

# Analiza numeryczna możliwości współspalania amoniaku w energetycznym kotle węglowym

Numerical analysis of the possibility of co-firing ammonia in a coal-fired power boiler

ALEKSANDRA KIEDRZYŃSKA, BEATA GLOT, PIOTR JÓŹWIAK

DOI 10.36119/15.2025.6.2

W pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznych procesu współspalania amoniaku na przykładzie kotła energetycznego OP-650. Za pomocą metod symulacyjnych dokonano optymalizacji miejsca wprowadzenia  $\text{NH}_3$  do kotła oraz określono maksymalny możliwy do zaakceptowania udział amoniaku w całkowitym udziale ciepłym paliwa do kotła. Celem było znalezienie kompromisu pomiędzy maksymalizacją ilości wprowadzanego amoniaku, a zachowaniem stabilnego spalania w komorze paleniskowej oraz akceptowalnego poziomu emisji zanieczyszczeń. Obliczenia wykazały pozytywny wpływ współspalania amoniaku na emisję dwutlenku węgla z kotła energetycznego. Współspalanie 40% (mocy cieplnej kotła) amoniaku spowodowało obniżenie współczynnika emisji  $\text{CO}_2$  poniżej 550 kg/MWh. Obliczenia wykazały również istotną zależność pomiędzy miejscem wprowadzenia amoniaku, a emisją tlenków azotu, wskazując jako najkorzystniejszą lokalizację wprowadzenia nowego paliwa palniki dolnego rzędu analizowanego kotła.

*Słowa kluczowe: współspalanie amoniaku, kotły węglowe, emisja tlenków azotu, emisja  $\text{CO}_2$ , symulacje numeryczne, dekarbonizacja*

The paper presents the results of numerical simulations of the ammonia co-combustion process using the OP-650 power boiler as an example. Using simulation methods, the place of  $\text{NH}_3$  introduction to the boiler was optimized and the maximum acceptable share of ammonia in the total heat share of the fuel to the boiler was determined. The aim was to find a compromise between maximizing the amount of ammonia introduced and maintaining stable combustion in the combustion chamber and an acceptable level of pollutant emissions. The calculations showed a positive effect of ammonia co-combustion on carbon dioxide emissions from the power boiler. Co-combustion of 40% (of the boiler thermal power) of ammonia resulted in a reduction of  $\text{CO}_2$  emission factor below 550 kg/MWh. The calculations also revealed a significant relationship between the location of ammonia injection and nitrogen oxides emissions, indicating the most advantageous position for introducing the new fuel is at lower row burners of the analyzed boiler.

*Keywords: ammonia co-firing, pulverized coal boiler,  $\text{NO}_x$  emissions,  $\text{CO}_2$  emissions, CFD simulations, decarbonisation*

## Wprowadzenie

Krajowy sektor wytwarzania energii elektrycznej i ciepła jest w dużej mierze uzależniony od paliw kopalnych, głównie węgla kamiennego i brunatnego. Wynika to z historycznych uwarunkowań gospodarczych oraz geopolitycznych, które kształtowały polską energetykę przez dziesięciolecia. Również przez dziesięciolecia paliwa te stanowiły gwarancję stabilności, przewidywalności i bezpieczeństwa energetycznego polskiej energetyki. W chwili obecnej polska energetyka przechodzi transformację energetyczną, od której już prawdopodobnie odwrotu nie ma. W kontekście dekarbonizacji mówi się

głównie o technologiach OZE, czy wodorce, ale coraz bardziej popularny staje się również amoniak, ale nie ten konwencjonalny, wytwarzany z gazu ziemnego lub węgla, a „zielony” amoniak, otrzymywany metodami ekologicznymi. Amoniak jest gazem palnym. Spalanie amoniaku jest wolne od emisji dwutlenku węgla, ponieważ w reakcji spalania otrzymuje się jedynie azot i wodę. Tlenki azotu to tak naprawdę jedyny szkodliwy związek, który może powstawać podczas spalania amoniaku, dlatego paliwo to jest warte rozważenia pod kątem ewentualnego wykorzystania w energetyce. W pracy przedstawiono analizę możliwości wykorzystania amoniaku do spalania razem z węglem

w kotle energetycznym klasy 200 MW. Wykorzystując obliczeniową dynamikę płynów (CFD), badania koncentrują się na optymalizacji procesu współspalania amoniaku pod kątem znalezienia optymalnej lokalizacji miejsca wtrysku zielonego paliwa oraz maksymalnego do zaakceptowania udziału  $\text{NH}_3$ , mając na celu zminimalizowanie emisji  $\text{CO}_2$  oraz zapewnienie stabilnego spalania i akceptowalnego poziomu tlenków azotu.

Tematyka współspalania amoniaku w kotłach węglowych jest w tej chwili jedną z rozważanych i badanych opcji w kierunku dekarbonizacji. W [1] przedstawiono szczegółowe zestawienie metod zastosowania amoniaku jako paliwa w przemyśle.

dr inż. Aleksandra Kiedrzyńska <https://orcid.org/0000-0002-9508-6163>, mgr inż. Beata Glot <https://orcid.org/0000-0002-1547-2575>,  
dr inż. Piotr Józwiak <https://orcid.org/0000-0002-7087-8180> – Instytut Energetyki Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.

Autor do korespondencji/ Corresponding author: dr inż. Aleksandra Kiedrzyńska, [aleksandra.kiedrzynska@ien.com.pl](mailto:aleksandra.kiedrzynska@ien.com.pl), tel. 797905469

