



---

---

## Wpływ atmosfery O<sub>2</sub>/RFG na zapłon i formowanie się płomienia

AUTOR: Wojciech Moroń<sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup> Zakład Inżynierii i Technologii Energetycznych, Instytut Techniki ciepłej i Mechaniki Płynów, Politechnika Wrocławska

\* Adres do korespondencji: wojciech.moron@pwr.edu.pl, tel. 71 320 42 68

---

### STRESZCZENIE

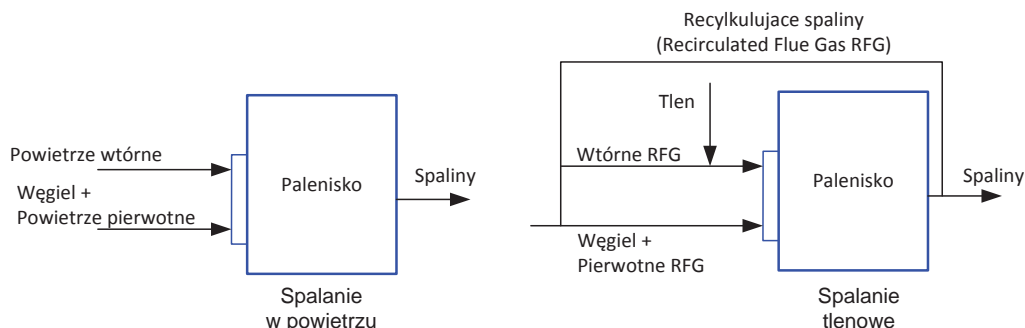
W artykule przedstawione zostały wyniki badań dotyczące zachowania się paliw alternatywnych, w czasie współspalania, w atmosferze wzbogaconej w tlen. Proces spalania tlenowego jest aktualnie jednym z głównych kierunków badań nad dalszym wykorzystaniem węgla do produkcji „czystej energii”. W przeprowadzonych badaniach skupiono się na zagadnieniach dotyczących wpływu współspalanego paliwa alternatywnego na stabilność płomienia pyłowo-powietrznego oraz na parametry zapłonu chmury pyłowo-powietrznej w atmosferze O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>. Otrzymane wyniki pozwalają przypuszczać, że wprowadzenie dodatkowego, paliwa do układu spalania może powodować dodatkowe zagrożenia niewystępujące w czasie spalania paliwa podstawowego.

**SŁOWA KLUCZOWE:** *spalanie tlenowe, współspalanie, paliwa alternatywne*

---

### 1. SPALANIE TLENOWE – OXY FUEL

Technologia oxy spalania została opracowana w celu znacznej redukcji emisji CO<sub>2</sub> z palenisk kotłów pyłowych. Może być ona stosowana zarówno do modernizacji istniejących elektrowni węglowych, jak i do projektowania nowych bloków z zerową emisją CO<sub>2</sub> (rys. 1). Proces spalania oxy odbywa się w mieszaninie tlenu ze spalinami (O<sub>2</sub>/Recycled Flue Gas), które są zawracane częściowo do komory spalania kotła. Przeprowadzenie procesu spalania w taki sposób, zwiększa stężenie CO<sub>2</sub> z poziomu 17% do 70% masowo. Zmiana warunków spalania polegająca na zastąpieniu powietrza atmosferą oxy (O<sub>2</sub>/RFG), ma wpływ na proces spalania pyłu węglowego w palenisku kotła, jak również na zachowanie się popiołu, emisje zanieczyszczeń gazowych oraz procesy wymiany ciepła w kotle [2, 3, 18]. Proces oxy jest nową technologią kotłową i jego rozwój wymaga zebrania dużej ilości informacji w obszarach związanych ze spalaniem, a w szczególności z zapłonem, stabilnością płomienia i warunkami spalania.



