

## POPIOŁY LOTNE, JAKO ZBROJENIE KOMPOZYTÓW METALOWYCH NA OSNOWIE STOPÓW METALI LEKKICH CZĘŚĆ 2. BADANIA WYSOKOTEMPERATUROWE

### FLY ASH AS THE REINFORCEMENT OF LIGHT ALLOY METAL MATRIX COMPOSITES PART 2. HIGH TEMPERATURE INVESTIGATIONS

*Piotr Długosz, Paweł Darlak, Piotr Drzymała, Jerzy J. Sobczak*

*Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

#### **Streszczenie**

*W drugiej części publikowanego cyklu zaprezentowano wyniki badań wysokotemperaturowych wybranych popiołów lotnych, przeznaczonych na zbrojenie materiałów kompozytowych typu ALFA. Na podstawie wykresów obrazujących zmiany wymiarów próbki w funkcji temperatury wyznaczono punkty charakterystyczne, odpowiadające wartościom temperatury spiekania, mięknięcia, topnienia i płynięcia. Poprawność wyników badań termicznych potwierdzono w testach wtórnych, porównawczych, które przeprowadzono w zróżnicowanych warunkach nagrzewania. W efekcie prac wytypowano popioły o najwyższej odporności termicznej.*

*Słowa kluczowe:* energetyka, węgiel, popiół lotny, gospodarka odpadami, badania wysokotemperaturowe, kompozyty ALFA

#### **Abstract**

*The second part of the publication presents the results of high temperature investigations of selected sorts of fly ash serving as a reinforcement in ALFA composites. Using graphs illustrating changes of sample dimensions in function of temperature, the characteristic points corresponding to the temperature of sintering, softening, melting and flowing were determined. The validity of the thermal test results was confirmed in the second series of comparative tests, performed at different heating rates. As a result of the studies, ash grades characterized by high thermal resistance were selected.*

*Key words:* power industry, coal, fly ash, waste management, high temperature investigations, ALFA composites

## Wprowadzenie

Popioły lotne można sklasyfikować w oparciu o różne kryteria, np.: ze względu na rodzaj węgla, z którego spalania powstają, technologii spalania, czy zawartości poszczególnych komponentów. Wszystkie te podziały w mniejszym lub większym stopniu odnoszą się do składu chemicznego. Dlatego też, klasyfikacja popiołów lotnych oparta jest głównie na umownym składzie tlenkowym. Jednym z najważniejszych kryteriów podziału jest zawartość tlenku wapnia (CaO). Według zawartości tego składnika, popioły lotne można zaliczyć do wysokowapniowych – klasa C, jeżeli zawierają ponad 30% wag. CaO. Do niskowapniowych zaliczamy pozostałe, zwykle zawartość w nich CaO jest mniejsza niż 4% wag. – klasa F. Zawartości innych tlenków pozostają w ścisłej zależności od udziału tlenku wapnia. W tabeli 1 pokazano wymogi wg ASTM dotyczące składów chemicznych klas C i F popiołów lotnych.

Popiół lotny klasy C pochodzi ze spalania węgla ksylicowego (zawierającego strukturę drewna) oraz podbitumicznego. Większość tego typu popiołów zawiera ponad 15% wag. tlenku wapnia, niektóre zawierają poniżej 10% wag. tego związku. Typowe fazy krystaliczne obecne w popiołach klasy C to: anhydryt ( $\text{CaSO}_4$ ), glinian trójwapnia ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ), tlenek wapnia (CaO), kwarc ( $\text{SiO}_2$ ), peryklaz (MgO), mulit ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ), marwinic ( $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ ) i ferryt ( $(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{Fe}_3\text{Al})_2\text{O}_4$ ) [1–3].

Popiół lotny klasy F jest zazwyczaj uzyskiwany ze spalania antracytu lub węgla bitumicznego. Obecnie nie używa się znaczących ilości antracytu do produkcji energii elektrycznej. Dlatego też, znacząca większość popiołu lotnego klasy F jest otrzymywana ze spalania węgla bitumicznego. Popiół lotny klasy F posiada niską zawartość tlenku wapnia – mniejszą niż 6% wag., i tym samym jest określany jako niskowapniowy. Kwarc ( $\text{SiO}_2$ ), mulit ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ) i hematyt ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) są głównymi fazami krystalicznymi występującymi w popiołach klasy F [1–3].

Tabela 1. Skład chemiczny popiołów lotnych klasy C i F [1]

Table 1: The chemical composition of C and F class of fly ash [1]

Składnik	Klasa (% wag.)	
	C	F
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , min.	50,0	70,0
$\text{SO}_3$ , max.	5,0	5,0
LOI ( <i>loss on ignition</i> – straty prażenia), max.	6,0	6,0
Zawartość wilgoci, max.	5,0	3,0

W pyłach lotnych występują takie pierwiastki, jak: tlen, krzem, glin, żelazo, wapń, magnez, sód, potas, tytan, których udział wynosi od kilku do kilkudziesięciu procent. Dodatkowo popioły lotne zawierają dużą liczbę innych pierwiastków, które ze względu na udział można określić jako śladowe, a ich zawartość waha się od kilku do kilkudziesięciu części na milion cząsteczek [ppm].

Oprócz tlenku wapnia w składzie popiołów lotnych obecne są tlenki: krzemu, glinu i żelaza. Ponadto stwierdzono także występowanie:  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $SO_3$ ,  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $BaO$  i innych, w udziałach nieprzekraczających kilku % wag.

Badane w pracy popioły lotne cechowało znaczne zróżnicowanie pod względem składu chemicznego (umownego składu tlenkowego). Największa zawartość tlenku krzemu i tlenku glinu występowała w popiołach z elektrowni i elektrociepłowni: Poznań, Opole, Szczecin, zaś najmniejsza w zakładach: Kielce, Skawina i Białystok, co odpowiadało popiołom wysokowapniowym. Zawartość tlenku wapnia była ściśle związana z zawartością tlenku siarki, co świadczyło o zastosowaniu wapniowych metod odsiarczania spalin. Również popioły z największej opalanej węglem brunatnym Elektrowni Bełchatów cechowały się znacznym udziałem tlenku wapnia (średnio 28,6% wag.). Największa koncentracja tlenków żelaza występowała w popiołach z Elektrociepłowni Kielce (oprócz kotła spalającego biomasę) i Rzeszów. Zawartość tlenków metali ciężkich o gęstości powyżej 4 g/cm<sup>3</sup> (oprócz żelaza) wynosiła średnio około 1,5%.

Popioły lotne do badań pobrano na terenie wytypowanych krajowych elektrowni i elektrociepłowni (rys. 1).



*Rys. 1. Lokalizacja elektrociepłowni i elektrowni w Polsce. Symbolem firmowym Instytutu Odlewnictwa wyróżniono miejsca pobranych próbek*

*Fig. 1. Location of the main electric and thermoelectric power plants in Poland. A "ladle" symbol (FRI trademark) marks the places of sampling*

Zdecydowaną większość popiołów pozyskano wprost z elektrofiltrów. Wyjątek stanowiły popioły z elewatorów i cyklonów. Wyboru zakładów dokonano w oparciu o następujące kryteria:

- położenie geograficzne,
- odległość od złóż surowców energetycznych,
- rodzaj surowca (węgiel kamienny, węgiel brunatny),
- technologia spalania (kotły: rusztowe, pyłowe, fluidalne).