W rozwoju tej technologii w chwili obecnej przodują Japończycy. Współspalanie amoniaku z węglem w kotłach zyskuje na popularności jako metoda redukcji emisji CO<sub>2</sub> z elektrowni, a symulacje CFD są często wykorzystywane do badania procesu spalania i optymalizacji wydajności [2]. Ze względu na wysoką zawartość azotu w amoniaku istnieją obawy dotyczące zwiększonej emisji NO<sub>x</sub> [3]. Badania współspalania amoniaku omówiono m.in. w [4], gdzie badany był wpływ podawania amoniaku powyżej 40 % mocy cieplnej. W [5] autorzy badali wpływ pozycji wtrysku amoniaku i proporcji mieszania na emisję NO<sub>x</sub> z kotła opalanego węglem o mocy 1000 MW, ujawniając, że wtrysk gazu amoniakowego do strefy płomienia palnika może zapewnić niższą emisję NO<sub>x</sub> niż spalanie czystego węgla. W [6] dokonano analizy numerycznej wpływu pozycji wtrysku oraz ilości współspalanego amoniaku na efektywność spalania i emisję zanieczyszczeń w kotle energetycznym z palnikami naściennymi. W [7] autorzy wykorzystali metody CFD do zbadania wpływu proporcji mieszanki amoniaku i węgla na spalanie w kotle i emisję NO<sub>x</sub> i odkryli, że wraz ze wzrostem proporcji amoniaku w mieszance temperatura spalania spada. W [8] autorzy wykorzystali symulacje numeryczne do analizy wpływu różnych strategii wtrysku amoniaku i konfiguracji palnika na wydajność spalania i charakterystykę emisji NO<sub>x</sub> kotła pyłowego o mocy 500 MW z palnikiem tangencjalnym. W [9, 10] autorzy również badali wpływ współspalania amoniaku na ogólną wydajność kotła i sprawność cieplną przy różnych obciążeniach i współczynnikach współspalania. Badania sugerują, że zwiększanie współczynników udziału amoniaku może prowadzić do spadku temperatury płomienia i potencjalnie wpływać na radiacyjny transfer ciepła i właściwości spalin, ostatecznie zmniejszając moc wyjściową brutto i sprawność cieplną kotła. Jednak konkretne efekty na kocioł o mocy 200 MW w różnych warunkach pracy i współczynnikach mieszania amoniaku, zwłaszcza przy wyższych współczynnikach potrzebnych do znacznej dekarbonizacji, wymagają bardziej szczegółowej analizy w celu opracowania strategii minimalizacji strat sprawności. Prowadzone badania [w tym m.in. 8, 9] potwierdzają, iż symulacje CFD są cennymi narzędziami do zrozumienia i optymalizacji współspalania amoniaku w kotłach opalanych węglem. Modele te pozwalają badaczom na określenie wpływu różnych parametrów na charakterystykę spalania i emisję do

środowiska szkodliwych zanieczyszczeń, co z kolei umożliwia opracowywanie strategii ograniczania emisji CO<sub>2</sub> przy jednoczesnej kontroli powstawania NO<sub>x</sub> [11].

### Założenia do obliczeń

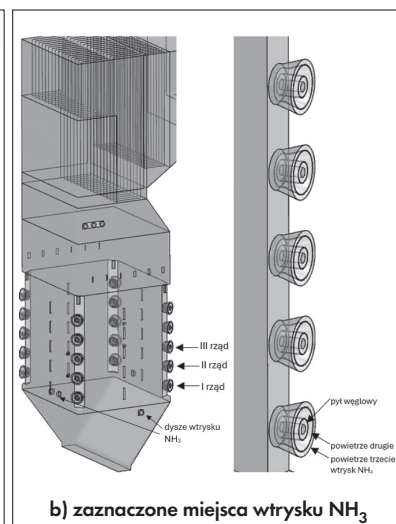
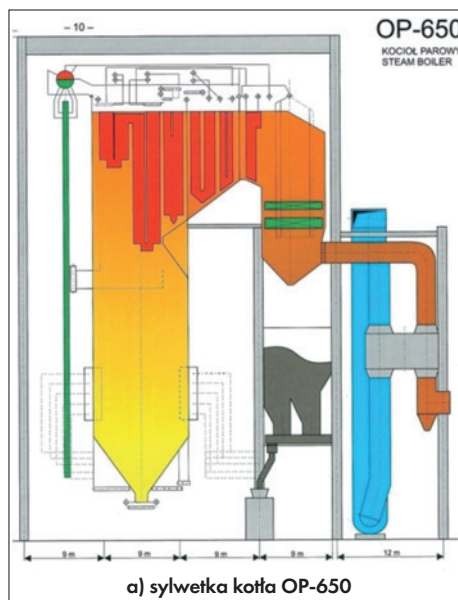
Przedmiotem analiz jest kocioł parowy OP-650, jednowalczakowy, z naturalnym obiegiem wody w parowniku, z doprowadzeniem żużla w postaci stałej, opalany pyłem węgla kamiennego. Kocioł posiada sylwetkę dwuciągową i składa się z komory paleniskowej, międzyciągu i ciągu konwekcyjnego. Komora paleniskowa ma kształt prostopadłościanu i zbudowana jest ze ścian szczelnych (membranowych), które tworzą powierzchnię ogrzewalną kotła. Główne elementy obiegu parowo-wodnego to parownik, przegrzewacz pary pierwotnej, przegrzewacz pary międzystopniowej i podgrzewacz wody. Podstawowe parametry projektowe kotła przedstawiono poniżej:

- wydajność maksymalna trwała WMT: 650 t/h;
- ilość pary międzystopniowej na wylocie z kotła: 572 t/h
- temperatura pary świeżej na wylocie z kotła: 540°C;

- całkowita ilość powietrza do spalania: 650 000 m<sup>3</sup>/h;
- ilość powietrza pierwotnego 131 000 m<sup>3</sup>/h;
- temperatura maksymalna powietrza pierwotnego 340°C;
- ilość spalin za obrotowym podgrzewaczem powietrza: 13,8%;
- współczynnik nadmiaru powietrza w komorze paleniskowej: 1,2;
- zawartość CO<sub>2</sub> w spalinach za obrotowym podgrzewaczem powietrza: 13,8%.

Kocioł posiada pięć rzędów niskoemisyjnych palników typu wirowego, umieszczonych w narożach komory spalania, z czego w obrębie jednego palnika różnią się dysze powietrza rdzeniowego, pierwotnego, wtórnego zawirowanego oraz trzeciego. W obrębie pasa palnikowego znajdują się cztery dysze powietrza dopalającego OFA o zmiennym przekroju wylotowym, umieszczone w czterech narożach palnikowych powyżej ostatniego pasa palnikowego na poziomie 23 m. Na poziomie 25 m znajduje się 12 dysz powietrza dopalającego OFA pogrupowanych w 4 zespoły po 3 dysze o zmiennym przekroju wylotowym.

Sylwetkę kotła przedstawia rys. 1a.

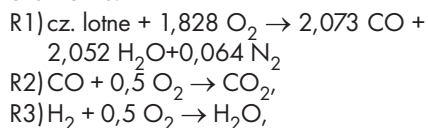


Rys. 1  
Sylwetka kotła OP-650  
Fig. 1 OP-650 type boiler

- ciśnienie pary świeżej na wylocie z kotła: 13,53 MPa;
- temperatura pary międzystopniowej wlot/wylot: 303/540°C;
- ciśnienie pary międzystopniowej 25,5/23 MPa;
- temperatura wody zasilającej: 242°C;
- temperatura spalin na wylocie z kotła: 140°C;
- sprawność: 92%;
- temperatura powietrza gorącego: 320°C;

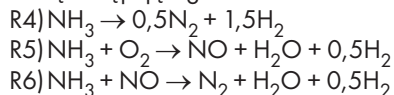
Kocioł jest opalany pyłem węgla kamiennego pochodzącym z różnych kopalń. Do celów analizy numerycznej założono, że kocioł jest opalany węglem o wartości opałowej 25 MJ/kg i zawartości popiołu 18,2 %. Jakość przemiału pyłu węglowego uwzględniono natomiast jako jeden wspólny, uśredniony przemiał dla wszystkich młynów scharakteryzowany poprzez rozkład Rosin – Rammlera, ze średnią średnicą cząstki pyłu równą 72 μm. Mechanizm spalania pyłu węglowego

uwzględniał trzy podstawowe reakcje chemiczne:



W równaniu R1 części lotne określa zbiorczo lotne związki organiczne uwalniane pod wpływem podwyższonej temperatury z węglowodorów stałych takich, jak biomasa czy węgiel kamienny.

