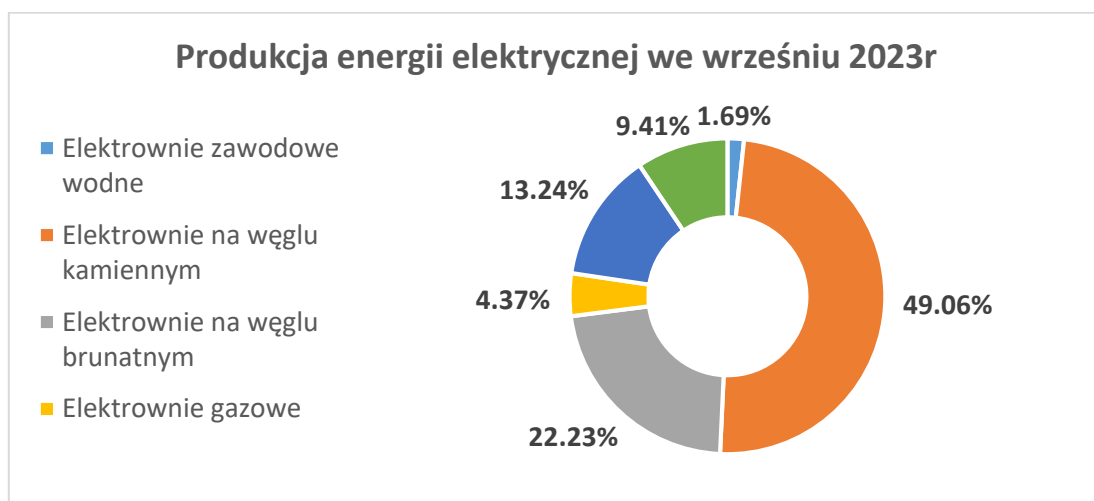
Niezmiernie ważne jest również modelowanie procesów spalania w kontekście zrównoważonego wykorzystania biomasy i odpadów jako paliw alternatywnych [4] [10]. Takie podejście nie tylko przyczynia się do dywersyfikacji źródeł energii, ale także do redukcji emisji gazów cieplarnianych, co jest zgodne z globalnymi trendami ochrony środowiska.

Instalacje przemysłowe takie jak huty czy elektrownie są podstawowym elementem wzrostu gospodarczego każdego państwa członkowskiego Unii Europejskiej. Instalacje te są również znaczącym źródłem zanieczyszczeń oddziałujących na środowisko. W celu ochrony środowiska w 1996 roku prawodawca unijny wydał pozwolenie zintegrowane regulujące warunki różnych emisji. Regulacje te ewoluowały na przestrzeni lat i zostały skodyfikowane w Dyrektywie IED z 2010 roku.

Podstawowym założeniem Dyrektywy jest określenie dopuszczalnych wielkości emisji na podstawie konkluzji BAT. Konkluzje te nakazują stosowania najlepszych dostępnych technik (ang. Best Available Techniques – BAT) które z kolei określają dokumenty referencyjne BREF (ang. Best Available Techniques Reference Document). W związku z nieustannym rozwojem techniki dla przemysłu, w 2011 roku nastąpił przegląd dokumentów dla LCP (ang. Large Combustion Plants) czego wynikiem było przyjęcie 28 kwietnia 2017 roku, konkluzji BAT. Oprócz zaostrzenia standardów emisji NO_x, SO₂ i pyłu w konkluzjach znalazły się również nieobjęte dotąd standardami emisje Hg (rtęć), HCl (chlorowodór), HF (fluorowodór) i NH₃ (amoniak). Wymogi te dotyczyły wszystkich nowopowstałych instalacji. Funkcjonujące już instalacje musiały zapewnić zgodność z nowymi normami w ciągu 4 lat od publikacji w Dzienniku Urzędowym UE.

Wraz z ograniczaniem zanieczyszczeń powstałych przez duże obiekty energetycznego spalania wzrastał udział odnawialnych źródeł energii w produkcji energii elektrycznej. W sierpniu 2023 roku udział energii odnawialnej do mocy zainstalowanej dla wszystkich źródeł w Polsce wynosił 41% [15]. Energia odnawialna, taka jak energia wiatrowa czy energia słoneczna, charakteryzuje się jednak dużą zmiennością pod względem dostępności, gdyż jest ona uzależniona od warunków atmosferycznych. Ważne jest, aby w momencie wzrostu lub spadku produkcji energii elektrycznej, elektrownie konwencjonalne posiadały zdolność do szybkiego

zrównoważenia podaży i popytu na energię elektryczną. Wang i in. [16] podkreśla konieczność utrzymania stabilności sieci elektroenergetycznej we współpracy z OZE. Dlatego też coraz większą rolę w energetyce konwencjonalnej odgrywa elastyczna praca boków energetycznych, które muszą dostosować swoją produkcję tak, aby zrekompensować wahania i utrzymać stabilność w sieci. Sunil i in. [17] zaproponował model dynamicznego zachowania kotła w szerokim zakresie scenariuszy obejmujących rozruchy i zmiany obciążenia. Trojan i in. [41] zaprezentował nowatorskie podejście do zwiększenia elastyczności bloku energetycznego o mocy 200MWe, co umożliwi lepszą integrację z odnawialnymi źródłami energii, jak na przykład farmy wiatrowe. Blok może dostosować produkcję do zapotrzebowania wynikającego z pracy OZE poprzez zastosowanie instalacji zbiorników na gorącą wodę. Podczas okresów niskiego zapotrzebowania, gorąca woda jest gromadzona w zbiornikach ciśnieniowych a następnie wykorzystywana do zasilenia kotła w czasie szczytowego popytu na energię. Dzięki możliwości odciążenia kotła w godzinach nocnych, możliwe jest osiągnięcie znacznych oszczędności i obniżenie kosztów eksploatacyjnych. Dodatkowo zastosowanie instalacji zbiorników na gorącą wodę zwiększa elastyczność pracy jednostki poprzez przyspieszenie rozruchu ze stanu zimnego.



Rysunek 1-1 Produkcja energii elektrycznej we wrześniu 2023r.

Aby móc sprostać tym wymaganiom, obiekty LCP musiały przejść szereg inwestycji i modernizacji których podstawowym zadaniem było nie tylko spełnienie wymagań środowiskowych, ale również technologicznych. Tabela 1 ukazuje zestawienie wartości dopuszczalnych emisji przed i po wprowadzeniu konkluzji BAT [18].

Parametr	Emisja wg. BAT (śr. roczna)	Emisja wg. BAT (śr. dobowa)	Emisja przed BAT (śr. godz.)
NO _x	65-150 mg/Nm ³	140-165 mg/Nm ³	600 mg/Nm ³
CO	5-100 mg/Nm ³	-	-
SO ₂	10-130 mg/Nm ³	50-220 mg/Nm ³	200 mg/Nm ³
HCl	1-5 mg/Nm ³	-	-
HF	1-3 mg/Nm ³	-	-
Pył	2-10 mg/Nm ³	3-11 mg/Nm ³	20 mg/Nm ³
Hg	1-4 μg/Nm ³	-	-

Tabela 1. Zestawienie wartości dopuszczalnych emisji przed i po wprowadzeniu konkluzji BAT

W obliczu rosnących wymogów dotyczących między innymi redukcji emisji dwutlenku siarki (SO₂) z elektrowni i innych obiektów przemysłowych, optymalizacja pracy instalacji mokrego odsiarczania spalin (IMOS) nabiera kluczowego znaczenia. W kontekście wyczerpywania się zasobów wysokiej jakości wapienia, niezbędnego do efektywnego przeprowadzenia procesu IMOS, poszukiwanie nowych, zrównoważonych materiałów sorbentowych staje się nieuniknione. Wykorzystanie odpadów, takich jak skorupy ostryg, jako substytutu dla wysokiej jakości wapienia, otwiera nowe perspektywy dla zwiększenia efektywności ekonomicznej i środowiskowej procesu odsiarczania. Rozwiązanie to zostało przedstawione przez Lin i. in. [19]

Znaczącym obszarem badań jest również optymalizacja procesów oksydacyjnych w systemach IMOS, które są kluczowe dla maksymalizacji wydajności odsiarczania. Zhao [20] przedstawił rozwiązania pozwalające zmniejszyć zużycie energii przez dmuchawy natleniające o ponad 30%. Osiągnięcie znaczących oszczędności energetycznych poprzez redukcję zużycia energii w podsystemach natleniania ma bezpośredni wpływ na zmniejszenie emisji CO₂ i kosztów operacyjnych instalacji. Dodatkowo Qin i in. [21] opisał zwiększenie skuteczności odsiarczania poprzez zastosowanie dodatkowej półki sitowej, pod poziomem zraszania.

Postęp w dziedzinie modelowania procesów i optymalizacji operacyjnej otwiera nowe możliwości dla zwiększenia skuteczności odsiarczania poprzez dokładniejszą kontrolę kluczowych parametrów procesu. Zhang przedstawił możliwość zastosowania elektrokoagulacji do oczyszczania ścieków pochodzących z IMOS, przy optymalizacji takich parametrów jak pH początkowe, czas elektrolizy czy napięcie stosowane, pozwala na skuteczniejsze usuwanie metali ciężkich i innych zanieczyszczeń [22].

W rezultacie, optymalizacja pracy instalacji IMOS staje się nie tylko kwestią technologiczną, ale również strategiczną, umożliwiającą przemysłowi energetycznemu i przetwórczemu osiągnięcie lepszej zgodności z przepisami środowiskowymi przy jednoczesnym minimalizowaniu wpływu na środowisko naturalne. Takie podejście wymaga ciągłego badania, rozwoju i wdrażania innowacyjnych rozwiązań, które wspierają zrównoważony rozwój i przyczyniają się do budowania gospodarki niskoemisyjnej. Dzięki badaniom

przeprowadzonym przez Zhong i in.[23] zostały zaproponowane wytyczne prowadzące do optymalizacji pracy systemów odsiarczania. Wang i in. [24] również zaproponował działania mające na celu zwiększenie skuteczności odsiarczania spalin w oparciu o ładunek SO₂ na wlocie do instalacji. W celu usprawnienia procesu odsiarczania i umożliwienia spalania węgla o wysokiej zawartości siarki, opracowano narzędzia pozwalające na modelowanie pracy instalacji z dodatkową półką sitową. Przeanalizowano wpływ zmian wartości pH zawiesiny absorbera i zastosowania półki na skuteczność odsiarczania oraz przedstawiono wymierne korzyści z zastosowania drugiego rozwiązania.

Dodatkowo opisane przez Chang i in. [25] innowacyjne metody, takie jak modyfikacja wapna hydratyzowanego przy użyciu roztworów etanolu i dodatków, takich jak lignosulfonian wapnia, pokazują, jak można zwiększyć efektywność adsorpcji SO₂ przez poprawę właściwości powierzchniowych adsorbentów. Z kolei zaawansowane modelowanie procesów odsiarczania, jak pokazuje praca nad modelem dla wieży odsiarczającej, umożliwia precyzyjne prognozowanie efektywności usuwania siarki, co jest kluczowe dla optymalizacji operacyjnej i redukcji kosztów [26].

Takie zintegrowane podejście do odsiarczania spalin, łączące innowacje w zakresie materiałów i zaawansowane modelowanie procesów, stanowi kierunek, w którym podąża współczesna inżynieria środowiska [27] [28]. Dążenie do maksymalizacji efektywności przy jednoczesnym minimalizowaniu negatywnego wpływu na środowisko jest kluczowe, a zrównoważone zarządzanie produktami ubocznymi otwiera nowe możliwości dla ekonomii obiegu zamkniętego [29] [30]. W ten sposób, badania nad odsiarczaniem spalin nie tylko przyczyniają się do czystszej produkcji energii, ale również wspierają globalne wysiłki na rzecz zrównoważonego rozwoju [31].

W ramach prac przeprowadzonych w niniejszej pracy doktorskiej, zbudowany został model 3D komory paleniskowej kotła OP-430 pracującego w bloku energetycznym w PGE Energia Ciepła S. A. Oddział w Krakowie, który został wykonany w wymiarach rzeczywistych w oparciu o udostępnioną dokumentację techniczno-ruchową kotła (DTR). Przeanalizowano rysunki wykonawcze komory paleniskowej wraz z układem palników i dysz powietrza w pasie palnikowym oraz dysz OFA na ścianach bocznych komory paleniskowej. Wszystkie opisane w pracy doktorskiej parametry geometryczne kotła zostały uwzględnione w opracowanym modelu 3D komory paleniskowej.

W odróżnieniu do modeli jednowymiarowych zaprezentowanych na przykład przez Bilde i in. [1] zaproponowany w pracy doktorskiej model numeryczny kotła pozwala na analizę przepływowo-cieplną z uwzględnieniem rzeczywistej geometrii. Ponadto, w porównaniu do modeli analitycznych, modelowanie CFD zapewnia bardzo szczegółowe informacje na temat wyznaczanych parametrów czynników roboczych. Dodatkowo dzięki możliwości modelowania złożonych interakcji między zjawiskami fizycznymi, modelowanie CFD zapewnia analizę realistycznych scenariuszy, co jest niezwykle ważne we współczesnych potrzebach inżynierskich i badawczych.

2. Cel, zakres pracy, teza pracy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest optymalizacja ilości i kolejności pracy pomp cyrkulacyjnych instalacji mokrego odsiarczania spalin (IMOS) pod kątem eksploatacji bloków energetycznych w pełnym zakresie obciążeń oraz analiza możliwości sterowania pracą kotłów energetycznych pod kątem optymalnej pracy instalacji mokrego odsiarczania spalin.

Cel:

Celem pracy doktorskiej było opracowanie metody pozwalającej na dobór ilości i kolejności załączania pracujących pomp cyrkulacyjnych instalacji odsiarczania pod kątem optymalnej pracy instalacji i dochowania odpowiednich poziomów emisji tlenków siarki z uwagi na ograniczenia środowiskowe i pracę (IMOS). Ponadto, w pracy doktorskiej dokonano analizy możliwości redukcji tlenków siarki SO_x z wykorzystaniem metody mokrej wapiennej podczas elastycznej pracy bloków energetycznych z wykorzystaniem modelowania CFD.

Zakres prac przewidzianych do realizacji:

1. Omówienie emisji substancji szkodliwych z bloków energetycznych oraz jej ograniczanie na przykładzie kotła OP-430 w EC Kraków
2. Przedstawienie metody mokrej wapiennej jako technologii redukcji SO_x
3. Omówienie modelowania CFD i jego roli w badaniach procesów spalania
4. Opis i charakterystyka badanego kotła OP-430
5. Analiza rzeczywistych parametrów pracy kotła
6. Powstawanie produktów spalania podczas pracy kotła
7. Elastyczna praca bloków energetycznych w kontekście współpracy z odnawialnymi źródłami energii
8. Model numeryczny (CFD) komory paleniskowej kotła OP-430
9. Walidacja uzyskanych z symulacji emisji SO_x
10. Dobór optymalnej konfiguracji pracy pomp cyrkulacyjnych IMOS
11. Omówienie możliwości dalszego rozwoju metody mokrej wapiennej
12. Propozycja dalszych badań i rozwoju tematu

W ramach pracy został wykonany model numeryczny komory paleniskowej kotła OP-430 pozwalający na przeprowadzenie symulacji komputerowych, w oparciu o które możliwe jest opracowanie charakterystyk emisji tlenków siarki w zależności od obciążenia kotła. Opracowany model numeryczny zwalidowany został w oparciu o dane pomiarowe przeprowadzone na rzeczywistym kotle energetycznym OP-430.

Głównym osiągnięciem naukowym mającym wkład w rozwój energetyki zawodowej jest zaproponowana metoda prowadzenia instalacji mokrego odsiarczania spalin, uwzględniająca optymalną pracę pomp cyrkulacyjnych i ograniczenie kosztów eksploatacyjnych. W analizowanym układzie do systemu odsiarczania spalin podłączone są 4 bloki energetyczne. Do poprawnej pracy układu IMOS zapewniona musi być temperatura spalin na poziomie 110°C i ilość tlenków siarki w przedziale 1100 ÷ 3200 mg/Nm³. Bazując na wyznaczonych charakterystykach emisji tlenków siarki można tak prowadzić IMOS, aby zapewnić optymalną pracę instalacji.

Wprowadzenie konkluzji BAT wymusiło przeprowadzanie modernizacji obiektów LCP w tym, Elektrociepłowni w Krakowie. Głównymi czynnikami stwarzającymi problem była emisja tlenków siarki, tlenków azotu oraz pyłu. W ramach niniejszej pracy doktorskiej skupiono się na ograniczeniu emisji tlenków siarki SO_x.

Podjęto próbę budowy modelu numerycznego (CFD) komory paleniskowej kotła w celu wyznaczenia emisji substancji szkodliwych na drodze obliczeń. Przeprowadzono walidację opracowanego modelu CFD w oparciu o dane pomiarowe na obiekcie.

Zakres przeprowadzonych prac jest ważny w odniesieniu do pracy instalacji odsiarczania, ponieważ warunkiem poprawnej pracy jest utrzymanie zawartości siarki na wylocie z instalacji na poziomie <200mg/Nm³. Przeprowadzone symulacje komputerowe pozwolą na określenie ilości tlenków siarki powstałych w procesie spalania pyłu węglowego i zaplanowania ilości pracujących pomp oraz kolejności ich załączania. Dzięki uzyskanym wynikom z symulacji pracy kotłów przy różnych obciążeniach, możliwe będzie określenie wytycznych do prowadzenia instalacji mokrego odsiarczania spalin dla ekonomicznej pracy IMOS.

Teza pracy:

- 1. Możliwe jest wytypowanie pracujących pomp cyrkulacyjnych instalacji mokrego odsiarczania spalin na podstawie obciążenia bloku energetycznego w sposób zapewniający bezpieczną i optymalną pracę IMOS oraz dochowanie wymaganych poziomów emisji tlenków siarki.***
- 2. Możliwe jest sterowanie pracą kotłów energetycznych w sposób zapewniający dochowanie wymaganych poziomów emisji tlenków siarki oraz zapewniający bezpieczną i optymalną pracę układu odsiarczania spalin (IMOS).***

3. Emisja z bloków energetycznych oraz jej ograniczanie na przykładzie kotła OP-430 w PGE Energia Ciepła S.A. Oddział nr 1 w Krakowie

W rozdziale przedstawiono zagadnienia związane z emisją zanieczyszczeń z bloków energetycznych elektrowni i elektrociepłowni konwencjonalnych. Opisano powstałe zanieczyszczenia, wpływ na środowisko oraz metody ich ograniczenia.

3.1. Rodzaje powstałych podczas spalania zanieczyszczeń

W wyniku spalania węgla kamiennego, do atmosfery emitowane są różne rodzaje zanieczyszczeń mających negatywny wpływ na środowisko. W celu jego ochrony, wprowadzone konkluzje BAT wymuszają na obiektach LCP dostosowanie technologii do nowych standardów oraz stosowanie najlepszych możliwych technik w celu redukcji tych zanieczyszczeń. Podczas spalania, do atmosfery emitowane są między innymi:

- powstały z popiołu zawartego w węglu pył (popiół lotny) o średnicy 1-200 μ m. W skład pyłu wchodzi różne tlenki metali (ołów, wanad, arsen, beryl, kadm) które w połączeniu z osadzonym na nim kwasem siarkowym i azotowym tworzą trujące i rakotwórcze związki. Dodatkowo oprócz mechanicznego podrażnienia dróg oddechowych, drobny pył przedostaje się do pęcherzyków płucnych a najdrobniejszy, podobnie jak gazy wnikają do płuc i rozpuszczają się w osoczu. Zawarte w nim metale ciężkie sprzyjają powstawaniu raka a związki siarki, azotu i węglowodorów powodują astmę lub zapalenie płuc.

- powstałe w procesie spalania siarki zawartej w paliwie dwutlenek i trójtlenek siarki. Dwutlenek siarki wpływa negatywnie na pracę serca i obieg krwi. Jego działanie na drogi oddechowe jest nasilone u niemowląt i osób starszych. Dodatkowo SO₂ ma bardzo negatywny wpływ na środowisko i infrastrukturę. Poprzez odbarwianie liści, hamuje fotosyntezę zmniejszając przyrost masy drzewnej oraz zmienia wapń w gips który jest następnie wymywany z murów podczas opadów.

- powstałe z azotu zawartego w paliwie i powietrzu doprowadzonym do procesu spalania tlenki azotu (NO_x) które powodują chroniczne schorzenia dróg oddechowych oraz mają niszczący wpływ na hemoglobinę. Duże stężenia tlenków azotu są szkodliwe dla płuc, natomiast małe, wraz z ozonem, węglowodorami i światłem słonecznym przyczyniają się do tworzenia smogu fotochemicznego i kwaśnego.

- powstały w przypadku niepełnego spalania tlenek węgla (CO)

- powstały podczas pełnego spalania węgla zawartego w paliwie dwutlenek węgla (CO₂)

Niezwykle niebezpiecznym zarówno dla środowiska jak i dla otoczenia jest zjawisko „kwaśnego opadu”. Połączenie dwutlenków siarki i tlenków azotu z wodą tworzy kwas o słabym stężeniu który wraz z opadami atmosferycznymi spadają na ziemię w postaci depozycji mokrej lub

depozycji suchej w przypadku opadania zanieczyszczonych kwasem cząsteczek pyłu zawieszonych w powietrzu. W ten sposób kwas przedostaje się do wód, gleb, organizmów, murów, budynków, pomników czego skutki przedstawiają poniższe zdjęcia.



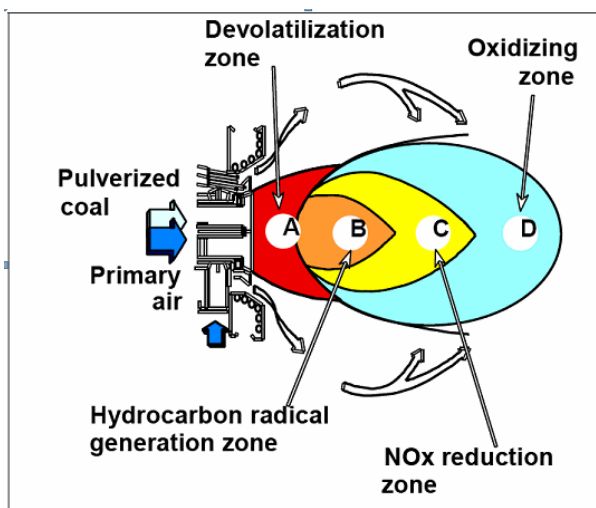
Zdjęcie 1 Acid rain, Jizera Mountains, Czech Republic
Autor: Nipik, 2006



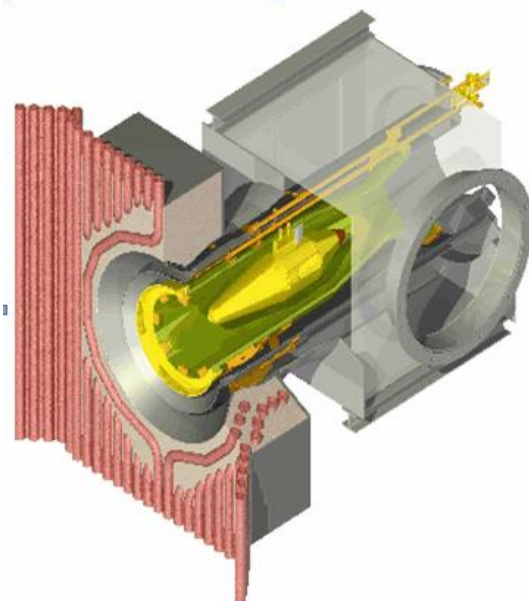
Zdjęcie 2 „Acid rain results on monuments”
Autor: Nino Barbieri, 2005

3.2. Redukcja tlenków azotu

Realizowana poprzez metody pierwotne redukcja tlenków azotu polega na stopniowaniu ilości powietrza do spalania. Odbywa się to poprzez podział doprowadzonego do palnika powietrza na powietrze pierwotne, wtórne i trzecie. Zasada działania palników niskoemisyjnych polega na wytworzeniu wysokotemperaturowego płomienia o działaniu redukcyjnym w rejonie końcówki palnika. Wytworzone związki redukcyjne rozpraszają tlenki azotu w strefie powietrza wtórnego a dostarczone powietrze trzecie dopala powstały w strefie powietrza wtórnego koksik.



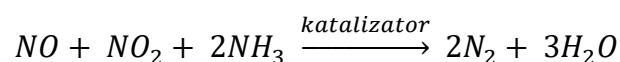
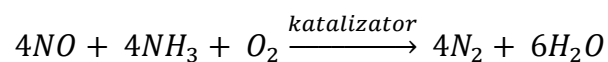
Rysunek 3-1 Zasada spalania niskoemisyjnego w palniku RI-JET2



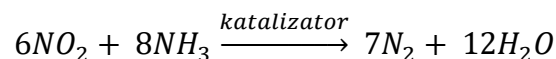
Rysunek 3-2 Budowa palnika niskoemisyjnego RI-JET2

W celu zapewnienia redukcji tlenków azotu do oczekiwanej wartości, konieczne jest wyposażenie kotła w system dysz OFA pozwalający na dwustopniowe spalanie które jest realizowane poprzez doprowadzenie powietrza powyżej górnej strefy spalania. System ten pozwala na maksymalną redukcję NOx przy jednoczesnej kontroli tworzenia ubocznych produktów spalania i koncentracji tlenku węgla. Strumień powietrza doprowadzonego do kotła jest taki sam jak w kotle bez systemu OFA zmieniając tylko jego rozkład.

Kolejną instalacją służącą oczyszczaniu spalin jest SCR (ang. Selective Catalytic Reduction). Instalacja ta odpowiada za zmniejszenie emitowanych w spalinach tlenków azotu. Dzieje się tak poprzez redukcję NOx do gazowego azotu i pary wodnej. Czynnikiem redukującym w przypadku kotła OP-430 jest amoniak. Metoda selektywnej redukcji katalitycznej dotyczy wyłącznie tlenków azotu nie oddziałując przy tym na atomy węgla i tlenki siarki. Naturalnym środowiskiem do zachodzenia reakcji redukujących tlenki azotu są temperatury rzędu 800°C i wyższych (w temperach rzędu 1100°C, więcej amoniaku jest utlenianego do NOx niż redukowanych NOx). Aby reakcje zachodziły w atmosferze niższych temperatur, konieczne jest zastosowanie katalizatora (zdjęcie 4) który ma za zadanie wspomóc reakcję (nie biorąc w niej udziału):



W przypadku spalania paliw kopalnianych, większość NOx to NO. W obu powyższych reakcjach występuje zależność 1:1 między redukowanymi NOx a zużywanym amoniakiem.



Powyzsza reakcja zachodzi w przypadku, gdy stężenie NO₂ jest większe niż NO.

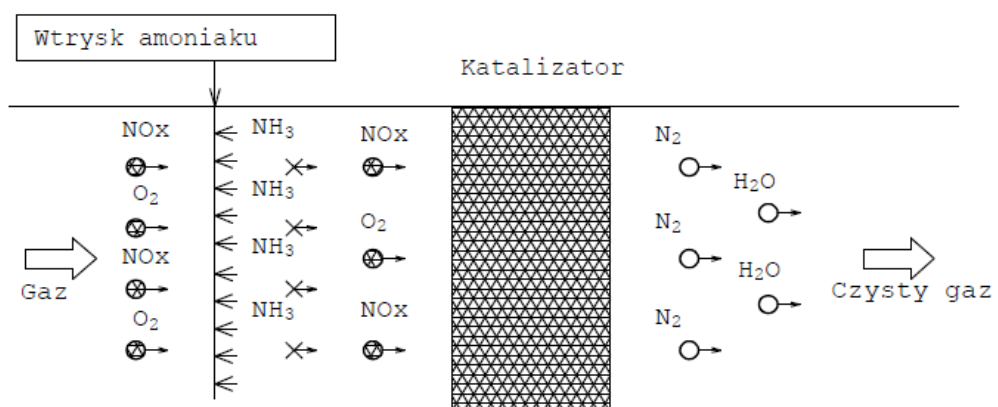
Woda amoniakalna o stężeniu 24% zostaje odparowana w instalacji odparowywacza a następnie rozcieńczana powietrzem i wtryskiwana do kanału wlotowego SCR poprzez ruszt wtryskowy ukazany na zdjęciu 3.



Zdjęcie 3 Ruszt wtryskowy



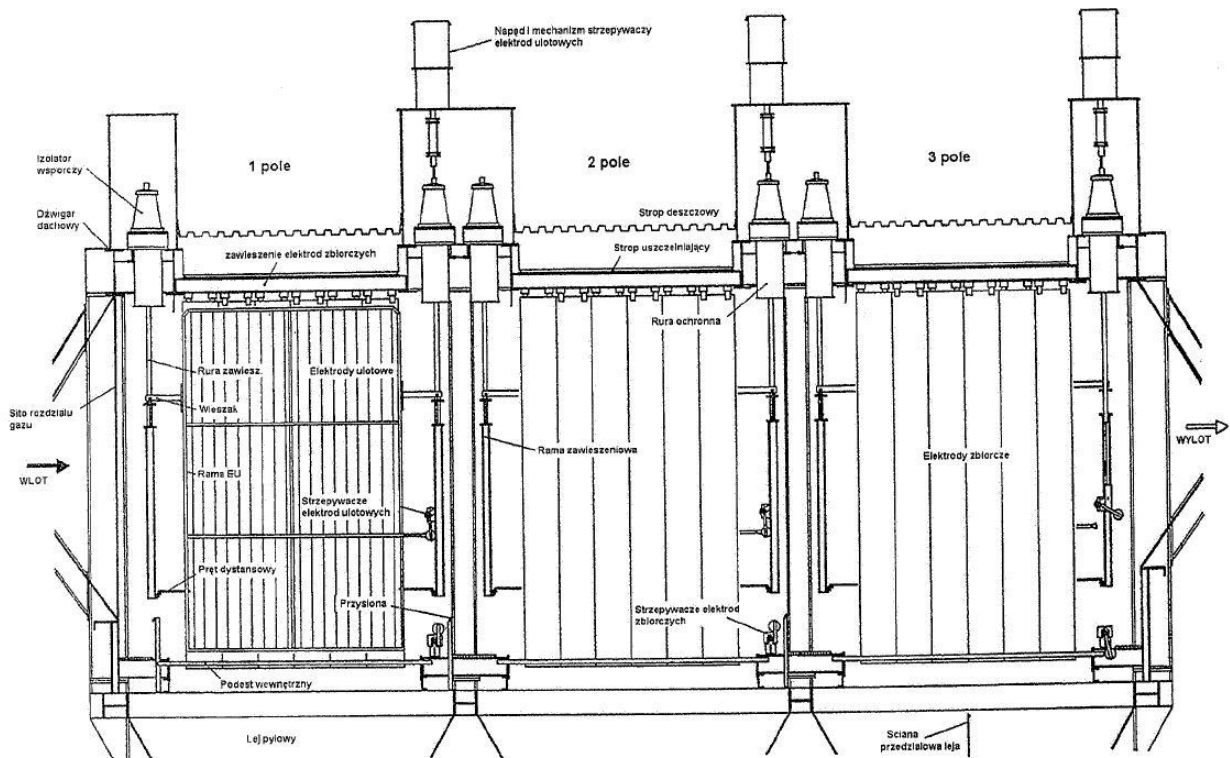
Zdjęcie 4 wnętrze katalizatora



Rysunek 3-3 zasada działania SCR

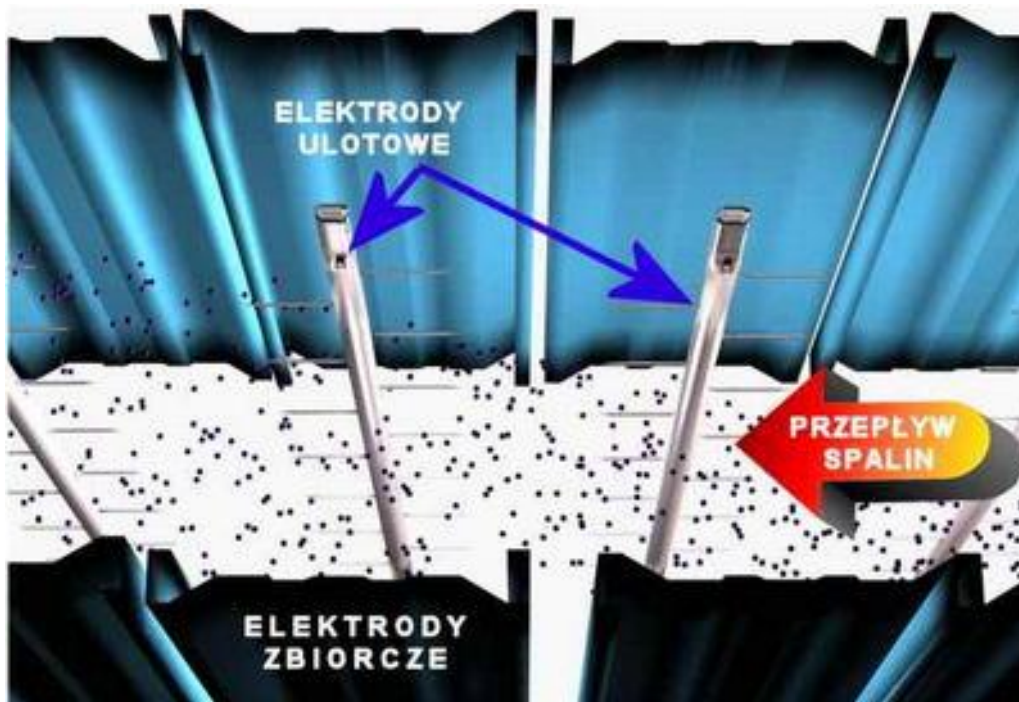
3.3. Redukcja pyłu

Kolejną instalacją na drodze spalin służącą ich oczyszczaniu są elektrofiltry. Elektrofiltry składają się z zespołu zasilającego oraz komory odpylającej. W skład zespołu zasilającego wchodzi doprowadzenie napięcia sieci zasilającej, szafy sterowniczej oraz zespołu prostowniczego a w jego wnętrzu znajduje się zespół elektrod i układu do ich oczyszczania z nagromadzonego pyłu. Działanie elektrofiltrów opiera się na wykorzystywaniu zjawiska powstawania i przemieszczania się ładunków elektryczności statycznej. Budowę elektrofiltru przedstawia rysunek 3-4.



