

# Badania eksperymentalne i symulacje numeryczne w celu wyrównania rozptyłu spalin i popiołu lotnego w kanałach spalin kotła BB-1345 w Elektrowni Pątnów II

Experimental tests and numerical simulations to even out the flue gas and fly ash distribution in the flue channels of the BB-1345 boiler in the Pątnów II Power Plant

ROBERT LEWTAK, BEATA GLOT, BARTOSZ ŚWIĄTKOWSKI, PAWEŁ KUDŁA

DOI 10.36119/15.2023.2.2

Celem pracy było zdiagnozowanie przyczyn nierównomierności rozptyłu spalin i popiołu lotnego w kanałach spalin elektrofiltra kotła BB-1345 w Elektrowni Pątnów II oraz przedstawienie sposobu rozwiązania ww. problemu. Prace rozpoczęto od serii pomiarów prowadzonych w kanałach spalin nad i pod obrotowym podgrzewaczem powietrza (OPP) od strony przedniej i tylnej kotła. Celem pomiarów było wyznaczenie rozkładu temperatury, prędkości i ciśnienia względnego spalin oraz koncentracji popiołu lotnego w wybranych punktach. Następnie sporządzono modele geometryczne kanałów spalin wraz z OPP dla stanu aktualnego oraz proponowanych koncepcji zmian. Geometria została wykonana na podstawie dokumentacji technicznej udostępnionej przez operatora elektrowni i uwzględniała kanały i OPP od strony przepływających spalin bez izolacji. Obliczenia numeryczne wykonano za pomocą programu Ansys FLUENT i przeprowadzono dla stanu aktualnego oraz zaproponowanych koncepcji zmian.

Obliczenia stanu aktualnego wykonano dla dwóch wariantów, tj. wariant bez uwzględnienia dossania powietrza do spalin oraz wariant z uwzględnieniem dossania powietrza do spalin. Uwzględnienie dossania powietrza spowodowało uzyskanie zbieżnej z pomiarami nierównomierności rozdziału pyłu na stronę lewą i prawą. Przepływ powietrza dossanego powodował przepychanie pyłu w kierunku przegrody tylnej OPP zbierającej pył do prawego kanału spalin. Efekt przepychania pyłu był szczególnie widoczny dla dossania nad wirnikiem OPP, ze względu na wystąpienie efektu „ślizgania się” powietrza po górnej stronie wirnika OPP. Natomiast powietrze wypyływające z dossania pod OPP było kierowane w mniejszym stopniu w głąb kanału spalin i nie mając fizycznej przeszkody w postaci wirnika w większości przepływało do dołu. Uwzględnienie dossania powietrza do spalin okazało się kluczowe w celu poprawnego zamodelowania rzeczywistych warunków rozdziału spalin i pyłu do prawego i lewego kanału pod OPP. Na podstawie symulacji stanu istniejącego określono przyczynę zaburzeń przepływu oraz określono rekomendowaną do zabudowy w kanałach spalin koncepcję zmian powodującą równomierny rozkład spalin. Podczas analiz zmodyfikowanego układu opracowano cztery koncepcje zmian elementów kierujących spaliną w przestrzeni pod OPP w celu wyrównania rozptyłu spalin. W rezultacie wybrano koncepcję, która polegała na zabudowie pionowej przegrody dzielącej kanał spalin pod OPP na stronę prawą i lewą. Biorąc pod uwagę, że obliczenia numeryczne pokazały gromadzenie się pyłu przy tylnej ścianie, wybrana koncepcja została dodatkowo zmodyfikowana o elementy nastawne, regulujące strumień pyłu i gazu. W końcowym etapie pracy wykonano wstępny projekt konstrukcyjny wybranego wariantu modernizacji.

*Słowa kluczowe: obrotowy podgrzewacz powietrza, kocioł, kanały spalin, symulacje numeryczne*

The purpose of the work was to diagnose the causes of uneven flow of flue gas and fly ash in the flue gas ducts of the BB-1345 boiler electrostatic precipitator in the Pątnów II Power Plant and to present a method of solving the above-mentioned problem. Work began with a series of measurements carried out in the flue gas ducts above and below the rotary air heater (RAH) from the front and rear sides of the boiler. The aim of the measurements was to determine the distribution of temperature, velocity and relative pressure of the exhaust gas as well as the concentration of fly dust at selected points. Then, geometrical models of the flue gas channels were prepared together with the RAH for the current state and the proposed concepts of changes. The geometry was made on the basis of the technical documentation provided by the power plant operator and took into account the ducts and RAH on the side of flowing flue gases without insulation. Numerical calculations were made using the Ansys FLUENT software and were carried out for the current state and the proposed concepts of changes.

dr inż. Robert Lewtak, <https://orcid.org/0000-0002-9797-5562>, mgr inż. Beata Glot, <https://orcid.org/0000-0002-1547-2575>,  
dr inż. Bartosz Świątkowski, <https://orcid.org/0000-0002-4339-3436> – Instytut Energetyki, Zakład Procesów Ciepłych, Warszawa  
mgr inż. Paweł Kudła, <https://orcid.org/0000-0002-0568-083X> – ZE PAK SA, Konin. Adres do korespondencji/ Corresponding author:  
kontakt e-mail: robert.lewtak@ien.com.pl

The calculations of the current state were made for two variants, i.e. the variant without taking into account air intake to the exhaust gases and the variant taking into account the intake of air into the exhaust gases. Taking into account the air suction resulted in obtaining a dust distribution on the left and right side convergent with the measurements. The suction air flow was pushing the dust towards the rear RAH cradle collecting the dust to the right exhaust duct. The dust-pushing effect was especially visible for the suction over the RAH rotor, due to the air "sliding" effect on the upper side of the RAH rotor. On the other hand, the air flowing from the suction under the RAH was directed to a lesser extent into the exhaust gas channel and, having no physical obstacle in the form of a rotor, mostly flowed downwards. Taking into account the air suction to the exhaust gases turned out to be of key importance in order to correctly model the actual conditions of the exhaust and dust separation into the right and left channels under the RAH. On the basis of the simulation of the existing state, the cause of the flow disturbances was determined and the concept of changes recommended for installation on the exhaust gas ducts was determined, resulting in a uniform distribution of exhaust gases.

