

Krzysztof Gogola\*, Sebastian Iwaszenko\*, Adam Smoliński\*

## PRÓBA ZASTOSOWANIA REAKTORA ZE ZŁOŻEM STAŁYM DO OCENY PUNKTU INICJACJI ZAPŁONU OBIEKTÓW FORMOWANYCH Z ODPADÓW POWĘGLOWYCH

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań podatności na samozapłon dla materiału zgromadzonego z wybranych obiektów uformowanych z odpadów powęglowych. Badania przeprowadzone z próbek pobranych w obiektach: „Waleska” kopalnia „Bolesław Śmiały”, „Wrzosa” kopalnia „Rydułtowy-Anna”, „Szyby Zachodnie” kopalnia „Jas-Mos”, hałda przy ul. Bielszowickiej w Zabrze i hałda „Ruda” w Zabrze-Biskupicach, polegały na podgrzaniu próbek do wybranej, na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych, temperatury początkowej, a następnie obserwowaniu samoistnego jej wzrostu. Do reaktora wprowadzono mieszaninę  $O_2$  i  $N_2$ , której skład odpowiadał składowi powietrza. W gazach wylotowych mierzono zawartość  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$  i  $O_2$ . Przedstawiono interpretację uzyskanych wyników pomiarów oraz zaproponowano koncepcję trzyetapowego opisu rozwoju pożaru na obiekcie z odpadów powęglowych. Badania przeprowadzono w ramach projektu POIG 1.3 pt. „System zarządzania likwidacją emisji  $CO_2$  ze zwałowisk odpadów powęglowych”.

### Trial of application of a fixed-bed reactor for the assessment of the ignition initiation point of objects formed from coal wastes

### Abstract

In the work the results of investigations into the susceptibility to spontaneous ignition for the material collected from selected objects formed from coal wastes were presented. The investigations carried out from samples taken at the objects: “Waleska” – “Bolesław Śmiały” colliery, “Wrzosa” – “Rydułtowy-Anna” colliery, “Szyby Zachodnie” – “Jas-Mos” colliery, dump in the Bielszowicka street in Zabrze and “Ruda” dump in Zabrze-Biskupice, consisted in preheating of samples to the initial temperature, selected on the basis of performed preliminary tests, and next in the observation of its autonomous growth. Into the reactor the mixture of  $O_2$  and  $N_2$  has been introduced, the composition of which corresponded with the composition of air. In the outlet gases the content of  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$  and  $O_2$  was measured. The interpretation of obtained measurement results was presented and the conception of three-stage description of fire development at the object from coal wastes has been proposed. The investigations were carried out in the framework of the POIG 1.3 project entitled “Management system of liquidation of  $CO_2$  emissions from coal waste dumps”.

## 1. WPROWADZENIE

Zjawisko samozapłonu oraz pożaru na obiektach uformowanych z odpadów powęglowych ma istotny wpływ na środowisko naturalne (Drenda i in. 2007). Płonące hałdy są uciążliwe dla środowiska i zdrowia i obniżają standard życia w rejonach je otaczających. Problematyka zwalczania zagrożenia pożarowego, będąca tematem wielu prac naukowych, jest niezwykle złożona, chociażby z powodu deponowania na

\* Główny Instytut Górnictwa

zwałowiskach materiałów odpadowych o różnym składzie (Korski, Henslok, Bodynek 2004). Zróżnicowanie to dodatkowo komplikuje badanie właściwości obiektów uformowanych z odpadów powęglowych i wymaga wnikliwego rozpatrywania każdego z nich. Przeprowadzone badania modelowe i eksperymentalne wskazują, że czas rozwoju zapożarowania po inicjującym podgrzaniu materiału, trwa około kilku dni (Arisoy, Beamish, Cetegen 2006). Głównym materiałem palnym, obecnym w ubocznych produktach procesu wydobywczego, jest węgiel. Uzasadnione wydaje się zatem wykorzystanie dorobku naukowego, związanego z badaniami samozapalania węgla, jako podstawy do opisu rozwoju zapożarowań na obiektach lokowania odpadów powęglowych (Gumińska, Różański 2005). Jako czynniki wpływające na podatność węgla kamiennego na samozapłon wymienia się: skład materiałowy, klasę węgla oraz warunki otoczenia (Falcon 1986).

Badania eksperymentalne prowadzone dla węgla kamiennego wykorzystują szereg metod określających skłonność węgla do samozapłonu na podstawie wyznaczenia: ilości ciepła i pary wodnej wydzielonej z próbki węgla (kalorymetria adiabatyczna) oraz pomiaru zdolności do sorpcji tlenu w zadanych warunkach zewnętrznych (Cygankiewicz 2000). Inny sposób pomiaru samozapłonu węgla polega na ogrzewaniu próbki w łaźni, stosując stały przyrost temperatury. Temperatura próbki początkowo równa temperaturze ogrzewającej ją łaźni, na skutek zachodzących procesów zaczyna ją przewyższać. Jako miarę podatności węgla do samozapłonu przyjmuje się czas, po którym temperatura próbki osiąga wartości wyższe niż temperatura ogrzewającej ją łaźni. W przeprowadzonych badaniach podatności materiału zgromadzonego na obiektach opisywanych w niniejszej pracy wykorzystano elementy metod bazujących na pomiarze ilości ciepła wydzielającego się z próbek w warunkach adiabatycznych po wcześniejszym podgrzaniu ich do przyjętej temperatury początkowej. Jako miarę ilości wydzielanego w wyniku procesów spalania ciepła, przyjęto zdolność próbki do spontanicznego wzrostu temperatury. Obserwacja tego zjawiska traktowana była jako znacznik skłonności materiału do samozapłonu.

