

Marta Kowalik<sup>1)</sup>, Monika Zajemska  
Politechnika Częstochowska

## Wykorzystanie metod symulacji numerycznej do efektywnego zarządzania paliwami w aspekcie ekologicznym

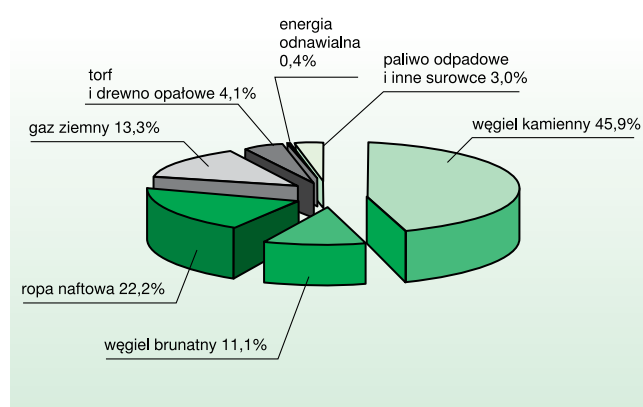
### Application of numerical simulation methods for effective fuel management in an ecological aspect

W ostatnim dziesięcioleciu zauważono znaczną poprawę jakości powietrza atmosferycznego w Polsce. Przyczyniły się do tego liczne międzynarodowe porozumienia, konwencje i protokoły dotyczące zapobiegania i ograniczania emisji zanieczyszczeń. Niemniej jednak nasz kraj na tle krajów Unii Europejskiej zajmuje czołowe miejsce wśród producentów dwutlenku węgla, pyłów oraz tlenków siarki i azotu. To głównie energetyka, oparta na spalaniu węgla, powoduje uwalnianie znaczącej ilości zanieczyszczeń. Przy obecnym tempie wydobywania węgla kamiennego, złóż eksploatowanych i wytypowanych do eksploatacji wystarczy go tylko na najbliższe kilkadziesiąt lat [1,2]. Nie ulega zatem wątpliwości, że w najbliższej przyszłości będą podejmowane coraz to skuteczniejsze działania w kierunku oszczędniejszego spalania paliw oraz poprawy jakości powietrza atmosferycznego.

W niniejszym artykule zaprezentowano ocenę przydatności numerycznego modelowania w prognozowaniu składu chemicznego produktów spalania pod kątem efektywnego zarządzania paliwami w aspekcie ekologicznym. Ponadto wykazano, że optymalny dobór parametrów procesu pozwala na ograniczenie emisji szkodliwych produktów spalania. Dzięki zastosowaniu symulacji numerycznych możliwe jest opracowanie technologii minimalizacji zanieczyszczeń bez prowadzenia długotrwałych i kosztownych eksperymentów. Umożliwiają one również szczegółową analizę powstających w procesie spalania przemian fizykochemicznych, których obserwacja drogą eksperymentalną byłaby niemożliwa [3].

#### Struktura zużycia paliw w Polsce

Najnowsze dane statystyczne GUS pokazują, iż najpopularniejszym i najpowszechniej stosowanym nośnikiem energii w gospodarce narodowej jest węgiel kamienny (rys. 1). Przedstawiona na rysunku 1 struktura wykorzystywania paliw wynika z dostępności surowców energetycznych w Polsce.

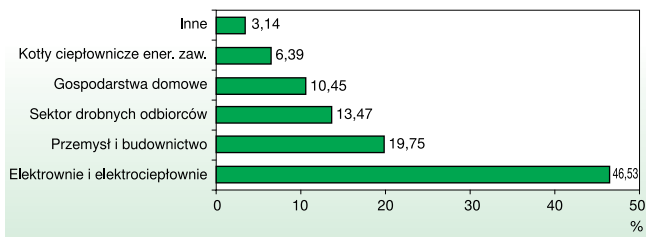


Rys. 1. Zużycie ogółem nośników energii pierwotnej w gospodarce narodowej w 2010 r. [4]

Obecnie szacuje się, że zasoby węgla kamiennego utrzymują się na poziomie ok. 42 mld ton. W Polsce roczne wydobywanie tego paliwa kształtuje się na poziomie ok. 95 mln ton [4].

Na rysunku 2 przedstawiono strukturę zużycia węgla kamiennego w Polsce. Blisko 47% tego paliwa wykorzystywane jest do produkcji energii elektrycznej i ciepłej.