During the analyzes of the modified system, four concepts of changes in the elements directing the exhaust gases in the space under the RAH in order to equalize the flow of exhaust gases were developed. As a result, a concept was selected that consisted in the installation of a vertical partition dividing the exhaust duct under the RAH into the right and left sides. Taking into account that the numerical calculations showed the accumulation of dust at the rear wall, the selected concept was further modified with adjustable elements regulating the dust and gas stream. In the final stage of work, a preliminary structural design of the selected modernization variant was prepared.

**Keywords:** rotary air heater, boiler, flue gas ducts, numerical simulations

## Wstęp

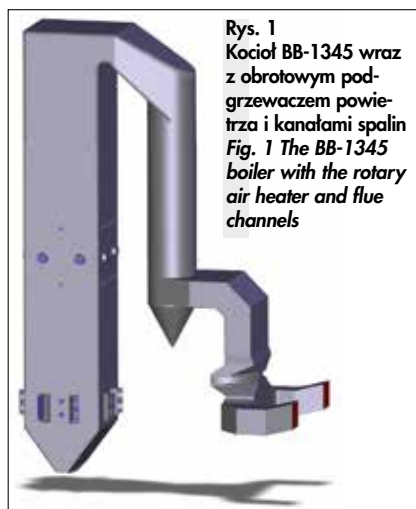
Przedmiotem analiz jest kocioł BB-1345, pracujący w Elektrowni Pątnów II, współpracujący z obrotowy podgrzewaczem powietrza przedstawiony schematycznie na rys. 1.

Kocioł BB-1345 jest kotłem wieżowym całkowicie opromieniowanym, przepływowym typu Bensona na nadkrytyczne parametry pary, opalany pyłem węgla brunatnego w podciśnieniowej komorze paleniskowej, z przegrzewem międzystopniowym przeznaczonym do pracy blokowej z turbiną kondensacyjną o mocy 464 MW. W kotle są rozmieszczone trzy stopnie przegrzewacza pary świeżej, dwa stopnie przegrzewacza pary wtórnej, parownik i podgrzewacz wody zasilającej.

Podstawowe parametry pracy kotła:

- maksymalna wydajność trwała (WMT): 1345 t/h,
- moc cieplna (obciążenie WTT, węgiel gwarancyjny): 992 MW,
- temperatura pary świeżej: 544°C,
- ciśnienie pary świeżej 26,6 MPa,
- temperatura pary wtórnej (wlot/wylot): 308/568°C,
- ciśnienie pary wtórnej: 5,15 MPa,
- temperatura wody zasilającej: 273°C,
- sprawność: 90,2 %.

Do współpracy z kotłem BB-1345 zastosowano jeden obrotowy regeneracyjny podgrzewacz powietrza typu Ljungström. Wymianę ciepła, tj. podgrzanie powietrza dostarczanego do kotła ciepłem uchodzących spalin, zapewnia powolny ruch obrotowy wirnika, w którym umieszczone blachy grzejne nagrzewają się kolejno w strumieniu spalin i ochładzają w strumieniu powietrza. OPP typu D34/1700 posiada obudowę podzieloną na dwa sektory: powietrza



Rys. 1  
Kocioł BB-1345 wraz z obrotowym podgrzewaczem powietrza i kanałami spalin  
Fig. 1 The BB-1345 boiler with the rotary air heater and flue channels

i spalin na wlocie i wylocie, które są oddzielone od siebie skrzydłami promieniowymi po stronie gorącego i zimnego końca.

Podczas eksploatacji kotła zdiagnozowano problem nierównomierności rozptyłu spalin i popiołu lotnego między prawą a lewą stroną elektrofiltra. Nierównomierne obciążenie sekcji elektrofiltrów wpływało na ich całkowitą skuteczność odpylania oraz zwiększało częstość usuwania zebranego popiołu spod jednej strony elektrofiltra.

W celu rozwiązania ww. problemu przebudowano instalację odbioru pyłu, aby zoptymalizować jego odbiór. Dodatkowo zdecydowano o przeprowadzeniu pomiarów oraz obliczeń sprawdzających w celu zdiagnozowania przyczyny i miejsca powstawania nierównomierności w przepływie spalin.

Wykonane przez Instytut Energetyki pomiary przepływu spalin i koncentracji popiołu lotnego wykazały, że problem dotyczy obszaru pod OPP, stąd niezbędne powinno być jedynie przebudowanie elementów kierujących znajdujących się pod

OPP. Na podstawie wyników numerycznych zaproponowano elektrowni koncepcję przebudowy kierownic w kanałach spalin.

## Pomiary rozptyłu spalin i popiołu lotnego

Celem przeprowadzonych pomiarów było wyznaczenie rozkładu temperatury, prędkości i ciśnienia względnego spalin oraz koncentracji pyłu lotnego w wybranych punktach w kanałach nad i pod OPP od strony przedniej i tylnej kanału spalin. Podczas pomiarów pobierano także próbki węgla podawanego do kotła oraz próbki pyłu lotnego z kanałów spalin.