Rys. 1. Porównanie warunków spalania w powietrzu i tlenie

Z badań innych ośrodków naukowych [10-11] wynika, że obecność  $\text{CO}_2$  w mieszaninie z tlenem, w porównaniu do zapłonu w atmosferze powietrza, opóźniała zapłon węgla i koksu. Zmiana atmosfery na mieszaninę  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  ma pomijalny wpływ na czas trwania odgazowania. Wpływ  $\text{CO}_2$  na zapłon cząstek węgla w porównaniu do  $\text{N}_2$ , tłumaczony jest tym, że  $\text{CO}_2$  ma wyższe molowe ciepło właściwe. Autorzy badań obserwowali, że zapłon cząstek i ich proces odgazowania w 30% mieszaninie  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  był podobny do tego rejestrowanego w powietrzu. Zwiększanie stężenia tlenu przyspieszało zapłon cząstek, zarówno w atmosferze  $\text{O}_2/\text{N}_2$ , jak i w  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ . Wpływ stężenia tlenu na zapłon cząstek tłumaczono głównie oddziaływaniem  $\text{O}_2$  na lokalną reaktywność mieszaniny, w której realizowany jest proces spalania. Odgazowanie cząstek przebiegało szybciej dla większych stężeń  $\text{O}_2$  i obniżało się w czasie rozcieńczania w  $\text{CO}_2$ . Oba te czynniki mają wpływ na szybkość dyfuzji tlenu i części lotnych. Atmosfera  $\text{CO}_2$  wpływa na spadek szybkości odgazowania ponieważ jest mniejsza szybkości dyfuzji masy części lotnych w mieszaninie z  $\text{CO}_2$ , podczas gdy wyższe stężenia  $\text{O}_2$  zwiększają strumień masy tlenu dostarczanego do płomienia części lotnych otaczających cząstkę węglową. Dzięki temu zwiększa się temperatura gazu w otoczeniu cząstki, i tym samym zwiększa się szybkość odgazowania. Wnioskowano, że w czasie spalania oxy zwiększanie stężenia tlenu w zawracanych spalinach, jeśli jest odpowiednio dobrane, powinno pozwolić na uzyskanie czasów zapłonu podobnych do tych uzyskiwanych w czasie spalania węgla w powietrzu.

Testy zapłonu chmury pyłu węglowego [7-9] różnych rodzajów węgla w warunkach atmosfery  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  prowadzone były przy wykorzystaniu 20 litrowej kuli do badań wybuchowości pyłów. W skład badanych węgli wchodził jeden węgiel kamienny z zawartością części lotnych 18% i pięć innych węgli kamiennych z niską zawartością części lotnych (od 6 do 13% w przeliczeniu na stan suchy węgla). Wszystkie badane węgle miały podobne charakterystyki zapłonu. Stężenia tlenu w mieszaninie z dwutlenkiem węgla, dla których zapłon odbywał się w warunkach podobnych do zapłonu w powietrzu wynosiło, w zależności od rodzaju węgla, od 30 do 35% obj. Zaobserwowano silny wpływ zwiększonego udziału utleniacza w atmosferze komory roboczej, co objawiało się niższymi czasami zapłonu paliw oraz skróceniem czasu wypale-

nia paliwa. Zapłon paliwa odbywa się w niższej temperaturze niż w powietrzu, kiedy stężenie tlenu w mieszaninach  $CO_2/O_2$  wynosi 30% [1, 14].

Badania propagacji płomienia pyłowego [3, 13] w warunkach atmosfery powietrza i oxy wykazały, że szybkość propagacji płomienia w atmosferze  $O_2/CO_2$  była niższa niż w  $O_2/N_2$ . Wyjaśniano to wyższą pojemnością cieplną dwutlenku węgla w porównaniu do azotu. Rejestrowane w badaniach opóźnienie zapłonu w czasie spalania oxy również przypisywano wyższej pojemności cieplnej dwutlenku węgla.

Dla stabilności i kształtu płomienia podstawowe znaczenie ma pojemność cieplna i gęstości głównych gazów ( $N_2$  i  $CO_2$ ) tworzących mieszaninę z tlenem [6,14-18]. Na podstawie przeprowadzonych badań, autorzy wnioskuje, że przestawienie palników z pracy powietrznej na pracę w atmosferze oxy będzie wymagało wprowadzenia zmian prędkości i wielkości strumieni masowych, zarówno strumienia pierwszego, jak i drugiego. Zmiany w aerodynamice strumieni, będą miały wpływ na kształt i rodzaj uzyskiwanego płomienia.

Badania wykazują również, że różnic w podstawowej strukturze chemicznej spalnego węgla są ważne w przewidywaniu stabilność płomienia nawet w burzliwym płomieniu dyfuzyjnym. Bardzo podobne węgle o zbliżonych parametrach analizy technicznej i elementarnej mają różne punkty stabilności zapłonu przy tych samych parametrach aerodynamicznych podawania. Stabilność płomienia i zapłonu cząstek węgla w burzliwym koncentrycznym płomieniu dyfuzyjnym obejmują skomplikowane, słabo poznane zjawiska aerodynamiczne i reakcje chemiczne [12].

Podjęte próby badań pilotażowych [14, 18], mające na celu przystosowanie powietrznego palnika wirowego do spalania pyłu węglowego w systemie oxy-fuel, polegały na dopasowywaniu warunków strumieni wlotowych, tak aby uzyskać parametry wymiany ciepła w palenisku, jak w przypadku spalania w powietrzu. Na podstawie uzyskanych wyników, autorzy zasugerowali dla rozważanej modernizacji palnika do warunków spalania w oxy-fuel, zastosowanie większych prędkości strumienia pierwszego, co jest spowodowane tym, że zapłon w atmosferze oxy może być opóźniony i przez to wystąpić z dala od dyszy palnika.

