



## Specificity of the properties of sewage sludge with reference to coal fuels and biomass

*Katarzyna ŚRODA<sup>1</sup>, Agnieszka KIJÓ-KLECZKOWSKA<sup>2</sup>, Magdalena SCHAB, Marek PIETRASIK, Tomasz PTAK, Jakub PYTLOS*

<sup>1</sup> *Instytut Maszyn Ciepłych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska, al. Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa; e-mail: katarzynasroda@imc.pcz.czyst.pl*

<sup>2</sup> *Instytut Maszyn Ciepłych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska, al. Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa; e-mail: kijo@imc.pcz.czyst.pl*

### Abstract

The paper presents a comparative analysis of the technical and elemental various types of fuel: biomass, sewage sludge, hard coal, brown coal, anthracite and coal mule. Furthermore, also summarized characteristic temperatures of ash melting of the above mentioned fuels. The analyzes contained in the paper of are extremely helpful in explaining the behavior of different fuels during the high physico-chemical process. At the same time it should be emphasized that in the Polish power sector coal is the primary fuel. However, due to new legal regulations related to the need to reduce the emission of pollutants into the atmosphere, or disposal of waste fuels, biomass combustion and thermal utilization of sewage sludge and coal mule becomes extremely important.

**Keywords:** technical and elemental analysis of fuels, characteristic temperatures of ash melting, wastes

### Streszczenie

Specyfika właściwości osadów ściekowych w odniesieniu do paliw węglowych i biomasy

W pracy przedstawiono porównawczą analizę techniczną i elementarną różnego rodzaju paliw: biomasy, osadów ściekowych, węgla kamiennego, węgla brunatnego, antracytu oraz mułu węglowego. Ponadto zestawiono charakterystyczne temperatury topliwości popiołu wspomnianych wyżej paliw. Analizy zawarte w opracowaniu stają się niezwykle pomocne w wyjaśnieniu zachowania się różnych paliw podczas wysokotemperaturowego fizyczno-chemicznego procesu. Jednocześnie należy podkreślić, iż w polskiej energetyce węgiel to paliwo podstawowe. Jednak z uwagi na nowe uwarunkowania prawne, związane z koniecznością obniżenia emisji zanieczyszczeń do atmosfery, czy unieszkodliwianiem paliw odpadowych, spalanie biomasy oraz termiczna utylizacja osadów ściekowych, a także mułów węglowych staje się niezwykle istotna.

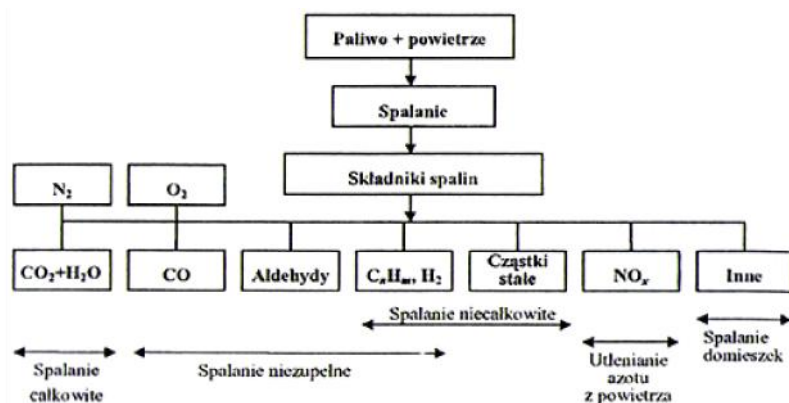
**Słowa kluczowe:** analiza techniczna i elementarna paliw, charakterystyczne temperatury topliwości popiołu, odpady

### 1. Wprowadzenie

Każde paliwo podlegające spalaniu przechodzi szereg etapów procesu. W zależności od jego warunków, poszczególne etapy (nagrzewanie, odparowanie wilgoci, odgazowanie i spalanie części lotnych oraz wypalanie karbonizatu) mogą występować kolejno po sobie lub wzajemnie się nakładać. Należy podkreślić, iż spalanie paliwa jest bardzo złożonym, wieloetapowym procesem przemian fizykochemicznych, dlatego jednoczesna analiza zjawisk w nim zachodzących jest praktycznie niemożliwa. Wypalanie karbonizatu jest etapem decydującym o przebiegu procesu spalania paliwa. Generalnie rozpoczyna się ono po zakończeniu uwalniania części lotnych, lecz czasem procesy te mogą zachodzić równocześnie. Podczas spalania paliwa, tlen ze strumienia powietrza transportowany jest do powierzchni paliwa, wchodząc w reakcję utleniania. Procesowi spalania towarzyszy szereg pośrednich reakcji, podczas których powstają nietrwałe produkty ulegające dalszym przemianom. Mechanizm ten jest bardzo skomplikowany, albowiem kształtują go warunki temperaturowe i przepływowe panujące w komorze spalania. Spalanie karbonizatu jest, w najprostszej formie, wysokotemperaturowym utlenianiem węgla pierwiastkowego do dwutlenku węgla [1-6]. W wyjaśnieniu zachowania się różnych paliw podczas wysokotemperaturowego fizyczno-chemicznego procesu, jakim jest

spalanie niezwykle pomocna staje się analiza techniczna oraz elementarna paliw, jak również wyznaczenie charakterystycznych temperatur topliwości popiołu.

Węgiel jest aktualnie najważniejszym nośnikiem energii pierwotnej, dlatego tak ważna jest analiza jego składu. Substancja organiczna palna węgla jest mieszaniną różnych związków organicznych, w skład których wchodzi wiele pierwiastków (m.in. węgiel, wodór, tlen, azot, siarka, fosfor) [7]. Analiza elementarna paliw węglowych wykazuje, że stopień uwęglenia, czyli zawartość pierwiastka C rośnie z „wiekiem” paliwa, a maleje w nim zawartość pierwiastka H i O i co za tym idzie jego reaktywność [5]. Substancja mineralna węgla to natomiast niejednorodna mieszanina związków chemicznych. Część tych związków jest chemicznie połączona z substancją organiczną. Należy podkreślić, iż nie ma możliwości w sposób bezpośredni wydzielić jej z węgla. Badanie substancji mineralnej dokonuje się zatem wyłącznie po spaleniu próbki węgla, w oparciu o powstały popiół. Substancja mineralna obecna w węglu to składnik niepożądany. W procesach spalania ulega ona głębokim przemianom, czego efektem jest powstawanie popiołu i produktów lotnych, nie spalonych cząsteczek substancji organicznej połączonych z popiołem oraz gazów (głównie tlenków siarki i azotu) stanowiących poważne zagrożenie dla środowiska. Należy jednocześnie podkreślić, iż tworzący się  $\text{SO}_2$  wiązany jest chemicznie przez tlenki Ca oraz Mg, wyłącznie do temperatury  $900^\circ\text{C}$ . Gdy ta temperatura zostanie przekroczona utworzone siarczany ulegają rozkładowi, po czym  $\text{SO}_2$  ulatnia się do atmosfery. Oprócz dwutlenku siarki do atmosfery uwalniają się również pyły oraz łatwo lotne pierwiastki, które ulegają procesowi sublimacji, jak np. As, Li, Pb, Be, Zn, Cd, Cl. Należy jednak podkreślić, iż wzbogacanie węgla przed procesem spalania, szczególnie usuwanie pirytu, a także utrzymanie procesu spalania w temperaturze do  $800^\circ\text{C}$ , odpylanie oraz oczyszczanie gazu może istotnie wpłynąć na zmniejszenie emisji szkodliwych substancji powstałych w procesie spalania (rys.1.1.). Należy również zaakcentować, że składniki substancji mineralnej, szczególnie związki siarki, są termicznie bardzo odporne (w temp.  $1500^\circ\text{C}$  jest jeszcze aż ok. 40% tych składników w karbonizatach), natomiast związki siarki ulegają całkowitemu rozkładowi dopiero w temperaturze powyżej  $2500^\circ\text{C}$  [8]. Drugim, obok substancji mineralnej, balastem węgla jest wilgoć, która stanowi wodę zawartą w węglu. Zarówno popiół, jak i wilgoć istotnie wpływają na wartość opałową węgla [7].