Współspalanie amoniaku uwzględniono w modelowaniu numerycznym za pomocą następującego mechanizmu reakcji:



Bilans rozpyłów powietrza i paliwa do kotła wykonano w oparciu o historyczne dane pomiarowe kotła. W bilansie uwzględniono współspalanie amoniaku dla różnych udziałów oraz przy różnych konfiguracjach pracy kota. Tabela 1 przedstawia parametry procesowe pracy kotła zadane na potrzeby obliczeń numerycznych.

**Tabela 1 Rozpyły powietrza i paliwa do kotła w analizowanych wariantach**  
**Table 1 Air and fuel flow to the boiler in the analyzed cases**

| wariant                               | Ref 5ZM | Ref 4ZM | Ref 4ZM70 | W1     | W2      | W3     | W4     | W5      | W6     | W7     | W8      | W9     | W10    | W11    | W12    |
|---------------------------------------|---------|---------|-----------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| udział NH <sub>3</sub> , %            | 0       | 0       | 0         | 40     | 40      | 40     | 40     | 40      | 40     | 40     | 40      | 10     | 20     | 30     | 50     |
| miejsce wtrysku NH <sub>3</sub>       | -       | -       | -         | I rzqd | II rzqd | 12m    | I rzqd | II rzqd | I rzqd | I rzqd | II rzqd | I rzqd | I rzqd | I rzqd | I rzqd |
| węgiel, kg/s                          | 23,42   | 23,42   | 17,36     | 14,05  | 14,05   | 14,05  | 14,05  | 14,05   | 14,05  | 10,42  | 10,42   | 21,08  | 18,74  | 16,39  | 11,71  |
| NH <sub>3</sub> , kg/s                | 0       | 0       | 0         | 12,65  | 12,65   | 12,65  | 12,65  | 12,65   | 12,65  | 9,37   | 9,37    | 3,16   | 6,32   | 9,48   | 15,81  |
| ZM                                    | 12345   | 1234    | 1234      | 12345  | 12345   | 12345  | 2345   | 1345    | 1234   | 1234   | 1234    | 12345  | 12345  | 12345  | 12345  |
| powietrze całkowite m <sup>3</sup> /h | 643763  | 643763  | 516934    | 727156 | 727156  | 727156 | 727156 | 727156  | 727156 | 583898 | 583898  | 664611 | 685459 | 706307 | 748004 |

Obliczenia przeprowadzono dla mocy elektrycznej bloku 222 MW i 160 MW. Założono stałą sprawność kotła 92% oraz stałe parametry pary dla danej mocy. Analizowany kocioł wyposażony jest w pięć młynów węglowych o wydajności około 25 t/h. Kocioł osiąga moc maksymalną przy pracy czterech i pięciu zespołów młynowych (4ZM i 5ZM). Mieszanka paliwowa – powietrzna z każdego młyna podawana jest do odpowiedniego narożka kotła.

**Wyniki symulacji numerycznych**

Wyniki symulacji numerycznych obejmują analizę wpływu lokalizacji miejsca wprowadzenia amoniaku oraz jego ilości na pracę komory paleniskowej kotła. Przeanalizowano 15 wariantów, w których każdy przedstawiał inny sposób eksploatacji kotła. Zmianie ulegał zarówno układ pracujących młynów, miejsce wtrysku i ilość wprowadzanego amoniaku, jak również rozpyły powietrza do kotła. Warianty podzielono w następujący sposób:

- 3 warianty referencyjne bez współspalania amoniaku: ref5ZM, ref4ZM i ref4ZM70, 5ZM oznacza pracę kotła na 5 zespołach młynowych, 4ZM oznacza pracę kotła na 4 zespołach młynowych, 4ZM70 oznacza pracę kotła na 4 zespołach młynowych i 70% wydajności;
- 8 wariantów współspalania amoniaku w ilości 40% przy różnej lokalizacji miejsca wtrysku: W1, W2, W3, W4, W5, W6, W7, W8, praca 5ZM 100%WMT (W1, W2, W3), praca 4ZM WMT100% (W4, W5, W6); praca 4ZM 70%WMT (W7, W8);
- 4 warianty współspalania amoniaku w ilości 10%, 20%, 30% i 50%: W9, W10, W11, W12, 10%NH<sub>3</sub> (W9), 20%NH<sub>3</sub> (W10), 30%NH<sub>3</sub> (W11), 50%NH<sub>3</sub> (W12).

W wyniku symulacji CFD uzyskano dane ilościowe oraz profile parametrów charakterystycznych dla procesu spalania, które przedstawiono w postaci rysunków i tabel.

niaku zarówno do istniejących palników węglowych (są to warianty W1, W2, W4-W8) jak również poza pasem palnikowym (wariant W3). Wtrysk amoniaku do palników realizowano poprzez podawanie NH<sub>3</sub> do dysz powietrza trzeciego rzędu I i II, natomiast wtrysk amoniaku poza pasem palnikowym realizowano poprzez podawanie go do dysz dodatkowych na poziomie 12 m. Analizowane miejsca wtrysku amoniaku zaznaczono na rys. 1b.

W tabeli 2 podano ważniejsze parametry procesowe kotła uzyskane z symulacji numerycznych. Wyniki obliczeń wykazały, iż wtrysk amoniaku w ilości 40% niezależnie od miejsca podawania zmienia warunki panujące w kotle i skład spalin w komorze spalania. Powstają znaczne ilości pary wodnej, a emisja CO<sub>2</sub> spada. Warunki panujące w komorze spalania sprzyjają utlenianiu CO do CO<sub>2</sub>, stąd emisja CO nie przekracza 100 ppm we wszystkich analizowanych wariantach. Reakcja spalania NH<sub>3</sub> do NO powoduje