<sup>1)</sup> kowalikm@wip.pcz.pl

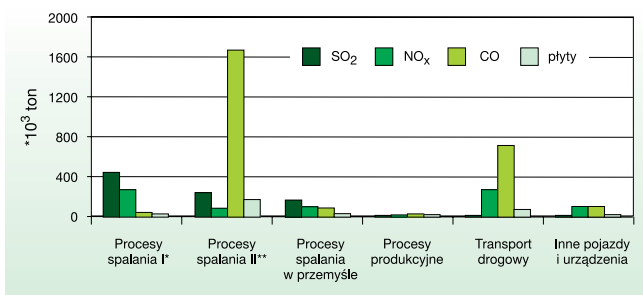


Rys. 2. Struktura zużycia węgla kamiennego w Polsce w 2010 r. [3]

## Procesy spalania a emisja zanieczyszczeń

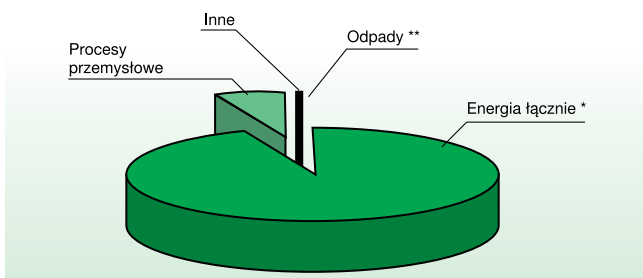
Procesy spalania paliw kopalnych są głównym źródłem skażenia atmosfery.

W strukturze emisji dominują substancje gazowe (ponad 99%) nad emisją pyłów (około 1%). Gazowe związki nieorganiczne to głównie  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  i CO. Wszystkie te składniki spalin można uznać za zanieczyszczające środowisko przyrodnicze. Ilość zanieczyszczeń powietrza według rodzajów działalności przedstawiono na rysunku 3. Jak wynika z rysunku decydujący wpływ na emisję szkodliwych produktów spalania wywierają procesy spalania w sektorze produkcji i transformacji energii oraz w sektorze komunalnym i mieszkaniowym. Procesy te uwalniają do atmosfery znaczące ilości tlenu węgla, dwutlenku siarki oraz tlenków azotu [4-6].



Rys. 3. Emisja głównych zanieczyszczeń powietrza według rodzajów działalności w 2009 r. [4]

Analiza stanu jakości powietrza w Polsce wykazała, że największy udział w emisji zanieczyszczeń stanowi dwutlenek węgla. W roku 2009 w wyniku procesów spalania paliw w celach energetycznych wyprodukowano około 29 200 ton  $\text{CO}_2$ . Na rysunku 4 przedstawiono całkowitą emisję tego zanieczyszczenia według źródeł emisji.



Rys. 4. Całkowita emisja  $\text{CO}_2$  według źródeł emisji w 2009 r. [4]

## Polityka ekologiczna w zakresie zapobiegania i ograniczania emisji zanieczyszczeń

W związku z tym, że proces spalania jest zjawiskiem powszechnym jego oddziaływanie na środowisko ma znaczący wpływ. Wynika to przede wszystkim z emisji szkodliwych zanieczyszczeń. Procesy energetycznego spalania są głównym źródłem antropogenicznej emisji  $\text{NO}_x$  i  $\text{SO}_2$  (75%), CO (70%), pyłów (75%) oraz  $\text{CO}_2$  (90%) [5].

Biorąc pod uwagę fakt szkodliwego oddziaływania produktów spalania należy podejmować działania naprawcze mające na celu poprawę stanu jakości powietrza atmosferycznego.

Strategicznym dokumentem, który określa cele i priorytety ekologiczne wskazując przy tym kierunek działań zmierzających do właściwej ochrony środowiska naturalnego jest polityka ekologiczna państwa. W roku 1991 powstała Pierwsza Polityka Ekologiczna Polski. Dokument ten przyczynił się do poprawy stanu środowiska i podniesienia świadomości ekologicznej społeczeństwa. Jednak po 10 latach jego główne cele i założenia przestały być adekwatne do zmieniającej się rzeczywistości. Przyczyniły się do tego między innymi prywatyzacja gospodarki, decentralizacja władzy, członkostwo w Radzie Europy OECD i NATO oraz podpisanie przez nasz kraj konwencji, protokołów i porozumień dotyczących ochrony środowiska.

W rezultacie, w związku ze zmianą sytuacji społeczno-ekonomicznej, w roku 2000 wydano Drugą Politykę Ekologiczną. Dokument ten dał szansę na uzyskanie dalszej poprawy stanu środowiska naturalnego oraz uzyskanie większych korzyści gospodarczych i społecznych. Jego głównym celem jest zapewnienie bezpieczeństwa ekologicznego społeczeństwa polskiego w XXI wieku oraz stworzenie podstaw dla opracowania i realizacji strategii zrównoważonego rozwoju kraju [7]. Wiodącym założeniem zrównoważonego rozwoju „*jest takie prowadzenie polityki i działań w poszczególnych sektorach gospodarki i życia społecznego, aby zachować zasoby i walory środowiska w stanie zapewniającym trwałe, nie doznające uszkodzenia możliwości korzystania z nich zarówno przez obecne jak i przyszłe pokolenia*” [8].