W ramach niniejszej pracy konieczne było określenie rozkładu prędkości spalin oraz strumienia transportowanego pyłu w przekrojach kanałów spalin przed i za obrotowym podgrzewaczem powietrza (OPP). Standardowa aparatura pomiarowa przeznaczona do pomiaru ilości pyłu w spalinach jest przeznaczona do pracy w temperaturze do około 150°C, natomiast przed OPP spodziewano się temperatur około 350 – 400°C, czyli znacznie wyższych, niż dopuszczalne dla dostępnej rynkowo aparatury pomiarowej. Z tego powodu w Instytucie Energetyki zaprojektowano, a następnie wykonano własny układ pomiarowy, dostosowany do warunków panujących w badanym obiekcie. Zaprojektowano oraz wykonano zintegrowane w jednym korpusie sondy pomiarowe, pełniące następujące funkcje:

- pomiar prędkości spalin – ze względu na konieczność zmieszczenia się w istniejących króćcach z gwintem wewnętrznym M64x4 zdecydowano się na wykonanie sond do pomiaru różnicy ciśnienia całkowitego i statycznego

(a po przeliczeniu – prędkości spalin) w postaci sondy Prandtla typu „S”, która charakteryzuje się zdecydowanie mniejszym wymiarem poprzecznym w stosunku do klasycznej sondy Prandtla typu „L” (rys 2a);

- pomiar temperatury spalin (wartość wskazań temperatury jest uwzględniana przy wyznaczaniu prędkości spalin na podstawie różnicy ciśnień sondy z punktu a) – termopara typu „K” (rys 2b);
- sonda do poboru spalin z popiołem lotnym (rys 2c) z zamontowanym na jej zewnętrznym końcu układem filtracji separującym popiół lotny; zamontowanie układu filtracji bezpośrednio na sondzie minimalizuje ryzyko zbyt szybkiego wykrapalania się pary wodnej ze spalin w miejscu filtracji, co z jednej strony wpływałoby na pomiar masy odseparowanego pyłu, a z drugiej mogło skutkować osadzaniem pyłu na wilgotnych powierzchniach toru pomiarowego przed punktem separacji pyłu. Ze względu na dostępność miejsca w okolicach króćców pomiarowych, wykonano sondy o dwóch długościach: 3,20 oraz 2,70 m.

Spaliny za układem separacji pyłu były transportowane węzłem stalowym odpornym na wysokie temperatury do układu chłodzenia ze zintegrowaną zwężką Venturiego, służącą do pomiaru prędkości zasysania spalin z kanału. Pobór spalin przez sondę był wymuszany przez czterostopniową pompę próżniową działającą na zasadzie strumienicy zasilanej sprężonym powietrzem. Za pomocą zaworu regulacyjnego, zamontowanego na układzie sprężonego powietrza zasilającego strumienicę, regulowano podciśnienie generowane przez pompę próżniową, a co za tym idzie sterowano w ten sposób prędkością zasysania.

Przewody impulsowe do pomiaru różnicy ciśnień na sondzie Prandtla (zintegrowa-



**Rys. 2**  
Końcówka zintegrowanej sondy konstrukcji Instytutu Energetyki: a) sonda Prandtla typu „S”; b) termopara typu „K”; c) sonda do odsysania spalin z popiołem lotnym  
**Fig. 2** The tip of the integrated probe of the Institute of Power Engineering construction: a) the Prandtl probe of type „S”, b) the „K” type thermocouple, c) the flue gas suction probe with fly ash

nej z sondą do pobierania pyłu) oraz na zwężce Venturiego (zamontowanej przy chłodnicy na torze zasysanych spalin), a także sygnały z termopar mierzących temperaturę spalin w kanale spalin (zintegrowanej z sondą do pobierania pyłu) oraz temperaturę na zwężce Venturiego były zbierane w centralnym systemie kontrolno-pomiarowym, który następnie (w sposób automatyczny) dobierał nastawy zaworu regulacyjnego na powietrzu sprężonym zasilającym strumienicę, aby uzyskać prędkości zasysania spalin równą prędkości spalin w miejscu zasysania (w kanale spalin), tj. zasysać spaliny z popiołem lotnym w sposób izokinetyczny.

Pomiary wykonano w kanale spalin nad i pod obrotowym podgrzewaczem powietrza od strony przedniej i tylnej kotła. Pomiary dokonywano w siatce, w każdym dostępnym króćcu wsuwając sondę w głąb kanału co 0,50 metra: na głębo-

kość maksymalnie 2,5 metra dla króćców, gdzie była możliwość wsunięcia sondy dłuższej oraz 2,0 metra dla króćców, gdzie ze względu na dostępne miejsce oraz kolizję z istniejącymi obiektami (słupy, ściany) mieściła się tylko sonda krótsza.

Poniżej przedstawiono tabele z wynikami przeprowadzonych pomiarów w obiekcie.

Tabele 1 i 2 przedstawiają prędkości spalin nad i pod OPP, a tabele 3 i 4 przedstawiają koncentrację popiołu nad i pod OPP.

Na podstawie analizy wyników pomiarów jednoznacznie stwierdzono, że przyczyna nierównomiernego rozdziału pyłu między kanał lewy i prawy kierujący spaliną do EF nie leży po stronie nierównomiernego napływu mieszaniny pyłowo-gazowej na wirnik OPP. Odcinek kanału spalin napływowy na OPP jest na tyle długi, że nawet przy braku kierownic na kolanie

**Tabela 1. Prędkość spalin nad OPP w warunkach rzeczywistych**  
**Table 1. Flue gas velocity above the rotary air heater at the real condition flow**

		Prędkość gazu, m/s							
		numeracja króćców							
		1	2	3	4	5	6	7	8
tył	1	15.98	19.31	20.58	18.20	17.11	18.51	18.31	16.69
	2	15.29	17.60	17.28	15.66	16.53	15.10	15.43	16.97
	3	13.60	16.64	15.62	13.62	15.08	12.56	13.68	10.44
	4	12.32	13.86	13.68	12.78	13.55	11.84	12.65	14.35
	5	11.00	12.65	12.27	14.66	15.40	12.51	11.07	11.72
	6	9.84	12.10	12.33	16.84	17.48	13.60	10.07	10.52
	7	9.05	13.02	14.09	18.54	19.11	14.64	10.17	7.44
	8	8.66	14.35	16.90	19.16	19.22	15.41	11.60	8.07
	9	10.08	16.56	18.99	19.13	18.62	16.55	14.48	8.51
	10	11.11	18.23	19.62	19.38	18.33	17.60	16.87	9.96
	11	10.31	18.68	19.81	17.88	16.37	17.02	17.68	9.72

