



Modelowanie i badania procesu zapłonu chmury pyłowo-powietrznej

Wojciech Moroń^{a,*}

^a Katedra Technologii Energetycznych, Turbin i Modelowania Procesów Ciepłno-Przepływowych

*wojciech.moron@pwr.edu.pl, tel. 42-68

STRESZCZENIE

Celem pracy było poznanie wpływu rodzaju atmosfery na proces zapłonu paliwa i stabilność płomienia pyłowo-gazowego. W badaniach wykorzystano trzy węgle kamienne oraz dwa węgle brunatne, dla których wykonano oznaczenia analizy fizykochemicznej, jak również wyznaczono czas indukcji zapłonu chmury pyłowo-powietrznej. Program badań obejmował wiele różnych aspektów zjawiska zapłonu paliwa, w tym: modelowanie zjawiska zapłonu, wpływ temperatury, wpływ rozmiaru ziaren, wpływ rodzaju atmosfery (powietrze/O₂/CO₂), wpływ udziału O₂ (5-30%) w atmosferze O₂/CO₂. Przeprowadzone badania uwiaryściły, że zapłon paliwa powiązany jest ze stopniem jego uwęglenia, temperaturą i typem atmosfery, w której zachodzi. Zapłon węgla kamiennych jest bardziej utrudniony niż węgla brunatnych, w celu jego polepszenia należy zastosować m.in. wyższe stężenia tlenu, wyższe koncentracje pyłu, drobniejszy przemiał pyłu lub wyższe temperatury otoczenia. Rodzaj gazu (N₂, CO₂), z którym mieszano tlen, miał zasadniczy wpływ na wartości charakterystyk zapłonu. Dla wszystkich badanych węgla czasy indukcji zapłonu chmury pyłowej oznaczone w atmosferze powietrza były krótsze od tych mierzonych w oxy. Przedstawione badania wykazały, że dla stabilności płomienia oraz parametrów zapłonu podstawowe znaczenie ma właściwa pojemność cieplna i gęstość głównych gazów tworzących mieszaninę z tlenem.

SŁOWA KLUCZOWE: *zapłon pyłowo-powietrzny, modelowanie zapłonu, oxy*

1. WPROWADZENIE

Problem emisji CO₂ jest nierozłącznie związany z użytkowaniem węgla, jakkolwiek modyfikowanie paliwa, konwersja na paliwo ciekłe lub gazowe zawsze powoduje emisję CO₂ do atmosfery. Rozwiązaniem problemu jest prowadzenie procesu spalania w układzie Carbon Capture & Storage (CCS) lub w atmosferze tlenu (OXY-FUEL) [1–3]. Jeżeli układy CCS bazują na konwencjonalnym układzie spalania paliwa, zintegrowanym z wychwytem CO₂ ze spalin za kotłem, to układy OXY-FUEL realizują proces spalania w atmosferze czystego tlenu. Reorganizacja procesu spalania i zastąpienie

azotu dwutlenkiem węgla w komorze spalania powoduje, że proces ten jest zagadnieniem nowym wymagającym poznania. Aby obniżyć wysoką temperaturę związaną ze spalaniem pyłu węglowego w czystym tlenie, rozważanych jest kilka możliwości recyrkulacji spalin, które w przypadku ich zastosowania będą miały znaczący wpływ na warunki procesu spalania. Z przeprowadzonych doświadczeń [1–3] wynika, że obecność CO₂ w mieszaninie z tlenem, w porównaniu do zapłonu w atmosferze powietrza, opóźniała zapłon węgla i koksu. Natomiast obecność CO₂ w procesie spalania ma pomijalny wpływ na czas trwania odgazowania części lotnych niezależnie od rodzaju atmosfery. Wpływ CO₂ na zapłon cząstek węgla w porównaniu do N₂, tłumaczony jest innymi wartościami ciepła właściwego tych gazów. Wpływ stężenia tlenu na zapłon cząstek wyjaśniany jest również oddziaływaniem O₂ na lokalną reaktywność mieszaniny [5–7]. Odgazowanie cząstek przebiega szybciej dla większych stężeń O₂ i obniża się wraz ze zwiększaniem udziału CO₂. Oba te czynniki mają wpływ na szybkość dyfuzji tlenu i części lotnych. CO₂ wpływa na spadek szybkości odgazowania z powodu mniejszej szybkości dyfuzji masy części lotnych w mieszaninie z CO₂, podczas gdy wyższe stężenia O₂ zwiększają strumień masy tlenu dostarczanego do płomienia części lotnych otaczających cząstkę węglową [8, 9]. Dzięki temu zwiększa się temperatura gazu w otoczeniu cząstki i tym samym zwiększa się szybkość odgazowania [10, 11].