Stechiometria spalania jest następnym instrumentem, po wskaźniku recyrkulacji, który pozwala na kontrolowanie temperatury płomienia. Analiza różnych warunków spalania i wpływu na nie stochiometrii oraz stężenia tlenu w strefie spalania (wynoszących w ich badaniach 30% i 40% obj.) została przedstawiona w pracy [2, 4, 15]. Z przeprowadzonych badań wynikało, że maksymalne temperatury spalania w powietrzu i w atmosferze oxy-fuel uzyskano dla 30% stężenia tlenu i przy stochiometrii spalania wynoszącej 1,15. Taki poziom temperatury nie został osiągnięty przy zawartości 40% tlenu w mieszaninie gazów i przy stochiometrii spalania 0,55 i 2,15. Po porównaniu wyników z konwencjonalnym spalaniem w powietrzu okazało się, że podobny zakres temperatur można uzyskać dla stężeń tlenu w azocie na poziomie 40% objętościowych.

## 2. BADANE PALIWA

Przeprowadzone badania dostarczyły szereg informacji o paliwach alternatywnych, badania fizykochemiczne wytypowanych paliw alternatywnych uwidaczniają znaczące różnice tych paliw wobec węgla. Ich odmienne własności w czasie realizacji procesu współspalania mogą w sposób znaczący oddziaływać na elementy kotła jak i jego sprawność. Właściwości chemiczne badanych paliw wykonano na podstawie oznaczeń analizy technicznej i elementarnej. Wykonano oznaczenia zawartości wilgoci, części lotnych, popiołu oraz składu pierwiastkowego badanych paliw. Oznaczenia przeprowadzono zgodnie z PN. Wśród wytypowanych paliw alternatywnych znalazły się dwie biomasy oznaczone w badaniach PeID (pelet drewno), PeIS (pelet słonecznik), OsadS (osad ściekowy) oraz SRF (Solid Recovery Fuel). Tak wytypowane paliwa pochodzące z różnych źródeł pozwoliły na precyzyjne pokazanie różnic pomiędzy tymi paliwami a paliwami kopalnymi. Z tabeli 1 można zauważyć, że paliwa te mają znaczną zawartość części lotnych w porównaniu do węgla oraz obniżony wskaźnik FC. Dodatkowo osady ściekowe oraz paliwa SRF charakteryzują się zwiększoną zawartością popiołu, która wynika głównie z charakteru procesu, w jakim powstają te odpady. W konsekwencji paliwa takie mają wskaźnik paliwowy FR poniżej 0,5, co jest ich wyróżnikiem w tzw. szeregu uwęglenia.

Taka odwrotna proporcja stosunku części lotnych do stałej części palnej stanowi potencjalnie zagrożenie w użytkowaniu tych paliw.

Tabela 1. Wyniki analizy technicznej paliw podstawowych (stan analityczny)

Nazwa próbki	W	A	V	FC <sup>1</sup>	FR <sup>2</sup>
	%	%	%	-	-
Janina	3,07	8,57	32,73	55,64	1,70
Turów	2,04	17,52	46,61	33,83	0,73
PeIS	2,08	2,68	73,52	21,72	0,30
PeID	4,48	1,28	78,31	15,93	0,20
OsadS	3,32	42,33	46,51	7,84	0,17
SRF	3,53	17,03	68,28	11,16	0,16

<sup>1</sup> FC=100-W-A-V

<sup>2</sup> FR=FC/V

Zagrożenia pojawiają się szczególnie w układzie podawania i przygotowania paliwa, w którym zwiększona zawartość części lotnych może sprzyjać zagrożeniom pożarowo-wybuchowym. Jednocześnie duża ilość części lotnych powinna sprzyjać procesowi zapłonu i stabilności płomienia, jednak może to wymagać przeprojektowania palników lub ich rekonfiguracji. Wyniki oznaczenia kaloryczności badanych próbek przedstawia tabela 2.

Analizę elementarną paliw wykonano automatycznym analizatorem LECO, wyniki oznaczeń badanych paliw przedstawia tabela 3. Badane paliwa alternatywne charakte-

ryzują się zmniejszoną zawartością węgla, natomiast mają podwyższoną zawartość tlenu. Jednocześnie paliwa, tj. osad ściekowy i SRF mogą mieć znacznie wyższe udziały siarki i azotu, wynika to ze źródła ich pochodzenia i procesu pozyskania. W przypadku biomas natomiast nie obserwuje się zawartości siarki lub jest ona bardzo mała.