**Tabela 2. Prędkość spalin pod OPP w warunkach rzeczywistych**  
**Table 2. Flue gas velocity under the rotary air heater at the real condition flow**

		Prędkość gazu, m/s							
		numeracja króćców							
		1	2	3	4	5	6	7	8
tył	1	-5.22	-3.84	2.24	8.70	12.55	12.01	16.06	17.54
	2	-3.92	1.36	5.90	10.29	14.21	15.86	20.17	20.58
	3	2.13	4.91	7.60	10.61	13.96	17.56	21.62	22.15
	4	5.58	7.47	9.32	11.77	15.84	20.87	28.80	29.54
	5	6.46	8.86	10.15	12.92	16.61	22.15	29.54	30.46
	6	13.55	11.80	10.86	10.90	11.41	16.36	20.77	20.94
	7	20.65	14.73	11.57	8.88	6.20	10.58	12.01	11.42
	8	19.60	14.61	11.69	9.77	7.85	11.53	13.96	15.75
	9	20.46	14.39	11.83	9.97	8.10	10.73	9.66	15.01
	10	24.08	14.61	16.17	12.42	8.68	7.19	4.35	6.14
	11	27.67	14.44	13.61	11.48	9.35	-3.91	-7.78	-3.89

**Tabela 3. Koncentracja popiołu nad OPP**  
**Table 3. Ash concentration above the rotary air heater**

		Koncentracja popiołu, g/m <sup>3</sup>							
		numeracja króćców							
		1	2	3	4	5	6	7	8
tył	1	38.13	20.49	25.22	19.53	30.37	16.27	19.90	29.24
	2	30.23	17.42	15.19	13.43	19.82	9.59	14.27	26.03
	3	21.15	15.25	8.18	8.73	9.38	4.93	10.44	13.74
	4	24.88	12.83	5.94	9.35	11.83	6.80	7.58	11.91
	5	15.35	16.88	14.61	19.60	17.14	11.89	9.62	9.79
	6	10.58	18.94	18.97	24.75	19.80	14.44	10.64	8.74
	7	5.81	21.02	23.34	29.92	22.47	16.99	11.65	7.69
	8	7.85	21.52	30.56	25.84	26.83	21.62	16.36	8.08
	9	11.82	22.95	37.19	20.73	30.10	27.25	24.28	8.24
	10	16.22	28.19	41.83	25.47	32.34	28.78	25.42	9.30
	11	18.04	31.90	45.67	27.63	31.28	27.65	23.64	8.74

**Tabela 4. Koncentracja popiołu pod OPP**  
**Table 4. Ash concentration under the rotary air heater**

		KONCENTRACJA POPIOŁU, g/m <sup>3</sup>							
		strona lewa				strona prawa			
		numeracja króćców							
		1	2	3	4	5	6	7	8
tył	1	0.00	0.00	1.24	4.17	18.57	7.40	18.18	22.39
	2	0.00	0.47	2.87	5.79	20.91	11.08	38.10	41.64
	3	0.82	1.29	2.95	7.98	20.40	13.66	56.86	60.43
	4	3.22	3.30	3.62	5.56	20.66	15.99	81.70	93.90
	5	4.22	3.39	3.09	7.94	24.44	18.97	101.46	122.50
	6	8.83	6.54	13.21	11.13	15.97	11.90	52.16	63.02
	7	13.40	9.66	23.32	14.34	7.43	4.80	2.92	3.91
	8	26.35	11.02	22.35	13.58	6.64	4.51	2.58	5.25
	9	41.27	12.27	21.38	11.61	3.96	3.53	1.23	4.86
	10	31.21	15.80	21.77	11.40	4.00	2.21	0.65	1.60
	11	16.69	18.80	12.14	7.71	4.06	0.00	0.00	0.00
przód									

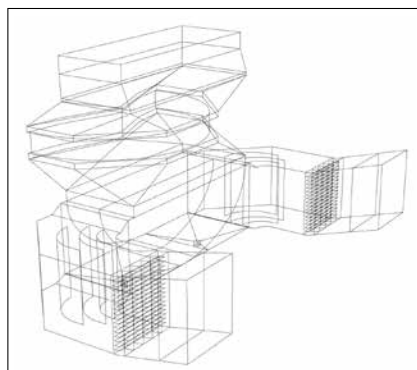
(poziom 45 m) rozkład prędkości i koncentracji pyłu przed OPP jest względnie wyrównany, a przynajmniej nie występuje wyraźne skoncentrowanie mieszaniny pyłowo-gazowej w tylnej części kanału, co mogłoby przenosić się pod OPP i dalej tylną przegrodą zasilać kanał prawy. Analizując wyniki pomiarów przed OPP można stwierdzić, że mieszanina ta koncentruje się nawet bardziej w tylnej części kanału. Przyczyną ww. nierównomierności nie jest również sam ruch wirowy OPP, który jest zbyt wolny w stosunku do prędkości gazu przepływającego przez pakiety OPP.

**Symulacje numeryczne przepływu spalin dla istniejącego układu w celu określenia przyczyn zaburzeń przepływu**

Rysunek 3 przedstawia model geometryczny kanałów spalin i OPP wykonany w celu przeprowadzenia obliczeń przepływu spalin i popiołu lotnego. Model geometryczny został wykonany na podstawie dostępnej dokumentacji technicznej i uwzględnienia kanały i OPP od strony przepływających spalin bez izolacji. W modelu geometrycznym kanałów spalin i OPP zostały uwzględnione wszystkie najważniejsze elementy, które bezpośrednio kształtują aerodynamikę przepływu spalin i popiołu lotnego. Model geometryczny uwzględnia:

- wlot spalin i popiołu lotnego na poziomie 33 m, tj. na poziomie, na którym były wykonywane pomiary przed OPP,
- kanały przed i za OPP,
- wirnik OPP po stronie spalin wraz z dostaniem powietrza do spalin,
- kierownice (tzw. kołyski lub tyżwy) wraz ze ścianką wewnętrzną,
- 2 leje popiołowe pod OPP,
- po 3 kierownice główne w prawym i lewym kanale,
- zespół kierownic w prawym i lewym kanale w napływie przed elektrofiltrami.