**Tabela 2 Parametry pracy kotła uzyskane podczas podawania 40% NH<sub>3</sub> w różnych konfiguracjach**  
**Table 2 Boiler operating parameters obtained when feeding 40% NH<sub>3</sub> in various configurations**

|   | Ref 5ZM | Ref 4ZM | W1     | W2      | W3    | W4     | W5      | W6     | Ref4ZM 70 | W7     | W8      |
|---|---------|---------|--------|---------|-------|--------|---------|--------|-----------|--------|---------|
| pracujące młyny   | 12345   | 1234    | 12345  | 12345   | 12345 | 2345   | 1345    | 1234   | 1234      | 1234   | 1234    |
| miejsce wtrysku   | -       | -       | I rzqd | II rzqd | 12m   | I rzqd | II rzqd | I rzqd | -         | I rzqd | II rzqd |
| udział NH <sub>3</sub> , %<br>ciepłnie                    | 0       | 0       | 40     | 40      | 40    | 40     | 40      | 40     | 0         | 40     | 40      |
| CO <sub>2</sub> , % obj.                                  | 12,46   | 13,05   | 6,20   | 6,59    | 6,58  | 5,93   | 6,02    | 5,87   | 13,30     | 7,39   | 7,07    |
| H <sub>2</sub> O, % obj.                                  | 5,96    | 6,35    | 12,16  | 13,10   | 12,90 | 12,25  | 12,96   | 13,16  | 6,30      | 14,99  | 15,12   |
| NO <sub>x</sub> , mg/m <sup>3</sup> ,<br>6%O <sub>2</sub> | 490     | 481     | 598    | 825     | 870   | 739    | 939     | 656    | 408       | 629    | 1062    |
| NH <sub>3</sub> , % obj.                                  | -       | 0       | 0      | 0       | 0     | 0      | 0       | 0      | 0         | 0      | 0       |
| cz. palne, %  | 4,26    | 4,1     | 5,4    | 3,1     | 2,69  | 4,7    | 3,26    | 4,5    | 1,60      | 3,73   | 1,93    |
| CO, ppm   | 60      | 90      | 33     | 44      | 25    | 33     | 45      | 36     | 34        | 57     | 74      |
| Q <sub>lej żuźlowy</sub> MW                               | 34      | 35      | 21     | 35,6    | 14    | 13     | 42      | 15     | 28        | 14     | 25      |
| t <sub>wylot z kotła</sub> K                              | 987     | 932     | 930    | 975     | 938   | 909    | 917     | 909    | 876       | 886    | 887     |
| t <sub>wylot komora</sub> K                               | 1371    | 1337    | 1345   | 1381    | 1361  | 1375   | 1366    | 1353   | 1326      | 1305   | 1317    |

**Analiza lokalizacji miejsca wtrysku NH<sub>3</sub>**

W analizie różnych miejsc wtrysku amoniaku do kotła założono stały udział NH<sub>3</sub> równy 40%. W obliczeniach numerycznych sprawdzono efekt wtrysku amo-

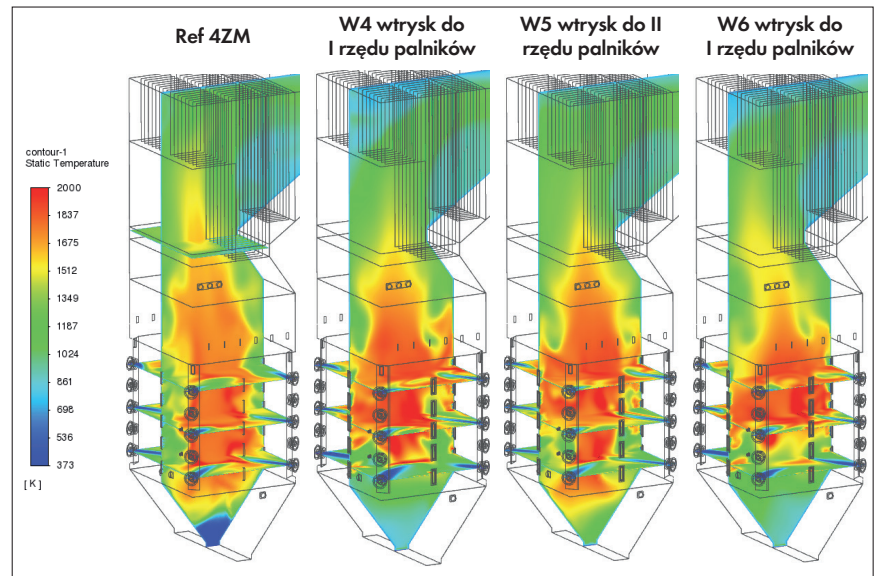
niaku zwiększenie ilości generowanych tlenków azotu podczas procesu współspalania amoniaku. We wszystkich wariantach amoniak jest spalany blisko wylotu z dyszy wtryskowej, reakcja spalania i konsumpcja tlenu zachodzą szybciej niż dla węgla, a na wylocie nie obserwuje się ulotu NH<sub>3</sub>.

Rys. 2, 3, 4 przedstawiają profile temperatur wygenerowane w wyniku symulacji współspalania 40% amoniaku w różnych konfiguracjach. Współspalanie amoniaku w konfiguracji pracy 5ZM to warianty W1, W2 i W3. W przypadku podawania amoniaku do I rzędu palników (wariant W1) obserwuje się przechłodzenie w dolnej części komory paleniskowej. Mimo, iż w tym obszarze następuje spalanie amoniaku to płomień nie jest widoczny i wyraźnie ukształtowany. W wariantach podawania amoniaku do palników I rzędu w związku z niższymi temperaturami spalin w obszarze leja żużlowego obserwuje się również spadek ilości ciepła przejętego przez powierzchnie ogrzewalne w tym obszarze. Palniki I rzędu w trybie współspalania pracują inaczej niż pozostałe palniki, co może niekorzystnie wpływać na proces odgazowania i spalania pyłu węglowego w tym obszarze, co skutkuje zwiększonymi zawartościami części palnych w popiele (do 5,4%). Emisja  $\text{NO}_x$  w wariantach W1 wynosi  $598 \text{ mg/m}^3$ . W dolnym rzędzie palników stężenie tlenu jest zazwyczaj mniejsze, co sprzyja reakcji redukcji amoniaku zamiast utleniającej. W takich warunkach amoniak ma większą szansę na redukcję  $\text{NO}_x$ , zamiast tworzenia dodatkowych tlenków azotu poprzez utlenianie. W wariantach podawania amoniaku do II rzędu palników (wariant W2) uzyskany ze spalania płomień pozornie wypełnia całą przestrzeń komory paleniskowej. Pomimo intensywniejszego spalania w dolnych partiach palników w wa-