Rysunek 3-4 budowa elektrofiltru

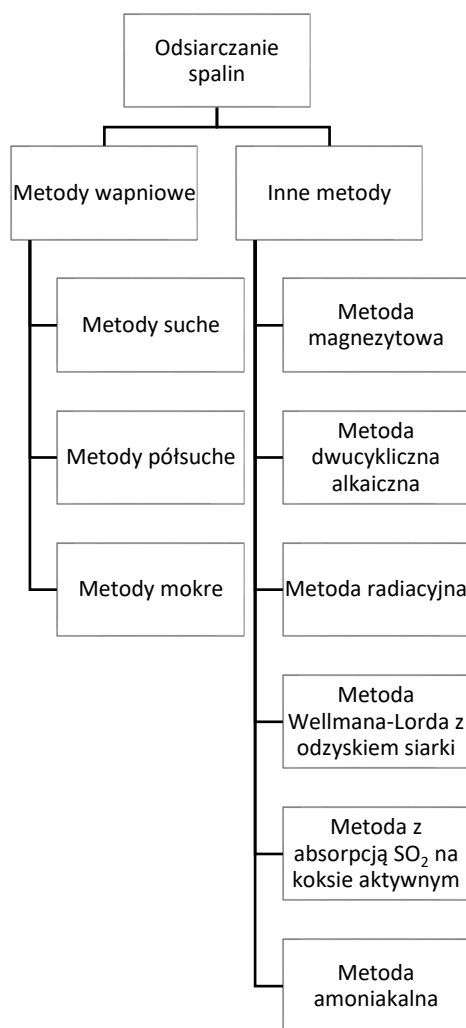
Elektrody ulotowe przedstawione na rysunku 3-5 są zasilane napięciem stałym o ujemnej biegunowości. W trakcie pracy duże natężenie pola przy elektrodach powoduje występowanie zjawiska ulotu elektronów które osadzają się na cząstkach przepływającego pyłu. Elektrody zbiorcze o dodatnim potencjale przyciągają naładowane ujemnie cząstki pyłu który następnie jest usuwany w sposób ciągły (elektrofiltry mokre) lub okresowy (elektrofiltry suche).



Rysunek 3-5– elektrody

3.4. Redukcja tlenków siarki

Ostatnim etapem na drodze spalin jest instalacja odsiarczania. Pomimo możliwości zastosowania różnych środków absorpcyjnych, 75% instalacji odsiarczania spalin oparta została na metodzie wapiennej. Mimo gorszych właściwości chłonnych węgla wapnia (tabela 2), w większości przypadków rozwiązanie to jest najkorzystniejsze z uwagi na produkt końcowy. Dzieje się tak z uwagi na fakt, iż produktem końcowym nie jest odpad a produkt. Podział metod odsiarczania spalin przedstawia schemat 3-6.



Rysunek 3-6 Podział instalacji odsiarczania spalin

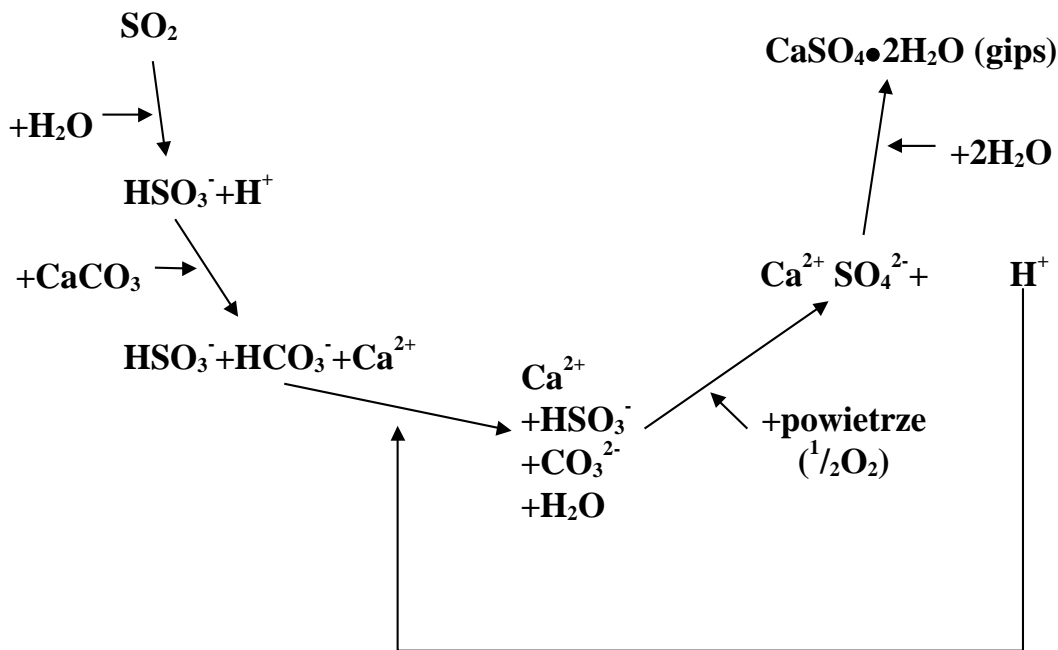
Roztwór	Stopień chłonności SO ₂ [mol SO ₂ /mol H ₂ O]
Woda	$6 * 10^{-5}$
Węglan wapnia	$8 * 10^{-4}$
Cytrynian sodu	$4 * 10^{-3}$
Siarczyn amonowy	$8 * 10^{-3}$
Siarczyn sodowy	$4 * 10^{-2}$

Tabela 2 – stopień chłonności SO₂ poszczególnych roztworów

Ze względu na wyczerpywanie zasobów wapna, poszukiwane są jego substytuty. Przykładem może być zaproponowany przez Jonghun L., zastosowanie odpadów muszli ostryg [19].

3.4.1. Opis metody mokrej wapiennej

Działanie metody mokrej wapienno-gipsowej oparte jest na obmywaniu spalin w absorberze wodną zawiesiną kamienia wapiennego. Podczas tego procesu tworzy się siarczyn wapnia CaSO_3 który jest kolejno natleniany i konwersowany do CaSO_4 . Po wytrąceniu z roztworu i jego odwodnieniu wytwarzany jest w efekcie końcowym gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Proces odsiarczania przedstawia rysunek 3-7. Oprócz usuwania ze spalin tlenków siarki, usuwane są dodatkowo związki HCl , HF i pył.

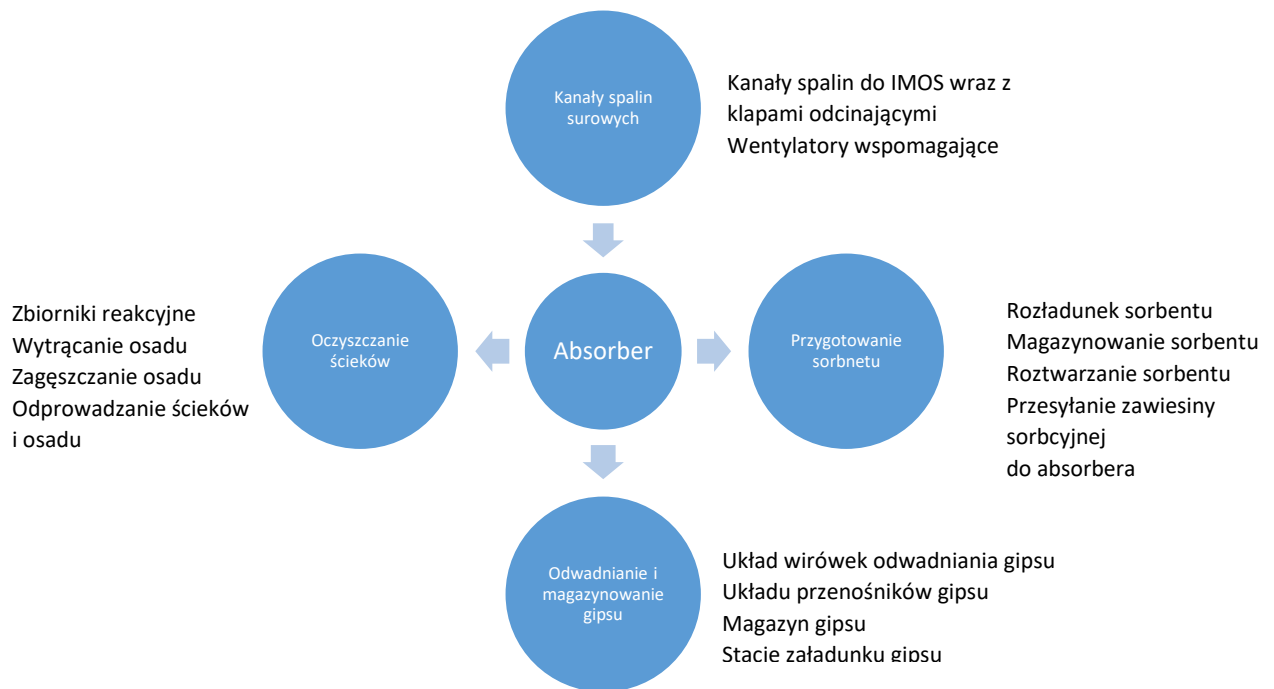


Rysunek 3-7 Proces chemiczny odsiarczania spalin

3.4.2. Przedstawienie metody mokrej wapiennej jako technologii redukcji SO_x

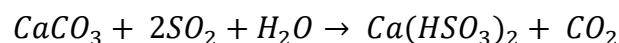
Instalacja mokrego odsiarczania spalin (IMOS) w PGE Energia Ciepła S.A Oddział nr 1 w Krakowie składa się z 5 głównych grup urządzeń przedstawionych na rysunku 3-8.

- absorber,
- komin i system kanałów spalin,
- węzeł przygotowania sorbentu,
- węzeł odwadniania i magazynowania gipsu,
- węzeł oczyszczalni ścieków.

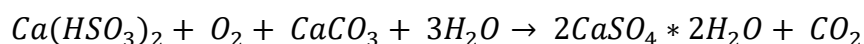


Rysunek 3-8 Schemat Grupy urządzeń IMOS

Zawiesina absorbera zawierająca wodę i węglan wapnia pobierana jest z części retencyjnej zbiornika i transportowana do strefy zraszania gdzie następuje intensywne przemycie spalin. Podczas tego procesu zachodzi reakcja:



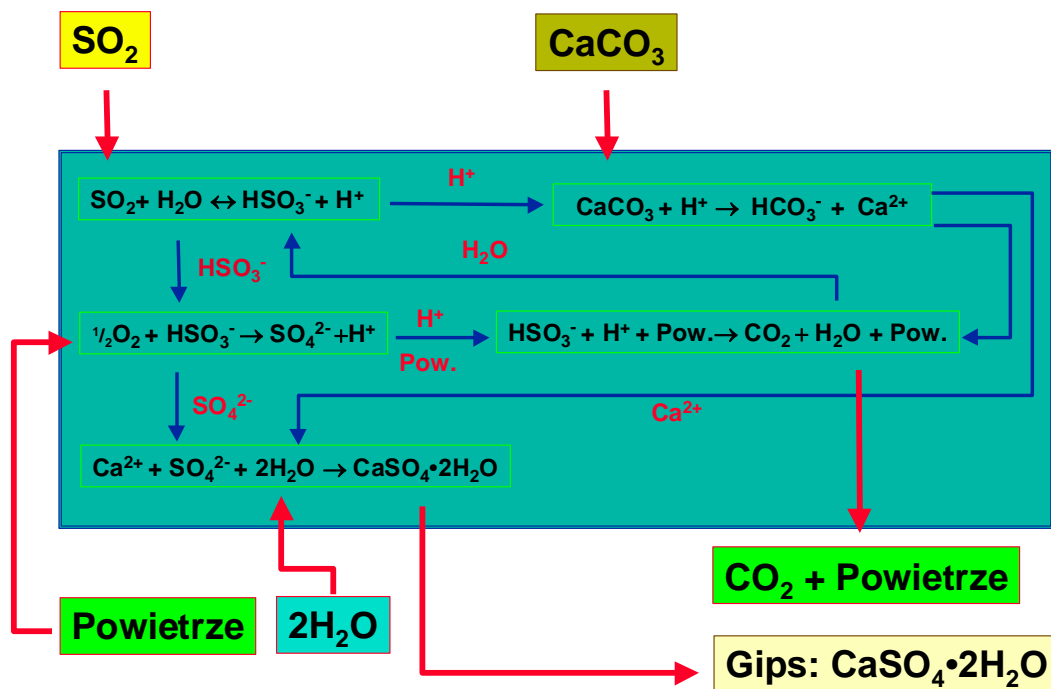
W wyniku kontaktu z doprowadzonym do absorbera powietrzem natleniającym, wodorosiarczyn wapnia utlenia się według reakcji:



Do wytworzenia świeżej zawiesiny sorpcyjnej wykorzystywana jest mączka kamienia wapiennego. Zawiesina absorbera zawierająca znaczne ilości gipsu cyrkulując w układzie, całkowicie wykorzystuje dostarczony sorbent. Ilość dostarczonego sorbentu zależy od strumienia SO_2 w spalinach surowych oraz wartości pH zawiesiny absorbera.

Zawiesina absorbera w sposób ciągły zostaje odprowadzana i przekierowywana na hydrocyklony gipsu w celu zagęszczenia a następnie odwodnienia przy użyciu wirówek gipsu. Produkt uboczny w postaci gipsu opuszcza instalację a powstały w trakcie wirowania filtrat zwracany do absorbera. Aby zapobiec wzrostowi stężeń niepożądanych substancji, z instalacji w sposób ciągły wyprowadzane są również ścieki. Podczas przemywania spalin zawiesiną, oprócz tlenków siarki do zawiesiny przedostaje się chlorowódz (występujący w postaci rozpuszczonego chlorku Cl-), tlenki żelaza, glinu oraz krzemiany.

Podczas usuwania SO_2 przy zastosowaniu sorbentu w postaci mączki kamienia wapiennego ważną rolę odgrywa wartość pH zawiesiny absorbera. Wyższe pH pozytywnie wpływa na usuwanie SO_2 , jednak osłabia szybkość reakcji rozpuszczania CaCO_3 oraz stopień utlenienia hydrosiarczanu. W celu całkowitej przemiany siarczynu w siarczan absorbery ze zintegrowanym węzłem utleniania powinny pracować na niższej wartości pH niż absorbery z zewnętrznym zbiornikiem. Efekty zmiany pH zostały przeanalizowane przez Zhongyang Z [27].



Rysunek 3-9 Reakcje w mokrej metodzie odsiarczania spalin, źródło: Instrukcja eksploatacji IMOS

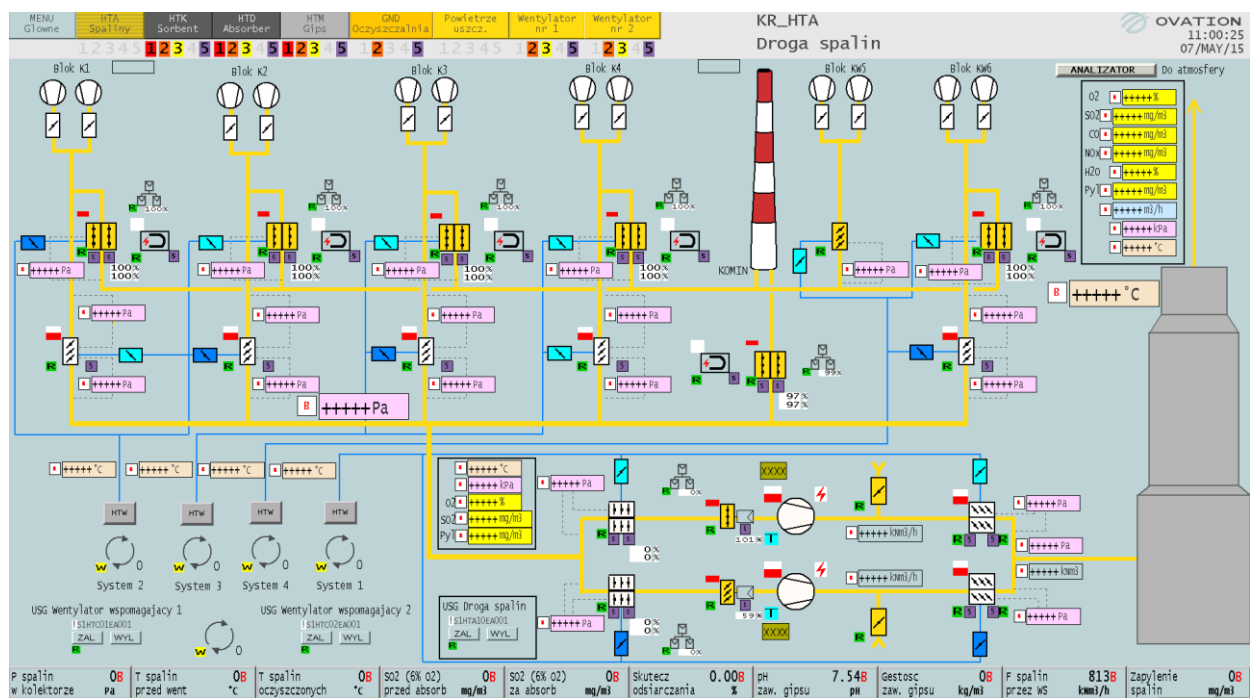
W celu umożliwienia pracy instalacji w dowolnej konfiguracji pracy bloków energetycznych, na dolocie do IMOS zabudowano układ kanałów spalin ukazany na rysunku 3-10. Kanały transportują spłiny o temperaturze od 110°C do 160°C . W skład systemu spalin wchodzi:

- kanały wewnętrzne pomiędzy wentylatorami wyciągowym kotła a wspomagającymi IMOS,

- klapy żaluzyjne obejściowe do kominów,
- klapy żaluzyjne odcinające IMOS.

W celu przeprowadzenia remontów, przeglądów lub napraw na dolocie spalin do absorbera zostały zainstalowane klapy odcinające. Jest to układ dwóch klap, uszczelnionych powietrzem zaporowym.

Zadaniem klap szybko otwierających jest zabezpieczenie instalacji oraz zapewnienie nieprzerwanej pracy kotłów energetycznych w przypadku wystąpienia awarii lub zakłócenia pracy IMOS. Dzieje się tak dzięki wyposażeniu klap w dodatkowy napęd sprężynowo-magnetyczny oraz amortyzatory. W przypadku wystąpienia zakłócenia, wyłączone jest napięcie na elektromagnesie, co powoduje zwolnienie sprężyn i otwarcie klapy w czasie krótszym niż 5 sekund. Spaliny zostają poprowadzone na komin rozruchowy, minimalizując możliwość „zdużenia” kotła. Takim zakłóceniem może być wzrost lub spadek ciśnienia w kolektorze dolotowym do IMOS do określonych wartości.



Rysunek 3-10 System kanałów spalin z klapami szybko otwierającymi

Szczelność zamkniętych klap zapewnia powietrze uszczelniające. Powietrze jest tłoczone za pomocą systemu dmuchaw w przestrzeń pomiędzy skrzydła klapy, a następnie kontrolowana jest wielkość nadciśnienia w stosunku do spalin.

Przeływające przez absorber spaliny o temperaturze 110°C ÷ 160°C zostają obmyte poprzez deszcz zawiesiny zawierającej środki absorpcyjne, schładzane do temperatury nasycenia i odprowadzane do atmosfery przez umieszczony nad absorberem komin mokry. Zabudowany w kominie system odkraplaczy (wstępny, pośredni i końcowy) zwracają krople cieczy do

absorbera. Podczas kontaktu spalin z zawiesiną, zostają związane i wyflukane ze spalin zanieczyszczenia (SO_2 , HCl , HF , SO_3 , pył). Cyrkulująca w absorberze zawiesina transportowana jest pompami cyrkulacyjnymi z dolnej części absorbera do strefy kontaktu, gdzie poprzez system dysz tworzy wspomniany deszcz zawiesiny.

W dolnej części absorbera, oprócz pomp cyrkulacyjnych znajdują się pompy upustowe których zadaniem jest wyprowadzenie części zawiesiny z produktami reakcji. Zawiesina jest transportowana na hydrocyklony gipsu gdzie przelew kierowany jest do zbiornika wody obiegowej a odpływ dolny w zależności od gęstości i przewodności zawiesiny transportowany jest do instalacji odwodnienia lub z powrotem do absorbera.

Ze zbiornika wody obiegowej, zawiesina kierowana jest z kolei na hydrocyklony ścieków gdzie znowu następuje odseparowanie cięższych frakcji. Wylew z hydrocyklonów ścieków zawraca do absorbera a ścieki z przelewu trafiają pierwotnie do zbiornika ścieków surowych a następnie na dwustopniową oczyszczalnię ścieków.

Odpływ dolny z hydrocyklonów gipsu, kierowany jest do zbiornika pośredniego zawiesiny gipsu. Pompy transportują zawiesinę do zbiornika zawiesiny gipsu skąd trafia na wirówki gipsu. Zawiesina o odpowiednich parametrach (gęstość, pH, temperatura) zostaje odwirowana do produktu końcowego w formie gipsu o zawartości wolnej wilgoci do 9%. Poprzez system taśmociągów, gips jest transportowany na magazyn gipsu skąd przy użyciu wygarniacza półportalowego trafia do stacji załadunku transportu samochodowego lub kolejowego.

3.4.3. Przystosowanie IMOS do konkluzji BAT:

Założenia projektowe instalacji mokrego odsiarczania spalin były dużo bardziej restrykcyjne niż wymagania wprowadzone przez konkluzje BAT. W celu przystosowania IMOS do obowiązujących od 2017 roku restrykcji, przeprowadzono 4 modernizacje:

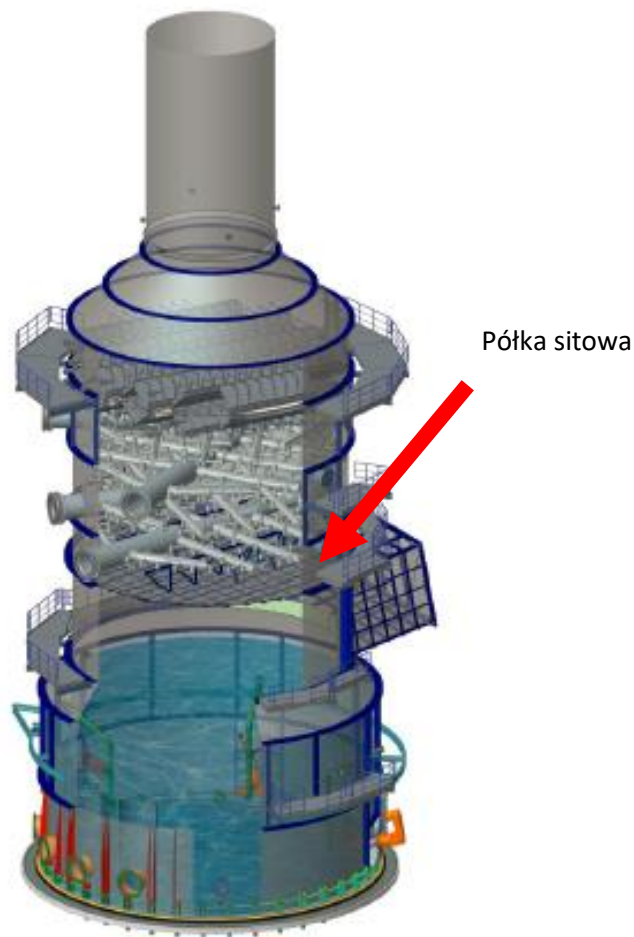
- montaż dodatkowej półki sitowej absorbera,
- zwiększenie wydajności wentylatorów wspomagających,
- przebudowa oczyszczalni ścieków IMOS
- instalacja monitoringu ciągłego Hg , HCl , NH_3 na emitorze

3.4.3.1. Montaż dodatkowej półki sitowej

Zadaniem zamontowanej 1,7m pod najniższym poziomem zraszania dodatkowej półki sitowej ukazanej na rysunku 3-11 i zdjęciu 5 jest polepszenie usuwania SO_2 ze spalin. Efekt ten jest uzyskany poprzez:

- homogenizację rozkładu prędkości przepływu spalin przez absorber – dzięki umieszczonej bezpośrednio nad wlotem spalin półce, profil prędkości przepływu spalin wyrównuje się. Homogenizacja rozkładu prędkości przepływu przez obszar dyszy zraszających, zwiększa skuteczność odsiarczania.

- zwiększenie powierzchni oraz czasu kontaktu gazu z cieczą – otwory w półce sitowej powodują zwiększenie prędkości spalin które przez nie przepływają. Efekt ten sprzyja porywaniu części opadającej w formie małych kropeł zawiesiny i ponowny ich unos. Zwiększa to czas kontaktu zawiesiny ze spalinami o 1-2 sekundy.
- zwiększone naturalne utlenianie – zwiększony czas kontaktu spalin z cieczą powoduje zwiększoną absorbcję nie tylko SO_2 , ale również O_2 . Zwiększone naturalne utlenianie powoduje z kolei zwiększoną absorbcję SO_2 ze względu na lepsze utlenianie siarczynu do siarczanu.
- odświeżenie powierzchni przenikania masy poprzez intensywne mieszanie zawiesiny – absorbcja SO_2 powoduje spadek pH przy powierzchni kropeł. Dzięki koalescencji zawiesiny na półkę i intensywnemu mieszaniu, pH na granicy między stanem ciekłym i lotnym wzrasta pochłaniając więcej SO_2 .



Rysunek 3-11 Rysunek absorbera z półką sitową



Zdjęcie 5 Półka sitowa

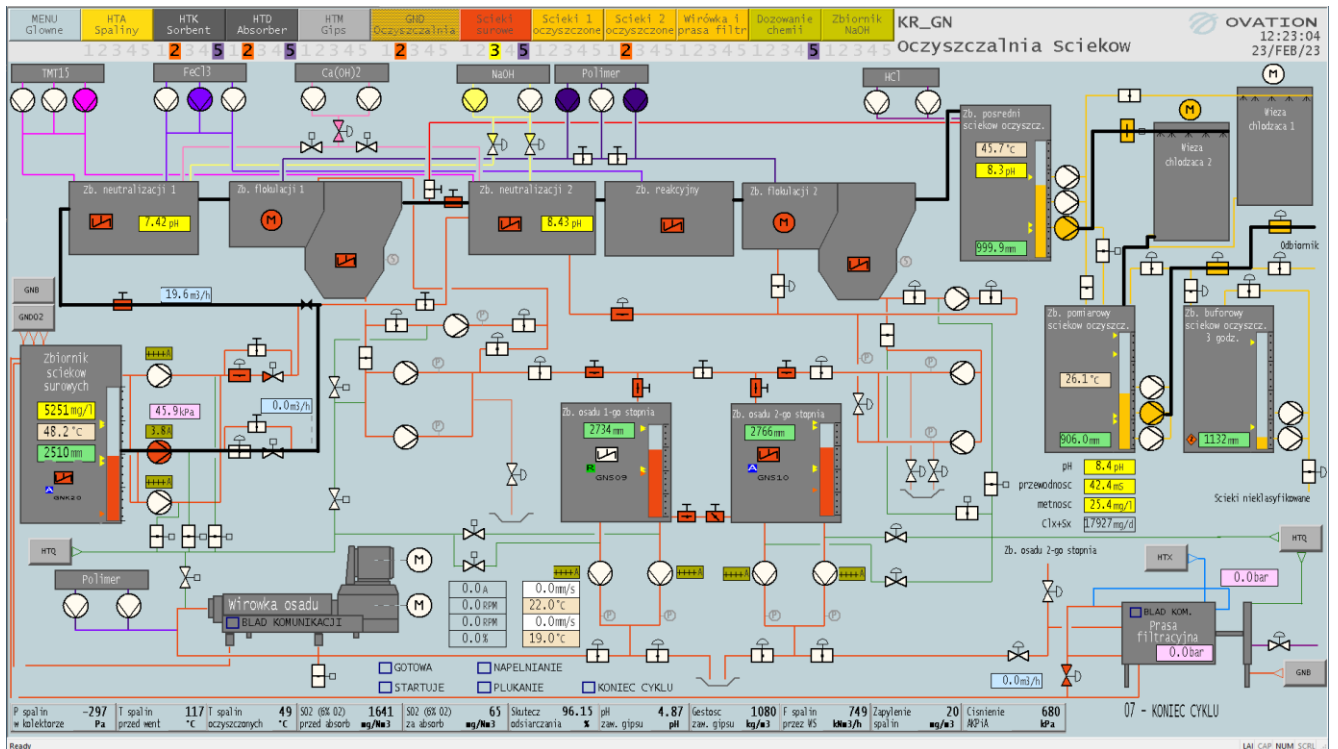
3.4.3.2. Zwiększenie wydajności wentylatorów wspomagających

Wentylatory wspomagające spalin niwelują spadki ciśnienia w instalacji mokrego odsiarczania spalin, utrzymując jednocześnie stałe ciśnienie wewnątrz kanału spalin prowadzącym do IMOS. Zabudowa dodatkowej półki sitowej spowodowała zwiększone straty. W celu ich niwelacji, zwiększono wydajność wentylatorów.

3.4.3.3. Zwiększenie wydajności odprowadzania ścieków, modernizacja oczyszczalni ścieków

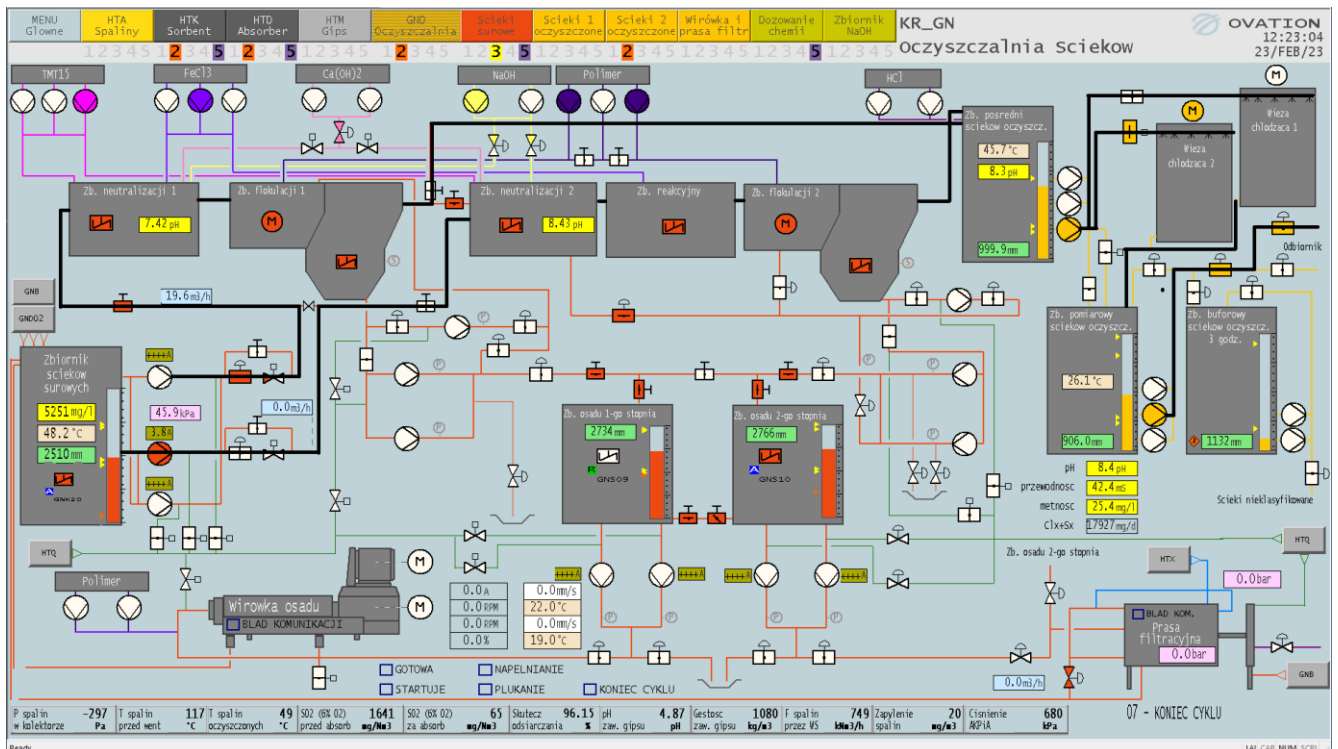
Hydrocyklony ścieków zmniejszają zawartość cząstek stałych z przelewu hydrocyklonów gipsu do poziomu umożliwiającego oczyszczanie. Poprawienie absorpcji, spowodowało zwiększenie ilości odprowadzanych ścieków, a w konsekwencji rozbudowę oczyszczalni ścieków. Nastąpiło zwiększenie wydajności oczyszczalni z 32 m³/h do 50 m³/h poprzez zmianę środka alkalinizującego z Ca(OH)₂ na NaOH, zmianę środka do wytrącania metali ciężkich oraz dostosowanie instalacji do równoległej pracy.