W związku z tym, iż ochrona powietrza atmosferycznego jest istotnym kierunkiem działań w sferze ochrony środowiska nowa polityka ekologiczna określa szczegółowe cele, a mianowicie [7,8]:

- zwiększenie liczby zanieczyszczeń objętych przeciwdziałaniem mającym zmniejszyć lub ograniczyć ich emisję i niekorzystne oddziaływanie na środowisko;
- konsekwentne przechodzenie na likwidację zanieczyszczeń u źródła, poprzez zmiany nośników energii, stosowanie czystszych surowców i technologii oraz minimalizację zużycia energii i surowców;
- coraz szersze normowanie emisji w przemyśle, energetyce i transporcie;
- wprowadzanie norm produktowych ograniczających emisję do powietrza zanieczyszczeń w rezultacie pełnego cyklu życia produktów i wyrobów.

## Prognozowanie emisji zanieczyszczeń z wykorzystaniem metod numerycznych

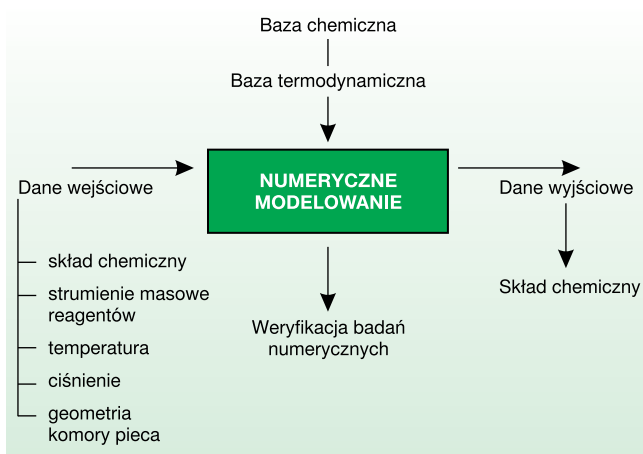
Procesy spalania paliw stałych są dużo bardziej złożone od spalania paliw gazowych czy ciekłych. Komplikuje je różnorodność zjawisk fizykochemicznych. Zastosowanie symulacji numerycznych jest niezwykle skutecznym narzędziem pozwalającym na ich zrozumienie i głębsze poznanie. Stanowią one bowiem połączenie teorii i eksperymentów. Pomagają w planowaniu doświadczeń, umożliwiając analizę zjawisk trudnych do obserwacji. Ponadto symulacje komputerowe pozwalają na rozwiązywanie problemów, których nie można zbadać doświadczalnie ze względu na złożoność procesu [9,10].

Zaletą symulacji komputerowych jest to, że eksperyment można wielokrotnie powtarzać zmieniając za każdym razem parametry oraz obserwować i analizować wpływ tych zmian na przebieg zjawiska. Proces tworzenia modelu obiektu lub zjawiska uwzględnia ich rzeczywiste parametry zastosowane w odpowiedniej skali. Wyniki obliczeń numerycznych zależą od warunków początkowych i brzegowych, jakie zostały zaimplantowane dla modelu.

Modelowanie numeryczne z zakresu analizy procesów spalania pozwala na przewidywanie szkodliwych dla środowiska substancji. Przy ich użyciu można również opracować technologię minimalizacji zanieczyszczeń. Z modelowania numerycznego korzysta się mając na celu optymalizację pracy urządzeń grzewczych oraz procesów produkcyjnych poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu spalania. Dzięki zastosowaniu symulacji numerycznych można zaoszczędzić czas, pieniądze oraz osiągnąć korzystne efekty dla środowiska [11-13].

Popularnym narzędziem wykorzystywanym do modelowania składu chemicznego produktów spalania jest stosowany na całym świecie program CHEMKIN. Umożliwia on rozwiązywanie złożonych problemów z zakresu kinetyki chemicznej. Analiza numeryczna przeprowadzona za pomocą tego programu daje pełny obraz powstających w procesie spalania zanieczyszczeń, których oszacowanie drogą eksperymentalną byłoby niemożliwe [14-16].

Na rysunku 5 przedstawiono schemat procedury numerycznego modelowania za pomocą programu CHEMKIN.