Rys. 1.1. Ważniejsze składniki spalin ze spalania paliw kopalnych [4]

Niekorzystny bilans paliwowy naszego kraju powoduje nadmierne obciążenie środowiska, wywołane emisją  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  i pyłów, a także powiększeniem powierzchni koniecznych na składowanie narastających stałych odpadów paleniskowych. Górnictwo, zmuszane dostarczać energetyce coraz lepsze paliwo, musi stosować głębsze wzbogacanie węgla. Powoduje to ciągle wzrost odpadów w postaci mułów poflotacyjnych. Najlepszą metodą utylizacji tych mułów jest ich spalanie w postaci zawieszin oraz współspalanie z innymi paliwami, prowadzone przede wszystkim w kotłach fluidyzacyjnych [9-12].

Jednym z najbardziej obiecujących źródeł energii odnawialnej w Polsce jest biomasa. Rozwój technologii jej wykorzystania na cele energetyczne wymusza ograniczenie emisji  $\text{CO}_2$  i przynosi szereg przyszłościowych korzyści, na które mają wpływ: dostępność surowca, możliwość rolniczego wykorzystania terenów zdegradowanych i rekultywowanych, stworzenie nowych miejsc pracy, wsparcie rozwoju lokalnego, aktualny i prognozowany wzrost cen paliw węglowych, czy też możliwość dofinansowania inwestycji, ale co najbardziej istotne odnawialności tych źródeł, a przy tym należy podkreślić duży przyrost masy (wierzba szwedzka, malwa pensylwańska, miskant olbrzymi). Pomimo korzystnych aspektów zastosowania biomasy jako paliwa, stwarza ona jednak pewne problemy. Wynikają one przede wszystkim z właściwości fizyczno-chemicznych biomasy, z

których najważniejsze to: mała gęstość, niska wartość opałowa oraz szeroki przedział wilgotności. Współspalanie biomasy z węglem znajduje w ostatnich latach coraz szersze zastosowanie, zarówno w kraju, jak i na świecie [13-17]. W chwili obecnej współspalanie biomasy z paliwami węglowymi realizowane jest na skalę przemysłową w szeregu krajowych elektrowni i elektrociepłowni. Spalanie paliw z dodatkiem biomasy przynosi korzyści nie tylko ekonomiczne i społeczne, ale również ekologiczne [14]. W pracy [18] podkreślono, że współspalanie węgla i biomasy umożliwia wykorzystanie właściwości węgla jako stabilizatora procesu spalania, co jest niezwykle istotne ze względu na zmienną zawartość wilgoci w mieszance paliwowej. Omawiany proces powoduje nie tylko ograniczenie emisji CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> oraz zanieczyszczeń organicznych, ale także obniżenie ilości wytworzonego popiołu.

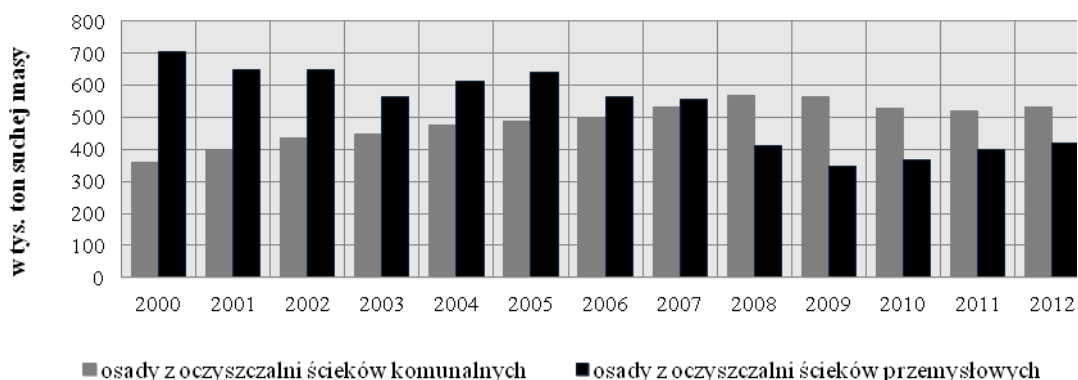
Biomasa może być wykorzystana na cele energetyczne w formie stałej do bezpośredniego spalania (drewno, słoma, osady ściekowe, makulatura), a także przetworzona na paliwo ciekłe (paliwo rzepakowe, alkohol) lub gazowe (biogaz z ze składowisk odpadów, z fermentacji odpadów zwierzęcych, z fermentacji osadów ściekowych).

Podstawowe cechy biomasy wyróżniające ją spośród innego typu paliw i mające bezpośredni wpływ na przebieg procesu spalania to:

- duża zawartość części lotnych, powodująca wysoką reaktywność paliwa,
- niska temperatura zapłonu,
- wysoka i zmienna zawartość wilgoci,
- zróżnicowany rozkład ziarnowy paliwa,
- zawartość alkaliów: potas, sód oraz chloru, siarki.

Biomasa jest paliwem węglowym, lecz ma właściwą sobie specyfikę spalania, m.in. jak wspomniano, z powodu dużej zawartości wilgoci oraz części lotnych. Stanowi zatem cenne paliwo energetyczne, zarówno w procesie monospalania, jak i współspalania z innymi paliwami. Ze względu na wysoką reaktywność, szybkość spalania karbonizatu biomasy jest zdecydowanie większa w porównaniu do węgla. Przykładowo, rozkład termiczny drewna rozpoczyna się w temperaturze około 220<sup>0</sup>C, a poszczególne jego składniki rozkładają się w różnych temperaturach, np. hemicelulozy: 220-320<sup>0</sup>C, celuloza: 320-370<sup>0</sup>C, lignina: 320-500<sup>0</sup>C. Do najważniejszych składników gazowych wydzielających się z drewna należą: CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> i H<sub>2</sub>, a głównymi ciekłymi elementami termicznego rozkładu tego typu paliwa są: woda, metanol, kwas octowy, aldehyd octowy i smoła. Ogólnie, proces spalania drewna jest podobny do spalania młodych węgli, zwłaszcza węgli brunatnych. Bardzo duży udział części lotnych w tego typu paliwie powoduje, że w procesie odgazowania wydziela się ponad 60-70% wartości opałowej drewna. Ze względu na wysoką reaktywność, szybkość spalania karbonizatu drewna jest zdecydowanie większa w porównaniu do węgla. Mechanizm utleniania pozostałości koksowej drewna zależy głównie od temperatury spalania. W wysokiej temperaturze dominuje utlenianie do CO, który następnie jest dopalany w spalinach. W niskiej temperaturze natomiast proces utleniania odbywa się do CO<sub>2</sub> z udziałem sorpcji tlenu na powierzchni karbonizatu [4].

Narastająca ilość osadów ściekowych komunalnych (rys.1.2.) zaczyna stwarzać ogromne problemy w ich racjonalnym zagospodarowaniu, tym bardziej, że składowanie ich nieprzetworzonej formy, które dotychczas było popularną metodą ich zagospodarowywania, będzie coraz bardziej ograniczane, a od 1 stycznia 2016 r., w przypadku tych odpadów o ciepłe spalania powyżej 6 MJ/kg suchej masy - niemożliwe [19].