2. TEORIA ZAPŁONU PALIW STAŁYCH

Teoria zapłonu cieplnego pozwala analizować zachowanie się chmury pyłowej lub pojedynczej cząstki węgla od momentu umieszczenia ich w powietrzu, w nagrzanym do określonej temperatury piecu, do chwili zapłonu. Model matematyczny jest opisany przez równania bilansu ciepła, masy i równanie szybkości reakcji utleniania. Równania bilansu energii uwzględniają wymianę ciepła na drodze konwekcji między pyłem i atmosferą gazową chmury oraz między chmurą i jej otoczeniem gazowym. Uwzględniona jest też wymiana ciepła na drodze promieniowania. W modelu przyjęto założenia [4, 13]:

- chmura pyłu ma kształt kulisty, zmiany w czasie średnicy chmury określone są na podstawie badań wizualizacyjnych na modelu komory pieca, cząstki węgla w chmurze są tego samego wymiaru;
- temperatura cząstek węgla zależy od czasu przebywania cząstki w strefie podwyższonej temperatury i ma stałą wartość wzdłuż średnicy ziarna;
- szybkość utleniania węgla zależy od stężenia tlenu, produktem utleniania jest CO₂.

W modelu wykorzystuje się następujące równania, z których określa się temperaturę cząstki i bieżącą średnicę ziaren oraz temperaturę gazu [4]:

1. równania bilansu ciepła:

1.1 faza stała:

$$m_s c_{ps} \frac{dT_s}{dt} = \frac{12}{32} S_s Q c^n k_0 \exp\left(\frac{-E}{R T_s}\right) - \alpha_s S_s (T_s - T_g) - \varepsilon_s \varepsilon_w F \sigma S_s (T_s^4 - T_w^4), \quad (1)$$

1.2 faza gazowa:

$$m_g c_{pg} \frac{dT_g}{dt} = N \alpha_s S_s (T_s - T_g) - \alpha_g S_g (T_g - T_w), \quad (2)$$

2. równanie wypalenia ziaren:

$$\frac{1}{S_s} \frac{dm_s}{dt} = -\frac{12}{32} c^n k_0 \exp\left(\frac{-E}{R T_s}\right), \quad (3)$$

z warunkami początkowymi: $T_s(0) = T_{s,i}, T_g(0) = T_{g,i}, m_s(0) = m_{s,i}$.

W podanych równaniach przyjęto następujące oznaczenia: m_s [kg] – masa cząstki o średnicy d (m), c_p – ciepło właściwe [J/kg·K], Q – ciepło reakcji [J/kg], k_0 – stała szybkości reakcji [$m^{3n-2}/kg^{n-1} s$], E – energia aktywacji [J/mol], R – stała gazowa [mol·K/J], c – stężenie tlenu w otaczającym gazie [kg/m^3], T – temperatura [K], S – powierzchnia [m^2], α_s – współczynnik przejmowania ciepła między cząstkami i gazem [$W/m^2\cdot K$], α_g – współczynnik przejmowania ciepła między chmurą i otoczeniem [$W/m^2\cdot K$], ε – emisyjność (-), indeksy dolne s, g, i w oznaczają odpowiednio: cząstkę, gaz i ścianę pieca, σ – stała Stefana-Boltzmana [$W/m^2\cdot K^4$], N – liczba cząstek w chmurze, F – współczynnik opromieniowania ziaren w chmurze (-).

Współczynnik opromieniowania ziaren w chmurze wyznaczony jest z następującego wzoru:

$$F = \exp\left(-\frac{3\rho_d L}{2\rho_s d}\right), \quad (4)$$

gdzie: ρ_d oznacza koncentrację pyłu (kg/m^3), L – promień chmury (m) i ρ_s – gęstość cząstki (kg/m^3). Za kryterium wystąpienia zapłonu przyjmuje się taki punkt na krzywej zmian temperatury ziaren w czasie, w którym szybkość zmian temperatury ziarna osiąga najwyższą wartość, tj. kiedy:

$$\left. \frac{d^2 T_s}{dt^2} \right|_{t=t_z} = 0, \quad (5)$$

gdzie t_z jest czasem indukcji zapłonu.