Całkowita objętość modelu obliczeniowego kanałów spalin i OPP, która wynosiła 3092 m<sup>3</sup>, została podzielona na 6,57 milio-



**Rys. 3**  
**Model geometryczny obszaru obliczeniowego dla istniejącego OPP**  
**Fig. 3 Geometry of the computational domain for the existing configuration of the rotary air heater**

na komórek obliczeniowych, dając w rezultacie średnią wielkość pojedynczej komórki obliczeniowej (sześciian) o boku 7,78 cm.

Modelowanie numeryczne przepływu spalin i pyłu lotnego, przeprowadzone z zastosowaniem komercyjnego programu Ansys Fluent, zostało oparte o dane zebrane podczas pomiarów.

Niezbędnym elementem modelowania numerycznego, umożliwiającym przeprowadzenie symulacji numerycznej, jest etap opracowania warunków brzegowych, tj. przyjęcia do obliczeń odpowiednich warunków dla rozważanych wielkości fizycznych, które opisują zachodzące w kanałach procesy ciepło-przepływowe. Zależnie od rodzaju powierzchni brzegowej (ścianka sztywna lub ruchoma, wlot, wylot) i wielkości fizycznej (prędkość, temperatura, entalpia, stężenie składników gazowych, intensywność radiacji, itd.), odpowiednimi warunkami brzegowymi są wartości tych parametrów lub wartości ich pierwszych pochodnych na danej powierzchni. W rozważanym zagadnieniu wyróżniono następujące powierzchnie i obszary, dla których zadano odpowiednie warunki brzegowe:

- wlot na poziomie 33 m, będący wlotem mieszaniny spalin i pyłu lotnego, na którym są zadawane: prędkość i temperatura spalin, strumień masowy pyłu lotnego i jego uziarnienie,

- wirnik OPP będący objętością, w której następuje schłodzenie spalin z jednoczesnym obrotem wirnika wokół osi,
- kierownice kształtujące przepływ, w postaci ścianek sztywnych,
- wylot spalin, gdzie przyjmuje się warunki przepływu ustalonego ze znaną wartością ciśnienia.

W modelu numerycznym przepływu spalin przyjęto następujące założenia:

- przepływ spalin w kanałach i wirniku jest trójwymiarowym, stacjonarnym, nieściśliwym, turbulentnym przepływem płynu lepkiego zadany jako gaz zastępczy o średniej masie molowej 28 kg/kmol wyznaczonej na podstawie składu spalin O<sub>2</sub> = 1,70%, CO<sub>2</sub> = 13,7%, N<sub>2</sub> = 61,8%, H<sub>2</sub>O = 22,7%
- proces wymiany ciepła zachodzi przez konwekcję między ośrodkiem gazowym (spalinami), cząstkami popiołu lotnego i powierzchniami ogrzewalnymi wirnika OPP,
- uziarnienie pyłu lotnego jest określone przez rozkład Rosina-Rammlera z parametrami d<sub>s</sub> = 199 μm i n = 1,95.

Tabela 5 przedstawia parametry procesowe pracy zadane na potrzeby obliczeń numerycznych.

**Tabela 5 Parametry procesowe**  
**Table 5. Process parameters**

lp.	parametr	jednostka	wartość
1	ilość spalin	tys.m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h	2340
2	temperatura spalin	°C	345
3	ilość pyłu	kg/s	12.0
4	moc OPP	MW	116
5	obroty wirnika OPP	obr./min	1.17
6	ilość dostanego powietrza	tys.m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h	300
7	temperatura powietrza zimnego	°C	50
8	temperatura powietrza gorącego	°C	290
9	podciśnienie na wylocie	Pa	1739

Wyniki obliczeń stanu aktualnego (rys. 4) przedstawiają profile prędkości i temperatur w kanałach OPP. Wykonano obliczenia dwóch wariantów, które różnią się od siebie tym, że w wariantcie 2 w modelu numerycznym uwzględniono przedmuch powietrza do kanałów spalin. Uwzględnienie dostania powietrza zostało zamodelowane przez wprowadzenie dwoma szczelinami (nad i pod wirnikiem) powietrza zimnego o temperaturze 50°C oraz powietrza gorącego o temperaturze 290°C w ilości 300 tys. m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h. W wariantcie bez uwzględnionego przedmuchu powietrza występuje równomierny rozkład zarówno czynnika gazowego jak również pyłu, co nie jest zgodne ze stanem faktycznym (przeprowadzone pomiary w obiekcie). Uwzględnienie dostania powietrza

przeciekającego na stronę spaliniową przez OPP spowodowały uzyskanie zbieżnej z pomiarami nierównomierności rozdziału pyłu do kanałów lewego i prawego prowadzącego do elektrofiltrów. Wysoka prędkość powietrza przeciekającego na stronę spaliniową powoduje przepychanie pyłu w kierunku kotłyszki tylnej zbierającej pył do prawego kanału spalin. Efekt przepychania pyłu jest szczególnie widoczny dla dossania nad wirnikiem OPP, ze wzglę-

du na wystąpieniu efektu ślizgania się powietrza po górnej stronie wirnika OPP. Natomiast powietrze wypływające z dossania pod OPP jest kierowane w mniejszym stopniu w głąb kanału spalin i nie mając fizycznej przeszkody w postaci wirnika bardziej ucieka do dołu wypełniając przestrzeń kanału z kotłyską przednią zbierającą do kanału lewego. Mechanizm tego procesu potwierdzają również pomiary zawartości tlenu w spalinach (J. Nocoń, S. Moskal,

*Sprawozdanie z pomiarów rozptyłu strumienia spalin przed i za OPP oraz określenia poziomu czystości OPP kotła nr 9 w Elektrowni Pątnów II, Energotechnika-Energorozruch SA, 2015*), wg których stężenie  $O_2$  jest wyższe o ok 1% w strumieniu spalin w lewym kanale do EF oraz wyniki pomiarów temperatury mierzone pod OPP, zgodnie z którymi niższe temperatury spalin występują w przedniej części kanału, co potwierdza tezę, że trafia tam chłodniejsze powietrze przeciekające pod OPP.