Rys.1.2. Produkcja osadów ściekowych [20]

Do metod termicznego unieszkodliwiania osadów zalicza się spalanie, współspalanie oraz tzw. metody alternatywne, takie jak: zgazowanie, piroliza czy mokre utlenianie. Istotnym argumentem przemawiającym za spalaniem i współspalaniem jest pełne opanowanie podstaw procesów, łącznie z technikami oczyszczania powstających produktów. Analizując przydatność osadów do termicznych utylizacji, należy zwrócić uwagę na skład chemiczny masy palnej i substancji mineralnej, zawartość części lotnych, wilgotność, popiół i jego skład. Parametry te decydują o doborze sposobu prowadzenia procesu termicznego pozwalającego na zachowanie minimalnej emisji i uniknięcie zagrożeń eksploatacyjnych. Produkcja, właściwości i metody termicznej utylizacji osadów ściekowych zostały szczegółowo opisane, m.in. w pracach [21-34].

Mechanizm spalania osadów ściekowych różni się od mechanizmu spalania węgla, głównie z powodu:

- znacznego uwodnienia: 50% [35],
- dużego udziału substancji mineralnej: 50% s.m.,
- dużego udziału części lotnych: 90% w substancji palnej.

Jak już wcześniej wspomniano, samo spalanie jest już procesem bardzo złożonym, natomiast spalanie odpadów, a szczególnie osadów ściekowych, które są materiałem bardzo heterogenicznym, potęguje jeszcze tę złożoność. Niemniej jednak podstawowe procesy, które zachodzą podczas spalania typowych paliw, towarzyszą również spalaniu odpadów. Przebieg spalania substancji organicznych złożonych przede wszystkim z węgla, wodoru, tlenu, azotu i siarki można przedstawić w dużym uproszczeniu, jako utlenianie węgla i wodoru, które mają główne znaczenie w bilansie energetycznym [36]:

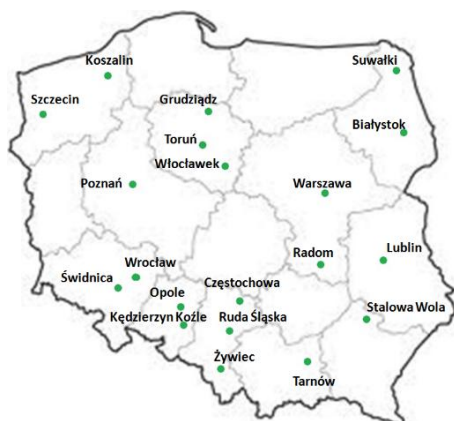


Podczas spalania oprócz dwutlenku węgla i wody powstają inne substancje, m.in. kwasy, sole, związki metaliczne, które są wynikiem reakcji chemicznych wynikających ze składu chemicznego samych odpadów. Wszystkim reakcjom towarzyszy wydzielanie ciepła, co stwarza możliwość odzysku energii.

Kinetyka spalania osadów ściekowych jest porównywalna do innych paliw energetycznych, a najbardziej zbliżona do węgla brunatnego [22]. Rozkład termiczny osadów ściekowych zaczyna się już od 100-150 °C, zachodzi prawie równocześnie z fazą suszenia, lecz dynamika wydzielania części lotnych jest większa niż w przypadku węgla brunatnego. Spalanie karbonizatu osadów ściekowych jest zdecydowanie szybsze niż węgla, głównie z powodu dużej reaktywności, dużej porowatości oraz małej zawartości węgla w paliwie. Badania przeprowadzone przez Werthera i innych [37] wykazały, że czas odgazowania mokrych osadów ściekowych o uziarnieniu 4-20 mm wynosił 100-300s, a dla osadów podsuszonych tylko 50s. Jak widać, suszenie, odgazowanie i spalanie części lotnych stanowi zatem istotny element procesu spalania paliwa. Spalanie karbonizatu stanowi zdecydowanie krótszy etap spalania, w porównaniu do węgla, przede wszystkim ze względu na niższą zawartość węgla pierwiastkowego w tym paliwie.

Należy również podkreślić, że spalanie osadów ściekowych nie jest procesem obojętnym dla środowiska, a wynika to głównie z emisji: dioksyn i furanów, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, HCl przyczyniających się do powstawania kwaśnych deszczy. W spalinach mogą pojawić się również metale ciężkie w formie gazowej, czyli w postaci aktywnej [38].

Termiczne metody utylizacji osadów ściekowych najczęściej poprzedzone są procesem suszenia częściowego (do uzyskania 85% s.m.) lub całkowitego (>85% s.m.). Suszenie osadów ściekowych ma na celu zmniejszenie masy tych odpadów, obniżenie kosztów transportu, pozbawienie ich organizmów chorobotwórczych, umożliwienie przechowywania i bezpośredniej utylizacji (bez dodatku paliwa podstawowego), a także uzyskanie odpowiedniej wartości rynkowej. Na rys. 1.3 przedstawiono lokalizację suszarni termicznych w Polsce. Osad po wysuszeniu całkowitym może mieć postać pyłu lub granulek (zależnie od technologii procesu). Cechą charakterystyczną osadów ściekowych, w przeciwieństwie do innych paliw, jest występowanie w czasie suszenia fazy kleistej. Do termicznego suszenia osadów wykorzystuje się biogaz, parę wodną, gaz ziemny, olej opałowy, ciepło „odpadowe”, a także nadwyżkę pary z zakładów przemysłowych i ciepło z turbin gazowych. Jak wiadomo, energochłonność procesu zależy głównie od uwodnienia odpadów, dlatego tak ważne jest ich odpowiednie wstępne odwodnienie. Instalacje suszenia tego typu odpadów powinny charakteryzować się bowiem jak najmniejszym wskaźnikiem zużycia ciepła koniecznego do odparowania 1 kg wody. Ilość energii potrzebnej do suszenia osadów ściekowych zależy nie tylko od rozwiązań technologicznych suszarni, sposobu odzysku ciepła czy doprowadzenia mediów grzewczych, ale przede wszystkim właściwości i charakterystyki osadu.



Rys.1.3. Suszarnie termiczne osadów ściekowych w Polsce [39]

Niniejsza praca stanowi porównawczą analizę właściwości różnego rodzaju paliw: biomasy, osadów ściekowych, węgla kamiennego, węgla brunatnego, antracytu oraz mułu węglowego, jako cennych źródeł energii wykorzystywanych we współczesnej energetyce.

## 2. Analiza właściwości osadów ściekowych w porównaniu do węgla i biomasy

Poniżej przedstawiono zestawienie wyników badań, podejmujących analizę techniczną i elementarną paliw (tablica 2.1, rys.2.1-2.9), a także charakterystyczne temperatury topliwości popiołów rozpatrywanych paliw, w atmosferze redukującej oraz utleniającej (tablica 2.2, rys.2.10-2.17). Pomiary wymagały odpowiedniego przygotowania paliwa, polegającego na jego rozdrobnieniu w młynku laboratoryjnym, a następnie przesianiu przez sito o rozmiarze oczek 100  $\mu\text{m}$ .

Na podstawie tablicy 2.1 oraz rys. 2.1.-2.9.można stwierdzić, iż w odniesieniu do wszystkich rozpatrywanych paliw:

- największą zawartością wilgoci cechuje się węgiel brunatny, najmniejszą antracyt,
- największą zawartością części lotnych charakteryzuje się biomasa, najmniejszą - antracyt,
- największą zawartością popiołu cechuje się muł węglowy oraz osady ściekowe, najmniejszą zaś antracyt oraz wierzba energetyczna,
- największa wartość opałowa cechuje antracyt, najmniejsza - osady ściekowe,
- największą zawartością pierwiastka C charakteryzuje się antracyt, najmniejszą - osady ściekowe,
- największą zawartością pierwiastka H cechuje się słoma, najmniejszą - antracyt,
- największą zawartością pierwiastka N charakteryzują się osady ściekowe, najmniejszą -sosna oraz antracyt,
- największą zawartością pierwiastka O cechuje się biomasa, najmniejszą - antracyt,
- największą zawartością pierwiastka S cechuje się węgiel kamienny oraz osady ściekowe (A,C), najmniejszą - biomasa.