Oczyszczalnia ścieków może pracować w sposób szeregowy lub równoległy. Możliwe układy pracy oczyszczalni przedstawiono na rysunkach 3-12 i 3-13.



Rysunek 3-12 Praca szeregową oczyszczalni

Podczas pracy szeregową ścieki przepływają przez I ciąg i są kierowane do oczyszczenia na II ciągu. Układ ten pozwala uzyskać lepsze efekty oczyszczania ścieków, jednak ogranicza wydajność oczyszczalni.



Rysunek 3-13 Praca równoległą oczyszczalni

Podczas pracy równoległej ścieki rozdzielone są pomiędzy I i II ciąg. Rozwiązanie to umożliwia pracę oczyszczalni z wydajnością 50 m³/h, jednak oczyszczanie jest mniej efektywne w porównaniu do pracy szeregowej.

3.4.3.3.1. Ciąg technologiczny węzła

Ciąg technologiczny węzła składa się z następujących elementów:

- a) zbiornik ścieków surowych – przelew z hydrocyklonów ścieków kierowany jest do pośredniego zbiornika ścieków surowych wyposażonego w mieszadło, z którego strumień ścieków jest transportowany do oczyszczalni ścieków i poddawany procesowi oczyszczania z nadmiernych zawiesin oraz metali ciężkich.
- b) zbiornik neutralizacyjny 1 stopnia – ścieki o odczynie pH 6,6 – 6,8 z dużą zawartością substancji stałych, są doprowadzone do zbiornika neutralizacji nr 1, do którego dozowane jest mleko wapienne lub wodorotlenek sodu (NaOH) w celu podniesienia pH do wartości 7-8.
- c) zbiornik flokulacji z osadnikiem lamelowym 1 stopnia – ze zbiornika neutralizacji ścieki przepływają grawitacyjnie do zbiornika flokulacji nr 1 zintegrowanego z osadnikiem lamelowym nr 1, gdzie reagują z dozowanym flokulantem, w wyniku czego tworzą się dobrze sedimentujące kłaczkowate skupiska.
- d) zbiornik neutralizacyjny 2 stopnia – Przelew z osadnika lamelowego nr 1 jest doprowadzony grawitacyjnie do zbiornika neutralizacji nr 2, gdzie ścieki reagują z mlekiem wapiennym lub wodorotlenkiem sodu (NaOH). Wodorotlenek sodu lub mleko wapienne dozowane jest proporcjonalnie do przepływu ścieków surowych oraz w zależności od wartości pH. Wartość pH jest nastawiona na 8,5. Taka wartość pH jest korzystna dla wytrącania większości metali ciężkich ze ścieków IMOS. Nie wszystkie metale ciężkie dają się wytrącić jako wodorotlenki. Należy tu wymienić rtęć i, kadm. W tym celu do zbiornika neutralizacji 2, proporcjonalnie do przepływu ścieków surowych, dozowany jest środek do wytrącania metali ciężkich. Tworzy on przede wszystkim z rtęcią i kadmem trudno rozpuszczalne związki kompleksowe.
- e) zbiornik flokulacji z osadnikiem 2 stopnia – Ścieki z przelewu lameli nr 1 zawierają jeszcze dużo drobnych cząstek, które źle się osadzają. Dla poprawienia koagulacji części stałych dozowany jest do zbiornika reakcyjnego proporcjonalnie do przepływu ścieków surowych Fe₂(SO₄). Zdolność do osadzania się osadu zostaje polepszona poprzez proporcjonalne do ilości ścieków surowych, dozowanie anionowego flokulanta (FHM) do zbiornika flokulacji nr 2. Polielektrolit (flokulant) podnosi znacznie ładunek powierzchniowy cząstek i umożliwia koagulację w postaci większych, lepiej osadzających się kłaczek (aglomeratów). Mieszadła w poszczególnych komorach służą do dokładnego wymieszania poszczególnych strumieni reagentów.

Części stałe wytrącone w zbiorniku flokulacji nr 2 spływają grawitacyjnie do osadnika lamelowego nr 2 o pochyłych ścianach. Na wewnętrznych ścianach tego zbiornika zamocowane są przegrody zwiększające efektywną powierzchnię klarowania. Następuje tutaj oddzielenie części stałych od ścieków.

- f) zbiornik pośredni ścieków oczyszczonych – W zbiorniku pośrednim ścieków oczyszczonych prowadzona jest korekta pH przy pomocy HCl. Następnie ścieki zostają przepompowane do wież chłodzących gdzie następuje ich ochłodzenie do temperatury poniżej 35°C. W zależności od wydajności oczyszczalni pracować będzie jeden lub dwa układy chłodzenia ścieków.
- g) zbiornik pomiarowy – z wież chłodzących ścieki spływają grawitacyjnie do zbiornika pomiarowego ścieków oczyszczonych, w którym następuje pomiar mętności, przewodności i pH.
- h) zbiornik buforowy ścieków - W przypadku nie osiągnięcia wymaganych parametrów jakościowych, ścieki są przepompowywane są do zbiornika buforowego ścieków oczyszczonych o 3 godzinny czasie retencji i następnie zwracane do układu oczyszczania ścieków.

Porównanie zmian dopuszczalnych stężeń przed i po wprowadzeniu konkluzji BAT przedstawiono w tabeli 3.

Dopuszczalne stężenia:		
	Przed wprowadzeniem BAT	Po wprowadzeniu BAT
Temperatura	35 °C	35 °C
pH	6,5-9	6,5-9
Zawiesina ogólna	35 mg/l	30 mg/l
BZT 5	25 mg O ₂ /l	25 mg O ₂ /l
ChZT	125 mg/l	-
Azot ogólny	400 mg/l	400 mg/l
Rtęć Hg	0,06 mg/l	0,003 mg/l
Kadm Cd	0,4 mg/l	0,005 mg/l
Bor B	200 mg/l	200 mg/l
Cynk Zn	2 mg/l	0,2 mg/l
Miedź Cu	0,5 mg/l	0,05 mg/l
Nikiel Ni	0,5 mg/l	0,05 mg/l
Ołów Pb	0,5 mg/l	0,02 mg/l

Suma Cl+SO ₄	30 000 mg/l	30 000 mg/l
Arsen As	-	0,05 mg/l
Chrom Cr	-	0,05 mg/l
OWO	-	50 mg/l
Fluorki F ⁻	-	25 mg/l
Siarczany SO ₄ ²⁻	-	2000 mg/l
Siarczyny SO ₃ ²⁻	-	20 mg/l
Siarczki S ²⁻	-	0,2 mg/l

Tabela 3 – dopuszczalne stężenia substancji w ściekach

4. Modelowanie CFD

Modelowanie CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) jest gałęzią mechaniki płynów wykorzystującą analizę numeryczną i algorytmy w celu rozwiązania zagadnień związanych z ruchem gazów i cieczy. Dzięki możliwości symulacji płynów w różnych warunkach, modelowanie staje się podstawową metodą obliczeniową w wielu dziedzinach inżynierii i nauki.

W przypadku złożonych geometrii i warunków brzegowych, rozwiązania analityczne równań różniczkowych opisujących ruch płynu, na których opiera się modelowanie CFD są niezwykle trudne. Metodyka CFD umożliwia aproksymację tych równań z wykorzystaniem metod numerycznych.

Aby umożliwić symulację z wykorzystaniem CFD należy przeprowadzić proces modelowania składający się z następujących kroków:

- Zdefiniowanie problemu,
- Wygenerowanie geometrii modelu,
- Wygenerowanie siatki numerycznej (dyskretyzacja modelu),
- Zdefiniowanie warunków brzegowych,
- Obliczenia numeryczne,
- Analiza i wizualizacja wyników.

Z uwagi na precyzję procesu modelowania, CFD znajduje zastosowanie w takich dziedzinach jak:

- Energetyka – Analiza przepływu w kotłach, przegrzewaczach, turbinach gazowych, turbinach wiatrowych, reaktorach jądrowych [32] [33] [34]
- Inżynieria lotnicza i kosmiczna – projektowanie samolotów, analiza oporów powietrza, przepływów wokół ciał.
- Ochrona środowiska – Analiza rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w środowisku (wodzie i w powietrzu),
- Inżynieria motoryzacyjna i mechaniczna – projektowanie układów chłodzenia, badania oporu aerodynamicznego.
- Biomechanika – badania przepływu krwi w naczyniach krwionośnych.

W ostatnich latach, modelowanie CFD odgrywa kluczową rolę w branży energetycznej skupiając się przede wszystkim na projektowaniu, optymalizacji i eksploatacji kotłów energetycznych. Zastosowanie CFD daje możliwość wykonania szczegółowych analiz procesów

spalania z uwzględnieniem rozkładu powietrza, mieszania się paliwa z powietrzem i kinetyki procesów chemicznych. Obliczenia te pozwalają na optymalizację obecnych źródeł pod kątem efektywności i ograniczenia zużycia paliwa. Drugim obszarem w kontekście energetyki jest wpływ na emisję szkodliwych substancji. Dzięki wykonanym symulacjom możemy przewidzieć poziomy emisji szkodliwych substancji jak NO_x, SO_x, CO₂ oraz tak dostosować proces spalania, aby ograniczyć powstawanie tych związków. Dodatkowo CFD wykorzystywane jest podczas projektowania urządzeń i instalacji energetycznych.

Podstawy przepływu płynów

Chcąc zdefiniować problem przepływu płynów należy posłużyć się prawami zachowania masy, pędu i energii. Wyrażone w postaci cząstkowych równań różniczkowych prawa są dyskretyzowane na podstawie techniki opartej na elementach skończonych.

Należy przyjąć założenia:

- Płyn jest newtonowski,
- Występuje w jednej fazie,
- Dziedzina problemu nie ulega zmianie,
- Należy określić, czy problem jest laminarny, czy turbulentny oraz algorytm niekompresowany lub ściśliwy

Równanie ciągłości

Z prawa zachowania masy wynika równanie ciągłości:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad 4-1$$

Gdzie:

V_x, V_y, V_z – składowe wektora prędkości, odpowiednio w kierunkach x, y, z

ρ – gęstość,

x, y, z – współrzędne kartezjańskie

t – czas

Prędkość zmiany gęstości można zastąpić prędkością zmiany ciśnienia i prędkością zmiany gęstości pod wpływem ciśnienia:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \quad 4-2$$

Gdzie:

P – ciśnienie

Dzięki równaniu stanu, możemy wyznaczyć pochodną gęstości po ciśnieniu. Przy użyciu algorytmu ściśliwego należy przyjąć właściwości gazu doskonałego:

$$\rho = \frac{P}{RT} \rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{1}{RT} \quad 4-3$$

Gdzie:

R – stała gazowa

T – temperatura

Równanie momentu

W płynie Newtonowskim zależność między naprężeniem, a szybkością odkształcenia płynu jest następująca:

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij}\lambda \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad 4-4$$

Gdzie:

τ_{ij} – tensor naprężeń

u_i – prędkości ortogonalne ($u_1 = V_x, u_2 = V_y, u_3 = V_z$)

μ – lepkość dynamiczna

λ – lepkość objętościowa (druga lepkość)

Ostatni człon, stanowiący iloczyn drugiego współczynnika lepkości i zmian prędkości, wynosi zero dla płynu o stałej gęstości i można go pominąć w przypadku płynu ściśliwego.

Równanie 4-4 przekształca równanie pędu w równania Naviera-Stokesa.

Równania momentu są więc następujące:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z V_x)}{\partial z} &= \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} \\ + R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) &+ T_x \end{aligned} \quad 4-5$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z V_y)}{\partial z} &= \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} \\ + R_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) &+ T_y \end{aligned} \quad 4-6$$

$$\frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z V_z)}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} \quad 4-7$$

$$+ R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + T_z$$

Gdzie:

g_x, g_y, g_z , - składowe przyspieszenia ziemskiego

ρ – gęstość

μ_e – lepkość efektywna

R_x, R_y, R_z – rozłożone rezystancje

T_x, T_y, T_z – warunki utraty lepkości

W przypadku przepływu laminarnego, lepkość efektywna jest równa lepkości dynamicznej.

Współczynniki R_x, R_y, R_z są określane w przypadku modelowania cech geometrycznych bez konieczności modelowania całej geometrii – np. przepływ przez sita.

Współczynniki T_x, T_y, T_z są eliminowane w przypadku płynu nieściśliwego.

$$T_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \quad 4-8$$

$$T_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) \quad 4-9$$

$$T_z = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \quad 4-10$$

Zachowanie energii może być wyrażone w kategoriach temperatury całkowitej, wykorzystywanej często przy przepływach o wysokiej sprężystości lub temperatury statycznej, odpowiedniej dla analiz niskoprędkościowych i nieściśliwych.

Równania energii dla płynów ściśliwych

Pełne równanie energii jest rozwiązywane w przypadku ściśliwym z uwzględnieniem wymiany ciepła. W odniesieniu do całkowitej temperatury, równanie energii jest następujące:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T_0) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x C_p T_0) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y C_p T_0) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z C_p T_0) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K \frac{\partial T_0}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K \frac{\partial T_0}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K \frac{\partial T_0}{\partial z}\right) + W^v + E^k + Q_v + \Phi + \frac{\partial P}{\partial t}$$

Gdzie:

C_p – ciepło właściwe

T_0 – temperatura odniesienia

K – przewodność cieplna

W^v – praca przepływającego płynu

Q_v – objętościowe źródło ciepła

Φ – dyssypacja energii w płynie na skutek lepkości

E^k – energia kinetyczna

Temperatura jest obliczana z temperatury odniesienia wyznaczonej z energii kinetycznej

$$T = T_0 - \frac{V^2}{2C_p} \quad 4-12$$

Gdzie:

V – wektor prędkości płynu

Temperatura statyczna i całkowita dla węzłów niepłynnych będzie taka sama.

Pracę przepływającego płynu określa:

$$W^v = V_x \mu \left[\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right] \quad 4-13$$

$$+ V_y \mu \left[\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right]$$

$$+ V_z \mu \left[\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right]$$

W literaturze, ten termin często występuje w notacji tensorowej, co pozwala na bardziej zwartą formę:

$$W^v = u_j \mu \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right] \quad 4-14$$

Powtórzenie indeksu dolnego oznacza sumowanie po trzech ortogonalnych kierunkach.

Energia kinetyczna wynosi:

$$E^k = - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{K}{Cp} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} |V^2| \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{K}{Cp} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} |V^2| \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K}{Cp} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} |V^2| \right) \right] \quad 4-15$$

Ostatecznie wartość dysypacji energii mechanicznej w płynie na skutek lepkości wynosi:

$$\begin{aligned} \Phi = 2\mu & \left[\left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2 \right] \\ & + \mu \left[\left(\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad 4-16$$

W literaturze jest to zwykle wyrażane w notacji tensorowej:

$$\Phi = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \quad 4-17$$

Równanie energii dla przepływu nieściśliwego:

Równanie energii dla przypadku nieściśliwego może być wyprowadzone z równania dla przypadku ściśliwego poprzez zaniedbanie lepkości, ciśnienia, rozpraszania lepkości i energii kinetycznej. Ponieważ energia kinetyczna jest zaniedbana, temperatura statyczna i całkowita są takie same. Równanie energii przyjmuje teraz postać równania transportu ciepła dla temperatury statycznej.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho Cp T) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho V_x Cp T) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho V_y Cp T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_z Cp T) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad 4-18$$

Gdzie:

Cp – ciepło właściwe

T_0 – temperatura odniesienia

K – przewodność cieplna

Q_v – objętościowe źródło ciepła

Turbulencje

W przypadku, gdy efekt bezwładności jest wystarczająco duży w stosunku do efektów lepkości, przepływ może być turbulentny. Turbulencja oznacza, że natychmiastowa prędkość w każdym

punkcie pola przepływu ulega fluktuacjom. Prędkość jest zatem wyrażona w terminach wartości średniej i składowej fluktuacyjnej:

$$V_x = \bar{V}_x + V'_x$$

Gdzie:

\bar{V}_x – średnia prędkość lokalna w kierunku x

V'_x – fluktuacja składowej prędkości w kierunku x

Jeśli takie wyrażenie jest używane dla określenia prędkości w równaniach Naviera-Stokesa, równania mogą być wtedy uśrednione w czasie. Średnia wartość składowych fluktuacyjnych prędkości wynosi zero, a średnia czasowa wartości chwilowej jest wartością średnią. Interwał czasowy jest tak dobrany, aby był wystarczająco długi, żeby powyższe było prawdą, i wystarczająco krótki, aby efekty przejściowe "w rzeczywistym czasie" nie wpływały na integrację.

$$\frac{1}{\delta_t} \int_0^{\delta_t} V'_x dt = 0; \quad \frac{1}{\delta_t} \int_0^{\delta_t} V_x dt = \bar{V}_x \quad 4-20$$

Po podstawieniu powyższego równania do równań pędu, uśrednianie czasowe prowadzi do pojawienia się dodatkowych wyrażen. Prędkości w równaniach pędu są prędkościami uśrednionymi, tak że brak kreski oznacza teraz wartość średnią. Dodatkowe wyrażenia to:

$$\sigma_x^R = -\frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho V'_x V'_x}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho V'_x V'_y}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho V'_x V'_z}) \quad 4-21$$

$$\sigma_y^R = -\frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho V'_y V'_x}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho V'_y V'_y}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho V'_y V'_z}) \quad 4-22$$

$$\sigma_z^R = -\frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho V'_z V'_x}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho V'_z V'_y}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho V'_z V'_z}) \quad 4-23$$

Gdzie:

σ^R - wartości naprężeń Reynoldsa

W podejściu lepkości wirowej do modelowania turbulencji wprowadza się te wyrażenia w formie lepkiego wyrazu naprężenia z nieznanym współczynnikiem - lepkością turbulentną.

Przykładem jest:

$$-\overline{\rho V'_x V'_y} = \mu_t \frac{\partial V_x}{\partial y} \quad 4-24$$

Znalezienie rozwiązania dla problemu turbulencji zależy od określenia wartości lepkości turbulencyjnej.

Ciśnienie

Z uwagi na fakt, iż równania są rozwiązywane w obracającym się układzie współrzędnych, równanie dla ciśnienia względnego jest następujące:

$$P_{abs} = P_{ref} + P_{rel} - \rho_0 \mathbf{g} \cdot \mathbf{r} + \frac{1}{2} \rho_0 (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{r} \quad 4-25$$

Gdzie:

ρ_0 – gęstość referencyjna

P_{ref} – ciśnienie referencyjne

\mathbf{g} – wektor przyspieszenia ze względu na grawitację

P_{abs} – ciśnienie absolutne

P_{rel} – ciśnienie relatywne

\mathbf{r} – wektor położenia cząstki płynu względem obracającego się układu współrzędnych

$\boldsymbol{\omega}$ – wektor prędkości kątowej ruchu obrotowego

Gęstość referencyjna jest obliczana z równania stanu zdefiniowanego przy użyciu normalnej temperatury.

Równanie pędu, biorąc pod uwagę obracający się układ współrzędnych jest wyrażone w notacji wektorowej:

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} + 2 \rho \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V} + \rho \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \\ = \rho \mathbf{g} - \nabla P_{abs} + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \end{aligned} \quad 4-26$$

Gdzie:

\mathbf{V} – wektor prędkości przy obracającym układzie współrzędnych

μ – lepkość płynu (przyjęta jako wartość stała)

ρ – gęstość płynu

W przypadku braku obrotu, wektor prędkości \mathbf{V} jest wektorem prędkości w globalnym układzie współrzędnym.

Przeciwiństwo gradientu ciśnienia absolutnego wynosi:

$$-\nabla P_{abs} = -\nabla P_{rel} - \rho_0 \mathbf{g} + \rho_0 \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad 4-27$$

Wstawienie tego wyrażenia do wektorowej formy równania pędu przedstawia je w kontekście ciśnienia względnego i różnic gęstości.

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} + 2 \rho \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V} + (\rho - \rho_0) \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \\ = (\rho - \rho_0) \mathbf{g} - \nabla P_{rel} + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \end{aligned} \quad 4-28$$

Ta forma ma pożądaną cechę (z punktu widzenia precyzji numerycznej) wyrażania funkcji wymuszającej z powodu grawitacji i przyspieszenia odśrodkowego w przypadkach różnic gęstości.

5. Opis i charakterystyka kotła OP-430

Poniżej przedstawiono charakterystykę kotła OP-430 ze szczególną uwagą na układy biorące bezpośredni udział w procesie spalania, dla którego przeprowadzono symulację CFD.

5.1. Budowa kotła OP-430

Kocioł OP-430 jest kotłem z obiegiem naturalnym o wydajności 430 ton pary na godzinę, z paleniskiem na pył węgla kamiennego. Kocioł posiada układ odwróconej litery „U” a ściany komory paleniskowej, międzyciągu oraz górnej części II-go ciągu wykonane są jako szczelne membranowe. W dolnej części komory paleniskowej rury ściany przedniej i tylnej, odgięte są do wnętrza tworząc lej żuźlowy. Dla jednoczesnego umożliwienia swobodnej dylatacji i zachowaniu szczelności, lej żuźlowy zamknięty jest zamkiem wodnym.

Obieg parowo wodny:

1. Podgrzewacz wody
2. Walczak
3. Parownik
4. Walczak
5. Przegrzewacz pary pierwotnej (świeżej):
 - a. Stropowy
 - b. Ekran II ciągu i międzyciągu
 - c. Konwekcyjny
 - d. Grodzie
 - e. Końcowy

Podgrzewacz wody zabudowany jest w dolnej części kotła. Woda doprowadzona jest czołowo z obu stron do komory wlotowej, następnie rurami wieszakowymi dostaje się do górnej komory rur wieszakowych skąd przepływa do dolnej komory rur wieszakowych. Następnie poprzez węzownice podgrzewacza, woda transportowana jest do rur pionowych wzdłuż tylnej ściany II ciągu do kolektora wylotowego i trafia do walczaka.

Rozdzielenie mieszanki parowo wodnej następuje w walczaku. Składa się on z urządzeń służących do wytrącania kropel wody (osuszenia pary) i wytrącenia zawartych w niej soli. W skład tych urządzeń wchodzi cyklony, żaluzje, separatory, sita i siatki odwadniające. Rozdział mieszanki parowo-wodnej następuje nad lustrem wody w walczaku gdzie panują warunki nasycenia wywołane pompą wody zasilającej. Odpowiednią suchość i czystość pary

odprowadzanej do przegrzewacza pary zapewnia 60 sztuk cyklonów oraz po 52 sztuki sit i oddzielaczy wody.

Odparowanie i podgrzanie wody następuje w parowniku. W zależności od charakteru obiegu wody rozróżniamy kotły:

- z naturalnym obiegiem wody,
- z wymuszonym obiegiem wody,
- kotły przepływowe.

W kotle OP-430 parownik stanowi zespół parownika. W zespół parownika wchodzi walczak, rury opadowe, dolne komory zbiorcze, rury wznoszące i górne komory zbiorcze. W tych elementach następuje dogrzanie i odparowanie wody oraz rozdzielnie wody i pary. Naturalny obieg wody wynika z różnicy gęstości spowodowanej różnicą temperatur.

Z powodu zagęszczania wody i wytrącania soli, z walczaka odprowadzane są odsoliny. Połączone ze sobą przy użyciu płetw rury, tworzą szczelny ekran z którego zbudowana jest komora paleniskowa. Wymiana ciepła w komorze paleniskowej odbywa się głównie w drodze promieniowania.

Z walczaka woda przedostaje się do rur opadowych a następnie do dolnych komór ekranowych. Kolejno woda przechodzi do rur wznoszących i jako mieszanka parowo-wodna trafia poprzez górne komory do walczaka.

Para z walczaka kierowana jest do komory wlotowej przegrzewacza wlotowego skąd kierowana jest na komorę wlotową przegrzewacza rozmieszczonego na ścianach drugiego ciągu. Komory wylotowe połączone są z górnymi komorami ekranów międzyciągu i po przejściu przez przegrzewacz międzyciągu, para kierowana jest do przegrzewacza konwekcyjnego.

W tylnej części przewału zabudowany jest przegrzewacz konwekcyjny którego komora wylotowa podzielone jest na 2 części. Na połączeniu komór wylotowych z grodziami I stopnia (zewnątrznymi) znajduje się schładzacz I stopnia. Grodzie II stopnia (wewnętrzne) łączą się z komorami wlotowymi przegrzewacza końcowego. Na połączeniu znajduje się schładzacz II stopnia. Z przegrzewacza końcowego, para kierowana jest na turbinę.

W celu zabezpieczenia kotła przed nadmiernym wzrostem ciśnienia, zabudowano zawory bezpieczeństwa ze wspomaganie pneumatycznym o łącznej wydajności wyższej niż wydajność kotła.

5.2. Urządzenia pomocnicze kotła

Wymienniki ciepła zabudowane na układzie spaliny-powietrze mają za zadanie obniżenia temperatury spalin przy jednoczesnym wzroście temperatury powietrza. Takie działanie ma wpływ na podwyższenie wydajności kotła oraz poprawę procesu spalania. W kotłach

energetycznych zabudowany jest zazwyczaj dwunitkowy układ podgrzewania powietrza składający się z:

- czerpni,
- parowego podgrzewacza powietrza,
- wentylatora podmuchu,
- regeneracyjnego obrotowego podgrzewacza powietrza,
- kanałów powietrza.

W zależności od potrzeb, wentylatory podmuchu zasysają powietrze z hali kotłowni lub z zewnątrz budynku i kieruje je bezpośrednio do wentylatorów lub do parowych podgrzewaczy powietrza. Parowe podgrzewacze powietrza podwyższają temperaturę powietrza do 30÷50°C. Tłoczenie wentylatorów podmuchu połączone jest z ssaniem wentylatorów młynowych w celu umożliwienie regulacji temperatury mieszanki pyłowo-powietrznej. Pozostałe powietrze trafia na obrotowe podgrzewacze powietrza które je podgrzewają do 330°C a następnie do skrzyń rozdzielczych skąd trafia na poszczególne palniki jako powietrze wtórne do dysz paliwowych oraz dysz OFA. Gorące powietrze trafia również na ssanie wentylatorów młynowych.

5.2.1. Zespoły młynowe

Wentylatory młynowe tłoczą powietrze indywidualnie do poszczególnych młynów gdzie stanowi medium nośne dla pyłu węglowego. Spaliny po wylocie z kotła dzielą się na dwie strugi i trafiają na obrotowe podgrzewacze powietrza gdzie zostają schłodzone. Następnie kilkakrotnie zmieniają kierunek przepływu, każdorazowo wytrącając popiół i trafiają na elektrofiltry. Umieszczone za elektrofiltrami wentylatory spalin, przetłaczają spaliny do kanałów.

Młyny węglowe dzielimy na:

1. Szybkobieżne (400÷1500 obr/min) – rozbijanie cząstek węgla następuje poprzez uderzenie podczas wpadania do młyna:
 - a) Bijakowe
 - b) Wentylatorowe
2. Średnobieżne (30÷150 obr/min) – rozbijanie cząstek węgla następuje poprzez miażdżenie pomiędzy elementami mielącymi:
 - a) Kulowo-misowe
 - b) Misowo-rolkowe
 - c) Talerzowo-rolkowe
 - d) Walcowe

3. Wolnobieźne (15÷30 obr/min) – młyny były instalowane w centralnych młynowniach oraz w układach z pośrednim zasobnikiem pyłu:

a) Bębnowo- kulowe

Ze względu na mniejsze zużycie energii na przemiał, większą trwałość i mniejsze zużycie elementów mielących, dla kotłów energetycznych o czasie użytkowania powyżej 6000 h/rok najbardziej przydatne są młyny średnobieżne miażdżące. Do zalet młynów pierścieniowo-kulowych i misowo-rolkowych zalicza się również brak ułożyskowania elementów mielących i możliwość pracy młyna w nad i podciśnieniu w komorze mielenia. Dla kotłów szczytowych najlepszym rozwiązaniem są wentylatorowe młyny szybkobieżne.

W młynach średnobieżnych kulowo-misowych moment obrotowy z silnika przenoszony jest na dolny pierścień powodując jego obrót i toczenie się kul po bieżni pierścienia. Spadający rurą zsypaną węgiel dostaje się na obracający pierścień gdzie zostaje rozdrobniony i zmielony przez toczące kule. Odpowiedni do rozdrobnienia węgla siłę kul uzyskuje się poprzez nacisk na nieruchomy pierścień dociskowy czterema zespołami dociskowymi. Strumień gorącego powietrza porywa ruchem spiralno-wznoszącym spod kul węgiel do odsiewacza gdzie następuje oddzielenie grubych frakcji i nawrót do ponownego przemiału. Właściwa mieszanka pyłowo-powietrzna trafia poprzez przewody pyłowe do palników kotła.

5.2.2. Palniki pyłowe

Palniki pyłowe dzielą się względem mieszania paliwa z powietrzem oraz rozmieszczenia ich w komorze. Pod względem mieszania paliwa z powietrzem rozróżniamy palniki wirowe i strumieniowe a pod względem rozmieszczenia palniki narożnikowe, stropowe i czołowe.

Rozmieszczenie palników na ścianie przedniej powoduje trudności z zapłonem oraz duże zużłowanie ścian, natomiast rozmieszczenie naprzeciwległe daje pewny zapłon, intensywne spalanie i mniejsze zużłowanie. Do zalet naściennego naprzeciwległego mocowania palników wirowych paleniska pyłowego należy zaliczyć:

- stabilny płomień z pojedynczego palnika,
- pewny zapłon mieszanki pyłowej,
- dobre mieszanie mieszanki pyłowej z powietrzem wtórnym,
- znacznie wypalenie w pobliżu palnika,
- możliwość pracy kotła z małym obciążeniem.

W przypadku tangencjonalnego rozmieszczenia palników które występuje zazwyczaj na 3 lub 4 poziomach, strumienie są wprowadzane do komory mimośrodowo względem osi. Powstały w ten sposób w centrum wir, dzięki sile wyporu i różnicy ciśnień porusza się ku górze komory. Stykające się płomienie stabilizują spalanie a centralny wir stabilizuje położenie płomienia w komorze.

6. Analiza rzeczywistych parametrów pracy kotła

Głównymi parametrami mającymi wpływ na pracę kotła energetycznego jest ilość dostarczanego paliwa oraz powietrza. Poprzez zmianę ilości paliwa, korygowana jest wydajność kotła wyrażana w ilości ton pary wodnej w ciągu godziny.

W skład analizowanego kotła parowego OP-430 wchodzi cztery zespoły młynowe oznaczone odpowiednio 4ZM1, 4ZM2, 4ZM3, 4ZM4. Każdy zespół młynowy pracuje na wszystkie cztery naroża kotła ze zmianą poziomu palników. 4ZM1 pracuje na najwyższy poziom, a 4ZM4 na poziom najniższy.