Rys. 5. Schemat procedury numerycznego modelowania

## Metodyka obliczeniowa

Skład chemiczny produktów spalania węgla kamiennego obliczono przy użyciu programu CHEMKIN. Wybór paliwa podyktowany był faktem, że w chwili obecnej węgiel kamienny jest najbardziej rozpowszechnionym i najczęściej stosowanym nośnikiem energii. Skład chemiczny paliwa (tab. 1) zaczerpnięto z jednej z kopalni znajdującej się na terenie naszego kraju.

Tabela 1

Analiza elementarna paliwa

| Paliwo          | c    | h   | n   | s   | o   | w   | a   |
|-----------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 | %    |     |     |     |     |     |     |
| Węgiel kamienny | 75,5 | 4,3 | 1,2 | 1,2 | 5,9 | 3,1 | 8,6 |

W związku z tym, że efektywność procesu spalania zależy przede wszystkim od wartości stosunku nadmiaru powietrza oraz temperatury spalania, obliczenia numeryczne wykonano dla [17]:

- zmiennej wartości stosunku nadmiaru powietrza ( $\lambda$ ) w zakresie 1,1-1,5 z krokiem co 0,5,
- różnych wartości temperatury spalania od 800 do 1800K.

Obliczenia przeprowadzono dla 2,052 kg węgla, tj.:

$$G = 2,052 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (1)$$

W celu wyznaczenia strumienia powietrza spalania przeprowadzono obliczenia rachunkowe na podstawie znanych zależności, a mianowicie:

$$V_{o \min} = 22,71 \cdot \left( \frac{c}{12} + \frac{s}{32} + \frac{h}{4} - \frac{o}{32} \right) \left[ \frac{\text{m}^3 \text{O}_2}{\text{kg}_w} \right] \quad (2)$$

$$V_{a \min} = \frac{V_{o \min}}{x_{\text{O}_2}} \left[ \frac{\text{m}^3 \text{pow}}{\text{kg}_w} \right] \quad (3)$$

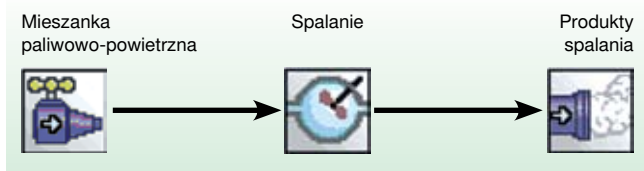
$$V_{arz} = \lambda \cdot V_{a \min} \left[ \frac{\text{m}^3 \text{pow}}{\text{kg}_w} \right] \quad (4)$$

gdzie:

- $V_{o \min}$  – minimalne zapotrzebowanie tlenu do spalania,
- $V_{a \min}$  – minimalne zapotrzebowanie powietrza spalania,
- $V_{arz}$  – rzeczywiste zapotrzebowanie powietrza spalania.

Obliczenia przeprowadzono dla reaktora idealnego wymieszania (PSR- Perfectly Stirred Reactor) opierając je na zmodyfikowanym mechanizmie GRI- Mech 3.0 obejmującym 152 reakcje

chemiczne oraz 46 pierwiastków i związków chemicznych. Skład chemiczny paliwa i powietrza wyrażono w udziałach masowych. Strumienie powietrza i paliwa wyrażono za pomocą strumieni masowych [kg/s] i wprowadzono je do programu jako mieszankę paliwowo-powietrzną (rys. 6).



Rys. 6. Schemat procedury modelowania z użyciem reaktora PSR

Do obliczeń numerycznych przyjęto następujące parametry:

- ciśnienie 1 atm.,
- czas przebywania 100s,
- temperatura spalania 800-1800K,
- temperatura powietrza 300°C.

Wybrane dane niezbędne do przeprowadzenia procedury modelowania, a mianowicie strumienie masowe reagentów oraz udziały masowe substratów przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Dane wejściowe do procedury modelowania dla różnych wartości  $\lambda$

| $\lambda$ | $\dot{m}_{\text{reag}}^{-1}$ | c      | h        | s        | n        | o        | w          |
|-----------|------------------------------|--------|----------|----------|----------|----------|------------|
| 1,10      | 0,00680                      | 0,0634 | 0,003603 | 0,001005 | 0,724819 | 0,197349 | 0,00259721 |
| 1,15      | 0,00709                      | 0,0609 | 0,003459 | 0,000965 | 0,727425 | 0,197855 | 0,00249337 |
| 1,20      | 0,00737                      | 0,0585 | 0,003326 | 0,000928 | 0,729830 | 0,198322 | 0,00239751 |
| 1,25      | 0,00765                      | 0,0564 | 0,003202 | 0,000894 | 0,732058 | 0,198754 | 0,00230875 |
| 1,30      | 0,00794                      | 0,0544 | 0,003088 | 0,000862 | 0,734126 | 0,199156 | 0,00222633 |
| 1,35      | 0,00822                      | 0,0525 | 0,002982 | 0,000832 | 0,736052 | 0,199529 | 0,00214959 |
| 1,40      | 0,00850                      | 0,0507 | 0,002882 | 0,000804 | 0,737850 | 0,199878 | 0,00207797 |
| 1,45      | 0,00879                      | 0,0491 | 0,002789 | 0,000778 | 0,739531 | 0,200205 | 0,00201096 |
| 1,50      | 0,00907                      | 0,0476 | 0,002702 | 0,000754 | 0,741108 | 0,200511 | 0,00194814 |