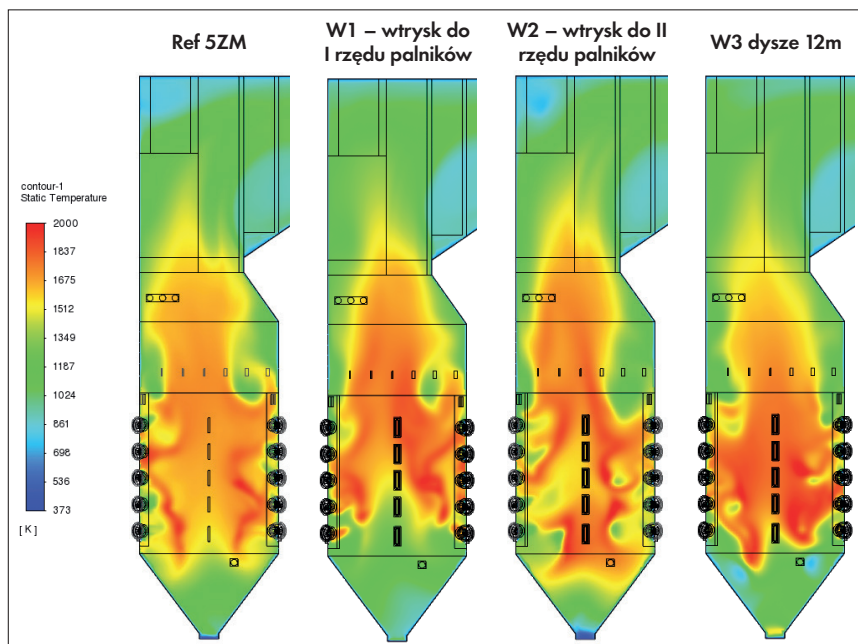
riancie W2 w porównaniu z wariantem W1, obserwuje się niesymetryczny i niejednorodny przebieg procesu spalania, charakteryzujący się obszarami o różnej intensywności spalania. W wariantach W2 uzyskano wyższe emisje  $\text{NO}_x$  ( $825 \text{ mg/m}^3$ ) w porównaniu z wariantem W1. Emisja CO wynosi poniżej 50 ppm, a zawartości części palnych nie przekracza 4%. W przypadku podawania amoniaku przez dysze zewnętrzne (wariant W3), uzyskany płomień wykazuje największe podobieństwo do płomienia powstającego podczas

spalania samego węgla. Brak obciążenia palników amoniakiem skutkuje niezakłóconym przebiegiem spalania pyłu węglowego. W tym przypadku emisja  $\text{NO}_x$  osiąga wartość  $870 \text{ mg/m}^3$ , emisja CO wynosi 25 ppm, a zawartość części palnych jest poniżej 3%.

Współspalanie amoniaku w konfiguracji 4ZM obejmuje warianty W4, W5, W6, W7, W8. Są to warianty kombinowane, różniące się układem pracujących zespołów młynowych i obciążeniem kotła, a amoniak jest podawany do I i II rzędu palników.



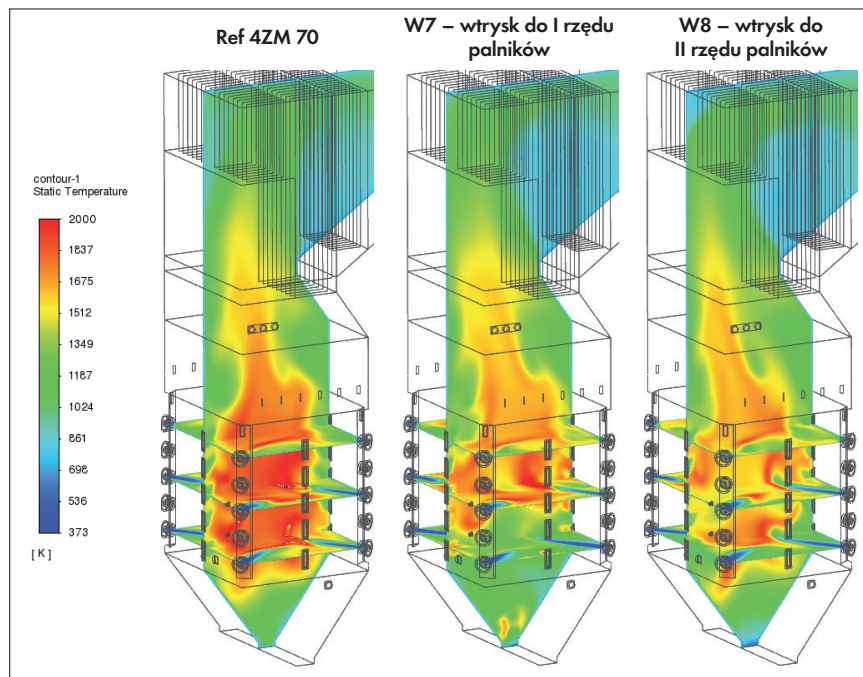
Rys. 3 Profile temperatur uzyskane podczas podawania 40%  $\text{NH}_3$  w różnych konfiguracjach (praca na 4ZM) 100% obciążenia  
Fig. 3 Temperature profiles obtained during the feeding of 40%  $\text{NH}_3$  in different configurations (operation at 4ZM) 100% load



Rys. 2 Profile temperatur uzyskane podczas podawania 40%  $\text{NH}_3$  w różnych konfiguracjach (praca na 5ZM) 100% obciążenia  
Fig. 2 Temperature profiles obtained during the feeding of 40%  $\text{NH}_3$  in different configurations (operation at 5ZM) 100% load

W każdym z tych wariantów płomień kształtuje się odmiennie, jednak tendencja dotycząca miejsca wtrysku jest podobna do obserwowanej w wariantach pracy 5ZM. Przy pracy palników I rzędu spalanie przebiega najmniej intensywnie w rejonie leja żużlowego, gdzie też uzyskano najwyższe zawartości części palnych w porównaniu do innych wariantów. Z drugiej strony, przy wtrysku amoniaku do palników I rzędu uzyskuje się najniższe tlenki azotu, tj.  $740 \text{ mg/m}^3$  dla wariantu W4,  $656 \text{ mg/m}^3$  dla wariantu W6. Natomiast, warianty wtrysku amoniaku do II rzędu palników, w różnych konfiguracjach, generują wyższe emisje tlenków azotu. W wariantach W5 emisja  $\text{NO}_x$  wynosi  $939 \text{ mg/m}^3$ . Nie zaobserwowano zmniejszenia ilości ciepła do powierzchni ogrzewalnych leja żużlowego ani znaczącego wzrostu zawartości CO i części palnych.

Warianty W7 i W8 to warianty współspalania 40%  $\text{NH}_3$  przy obniżonej wydajności kotła. W tej konfiguracji obserwuje się tendencję podobną do poprzednich,



**Rys. 4**  
**Profile temperatur uzyskane podczas podawania 40% NH<sub>3</sub> w różnych konfiguracjach (praca na 4ZM) 70% obciążenia**  
**Fig. 4 Temperature profiles obtained during the feeding of 40% NH<sub>3</sub> in different configurations (operation on 4ZM) 70% load**

a mianowicie wtrysk amoniaku do najniższego rzędu palników powoduje najniższe emisje tlenków azotu. Z drugiej jednak strony profile temperatur w komorze spalania wskazują, iż współspalanie amoniaku w tej konfiguracji powoduje znaczne obniżenie temperatur spalin w komorze spalania i wyraźnie widoczną niestabilność płomienia w stosunku do wariantu referencyjnego. Przy podawaniu amoniaku do palników rzędu wyższego płomień jest stabilniejszy, bardziej rozciągnięty, natomiast emisje NO<sub>x</sub> są wysokie osiągając wartość powyżej 1000 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup>.