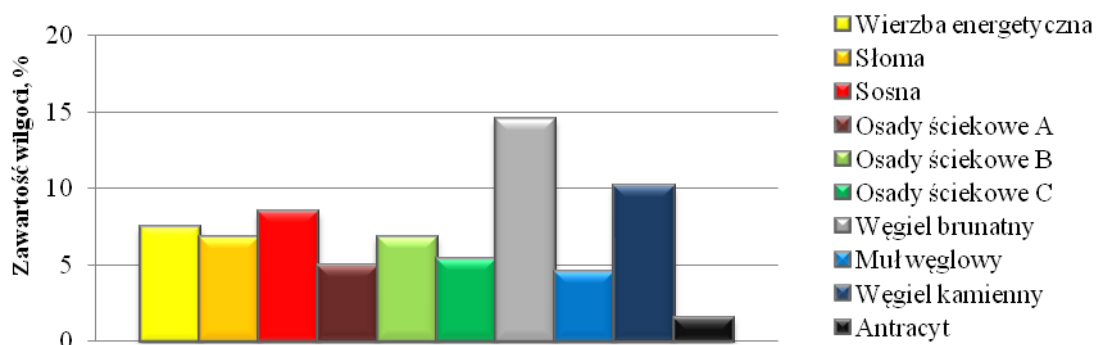
Powyższa analiza porównawcza paliw wykazała zatem różnorodność ich właściwości, istotnie wpływających na kinetykę i mechanizm procesów termicznych suszenia, spalania i współspalania, a także towarzyszącą im emisję zanieczyszczeń do atmosfery. Można zatem wnioskować, iż przykładowo wysoka zawartość siarki i azotu w osadach ściekowych wpływa na tworzenie się w gazach spalinowych podczas procesu spalania tlenków siarki oraz tlenków azotu.



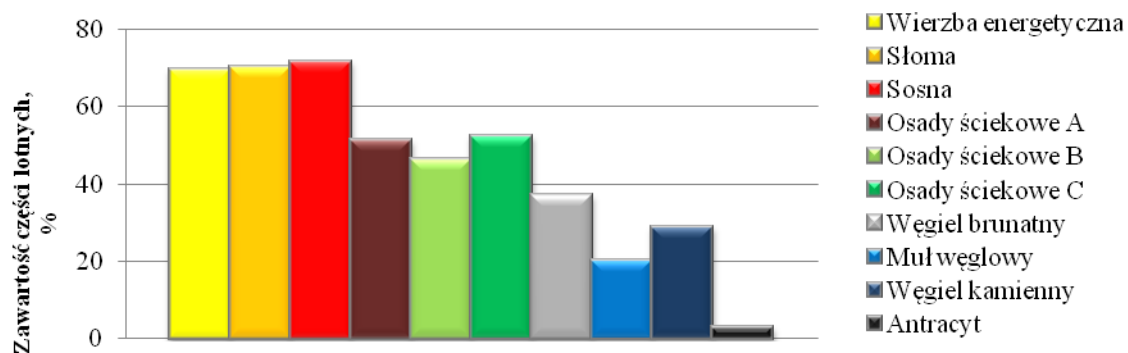
Tablica 2.1. Analiza techniczna i elementarna analizowanych paliw\*

Paliwo	ANALIZA TECHNICZNA				
	Zawartość wilgoci	Zawartość lotnych części	Zawartość popiołu	Wartość opałowa	
	W <sup>a</sup> , %	V <sup>a</sup> , %	A <sup>a</sup> , %	Q <sub>i</sub> <sup>a</sup> , kJ/kg	
Wierzba energetyczna	7,42	69,65	2,23	16828	
Słoma	6,71	70,38	4,20	16684	
Sosna	8,39	71,82	4,89	17570	
Osady ściekowe A	4,94	51,44	36,44	12574	
Osady ściekowe B	6,74	46,40	38,16	11104	
Osady ściekowe C	5,31	52,59	32,46	13801	
Węgiel brunatny	14,46	37,11	18,42	16165	
Muł węglowy	4,51	20,45	39,43	15024	
Węgiel kamienny	10,08	28,91	11,07	23488	
Antracyt	1,50	3,00	2,50	39350	
Paliwo	ANALIZA ELEMENTARNA				
	Zawartość pierwiastka węgla	Zawartość pierwiastka wodoru	Zawartość pierwiastka azotu	Zawartość pierwiastka tlenu (obl.)	Zawartość pierwiastka siarki
	C <sub>t</sub> <sup>a</sup> , %	H <sub>t</sub> <sup>a</sup> , %	N <sup>a</sup> , %	O <sub>d</sub> <sup>a</sup> , %	S <sub>t</sub> <sup>a</sup> , %
Wierzba energetyczna	44,65	6,12	0,69	38,87	0,06
Słoma	42,54	6,89	0,53	39,13	0,10
Sosna	42,40	4,85	0,00	39,46	0,02
Osady ściekowe A	30,77	3,92	4,26	18,23	1,44
Osady ściekowe B	27,50	3,72	4,24	18,73	0,91
Osady ściekowe C	32,43	4,30	5,47	18,42	1,61
Węgiel brunatny	43,16	3,08	0,55	19,81	1,04
Muł węglowy	40,12	2,82	0,54	12,11	0,72
Węgiel kamienny	59,89	3,62	1,17	12,89	1,71
Antracyt	93,00	1,70	0,06	1,01	0,23

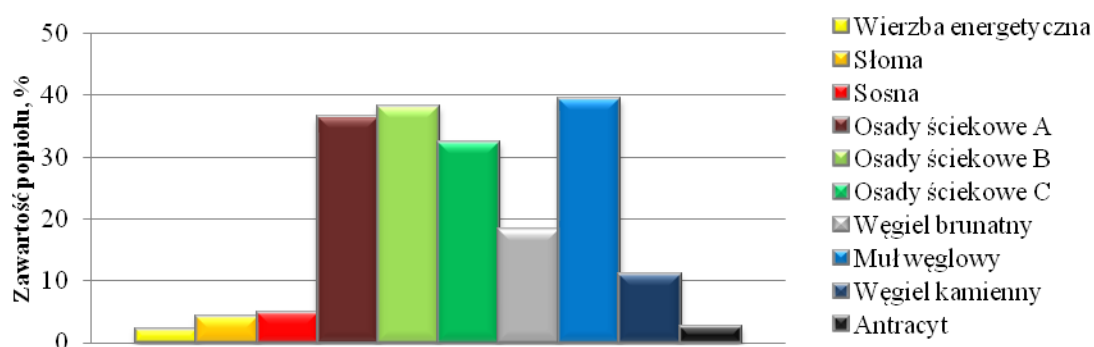
\*pomiarzy wykonane przez firmę zewnętrzną, zgodnie ze zleceniem



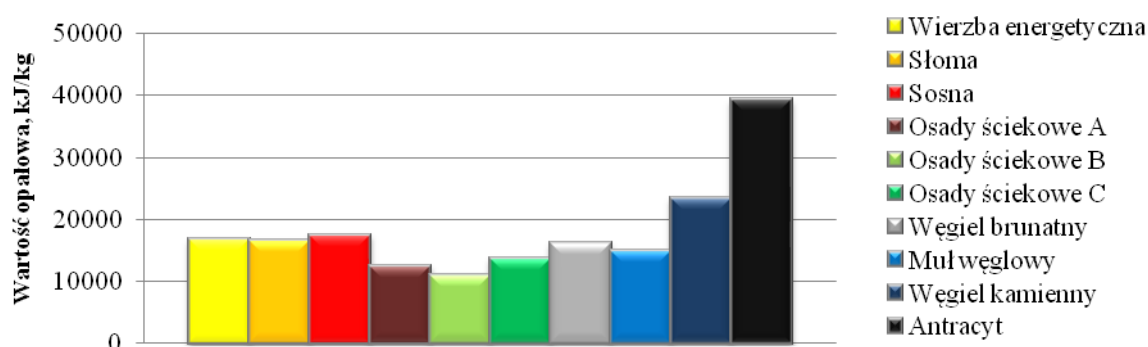
Rys.2.1. Porównanie udziału wilgoci w analizowanych paliwach