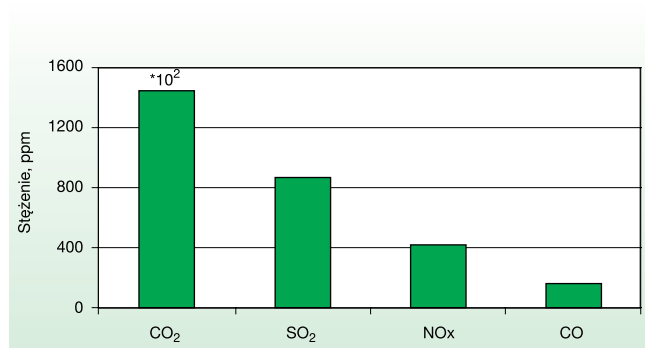
$\dot{m}_{\text{reag}}$  – strumień masowy mieszaniny powietrze + paliwo

## Dyskusja wyników obliczeń

Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły na określenie składu chemicznego produktów spalania węgla kamiennego. Przykładowe wyniki symulacji przedstawiono w postaci zrzutu ekranu na rysunku 7.

Przeprowadzona analiza wykazała, że w procesie spalania węgla kamiennego powstaje kilkadziesiąt związków chemicznych. Większość z nich występuje w śladowych ilościach, dlatego dalszym rozważaniom poddano cztery podstawowe produkty spalania, a mianowicie dwutlenek węgla, dwutlenek siarki, tlenki azotu oraz tlenek węgla.

Dla zobrazowania wyników obliczeń główne produkty spalania przedstawiono na rysunku 8.



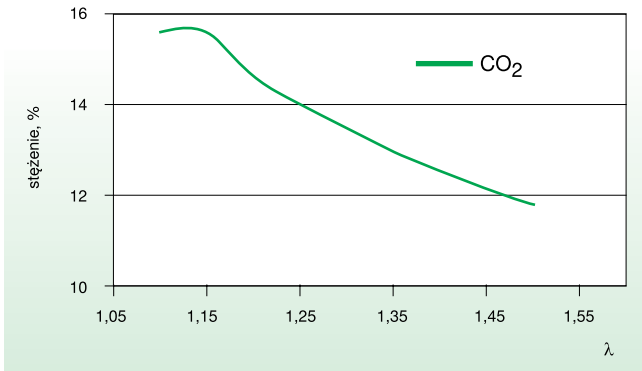
Rys. 8. Stężenie głównych produktów spalania węgla kamiennego ( $\lambda = 1,2$ )

Na rysunkach 9–12 zobrazowano zmiany stężenia wybranych produktów spalania węgla w zależności od wartości stosunku nadmiaru powietrza ( $\lambda$ ) dla stałej wartości temperatury równej 1000 K.