Tabela 2. Ciepło spalania Q kJ/kg, wartość opałowa Q<sub>i</sub> kJ/kg badanych próbek (stan analityczny)

Nazwa próbki	Q kJ/kg	Q <sub>i</sub> <sup>1</sup>
Janina	75,70	4,32
Turów	59,00	4,79
PelS	51,90	5,68
PelD	52,10	6,51
OsadS	29,80	3,98
SRF	51,35	6,65

$$^1 Q_i = Q - 24,42(W_i^r + 8,94H)$$

Tabela 3. Analiza elementarna badanych paliw (stan analityczny)

Nazwa próbki	C	H	N %	S	O <sup>1</sup>
Janina	75,70	4,32	1,19	1,24	5,91
Turów	59,00	4,79	0,53	1,30	14,83
PelS	51,90	5,68	0,73	0,10	36,84
PelD	52,10	6,51	0,40	0,05	35,18
OsadS	29,80	3,98	3,84	2,27	14,46
SRF	51,35	6,65	0,70	0,17	20,57

$$^1 O = 100 - C - H - N - S - W - A$$

### 3. BADANIE STABILNOŚCI PŁOMIENIA PYŁOWEGO

Pomiary osiągnięcia stabilności zapłonu (płomienia) zrealizowano na zmodernizowanym pionowym 3 metrowym reaktorze przepływowym, w którym w strefie palnika umieszczona została sonda poboru spalin oraz termopara mierząca temperaturę pieca w strefie płomienia. Pomiar polegał na grzaniu pieca ze stałą szybkością nagrzewania (około 15 °C/min) i podawaniu pyłu węglowego do komory pieca. Równocześnie z podawaniem paliwa rejestrowane były parametry emisji CO, CO<sub>2</sub> i stężenia O<sub>2</sub> w celu określenia temperatury, w której następuje stabilny zapłon podawanego do komory paliwa.

Stanowisko badawcze składało się z następujących elementów:

- pionowy piec opadowy, o wysokości 3 m,
- komputer do sterowania i archiwizacji danych z pieca,
- mechaniczno - pneumatyczny podajnik paliwa z układem pomiaru on-line,
- analizator spalin z układem rejestracji danych pomiarowych,
- instalacja wyciągowa spalin.

W górnej części pieca znajduje się podajnik, którego zadaniem było ciągle podawanie próbki monofrakcji rozdrobnionego paliwa do komory spalania (podawanie z wydatkiem około 5-10 g/min). Spaliny z komory usuwane były przy pomocy wentylatora spalin, który miał za zadanie wyprowadzenia spalin do instalacji recyrkulacji kontrolowanej przez sterownik masowy a pozostałą część do instalacji wyciągowej. Istotnym urządzeniem był analizator spalin Sensonic 6000 współpracujący z rozcieńczalnikiem spalin LAT R2, który służył do pomiaru takich składników gazowych jak  $O_2$ , NO,  $SO_2$ , CO,  $CO_2$ . Parametry komory i mierzone składniki gazowe rejestrowane były przez komputer sterująco-wizualizujący proces.

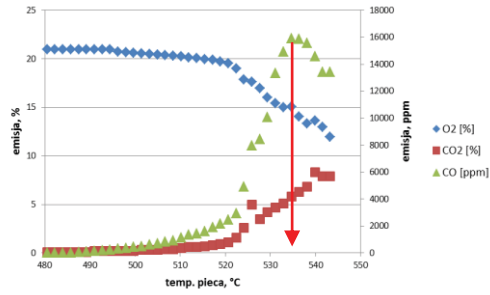
Realizacja badań podzielona została na trzy etapy uwzględniające różne stężenia spalin w komorze roboczej reaktora. Badania wpływu recyrkulowanych spalin na proces stabilności zapłonu płomienia pyłowo-powietrznego przeprowadzono dla dwóch typów recyrkulacji. W badaniach uwzględniono recyrkulację spalin suchych oraz recyrkulację spalin wilgotnych. Jako atmosferę odniesienia przyjęto powietrze. Recyrkulowany strumień spalin w przypadku suchego RFG uzyskiwano z wykorzystywaniem układu butli gazów technicznych, natomiast spaliny dla mokrego RFG recyrkulowano bezpośrednio z komory spalania.

Zawartość wilgoci w recyrkulowanych spalinach wyniosła około 10% co było zgodne z uzyskanymi pomiarami analizy technicznej paliw. Wypadkowa wartość stężenia gazów w komorze z uwzględnieniem wilgoci wynosiła  $27\%O_2/63\%CO_2/10\%H_2O$  co pozwalało zachować pierwotnie założony stosunek  $O_2/CO_2$  na poziomie 30/70%. Zestawienie uzyskanych wyników pomiarowych przedstawia tab. 4.