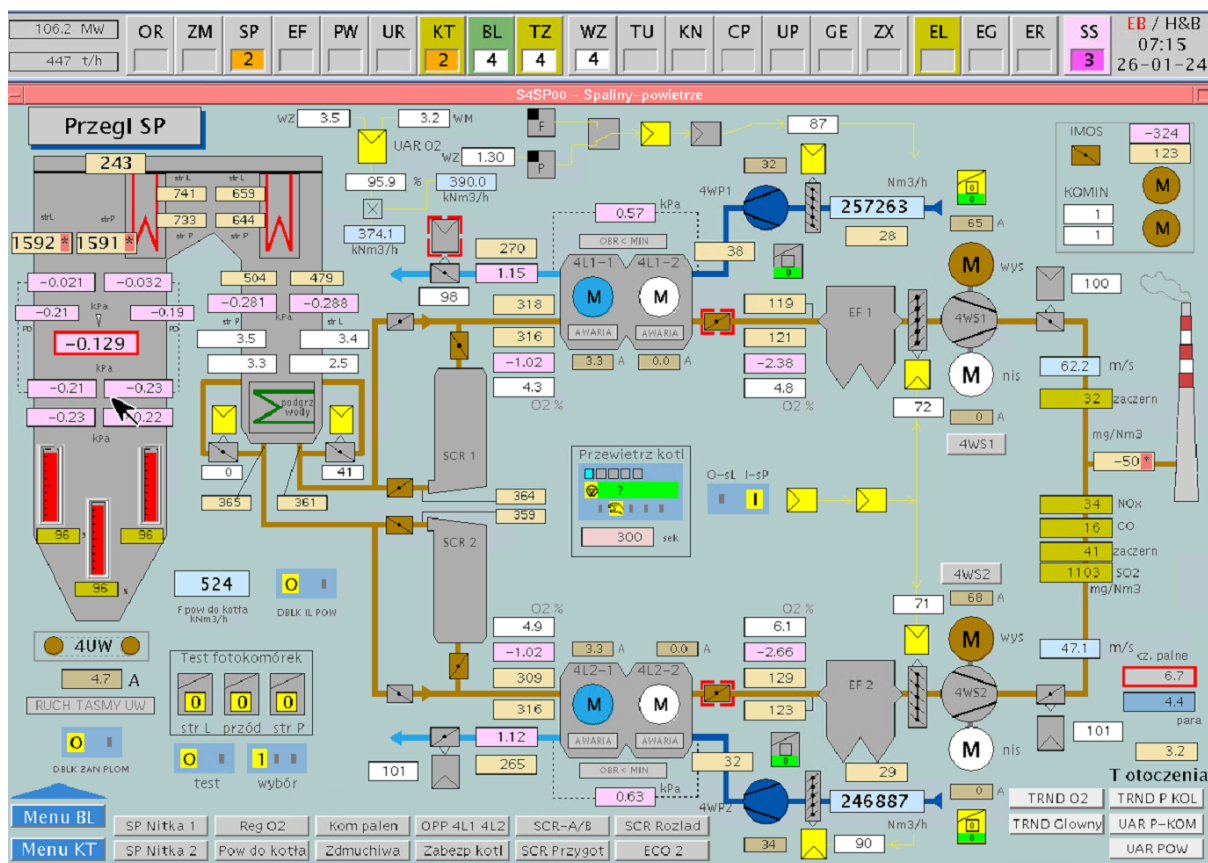
W skład zespołu młynowego wchodzi przede wszystkim:

- Młyn węglowy,
- Podajnik ślimakowy,
- Zasobnik węglowy,
- Wentylator młynowy,
- Dmuchawa uszczelniająca.

W celu zmagazynowania węgla w ilości pozwalającej na pracę z maksymalnym obciążeniem kotła przez okres około 28 godzin (425 ton), nad młynem węglowym zabudowano zasobniki węglowe. Paliwo z zasobników transportowane jest do młyna węglowego poprzez rurę zsypaną za pomocą podajników ślimakowych. Węgiel dostaje się na obracający pierścień miażdzący i toczące się kule gdzie ulega rozdrobnieniu i zmieleniu. Zmielony węgiel unosi się ruchem spiralno-wznoszącym do odsiewacza gdzie następuje oddzielenie grubych frakcji pyłu i nawrót do ponownego przemiału.

Wentylator młynowy tłoczy powietrze do młyna węglowego dla transportu płynu węglowego. Aparat kierowniczy ma na celu utrzymanie odpowiedniej temperatury mieszanki pyłowo-powietrznej na wylocie z młyna węglowego. Regulacja temperatury następuje poprzez zmianę stosunku ilości powietrza gorącego względem zimnego.

Powietrze zasysane jest kanałami z czerpni umieszczonych na poziomie 50 metrów. Czerpnie umożliwiają zasysanie powietrza z zewnątrz bądź z wnętrza hali kotłowni. Powietrze może być skierowane bezpośrednio do wentylatorów powietrza (4WP1, 4WP2) lub przechodzić dodatkowo przez parowe podgrzewacze powietrza mające na celu podniesienie temperatury o dodatkowe 20÷30°C. Zimne powietrze kierowane jest na ssanie wentylatorów młynowych w celu umożliwienia regulacji temperatury mieszanki pyłowo-powietrznej oraz na obrotowe podgrzewacze powietrza. Po przejściu przez obrotowe podgrzewacze powietrza, temperatura powietrza osiąga wartość 330°C. Powietrze o tej temperaturze kierowane jest do ścian bocznych kotła oraz na ssanie wentylatorów młynowych. Rysunek 6-1 ukazuje układ spaliny – powietrze kotła OP-430.



Rysunek 6-1 Układ spaliny – powietrze kotła OP-430

Skierowane w kierunku ścian bocznych kotła powietrze trafia do skrzyń rozdzielczych a następnie na poszczególne palniki jako powietrze wtórne do dysz palnikowych oraz do dysz OFA.

System dysz OFA składa się z 3 głównych części:

- Kanałów powietrza pierwotnego,
- Kanałów powietrza wtórnego,
- Kłap odchylających.

Kłapy odchylające kontrolują stosunek powietrza wtórnego względem powietrza trzeciego. W opisywanym przypadku, stosunek ten wynosi 30%.

Dwustopniowy system dysz OFA ma na celu maksymalną redukcję tlenków azotu przy jednoczesnej kontroli niedopału węgla i koncentracji tlenu węgla za kotłem. Zadaniem dysz OFA jest dostarczenie powietrza które nie zostało dostarczone do strefy palników powyżej strefy spalania, czyli ponad najwyższy poziom palników.

Dzięki niższej zawartości tlenu, wysokiej temperaturze płomienia i większej ilości rodników węglowodorowych (reagujących z tlenkami azotu), wewnątrz palnika wytwarzane są warunki podstechiometryczne, obniżając emisję NOx. Skuteczność systemu OFA zależy w głównej

mierze od stechiometrii w strefie palnika, czasu przebywania spalin w atmosferze redukującej oraz stopnia przenikania i mieszania ze spalinami.

6.2. Analiza ilości dostarczonego paliwa

Do analizy przyjęto rzeczywiste wartości pomiarów dla obciążeń 60% i 90%.

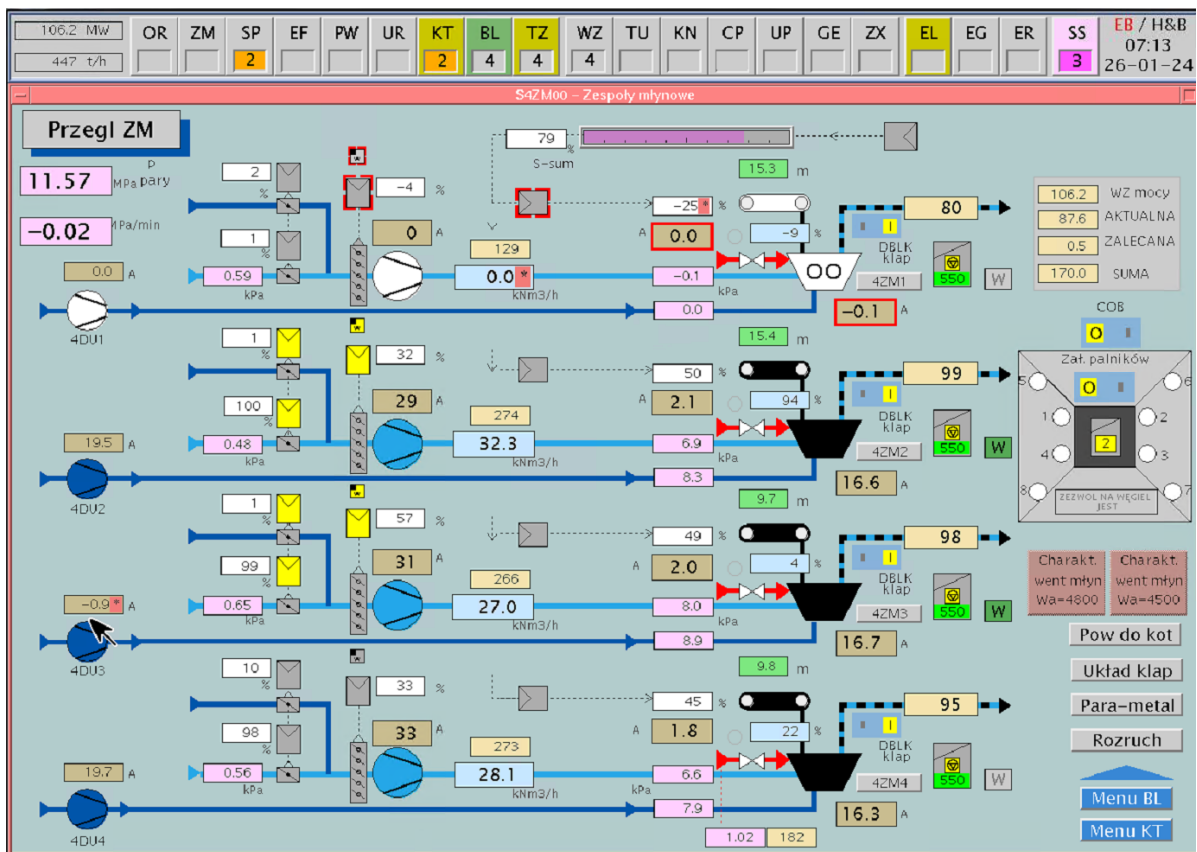
6.2.1. Obciążenie 90%

Podstawowe parametry odczytane z systemu DCS przyjęte do analizy podczas pracy z obciążeniem 90% przedstawia tabela 4.

Całkowite zużycie węgla	Wydajność kotła - ilość pary	Temperatura spalin za kotłem	Ciśnienie spalin za kotłem
[kg/s]	[t/h]	[°C]	[kPa]
13.363	382.5	252.2	0.555

Tabela 4 – podstawowe parametry pracy kotła

Rysunek 6-2 przedstawia układ zasilania kotła w paliwo. Parametrami użytymi do wyliczenia ilości węgla dostarczonej do poszczególnych palników jest całkowita, chwilowa ilość zużycia węgla oraz wartość obciążenia prądowego pracujących podajników węglowych. Z uwagi na fakt, iż każdy młyn pracuje na wszystkie 4 naroża przyjęto jednakowy rozkład mieszanki pyłowo powietrznej do każdego palnika.



Rysunek 6-2 Zasilanie kotła w paliwo

Tabela 5 przedstawia odczytane chwilowe obciążenie prądowe podajników węglowych.

Obciążenie prądowe podajnika węgla N1	Obciążenie prądowe podajnika węgla N2	Obciążenie prądowe podajnika węgla N3	Obciążenie prądowe podajnika węgla N4
[A]	[A]	[A]	[A]
7.19	7.84	7.15	0

Tabela 5 - chwilowe obciążenie prądowe podajników węglowych

W celu obliczenia ilości dostarczanego do poszczególnych palników paliwa, wykonano obliczenia. Jako 100% zużycia węgla (całkowite zużycie węgla) przyjęto sumę obciążenia pracujących podajników węgla.

Strumień masy paliwa podawanego do poszczególnych palników wyznaczony został w oparciu o obciążenie prądowe młynów.

$$13,362 \left[\frac{kg}{s} \right] \rightarrow 22,18 [A]$$

$$1 [A] \rightarrow 0,6024 \left[\frac{kg}{s}\right]$$

Z powyższych obliczeń wynika, iż do młynów dostarczona ilość węgla przedstawioną w tabeli 6.

Ilość dostarczonego węgla do MW1	Ilość dostarczonego węgla do MW2	Ilość dostarczonego węgla do MW3	Ilość dostarczonego węgla do MW4
[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]
4.3317	4.7239	4.3071	0

Tabela 6 - ilość węgla dostarczona do młynów

W celu wyliczenia jednostkowej ilości paliwa do palnika, podzielono ilość dostarczonego węgla do młyna węglowego przez ilość palników pracujących z danym młynem (4 sztuki). Wynik przedstawiono w tabeli 7:

Jednostkowa ilość paliwa dostarczona do palników młyna nr 1	Jednostkowa ilość paliwa dostarczona do palników młyna nr 2	Jednostkowa ilość paliwa dostarczona do palników młyna nr 3	Jednostkowa ilość paliwa dostarczona do palników młyna nr 4
[k/s]	[k/s]	[k/s]	[k/s]
1.2032	1.3122	1.1964	0

Tabela 7 - ilość paliwa do palnika

6.2.2. Obciążenie minimalne 60%

Dla obciążenia minimalnego na poziomie 60%, algorytm obliczeń był identyczny jak w przypadku obciążenia 90%. Podstawowe parametry odczytane z systemu DCS przyjęte do analizy podczas pracy z obciążeniem minimalnym przedstawia tabela 8.

Całkowite zużycie węgla	Wydajność kotła - ilość pary	Temperatura spalin za kotłem	Ciśnienie spalin za kotłem
[kg/s]	[t/h]	[°C]	[kPa]
9.37	250	259.0	1.25

Tabela 8 – podstawowe parametry pracy kotła

Tabela 9 przedstawia odczytane chwilowe obciążenie prądowe podajników węglowych.

Obciążenie prądowe podajnika węgla N1	Obciążenie prądowe podajnika węgla N2	Obciążenie prądowe podajnika węgla N3	Obciążenie prądowe podajnika węgla N4
[A]	[A]	[A]	[A]
7.39	5.32	7.03	0

Tabela 9 - chwilowe obciążenie prądowe podajników węglowych

W celu obliczenia ilości dostarczanego do poszczególnych palników paliwa, wykonano obliczenia. Jako 100% zużycia węgla (całkowite zużycie węgla) przyjęto sumę obciążenia pracujących podajników węgla.

Strumień masy paliwa podawanego do poszczególnych palników wyznaczony został w oparciu o obciążenie prądowe młynów.

$$9,37 \left[\frac{kg}{s} \right] \rightarrow 19,75 [A]$$

$$1 [A] \rightarrow 0,4746 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Z powyższych obliczeń wynika, iż do młynów dostarczono ilość węgla przedstawioną w tabeli 10.

Ilość dostarczonego węgla do MW1	Ilość dostarczonego węgla do MW2	Ilość dostarczonego węgla do MW3	Ilość dostarczonego węgla do MW4
[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]
3.5091	2.5269	3.3353	0

Tabela 10 - ilość węgla dostarczona do młynów

W celu wyliczenia jednostkowej ilości paliwa do palnika, podzielono ilość dostarczonego węgla do młyna węglowego przez ilość palników pracujących z danym młynem (4 sztuki). Wynik przedstawiono w tabeli 11:

Jednostkowa ilość paliwa dostarczona do palników młyna nr 1	Jednostkowa ilość paliwa dostarczona do palników młyna nr 2	Jednostkowa ilość paliwa dostarczona do palników młyna nr 3	Jednostkowa ilość paliwa dostarczona do palników młyna nr 4
[k/s]	[k/s]	[k/s]	[k/s]
0.8773	0.6317	0.8338	0

Tabela 11 - ilość paliwa do palnika

6.3. Analiza ilości dostarczanego powietrza

Powietrze dostarczanie do kotła podczas procesu spalania można sklasyfikować w następujący sposób:

- powietrze podawane wraz z paliwem (mieszanka pyłowo-powietrzna)
- powietrze podawane bezpośrednio do komory paleniskowej (dysze OFA)

6.3.1. Powietrze podawane wraz z paliwem

Parametry powietrza podawanego wraz z paliwem odczytano z systemu DCS i przedstawiono w tabelach poniżej (12-15). Pomiar ilości powietrza widoczny jest na rysunku 6-2.

Młyn węglowy 1				
Temperatura powietrza	Ilość powietrza	Ilość powietrza	Ciśnienie powietrza	Temperatura mieszanki pyłowo powietrznej
[°C]	[kNm ³ /h]	[kg/s]	[kPa]	[°C]
198.15	37.40	13.43	4.64	98.93

Tabela 12 - Parametry powietrza i paliwa dostarczanego do młyna węglowego nr 1

Młyn węglowy 2				
Temperatura powietrza	Ilość powietrza	Ilość powietrza	Ciśnienie powietrza	Temperatura mieszanki pyłowo powietrznej
[°C]	[kNm ³ /h]	[kg/s]	[kPa]	[°C]
210.74	38.16	13.70	5.02	99.27

Tabela 13 - Parametry powietrza i paliwa dostarczanego do młyna węglowego nr 2

Młyn węglowy 3				
Temperatura powietrza	Ilość powietrza	Ilość powietrza	Ciśnienie powietrza	Temperatura mieszanki pyłowo powietrznej
[°C]	[kNm ³ /h]	[kg/s]	[kPa]	[°C]
205.45	38.02	13.65	4.84	99.46

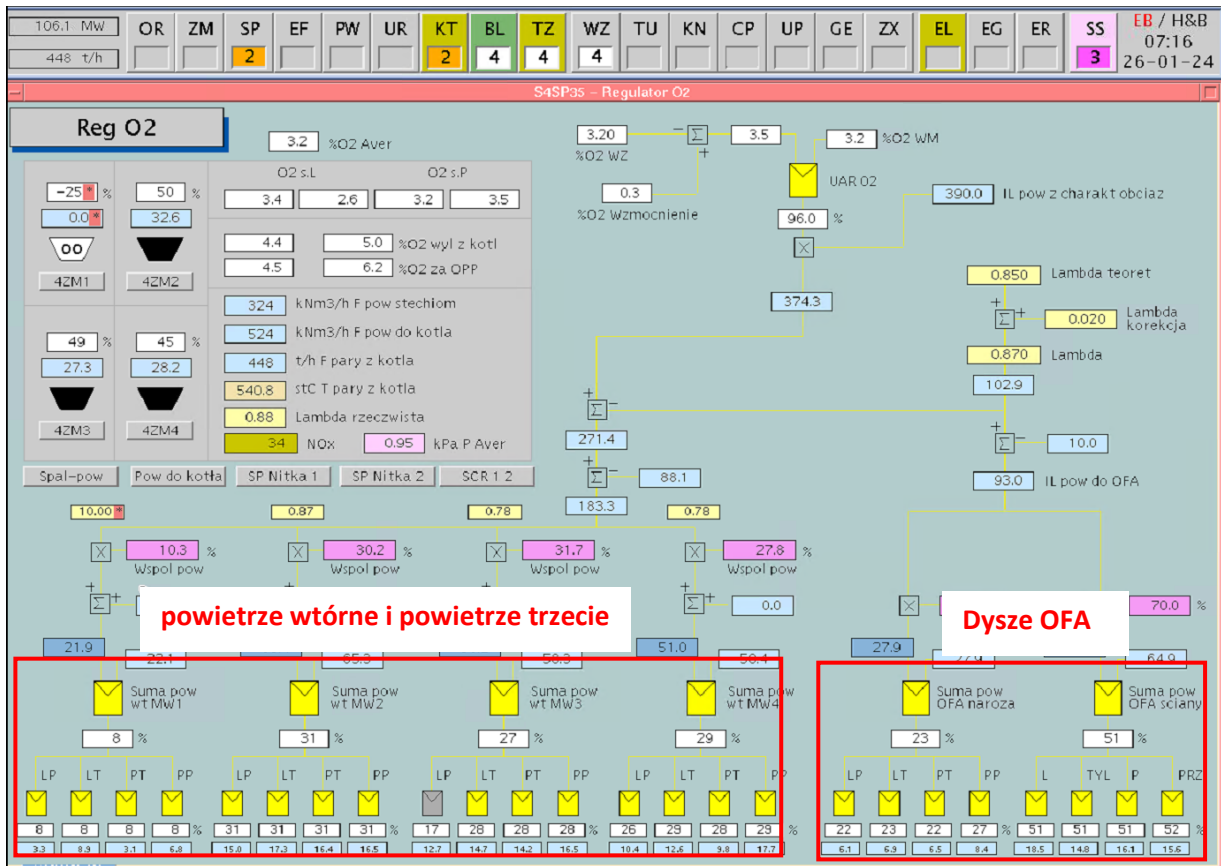
Tabela 14 - Parametry powietrza i paliwa dostarczanego do młyna węglowego nr 3

Młyn węglowy 4				
Temperatura powietrza	Ilość powietrza	Ilość powietrza	Ciśnienie powietrza	Temperatura mieszanki pyłowo powietrznej
[°C]	[kNm ³ /h]	[kg/s]	[kPa]	[°C]
0	0	0	0	0

Tabela 15 - Parametry powietrza i paliwa dostarczanego do młyna węglowego nr 4

6.3.2. Powietrze podawane do komory paleniskowej

Aby zapewnić odpowiednią redukcję tlenków azotu, powietrze wykorzystywane w procesie spalania ulega stopniowaniu. W obszarze spalania następuje zmniejszenie nadmiaru powietrza czego efektem jest powstanie atmosfery redukującej. W celu dalszego dopalenia pozostałości z pierwszej strefy spalania, powyżej poziomu palników doprowadzone jest dodatkowe powietrze – poprzez dysze OFA. Rozdział ukazano na rysunku 6-3.



Rysunek 6-3 Układ powietrza do kotła

Z uwagi na konieczność ograniczenia emisji NO_x w Elektrociepłowni w Krakowie, w 1996 roku zabudowane zostały niskoemisyjne palniki RI-JET2. Palnik ten składa się z trzech współosiowo zabudowanych stref rurowych. Pierwszą z nich (środkową) jest przewód węglowy ze zwężką Venturiego i koncentratorem P.C. oraz pierścieniem stabilizującym płomień. Drugą strefą jest strefa powietrza wtórnego a trzecią, strefa powietrza trzeciego. W trzeciej strefie zabudowane zostały łopatki nadające kierunek i intensywność zawirowania powietrza oraz jego ilość.

Do przeprowadzenia symulacji przyjęto rozdział między powietrzem wtórnym a trzecim w stosunku 0,3 : 0,7. Wartości rzeczywiste ilości powietrza przedstawiają tabele 16-19.

	Młyn węglowy 1			
	Lewy przód	Lewy tył	Prawy tył	Prawy przód
Ilość powietrza dostarczona do palnika [kg/s]	0.754	2.011	0.828	1.293
Ilość powietrza wtórnego [kg/s]	0.226215171	0.603240457	0.269303775	0.387797437
Ilość powietrza trzeciego [kg/s]	0.5278354	1.407561066	0.628375476	0.904860685

Tabela 16 - Wartości rzeczywiste ilości powietrza do młyna 1

	Młyn węglowy 2			
	Lewy przód	Lewy tył	Prawy tył	Prawy przód
Ilość powietrza dostarczona do palnika [kg/s]	1.544	3.232	0.682	1.113
Ilość powietrza wtórnego [kg/s]	0.463202494	0.969493591	0.204670869	0.333936682
Ilość powietrza trzeciego [kg/s]	1.080805819	2.262151713	0.477565362	0.77918559

Tabela 17 - Wartości rzeczywiste ilości powietrza do młyna 2

	Młyn węglowy 3			
	Lewy przód	Lewy tył	Prawy tył	Prawy przód
Ilość powietrza dostarczona do palnika [kg/s]	0.826	2.729	1.239	1.239
Ilość powietrza wtórnego [kg/s]	0.247759473	0.818683477	0.398569588	0.398569588
Ilość powietrza trzeciego [kg/s]	0.578105438	1.910261447	0.929995704	0.929995704

Tabela 18 - Wartości rzeczywiste ilości powietrza do młyna 3

	Młyn węglowy 4			
	Lewy przód	Lewy tył	Prawy tył	Prawy przód
Ilość powietrza dostarczona do palnika [kg/s]	1.149	1.508	1.185	1.400
Ilość powietrza wtórnego [kg/s]	0.344708833	0.452430343	0.355480984	0.42011389
Ilość powietrza trzeciego [kg/s]	0.804320609	1.0556708	0.829455628	0.980265743

Tabela 19 - Wartości rzeczywiste ilości powietrza do młyna 4

Dopalenie pozostałości (w skład których wchodzi przede wszystkim CO i koks) z pierwszej strefy spalania zapewniają zabudowane ponad poziomem palników dysze OFA. System dysz OFA składa się z 4 dysz zabudowanych ponad palnikami oraz 4 dysz zabudowanych na bocznych ścianach komory paleniskowej. Rozmieszczenie dysz przedstawia rysunek 6-3.

Dla analizowanego przypadku, odczytano rozdział powietrza skierowanego na dysze OFA zgodnego z tabelą 20, 21.

	Naroża			
	Lewy przód	Lewy tył	Prawy tył	Prawy przód
Ilość powietrza dostarczona do dyszy OFA [kg/s]	5.35	5.06	4.56	3.77

Tabela 20 - rozdział powietrza skierowanego na dysze OFA

	Ściany			
	Lewy przód	Lewy tył	Prawy tył	Prawy przód
Ilość powietrza dostarczona do dyszy OFA [kg/s]	3.02	2.12	1.47	1.58

Tabela 21 - rozdział powietrza skierowanego na dysze OFA

Wyznaczone parametry stanowią warunki brzegowe podczas modelowania CFD pracy komory paleniskowej. W analogiczny sposób wyznaczono strumienie masy paliwa i powietrza podawanego do kotła dla pozostałych modelowanych obciążeń kotła.

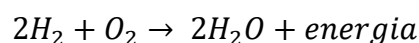
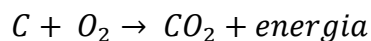
7. Powstawanie produktów spalania podczas pracy kotła

Spalanie paliwa w kotłach energetycznych OP-430 jest złożonym procesem chemicznym i termodynamicznym, mającym na celu wytworzenie pary o odpowiednio wysokiej temperaturze i ciśnieniu. Spalanie paliw kopalnianych wiąże się z emisją wielu szkodnych substancji.

Podczas procesu spalania węgla kamiennego w kotle mogą powstać między innymi następujące produkty spalania:

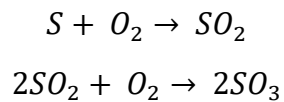
- Dwutlenek węgla CO₂
- Para wodna H₂O
- Tlenek węgla CO
- Dwutlenek siarki SO₂
- Tlenki azotu NO_x
- Tlenki węgla CO_x
- Tlenki siarki SO_x
- Amoniak NH₃
- Wodorowęglany C_mH_n
- Związki siarki (np. siarkowodór H₂S)
- Dioxyny i furany
- Związki chloru i fluoru (np. chlorowodór HCl i fluorowodór HF)
- Popiół lotny
- Żużel
- Sadza

Spalanie węgla kamiennego można przedstawić uproszczoną reakcją chemiczną gdzie węgiel reaguje z tlenem dostarczanym z powietrza, tworząc głównie dwutlenek węgla i wodę przy równoczesnym uwalnianiu energii cieplnej:



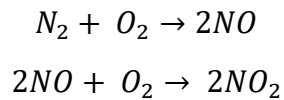
Uwolniona w powyższej reakcji energia, służy do wytworzenia pary wodnej.

Zawarta w paliwie siarka reaguje jednak z tlenem co skutkuje powstawaniem tlenków siarki:



Podczas reakcji tlenków siarki z parą wodną dochodzi do tworzenia kwasu siarkowego (H_2SO_4) który jest głównym składnikiem kwaśnych deszczy.

W atmosferze wysokiej temperatury panującej w komorze paleniskowej zachodzi reakcja tlenu i azotu której wynikiem są tlenki azotu NOx:



Podczas procesu spalania dochodzi również do uwalniania metali ciężkich które mogą być emitowane do atmosfery wraz ze spalinami lub pozostać w formie stałej w popiołach i żużlu. Głównymi czynnikami wpływającymi na uwalnianie metali jest temperatura spalania, forma chemiczna w jakiej występują w węglu oraz otoczenie innych pierwiastków. Substancje takie jak rtęć, kadm, ołów, chrom czy arsenik są niebezpieczne dla zdrowia ludzi oraz dla środowiska. Dzięki dobrym warunkom do przenoszenia na duże odległości, metale ciężkie są zdolne do akumulacji w łańcuchach pokarmowych. Długotrwałe narażenie na metale ciężkie może powodować uszkodzenie nerek, układu nerwowego i zaburzeń rozwojowych u dzieci.

8. Elastyczna praca bloków energetycznych

Elastyczna praca bloków energetycznych odnosi się do zdolności jednostek do szybkiego dostosowania się do zmiennego zapotrzebowania na energię elektryczną. Ze względu na obecną potrzebę współpracy bloków energetycznych opalanych węglem z odnawialnymi źródłami energii, powinny one charakteryzować się wysoką elastycznością działania [35].

Pierwszym aspektem są regulacje środowiskowe które wymuszają na elektrowniach i elektrociepłowniach bardziej zrównoważoną pracę. Elastyczna praca może okazać się pomocna pod kątem zmniejszenia czasu pracy na pełnym obciążeniu i tym samym ograniczenia emisji szkodliwych substancji.

Kolejny aspekt wymuszenia na blokach energetycznych elastycznej pracy jest wzrost udziału odnawialnych źródeł energii które są zależne od takich czynników jak słońce i wiatr. Sprawia to, że źródła te są niestabilne i zmienne w zależności od warunków atmosferycznych. Celem zbilansowania tych wahań, jednostki konwencjonalne muszą posiadać zdolność do szybkiej regulacji obciążenia. Wzrost udziału OZE w globalnym miksie energetycznym jest spowodowana przede wszystkim zmianami klimatycznymi i rosnącą świadomością tych zmian. Powoduje to potrzebę ograniczenia emisji szkodliwych substancji do środowiska i rosnące inwestycje w czyste technologie. Dodatkowo wiele rządów wprowadza przepisy zachęcające do rozwoju odnawialnych źródeł energii. Przykładem mogą być ulgi podatkowe, zielone certyfikaty czy subsydia. Niektóre kraje są zobowiązane do redukcji emisji, promując jednocześnie OZE. Przykładem takich działań jest Porozumienie Paryskie czy Protokół z Kioto.

Kolejną ważną kwestią na drodze rozwoju odnawialnych źródeł energii jest idący do przodu postęp technologiczny, który przyczynia się do obniżenia kosztów z nimi związanych. Dzięki temu takie technologie jak instalacje PV, czy turbiny wiatrowe stają się coraz bardziej konkurencyjne na tle tradycyjnych źródeł. Po części wzrost udziału OZE przyczynia się również do wzrostu bezpieczeństwa energetycznego kraju zmniejszając zależność od importowanych paliw kopalnianych.

Umożliwienie lepszego zarządzania produkcją energii z OZE poprzez rosnący postęp w technologii magazynowania energii przyczyni się do dalszego rozwoju i rozpowszechniania zielonej energii. Rozwój ten może znacząco wpłynąć na rolę energetyki konwencjonalnej w systemie energetycznym. Aktualne trendy wskazują na ukierunkowanie elektrowni węglowych na współpracę z systemami magazynowania energii celem wygładzenia produkcji energii i dostarczania jej w sposób ciągły a także utrzymania stabilności sieci [36]. Dodatkowo można zauważyć zwrot w kierunku energetyki jądrowej oraz zwiększenia zainteresowania mikrosieciami i lokalnymi systemami energetycznymi. Może to doprowadzić do powstawania nowych, mniejszych jednostek które zastąpią stare źródła.

Analizując dotychczasowe działania w kierunku ochrony środowiska, można spodziewać się również nowych regulacji zmniejszających standardy emisji. Wprowadzenie bardziej restrykcyjnych norm spowoduje konieczność inwestycji w modernizację aktualnie pracujących instalacji ochrony środowiska oraz zwiększy koszty wytwarzania energii elektrycznej.

Skutkować to będzie zamknięciem najmniej efektywnych i najbardziej zanieczyszczających jednostek.

Biorąc pod uwagę powyższe informacje, podjęta tematyka jest istotna, ponieważ istniejące bloki energetyczne zmuszone są do pracy przy różnych obciążeniach wynikających z aktualnej sytuacji w krajowym systemie elektroenergetycznym. Zmiana obciążeń powoduje zmiany emisji substancji szkodliwych, w tym SO_x, co pociąga za sobą konieczność prowadzenia ciągłych korekt w pracy instalacji oczyszczania spalin.