Zgodnie z teorią zapłonu warunki zapłonu występują, kiedy szybkości wydzielania ciepła Q_R i odprowadzenia ciepła Q_L są sobie równe oraz kiedy pochodne względem temperatury obu szybkości są równe. Zatem w punkcie zapłonu:

$$Q_R = Q_L, \quad \frac{dQ_R}{dT} = \frac{dQ_L}{dT}. \quad (6)$$

Powyższe równania dla kulistej pojedynczej cząstki paliwa z reakcją n -tego rzędu przyjmują następującą postać:

$$Q \left(\frac{273 c \rho}{T_{gk}}\right)^n \beta k_{0,a} \exp\left(\frac{-E_a}{R_g T_{sk}}\right) = \frac{Nu \lambda_0 (T_g)^{0,75}}{d} (T_s - T_g), \quad (7)$$

$$\frac{Q \left(\frac{273 c \rho}{T_{gk}}\right)^n E_a \beta k_{0,a} \exp\left(\frac{-E_a}{R_g T_{sk}}\right)}{R_g T_{sk}} = \frac{Nu \lambda_0 \left(\frac{T_{gk}}{293}\right)^{0,75}}{d}, \quad (8)$$

gdzie: Q jest ciepłem reakcji, c – stężeniem tlenu, β – współczynnikiem stechiometrycznym i λ – współczynnikiem przewodzenia gazu [J/m/s/K], Nu – liczbą Nusselta. Po uwzględnieniu uproszczeń oraz założeniu, że liczba Nusselta przyjmuje wartość równą

2 równania (7) i (8) zredukują się do pojedynczego równania, które po obustronnym logarytmowaniu przyjmie postać:

$$\ln \left[\frac{(T_{gk})^{2,75+n} 2R_g \lambda_0}{c^n 2,718 \beta Q d 273^n 298^{0,75}} \right] = \ln (E_a k_{0,a}) - \frac{E_a}{T_{gk} R_g}. \quad (9)$$

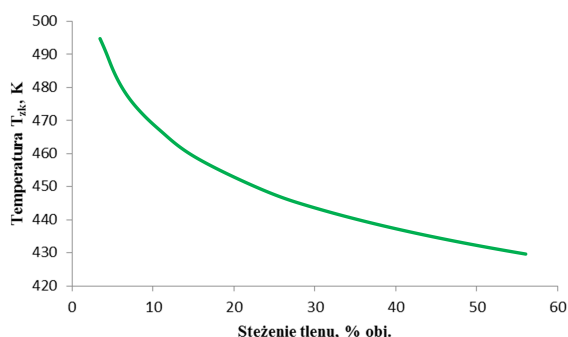
Zgodnie z teorią zapłonu cieplnego warunki krytyczne definiowane są przez rozwiązanie układu równań (1) i (2) w stanie stacjonarnym, tj., kiedy lewe strony równań (1) i (2) równe są zero. Rozwiązanie powyższego układu równań, z pominięciem członu związanego z promieniowaniem cieplnym, określa warunki krytyczne zapłonu chmury cząstek paliwa:

$$\frac{1}{e} = \frac{\frac{12}{32} E Q c r k_0 \exp \left(\frac{-E}{R T_{gk}} \right)}{\lambda R T_{gk}^2} \cdot \left(\frac{3m Nu_s}{4\pi r^2 \rho_s Nu L} + 1 \right), \quad (10)$$

gdzie: r oznacza promień cząstki, T_{gk} – krytyczna temperatura zapłonu, m – masa pyłu, Nu_s – liczba Nusselta dla cząstki, λ – współczynnik przewodzenia ciepła i Nu – liczba Nusselta dla chmury cząstek.

3. OBLICZENIA PARAMETRÓW ZAPŁONU CHMURY PYŁOWO-POWIETRZNEJ

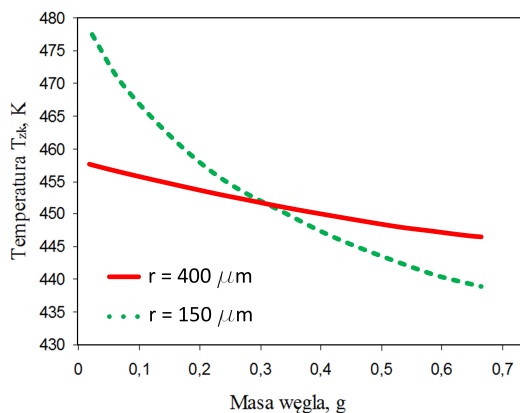
Równanie (10) określa związek między krytyczną temperaturą zapłonu (T_{gk}) a parametrami otoczenia gazowego i własnościami paliwa. Z analizy tej zależności wynika, że dla małych stężeń pyłu oraz dużych rozmiarów cząstek i chmury warunki krytyczne zapłonu odpowiadają warunkom krytycznym zapłonu pojedynczej cząstki. Natomiast, kiedy zwiększa się stężenie pyłu w chmurze, maleją rozmiary cząstek i chmury, wówczas warunki zapłonu odpowiadają zapłonowi chmury pyłowej. Zależność (10) posłużyła do jakościowej interpretacji zależności między krytyczną temperaturą zapłonu chmury pyłowo-gazowej a warunkami otoczenia i parametrami tworzonej chmury. Przykładowo na rysunku 1 pokazane są wyniki obliczeń obrazujące wpływ stężenia utleniacza na krytyczną temperaturę zapłonu (T_{gk}). Ze wzrostem stężenia tlenu