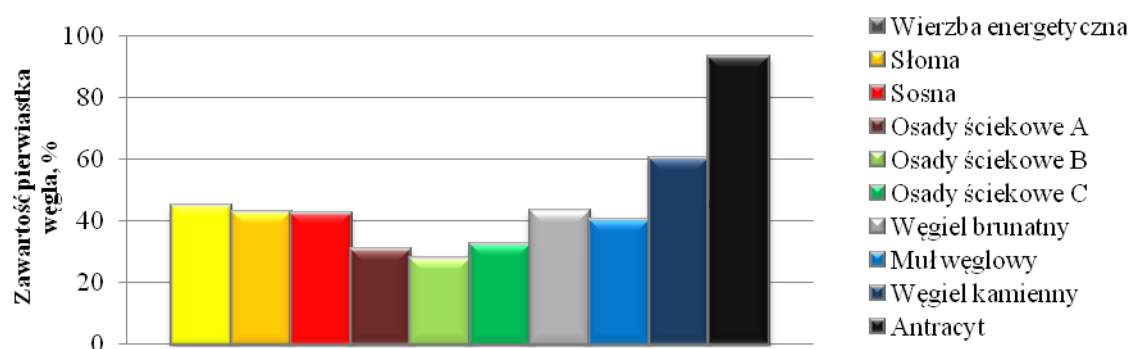
Rys.2.2. Porównanie udziału części lotnych w analizowanych paliwach



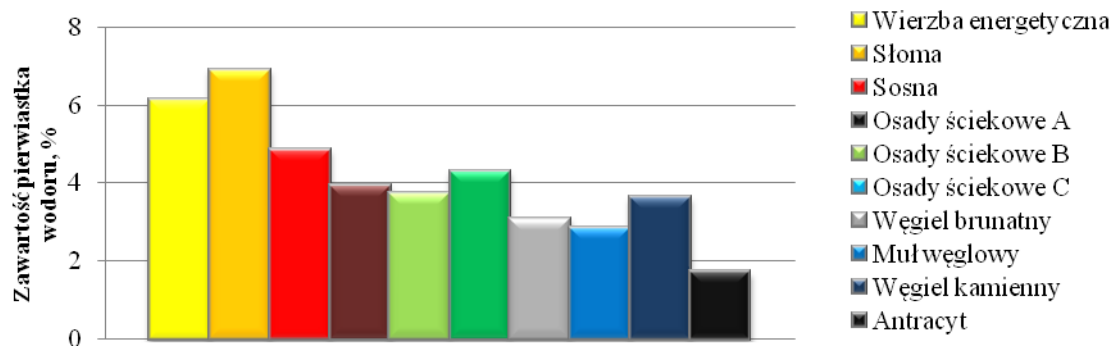
Rys.2.3. Porównanie udziału popiołu w analizowanych paliwach



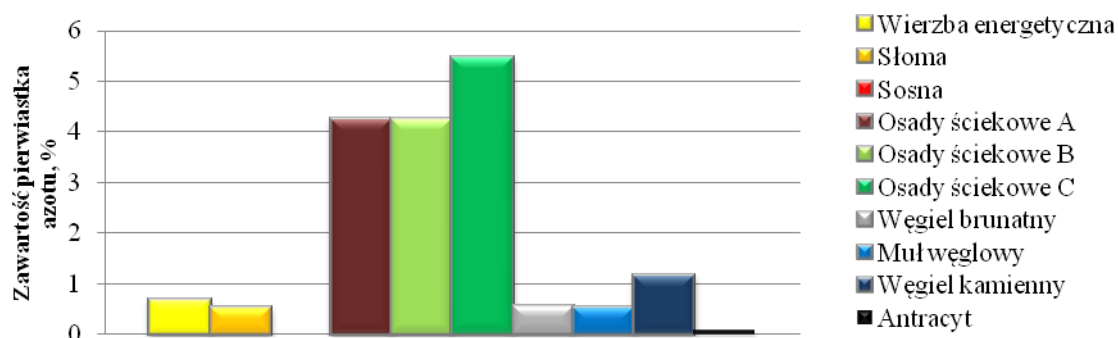
Rys.2.4. Porównanie wartości opalowej analizowanych paliw



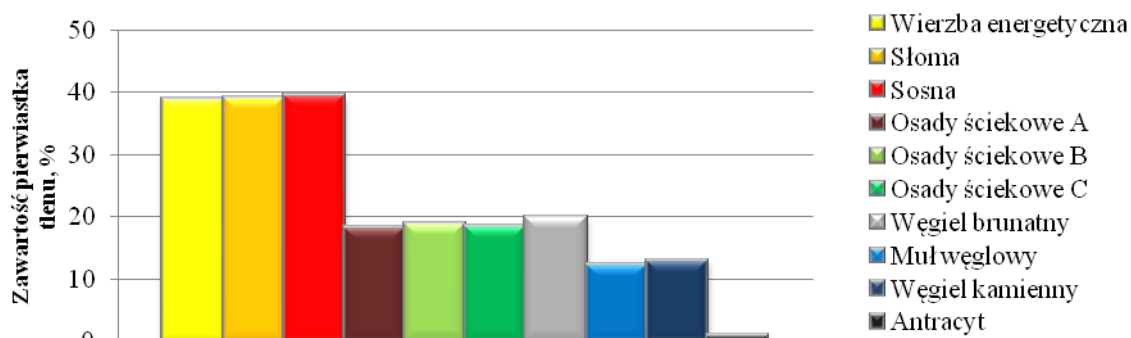
Rys.2.5. Porównanie udziału pierwiastka węgla w analizowanych paliwach



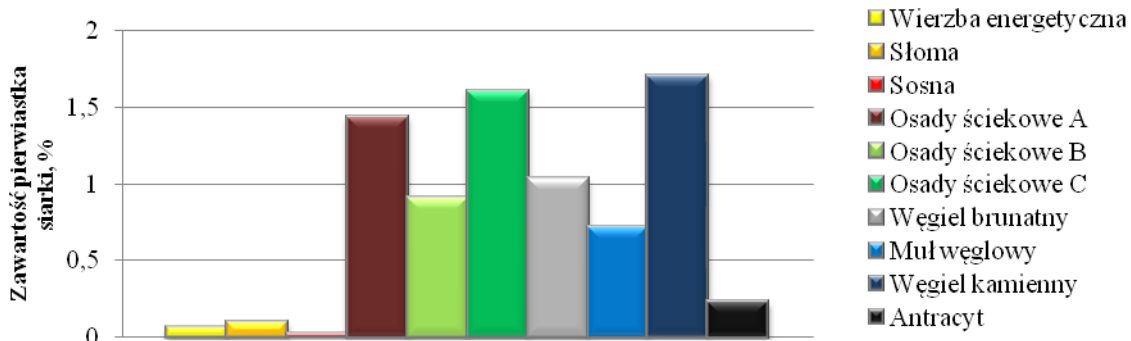
Rys.2.6. Porównanie udziału pierwiastka wodoru w analizowanych paliwach