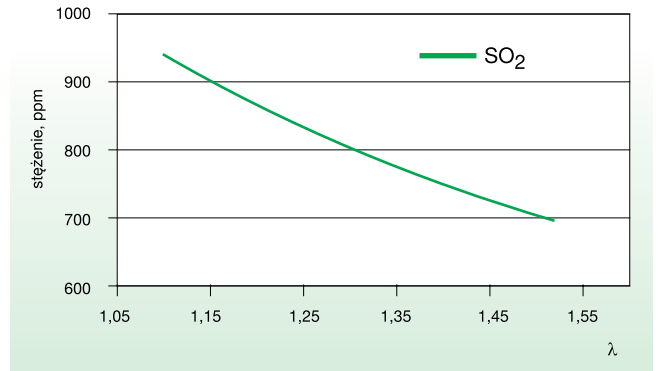
### EXIT GAS PHASE MOLE FRACTIONS

|      |              |       |              |      |              |
|------|--------------|-------|--------------|------|--------------|
| H2   | = 1.1709E-05 | H     | = 2.8840E-06 | O2   | = 1.4035E-02 |
| O    | = 8.9287E-06 | OH    | = 2.9006E-05 | HO2  | = 8.2790E-07 |
| H2O  | = 5.3272E-02 | N     | = 1.0983E-07 | N2   | = 0.7858     |
| NO   | = 3.7219E-04 | NH    | = 1.8549E-10 | NH2  | = 2.6264E-10 |
| NH3  | = 1.0972E-09 | HNO   | = 2.0852E-08 | NO2  | = 1.6837E-06 |
| N2O  | = 2.6809E-05 | CO2   | = 0.1454     | CO   | = 1.6813E-04 |
| CH   | = 4.1833E-14 | HCO   | = 9.3413E-12 | C    | = 5.8114E-10 |
| CN   | = 1.4022E-10 | HCNO  | = 4.7827E-18 | HCN  | = 2.6248E-06 |
| HOCN | = 3.3854E-09 | HNCO  | = 1.5052E-08 | NCO  | = 2.6841E-09 |
| S    | = 4.2242E-11 | SH    | = 4.4327E-14 | H2S  | = 6.7068E-17 |
| SO   | = 4.1502E-09 | SO2   | = 8.6523E-04 | SO3  | = 5.6392E-10 |
| HSO2 | = 1.6160E-33 | SN    | = 1.3658E-15 | S2   | = 8.2281E-19 |
| CS   | = 1.8549E-28 | COS   | = 2.3345E-20 | HSNO | = 0.000      |
| HSO  | = 4.7358E-15 | HOS   | = 1.9027E-16 | HSOH | = 3.2177E-10 |
| H2SO | = 1.6484E-14 | HOSHO | = 8.0336E-13 | HS2  | = 5.3236E-23 |
| H2S2 | = 1.5574E-33 |       |              |      |              |

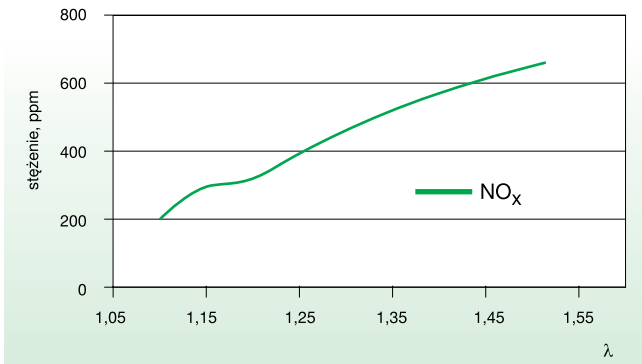
Rys. 7. Zrzut ekranu pliku wynikowego procedury modelowania składu chemicznego produktów spalania węgla dla  $\lambda = 1,2$  i temperatury 1000 K



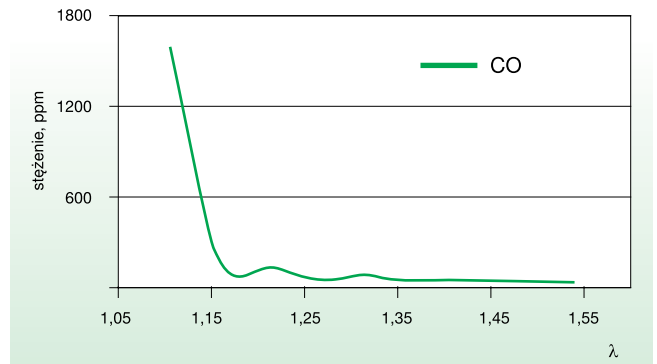
Rys. 9. Stężenie  $\text{CO}_2$  w zależności od wartości stosunku nadmiaru powietrza  $\lambda$ .



Rys. 10. Stężenie  $\text{SO}_2$  w zależności od wartości stosunku nadmiaru powietrza  $\lambda$ .



Rys. 11. Stężenie NO w zależności od wartości stosunku nadmiaru powietrza  $\lambda$ .



Rys. 12. Stężenie CO w zależności od wartości stosunku nadmiaru powietrza  $\lambda$ .

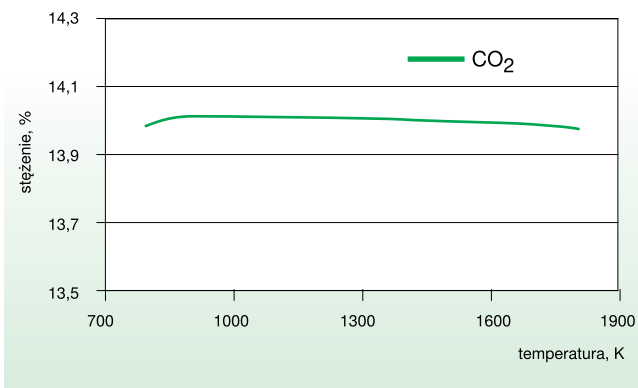
Z przeprowadzonej analizy wynika, że stężenia poszczególnych produktów spalania silnie zależą od wartości stosunku nadmiaru powietrza spalania ( $\lambda$ ). Udział  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  i CO maleje wraz ze wzrostem  $\lambda$ , natomiast stężenie NO w spalinach rośnie.