Rys. 1: Zmiana krytycznej temperatury zapłonu w zależności od stężenia tlenu

następuje obniżanie się krytycznej temperatury zapłonu w wyniku intensyfikacji reakcji chemicznej. Charakter zmian jest podobny do przebiegów T_{gk} , uzyskanych podczas badań zapłonu chmury ziaren i zapłonu pojedynczej cząstki.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki obliczeń zależności temperatury zapłonu od stężenia pyłu (masy pyłu w chmurze) i rozmiaru ziaren rozmiarów ziaren. Z przeprowa-

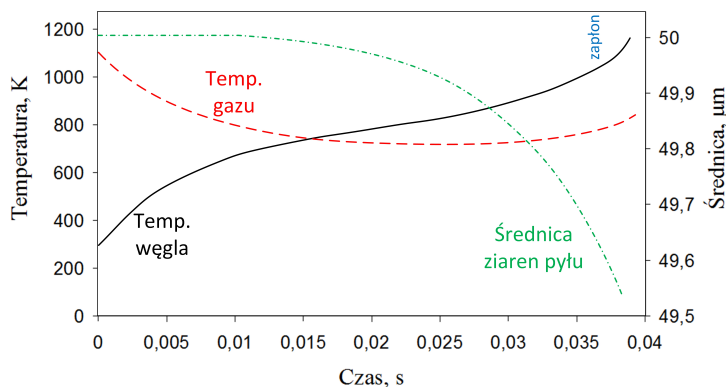


Rys. 2: Zmiany krytycznej temperatury zapłonu w zależności od masy chmury pyłu i wymiaru ziaren (μm) dla stężenia tlenu 21%

dzonych obliczeń wynika, że zwiększenie stężenia pyłu (wzrost masy pyłu) powoduje obniżanie się krytycznej temperatury zapłonu. Przy małej koncentracji pyłu chmura, składająca się z dużych ziaren, ulega zapłonowi w niższych temperaturach, w porównaniu do chmury utworzonej z mniejszych ziaren, co odpowiada zapłonowi pojedynczej cząstki. Dla pojedynczej cząstki czas indukcji zapłonu maleje wraz z obniżaniem się rozmiaru ziaren. Fakt ten związany jest z tym, że wraz ze zmniejszaniem się rozmiaru cząstki poprawiają się warunki wymiany ciepła gaz–cząstka, ale również poprawia się dostęp utleniacza do cząstki węgla. Wraz ze wzrostem stężenia pyłu (masy pyłu) następuje przejście do obszaru zapłonu chmury. Dla chmury pyłu można również zaobserwować, że im mniejszy jest rozmiar ziaren tym krótszy jest czas indukcji zapłonu chmury pyłowo-powietrznej (rys. 3 oraz 4).

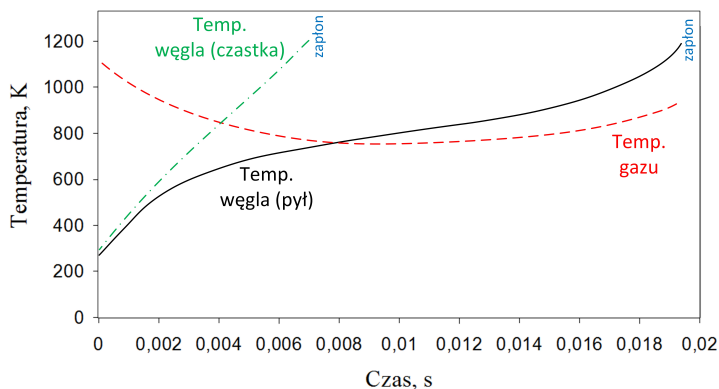
W przedstawionym modelu przyjęto dodatkowe założenia umożliwiające rozwiązanie równań (1)–(3). Jednym z nich było kryterium obliczania ciepła właściwego węgla z użyciem modelu Merricka, jako funkcji temperatury cząstki [14]. W przypadku gazów założono, że wszystkie właściwości fizyczne gazu są funkcją temperatury liczonej jako średnia arytmetyczna z temperatur: gazu w chmurze i powierzchni cząstki. Stałe kinetyczne: energia aktywacji i stała szybkości reakcji, występujące w powyższych równaniach, wyznaczone były dla badanych węgli doświadczalnie. Rozwiązanie równań (1)–(3) z warunkami początkowymi pozwala śledzić historię zmian temperatur otoczenia gazów i pyłu od momentu umieszczenia ziaren pyłu w gorącym powietrzu do chwili zapłonu. Na tej podstawie można wyznaczyć dwie podstawowe charakterystyki zapłonu pojedynczej cząstki i chmury pyłu: temperaturę zapłonu oraz czas indukcji zapłonu. Na rysunkach 3 i 4 przedstawione są wyniki obliczeń uzyskane za pomocą modelu. Na rysunku 3 pokazano zmiany temperatury ośrodka, temperatury cząstek węgla oraz zmiany średnicy cząstek węgla w wyniku reakcji chemicznych. W pierwszym etapie temperatura gazu w piecu obniża się w wyniku przekazywania ciepła do węgla. W wyniku postępującej reakcji chemicznej oraz ogrzewania się węgla od otoczenia ro-