Biorąc pod uwagę powyższe, uwzględnienie dossania powietrza do spalin okazało się kluczowe w celu poprawnego zamodelowania rzeczywistych warunków rozdziału spalin i pyłu do prawego i lewego kanału pod OPP.

### Symulacje numeryczne przepływu spalin dla zmodyfikowanego układu w celu zapewnienia optymalnego rozptyłu spalin

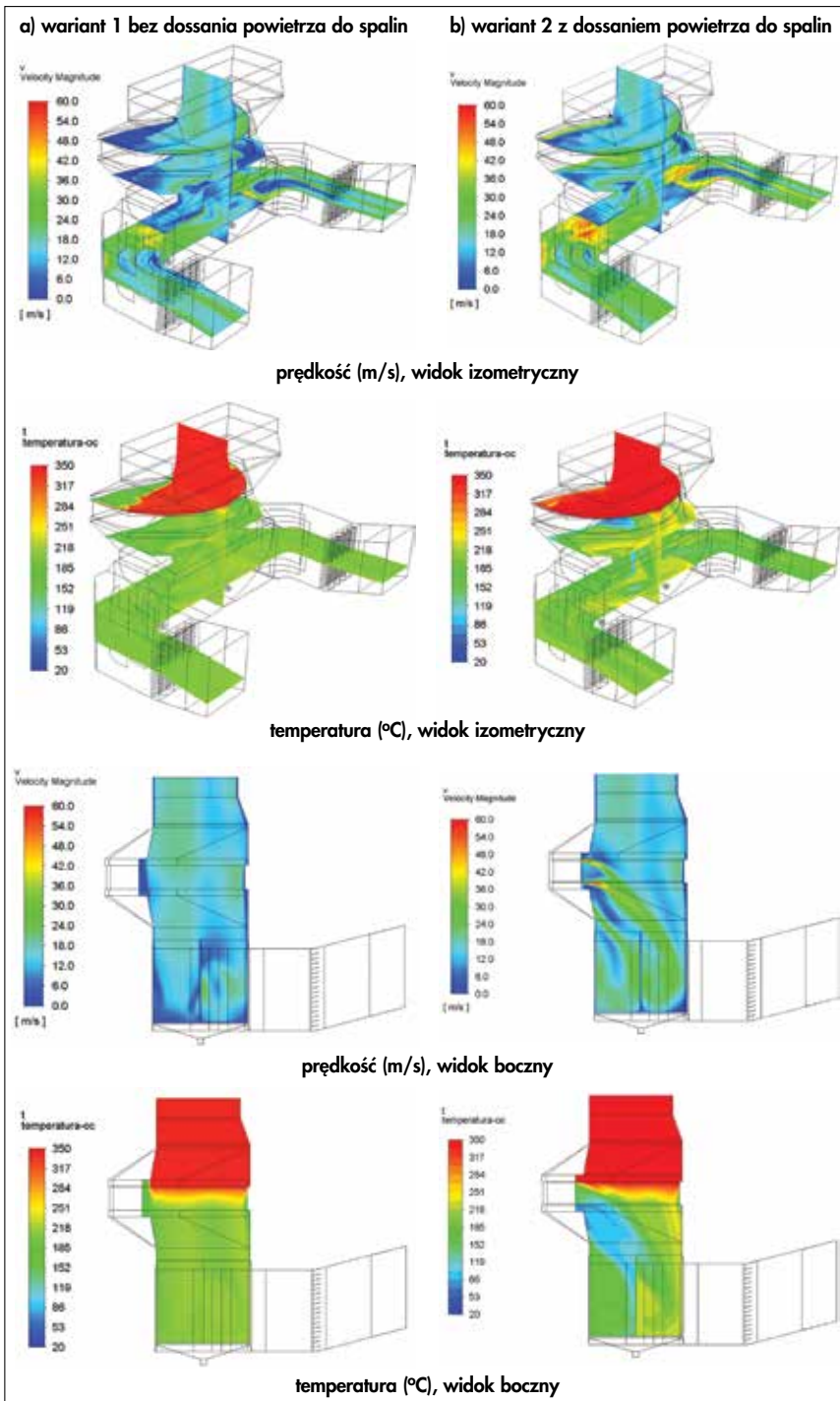
Biorąc pod uwagę zdiagnozowaną na podstawie pomiarów i obliczeń numerycznych przyczynę nierównomierności rozdziału mieszaniny pyłowo-gazowej między kanał lewy i prawy kierujący spaliny do elektrofiltra opracowano 4 koncepcje zmian elementów kierujących spaliny w przestrzeni pod OPP:

- koncepcja nr 1 (rys. 5a), w której zastosowano istniejący obecnie układ kotłyszek lewej i prawej, ale bez ścianki wewnętrznej dzielącej kanał pod OPP na stronę przednią i tylną,
- koncepcja nr 2 (rys. 5b), w której usunięto wszystkie istniejące elementy kierujące znajdujące się bezpośrednio w kanale pod OPP,
- koncepcja nr 3 (rys. 5c), w której zastosowano pionową przegrodę dzielącą kanał pod OPP na stronę prawą i lewą,
- koncepcja nr 4 (rys. 5d), w której oprócz zastosowania pionowej przegrody (koncepcja 3) zabudowano dodatkowe kierownice kierujące przepływ z pionowego na skośny w kierunku kanału lewego lub kanału prawego.

Rys. 6 przedstawia wyniki obliczeń numerycznych dla wybranych koncepcji modernizacji.

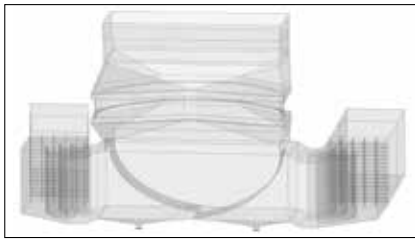
Podsumowanie wyników symulacji numerycznej rozdziału mieszaniny pyłowo-gazowej przedstawiono w Tabeli 6.