9. Model matematyczny komory paleniskowej kotła OP-430

W celu przeprowadzenia symulacji pracy kotła opracowano model numeryczny komory paleniskowej pozwalający na wyznaczenie rozkładów temperatury spalin oraz poziomów emisji substancji szkodliwych pochodzących z procesu spalania dostarczonego paliwa. W ramach przeprowadzonych prac zbudowany został model 3D komory paleniskowej kotła OP-430 pracującego w bloku energetycznym w PGE Energia Ciepła S. A. Oddział w Krakowie. Model wykonany został w wymiarach rzeczywistych w oparciu o udostępnioną dokumentację techniczno-ruchową kotła (DTR). Przeanalizowano rysunki wykonawcze komory paleniskowej wraz z układem palników i dysz powietrza w pasie palnikowym oraz dysz OFA na ścianach bocznych komory paleniskowej. Wszystkie opisane poniżej parametry geometryczne kotła zostały uwzględnione w opracowanym modelu 3D komory paleniskowej.

9.1. Rejon zabudowy palników

Niskoemisyjne palniki pyłowe RI-JET2 pracują w tangencjonalnym układzie rozmieszczenia. Strumienie powietrza wtórnego i mieszanki pyłowo-powietrznej są wprowadzone do komory paleniskowej mimośrodowo względem osi komory spotykając się stycznie czego wynikiem jest wytworzenie w centrum komory wiru stabilizującego położenie płomienia. Z uwagi na działającą siłę wyporu i różnicy ciśnień, wir porusza się ku górze komory.

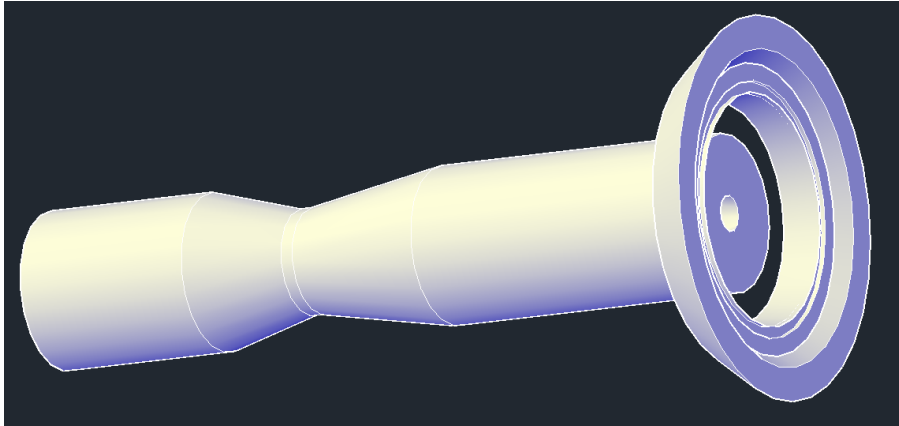
Palniki pracują na 4 poziomach. Każdy z czterech młynów węglowych kieruje mieszankę pyłowo-powietrzną do 4 palników pyłowych zlokalizowanych w 4 narożach komory, na tym samym poziomie. W tabeli 22 przedstawiono zestawienie młynów węglowych z poziomem palników (1 oznacza najwyższy poziom, a 4 poziom najniższy).

Młyn węglowy	Poziom palników
Młyn węglowy 1	Poziom górny
Młyn węglowy 2	Poziom środkowy
Młyn węglowy 3	Poziom środkowy
Młyn węglowy 4	Poziom dolny

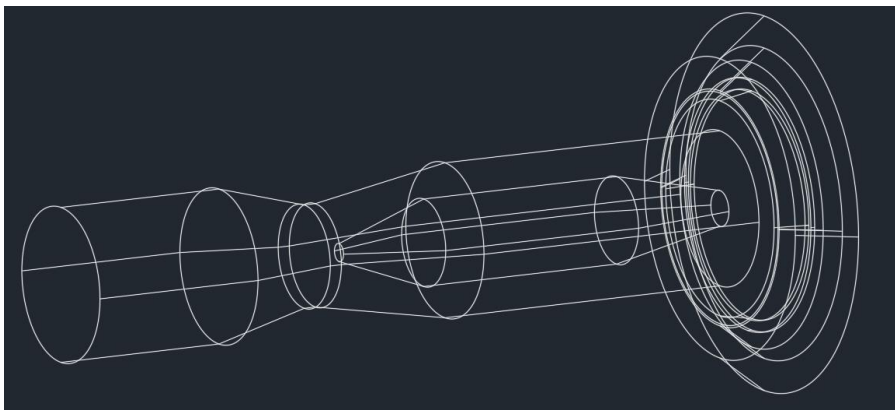
Tabela 22 - zestawienie młynów węglowych z poziomem palników

W celu przeprowadzenia symulacji pracy kotła energetycznego OP-430, zbudowano model 3D komory paleniskowej oraz palników i dysz powietrza wtórnego i trzeciego. Rysunki 9-1, 9-2, 9-3 i 9-4 przedstawiają budowę rzeczywistego palnika pyłowego RI-JET2 z widocznym koncentratorem P.C.

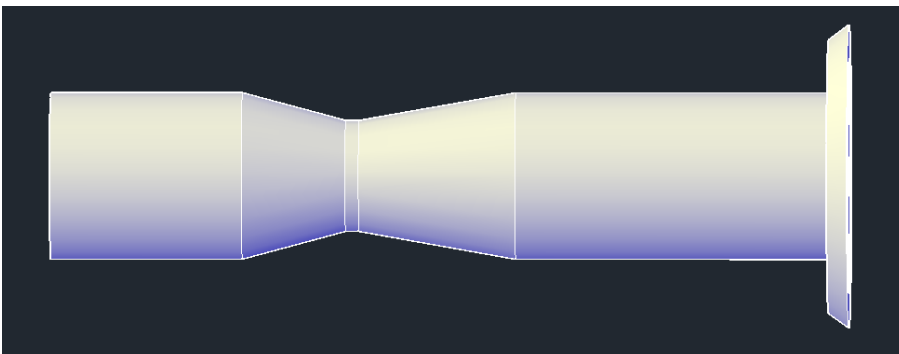
Koncentrator P.C. widoczny na rysunkach 9-2 i 9-4 odpowiada za odpowiednie ukształtowanie jądra płomienia. Dzieje się tak poprzez koncentrację cząstek węgla co przekłada się na równomierne rozłożenie mieszanki pyłowo-powietrznej w całym przekroju palnika.



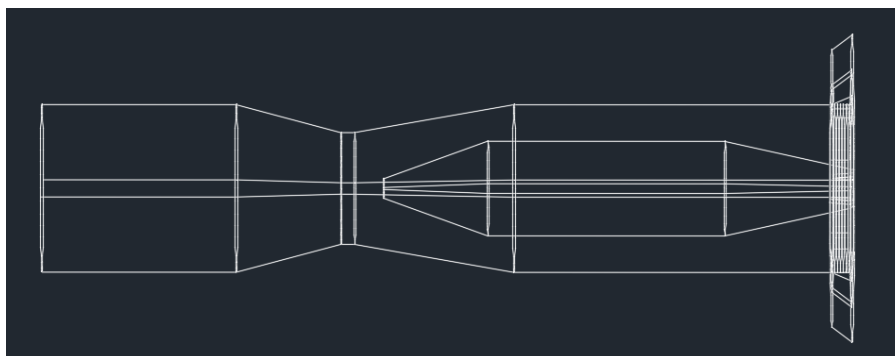
Rysunek 9-1 model palnika pyłowego



Rysunek 9-2 model palnika pyłowego z widocznym koncentratorem



Rysunek 9-3 model palnika pyłowego



Rysunek 9-4 model palnika pyłowego z widocznym koncentratorem

9.1.1. Rejon zabudowy dysz OFA

Analizowany kocioł OP-430 posiada zabudowany dwustopniowy system dysz OFA. Dysze ulokowane zostały w narożach, ponad najwyższym poziomem palników oraz na ścianach bocznych. W tabeli 23 przedstawiono dane dysz OFA a rozmieszczenie dysz względem komory paleniskowej ukazuje rysunek 9-5.

Dane dysz OFA	
Średnica wylotu powietrza	Ø610 mm
Średnica dyszy	Ø790 mm
Ilość dysz OFA	2 x 4 szt.
Przepływ powietrza/dysza	12 kg/s
stechiometria	0,43

Tabela 23 - dane dysz OFA

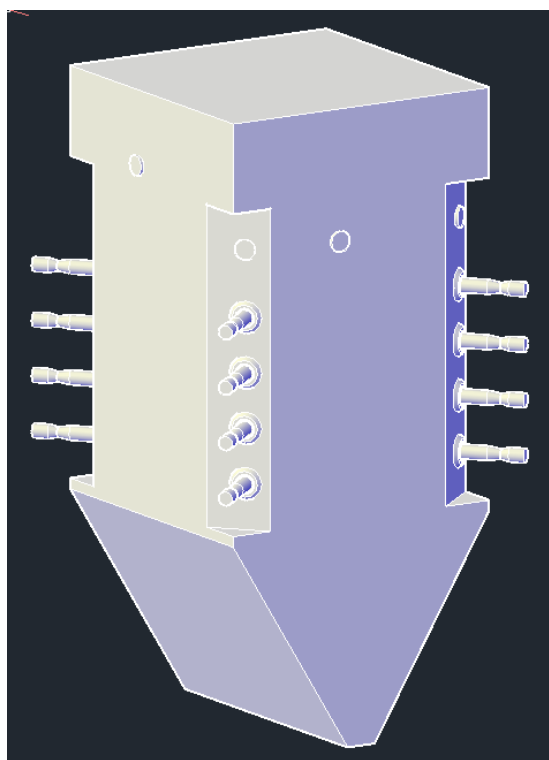
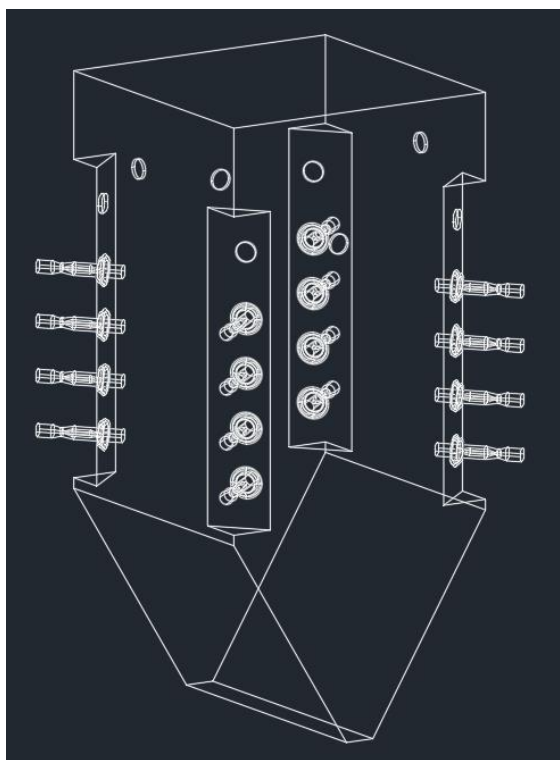
9.1.2. Komora paleniskowa

Komora paleniskowa kotła OP-430 zbudowana jest ze szczelnych ścian membranowych o przekroju poprzecznym 9655 x 9615mm i wysokości około 37000mm. W dolnej części komory paleniskowej, na poziomie około 9700mm odgięte do środka rury ścian przedniej i tylnej tworzą lej żużlowy. Odgięcia na poziomie 11000mm tworzą naroża dla palników pyłowych zabudowanych na poziomach przedstawionych w tabeli 24.

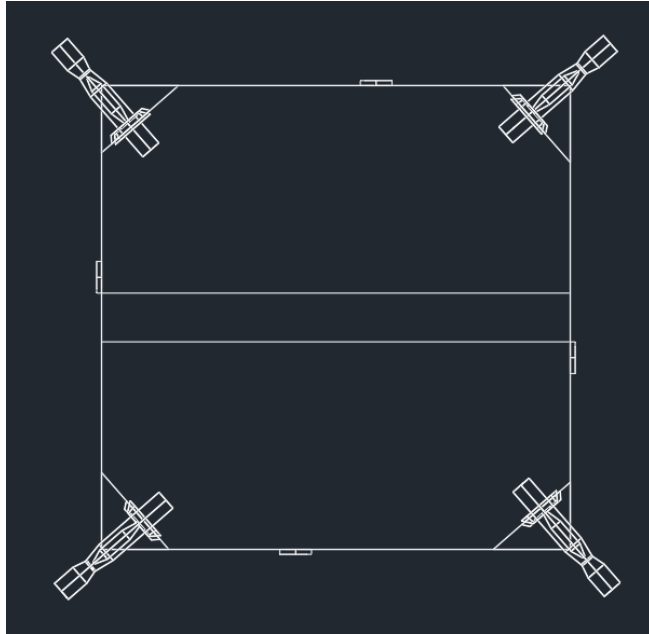
Poziom palników	Poziom w komorze paleniskowej
Poziom 1	16 265 mm
Poziom 2	15 055 mm
Poziom 3	13 845 mm
Poziom 4	12 835 mm

Tabela 24 – poziom zainstalowania palników

Przygotowany model 3D komory paleniskowej pokazany został na rysunkach 9-5, 9-6 i 9-7.



Rysunek 9-5 Model krawędziowy komory paleniskowej Rysunek 9-6 Model 3D komory paleniskowej



Rysunek 9-7 Model 3D komory paleniskowej – widok z góry

9.2. Siatka numeryczna

Kolejnym etapem była dyskretyzacja przygotowanego modelu geometrycznego. Siatka numeryczna zbudowana została przy wykorzystaniu oprogramowania ANSYS – MESH 2022R2. Siatka zawierała 4 106 117 elementów (1 152 395 węzłów). Parametry przygotowanej siatki numerycznej przedstawiono na rysunku 9-8.

Mesh Statistics									
Domain Name	Orthog. Angle			Exp. Factor			Aspect Ratio		
	Minimum [deg]			Maximum			Maximum		
Komora	4.8	!		428	!		684	OK	
	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK
Komora	<1	2	98	3	10	87	0	0	100

Rysunek 9-8 Parametry siatki numerycznej

Widać, że jakość siatki jest bardzo dobra. Kryteria określające jakość siatki numerycznej są spełnione. Wartości minimalnego kąta ortogonalności oraz maksymalnego współczynnika proporcji mieszczą się w dopuszczalnych granicach praktycznie dla całości przygotowanej siatki. W przypadku maksymalnego współczynnika ekspansji siatki dla 3% elementów przekroczone zostały dopuszczalne wartości. Przekroczenia związane są z uwzględnioną warstwą przyścienną, dla której elementy są bardzo małe, natomiast w rdzeniu komory

elementy są kilkadziesiąt razy większe. Wyeliminowanie przekroczeń współczynnika ekspansji siatki dla tych 3% elementów wiązałoby się ze zmniejszeniem wielkości siatki numerycznej, co z kolei spowodowałoby znaczne wydłużenie czasu obliczeń. Przeprowadzona analiza wpływu jakości siatki wykazała, że wskazane przekroczenia dla parametru maksymalnego współczynnika ekspansji siatki nie wpływają znacząco na uzyskiwane wyniki.

Przy ścianach komory paleniskowej zbudowano warstwę przyścienną, w której wysokość pierwszej warstwy wyznaczono dla parametru $\gamma^+ = 1$. Przyjęto temperaturę ścian komory paleniskowej równą temperaturze pary w walczaku.

Opracowana siatka numeryczna wykorzystana została do symulacji pracy kotła przy różnych obciążeniach.

9.3. Preprocesor

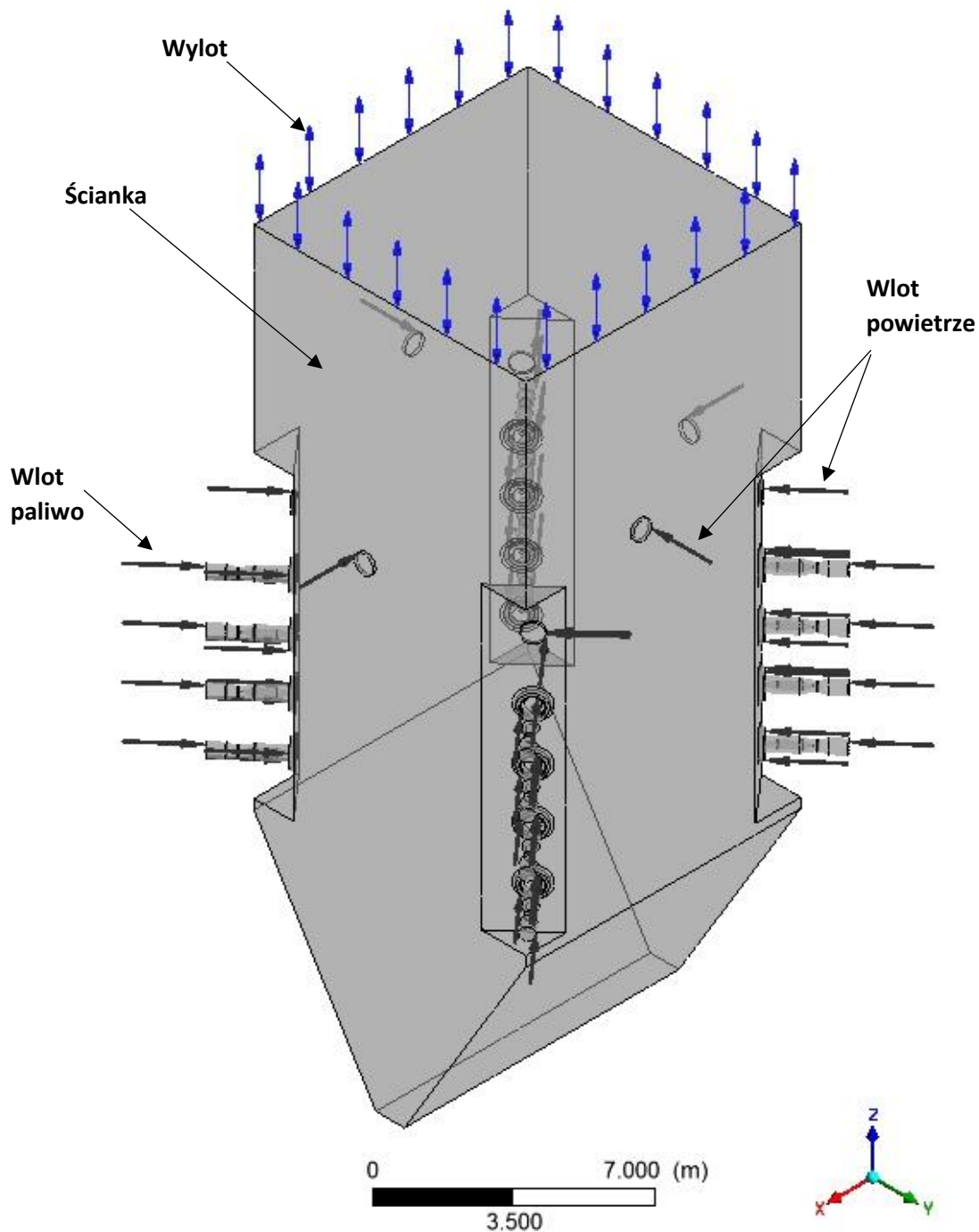
W kolejnym etapie przypisano niezbędne właściwości wykorzystanych podczas modelowania materiałów, sformułowano reakcje zachodzące podczas procesu spalania i zadano warunki brzegowe. W przypadku paliwa zadano własności węgla zgodnie z danymi historycznymi udostępnionymi przez PGE Energia Ciepła S.A. Oddział nr 1 w Krakowie, w szczególności dotyczącymi wartości opałowej i jego składu chemicznego

Parametr	Jednostka	Wartość
Wartość opałowa	kJ/kg	24 340
Zawartość popiołu	%	20,4
Zawartość wilgoci	%	2,1
Zawartość siarki	%	0,68

Tabela 25 - składu chemicznego węgla

Dla popiołu przyjęto: masę molową 12kg/kmol, gęstość 1000kg/m³, ciepło właściwe 800J/kgK. Dla pozostałości koksowej przyjęto własności: masę molową 12kg/kmol, gęstość 2000kg/m³, ciepło właściwe 1600J/kgK.

Reakcje procesów zachodzących w trakcie spalania paliwa zaimportowane zostały w oparciu o wbudowane biblioteki w programie ANSYS – CFX 2022R2. Poszczególne reakcje modelowano według równań opisujących odgazowanie, utlenianie pozostałości koksowej i utlenianie w fazie gazowej. Rysunek 9-9 ukazuje model z zadanymi warunkami.



Rysunek 9-9 Warunki brzegowe zadane w modelu

W celu wyznaczenia poziomu emisji tlenków azotu wykorzystano modele tworzenia się NO_x termicznych i paliwowych. W obliczeniach przyjęto rozdział na części lotne i pozostałość koksową: 39% : 61%.

Dla zbudowanego modelu wykonano symulacje pracy kotła OP-430 w zakresie 60 – 100% ze skokiem co 5%. Wydajności kotła, dla których wykonano obliczenia numeryczne zestawiono w tabeli 26.

Obciążenie kotła [%]	Wydajność – przepływ pary [t pary/h]
60	250
65	272.5
70	296
75	318.5
80	342.5
85	363.7
90	382.5
95	408.6
100	430

Tabela 26 – przepływ pary kotła dla których wykonano obliczenia

W dalszej części pracy przedstawiono metodykę przygotowania i prowadzenia symulacji na przykładzie dwóch wybranych wariantów pracy kotła. Pierwszym z nich jest praca przy 90% wydajności kotła a drugim praca na minimum technicznym jednostki, czyli z przepływem pary na poziomie 250 t/h – 60%.

9.3.1.1. Praca bloku przy obciążeniu 90%

Dla pracy kotła przy obciążeniu 90% (przepływ pary – 382.5 t/h) odczytane z systemu zostały ilości powietrza do palników pyłowych. Następnie uwzględniając temperaturę, ciśnienie oraz gęstość powietrza, wartości te zostały przeliczone z kNm^3/h na kg/s . Kolejnym krokiem był rozdział powietrza według ustawień rzeczywistych na powietrze wtórne i powietrze trzecie w stosunku 0,3 : 0,7. Parametry zadane dla przeprowadzenia obliczeń przedstawia tabela 27.

Młyn węglowy	MW1				MW2				MW3				MW4			
	lewy przód	lewy tył	prawy przód	prawy tył	lewy przód	lewy tył	prawy przód	prawy tył	lewy przód	lewy tył	prawy przód	prawy tył	lewy przód	lewy tył	prawy przód	prawy tył
Ilość powietrza wtórnego [kg/s]	1,0988	1,4327	0,7002	1,1634	0,3663	0,6140	0,5063	0,5386	1,1849	1,0018	0,9479	1,1203	0,6356	1,0018	0,6894	1,4004
Ilość powietrza trzeciego [kg/s]	2,5638	3,3430	1,6338	2,7146	0,8546	1,4327	1,1813	1,2568	2,7649	2,3376	2,2119	2,6140	1,4830	2,3376	1,6086	3,2676
Temperatura [K]	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938

Tabela 27 - Parametry zadane dla przeprowadzenia obliczeń

Nad poziomem palników zabudowane zostały dysze OFA. 4 dysze OFA znajdują się w narożach komory paleniskowej nad najwyższym poziomem palników i 4 na ścianach bocznych komory. Dokonano przeliczenia wartości z kNm^3/h na kg/s . Wartości ilości powietrza i temperatury przestawiono w tabeli 28

	Dysze OFA							
	Naroże				Ściana			
	lewy przód	lewy tył	prawy przód	prawy tył	lewa	tył	prawa	przód
Ilość powietrza [kg/s]	1,0772	1,1849	1,1849	1,1131	3,0521	2,4058	2,6930	2,4776
Temperatura [K]	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938	505,938

Tabela 28 - Wartości ilości powietrza i temperatury

W ostatnim kroku zadano parametry ilościowe dostarczanego paliwa. W celu wyznaczenia strumienia paliwa do poszczególnych palników pyłowych, odczytano z systemu ilość spalnego węgla i obciążenie prądowe pracujących podajników węglowych. Dokonano zsumowania wartości prądowych i przeliczenia ilości węgla względem 1 [A]. Następnie przeliczono ilość węgla w stosunku do obciążenia podajnika i rozdzielono równomiernie na cztery palniki, odpowiadające za spalanie wyprowadzone z pojedynczego młyna węglowego. Przeliczone wartości przedstawia tabela 29.

	młyn			
	1	2	3	4
Ilość powietrza [kg/s]	1,1736	0,0000	1,3522	1,5407
Ilość paliwa [kg/s]	0,9860	0	1,1870	1,1252
Temperatura [K]	369,390	351,495	367,437	372,613

Tabela 29 – ilość węgla w stosunku do obciążenia podajnika

9.3.1.2. Praca bloku przy minimum technicznym

Dla pracy kotła przy obciążeniu minimalnym 60% (przepływ pary - 250 t/h) odczytano z systemu ilości powietrza do palników pyłowych. Następnie przeliczono jednostki i dokonano rozdziału powietrza na powietrze wtórne i powietrze trzecie. Parametry pracy przedstawia tabela 30.

Młyn węglowy	MW1				MW2				MW3				MW4			
	lewy przód	lewy tył	prawy tył	prawy przód	lewy przód	lewy tył	prawy tył	prawy przód	lewy przód	lewy tył	prawy tył	prawy przód	lewy przód	lewy tył	prawy tył	prawy przód
Naroże																
Ilość powietrza wtórnego [kg/s]	0.118494	0.39857	0.172354	0.226215	0.236987	0.463202	0.064633	0.204671	0.129266	0.581696	0.118494	0.086177	0.269304	0.409342	0.247759	0.387797
Ilość powietrza trzeciego [kg/s]	0.276485	0.929996	0.40216	0.527835	0.55297	1.080806	0.15081	0.477565	0.30162	1.357291	0.276485	0.20108	0.628375	0.955131	0.578105	0.904861
Temperatura [K]	542.14	542.14	542.14	542.14	542.14	542.14	542.14	542.14	542.14	542.14	542.14	542.14	542.14	542.14	542.14	542.14

Tabela 30 - Parametry pracy kotła przy obciążeniu minimalnym

Dla tego przykładu również dokonano przeliczenia wartości z kNm^3/h na kg/s . Wartości ilości powietrza i temperatury przestawiono w tabeli 31.

	Dysze OFA							
	Naroże				Ściana			
	lewy przód	lewy tył	prawy przód	prawy tył	lewa	tył	prawa	przód
Ilość powietrza [kg/s]	2.657131	2.585316	1.579915	1.831266	1.292658	1.041308	0.682236	0.646329
Temperatura [K]	542.15	542.15	542.15	542.15	542.15	542.15	542.15	542.15

Tabela 31 - Wartości ilości powietrza i temperatury

Parametry ilościowe dostarczanego paliwa wyznaczono w taki sam sposób jak dla pracy kotła z obciążeniem 90%. Przeliczone wartości przedstawiono w tabeli 32.

	młyn			
	1	2	3	4
Ilość powietrza [kg/s]	3.132901	3.159831	3.052109	0.332141
Ilość paliwa [kg/s]	0.87728	0.631716	0.83383	0
Temperatura [K]	370.15	372.15	371.15	358.15

Tabela 32- ilość węgla w stosunku do obciążenia podajnika

9.5. Solver

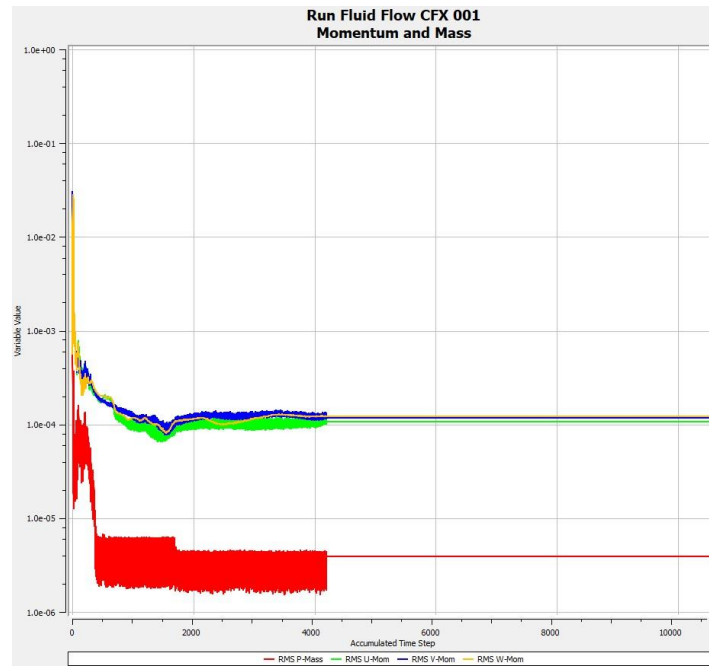
Obliczenia numeryczne przeprowadzono na serwerze obliczeniowym wyposażonym w procesor AMD EPYC 9654 96-Core 2.40 Gz i dysponującym 768 GB RAM. Do obliczeń

wykorzystano 180 wątków i 380 GB RAM. W trakcie obliczeń prowadzono kontrolę wybranych parametrów obliczeniowych w celu określenia zbieżności realizowanych obliczeń.

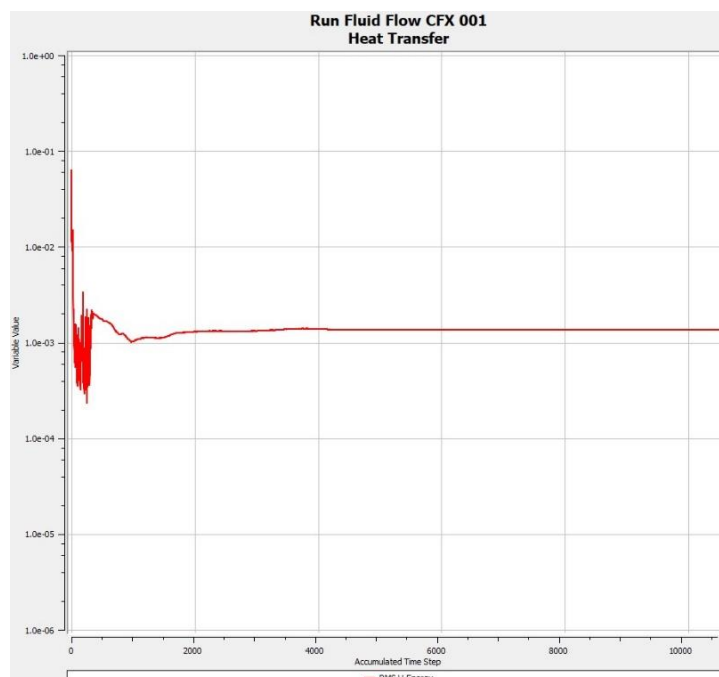
9.5.1. Praca bloku przy obciążeniu 90%

Poniżej zestawiono wybrane residua obrazujące jakość prowadzonych obliczeń.