## Przygotowanie próbek i metodyka badań

Pobrane próbki popiołów lotnych kompaktowano w pastylki o przekroju okrągłym przy użyciu specjalistycznej prasy laboratoryjnej. Próbki o średnicy i wysokości 3 mm (rys. 2) umieszczano w ceramicznej rurze pieca, bezpośrednio na płytce ze spiekane go tlenku glinu, połączonej z termoparą PtRh10-Pt. Pomiar rozpoczynano w temperaturze 830°C. Zmiany profilu próbki rejestrowano za pomocą kamery analogowej (co 1,5°C) wyposażonej w zestaw przesłon i filtrów optycznych. Piec nagrzewano ze stałym przyrostem temperatury 10°C/min.



Rys. 2. Próbką popiołu na ceramicznej podstawie

Fig. 2. The fly ash sample on ceramic substrate

Podczas wygrzewania próbek w piecu obserwowano wyraźne zmiany ich kształtu i wymiarów [4, 5]. Zarejestrowane wartości temperatury określały:

- temperaturę spiekania, w której następował skurcz próbki z zachowaniem ostrych krawędzi;
- temperaturę mięknięcia, w której następowało wyraźne zaokrąglenie profilu, oznaczające początek nadtapiania. Zjawisko to często wiązane jest z pojawieniem się w próbce znacznych ilości fazy ciekłej;
- temperaturę topnienia, w której badana próbka przybierała kształt półkuli;
- temperaturę płynięcia, w której próbka ulegała rozlaniu (płynięciu).

Poznanie wymienionych charakterystyk temperaturowych jest szczególnie istotne dla sprecyzowania warunków spiekania surowców, określenia zachowania się składników w złożonym tworzywie podczas jego nagrzewania.

## Badania wysokotemperaturowe

Pomiary przeprowadzono na urządzeniu PR-25/1750 w Zakładzie Technologii Instytutu Odlewnictwa w Krakowie (rys. 3 i 4). Program komputerowy do wyznaczania temperatury przemian fazowych został opracowany w oparciu o normę PN-82/G-04535. Rejestrację i wydruk wyników wykonano w systemie TEMPAT, opracowanym w Przemysłowym Instytucie Elektroniki w Warszawie.



Rys. 3. Piec grzewczy PR-25/1750

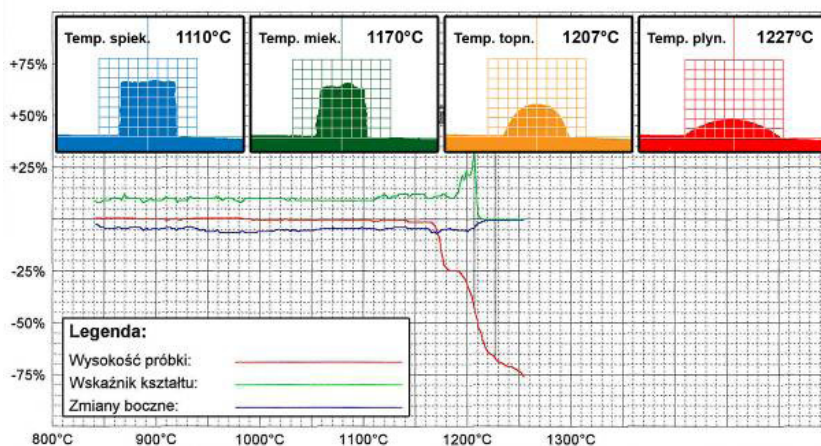
Fig. 3. The PR-25/1750 heating oven



Rys. 4. Kamera rejestrująca obraz próbki

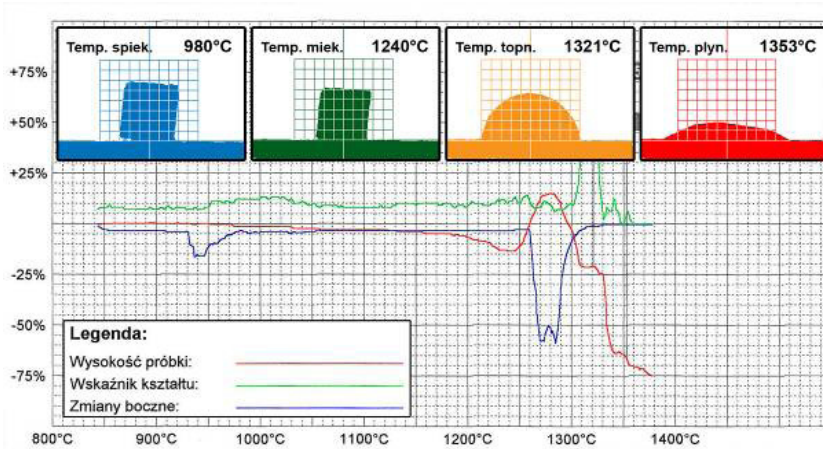
Fig. 4. The camera for sample image recording

## Wyniki badań wysokotemperaturowych – wyznaczenie wartości charakterystycznych (rys. 5–27)



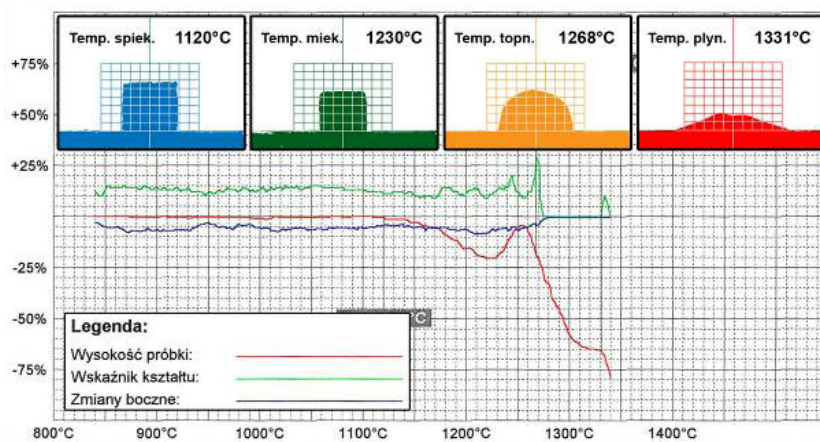
Rys. 5. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego M7 zasiarczonego, węglowego z Elektrociepłowni Siekierki

Fig. 5. Dimensional changes in the M7 fly ash sample of bastard coal from Siekierki Power Plant



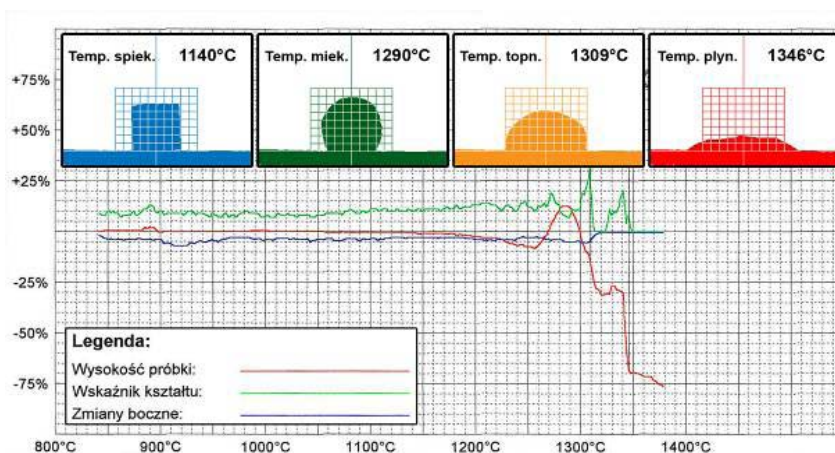
Rys. 6. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego ZRP3 z Elektrociepłowni Siekierki, spalonego z dodatkiem 10% wag. biomasy