śnie temperatura pyłu, aż do momentu wyrównania się temperatur gazów i węgla. W tym momencie temperatura węgla wzrasta w wyniku przyspieszającej reakcji chemicznej, której efektem jest gwałtowny spadek średnicy ziaren węgla, po czym następuje zapłon. Na rysunku 4 przedstawione jest porównanie przebiegu procesu dla pojedynczej



Rys. 3: Zmiana temperatury otaczających gazów oraz temperatury i wielkości ziaren pyłu do chwili zapłonu. Temperatura pieca 1100 K, stężenie utleniacza 21%, średnica ziaren pyłu 63 μm

cząstki oraz dla chmury pyłu. Znacznie krótszy czas zapłonu pojedynczego ziarna jest wynikiem szybkiego nagrzewania się ziarna od otoczenia (temperatura otoczenia praktycznie nie ulega zmianie), natomiast dla chmury pyłu widoczny jest wyraźny spadek temperatury gazu.



Rys. 4: Zmiana temperatur dla pyłu i pojedynczej cząstki węgla; temperatura pieca 1100 K, stężenie utleniacza 21%, średnica ziaren pyłu 63 μm

4. BADANE PALIWA

W badaniach wykorzystano pięć paliw – trzy węgle kamienne (WK1–KWK Janina, WK2–KWK Sobieski, WK3–KWK Ziemowit) oraz dwa węgle brunatne (WB1–KWB

Turów, WB2–KWK Bełchatów). Dla paliw tych wykonano oznaczenia właściwości chemicznych i fizycznych na podstawie oznaczeń analizy technicznej i elementarnej, a wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1: Analiza techniczna i elementarna badanych paliw (stan analityczny)

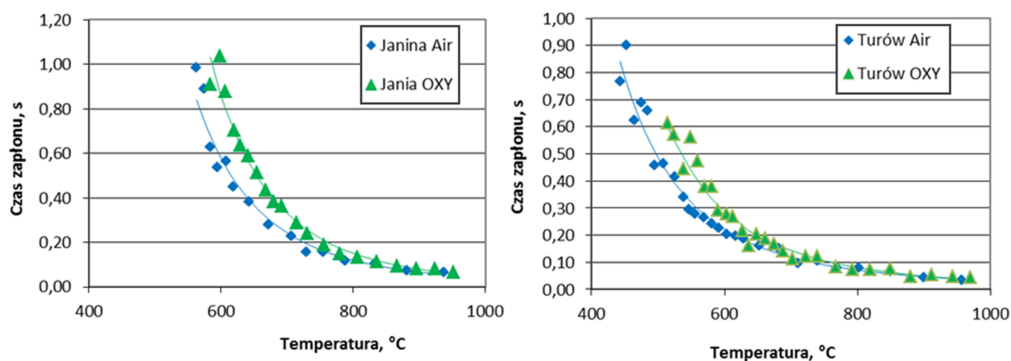
Analiza techniczna						
Paliwa		WK1	WK2	WK3	WB1	WB2
Wilgoć, <i>W</i>		3,1	3,7	2,4	2,0	4,4
Popiół, <i>A</i>	%	8,6	10,4	7,7	17,5	16,1
Części lotne, <i>VM</i>		32,7	33,0	34,9	46,6	44,4
Fixed Carbon, <i>FC</i>	-	55,6	52,9	54,9	33,8	35,0
Fuel Ratio, <i>FR</i>	-	1,7	1,6	1,6	0,7	0,8
Ciepło spalania, <i>Q</i>	MJ/kg	24,7	25,8	27,0	21,7	18,9