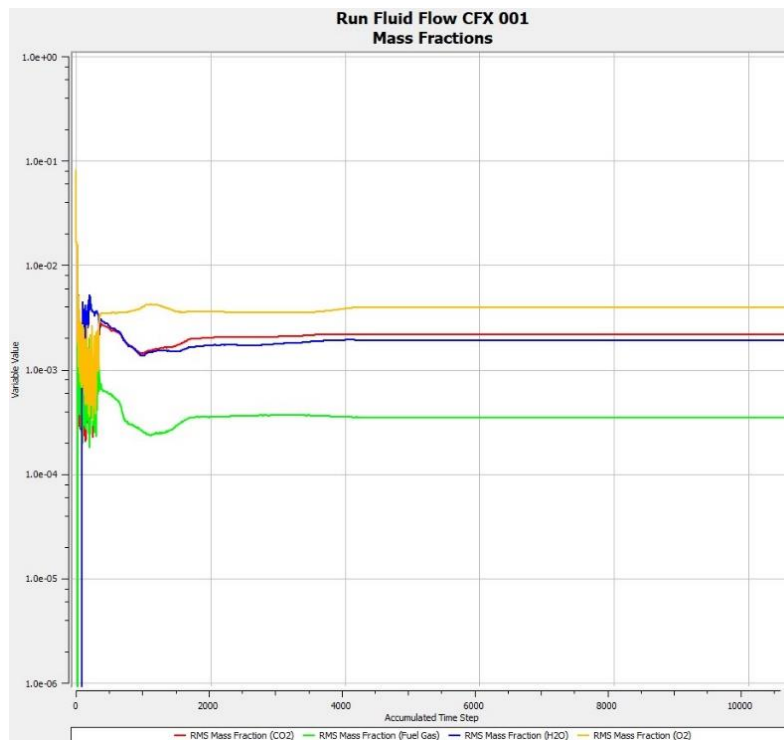
a)



b)



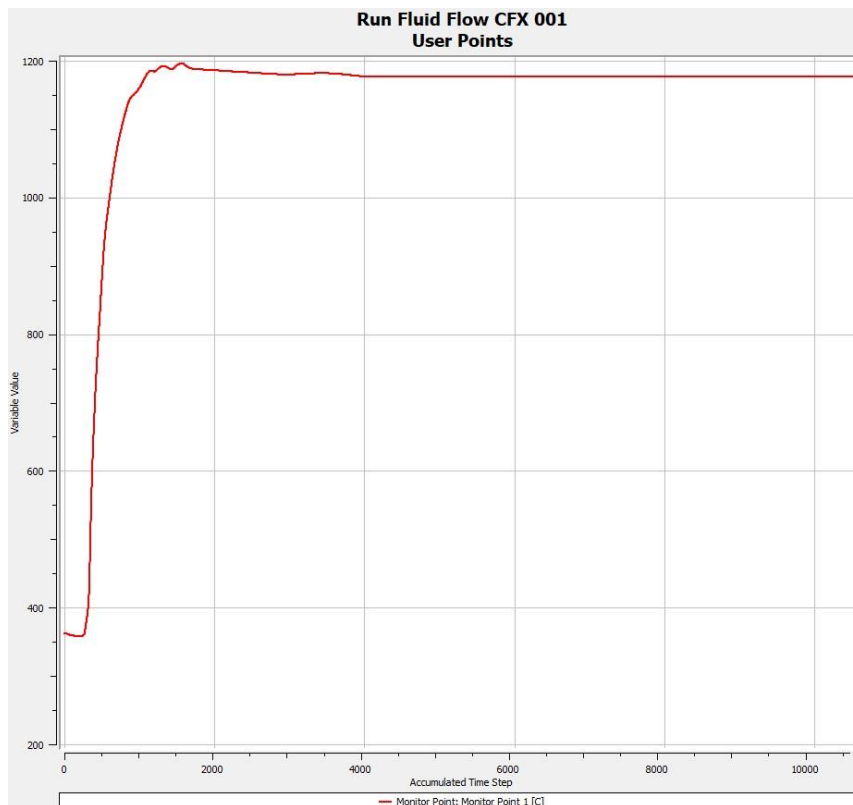
c)



Rysunek 9-10 Przebiegi wybranych residuów

Wszystkie przedstawione na rysunku 9-10 residua osiągnęły bardzo dobry poziom zbieżności, w przedziale od 10^{-6} do 10^{-3} i są stabilne (brak dużych wahań), co świadczy o poprawności przygotowania modelu obliczeniowego.

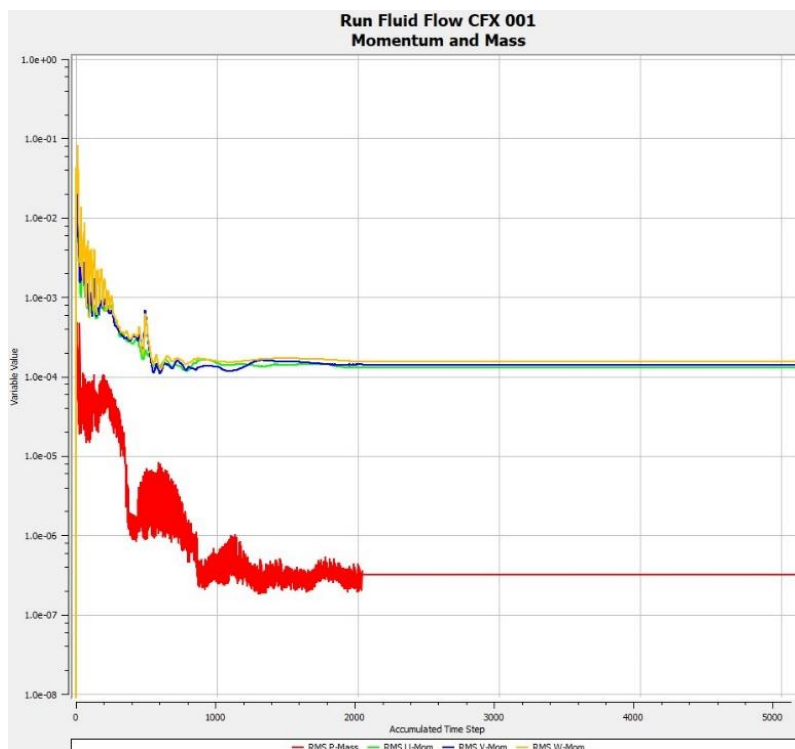
Dodatkowo w celu kontroli prowadzonych obliczeń zdefiniowano punkt monitorowania średniomasowej temperatury spalin na wylocie z komory paleniskowej. Widać że temperatura spalin w trakcie trwania obliczeń zmienia się od wartości początkowej równej 362°C do temperatury 1177°C . Po wykonaniu 2000 iteracji zmiany temperatury spalin na wylocie z komory ustabilizowały się. Po przeprowadzeniu 4000 iteracji obliczenia można uznać za ustalone (małe zmiany wyznaczonej temperatury i pozostałych parametrów). Zmiany temperatury spalin podczas prowadzonych obliczeń pokazano na rysunku 9-11.



Rysunek 9-11 Kontrola temperatury spalin w trakcie symulacji

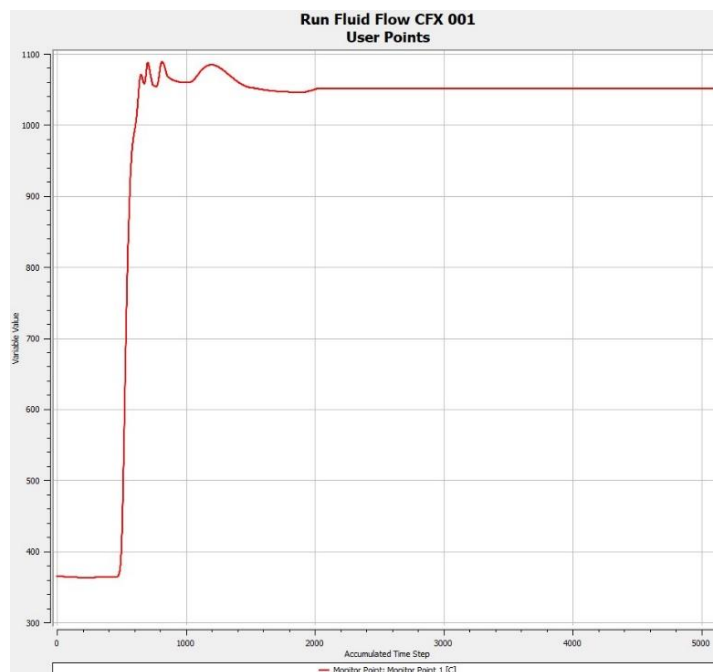
9.5.2. Praca bloku przy minimum technicznym

Podczas pracy przy minimum technicznym bloku wynoszącym 250 t/h obliczenia również były stabilne. Przykładowe residua dla równania zachowania masy osiągają bardzo dobry poziom zbieżności w przedziale od 10^{-6} do 10^{-4} co przedstawia rysunek 9-12.



Rysunek 9-12 Residua dla równania zachowania masy

Podobnie jak w poprzednim przypadku, dla prowadzenia kontroli nad obliczeniami zdefiniowano punkt monitorowania średniomasowej temperatury spalin na wylocie z komory paleniskowej. Widać że temperatura spalin w trakcie trwania obliczeń zmienia się od wartości początkowej równej 364°C do temperatury 1061°C. Po wykonaniu 2000 iteracji zmiany temperatury spalin na wylocie z komory ustabilizowały się. Po przeprowadzeniu 4000 iteracji obliczenia można uznać za ustalone (małe zmiany wyznaczonej temperatury i pozostałych parametrów).



Rysunek 9-13 Residua dla temperatury spalin

9.6. Analiza uzyskanych wyników

W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano rozkład temperatury spalin w całej objętości komory paleniskowej oraz stężenia poszczególnych substancji. W celu wyznaczenia ładunku siarki na wylocie z komory paleniskowej, z przeprowadzonych obliczeń numerycznych odczytano ilość spalin powstałą podczas procesu spalania w kotle oraz zawartość poszczególnych składników: CO₂, N₂, O₂, H₂O. Zawartość SO_x w spalinach wyznaczona została w oparciu o wyznaczone udziały wskazanych wyżej składników. Zawartość SO_x w spalinach w przybliżeniu jest równa

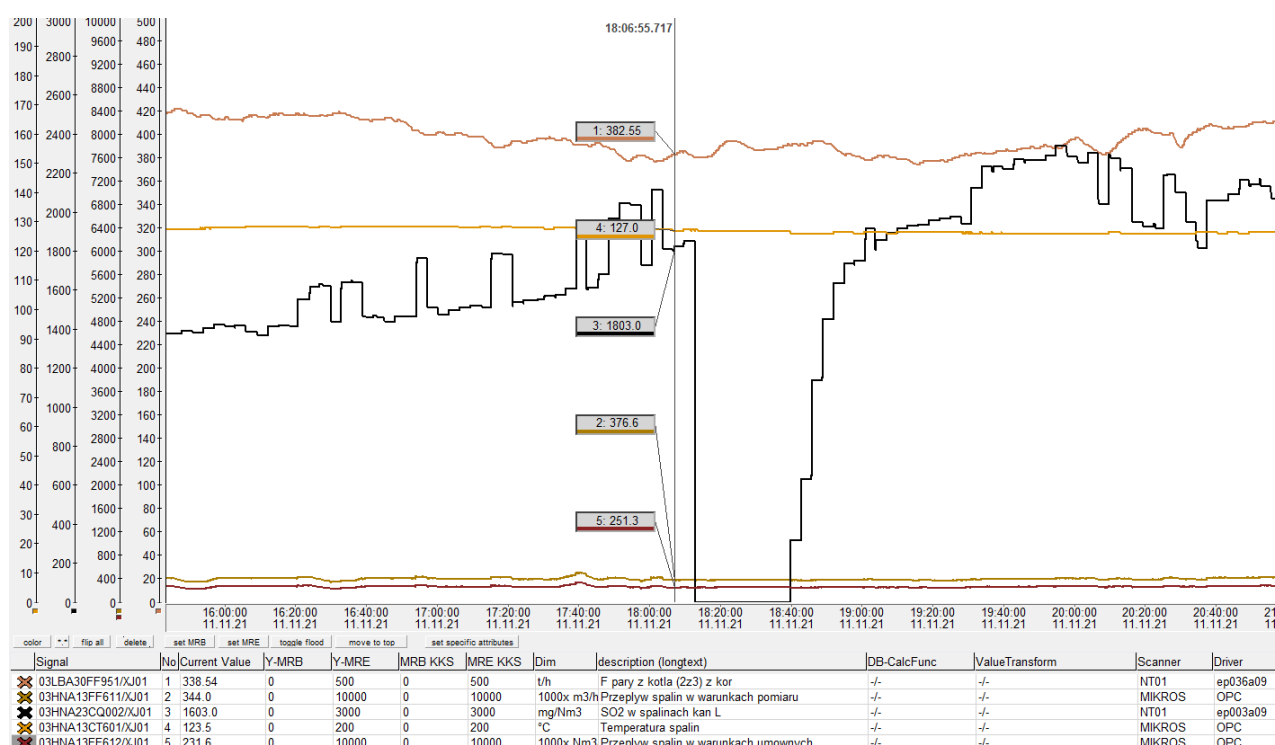
$$SO_x = 1 - CO_2 - N_2 - O_2 - H_2O$$

Tabela 33 przedstawia odczytane wartości z obliczeń numerycznych komory dla wszystkich 9 analizowanych przypadków przeliczone dla temperatury spalin przed IMOS wynoszącej 120°C. Dodatkowo dla obciążenia minimalnego 60% oraz obciążenia 90% przedstawiono wyniki graficzne rozkładu temperatur w komorze paleniskowej oraz średnie wartości poszczególnych substancji. Przykładowe odczyty danych pomiarowych dla analizowanych wydajności 382.5 i 250 t/h pokazano odpowiednio na rysunkach 9-14 i 9-15.

W oparciu o wyniki dokonano walidacji uzyskanych wyników z symulacji.

Rysunek 9-14 przedstawia wykres określający wybrane parametry pracy kotła OP-430 przy wydajności 90%. Z wykresu można odczytać:

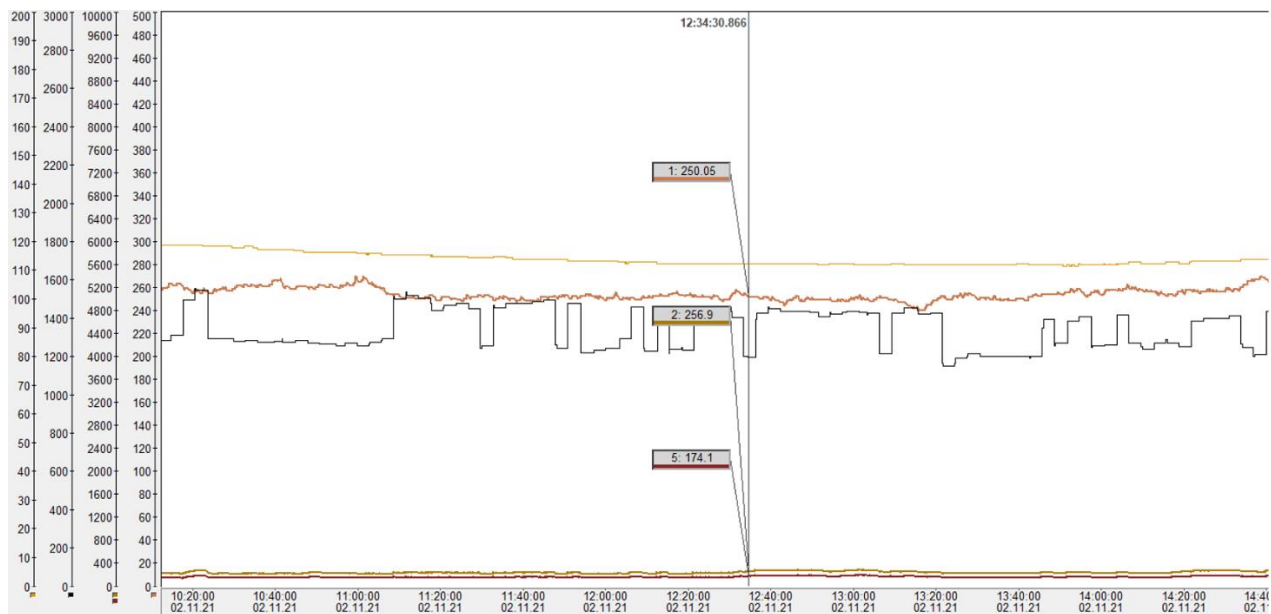
- wydajność kotła: 382.5 t/h
- wielkość ładunku SO₂ w spalinach: 1803 mg/Nm³
- temperatura spalin: 127 °C
- ilość spalin: 251.3 kNm³/h



Rysunek 9-14 Wykres wartości odczytanych z systemu dla wydajności 90% obciążenia

Z rysunku 9-15 przedstawiającego wybrane parametry pracy kotła OP-430 przy wydajności 60%. Z wykresu można odczytać:

- wydajność kotła: 250 t/h
- wielkość ładunku SO₂ w spalinach: 1307 mg/Nm³
- temperatura spalin: 125 °C
- ilość spalin: 174.1 kNm³/h



Rysunek 9-15 Wykres wartości odczytanych z systemu dla wydajności 60% obciążenia

Obciążenie kotła	Pomiar					Obliczenia CFD	
	Ilość pary z kotła	Zawartość SO ₂	Ilość spalin	Ilość spalin	Ładunek SO ₂ na wylocie z komory	Ilość spalin	Ładunek SO ₂ na wylocie z komory
[%]	[t/h]	[kg/Nm ³]	[1000xm ³ /h]	[Nm ³ /h]	[kg/h]	[1000xm ³ /h]	[kg/h]
60	250	0.001307	256.9	174100	226.50	260.6	228
65	272.5	0.00126	277.7	190500	240.03	272.3	247.2
70	296	0.001566	316.1	216800	339.51	310	346.8
75	318.5	0.001663	334.9	227800	378.83	342.8	370.5
80	342.5	0.001676	347.1	231600	388.16	352.2	376
85	363.7	0.001576	373.6	255000	401.88	382.2	409.7
90	382.5	0.001803	376.6	251300	453.09	379	446.8
95	408.6	0.001687	410.7	273100	460.72	417.8	451.7
100	430	0.001587	452.7	300600	477.05	445.8	470.3

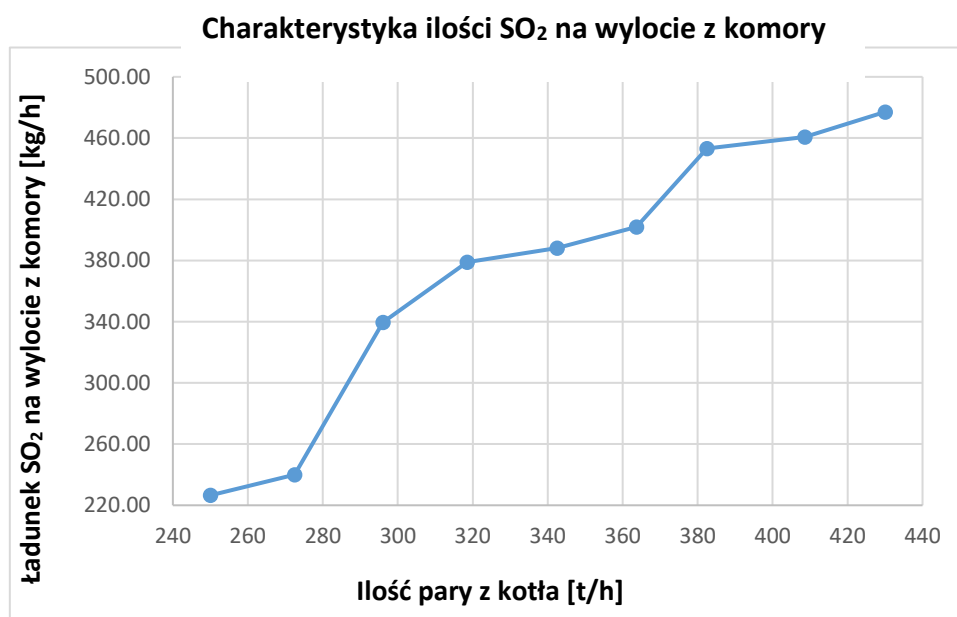
Tabela 33 - odczytane wartości dla analizowanych przypadków

Bazując na powyższych danych, możliwe jest określenie błędu względnego dla wyznaczonej ilości spalin i ładunku SO₂ pomiędzy wartościami uzyskanymi z pomiarów i obliczeń CFD. Błędy te zestawiono w tabeli 34.

Obciążenie kotła [%]	Błąd względny Ilość spalin	Błąd względny Ładunek SO ₂
60	3.29	0.66
65	1.94	2.99
70	1.93	2.15
75	2.36	2.20
80	1.47	3.13
85	2.30	1.95
90	0.64	1.39
95	1.73	1.96
100	1.52	1.42

Tabela 34 Zestawienie błędów względnych

Powyższe zestawienie pozwala na wyznaczenie charakterystyki (rysunek 9-16) ilości siarki na wylocie z komory paleniskowej względem obciążenia kotła wyrażonego w ilości pary/godzinę.



Rysunek 9-16 Charakterystyka ilości SO₂ na wylocie z komory

Opracowana charakterystyka wykorzystana będzie w procesie optymalizacji pracy pomp cyrkulacyjnych instalacji odsiarczania spalin do wyznaczenia przewidywanej ilości tlenków siarki podczas pracy bloku przy danym obciążeniu.

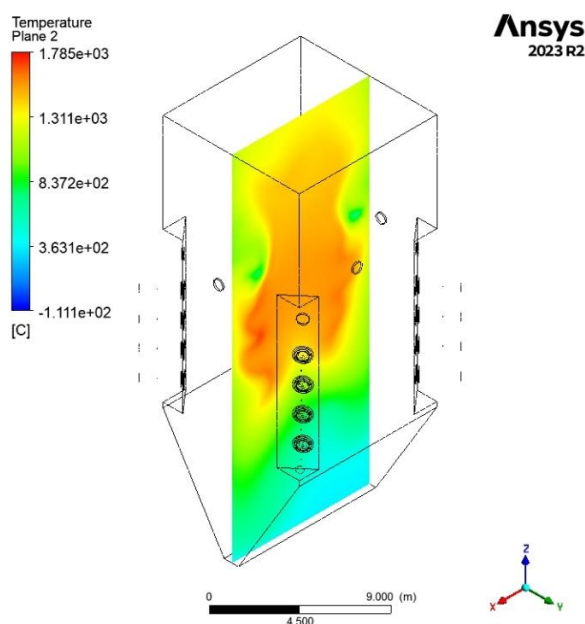
Poniżej przedstawiono rozkłady dodatkowych, najistotniejszych parametrów pracy komory paleniskowej kotła, możliwych do uzyskania z modelowania CFD, dla wybranych obciążeń.

9.6.1. Praca bloku przy obciążeniu 90%

W procesie analizowania wyników dla kotła pracującego z obciążeniem 90%, zwrócono szczególną uwagę w kontekście rozkładu temperatur i powstałych produktów spalania.

9.6.1.1. Rozkład temperatury spalin

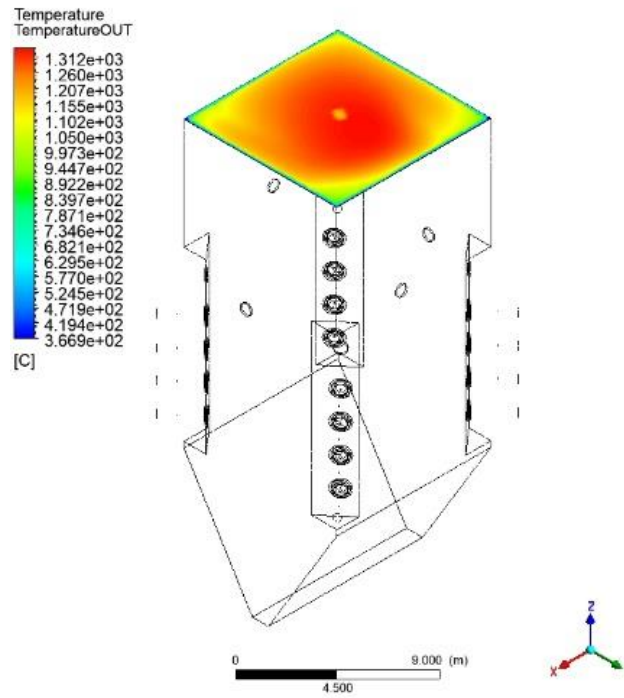
W analizowanym przypadku pracy kotła OP-430 z przepływem pary o wartości 385 t/h rozkład temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej przedstawiono na rysunku 9-17.



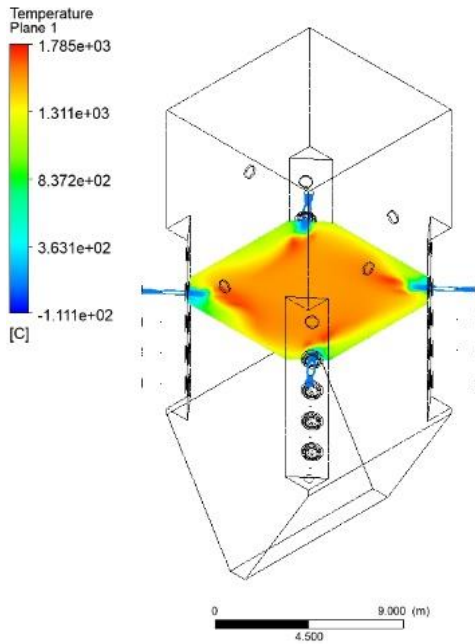
Rysunek 9-17 Rozkład temperatury w komorze paleniskowej

Rozkład temperatury spalin w przekroju poprzecznym komory paleniskowej na różnych wysokościach pokazano na rysunku 9-18. Znajomość rozkładu temperatury spalin w komorze paleniskowej i na jej wylocie jest bardzo istotna. Ponadto, pokazane na rysunku 9-18 jądro płomienia utrzymane w centrum komory świadczy o równomiernym rozkładzie temperatur w całej komorze paleniskowej. Rozkład ten ma wpływ na efektywność procesu spalania i finalnie emisję szkodliwych substancji. Dodatkowo zapobiega bezpośredniemu oddziaływaniu wysokich temperatur na ściany komory paleniskowej a także zmniejsza ryzyko korozji i erozji, zwiększając tym samym żywotność kotła.

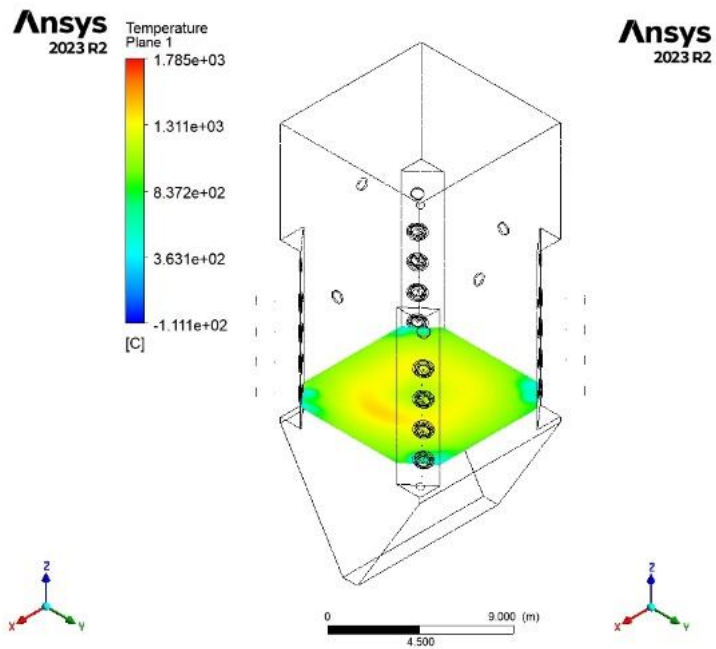
a)



b)



c)



Rysunek 9-18 Rozkład temperatury na poszczególnych poziomach komory paleniskowej

9.6.1.2. Produkty spalania

Koncentracja (stężenie) składnika określa masę danego składnika do zajmowanej objętości. Odczytane z modelowania CFD stężenia poszczególnych składników na wylocie z komory paleniskowej, dla średniej temperatury splin 1178°C przedstawiono w tabeli 35.

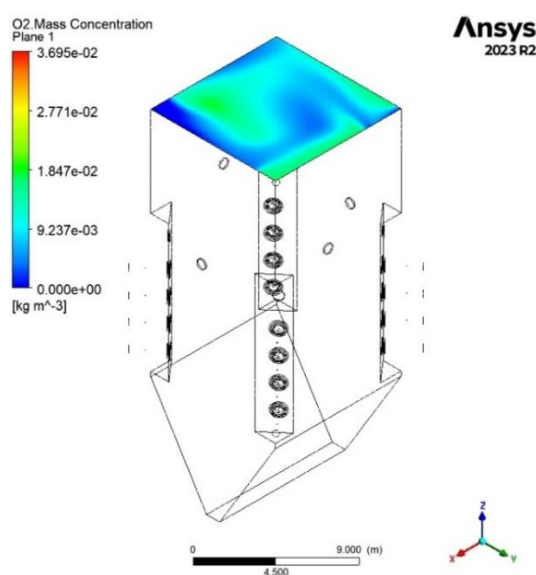
Składnik	Koncentracja składnika [kg/m ³]
CO ₂	0.05375220
H ₂ O	0.00634364
N ₂	0.18456759
O ₂	0.00868026

Tabela 35 - udziały masowe poszczególnych składników na wylocie z komory paleniskowej

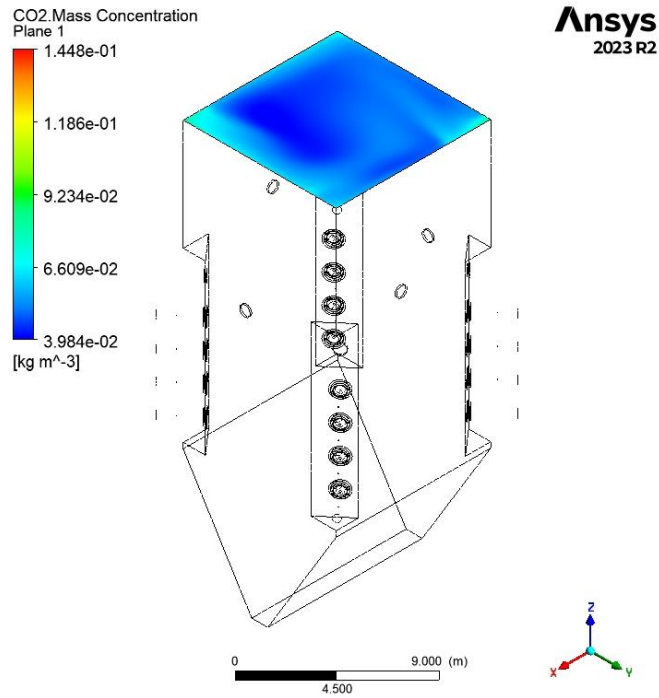
Ilość spalin obliczona na drodze przeprowadzonej symulacji wynosi 98,35 kg/s. Przy wykorzystaniu wartości pokazanych w tabeli 35 wyliczono ładunek SO₂ na wylocie z komory paleniskowej w temperaturze 1178°C. Skład spalin jest następujący: CO₂, H₂O, N₂, O₂, SO₂. Znając stężenia CO₂, H₂O, N₂, O₂ można wyliczyć stężenie SO₂ w spalinach.

Dla analizowanego obciążenia i temperatury spalin 1178°C, koncentracja SO₂ na wylocie z komory paleniskowej wynosi 0.00031931 kg/m³, co po uwzględnieniu strumienia masy spalin produkowanych w kotle daje 446.8 kg/h SO₂. Podane w tabeli 33 stężenie SO₂ zostało przeliczone dla temperatury 120°C (w tej temperaturze wykonywane są pomiary).

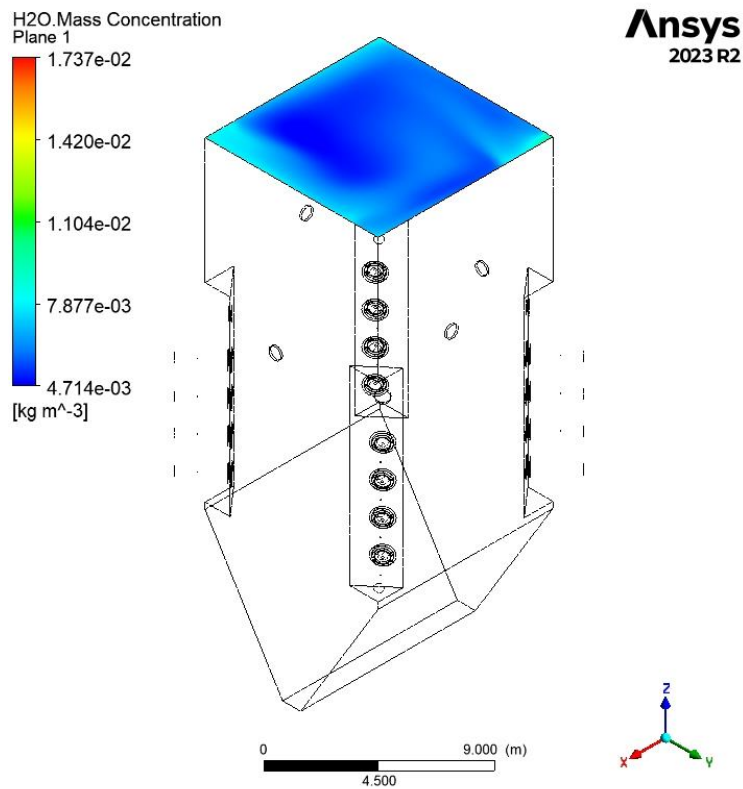
Na poniższych rysunkach przedstawiono graficznie wyniki symulacji dotyczące rozkładu stężeń tlenu (rysunek 9-19), dwutlenku węgla (rysunek 9-20), wody (rysunek 9-21), i azotu (rysunek 9-22).