Fig. 6. Dimensional changes in the ZRP3 fly ash sample of coal burned with 10 wt.% biomass addition from Siekierki Power Plant



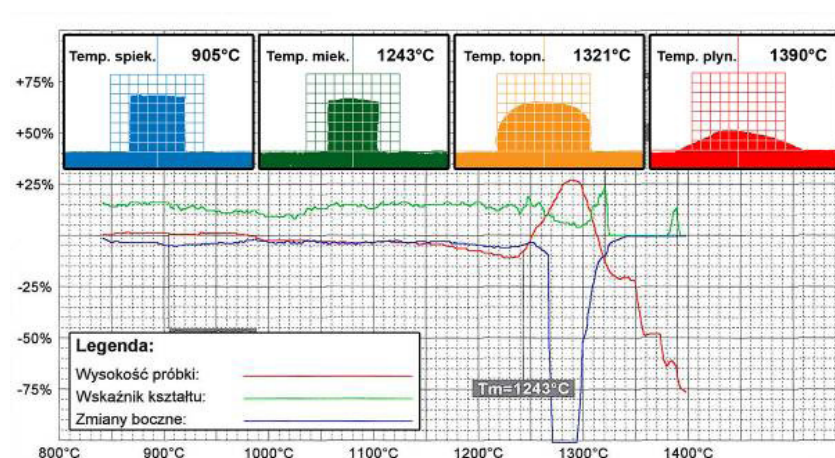
Rys. 7. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego z Elektrociepłowni Rzeszów

Fig. 7. Dimensional changes in the fly ash sample from Rzeszów Power Plant



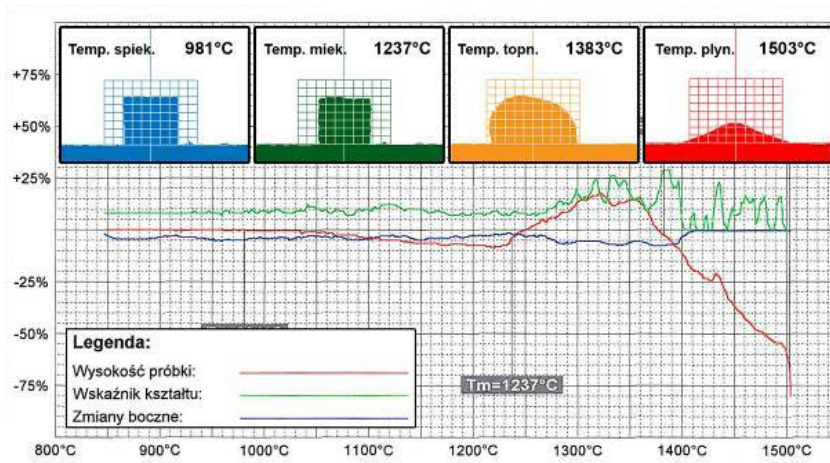
Rys. 8. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego z Elektrowni Połaniec, zawierającego 4% cz. palnych

Fig. 8. Dimensional changes in the fly ash sample with 4 wt.% unburned fraction content from Połaniec Power Plant



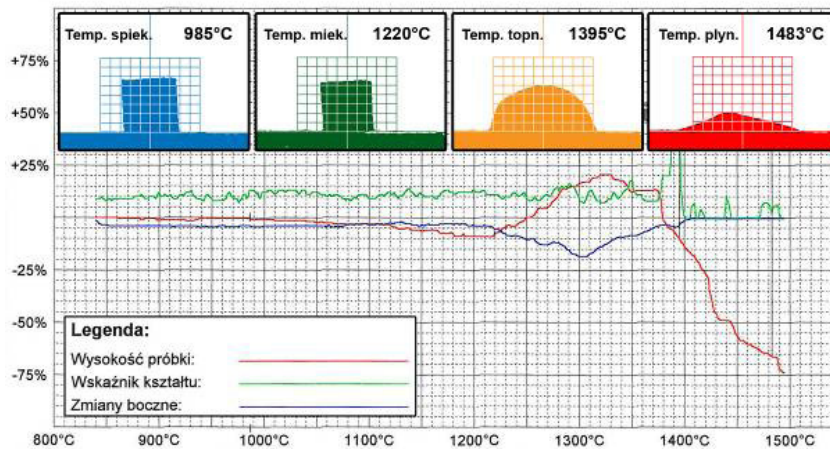
Rys. 9. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego z Elektrowni Połaniec, zawierającego 8% cz. palnych

Fig. 9. Dimensional changes in the fly ash sample with 8 wt.% unburned fraction content from Połaniec Power Plant



Rys. 10. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego z Elektrowni Opole spółka EPO, blok nr 2

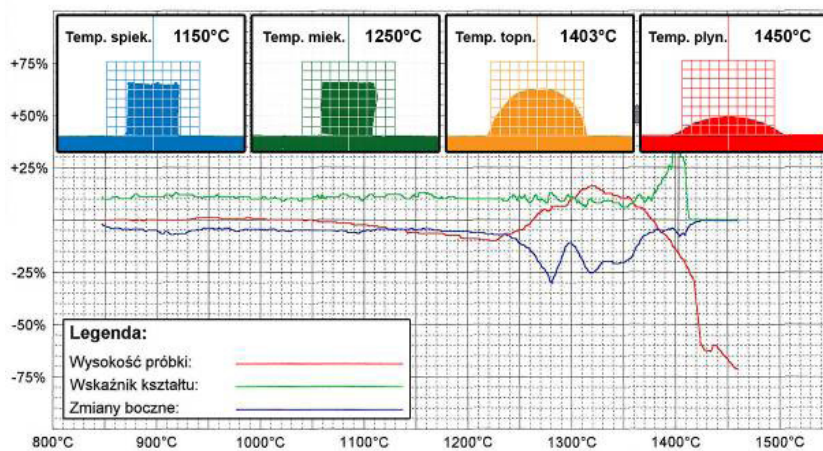
Fig. 10. Dimensional changes in the fly ash sample from EPO Opole Power Plant, block no. 2



Rys. 11. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego z Elektrowni Opole spółka EPO, blok nr 3

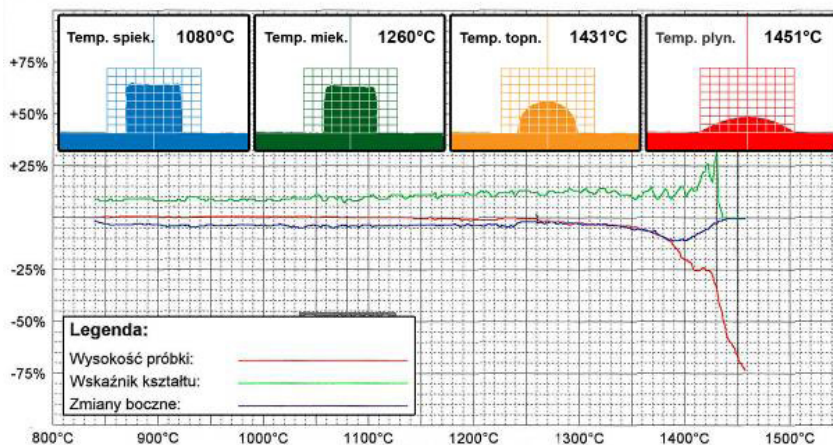
Fig. 11. Dimensional changes in the fly ash sample from EPO Opole Power Plant, block no. 3