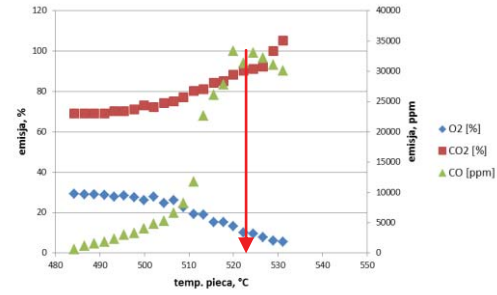
Tab. 4. Zestawienie wyników dla badanych paliw

	Janina			Turów		
	Powietrze	30% $O_2$ / 70% $CO_2$	27% $O_2$ / 63% $CO_2$ / 10% $H_2O$	Powietrze	30% $O_2$ / 70% $CO_2$	27% $O_2$ / 63% $CO_2$ / 10% $H_2O$
Temp. zapłonu	536 °C	524°C	555 °C	520 °C	519 °C	529 °C

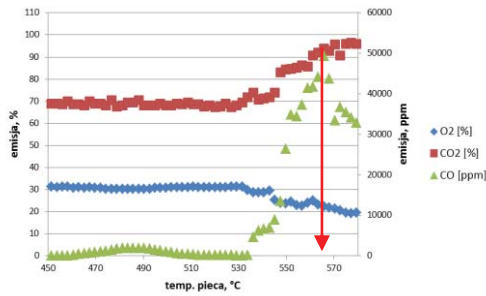
Janina - powietrze



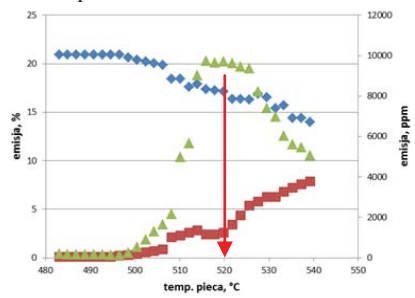
Janina - 30% $O_2/70\%CO_2$



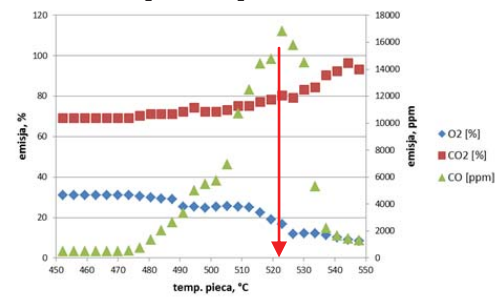
Janina - 27% $O_2/63\%CO_2/10\%H_2O$



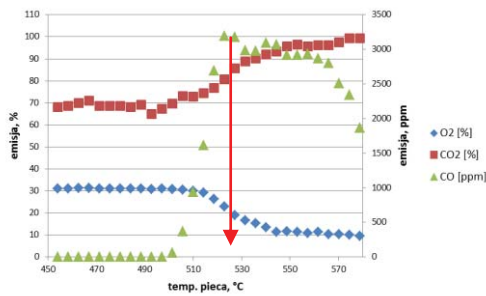
Turów - powietrze



Turów - 30% $O_2/70\%CO_2$



Turów - 27% $O_2/63\%CO_2/10\%H_2O$



Rys. 2. Wynik pomiarów stabilności zapłonu (płomienia) dla badanych atmosfer

Uzyskane wyniki pomiarowe przedstawione zostały na rys. 2. Analizując uzyskane wyniki pomiarowe można zauważyć, że w niskich temperaturach drastycznie wzrasta stężenie CO aż do pewnej temperatury, a następnie spada. Moment szczytowego stężenia CO wyznacza temperaturę zapłonu pyłu węglowego. Stężenie CO<sub>2</sub> rośnie w niewielkim stopniu, a po ustabilizowaniu się płomienia wyrównuje się i osiąga stały poziom. W momencie wzrostu emisji CO<sub>2</sub> następuje obniżenie stężenia tlenu na skutek reakcji utleniania z wydzielanymi z węgla częściami lotnymi.