Biorąc pod uwagę wyniki przedstawione w Tabeli 6, usunięcie samej przegrody oraz dodatkowo usunięcie kotłyszek (koncepcja 1 i 2) powoduje wyrównanie rozdziału pyłu do kanału lewego i prawego w porównaniu do stanu obecnego. Zabudowane w obecnym kształcie kierownice (kotłyszki)

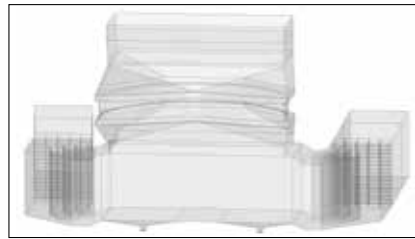


Rys. 4

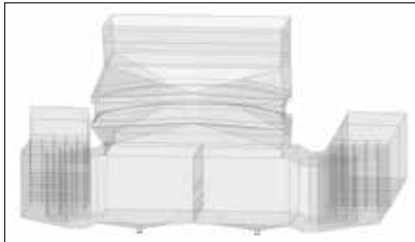
Wybrane wyniki obliczeń numerycznych dla stanu aktualnego, kolumna lewa przedstawia wyniki bez dossania powietrza do spalin, kolumna prawa przedstawia wyniki z dossaniem powietrza do spalin  
 Fig. 4 Selected numerical results for the existing configuration, the left column illustrates results without air leak into the flue gas section, the right column illustrates results with air leak into the flue gas section



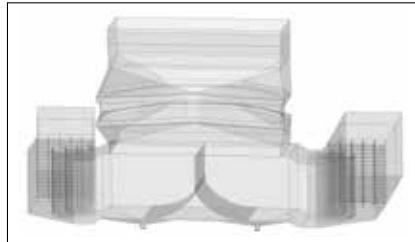
a) koncepcja nr 1: układ bez ścianki wewnętrznej oddzielającej kołyskę lewą i kołyskę prawą



b) koncepcja nr 2: układ bez ścianki wewnętrznej i bez kołyski lewej i bez kołyski prawej



c) koncepcja nr 3: układ z pionową przegrodą dzielącą kanał pod OPP na stronę prawą i lewą



d) koncepcja nr 4: układ z koncepcji 3 z dodatkowymi kierownicami

Rys. 5

Koncepcje modernizacji elementów kierujących przepływ w OPP

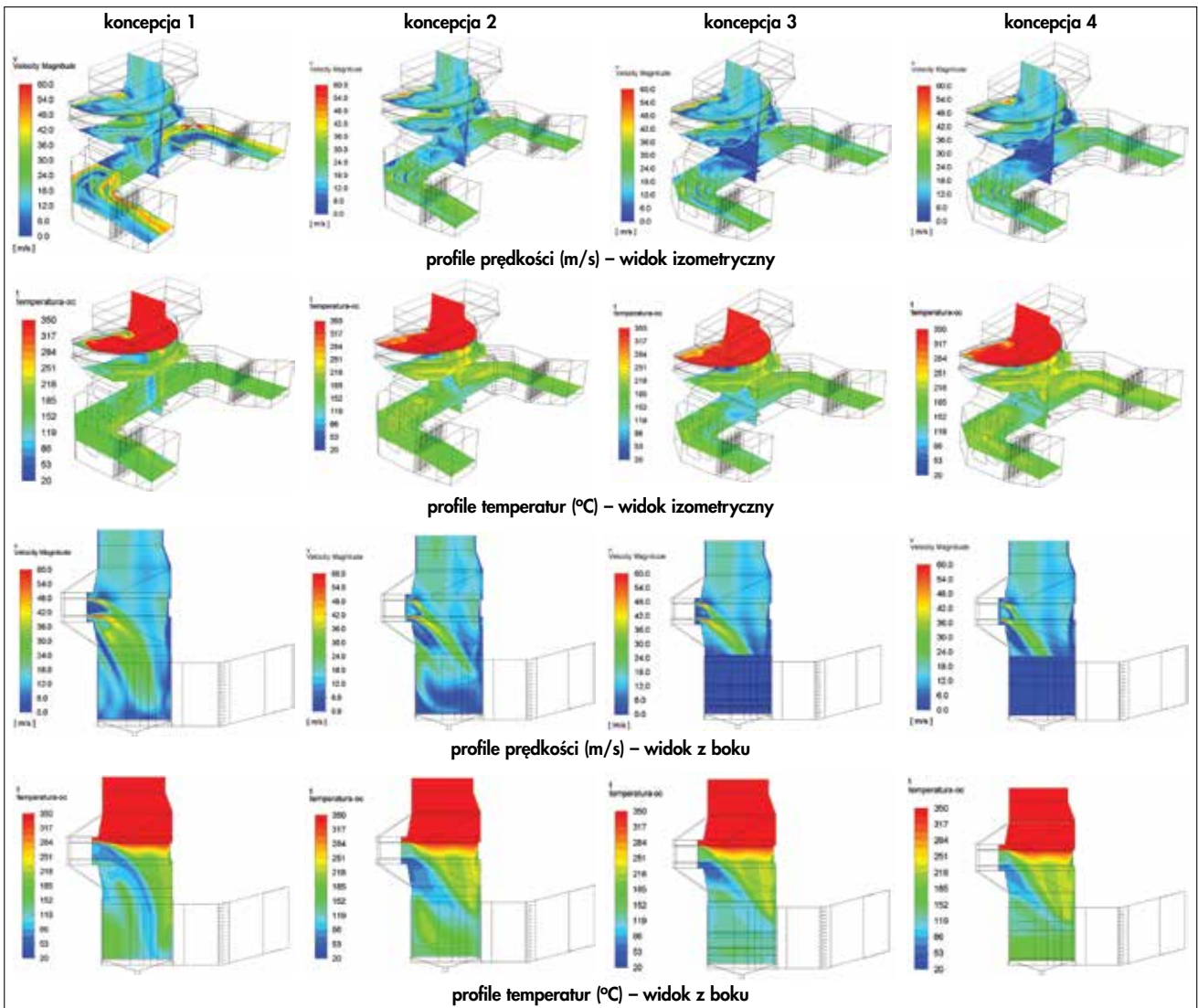
Fig. 5 Modernization concepts of elements directing the flow in the rotary air heater

tu pyłu (więcej idzie do kanału lewego, mniej do prawego).