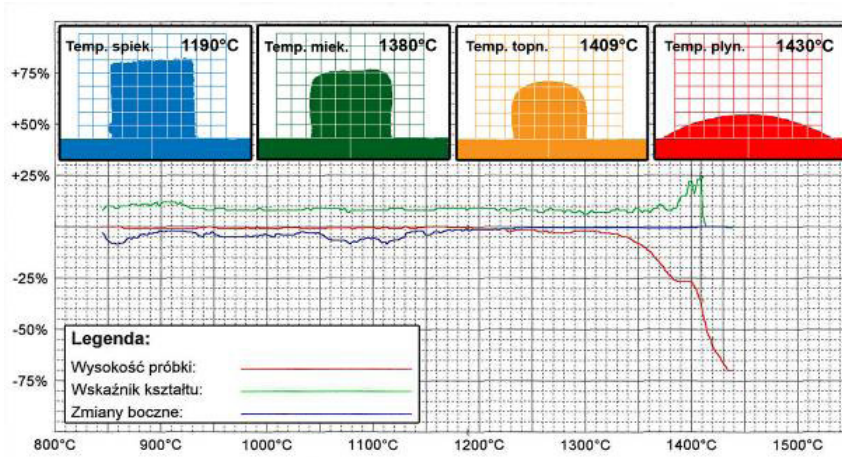
Rys. 12. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego z Elektrowni Opole spółka EPO, elewator

Fig. 12. Dimensional changes in the fly ash sample from EPO Opole Power Plant, elevator



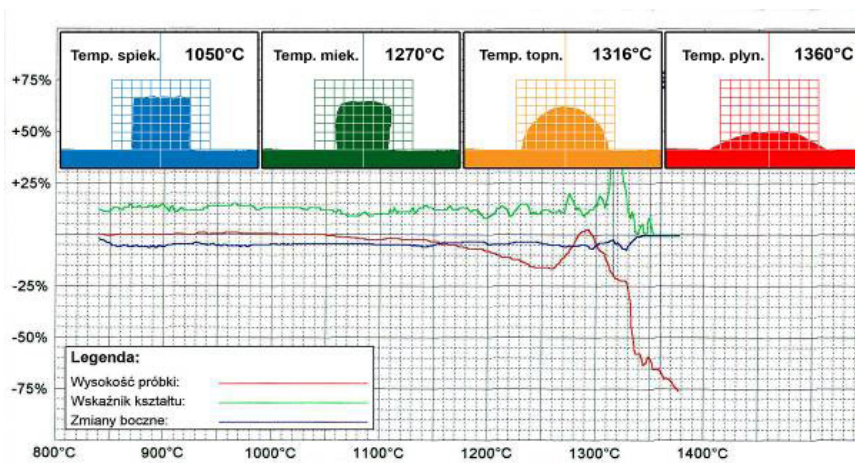
Rys. 13. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego z Elektrowni Bełchatów, blok nr 3

Fig. 13. Dimensional changes in the fly ash sample from Bełchatów Power Plant, block no. 3



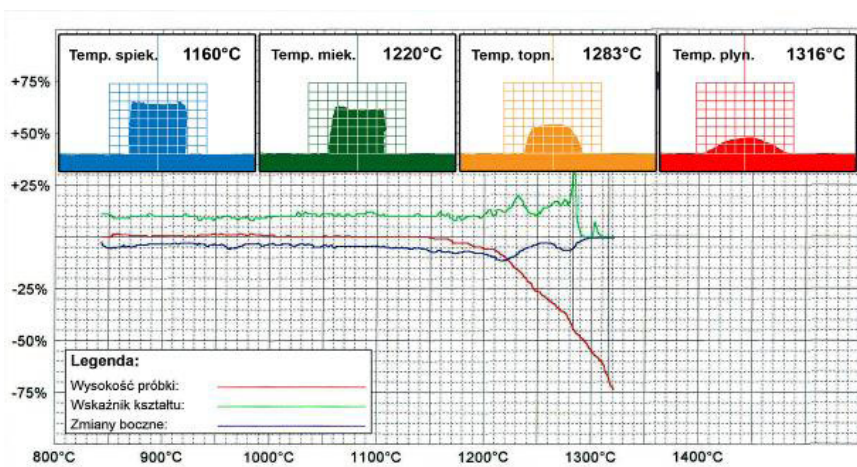
Rys. 14. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego z Elektrowni Bełchatów, blok stary

Fig. 14. Dimensional changes in the fly ash sample from Bełchatów Power Plant, old block



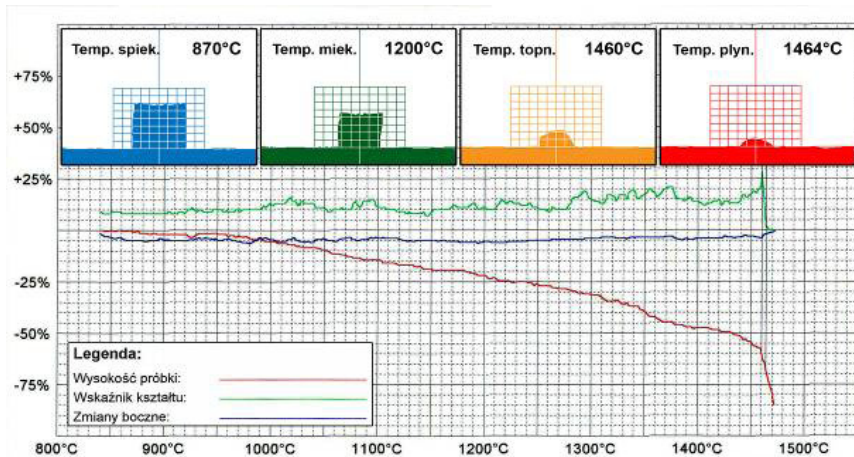
Rys. 15. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego WP140 z Elektrociepłowni Kielce

Fig. 15. Dimensional changes in the WP140 fly ash sample from Kielce Power Plant



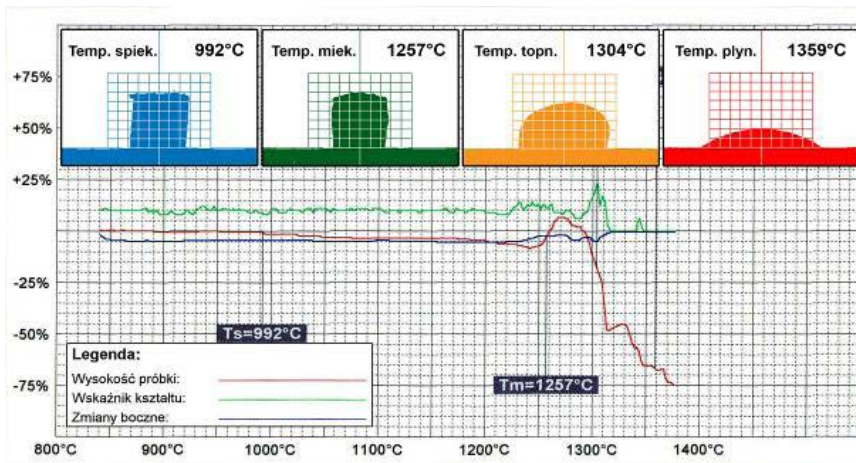
Rys. 16. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego WR 25 k5 rusztowego, pobranego z multicyklonów w Elektrociepłowni Kielce