Analiza elementarna						
Paliwa		WK1	WK2	WK3	WB1	WB2
Węgiel, <i>C</i>		75,7	76,0	77,1	59,0	55,2
Wodór, <i>H</i>		4,3	4,1	4,6	4,8	4,5
Azot, <i>N</i>	%	1,2	1,2	1,2	0,5	0,6
Siarka, <i>S</i>		1,2	1,6	1,1	1,3	1,8
Tlen (różnicowo), <i>O</i>		5,9	2,9	5,7	14,8	17,4

5. POMIARY PARMETRÓW ZAPŁONU CHMURY PYŁOWO-POWIETRZNEJ

Charakterystyki zapłonu wyznaczano w jednometrowym pionowym piecu opadowym w atmosferze powietrza w zakresie temperatury 350–1050 °C. W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskano charakterystyki zapłonu badanych węgli obejmujące minimalną temperaturę zapłonu (1) oraz czas indukcji zapłonu (2) dla temperatury pieca powyżej krytycznej temperatury zapłonu. Wyniki badań i charakterystyki zapłonu są zgodne z trendami zmian temperatury zapłonu i czasu indukcji zapłonu uzyskanymi w wyniku obliczeń matematycznych. Przeprowadzone pomiary wykazały, że zaproponowany model matematyczny jest poprawny, a zmiany obliczeniowych parametrów zapłonu znalazły odzwierciedlenie w przeprowadzonych pomiarach.

Badania prowadzono dla dwóch atmosfer, atmosfery powietrza – Air i atmosfery OXY – 30%O₂/70%CO₂. Przykładowe wyniki dla badanych paliw przedstawia rysunek 5 oraz tabela 2. Najniższe wartości czasów zapłonu miały węgle brunatne (np. w temperaturze 600 °C czas zapłonu wynosił ok. 0,2 s). Najtrudniej zapalał się węgiel kamienny z kopalni Sobieski (czas zapłonu ziaren tego paliwa w temperaturze pieca 600 °C wynosił ok. 0,8 s). Zaobserwowano zależność pomiędzy czasami zapłonu a stopniem uwęglenia paliw, to jest im niższy jest stopień uwęglenia (wyższa reaktywność paliwa), tym łatwiej zapalają się w danej temperaturze ziarna danego paliwa. Dla badanych paliw wraz z obniżaniem się temperatury pieca, osiągnięta jest taka jej wartość, dla której czas zapłonu dąży do nieskończoności. Wartość tej temperatury pieca definiuje tzw. minimalną temperaturę zapłonu. Dla badanych paliw najniższymi wartościami minimalnej temperatury zapłonu (ok. 440 °C) miały węgle brunatne, a najwyższe - kamienne (np. dla węgla z kopalni Sobieski wartość minimalnej temperatury zapłonu



Rys. 5: Porównanie czasów indukcji zapłonu dla wszystkich badanych paliw w atmosferach oxy i powietrza

Tab. 2: Zestawienie minimalnych temperatur zapłonu MTI_c i czasów zapłonu t_{z650}

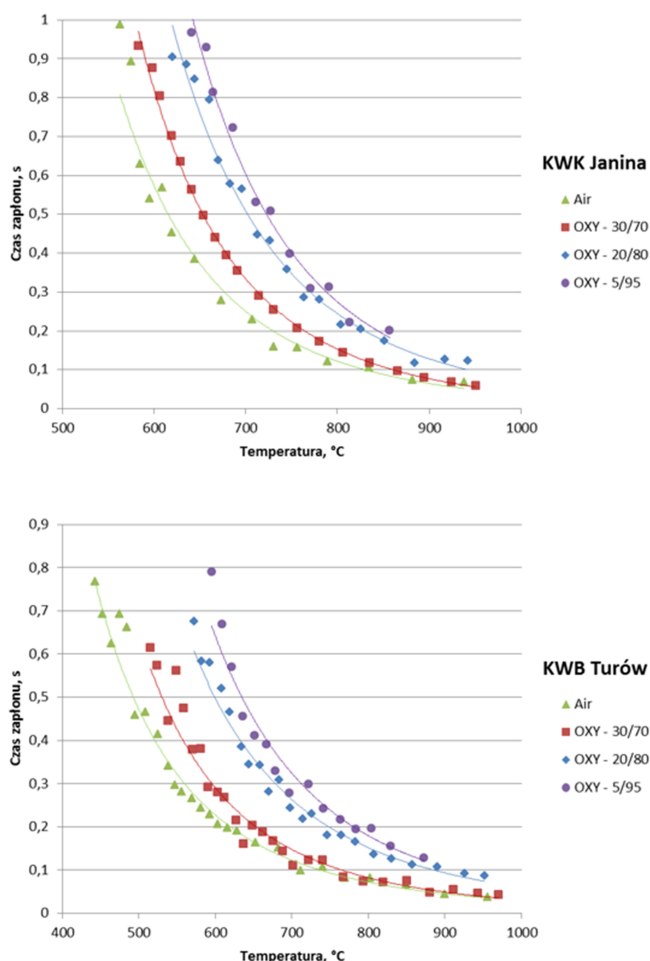
Paliwo	Air – powietrze		OXY – 30%O ₂ /70%CO ₂	
	MTI_c , °C	t_{z650} , s	MTI_c , °C	t_{z650}
WK1	581	0,370	555	0,420
WK2	580	0,536	610	0,682
WK3	578	0,468	589	0,564
WB1	437	0,178	443	0,142
WB2	435	0,142	444	0,123