Rys.2.7. Porównanie udziału pierwiastka azotu w analizowanych paliwach



Rys.2.8. Porównanie udziału pierwiastka tlenu w analizowanych paliwach



Rys.2.9. Porównanie udziału pierwiastka siarki w analizowanych paliwach

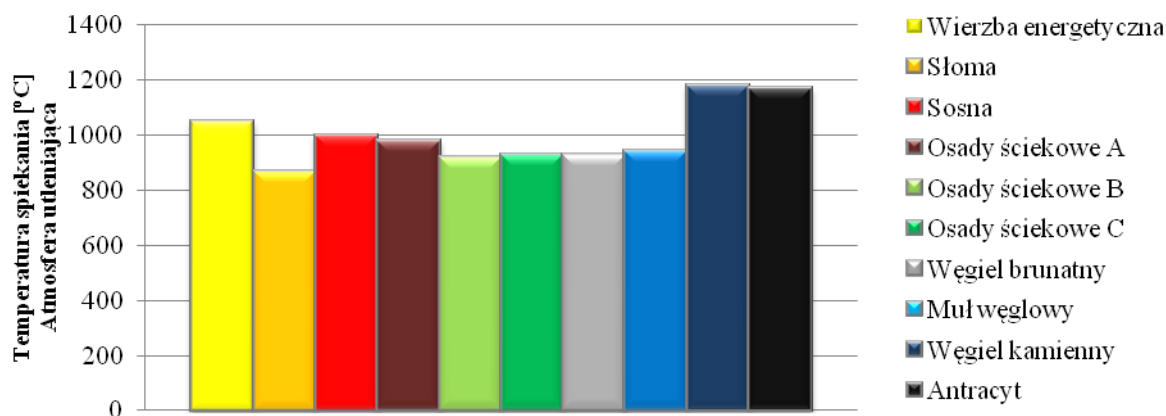


Tablica 2.2. Charakterystyczne temperatury topliwości popiołów paliw\*\*

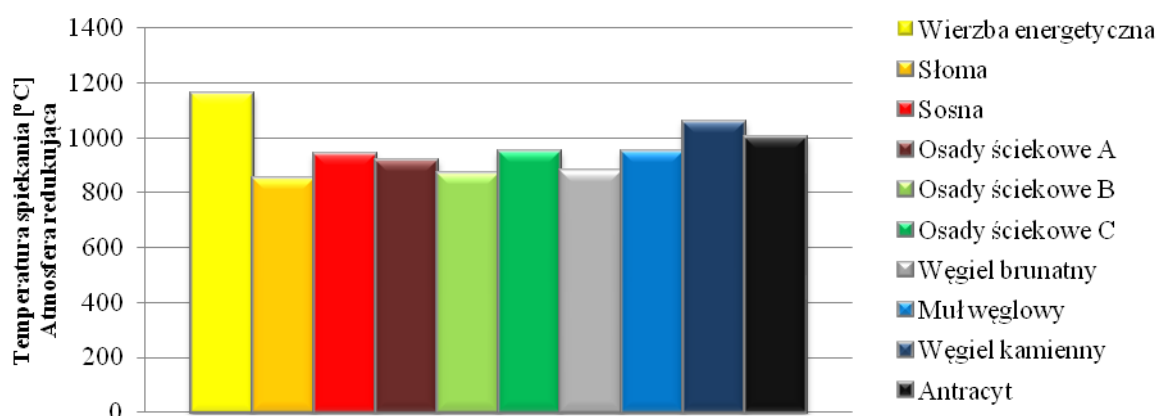
Paliwo	CHARAKTERYSTYCZNE TEMPERATURY TOPLIWOŚCI POPIOŁU							
	Temperatura spiekania, $t_s$ [°C]		Temperatura mięknięcia, $t_A$ [°C]		Temperatura topnienia, $t_B$ [°C]		Temperatura płynięcia, $t_C$ [°C]	
	Atmosfera utleniająca	Atmosfera redukująca	Atmosfera utleniająca	Atmosfera redukująca	Atmosfera utleniająca	Atmosfera redukująca	Atmosfera utleniająca	Atmosfera redukująca
Wierzba energetyczna	1050	1160	1190	1340	1240	>1500	1330	>1500
Słoma	870	850	990	960	1020	980	1100	1010
Sosna	1000	940	1340	1270	1360	1350	1420	1420
Osady ściekowe A*	980	920	1220	1080	1280	1130	1290	1180
Osady ściekowe B	920	870	1170	1190	1250	1230	1320	1280
Osady ściekowe C	930	950	1230	1090	1270	1200	1330	1270
Węgiel brunatny	930	880	1240	1220	1250	1240	1280	1270
Muł węglowy	940	950	1350	1320	>1500	>1500	>1500	>1500
Węgiel kamienny	1180	1060	1300	1150	1330	1160	1370	1200
Antracyt	1170	1000	1230	1050	1300	1070	1410	1100

Atmosfera utleniająca – powietrze  
 Atmosfera redukująca – mieszanka CO+CO<sub>2</sub> w stosunku objętościowym 3:2  
 \*badanie wykonane w ramach projektu NCN nr decyzji DEC-2012/07/B/ST8/03730

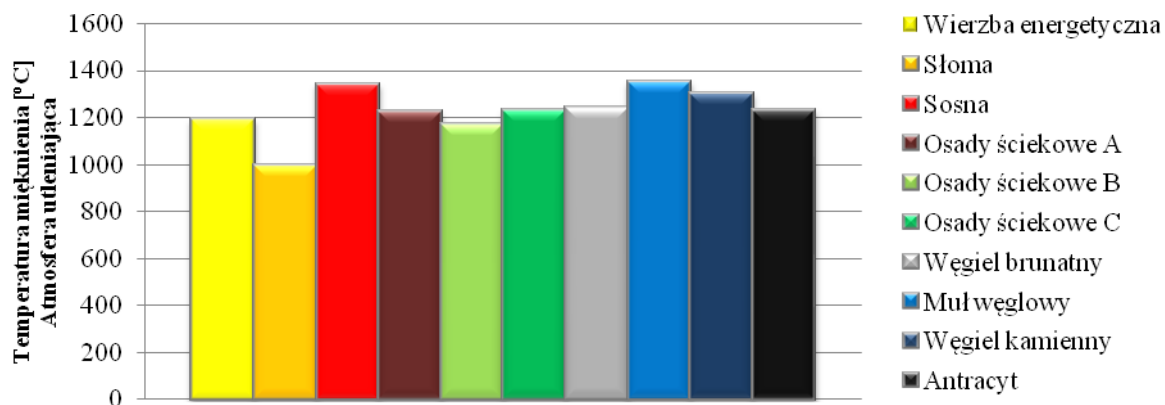
\*\*pomiary wykonane przez firmę zewnętrzną, zgodnie ze zleceniem



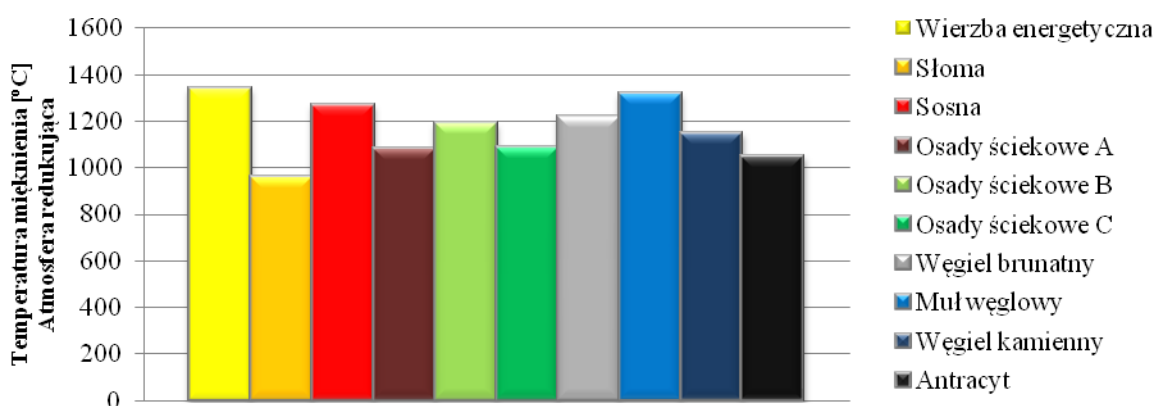
Rys.2.10. Porównanie temperatur spiekania (atmosfera utleniająca) analizowanych paliw