Fig. 16. Dimensional changes in the WR 25 k5 grate fly ash sample taken from multicyclones operating at Kielce Power Plant



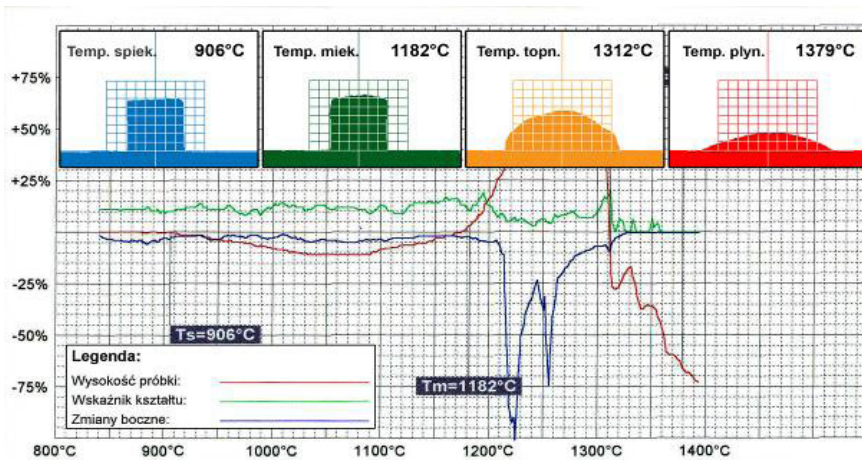
Rys. 17. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego z procesu współpalania z biomasa z Elektrociepłowni Kielce

Fig. 17. Dimensional changes in the fly ash sample from the process of co-burning with biomass content at Kielce Power Plant



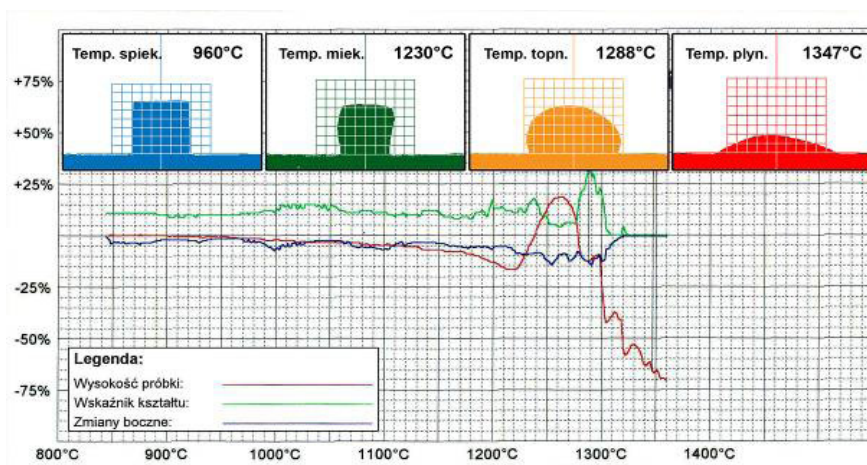
Rys. 18. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego 12–6 z sekcji I w Elektrociepłowni Białystok

Fig. 18. Dimensional changes in the 12–6 fly ash sample from section I of Białystok Power Plant



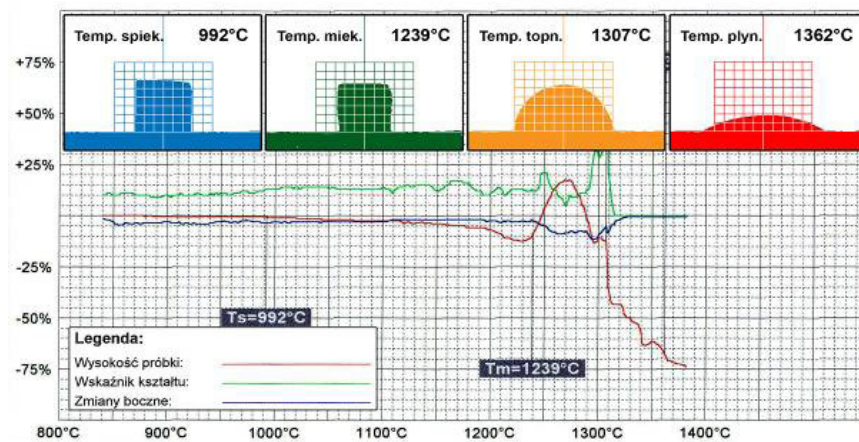
Rys. 19. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego 12–6 z sekcji II w Elektrociepłowni Białystok

Fig. 19. Dimensional changes in the 12–6 fly ash sample from section II of Białystok Power Plant



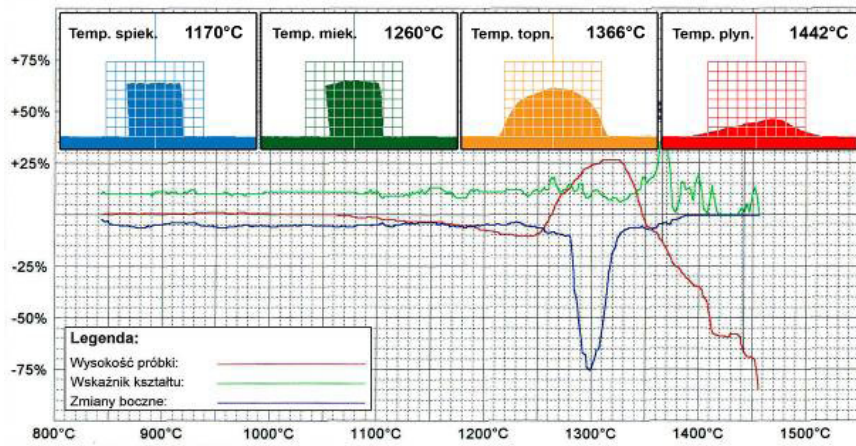
Rys. 20. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego 12–6 z sekcji III w Elektrociepłowni Białystok

Fig. 20. Dimensional changes in the 12–6 fly ash sample from section III of Białystok Power Plant



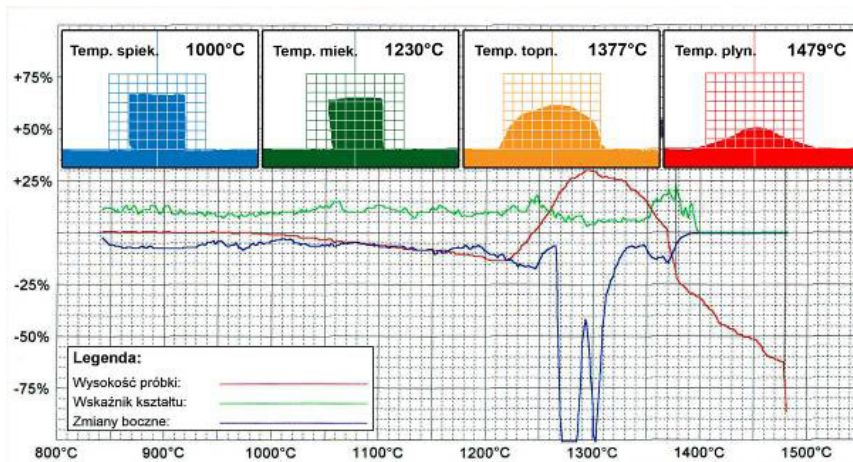
Rys. 21. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego ze składowiska przy Elektrociepłowni Białystok