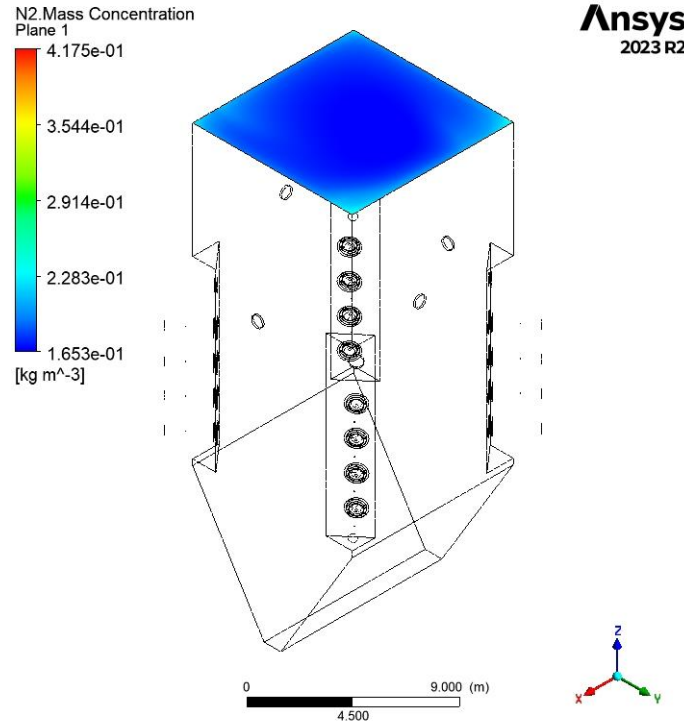
Rysunek 9-19 Rozkład tlenu na wylocie z komory paleniskowej



Rysunek 9-20 Rozkład dwutlenku węgla na wylocie z komory paleniskowej

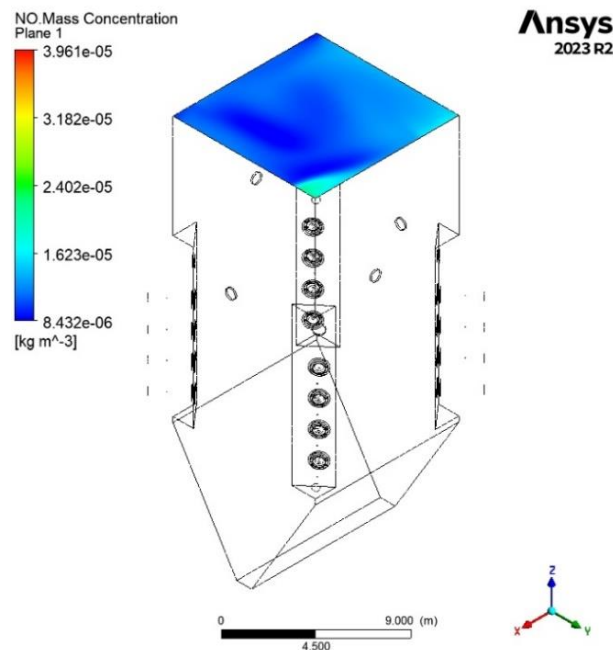


Rysunek 9-21 Rozkład wody na wylocie z komory paleniskowej



Rysunek 9-22 Rozkład azotu na wylocie z komory paleniskowej

Dodatkowo modelowanie pozwala na wyznaczenie poziomu NO_x. Dla analizowanego przypadku średnie stężenie tlenków azotu wynosi 1.18494e-05 kg/m³ co po przeliczeniu daje wartość 49.31 ppm (86.48 mg/Nm³ O₂). Rysunek 9-23 określa rozkład stężeń NO_x na wylocie z komory.



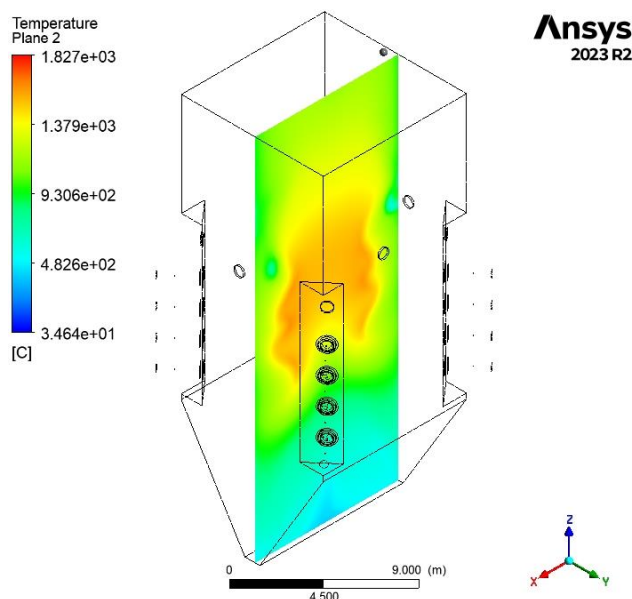
Rysunek 9-23 Rozkład tlenków azotu na wylocie z komory paleniskowej

9.6.2. Praca bloku przy minimum technicznym

W analizowanym przypadku pracy kotła OP-430 przy minimum technicznym - z przepływem pary o wartości 250 t/h zwrócono szczególną uwagę na rozkłady temperatur i powstałe produkty spalania.

9.6.2.1. Rozkład temperatury spalin

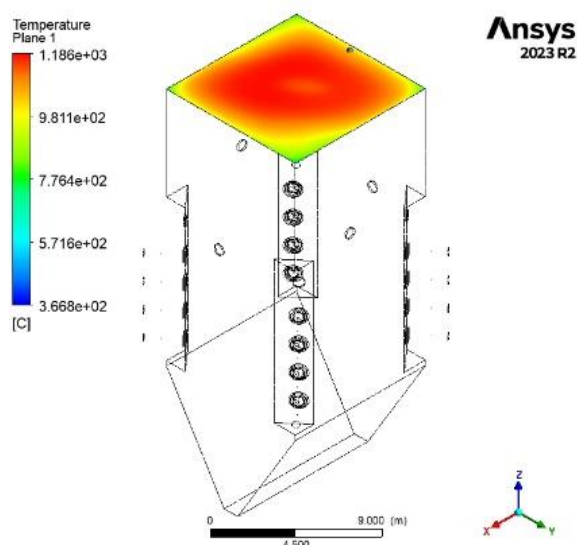
Rozkład temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej przedstawiono na rysunku 9-24.

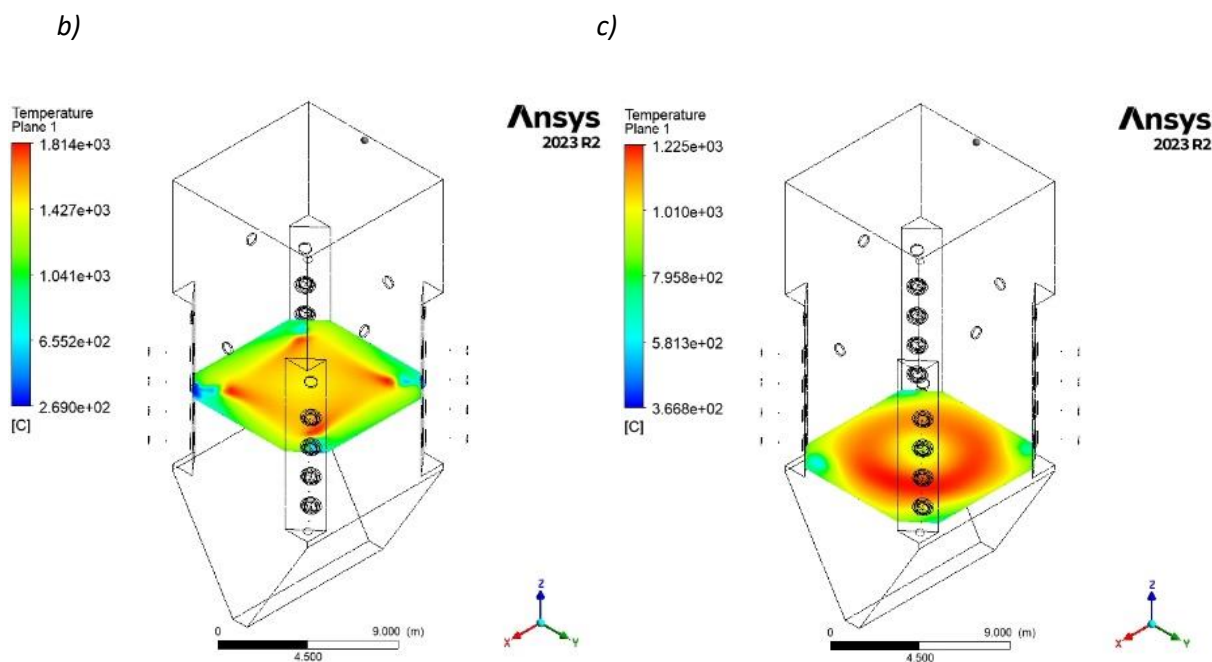


Rysunek 9-24 Rozkład temperatury w komorze paleniskowej

Rozkład temperatury spalin w przekroju poprzecznym komory paleniskowej na różnych wysokościach pokazano na rysunku 9-25.

a)





Rysunek 9-25 Rozkład temperatury na poszczególnych poziomach komory paleniskowej

9.6.2.2. Produkty spalania

Odczytane z modelowania CFD stężenia poszczególnych składników na wylocie z komory paleniskowej, dla średniej temperatury spalin 1061°C przedstawiono w tabeli 36.

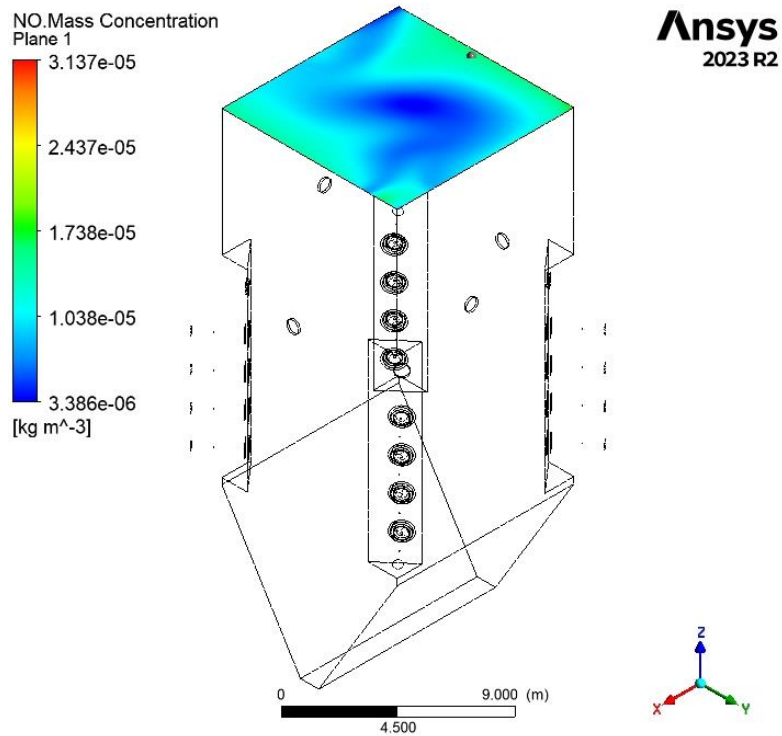
Składnik	Koncentracja składnika [kg/m ³]
CO ₂	0.05554180
H ₂ O	0.00603879
N ₂	0.20332200
O ₂	0.00999142

Tabela 36 Udziały masowe poszczególnych składników na wylocie z komory paleniskowej

Ilość spalin obliczona na drodze przeprowadzonej symulacji wynosi 70.0 kg/s. Z powyższych wartości wyliczono ładunek SO₂ na wylocie z komory paleniskowej.

Dla analizowanego obciążenia i temperatury spalin 1061°C, koncentracja SO₂ na wylocie z komory paleniskowej wynosi 0,00024899 kg/m³, co po uwzględnieniu strumienia masy spalin produkowanych w kotle daje 228.0 kg/h SO₂.

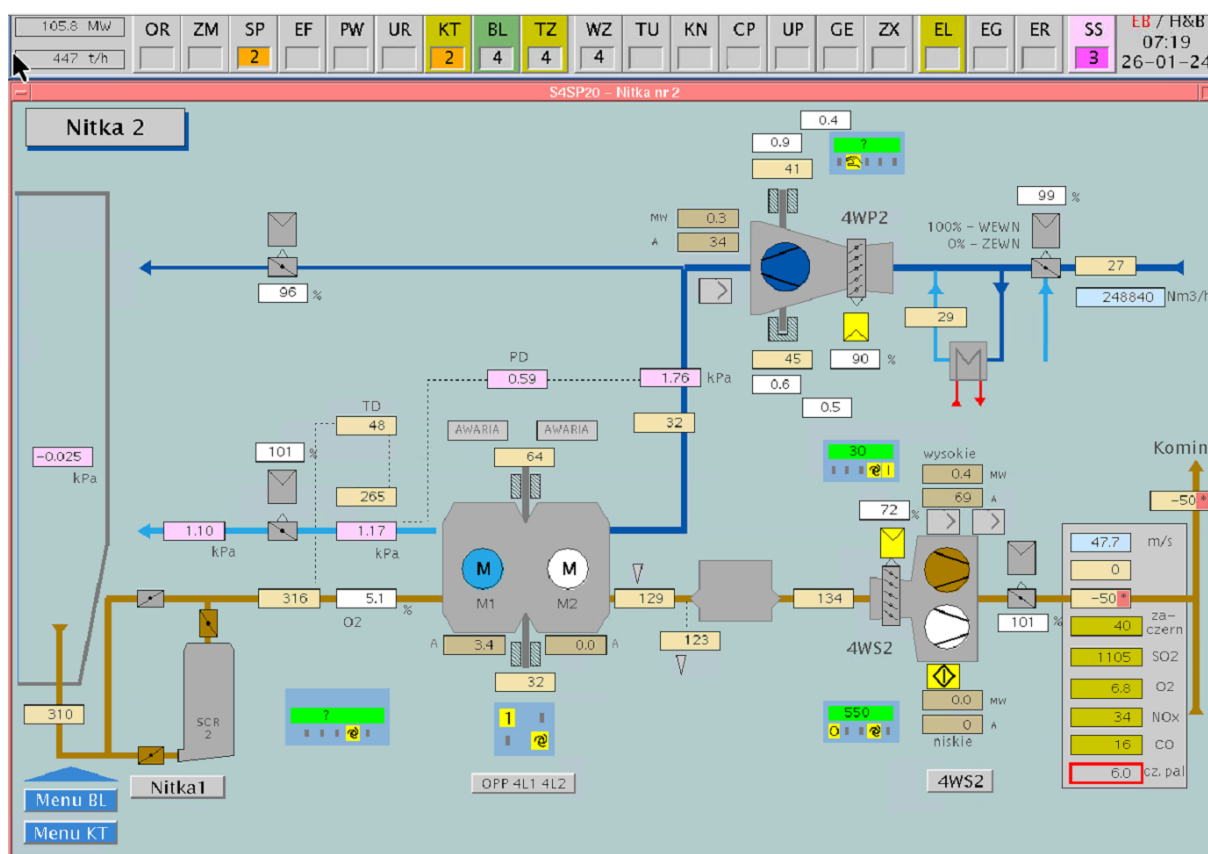
Dla analizowanego przypadku średnie stężenie tlenków azotu wynosi $1.05026 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ co po przeliczeniu daje wartość 40.15 ppm (71.01 mg/Nm³ 6% O₂). Rysunek 9-26 określa rozkład NO_x na wylocie z komory.



Rysunek 9-26 Rozkład tlenków azotu na wylocie z komory paleniskowej

10. Porównanie wyników symulacji z rzeczywistą emisją SO_x

W celu zwalidowania wyników ilości tlenków siarki na wylocie z komory paleniskowej otrzymanych na drodze przeprowadzonej symulacji dokonano ich porównania z rzeczywistymi parametrami pracy kotła OP-430. Z systemu DCS odczytano wartości stężenia SO₂ dla przypadku pracy kotła z wydajnością 60 i 90%. Na rysunku 10-1 ukazany został zrzut ekranu systemu do ciągłego pomiaru parametrów pracy kotła.



Rysunek 10-1 Układ spaliny- powietrze kotła OP-430

Podczas pracy z przepływem pary z kotła na poziomie 385 t/h, odczytana wartość stężenia SO₂ wyniosła 453.09 kg/h. Wartość wyliczona za pomocą oprogramowania Ansys - CFX wyniosła 446.8 kg/h. Błąd względny pomiędzy uzyskanymi ładunkami SO₂ w przypadku pracy kotła z wydajnością na poziomie 90% wyniósł 1.39%. Dodatkowo zweryfikowano temperaturę spalin na wylocie z komory paleniskowej. Z obliczeń CFD średnia wartość temperatury spalin na wylocie z komory wynosi 1177°C. Pomiar temperatury spalin wskazuje wartość 1141°C. Wykonywany on jest przy ścianie komory paleniskowej. Odczytana wartość temperatury spalin w rejonie w którym znajduje się pomiar temperatury wynosi 1135°C. Błąd względny pomiędzy temperaturą uzyskaną z pomiarów i obliczeń wynosi 0,523%.

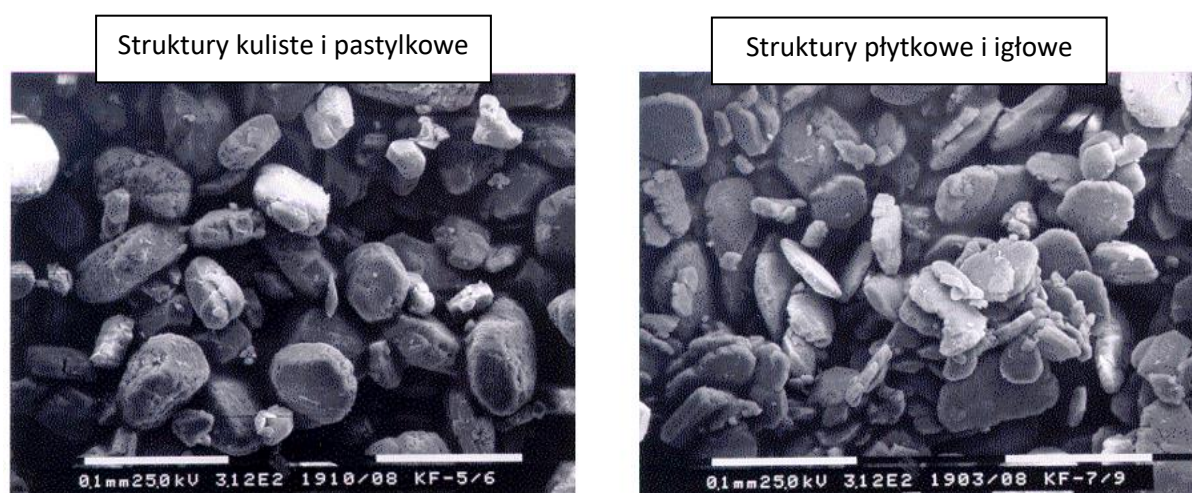
$$\frac{t_{\text{pomiar}} - t_{\text{obliczenia}}}{t_{\text{pomiar}}} \times 100\% = \Delta$$

Dla przepływu minimalnego 250 t/h, odczytana wartość ładunku SO₂ na wylocie z komory wyniosła 226.20 kg/h. Wartość uzyskana w wyniku przeprowadzonej symulacji wyniosła 228.0 kg/h, co przekłada się na błąd względny rzędu 0.66%. Dodatkowo zweryfikowano temperaturę spalin na wylocie z komory paleniskowej. Z obliczeń CFD średnia wartość temperatury spalin na wylocie z komory wynosi 1061°C. Pomiar temperatury spalin wskazuje wartość 1051°C. Wykonywany on jest przy ścianie komory paleniskowej. Odczytana wartość temperatury spalin w rejonie w którym znajduje się pomiar temperatury wynosi 1042°C. Błąd względny pomiędzy temperaturą uzyskaną z pomiarów i obliczeń wynosi 0,86%.

Dla obu powyższych przykładów, błąd względny jest niski. Można więc uznać wynik przeprowadzonej symulacji za wiarygodny a sam proces modelowania pracy kotła za poprawny.

11. Dobór optymalnej konfiguracji pracy pomp cyrkulacyjnych IMOS

Ilość siarki na wylocie z instalacji mokrego odsiarczania spalin, przy jednakowych warunkach na wlocie do IMOS uwarunkowana jest poprzez dwa parametry. Pierwszym parametrem mającym bezpośredni wpływ na skuteczność odsiarczania jest wartość pH zawiesiny absorbera. Zwiększając wartość pH, poprawiamy proces usuwania siarki ze spalin jednak pogarszamy warunki dla tworzenia gipsu. Z kolei zmniejszając wartość pH zawiesiny gipsu w absorberze, pogarszamy zdolność instalacji do usuwania siarki, poprawiając jakość gipsu. Na rysunku 11-1 przedstawiono pożądane struktury kryształów gipsu powstające w IMOS. Hengfei Z. podał ilościowy związek między pH a współczynnikiem przenikania masy po stronie cieczy [39]. Wartość pH jako optymalny punkt pracy została ustalona przez producenta na poziomie 4,8. Operator sterując parametrami pracy IMOS zmienia tą wartość w przypadku nagłej konieczności obniżenia stężenia siarki na wylocie z instalacji, bądź konieczności poprawienia jakości gipsu.



Rysunek 11-1 Struktury kryształów gipsu powstające w IMOS

Drugim czynnikiem wpływającym na emisję SO_2 za instalacją jest ilość oraz konfiguracja pracujących pomp cyrkulacyjnych. 4 pompy cyrkulacyjne tłoczą zawiesinę z absorbera do 4 indywidualnych poziomów zraszania. Każda z 4 pomp cyrkulacyjnych posiada wydajność 7000 m^3/h co oznacza, że przy zachowaniu takiej samej wydajności, tłocząc medium na różne wysokości, pompy posiadają różne moce co z kolei przekłada się na zużycie prądu. Ze względu na bezpieczeństwo instalacji konieczna jest praca dwóch pomp. Ma to na celu zabezpieczenie przed nieoczekiwanym wyłączeniem np. w skutek wystąpienia zakłócenia w sieci. Zawiesina tłoczona przez pompy o większej mocy (tłoczona na wyższe poziomy) ma jednak wydłużony czas kontaktu z opływającymi ją spalinami. Wydłużając ten czas, zwiększamy czas reakcji zachodzącej pomiędzy zawiesiną a siarką zawartą w spalinach, zwiększając tym samym sprawność odsiarczania [23].

Pobór prądu przez wszystkie 4 pompy jest różny. Pompa która tłoczy na najniższy poziom zraszania jest tańsza pod kątem eksploatacji od pompy która tłoczy ponad nią. Tabela 37 przedstawia przybliżony pobór prądu dla wszystkich 3 faz podczas pracy pompy.

Pompa	Obciążenie prądowe [A]
PCA1	68
PCA2	78
PCA3	82
PCA4	88

Tabela 37 - przybliżony pobór prądu przez pompę cyrkulacyjną.

Posiłkując się wzorem można wyznaczyć zużycie prądu wyrażone w kWh.

$$\text{Pobór prądu (kWh)} = \sqrt{3} \times I \times U \times \cos\varphi \times t$$

Gdzie:

$\sqrt{3}$ – stała wynikająca z zasilania trójfazowego

I – prąd w amperach [A]

U – napięcie fazowe w woltach [V]

$\cos\varphi$ – współczynnik mocy

t – czas w godzinach [h]

Dla pomp PCA1 – PCA4 zużycie prądu podczas godzinowej pracy przedstawiono w tabeli 38.

Pompa	Zużycie prądu [kWh]
PCA1	631
PCA2	723
PCA3	761
PCA4	816

Tabela 38 - zużycie prądu podczas godzinowej pracy pomp cyrkulacyjnych

Najbardziej optymalną konfiguracją pracy pomp pod kątem ekonomicznym, przy założeniu konieczności pracy co najmniej 2 pomp jest praca PCA1 z PCA2. Konfiguracja jest jednak

uzależniona od ilości tlenków siarki opuszczającej IMOS. Aktualnie decyzja o ilości i kolejności pracujących pomp należy do operatora instalacji. Na podstawie opracowanego modelu numerycznego komory paleniskowej można już wcześniej zaplanować najkorzystniejszy układ pracy pomp. W tym celu należy jednak odczytać maksymalny punkt pracy dla każdej możliwej konfiguracji. Zakładając, że minimalna ilość pracujących pomp wynosi 2 a praca 4 pomp zapewnia absorbcję dla maksymalnego możliwego ładunku SO₂ dostarczanego do absorbera przy pracy wszystkich dostępnych jednostek, konfigurację przedstawia tabela 39.

Możliwa konfiguracja pracy pomp
Pompy PCA 1- PCA 2
Pompy PCA 1- PCA 4
Pompy PCA 2- PCA 3
Pompy PCA 3- PCA 4
Pompy PCA 1- PCA 2- PCA 3
Pompy PCA 1- PCA 2- PCA 4
Pompy PCA 1- PCA 3- PCA 4
Pompy PCA 2- PCA 3- PCA 4
Pompy PCA 1- PCA 2- PCA 3 – PCA4

Tabela 39 – zestawienie maksymalnego możliwego ładunku SO₂ do absorpcji

Pompy PCA1 z PCA3 i PCA2 z PCA4 zasilane są ze wspólnej sekcji rozdzielni. Z uwagi na konieczność gwarancji bezpieczeństwa pracy instalacji, niedopuszczalna jest praca dwóch pomp w tej konfiguracji.

Dla każdej z wymienionych konfiguracji pracujących pomp odczytano z systemu na przedziale 3 lat, ilość maksymalnego ładunku na wlocie do absorbera przy zapewnieniu standardów emisji na wylocie z IMOS. Wyniki przedstawiono w tabeli 40.

Konfiguracja	Ładunek SO ₂ [kg/h]	SO ₂ na wylocie [mg/h]
Pompy 1-2	1306	199
Pompy 1-4	1660	199
Pompy 2-3	1813	199
Pompy 3-4	1470	199
Pompy 3-4-1	2738	199
Pompy 1-2-3	1581	199
Pompy 1-2-4	2022	199
Pompy 2-3-4	2706	199

Tabela 40 - ilość maksymalnego ładunku na wlocie do absorbera przy zapewnieniu standardów emisji na wylocie z IMOS

Z powyższego zestawienia wynika, że w celu zachowania ilości siarki na wylocie z IMOS na poziomie <200mg/h, konieczne jest dołączenie kolejnej pompy przy ładunku SO₂ wyrażonym w tabeli. Uzupełniając zestawienie o zużycie prądu dla poszczególnych pomp, możemy odczytać który wybór będzie najbardziej optymalny. Wynik przedstawiono w tabeli 41.

Konfiguracja	ładunek SO ₂ [kg/h]	SO ₂ na wylocie [mg/h]	Zużycie prądu [kWh]
Pompy 1-2	1306	199	1354
Pompy 1-4	1660	199	1447
Pompy 2-3	1813	199	1484
Pompy 3-4	1470	199	1577
Pompy 1-2-3	1581	199	2115
Pompy 1-2-4	2022	199	2170
Pompy 3-4-1	2738	199	2207
Pompy 2-3-4	2706	199	2300

Tabela 41 - zużycie prądu dla poszczególnych pomp

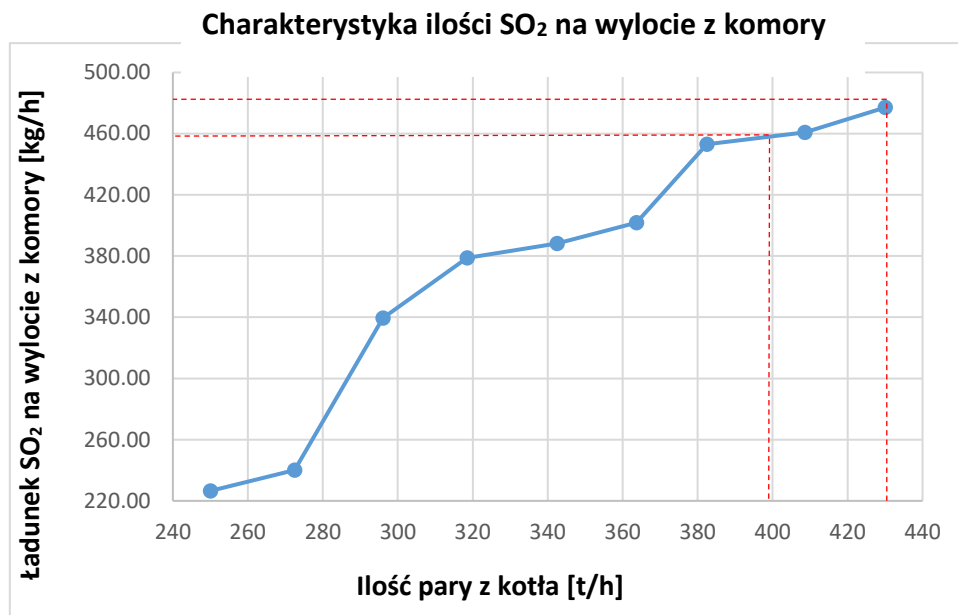
Korzystając z wyznaczonej charakterystyki ilości siarki na wylocie z komory paleniskowej przy danym obciążeniu kotła, możliwe jest już na poziomie planowania pracy bloków energetycznych, zaplanować pracę pomp cyrkulacyjnych na IMOS.

Dla sprawdzenia zasadności powyższych wyliczeń opracowano dwa scenariusze pracy bloków energetycznych OP-430.

11.1. Scenariusz 1

Scenariusz 1 zakłada pracę dwóch bloków energetycznych OP-430 z wydajnością odpowiednio 430 t/h i 398 t/h oraz zaplanowanym uruchomieniem trzeciego bloku OP-430 z minimalnym obciążeniem.

Z wyznaczonej wcześniej charakterystyki, odczytujemy ilość SO_2 na wylocie z komory paleniskowej.



Rysunek 11-2 Odczyt ładunku SO_2 z charakterystyki

Dla wydajności 430 t/h odczytana wartość ładunku SO_2 wynosi 470.3 kg/h a dla wydajności 398 t/h – 449.71 kg/h. Łączny ładunek SO_2 na wlocie do IMOS wynosi 920.01 kg/h.

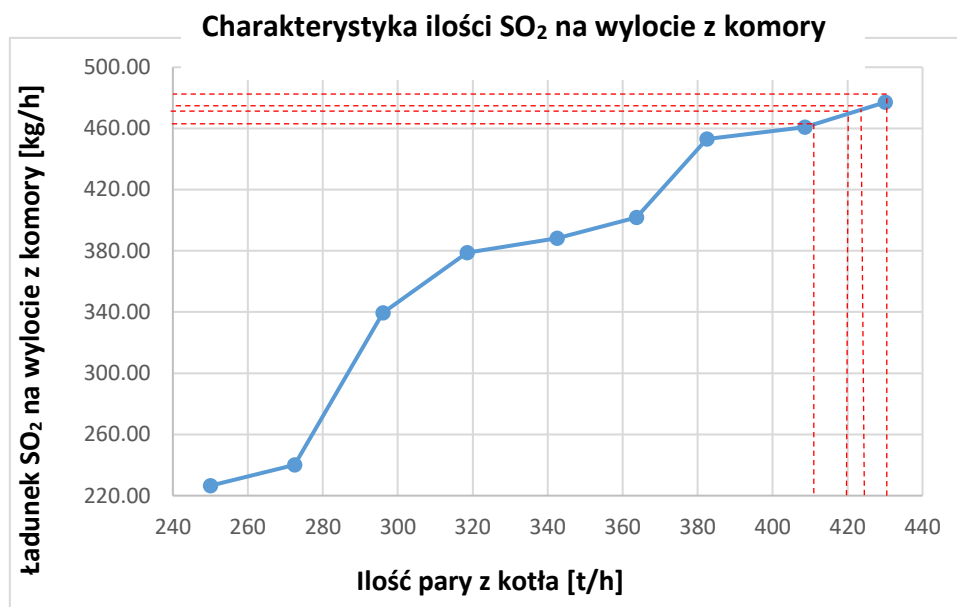
Odczytując z tabeli 41 możliwość redukcji SO_2 , wskazujemy optymalną konfigurację pracy pomp PCA1 i PCA2.

Wiedząc, że trzeci blok pracujący z minimalnym obciążeniem zwiększy ładunek SO_2 o 228.0 kg/h do wartości końcowej 1148 kg SO_2 /h już w trakcie uruchomienia wiemy, że nie ma potrzeby uruchamiania kolejnej pompy.

11.2. Scenariusz 2

Scenariusz 2 zakłada pracę czterech bloków energetycznych OP-430 z wydajnością odpowiednio 420 t/h, 425 t/h, 410 t/h i 430 t/h.

Z charakterystyki wyznaczamy ładunek SO_2 na wlocie do absorbera.