### Analiza wpływu ilości NH<sub>3</sub>

Wyniki obliczeń dotyczących różnych lokalizacji wtrysku 40% NH<sub>3</sub> do kotła wykazały, że optymalnym rozwiązaniem pod względem emisji NO<sub>x</sub> przy maksymalnej mocy urządzenia jest podawanie amoniaku wyłącznie do pierwszego rzędu palników. W związku z tym dla tej lokalizacji wykonano dodatkowe analizy wpływu różnych ilości podawanego NH<sub>3</sub> do kotła. Obliczenia wykonano przy założeniu udziału amoniaku na poziomie 10%, 20%, 30% i 50% mocy cieplnej kotła. W tabeli 3 oraz na rys. 5 i 6 przedstawiono uzyskane rezultaty.

Wyniki symulacji potwierdzają, że wprowadzenie amoniaku do komory paleniskowej znacząco modyfikuje warunki spalania, niezależnie od jego udziału energetycznego. Podawanie już 10% amonia-

w w dolnej części komory paleniskowej wiadać szczególnie analizując profile temperatur dla wariantów z udziałem cieplnym amoniaku 30% i 40%. Zmiana profili temperatur skutkuje zmniejszeniem ilości ciepła odbieranego przez powierzchnie ogrzewalne zlokalizowane w leju żużlowym dla wariantów podawania 30% i 40% NH<sub>3</sub>.

Pomimo podawania dodatkowego powietrza do dolnych rzędów palników, wtrysk amoniaku powoduje, że proces odgazowania i spalania części lotnych z węgla przebiega w tym obszarze wolniej. Dopalenie cząstek następuje w wyższych partiach palników. Warunki podstechiometryczne występujące w obszarze palników dolnych sprzyjają redukcji tlenków azotu powstających w procesie spalania amoniaku. Wraz ze wzrostem ilości NH<sub>3</sub> zmniejsza się emisja NO<sub>x</sub> ze spalania węgla, a zwiększa się emisja ze spalania NH<sub>3</sub>. Sumaryczna emisja NO<sub>x</sub> przeliczona na stan suchy (różna zawartość H<sub>2</sub>O na wylocie) generowana przez oba spalane paliwa jest w wariantach 10÷40% NH<sub>3</sub> do siebie zbliżona i wynosi od 560

**Tabela 3 Parametry pracy kotła uzyskane podczas podawania 10÷50% NH<sub>3</sub> do I rzędu palników**  
**Table 3 Boiler operating parameters obtained when feeding 10÷50% NH<sub>3</sub> to the first row of burners**

| parametr  | W9    | W10   | W11   | W1    | W12   |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| pracujące młyny   | 12345 | 12345 | 12345 | 12345 | 12345 |
| poziom wtrysku NH <sub>3</sub> do palników  | I     | I     | I     | I     | I     |
| udział NH <sub>3</sub> , % cieplnie   | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    |
| prędkość NH <sub>3</sub> , m/s  | 2,57  | 5,14  | 7,70  | 10,27 | 12,85 |
| CO <sub>2</sub> , % obj.  | 10,25 | 8,98  | 7,21  | 6,2   | 4,89  |
| H <sub>2</sub> O, % obj.  | 7,56  | 9,42  | 10,83 | 12,16 | 13,96 |
| NO <sub>x</sub> , mg/m <sub>n</sub> <sup>3</sup> , 6% O <sub>2</sub> , stan suchy | 562   | 579   | 574   | 598   | 685   |
| NH <sub>3</sub> , % obj.  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| cz. palne, %  | 4,4   | 4,3   | 4,65  | 5,4   | 5,7   |
| CO, ppm   | 68    | 76    | 26    | 33    | 33    |
| Q <sub>leju żużlowy</sub> , MW  | 20    | 24    | 20    | 21    | 13    |
| t <sub>wylot z kotła</sub> , K  | 929   | 930   | 908   | 930   | 915   |
| t <sub>wylot komora</sub> , K   | 1387  | 1361  | 1368  | 1345  | 1321  |

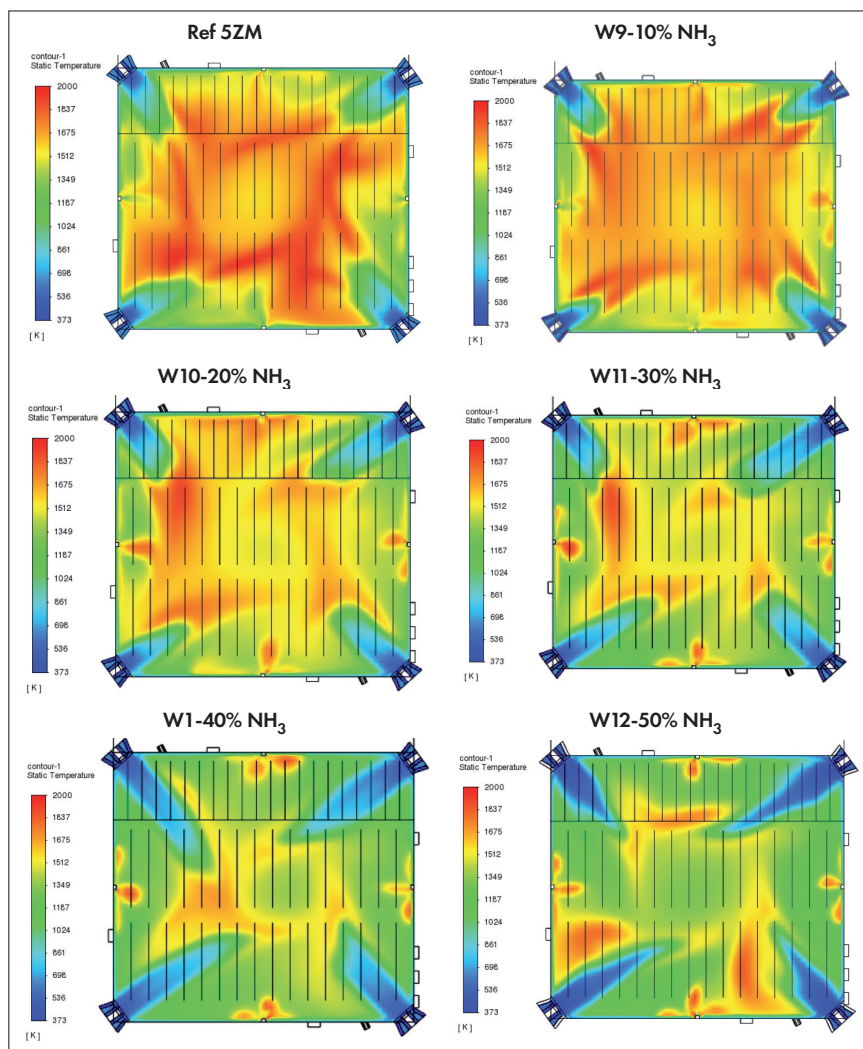
ku powoduje zmianę profili temperatur w obrębie dolnego pasa palnikowego (rys. 5). W miejscu wtrysku amoniaku spalanie ulega znacznemu zmniejszeniu intensywności w porównaniu z wariantem bez współspalania. Zmniejszenie długości płomienia oraz spadek intensywności spalania

do 598 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup>. Natomiast w wariantcie współspalania 50% NH<sub>3</sub> emisja NO<sub>x</sub> wzrasta o niemal 100 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup> osiągając wartość 685 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup>.