Fig. 21. Dimensional changes in the fly ash sample from industrial waste lagoon of Białystok Power Plant



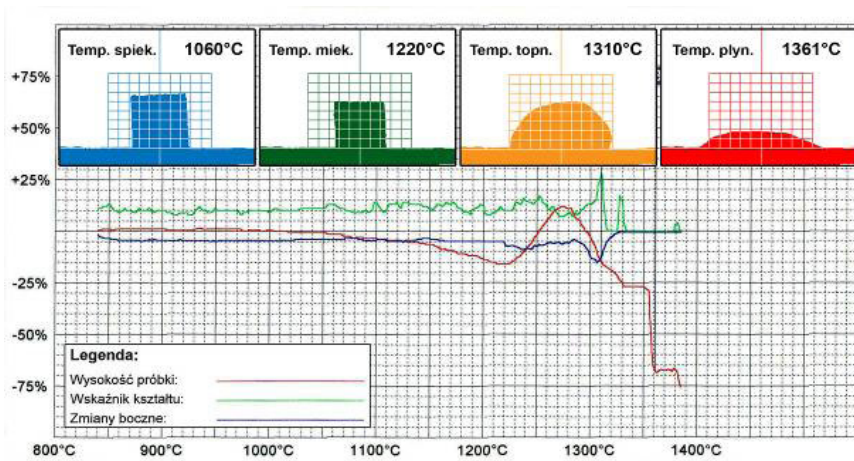
Rys. 22. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego zawierającego 2,7% węgla ze składowiska przy Elektrowni Dolna Odra

Fig. 22. Dimensional changes in the fly ash sample with 2.7% carbon content from industrial waste lagoon of Dolna Odra Power Plant



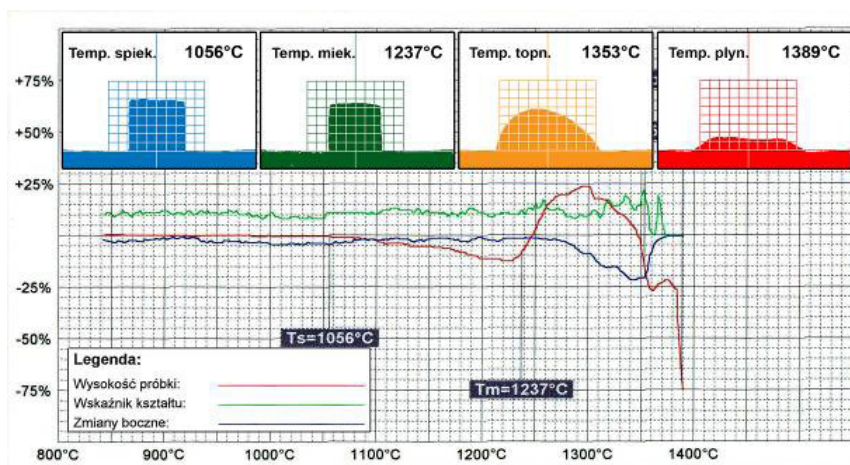
Rys. 23. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego z elektrofiltru w Elektrociepłowni Szczecin

Fig. 23. Dimensional changes in the fly ash sample from electrofilters of Szczecin Power Plant



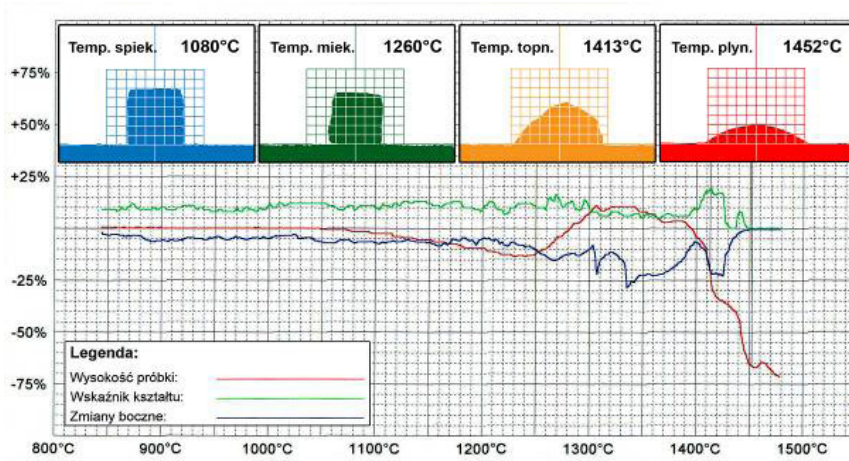
Rys. 24. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego ZRP1 z Elektrociepłowni Wybrzeże

Fig. 24. Dimensional changes in the ZRP1 fly ash sample from Wybrzeże Power Plant



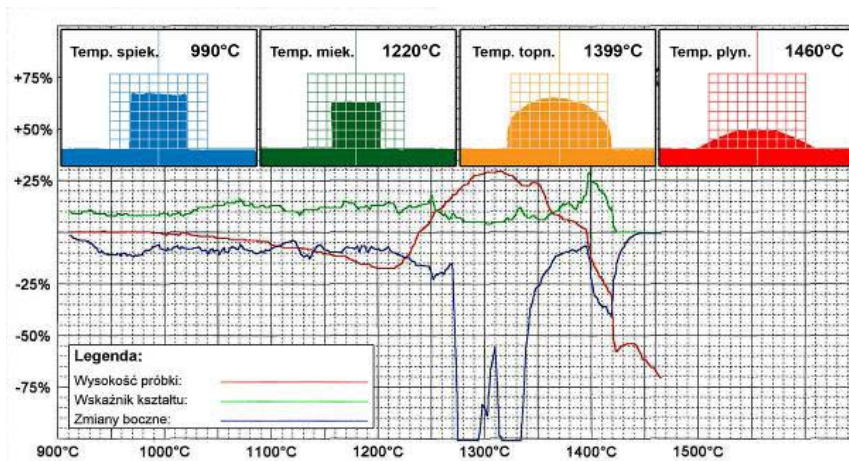
Rys. 25. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego ZRP2 z Elektrociepłowni Wybrzeże

Fig. 25. Dimensional changes in the ZRP2 fly ash sample from Wybrzeże Power Plant



Rys. 26. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego z elektrofiltru w Elektrociepłowni Poznań

Fig. 26. Dimensional changes in the fly ash sample from electrofilters of Poznań Power Plant



Rys. 27. Zmiany wymiarów próbki popiołu lotnego z elektrofiltru z Elektrociepłowni Skawina

Fig. 27. Dimensional changes in the fly ash sample from electrofilters of Skawina Power Plant

## Dyskusja wyników

Wartości temperatur charakterystycznych, wyznaczone przy użyciu mikroskopu grzewczego, zestawiono w tabeli 2. Średnia wartość temperatury spiekania, mięknięcia, topnienia i płynięcia wynosiła odpowiednio: 1040, 1241, 1345 i 1397°C, natomiast mediana: 1050, 1237, 1321 i 1389°C.