W ramach badań wykonano również obliczenia numeryczne składu chemicznego produktów spalania dla stałej wartości  $\lambda = 1,25$ , czasu przebywania 100 s, ciśnienia 1 atm, ale zmiennych wartości temperatury w zakresie 800–1800 K, z krokiem co 100 K.

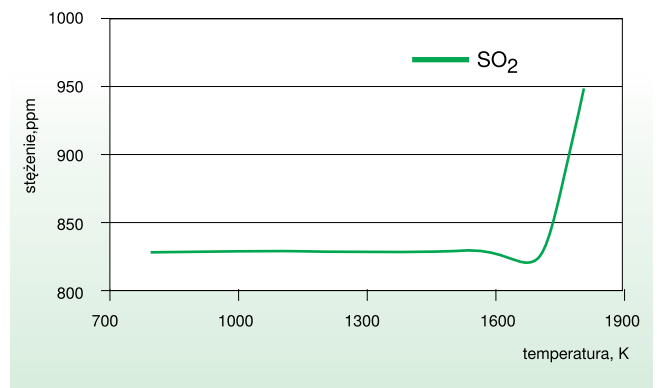
Wybrane produkty spalania przedstawiono na rysunkach 13-16.

Uzyskane wyniki badań wykazały, że temperatura spalania ma istotny wpływ na formowanie zanieczyszczeń. Wraz ze wzrostem temperatury rośnie stężenie  $\text{NO}_x$ . Stężenie CO w zakresie 800–1200 K maleje, przy temperaturze 1300K rośnie, natomiast w temperaturze 1800K osiąga wartość najwyższą.

Z rysunków 14–15 wynika, że istnieje pewien obszar temperatur (800–1600 K), w którym stężenia  $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_x$  są niewielkie. W przypadku tlenków azotu można zaobserwować gwałtowny wzrost stężenia powyżej temperatury 1600 K (do wartości 220 ppm), co ma związek z termicznym mechanizmem formowania się

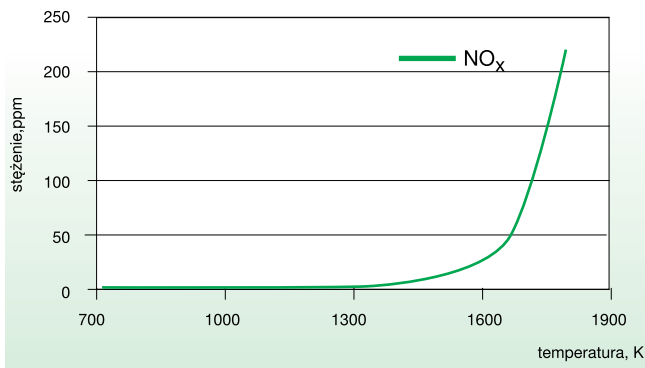


Rys. 13. Stężenie  $\text{CO}_2$  w zależności od temperatury

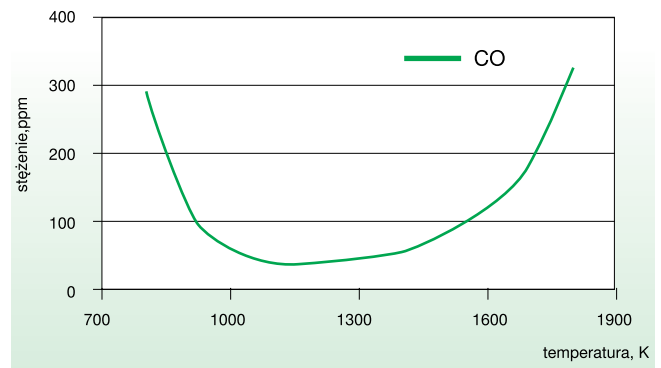


Rys. 14. Stężenie  $\text{SO}_2$  w zależności od temperatury





Rys. 15. Stężenie NO w zależności od temperatury



Rys. 16. Stężenie CO w zależności od temperatury

$\text{NO}_x$ . Podobną sytuację można zaobserwować dla  $\text{SO}_2$  (rys. 14). Powyżej 1700 K stężenie dwutlenku siarki zaczyna gwałtownie wzrastać osiągając w temperaturze 1800 K wartość równą 950 ppm.