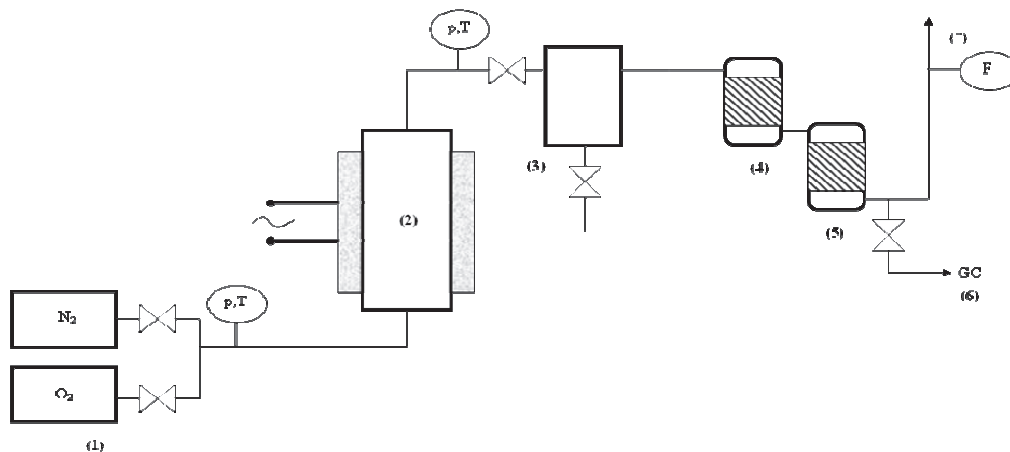
Proces samozapalania węgla często jest postrzegany jako proces wieloetapowy (Falcon 1986; Cygankiewicz 2000; Sawicki 2004). W pracy postuluje się zatem zastosowanie tego samego podejścia do opisu rozwoju pożaru na obiektach uformowanych z odpadów powęglowych.

## **2. METODYKA BADANIA SAMOZAPŁONU OBIEKTÓW UFORMOWANYCH Z ODPADÓW POWĘGLOWYCH WRAZ Z CHARAKTERYSTYKĄ WYTYPOWANYCH DO BADAŃ PRÓBEK HAŁD POWĘGLOWYCH**

Do badań pobrano pięć próbek odpadów powęglowych z wytypowanych zwałowisk: „Waleska” – kopalnia „Bolesław Śmiały”, „Wrzosa” – kopalnia „Rydułtowy-Anna”, „Szyby Zachodnie” – kopalnia „Jas-Mos”, hałda przy ul. Bielszowickiej w Zabrze po dawnej kopalni „Zabrze” i hałda „Ruda” w Zabrze-Biskupicach. Próbki zostały pobrane zgodnie z normą PN-90/G-04502.

Badania samozapłonu przeprowadzono w laboratoryjnej instalacji z reaktorem ze złożem stałym, której schemat zaprezentowano na rysunku 1. Przedstawiony tam sys-

tem składa się z: układu doprowadzającego reagenty gazowe – wloty, zawory i regulatory przepływu gazów reakcyjnych (1), reaktora o pojemności 800 cm<sup>3</sup> ogrzewanego przy użyciu pieca oporowego (2), układu schładzania gazu powstającego w procesie (3), separatora z płaszczem chłodzącym, systemu oczyszczania i osuszacza gazu (4), filtra cząstek stałych (5), systemu analizy składu gazu z mikrochromatografem gazowym (6) oraz układu do pomiaru natężenia przepływu gazu powstającego w procesie.



Rys. 1. Schemat laboratoryjnej instalacji z reaktorem ze złożem stałym służącej do badania procesu samozapłonu odpadów powęglowych

Fig. 1. Scheme of laboratory installation with fixed-bed reactor designed for investigations into the process of coal waste spontaneous combustion