Najwyższą wartość temperatury spiekania, parametr niezwykle ważny w procesie wytwarzania preform ceramicznych, zarejestrowano podczas pomiaru popiołu lotnego



z Elektrowni Bełchatów – blok stary (1190°C) i popiołu z Elektrociepłowni Poznań (1180°C). Natomiast najniższe wartości – dla popiołu z biomasy z Elektrociepłowni Kielce (870°C), popiołu zawierającego 8% cz. palnych z Elektrowni Połaniec (905°C) oraz dla popiołu 12–6, z II sekcji kotłów z Elektrociepłowni Białystok.

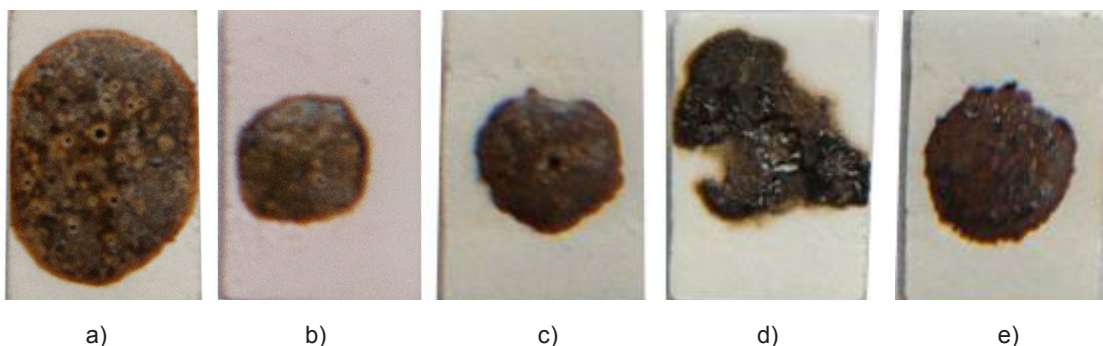
*Tabela 2. Właściwości temperaturowe wybranych popiołów lotnych*

*Table 2. Temperature characteristics of selected fly ash samples*

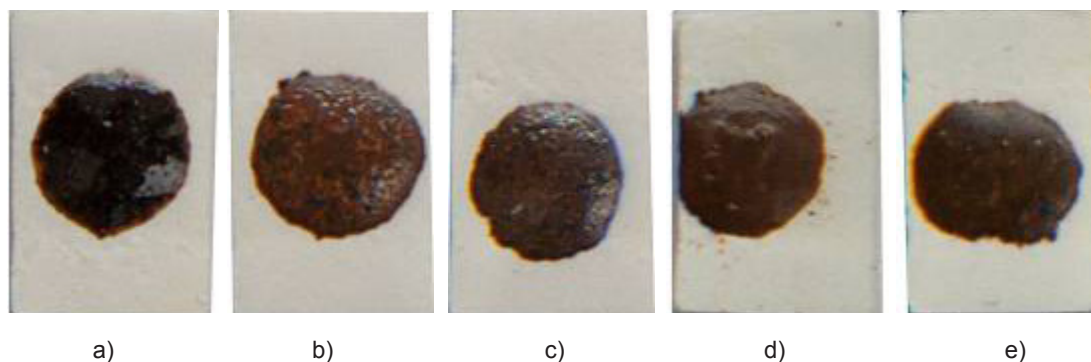
Zakład	Oznaczenie popiołu	Temperatura, °C			
		spiekania	mięknienia	topnienia	plynięcia
Elektrociepłownia Siekierki	Sz	1110	1170	1207	1227
	Sb	980	1240	1321	1353
Elektrociepłownia Rzeszów	Rp	1120	1230	1268	1331
Elektrownia Połaniec	P4	1140	1290	1309	1346
	P8	905	1243	1321	1390
Elektrownia Opole Spółka EPO	O2	981	1237	1383	1503
	O3	985	1220	1395	1483
	Oh	1150	1250	1403	1450
Elektrownia Bełchatów	B3z	1080	1260	1431	1451
	Bs	1190	1380	1409	1430
Elektrociepłownia Kielce	KWP	1050	1270	1316	1360
	KWR	1160	1220	1283	1316
	KL	870	1200	1460	1464
Elektrociepłownia Białystok	Bi1	992	1257	1304	1359
	Bi2	906	1182	1312	1379
	Bi3	960	1230	1288	1347
	BiS	992	1239	1307	1362
Elektrownia Dolna Odra	Dos	1170	1260	1366	1442
Elektrociepłownia Szczecin	Sz	1000	1230	1377	1479
Elektrociepłownia Wybrzeże	Wy1	1060	1220	1310	1361
	Wy2	1056	1237	1353	1389
Elektrociepłownia Poznań	Poe	1080	1260	1413	1452
Elektrociepłownia Skawina	Skp	990	1220	1399	1460

Najwyższe wartości temperatury topnienia, uzyskano dla popiołu z biomasy z Elektrociepłowni Kielce (1460°C), popiołów z Elektrowni Bełchatów (1431 i 1409°C) i Elektrociepłowni Poznań (1413°C). Najniższą wartość temperatury topnienia osiągnęła próbka z popiołu węglowego zasiarzonego M7 z Elektrociepłowni Siekierki (1207°C). Próbka z biomasy, o nietypowej smolistej konsystencji, miała najniższą temperaturę spiekania i najwyższą temperaturę topnienia. Charakterystyki (rys. 17) nie wykazały wzrostu objętości próbki przy jednoczesnym zachowaniu współczynnika kształtu. Natomiast wygląd próbki z biomasy po zakończonym badaniu różnił się od wyglądu innych próbek (rys. 28 d).

Stopione próbki charakteryzowały się przeważnie gładką i szklistą powierzchnią, niekiedy chropowatą (rys. 28 i 29). Stopione popioły miały różne barwy, najczęściej niejednolite: brunatna czerwień, jasny i ciemny brąz, połyskująca czerń.

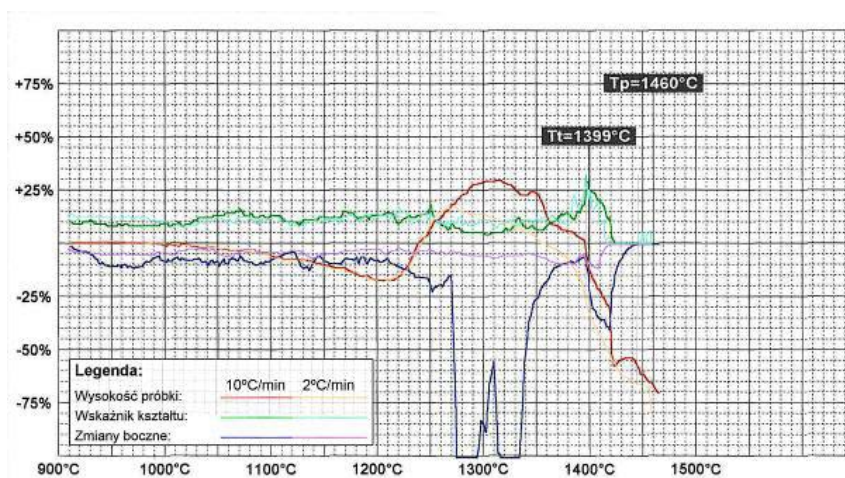


Rys. 28. Stopione próbki popiołu z: a) Elektrowni Bełchatów, blok stary; b) Elektrowni Bełchatów, blok 3; c) Elektrociepłowni Poznań; d) Elektrociepłowni Kielce; e) Elektrociepłowni Kielce, WP140  
Fig. 28. Melted fly ash samples from: a) Bełchatów Power Plant, old block; b) Bełchatów Power Plant, block 3; c) Poznań Power Plant; d) Kielce Power Plant; e) Kielce Power Plant, WP140