Wraz ze wzrostem udziału amoniaku w mieszance paliwowej, następuje znacząca redukcja emisji dwutlenku węgla

**Tabela 4 Wskaźnik emisji CO<sub>2</sub> przy wtrysku 10÷50% NH<sub>3</sub>**  
**Table 4 CO<sub>2</sub> emission rate at 10÷50% NH<sub>3</sub> injection**

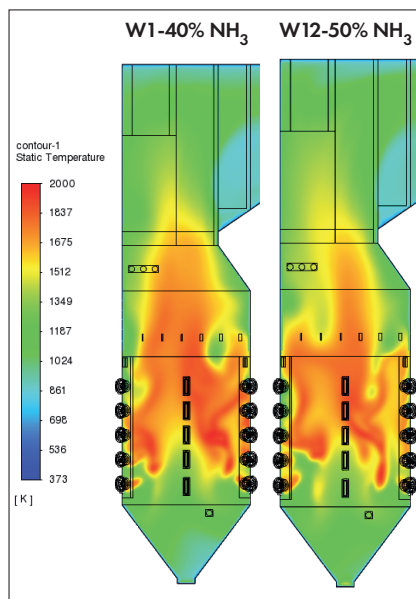
| parametr                        | Ref5ZM   | W9       | W10      | W11      | W1       | W12      |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| udział NH <sub>3</sub> , %      | 0        | 10       | 20       | 30       | 40       | 50       |
| strumień spalin, kg/s           | 252      | 258      | 269      | 277      | 287      | 297      |
| udział masowy CO <sub>2</sub>   | 0,195    | 0,149    | 0,140    | 0,116    | 0,091    | 0,076    |
| strumień CO <sub>2</sub> , kg/s | 49,01    | 38,44    | 37,66    | 32,13    | 26,03    | 22,57    |
| zał. dyspozycyjność, h          | 7000     | 7000     | 7000     | 7000     | 7000     | 7000     |
| strumień CO <sub>2</sub> , kg   | 1,24E+09 | 9,69E+08 | 9,49E+08 | 8,10E+08 | 6,56E+08 | 5,69E+08 |
| en. elektr, MWh                 | 1400000  | 1400000  | 1400000  | 1400000  | 1400000  | 1400000  |
| wskaźnik emisji, kg/MWh         | 882      | 692      | 678      | 578      | 469      | 406      |



**Rys. 5**  
**Profile temperatur w przekroju poziomym kotła (10÷50% NH<sub>3</sub>; poziom 13m – 1 rząd palników)**  
**Fig. 5 Temperature profiles in the horizontal section of the boiler (10÷50% NH<sub>3</sub>; level 13m – 1st row of burners)**

w procesie spalania (tabela 4). W wariancie W1 z 40% udziałem NH<sub>3</sub> zaobserwowano ponad 50% redukcję emisji CO<sub>2</sub> w porównaniu do wariantu bez współspalania (gdzie paliwem jest wyłącznie węgiel). Oznacza to, że można uzyskać znaczną poprawę efektywności środowiskowej, co ma kluczowe znaczenie w kontekście polityki dekarbonizacji i realizacji celów klimatycznych. Wartości emisji CO<sub>2</sub> przy różnych proporcjach amoniaku wskazują na wysoką skuteczność tego rozwiązania. Przy wtrysku 30% NH<sub>3</sub> emisja CO<sub>2</sub> wynosi około 550 kg/MWh, co już stanowi istotne obniżenie w porównaniu do standardowych kotłów zasilanych paliwami kopalnianymi. Natomiast przy wtrysku 40% NH<sub>3</sub>, emisja CO<sub>2</sub> spada jeszcze bardziej, osiągając poziom 469 kg/MWh, co jest znacząco poniżej wspomnianej granicy 550 kg/MWh.

Porównując wyniki symulacji numerycznych dla wariantów W1 i W12 (rys. 6) wykazuje istotne różnice w profilach tem-



**Rys. 6**  
**Profile temperatur w przekroju pionowym kotła dla 40% NH<sub>3</sub> i 50% NH<sub>3</sub>**  
**Fig. 6 Temperature profiles in the vertical section of the boiler for 40% NH<sub>3</sub> and 50% NH<sub>3</sub>**

peratur pomiędzy współspalaniem 40% NH<sub>3</sub>, a 50% NH<sub>3</sub>. W przypadku podawania 50% amoniaku obserwuje się rozszerzenie strefy niskotemperaturowej w dolnej części komory paleniskowej w porównaniu z wariantem 40% NH<sub>3</sub>. Skutkuje to redukcją strumienia ciepła docierającego do powierzchni ogrzewalnej leja żużlowego, do 13 MW. W wariancie W12 płomień wyróżnia się wyraźnie skróconą długością i spłaszczonym kształtem, co wpływa na obraz pola temperatury w komorze. Modyfikacja procesu spalania obejmuje nie tylko palniki pierwszego rzędu, ale także oddziałuje na strefę palników drugiego rzędu, gdzie odnotowano spadek temperatury (w porównaniu do wariantu W1). W wariancie 12 nie stwierdzono wzrostu emisji CO, natomiast następuje wzrost zawartości części palnych w popiele do wartości 5,7% oraz wzrost emisji NO<sub>x</sub> do wartości 685 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup> w porównaniu z 598 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup> w wariancie W1.

## Podsumowanie

Przeprowadzone symulacje procesu współspalania węgla z NH<sub>3</sub> pozwoliły na sformułowanie następujących głównych wniosków i spostrzeżeń:

- Symulacje numeryczne wykazały możliwość współspalania amoniaku w istniejącej konstrukcji układu paleniskowego kotła energetycznego OP-650. Palniki wirowe charakteryzują się wysoką stabilnością spalania, nawet przy obniżonym współczynniku nadmiaru powietrza w pasie palnikowym. Z punktu widzenia realizacji procesu współspalania, korzystna jest również ich lokalizacja w ściętych narożach komory paleniskowej. Dodatkowo, usytuowanie palników pyłowych jeden nad drugim powoduje również wzajemną ich stabilizację. Powyższe czynniki ułatwiają reorganizację procesu spalania, gdy amoniak (paliwo w stanie gazowym) jest wprowadzany do kotła energetycznego pierwotnie zaprojektowanego do spalania paliwa stałego.
- Najkorzystniejszym spośród przeanalizowanych sposobem podawania amoniaku do kotła jest jego wtrysk poprzez istniejące palniki (do dolnych rzędów palników – pierwszy lub drugi rząd) poprzez dysze powietrza trzeciego. Taka lokalizacja zapewnia najniższe wartości emisji NO<sub>x</sub> na wylocie z komory paleniskowej, która przy współspalaniu 40% energetycznie amoniaku wynosiła 598 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup> przy pracy pierwszego rzędu palników.