wynosiła ok. 600 °C. W celu wyjaśnienia roli stężenia tlenu w mieszaninie gazowej O₂/CO₂ przeprowadzono dalsze badania dla stężeń tlenu w mieszaninie gazowej z CO₂: 5%, 20% i 30% obj. Wyniki porównane zostały z charakterystykami zapłonu wyznaczonymi w atmosferze powietrza i przedstawione na rysunku 6. Zmniejszenie stężenia tlenu w mieszaninie gazowej z 30 do 5% powodowało wzrost czasu zapłonu w temperaturze pieca 700 °C, dla węgla brunatnego z wartości 0,13 s do 0,31 s, a dla węgla kamiennego z wartości 0,32 s do 0,55 s. Rodzaj gazu, z którym mieszano tlen miał zasadniczy wpływ na mierzone wartości charakterystyk zapłonu. Dla węgla brunatnego czas zapłonu w temperaturze 700°C w atmosferze powietrza wynosił ok. 0,11 s, a w atmosferze 30%O₂/70%CO₂ – 0,26 s. Dla węgla kamiennego czas zapłonu w powietrzu wynosił 0,32 s, a w 30%O₂/70%CO₂ – 0,5 s.

6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone rozważania teoretyczne oraz badania dostarczyły wiele informacji, które pozwoliły w znacznym stopniu wyjaśnić mechanizm zapłonu chmury pyłowo-powietrznej w warunkach atmosfery wzbogaconej w tlen. Obliczenia zachowania się chmury pyłu paliwa w zależności od rozmiaru cząstek, stężenia utleniacza, temperatury znalazły odzwierciedlenie w pomiarach zrealizowanych na stanowisku badawczym.

Wyznaczane w pracy parametry zapłonu, tj. temperatura zapłonu, czas indukcji zapłonu zmieniały się w zależności od stopnia uwęglenia węgla. Zapłon węgla kamiennych jest bardziej utrudniony niż węgla brunatnych, to znaczy, że aby w płomieniu pyło-



Rys. 6: Charakterystyki zapłonu badanych paliw dla różnych stężeń tlenu w atmosferze OXY

wym polepszyć dla danego paliwa parametry zapłonu należy zastosować m.in. wyższe stężenia tlenu, wyższe koncentracje pyłu, drobniejszy przemiał pyłu, wyższe temperatury otoczenia.

W warunkach zapłonu chmury pyłowej, kiedy występuje oddziaływanie między ziarnami wartości czasów zapłonu zależały od stopnia uwęglenia paliwa. Najniższe wartości czasów zapłonu miały węgle brunatne (np. w temperaturze 600 °C czas zapłonu wynosił ok. 0,2 s). Najtrudniej zapalał się węgiel kamienny z kopalni Sobieski (czas zapłonu ziaren tego paliwa w temperaturze pieca 600 °C wynosił ok. 0,8 s). Obniżenie stężenia tlenu w mieszaninie gazowej z 30 do 5% powodowało wzrost czasów zapłonu w temperaturze pieca 700 °C, dla węgla brunatnego z wartości 0,13 do 0,31 s, a dla węgla kamiennego z wartości 0,32 s do 0,55 s.

Rodzaj gazu, z którym mieszano tlen miał zasadniczy wpływ na mierzone wartości charakterystyk zapłonu. Dla wszystkich badanych węgli czasy indukcji zapłonu

chmury pyłowej oznaczone w atmosferze powietrza były krótsze od tych mierzonych w 30%O₂/70%CO₂. Z przedstawionych badań wynika, że zmiana atmosfery powietrznej na atmosferę O₂/CO₂ dla stężeń tlenu w mieszaninie gazowej poniżej 30% będzie powodowała pogorszenie zapłonu.