Rys. 29. Stopione próbki popiołu z: a) Elektrociepłowni Białystok, sekcja I; b) Elektrociepłowni Białystok, sekcja II; c) Elektrociepłowni Białystok, sekcja III; d) Elektrociepłowni Wybrzeże, ZRP2; e) Elektrowni Opole, elewator  
Fig. 29. Melted fly ash samples from: a) Białystok Power Plant, section I; b) Białystok Power Plant, section II; c) Białystok Power Plant, section III; d) Wybrzeże Power Plant, ZRP2; e) Opole Power Plant, elevator

W celu uwzględnienia wpływu szybkości ogrzewania próbki w piecu na przebieg charakterystyk temperaturowych przeprowadzono pomiar porównawczy dla popiołu lotnego z Elektrociepłowni Skawina (rys. 30). W tym przypadku ustalono, że szybkość podgrzewania będzie stopniowo zmniejszana od temperatury 1100°C do 1200°C. W przedziale 1200–1450°C próbkę podgrzewano z szybkością 2°C/min.



Rys. 30. Wpływ szybkości ogrzewania próbki w piecu na przebieg charakterystyk temperaturowych popiołu lotnego z Elektrociepłowni Skawina

Fig. 30. Effect of heating rate of the sample in an oven on the course of the temperature characteristics of fly ash from Skawina Power Plant

Badanie porównawcze nie wykazało znaczących różnic między temperaturami charakterystycznymi dla różnych szybkości podgrzewania (tab. 3). Natomiast zmiana objętości próbki podczas badania była wyraźnie większa w przypadku szybszego podgrzewania. Począwszy od temperatury 1270°C wysokość próbki podgrzewanej z szybkością 10°C/min odbiegała od wysokości próbki porównawczej, osiągając większą względną maksymalną wartość przyrostu (35% w stosunku do 17%). Podobnie zmiany boczne były wyraźnie większe, a nadtopiona próbka nie mieściła się wręcz w wyskalowanej siatce (rys. 27, temperatura topnienia i płynięcia).

Tabela 3. Temperatury charakterystyczne badanych popiołów lotnych pochodzących z Elektrociepłowni Skawina w zależności od szybkości ogrzewania

Table 3. Characteristic temperatures of the tested fly ash samples from Skawina Power Plant in relation to heating rate

Szybkość ogrzewania, °C/min	Temperatura, °C			
	spiekania	mięknienia	topnienia	plynięcia
10	990	1220	1399	1460
2	970	1220	1396	1445

## Wnioski

W trakcie badań zaobserwowano specyficzne zachowanie popiołów lotnych przejawiające się zmianą profilu ogrzewanych w piecu próbek. Główną przyczyną wzrostu objętości próbek podczas ogrzewania był rozkład związków zawartych w popiole lotnym i utlenianie pozostałości części palnych. Podczas powolnego wzrostu temperatury te produkty rozkładu i utleniania mogły wydzielić się przez nadtopioną powierzchnię próbki, nie powodując tak dużego wzrostu objętości. Szybszy wzrost temperatury w piecu spowodował przyspieszenie reakcji w próbce, co skutkowało nieraz skokowym wzrostem jej wymiarów. Wynika z tego, zatem, że skład chemiczny i mineralogiczny popiołów determinuje wartości temperatur charakterystycznych. Tlenki, fazy i pierwiastki wysokotopliwe podnoszą te wartości, natomiast niskotopliwe – obniżają. Głównym składnikiem wysokotopliwym w popiołach lotnych są związki krzemu i glinu, zaś niskotopliwym – związki alkaliczne m.in. potasu i sodu oraz związki organiczne. Większość zbadanych popiołów wykazuje dużą odporność na wysokie temperatury, wystarczającą np. do wytwarzania z nich preform do infiltracji ciekłymi stopami aluminium. Temperatura mięknienia popiołów, wskazująca pośrednio na wytrzymałość preform w wysokich temperaturach, osiągnęła wartość nie mniejszą niż 1200°C dla niemal wszystkich popiołów. Stwarza to duży zakres bezpieczeństwa, gdyż temperatura syntezy kompozytów na podstawie stopów aluminium nie przekracza 800°C. Temperatura mięknienia popiołu lotnego z Elektrowni Bełchatów wynosi aż 1380°C (blok stary), co daje możliwość wytwarzania preform do infiltracji ciekłym metalem w warunkach wyższej temperatury np. stopów Cu czy niektórych gatunków żeliwa. Korelacja pomiędzy wysokim poziomem temperatury topnienia, mięknienia i niskim współczynnikiem przewodzenia ciepła daje możliwość zastosowania popiołów lotnych w wytwarzaniu mas formierskich i mikrosferowych mieszanin izolacyjnych [6, 7].

Występująca niestabilność składu chemicznego i mineralogicznego popiołów, która zależy od wielu czynników: rodzaju surowca, temperatury spalania kotłowego, miejsca składowania odpadów stanowi jednak istotną przeszkodę w przemysłowym wdrożeniu rozwiązań kompozytowych. Dodatkowym czynnikiem wpływającym niekorzystnie na właściwości gotowych wyrobów kompozytowych jest obecność w popiołach frakcji orga-

nicznych lub węgla niezwiązanego. Wysoka temperatura procesu łączenia zbrojenia z osnową metalową powoduje utlenianie i rozkład frakcji organicznych, czemu towarzyszy emisja gazów. Prowadzi to do występowania różnego rodzaju wad odlewniczych, porowatości gazowej i aglomeracji cząsteczek zbrojenia kompozytu. Pomimo tych przeszkód popiół lotny, jako produkt odpadowy powstały w procesie spalania węgla, po niewielkich modyfikacjach, nadal jest atrakcyjnym materiałem do zastosowań w przemyśle kompozytów.

## **Literatura**

1. Naik R.T., Ramme W.B., Tews J.H.: *Use of High Volumes of Class C and Class F Fly Ash in Concrete*. Cement, Concrete and Aggregates, 1994, Vol. 16, pp. 12–20.
2. *ASTM C 618-03 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02.2004, pp. 319–321.
3. Nalbantoglu Z.: *Effectiveness of Class C Fly Ash as an Expansive Soil Stabilizer*. Construction and Building Materials, 2004, Vol. 18, pp. 377–381.
4. PN-82/G-04535 Paliwa stałe – Oznaczenie charakterystycznych temperatur topliwości popiołu.
5. Rymoń-Lipiński T., Zborowski J.: *Fizykochemiczne metody badań w ceramice*. Skrypty Uczelniane AGH, 1978, s. 123–124.
6. Biernacki J.J., Vazrala A.K., Leimer H.W.: *Sintering of class F fly ash*. Fuel, 2008, Vol. 87, No. 6, pp. 782–792.
7. Baliński A.: *Recykling odpadowych popiołów lotnych powstających ze spalania węgla kamiennego, w aspekcie wytwarzania mas formierskich*. Prace Instytutu Odlewnictwa, 2008, T. 48, nr 3, s. 5–30.