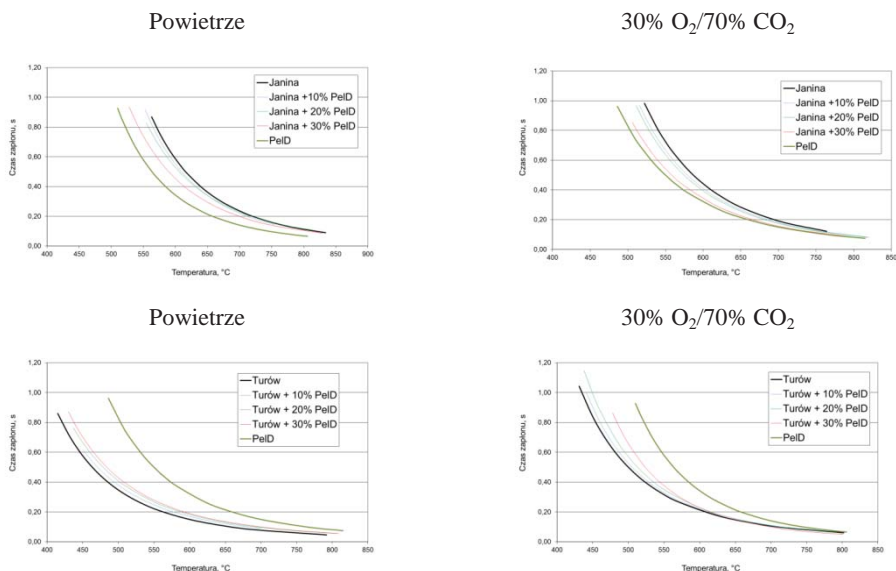
Na podstawie przedstawionych badań można wywnioskować, że warunki stabilnego zapłonu w laminarnym strumieniu mieszaniny pyłowo powietrznej były osiągane w temperaturze pieca wynoszącej 536 °C dla węgla kamiennego i 520 °C dla węgla brunatnego. W przypadku spalania w atmosferze oxy z 30% stężeniem tlenu nastąpiło obniżenie temperatury o maksymalnie 12 °C. Obecność H<sub>2</sub>O powodowała wzrost temperatury stabilnego zapłonu płomienia o 10-30%. Spowodowane to jest najprawdopodobniej obniżeniem temperatury spalin w strefie spalania w wyniku pobierania przez zawartą w spalinach wodę ciepła na odparowanie.

#### 4. ZAPŁON CHMURY PYŁOWO-POWIETRZNEJ

Charakterystyki zapłonu wyznaczano w 1 metrowym pionowym piecu opadowym w atmosferze powietrza w zakresie temperatur 350–900 °C [4]. W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskano charakterystyki zapłonu badanych węgli, biopaliw oraz ich mieszanin obejmujące minimalną temperaturę zapłonu oraz czas indukcji zapłonu dla temperatury pieca powyżej krytycznej temperatury zapłonu. Uzyskane wyniki zestawiono dla wszystkich badanych węgli, biomas i ich mieszanin w celu porównania ich zachowania w czasie zapłonu. W czasie pomiarów zmieniano atmosferę pieca. Badania prowadzono w atmosferze powietrza i atmosferze 30%O<sub>2</sub>/70%CO<sub>2</sub>. W pracy charakterystyki zapłonu obejmowały wyznaczenie czasów indukcji zapłonu ( $t_z$ ) i minimalnej temperatury zapłonu chmury pyłowej ( $MIT_c$ ).

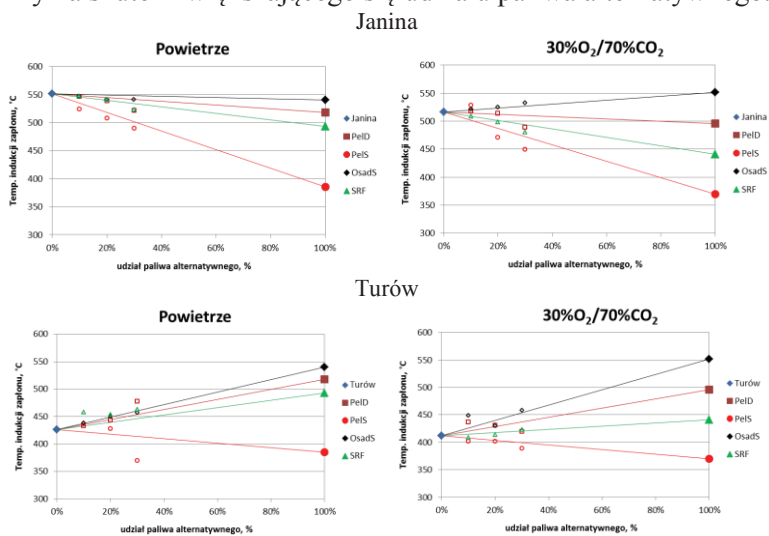
Rys. 3. przedstawia charakterystyki zapłonu badanych paliw wyjściowych i ich mieszanin. Można zauważyć, że dodatek paliwa alternatywnego powoduje zmianę charakterystyki zapłonu mieszaniny niezależnie od badanej atmosfery. Kierunek zmian zależy od parametrów paliwa alternatywnego, jeżeli charakterystyka zapłonu paliwa alternatywnego ma niższe parametry od węgla dodatek taki powoduje obniżenie parametrów zapłonu chmury pyłowo-powietrznej. W przypadku wyższych parametrów zapłonu paliwa alternatywnego jego dodatek podwyższa parametry zapłonu mieszaniny. Jednocześnie analizując charakter tych zmian można zauważyć, że nie są one addytywne w stosunku do udziału paliwa alternatywnego w mieszaninie. Obserwowano również, że paliwa alternatywne o bardzo niskich parametrach zapłonu tj. np. PelS znacząco wpływały na charakterystykę zapłonu mieszaniny niż te, które miały charakterystyki zbliżone do węgla.