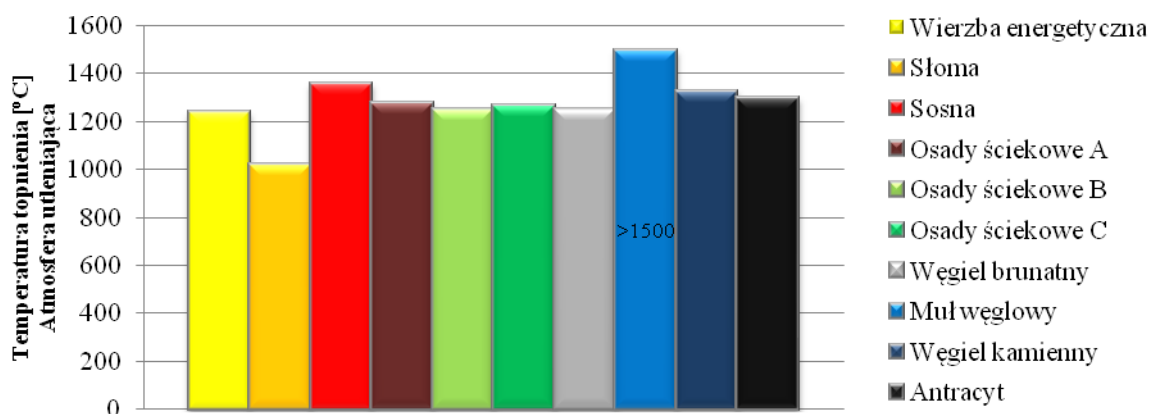
Rys.2.11. Porównanie temperatur spiekania (atmosfera redukująca) analizowanych paliw



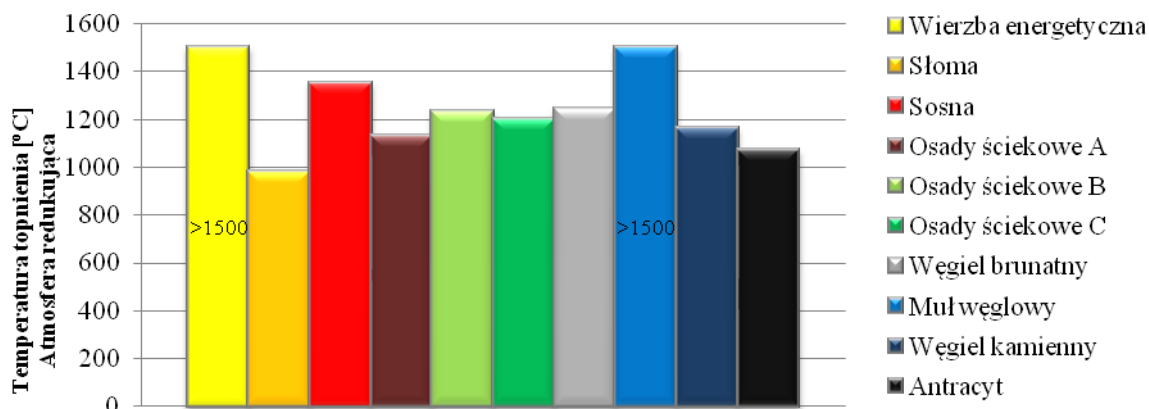
Rys.2.12. Porównanie temperatur mięknięcia (atmosfera utleniająca) analizowanych paliw



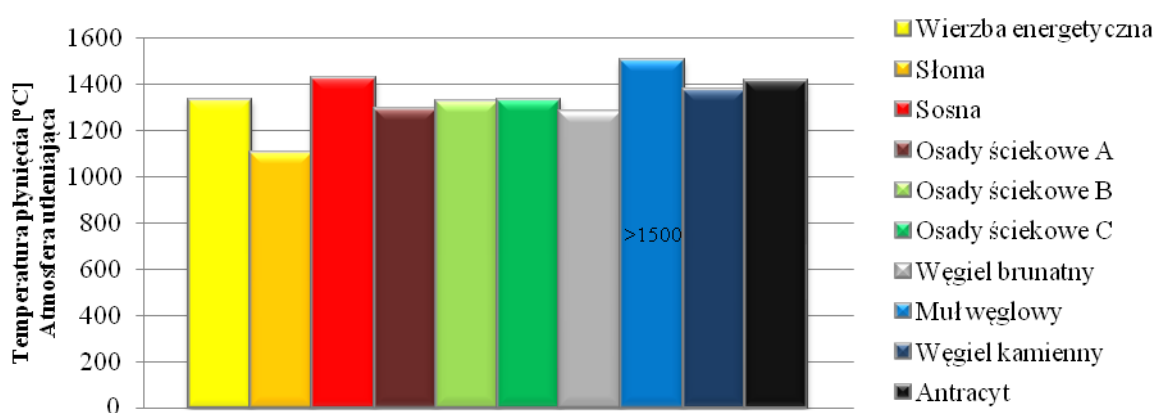
Rys.2.13. Porównanie temperatur mięknięcia (atmosfera redukująca) analizowanych paliw



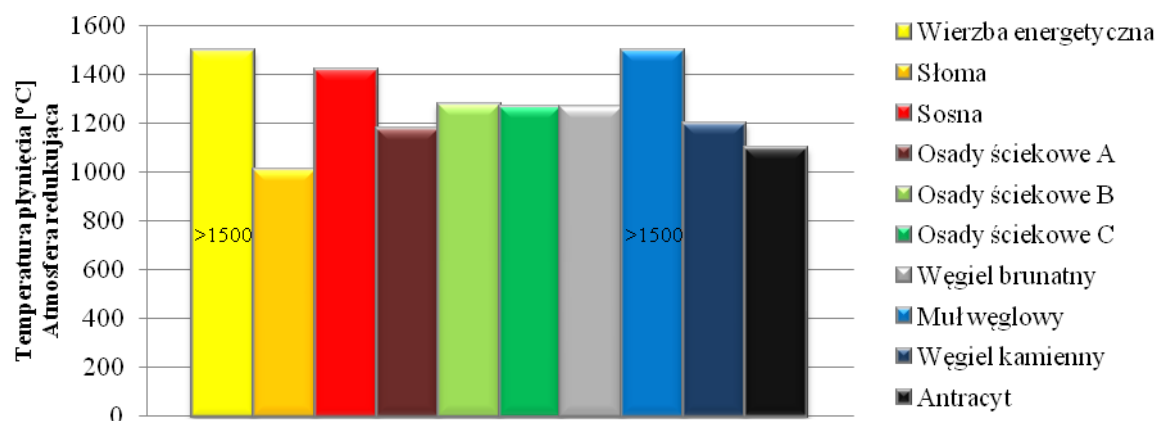
Rys.2.14. Porównanie temperatur topnienia (atmosfera utleniająca) analizowanych paliw



Rys.2.15. Porównanie temperatur topnienia (atmosfera redukująca) analizowanych paliw



Rys.2.16. Porównanie temperatur płynięcia (atmosfera utleniająca) analizowanych paliw



Rys.2.17. Porównanie temperatur płynięcia (atmosfera redukująca) analizowanych paliw

Na podstawie tablicy 2.2 oraz rys. 2.10.-2.17. można stwierdzić, iż:

- największą temperaturą spiekania popiołu w atmosferze utleniającej cechują się węgiel kamienny oraz antracyt, natomiast w atmosferze redukującej - wierzba energetyczna,
- największą temperaturą mięknięcia popiołu w atmosferze utleniającej cechują się sosna oraz muł węglowy, natomiast w atmosferze redukującej - wierzba energetyczna,
- największą temperaturą topnienia popiołu w atmosferze utleniającej cechuje się muł węglowy, natomiast w atmosferze redukującej - wierzba energetyczna oraz muł węglowy,

- największą temperaturą płynięcia popiołu w atmosferze utleniającej cechuje się muł węglowy, natomiast w atmosferze redukującej - wierzba energetyczna oraz muł węglowy.