Dla stabilności i kształtu płomienia oraz parametrów zapłonu (czasu indukcji zapłonu i dolnej granicy zapłonu) podstawowe znaczenie ma właściwa pojemność cieplna i gęstość głównych gazów (N₂ i CO₂) tworzących mieszaninę z tlenem. Pojemność cieplna CO₂ w 1127 °C wynosi około 57,8 kJ/mol w porównaniu do 34,2 kJ/mol dla N₂. Dla 40%-mieszaniny tlenu z dwutlenkiem węgla właściwa pojemność cieplna wyniesie 46,5 kJ/mol w temperaturze 727 °C i ciśnieniu gazu 1 atm. To jest o 38% więcej niż pojemność cieplna mieszaniny tlenu i azotu. Gęstość CO₂ w 1127 °C i ciśnieniu atmosferycznym wynosi 0,383kg/m³ w porównaniu do 0,244 kg/m³ dla N₂. CO₂ ma wyższą pojemność cieplną dlatego więcej ciepła jest potrzebne do podwyższenia temperatury, kiedy węgiel utlenia się w czasie zapłonu. Aby więc uzyskać podobne jak w powietrzu czasy zapłonu należy zwiększyć stężenie tlenu i rozdrobnienie paliwa.

LITERATURA

- [1] Arias B., Pevida C., Rubiera F., Pis J.J., *Effect of biomass blending on coal ignition and burnout during oxy-fuel combustion*, Fuel, 87, 2753–2759, 2008.
- [2] Cahyadi, Surjosatyo A., Nugroho Y. S., *Predicting Behavior of Coal Ignition in Oxy-fuel Combustion*, Energy Procedia, 37, 1423–1434, 2013.
- [3] Corrêa da Silva R., Kangwanpongpan T., Krautz H.J., *Flame pattern, temperatures and stability limits of pulverized oxy-coal combustion*, Fuel, 115, 507–520, 2014.
- [4] Cisowski R., *Zapłon mieszaniny pyłowo-powietrznej*, Praca doktorska, Promotor Prof. Wiesław Rybak, Politechnika Wroclawska, 2004.
- [5] Hjærtstam S., Andersson K., Johnsson F., Leckner B., *Combustion characteristics of lignite-fired oxy-fuel flames*, Fuel, 88 (11), 2216–2224, 2009.
- [6] Khare S.P., Wall T.F., Farida A.Z., Liu Y., Moghtaderi B., Gupta R.P., *Factors influencing the ignition of flames from air-fired swirl pf burners retrofitted to oxy-fuel*, Fuel, 87 (7), 1042–1049, 2008.
- [7] Khatami R., Stivers C., Levendis Y.A., *Ignition characteristics of single coal particles from three different ranks in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres*, Combustion and Flame, 159 (12), 3554–3568, 2008.
- [8] Levendis Y.A., Joshi K., Khatami R., Sarofim A.F., *Combustion behavior in air of single particles from three different coal ranks and from sugarcane bagasse*, Combustion and Flame, 158, 452–465, 2011.
- [9] Li J., Biagini E., Yang W., Tognotti L., Blasiak W., *Flame characteristics of pulverized torrefied-biomass combusted with high-temperature air*, Combustion and Flame, 160 (11), 2585–2594, 2013.
- [10] Liu B., Zhang Z., Zhang H., Yang H., Zhang D., *An experimental investigation on the effect of convection on the ignition behaviour of single coal particles under various O₂ concentrations*, Fuel, 116, 77–83, 2014.
- [11] Liu Y., Geier M., Molina A., Shaddix C. H., *Pulverized coal stream ignition delay under conventional and oxy-fuel combustion conditions*, International Journal of Greenhouse Gas Control, 5 (1), 36–46, 2011.
- [12] Maffei T., Khatami R., Pierucc S., Faravelli T., Ranzi E., Levendis Y. A., *Experimental and modeling study of single coal particle combustion in O₂/N₂ and Oxy-fuel (O₂/CO₂) atmospheres*, Combustion and Flame, 160 (11), 2559–2572, 2013.

- [13] Nowak W., Rybak W., Czakiert T., *Spalenie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013.
- [14] Merrick D., *Mathematical models of the thermal decomposition of coal: 2. Specific heats and heats of reaction*, Fuel, 62 (5), 540–546, 1983.

PODZIĘKOWANIA

Praca naukowa współfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, jako Projekt Strategiczny PS/E/2/66420/10 „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii spalania tlenowego dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂”.