Zastosowanie dzielonych ruchomych kierownic kierunkowych (koncepcja 4) dało możliwość znalezienia optymalnego ich ustalenia i wyregulowanie akceptowanego podziału mieszaniny pyłowo-gazowej. Koncepcja nr 4 została uznana za rekomendowaną do zastosowania w obiekcie. Dodatkowo w tej koncepcji zaproponowano także dwa dzielone na stronę przednią i tylną ruchome nastawialne w zakresie  $\pm 40^\circ$  skrzydła kierunkujące zlokalizowane w górnej części przegrody, które pozwalają na bieżącą kontrolę rozdziału. Zmodyfikowana koncepcja nr 4 została przedstawiona na rys. 7.

### Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych w kanałach spalin pod i nad OPP od strony przedniej



Rys. 6.

Wybrane wyniki obliczeń numerycznych dla koncepcji modernizacji

Fig. 6 Selected numerical results for modernization concepts

bezpośrednio w kanale pod OPP, wpływają niekorzystnie na rozdział pyłu, ich usunięcie wyrównuje przepływy.

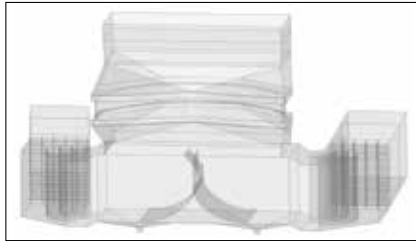
Zastosowanie rozwiązania według koncepcji 3 skutkuje dość wyraźnym odwróceniem nierównomierności rozdzia-

i tylnej kołta. Podczas pomiarów w obiekcie wyznaczono rozkłady temperatur, prędkości i ciśnienia względnego spalin

**Tabela 6. Rozdział spalin i pyłu dla analizowanych wariantów obliczeniowych**  
**Table 6. Flue gas and dust separation for the analysed calculation cases**

parametr	stan obecny		warianty modernizacji			
	bez dossania powietrza	z dossaniem powietrza	koncepcja 1	koncepcja 2	koncepcja 3	koncepcja 4
podział czynnika gazowego kanał P/kanał L, %	47,5/52,5	49/51	50,5/49,5	50,5/49,5	50/50	50/50
strumień popiołu do kanału prawego, kg/s	5,953	6,677	6,038	6,326	5,682	5,873
strumień popiołu do kanału lewego, kg/s	5,841	5,251	5,87	5,638	6,291	6,112
podział pyłu kanał P/kanał L, %	50,5/49,5	56/44	51/49	53/47	47/53	49/51

oraz koncentracji pyłu lotnego w wybranych punktach. Pobrano również próbki węgla podawanego do kotła oraz próbki



**Rys. 7**

Rekomendowany do zabudowy w kanałach zmodyfikowany wariant koncepcji 4 z zabudowanymi dwoma dzielącymi na stronę przednią i tylną ruchomymi nastawialnymi w zakresie  $\pm 40^\circ$  skrzydłami kierunkującymi

*Fig. 7 Modified concept 4 recommended for installation on flue gas channels with built-in two dividing the front and rear sides movable adjustable in the range of  $\pm 40^\circ$  guiding wings*

pyłu lotnego z kanałów spalin. Wyniki pomiarów opracowano w formie tabel przedstawiających wartości badanych parametrów w wybranych punktach pomiarowych, które dostarczyły informacje o charakterze przepływu.

Na podstawie wyników pomiarów sporządzono model numeryczny przepływu spalin dla układu istniejącego w celu potwierdzenia zdiagnozowanej w trakcie pomiarów przyczyny zaburzeń przepływu.

Obliczenia stanu istniejącego wykonano dla dwóch wariantów, tj. wariant bez uwzględnienia dossania powietrza do spalin oraz wariant z uwzględnieniem dossania powietrza do spalin. Uwzględnienie dossania powietrza spowodowało uzyskanie zbieżnej z pomiarami nierównomierności rozdziału pyłu na stronę lewą i prawą. Przepływ powietrza dossanego

powodował przepychanie pyłu w kierunku kołyski tylnej zbierającej pył do prawego kanału spalin. Efekt przepychania pyłu był szczególnie widoczny dla dossania nad wirnikiem OPP, ze względu na wystąpienie efektu ślizgania się powietrza po górnej stronie wirnika. Natomiast powietrze wpływające z dossania pod OPP było kierowane w mniejszym stopniu w głąb kanału spalin i nie mając fizycznej przeszkody w postaci wirnika bardziej uciekało do dołu. Uwzględnienie dossania powietrza do spalin okazało się kluczowe w celu poprawnego zamodelowania rzeczywistych warunków rozdziału spalin i pyłu do kanału prawego i lewego pod OPP.

W następnej kolejności wykonano obliczenia układu zmodyfikowanego, w celu znalezienia odpowiedniego wariantu niwelującego problem nierównomierności. Opracowano cztery koncepcje zmian elementów kierujących spaliny w przestrzeni pod OPP i przeprowadzono obliczenia przepływowe. W efekcie obliczeń wybrano koncepcję nr 4 jako rekomendowaną do zastosowania w obiekcie. Ze względu na to, że obliczenia numeryczne pokazały gromadzenie się pyłu przy tylnej ścianie koncepcja nr 4 była jeszcze optymalizowana i zmodyfikowana o elementy nastawne, regulujące strumień pyłu i gazu. ■