W przypadku wszystkich analizowanych paliw (rys. 2.10-2.17), zarówno w atmosferze redukującej, jak i utleniającej, najniższą temperaturą spiekania, mięknięcia, topnienia oraz płynięcia popiołu charakteryzuje się słoma. Wynika to najprawdopodobniej z analizy technicznej i elementarnej tego rodzaju paliwa (mała zawartość popiołu, duża ilość alkaliów, m.in. chloru).

### 3. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza porównawcza rozpatrywanych paliw wykazała różnorodne właściwości, mające decydujący wpływ na konstrukcję palenisk oraz przebieg procesów termicznych i ich optymalizację, zarówno z punktu widzenia technologicznego, jak i środowiskowego. Zaakcentowano ponadto istotę własności popiołów, które z jednej strony będąc balastem paliwa, z drugiej - wpływają na kinetykę procesów termicznych, z możliwością ich dalszego wykorzystania. Dlatego tak istotne jest również rozpoznanie wartości charakterystycznych temperatur topliwości popiołów różnego rodzaju paliw.

### Literatura

1. Basu P., Fraser S.A.: *Circulating Fluidized Bed Boilers. Design and Operations*, Butterworth-Heinemann (USA), 1991.
2. Basu. P.: *Combustion of coal in circulating fluidized – bed boilers: a review*. *Chemical Engineering Science* 54 (1999), pp.5547-5557.
3. Chomiak J.: *Podstawowe problemy spalania*. PWN, Warszawa, 1977.
4. Kordylewski W.: *Spalanie i paliwa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
5. Tomeczek J.: *Spalanie węgla*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1992.
6. Kijo-Kleczkowska A., Szumera M., Środa K.: *Porównawcza analiza TG/DTG oraz DTA paliw stałych w powietrzu* (wysłany do recenzji w *Archives of Mining Sciences*, 2014).
7. Wandrasz J.W., Wandrasz A.J.: *PALIWA FORMOWALNE biopaliwa i paliwa z odpadów w procesach termicznych*, Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa 2006.
8. Jasięńko S.(red.): *Chemia i fizyka węgla*. Oficyna Wdawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1995.
9. Kijo-Kleczkowska A.: *Identyfikacja mechanizmu współspalania zawieszinowych paliw węglowo-wodnych z biomasą*. *Archiwum Spalania* 10 (2010), s.87-98.
10. Kijo-Kleczkowska A.: *Analysis of the Co-Combustion Process of Coal-Water Slurries and Biomass*. *Archives of Mining Sciences* 55 (2010), nr 3, s.487-500.
11. Kijo-Kleczkowska A.: *Combustion of coal–water suspensions*. *Fuel* 90 (2011), pp.865-877.
12. Kijo-Kleczkowska A.: *Analysis Combustion Process of Coal-Water Fuel*. *Archives of Mining Sciences*, 54 (2009), nr 1, s.119-133.
13. Demirba A.: *Combustion characteristics of different biomass fuels*. *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (2004), pp.219-230.
14. Demirba A.: *Sustainable co-firing of biomass with coal*. *Energy Conversion and Management*. 44 (2003), pp.1465-1479.
15. Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A.: *Analysis of coal-biomass mixtures combustion*. *Archivum Combustionis* 28 (2008), pp.215-230.
16. Sait Hani H., Hussain Ahmad, Salema Arshad Adam, AniFarid Nasir: *Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis*. *Bioresource Technology* 118 (2012), pp. 382–389.
17. Senneca O.: *Kinetics of pyrolysis, combustion and gasification of three biomass fuels*. *Fuel Processing Technology* 88 (2007), pp.87-97.

18. Kaczmarek A.: Energetyczne wykorzystanie biomasy. Rynek Energii, nr 2, 2008, s.54-58.
19. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczenia odpadów do składowania odpadów danego typu (Dz. U. 2013 poz. 38).
20. Ochrona Środowiska 2001-2013. Główny Urząd Statystyczny. Informacje i Opracowania Statystyczne, Warszawa 2001-2013.
21. Bień J.B., Wystalska K.: Procesy termiczne w unieszkodliwianiu osadów ściekowych. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2008.
22. Bień J., Gandor M.: Parametry kinetyczne spalania osadów ściekowych w atmosferze O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>. Archiwum Spalania 11 (2011), nr 3-4, s. 171-179.
23. Li P.-S., Hu Y., Yu W., Yue Y.-N., Xu Q., Hu S., Hu N.-S., Yang J.: Investigation of sulfur forms and transformation during the co-combustion of sewage sludge and coal X-ray photoelectron spectroscopy. Journal of Hazardous Materials 167 (2009), pp. 1126-1132.
24. Pająk T.: Suszenie i spalanie osadów ściekowych – w Polsce i innych krajach UE. VI Ogólnopolska Konferencja Szkoleniowa Suszenie i termiczne przekształcanie osadów ściekowych. Warszawa 19-21 września 2012.
25. Pająk T.: Projekty spalarni odpadów komunalnych i osadów ściekowych w strategii zagospodarowania odpadów. Inżynieria i Ochrona Środowiska 13 (2010), s. 53-66.
26. Słowik K., Stelmach S., Wasilewski R.: Sewage sludge co-combustion in coal-fired boilers. Archives of Waste Management and Environmental Protection 13 (2011), pp. 41-50.
27. Werle S.: Energia ze ścieków. Termiczne sposoby zagospodarowania osadów ściekowych, Energetyka ciepła i zawodowa, 9 (2010), pp. 28-31.
28. Werle S.: Wielowariantowa analiza możliwości współspalania osadów ściekowych w kotłach energetycznych opalanych węglem. Archives of Waste Management 13 (2011) nr 1, pp. 21-38.
29. Werle S.: Termiczne sposoby zagospodarowania osadów ściekowych. Energia ze ścieków. Energetyka Ciepła i Zawodowa, nr 9/2010.
30. Kijo-Kleczkowska A., Szumera M., Środa K.: Thermal analysis of solid fuels in an inert atmosphere (artykuł przyjęty do opublikowania w Archives of Mining Sciences).
31. Kijo-Kleczkowska A., Środa K.: Analysis of combustion process of sewage sludge in reference to coals and biomass (artykuł przyjęty do opublikowania w Archives of Mining Sciences).
32. Kijo-Kleczkowska A., Otwinowski H., Środa K.: Properties and production of sewage sludge in Poland with reference to the methods of neutralizing. Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska, vol.14 (2012), pp.59-78.
33. Kijo-Kleczkowska A., Kosowska-Golachowska M., Gajewski W., Środa K., Musiał T., Wolski K.: Spalanie osadów ściekowych w odniesieniu do węgla i biomasy. Zeszyty Naukowe PRz (Konferencja: XXII Zjazd Termodynamików, 23-27.09.2014).
34. Środa K.: Termiczne metody suszenia i unieszkodliwiania osadów ściekowych. VII Międzywydziałowe Seminarium Kół Naukowych Politechniki Częstochowskiej. Materiały konferencyjne (referat), 2013.
35. Boruszko D.: Przeróbka i unieszkodliwianie osadów ściekowych: ćwiczenia laboratoryjne. Wydaw. Politechniki Białostockiej. Białystok, 2001.
36. Kempa E.S.: Gospodarka odpadami miejskimi. Arkady, Warszawa 1983.
37. Werther, J., Ogada, T.: Sewage sludge combustion. Progress in Energy and Combustion Science 25 (1999), pp. 55–116.
38. Piecuch T.: Termiczna utylizacja odpadów. Rocznik Ochrony Środowiska. Tom 2 (2000), s. 11-37.
39. Bień J.D.: Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych metodami termicznymi. Inżynieria i Ochrona Środowiska, 4 (2012), s. 439-449.