Dogłębnej analizie należałoby poddać mechanizm formowania CO. Z rysunku 16 wynika, że istnieje pewien zakres temperatur (800–1300 K), w którym stężenie CO maleje, po czym po przekroczeniu temperatury 1300 K zaczyna ponownie przyrastać.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania dowodzą, że wykorzystanie metod numerycznych w efektywnym zarządzaniu paliwami ma istotne znaczenie. Dzięki ich zastosowaniu można dobrać takie parametry procesu spalania, jak wartość stosunku nadmiaru powietrza ( $\lambda$ ) czy temperatura, które pozwolą zminimalizować ilość formowanych zanieczyszczeń.

Z punktu widzenia ograniczania stężenia  $\text{CO}_2$  i  $\text{SO}_2$  korzystne jest prowadzenie procesu spalania przy  $\lambda = 1,3$  (rys. 9–10), gdyż można wtedy osiągnąć 50-procentową redukcję tych zanieczyszczeń. Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż spalanie węgla kamiennego ze stosunkiem nadmiaru powietrza spalania poniżej 1,15 jest niekorzystne, ze względu na wysokie stężenie CO (rys. 12).

Na formowanie się tlenku azotu istotny wpływ ma temperatura w komorze spalania. Im wyższa temperatura spalania, tym wyższe stężenie  $\text{NO}_x$  (rys. 15).

Prowadząc proces spalania w zakresie 800–1200 K można zauważyć, że ilość CO maleje, po czym od temperatury 1300 K rośnie (rys. 16). Biorąc pod uwagę powyższe rozważanie należy przeprowadzić dodatkowe obliczenia, w których wydłużony zostanie czas przebywania, co w rezultacie pozwoli na dopalenie tlenku węgla. Ograniczenie CO w obszarze wysokich temperatur można również osiągnąć doprowadzając dodatkowe powietrze.

## LITERATURA

- [1] <http://finanse.wp.pl>
- [2] Lorenz U.: „Skutki spalania węgla kamiennego dla środowiska przyrodniczego i możliwości ich ograniczania”. Mat. Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Sympozja i Konferencje nr 64. Wyd. Instytut GSMiE PAN. Kraków 2008. s. 97-112

- [3] Kowalik M., Kieloch M Krawczyk E.: „Spalanie węgla kamiennego a środowisko naturalne”. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej”. Seria: Materiały Konferencyjne nr 2. Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2010, s. 495-498
- [4] <http://www.stat.gov.pl>
- [5] <http://www.czestochowa.energiainrodowisko.pl>
- [6] Ney R., Blaschke W., Lorenz U., Gawlik L.: „Węgiel kamienny jako źródło czystej energii w Polsce”. Międzynarodowa Konferencja „Przyszłość węgla w gospodarce świata i Polski”. Wyd. GIPH. Katowice 2004, s. 224-240
- [7] <http://www.mos.gov.pl>
- [8] Uchwała Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 22 maja 2009 r. w sprawie przyjęcia dokumentu „Polityka ekologiczna Państwa w latach 2009–2012 z perspektywą do roku 2016”
- [9] Adamczuk M., Szećówka L., Radomiak H.: „Zastosowanie metod numerycznych w ochronie powietrza atmosferycznego”. Archiwum Spalania 2009, nr 1-2, s. 13-23
- [10] Adamczuk-Poskart M.: „Przewidywanie składu chemicznego produktów spalania w piecach grzewczych z wykorzystaniem programu CHEMKIN- PRO”. Hutnik 2010, s. 103-105
- [11] Adamczuk-Poskart M.: „Możliwości zastosowania metod symulacji komputerowej do modelowania procesów spalania”. Hutnik 2010, s. 736-739
- [12] Tarnowski W., Bartkiewicz S.: „Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa”. Wyd. Feniks, Koszalin 1998
- [13] Miller J.D., Bowman C.T.: „Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion”. Progress in Energy and Combustion Science 1989, s. 287-338
- [14] Evlampiev A.: „Numerical combustion modeling for complex reaction systems”, Proefschrift Technische Universitet. Eindhoven 2007
- [15] Beer J.M.: „Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges”. Progress in Energy and Combustion Science 26 (2000), 301–327
- [16] Zajemska M., Radomiak H.: „Analiza ekonomiczno-ekologiczna energetycznego wykorzystania wybranych paliw”. Rynek Energii 2011, nr 6, s. 31-37
- [17] Kowalik M., Warwas E., Krawczyk E.: „Wpływ wybranych parametrów spalania węgla kamiennego na emisję zanieczyszczeń”. XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej”, Seria: Materiały Konferencyjne. Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2012, s. 48-52