Wyniki symulacji różnych wariantów lokalizacji wtrysku, konfiguracji pracujących zespołów młynowych oraz zmiennego obciążenia kotła wykazują spójną tendencję wskazującą na korzystny wpływ wtrysku amoniaku przez dolne rzędy palników na profile temperatur w komorze paleniskowej oraz emisję  $\text{NO}_x$ . Powyższe ma jednak zastosowanie do pracy kotła przy 100% obciążenia. Zmniejszenie obciążenia kotła przy wysokim udziale amoniaku podawanego do palników I rzędu może stwarzać ryzyko wystąpienia niestabilnego spalania w komorze paleniskowej wraz z obniżeniem uzyskiwanych temperatur spalin na wylocie z komory paleniskowej.

- Współspalanie amoniaku w ilości 40% energetycznie pozwala na znaczne obniżenie emisji  $\text{CO}_2$  z kotła i osiągnięcie wskaźnika emisji  $\text{CO}_2$  poniżej 550 kg/MWh, kluczowego parametru umożliwiającego eksploatację kotła z punktu widzenia limitu emisyjności obowiązującego w Polsce od 2025 roku. Jest to szczególnie istotne z perspektywy współczesnej polityki transformacji energetycznej, która wymaga stopniowego ograniczania wykorzystania węgla oraz intensyfikacji poszukiwań alternatywnych, mniej emisyjnych paliw.
- Dla wariantów z udziałem amoniaku 50% energetycznie zaobserwowano pogorszenie parametrów pracy kotła w porównaniu z pozostałymi wariantami. Tym samym rekomendowaną granicą ilości  $\text{NH}_3$  do kotła w tym przypadku jest 40% pod warunkiem pracy kotła na maksymalnym obciążeniu. Podawanie większej ilości intensy-

fikuje niekorzystne efekty procesu spalania, które są już zauważalne w wariantach współspalania 40%  $\text{NH}_3$ , a które uznaje się za jeszcze akceptowalne.

- Aby zapewnić efektywny przebieg procesu współspalania amoniaku, konieczne jest precyzyjne kontrolowanie ilości powietrza dostarczanego do poszczególnych palników. Podawanie  $\text{NH}_3$  do palników powinno odbywać się w reżimie podstechiometrycznym, korzystnie w przedziale 0,8÷0,9, co pozwala na ograniczenie powstawania tlenków azotu podczas spalania.

Wyniki obliczeń mają zastosowanie do analizowanej, konkretnej instalacji paleniskowej. Zarówno maksymalna, dopuszczalna ilość  $\text{NH}_3$ , jak również miejsce wtrysku powinno być każdorazowo zoptymalizowane i dostosowywane do specyfiki danej instalacji paleniskowej i rodzaju stosowanego paliwa. W kotłach typu OP-650 wyposażonych w inne palniki pyłowe, dodatkowo pracujące w układzie naściennym, z innym systemem dystrybucji powietrza i opalanych innymi typami węgla, efekty współspalania  $\text{NH}_3$  mogą się znacząco różnić.

Artykuł powstał na podstawie badań uzyskanych z projektu NFOŚiGW w ramach programu priorytetowego nr 8.1.1 pt. „Analiza potencjału wykorzystania amoniaku jako nośnika wodoru w celu redukcji śladu węglowego polskich jednostek wytwórczych energetyki przemysłowej i zawodowej”.

#### BIBLIOGRAFIA

[1] Hookyung Lee, Min-Jung Lee, Recent Advances in Ammonia Combustion Technology in Thermal Power Generation System for Carbon

Emission Reduction, *Energies* 2021, 14(18),5604.

- [2] Liu, M., Chen, S., Zhu, H., Zhou, Z., & Xu, J. (2023). Numerical investigation of ammonia/coal co-combustion in a low  $\text{NO}_x$  swirl burner. *Energy*, 282(x), 128358. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128358>
- [3] Lyu, Q., Wang, R., Du, Y., & Liu, Y. (2023). Numerical study on coal/ammonia co-firing in a 600 MW utility boiler. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(45), 17293–17310.
- [4] Masato Tamura, Takahiro Gotou, Hiroki Ishii, Dirk Riechelmann, Experimental investigation of ammonia combustion in a bench scale 1.2 MW-thermal pulverised coal firing furnace, *Applied Energy* 277 (2020) 115580.
- [5] Ishihara, S., Zhang, J., & Ito, T. (2020). Numerical calculation with detailed chemistry on ammonia co-firing in a coal-fired boiler: Effect of ammonia co-firing ratio on  $\text{NO}$  emissions. *Fuel*, 274, 117742.
- [6] Mingyu Liu, Sheng Chen, Hongwei Zhu, Zijian Zhou, Jingying Xu, Numerical investigation of ammonia/coal co-combustion in a low  $\text{NO}_x$  swirl burner, *Energy* 282 (2023) 128358
- [7] Wei, D., Zhang, Z., Wu, L., Wang, T., & Sun, B. (2023). Ammonia blend ratio impact on combustion characteristics and  $\text{NO}_x$  emissions during co-firing with sludge and coal in a utility boiler. *Energy*, 283, 129220.
- [8] Zeng, Y., Kweon, J., Kim, G. M., & Jeon, C. H. (2024). Carbon-free power generation strategy in South Korea: CFD simulation for ammonia injection strategies through boiler burner configurations in tangentially fired boiler. *Energy*, 309, 133076.
- [9] Zhang, J., Ito, T., Ishii, H., Ishihara, S., & Fujimori, T. (2020). Numerical investigation on ammonia co-firing in a pulverized coal combustion facility: Effect of ammonia co-firing ratio. *Fuel*, 267, 117166.
- [10] Yin Q, Xiong Z, Zhang Q, – al, Wang Y, Hu – Q, et al. Numerical analysis of flow and combustion of Coal-Ammonia blend in coal-fired furnace. *Engineering Research Express* 2024;6:015511.
- [11] Zhou, C., Wang, Y., Jin, Q., Chen, Q., & Zhou, Y. (2019). Mechanism analysis on the pulverized coal combustion flame stability and  $\text{NO}_x$  emission in a swirl burner with deep air staging. *Journal of the Energy Institute*, 92(2), 298–310.