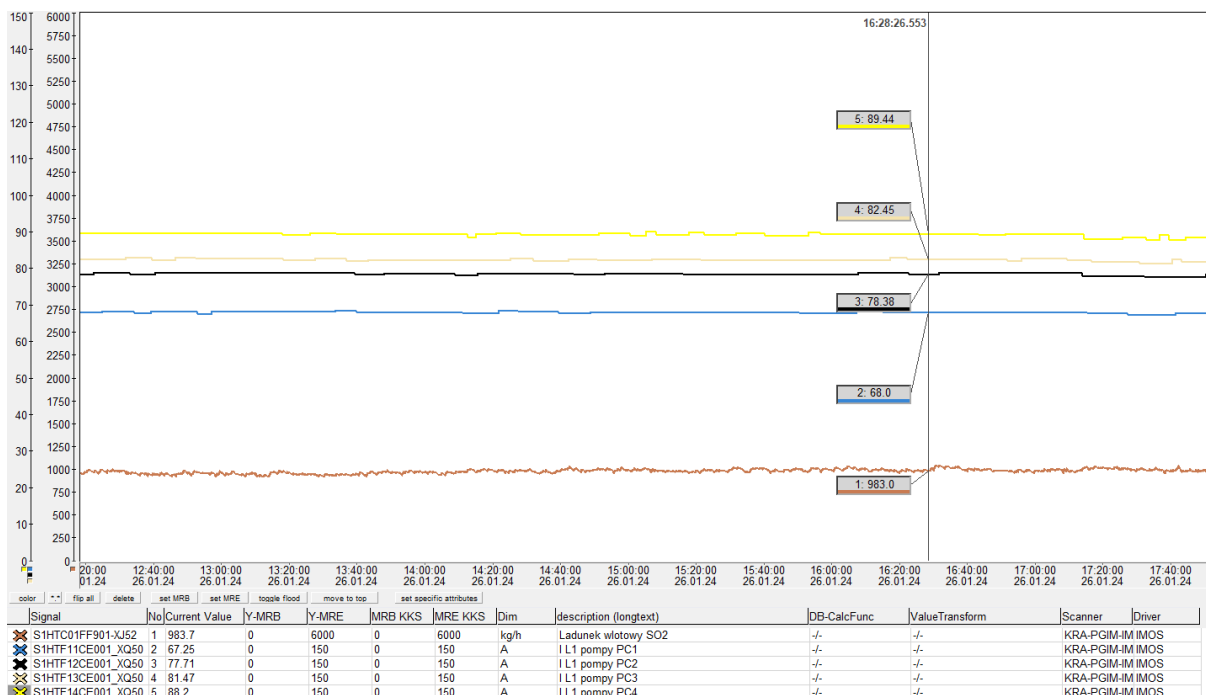
Rysunek 11-3 Odczyt ładunku SO_2 z charakterystyki

Ilość pary z kotła	Ładunek SO_2 na wylocie z kotła
420	461.61
425	465.95
410	452.92
430	470.00

Tabela 42 – zestawienie ilości siarki

Odczytana z powyższej tabeli, łączna ilość ładunku SO_2 na wylocie z komory paleniskowej wynosi 1850.48 kg/h. Z tabeli 41 odczytujemy, że konieczna jest praca minimum 3 pomp cyrkulacyjnych a najbardziej optymalną konfiguracją jest układ PCA1, PCA2 i PCA4.

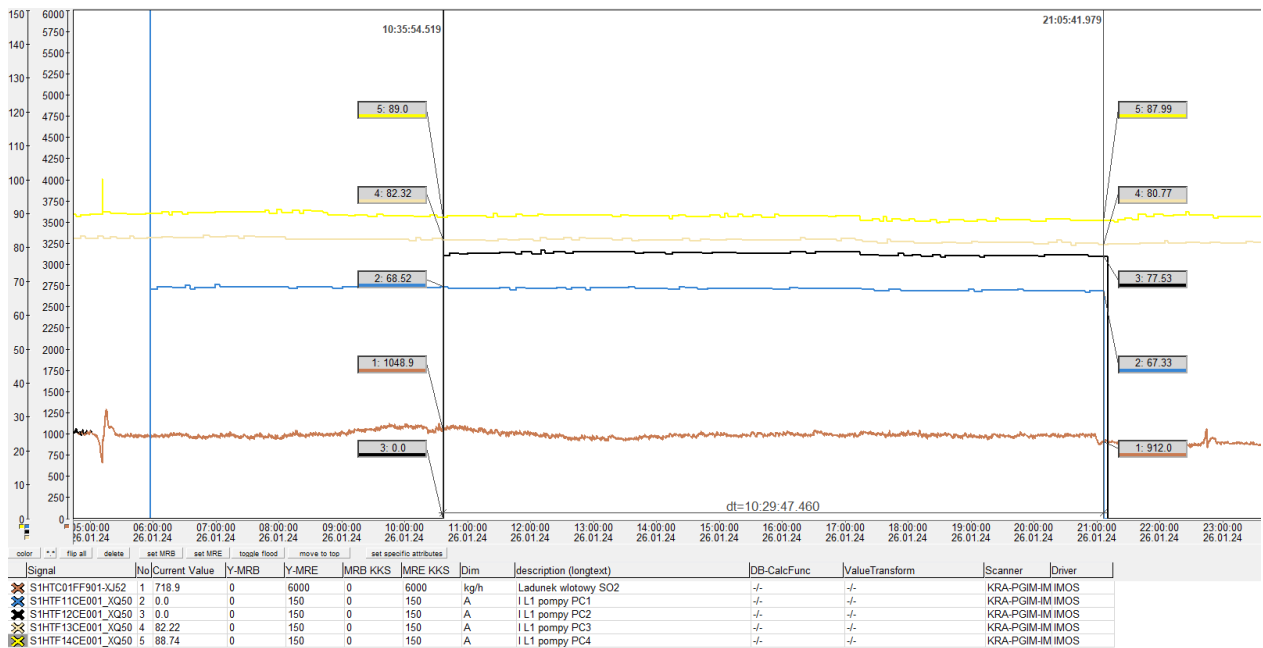
Zastosowanie opracowanej metodologii optymalizacji pracy pomp cyrkulacyjnych dla IMOS pozwoli na osiągnięcie wymiernych korzyści finansowych. Bazując na danych historycznych z systemu DCS, odczytano przykładową konfigurację pracy pomp cyrkulacyjnych dla wybranych ładunków SO_2 które wynosiły odpowiednio 983.0 kg/h oraz 1532.8 kg/h.



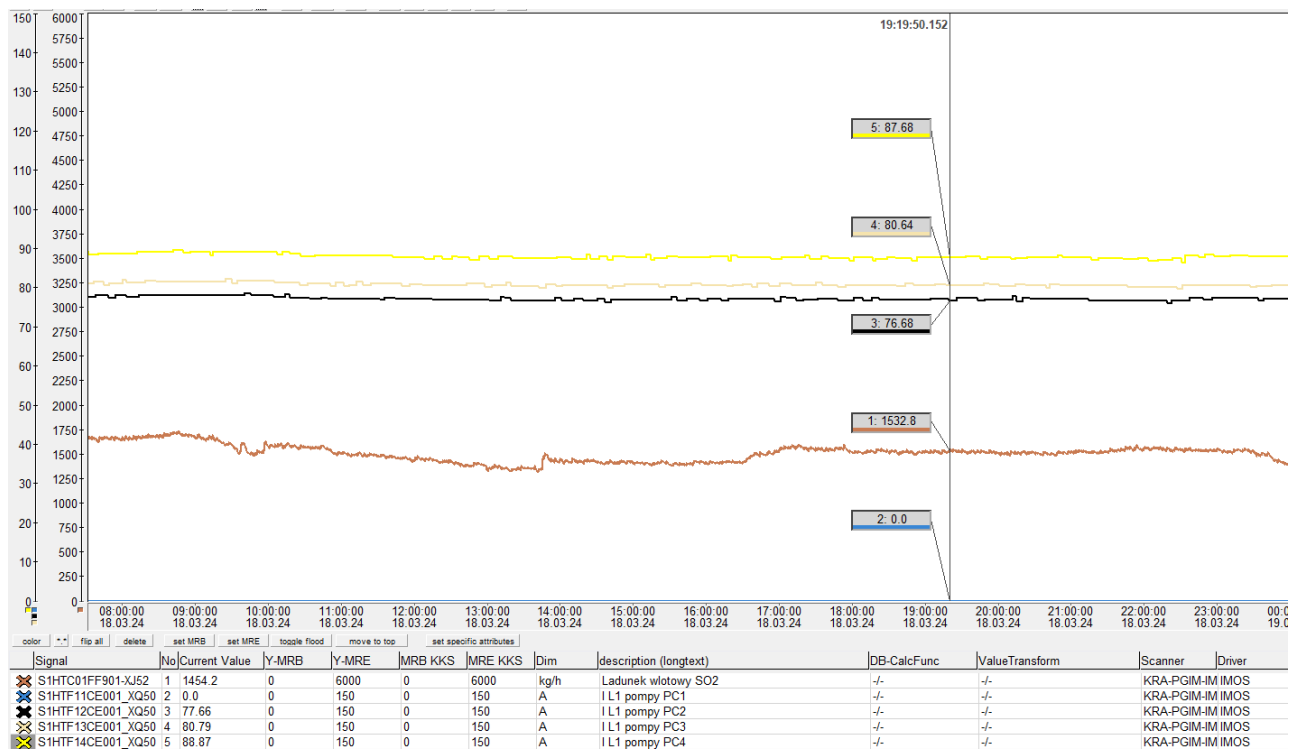
Rysunek 11-4 dane z systemu DCS

W pierwszym przypadku, ładunek wlotowy wynosił 983.0 kg/h SO₂. Pracujące pompy to PCA1, PCA2, PCA3, PCA4. Z tabeli 41 odczytujemy optymalne zestawienia pracujących pomp dla tego ładunku – PCA1, PCA2. Różnica w ilości zużywanej energii wynosi 2931 kWh (dla PCA1-4) – 1354 kWh (dla PCA1-2) = 1577 kWh. Biorąc pod uwagę średni koszt 1 kWh dla firm w 2023 roku na poziomie 1zł (wg. ecodlabiznesu.pl), godzinna oszczędność na pracy z dobranymi według algorytmu pompami wynosi 1354zł.

Dla powyższego przykładu, czas pracy w tej konfiguracji, odczytany z poniższego rysunku 11-4 wyniósł 10,5h co przy zastosowaniu algorytmu dałoby oszczędność rzędu 14 217zł.



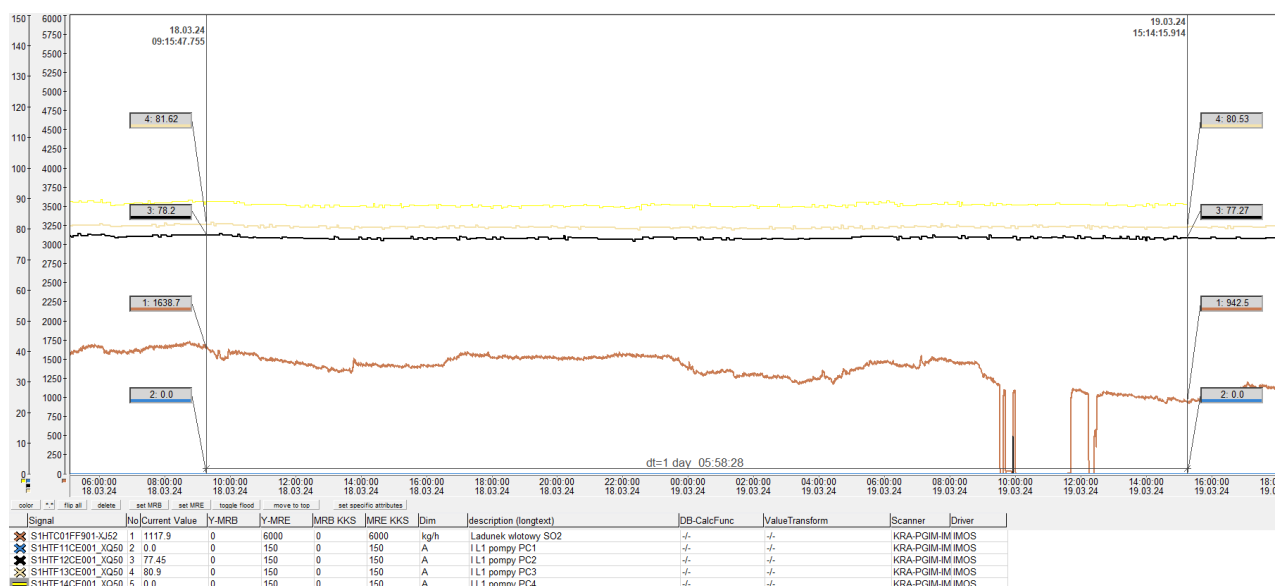
Rysunek 11-5 dane z systemu DCS



Rysunek 11-6 dane z systemu DCS

W drugim przypadku ładunek siarki osiągnął wartość 1532.8 kg/h SO2. Według tabeli 41, optymalne zestawienie pracy pomp to PCA1 i PCA4 podczas gdy na obiekcie pracowały pompy PCA1, PCA3 i PCA4. Rzeczywiste zużycie energii elektrycznej wyniosło 2207 kWh. Przy

optymalnym doborze, zużycie można było ograniczyć do 1447 kWh co dałoby oszczędność rzędu 760 kWh czyli w skali godziny 760zł.



Rysunek 11-7 dane z systemu DCS

Czas pracy w tej konfiguracji dla ilości siarki poniżej 1660 kg/h (warunek dla pracy pomp PCA1 i PCA4) wyniósł 30h. Podczas pracy według algorytmu, oszczędność przy optymalnym doborze pracujących pomp wyniosłaby 22 800zł.

Aktualnie stosowana procedura konfiguracji pracujących pomp cyrkulacyjnych uzależniona jest od emisji SO₂ na wylocie z IMOS. Jeżeli Operator widzi, że emisja zbliża się do wartości 200 mg/Nm³, dołącza kolejną pompę. Jeżeli zauważa spadek tej wartości, może podjąć decyzję o jej wyłączeniu. Zmiana wartości emisji związana jest ze zmianą parametrów spalnego węgla, zmianą obciążenia lub załączaniem/ wyłączeniem jednostek wytwórczych. W związku z tym, zmiana konfiguracji pracy pomp cyrkulacyjnych IMOS przeprowadzana jest stosunkowo rzadko. Wykorzystanie opracowanych algorytmów pozwoli zaplanować pracę bloków z wydajnościami zapewniającymi bezpieczną i ekonomiczną pracę IMOS.

Powyższe przypadki są tylko przykładem pracy pomp dla odczytu rzeczywistych parametrów. Nie jest jednak znana sytuacja ruchowa i na podstawie analizowanych danych nie można jednoznacznie stwierdzić, że praca pomp w tej konfiguracji nie była konieczna.

Na potrzeby opracowania powyższych scenariuszy założono pracę 4 bloków energetycznych OP-430. W PGE Energia Ciepła S.A. Oddział nr 1 w Krakowie zainstalowane zostały dwie jednostki OP-380 i dwa kotły OP-430. Opracowany model łatwo jest jednak dostosować do kotła OP-380, dając tym samym możliwość opracowania w pełni funkcjonalnego narzędzia do planowania pracy instalacji mokrego odsiarczania spalin.

12. Omówieni możliwości dalszego rozwoju metody mokrej wapiennej

Biorąc pod uwagę możliwość dalszego rozwoju metody mokrej wapiennej, można wskazać kilka kluczowych elementów. Są nimi przede wszystkim zwiększenie efektywności odsiarczania, redukcja kosztów eksploatacyjnych oraz minimalizacja wpływu na środowisko.

12.1. Zwiększenie efektywności odsiarczania

W celu zwiększenia efektywności odsiarczania bez potrzeby modernizacji absorbera, można opracować i zastosować sorbent w ulepszonej formule. Rozwój sorbentów modyfikowanych, mających zwiększoną powierzchnię reaktywną, wzbogaconych o specjalne dodatki zwiększające ich zdolność do pochłaniania siarki może dać możliwość zwiększenia skuteczności absorpcji SO_2 przy niższych stężeniach.

Dla nowych instalacji, najprostszym rozwiązaniem jest dodanie w absorberze kolejnego poziomu zraszania lub przygotowanie dla niego miejsca w przypadku wystąpienia konieczności dalszego ograniczania emisji. Z bardziej zaawansowanych technologii można wskazać opracowanie technologii sorbentów i reagentów wielofunkcyjnych, dających możliwość absorpcji zarówno SO_x jak i NO_x . Ten przypadek może obejmować innowacyjne materiały sorpcyjne lub opracowanie katalizatorów mogących pracować w różnych konfiguracjach procesowych. Pozwoli to na usuwanie tlenków siarki i azotu w jednej instalacji oczyszczania spalin. Przykładem może być odsiarczanie i odazotowanie spalin przy użyciu odczynnika Fentona, opisanym przez Yi Zhao [37]. Innym rozwiązaniem może być absorpcja NO_x wraz z SO_2 w skruberze mokrego odsiarczania spalin oparte na utlenianiu ozonem w fazie gazowej opisane przez Jiangyuan Q [38]

12.2. Redukcja kosztów eksploatacyjnych

Redukcję kosztów eksploatacyjnych można uzyskać poprzez zwiększenie wartości produktów ubocznych. W przypadku Instalacji mokrego odsiarczania spalin, produktem ubocznym jest gips. Udoskonalenie procesu, aby produkowany gips był najwyższej jakości pozwoliłoby na jego sprzedaż w lepszej cenie.

Kolejnym przykładem redukcji kosztów może być zastosowanie odzysku ciepła na wylocie z IMOS jak i ze ścieków powstałych po IMOS. Taka operacja może zmniejszyć zużycie energii w całym obiekcie.

W celu optymalizacji zużycia sorbentów i energii elektrycznej, można opracować i zastosować zaawansowane systemy automatyzacji procesu. Przykładem optymalizacji zużycia energii elektrycznej jest opracowany w niniejszej pracy model pozwalający na optymalny dobór pracujących pomp cyrkulacyjnych.

12.3. Minimalizacja wpływu na środowisko

Opracowanie technologii pozwalającej na odzysk wody na wylocie z IMOS i jej recyrkulację w systemie odsiarczania, znacząco zmniejszyłoby zapotrzebowanie na świeżą wodę co jest z kolei kluczowe w kwestii środowiska.

W celu ograniczenia emisji CO₂ ze spalin możliwe jest opracowanie sposobu integracji metody mokrej wapiennej z hodowlą alg. Takie połączenie można wykorzystać do absorpcji dwutlenku węgla ze spalin, redukując jego emisję do środowiska.

13. Wnioski i uwagi końcowe

Badania przeprowadzone w niniejszej pracy doktorskiej, potwierdzone danymi rzeczywistymi odczytanymi z systemu DCS podczas pracy kotła energetycznego OP-430 zainstalowanego w PGE Energia Ciepła S.A. Oddział nr 1 w Krakowie potwierdziły możliwość doboru konfiguracji pracy pomp cyrkulacyjnych instalacji mokrego odsiarczania spalin już na etapie planowania pracy bloków energetycznych.

W tym celu wykonany został model numeryczny komory paleniskowej kotła OP-430 pozwalający na przeprowadzenie symulacji komputerowych. Przeprowadzone symulacje komputerowe pracy kotła OP-430 pozwoliły na wyznaczenie i odczytanie powstających podczas procesu spalania produktów spalania w zakresie pracy kotła od minimum technicznego (60%) do obciążenia nominalnego (100%), ze skokiem 5% obciążenia. Odczytane z modelowania dane posłużyły do opracowania charakterystyki emisji tlenków siarki na wylocie z komory paleniskowej w funkcji wydajności kotła.

Kolejnym krokiem była analiza pracy pomp cyrkulacyjnych pod kątem zużycia energii elektrycznej. Zabudowana w PGE Energia Ciepła S.A. Oddział nr 1 w Krakowie instalacja mokrego odsiarczania spalin dysponuje czterema poziomami zraszania. Na każdy z poziomów pracuje dedykowana pompa cyrkulacyjna dostarczająca taką samą ilość zawiesiny. Rozwiązanie to skutkuje różnymi wartościami zużycia energii elektrycznej sprawiając, że najkorzystniejszą pod kątem ekonomicznym, konfiguracją jest praca najniższych poziomów zraszania.

Następnie z archiwalnych danych pracy pomp cyrkulacyjnych odczytano dla każdej możliwej konfiguracji pracy pomp, maksymalną wartość ładunku tlenków siarki na wlocie do absorbera instalacji IMOS przy jednoczesnym zachowaniu norm emisji na wylocie z instalacji. Przyjętą wartością dla której nastąpił odczyt była emisja SO_2 na poziomie 199 mg/h (wartość dopuszczalna wynosi 200 mg/h). Po skorelowaniu możliwości absorpcji ładunku SO_2 ze zużyciem energii elektrycznej dla wszystkich przypadków, opracowano zestawienie pozwalające na dobór optymalnej konfiguracji pomp, przy znajomości ładunku tlenków siarki na wlocie do instalacji.

Korzystając z powyższego algorytmu, jesteśmy w stanie już na etapie planowania pracy bloków energetycznych, wskazać optymalną pracę pomp cyrkulacyjnych, czego skutkiem będzie redukcja kosztów eksploatacyjnych. Tym samym udowodniona została teza nr 1.

Połączenie zastosowanych w pracy doktorskiej narzędzi w ramach wspólnej metodologii skutkować będzie opracowaniem kompleksowego narzędzia do planowania najkorzystniejszego wariantu pracy instalacji mokrego odsiarczania spalin. Jest to niezwykle ważne z uwagi na opłacalność funkcjonowania elektrowni konwencjonalnych, dla których wymagana jest praca przy zmiennym obciążeniu ze względu na coraz większy udział odnawialnych źródeł energii w krajowym systemie elektroenergetycznym.

Zaprezentowany w niniejszej pracy doktorskiej model matematyczny komory paleniskowej, umożliwia precyzyjne wyznaczanie stężeń wszystkich szkodliwych substancji, co stanowi solidną podstawę do rozwoju zintegrowanych systemów oczyszczania spalin w oparciu o symulacje komputerowe. Model komory paleniskowej oferuje nie tylko możliwość identyfikacji kluczowych parametrów wpływających na emisję szkodliwych substancji, ale również pozwala na optymalizację procesów spalania pod kątem minimalizacji emisji. Dzięki temu, metodologia zaproponowana w pracy może być rozbudowana o narzędzia do kompleksowego planowania i zarządzania całym systemem oczyszczania spalin, co otwiera nowe perspektywy dla efektywnego ograniczania negatywnego wpływu elektrowni na środowisko. Opracowany model, uzyskane i zwalidowane wyniki oraz przedstawione analizy potwierdzają słuszność postawionej tezy nr 2.

Implementacja tego modelu umożliwi również dokładne prognozowanie zapotrzebowania na sorbenty w procesie oczyszczania spalin ze względu na znajomość poziomu emisji SO_2 z symulacji komputerowych, co jest kluczowe dla efektywnego zarządzania zasobami i optymalizacji kosztów operacyjnych. Zastosowanie opracowanego rozwiązania pozwoli przewidywać czas pracy poszczególnych pomp cyrkulacyjnych IMOS, dzięki temu możliwe będzie zaplanowanie remontów bieżących i kapitalnych pomp.

Warto również podkreślić, że rozbudowa zaprezentowanej metody o aspekty związane z zarządzaniem całym systemem oczyszczania spalin może znacząco przyczynić się do poprawy efektywności energetycznej oraz redukcji śladu węglowego elektrowni. Dalsze badania i rozwój modelu mogą również prowadzić do opracowania zaleceń dotyczących projektowania nowych, bardziej efektywnych technologii oczyszczania spalin, co stanowiłoby istotny wkład w dziedzinie ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju energetyki.

Podsumowując, prezentowane wyniki pracy doktorskiej ukazują szerokie spektrum możliwości wykorzystania opracowanego modelu matematycznego komory paleniskowej, począwszy od aspektów technicznych związanych z optymalizacją procesów spalania, po strategiczne aspekty zarządzania eksploatacją systemu oczyszczania spalin. Rozbudowa tej metody może przynieść znaczące korzyści dla praktyki inżynierskiej, a także dla środowiska naturalnego oraz korzyści ekonomiczne.

14. Bibliografia

- [1] Bilde, K.G., Sørensen, K., Condra, T. „Mathematical model of natural circulation biomass boilers during start-up” (2019) *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 143, art. no. 118477
- [2] Wang, D., Zhou, Y., Li, X. „A dynamic model used for controller design for fast cut back of coal-fired boiler-turbine plant” (2018) *Energy*, 144, pp. 526-534
- [3] Oko, E., Wang, M. „Dynamic modelling, validation and analysis of coal-fired subcritical power plant” (2014) *Fuel*, 135, pp. 292-300.
- [4] Chapela, S., Cid, N., Porteiro, J., Míguez, J.L. „Numerical transient modelling of the fouling phenomena and its influence on thermal performance in a low-scale biomass shell boiler” (2020) *Renewable Energy*, 161, pp. 309-318
- [5] Huttunen, M., Peltola, J., Kallio, S., Karvonen, L., Niemi, T., Ylä-Outinen, V. „Analysis of the processes in fluidized bed boiler furnaces during load changes” (2017) *Energy Procedia*, 120, pp. 580-587.
- [6] Haaf, M., Peters, J., Hilz, J., Unger, A., Ströhle, J., Epple, B. „Combustion of solid recovered fuels within the calcium looping process – Experimental demonstration at 1 MWth scale” (2020) *Experimental Thermal and Fluid Science*, 113, art. no. 110023.
- [7] Hilz, J., Helbig, M., Haaf, M., Daikeler, A., Ströhle, J., Epple, B. „Investigation of the fuel influence on the carbonate looping process in 1 MWth scale” (2018) *Fuel Processing Technology*, 169, pp. 170-177.
- [8] Zheng, Z., Yang, W., Yu, P., Cai, Y., Zhou, H., Boon, S.K., Subbaiah, P. „Simulating growth of ash deposit in boiler heat exchanger tube based on CFD dynamic mesh technique” (2020) *Fuel*, 259, art. no. 116083.
- [9] Chapela, S., Porteiro, J., Gómez, M.A., Patiño, D., Míguez, J.L. „Comprehensive CFD modeling of the ash deposition in a biomass packed bed burner” (2018) *Fuel*, 234, pp. 1099-1122.
- [10] Taler, J., Weglowski, B., Taler, D., Sobota, T., Dzierwa, P., Trojan, M., Madejski, P., (...), Pilarczyk, M. „Determination of start-up curves for a boiler with natural circulation based on the analysis of stress distribution in critical pressure components” (2015) *Energy*, Part 1 92, pp. 153-159.
- [11] Deng, K., Yang, C., Chen, H., Zhou, N., Huang, S. „Start-Up and dynamic processes simulation of supercritical once-through boiler” (2017) *Applied Thermal Engineering*, 115, pp. 937-946.
- [12] Madejski, P. „Numerical study of a large-scale pulverized coal-fired boiler operation using CFD modeling based on the probability density function method” (2018) *Applied Thermal Engineering*, 145, pp. 352-363.

- [13] Gómez, M.A., Porteiro, J., Patiño, D., Míguez, J.L. Eulerian „CFD modelling for biomass combustion. Transient simulation of an underfeed pellet boiler” (2015) *Energy Conversion and Management*, 101, pp. 666-680.
- [14] Laubscher, R., van der Merwe, S. „Heat transfer modelling of semi-suspension biomass fired industrial watertube boiler at full- and part-load using CFD” (2021) *Thermal Science and Engineering Progress*, 25, art. no. 100969.
- [15] Strona www.pse.pl
- [16] Z. Wang et al. „Flexibility and efficiency co-enhancement of thermal power plant by control strategy improvement considering time varying and detailed boiler heat storage characteristics” *Energy* (2021)
- [17] P.U. Sunil et al. „Mathematical modeling, simulation and validation of a boiler drum: some investigations” *Energy* (2017)
- [18] Strona <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/large-combustion-plants-0>
- [19] Jonghun Lim Hyungtae Cho Junghwan Kim „Optimization of wet flue gas desulfurization system using recycled waste oyster shell as high-grade limestone substitutes” *Journal of Cleaner Production* 30 July 2021
- [20] Zhongyang Zhao Haidong Fan Xiang Gao „Hybrid modeling and operating optimization method of oxidation process of wet flue gas desulfurization (WFGD) system” *Chemical Engineering Research and Design* September 2022
- [21] Mingchen Qin Yong Dong Chunyuan Ma „Pilot-scale experiment and simulation optimization of dual-loop wet flue gas desulfurization spray scrubbers” *Chemical Engineering Research and Design* August 2019
- [22] Haiyun Zhang Zhoutai Shang Wenyi Tan „Electrocoagulation Treatment of Wet Flue-Gas Desulfurization Wastewater Using Iron-Based Electrodes: Influence of Operating Parameters and Optimization” *International Journal of Electrochemical Science* March 2019
- [23] Yi Zhong Xiang Gao Ke-fa Cen „A model for performance optimization of wet flue gas desulfurization systems of power plants” *Fuel Processing Technology* November 2008
- [24] Qiyao Wang Heng Zhao Jicang Gu „Prediction of SO₂ emission concentration in industrial flue gas based on deep learning: The ammonia desulfurization system of the Yunnan aluminum carbon plant as the research object” *Process Safety and Environmental Protection* 12 March 2024
- [25] Jing-yang Chang Meng Liu Tao Li „Preparation of high-reactivity Ca-based SO₂ adsorbent and experimental study for simulated flue gas dry desulfurization” *Energy Reports* April 2023

- [26] Jianguan Qu Nana Qi Lifeng Li „Mass transfer process intensification for SO₂ absorption in a commercial-scale wet flue gas desulfurization scrubber” Chemical Engineering and Processing - Process Intensification May 2021
- [27] Zhongyang Zhao Yongxin Zhang Xiang Gao „Simulation of SO₂ absorption and performance enhancement of wet flue gas desulfurization system” Process Safety and Environmental Protection April 2021
- [28] Tiejue Qi Jingzhao Zhang Lidong Wang „Facilitating calcium sulfite oxidation during flue-gas desulfurization for efficient sulfur utilization using a robust MnTiO₃ perovskite” Applied Surface Science November 2023
- [29] Vibhav Dabadghao Lorenz T. Biegler Debangsu Bhattacharyya „Multiscale modeling and nonlinear model predictive control for flue gas desulfurization” Chemical Engineering Science February 2022
- [30] Chang Yuan Siqian Su Zuwu Wang „Effect of wet flue gas desulfurization on the concentrations and component profiles of condensable particulate matter from ultralow emission coal-fired power plants” Atmospheric Pollution Research March 2022
- [31] Hongfang An Lingling Wang Dewen Kong „Multi-objective optimization of properties on polymer fiber-reinforced desulfurization gypsum-based composite cementitious materials” Construction and Building Materials February 2023
- [32] B. Li et al. „DBSSP - a computer program for simulation of controlled circulation boiler and natural circulation boiler start up behavior” Energy Convers Manag (2005)
- [33] H. Fan et al. „A dynamic mathematical model for once-through boiler-turbine units with superheated steam temperature” Appl Therm Eng (2020)
- [34] D. Wang et al. „A dynamic model used for controller design for fast cut back of coal-fired boiler-turbine plant” Energy (2018)
- [35] Zima W., Grądziel S., Cebula A., Rerak M., Kozak-Jagięła E., Pilarczyk M., „Mathematical model of a power boiler operation under rapid thermal load changes” Energy (2023)
- [36] G. Hou et al. „Application of fast adaptive moth-flame optimization in flexible operation modeling for supercritical unit” Energy (2022)
- [37] Yi Zhao, Xueyou Wen, Tianxiang Guo, Junhui Zhou „Desulfurization and denitrogenation from flue gas using Fenton reagent” Fuel Processing Technology Volume 128, December 2014, Pages 54-60
- [38] Jianguan Q., Nana Q. Kai Z., „CFD modeling for NO_x absorption accompanying with SO₂ in wet flue gas desulfurization scrubber based on gas-phase ozone oxidation” Process Safety and Environmental Protection Volume 159, March 2022, Pages 685-697

- [39] Hengfei Z., Jingqi Y., „Online application oriented dynamic modeling for the flue gas desulfurization tower in coal-fired power plants” Process Safety and Environmental Protection Volume 159, March 2022, Pages 698-707
- [40] Trojan M., „Modeling of a steam boiler operation using the boiler nonlinear mathematical model”, Energy 175 (2019), pp. 1194-1208, DOI: 10.1016/j.energy.2019.03.160
- [41] Trojan M., Taler D., Dzierwa P., Taler J., Kaczmarski K., Wrona J., “The use of pressure hot water storage tanks to improve the energy flexibility of the steam power unit”, Energy 173 (2019), pp. 926-936, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.059>