Rys. 3. Charakterystyki zapłonu paliw wyjściowych i ich mieszanin dla badanych atmosfer

Charakteru zmian zachowania się mieszanin: węgiel + paliwo alternatywne (rys. 4.) nie można jednoznacznie określić. Minimalne temperatury indukcji zapłonu, w przypadku badanych mieszanin, są zmienne, przyjmują wartości powyżej udziału paliwa alternatywnego w mieszaninie lub poniżej udziału paliwa alternatywnego. Jednak dla wahań tych można zaobserwować tendencję zmian wpływu paliwa alternatywnego na mieszaninę, tj. wzrost lub spadek minimalnej temperatury indukcji zapłonu mieszaniny na skutek zwiększającego się udziału paliwa alternatywnego.



Rys. 4. Minimalna temperatura indukcji zapłonu w funkcji udziału paliwa alternatywnego

## 5. WNIOSKI Z BADAŃ

Zapłon węgla kamiennych jest trudniejszy niż węgla brunatnych. Warunki stabilnego zapłonu dla węgla kamiennego miały miejsce zawsze w temperaturze wyższej niż dla węgla brunatnego. Jest to spowodowane większą zawartością wilgoci oraz mniejszą zawartością lotnych części palnych w paliwie. Dlatego aby w płomieniu pyłowym polepszyć dla danego paliwa parametry stabilności zapłonu należy zastosować np. wyższe stężenie tlenu, większe rozdrobnienie pyłu, wyższą temperaturę otoczenia. Uzyskane wyniki są zgodne z wynikami uzyskiwanymi przez inne ośrodki [12].

W atmosferze mieszaniny gazów ( $30\%O_2/70\%CO_2$ ) temperatury zapłonu nieznacznie różniły się od temperatur zapłonu w powietrzu. Można zatem uznać, że aby spalanie było przeprowadzone w takich samych warunkach jak w obecnych kotłach stężenie tlenu powinno wynosić ok 30%.

W atmosferze mieszaniny gazów ( $10\%H_2O/27\%O_2/63\%CO_2$ ) warunki stabilnego zapłonu zostały osiągnięte w wyższej temperaturze. Jednym z kluczowych procesów odbywających się podczas spalania jest nagrzewanie cząstki a dokładnie odparowanie wilgoci z węgla. Wysoka zawartość wody w atmosferze gazowej powoduje dłuższe nagrzewanie cząstki węgla i opóźnienie zapłonu.

W warunkach zapłonu chmury pyłowej, kiedy występuje wzajemne oddziaływanie między ziarnami wartości czasów zapłonu zależały od stopnia uwęglenia paliwa. Najniższe wartości czasów zapłonu miały węgle brunatne (np. w temperaturze  $600\text{ }^\circ\text{C}$  czas zapłonu wynosił ok. 0,2 s). Obniżenie stężenia tlenu w mieszaninie gazowej z 30% do 5% powodowało wzrost czasów zapłonu w temperaturze pieca  $700\text{ }^\circ\text{C}$ , 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 wszystkich badanych węgla czasy indukcji zapłonu chmury pyłowej oznaczone w atmosferze powietrza były krótsze od tych mierzonych w  $30\%O_2/70\%CO_2$ . Z przedstawionych badań wynika, że zmiana atmosfery powietrznej na atmosferę  $O_2/CO_2$  dla stężeń tlenu w mieszaninie gazowej poniżej 30% będzie powodowała pogorszenie zapłonu.

Uzyskane wyniki pomiarowe są zgodne z wynikami innych ośrodków badawczych w obszarze charakteru zmian i czynników, jakie wpływają na badane parametry. Szerze porównanie uzyskanych wyników jest trudne ze względu na różne zastosowane narzędzia badawcze jak i różne próby paliw wykorzystane w pomiarach.

## 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  $CO_2$ ”.

## 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* 2008, vol. 87, 2753–2759, DOI: 10.1016/j.fuel.2008.01.020.
- [2] **Bohn J.-P., Blume M., Goanta A., Spliethoff H.**, *Flame temperatures and species concentrations in non-stoichiometric oxy coal flames*, *Fuel*, 2011, vol. 90, 3109–3117, DOI: 10.1016/j.fuel.2011.05.009.
- [3] **Buhre B.J.P., Elliott L.K., Sheng C.D., Gupta R.P., Wall T.F.**, *Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation*. *Progress in Energy and Combustion Science*; 31 (4); 283-307, 2005, DOI: 10.1016/j.pecs.2005.07.001.
- [4] **Chen L., Yong S.Z., Ghoniem A.F.**, *Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling*, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, Vol. 38, 2, 156–214, DOI: 10.1016/j.pecs.2011.09.003.
- [5] **Cisowski R.**, *Zapłon mieszaniny pyłowo-powietrznej*, praca doktorska, Politechnika Wroclawska, 2004.
- [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, DOI: 10.1016/j.fuel.2007.06.026.
- [7] **Liu Y., Geier M., Molina M., Shaddix C.R.**, *Pulverized coal stream ignition delay under conventional and oxy-fuel combustion conditions*, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, Volume 5, Supplement 1, Pages S36–S46, DOI: 10.1016/j.ijggc.2011.05.028.
- [8] **Man C.K., Gibbins J.R.**, *Factors affecting coal particle ignition under oxyfuel combustion atmospheres*, *Fuel*, 2011, Vol. 90, 1, 294–304, DOI: 10.1016/j.fuel.2010.09.006.
- [9] **Man C. K., Gibbins J. R., Cashdollar K. L.**, *Effect of coal type and oxyfuel combustion parameters on pulverised fuel ignition*, w: *International conference on coal science and technology*, Nottingham, UK, 28-31 Aug 2007.
- [10] **Molina A., Shaddix C. R.**, *Effect of  $O_2/CO_2$ -firing on coal particle ignition*, w: *Proceedings, twenty- second annual Pittsburgh coal conference*, Pittsburgh, PA, USA, 12-15.09.2005.
- [11] **Molina, A., Shaddix, C.R.**, *Ignition and devolatilization of pulverized bituminous coal particles during oxygen/ carbon dioxide coal combustion*, *Proc Combust Inst*, Vol. 31, 1905 – 1912, 2007, DOI: 10.1016/j.proci.2006.08.102.
- [12] **Rezaei D., Zhou Y., Zhang J., Kelly K. E., Eddings E. G., Pugmire R. J., Solum M. S., Wendt J. O. L.**, *Energy Fuels*, 2013, 27 (8), 4935–4945, DOI: 10.1021/ef4004957.
- [13] **Riaza J., Álvarez L., Gil M.V., Pevida C., Pis J.J., Rubiera F.**, *Ignition and NO Emissions of Coal and Biomass Blends under Different Oxy-fuel Atmospheres*, *Energy Procedia*, Vol. 37, 1405–1412, 2013, DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.016.
- [14] **Riaza J., Álvarez L., Gil M.V., Pevida C., Pis J.J., Rubiera F.**, *Effect of oxy-fuel combustion with steam addition on coal ignition and burnout in an entrained flow reactor*, *Energy* 2011, Vol. 36, 8, 5314–5319, DOI: 10.1016/j.energy.2011.06.039.
- [15] **Riaza J., Khatami R, Levendis Y. A., Álvarez L., Gil M. V., Pevida C., Rubiera F, Pis J. J.**, *Single particle ignition and combustion of anthracite, semi-anthracite and bituminous coals in air and simulated oxy-fuel conditions*, *Combustion and Flame* 2014, 161, 1096–1108, DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.10.004.
- [16] **Shaddix C., Molina A.**, *Ignition, flame stability, and char combustion in oxy-fuel combustion*, w: Zheng L. (red.) *Oxy-Fuel Combustion for Power Generation and Carbon Dioxide ( $CO_2$ ) Capture*, Woodhead Publishing Limited, 2011, 101–124, DOI: 10.1533/9780857090980.2.101.

- 
- [17] **Taniguchi M., Shibata T., Kobayashi H.**, *Prediction of lean flammability limit and flame propagation velocity for oxy-fuel fired pulverized coal combustion*, Proceedings of the Combustion Institute, 2011, Vol.33, 2, 3391–3398, DOI: 10.1016/j.proci.2010.07.020.
- [18] **Wall T.**, *Coal based oxy-fuel technology: progress to deployment*. Paper presented to: 1<sup>st</sup> oxyfuel combustion conference, Cottbus, Germany, 8-11.09. 2009.