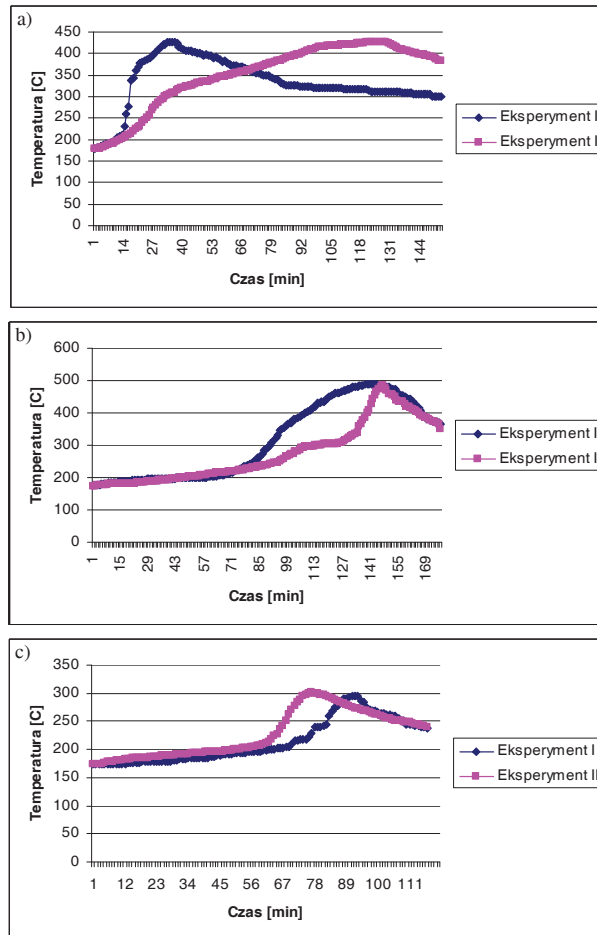
Próbka hałdy powęglowej w stanie analitycznym o masie 150 g i uziarnieniu  $d < 0,2$  mm jest umieszczana w dolnej części reaktora, między dwoma warstwami waty kwarcowej. Wata ta jest stosowana w celu zapewnienia lepszego rozkładu temperatury oraz zapobiega porywaniu ziaren próbki przez media gazowe doprowadzane do reaktora i zatykaniu króćca przez cząstki stałe. Następnie próbka jest ogrzewana do temperatury 180°C z prędkością 1,33°C·s<sup>-1</sup>. Temperatura we wnętrzu reaktora jest mierzona za pomocą termooigniwa. Po ustabilizowaniu się temperatury, do reaktora zostaje wprowadzana mieszanina gazowa o składzie: 21,3% obj. tlenu i 78,7% obj. azotu z natężeniem przepływu 10,5 cm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Kolejno produkty reakcji kierowane są do układu separatorów, w których następuje zatrzymanie pary wodnej. Objętość schłodzonego i osuszonego produktu gazowego procesu jest mierzona za pomocą przepływomierza masowego, natomiast skład gazów analizowany przy użyciu mikrochromatografu gazowego.

### 3. WYNIKI I DYSKUSJA

Dla każdej omawianej tu próbki badanie samozapłonu przeprowadzono dwukrotnie. W rezultacie stwierdzono, że spośród przebadanych próbek do samozapłonu doszło jedynie w przypadku materiału pochodzącego z obiektów: „Waleska” oraz hałd przy ul. Bielszowickiej i „Ruda”. Na rysunku 2 przedstawiono zmiany temperatury

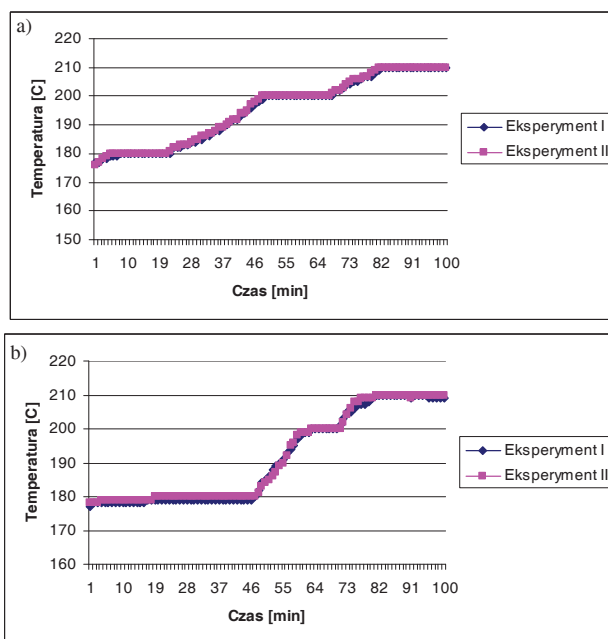
próbek z obiektów: „Waleska”, hałd przy ul. Bielszowickiej i „Ruda” zachodzące po wprowadzeniu do reaktora mieszaniny gazowej o wyżej podanym składzie. Krzywe zmian temperatury dla obiektów przy ul. Bielszowickiej i „Ruda” miały zbliżony przebieg w obu testach. W przypadku eksperymentów prowadzonych na materiałach z obiektu „Waleska” krzywe te wyraźnie różniły się.

Po wprowadzeniu mieszaniny gazowej do próbek z obiektów „Wrzosey” i „Szyby Zachodnie” nie zaobserwowano efektu samozapłonu. W związku z tym zwiększono wyjściową temperaturę hałdy ze 180°C do 200°C i 210°C. Także ten zabieg nie wywołał samozapłonu pobranego materiału (rys. 3).



**Rys. 2.** Zmiany temperatury próbek ze zwalowiska: a – „Waleska”, b – przy ulicy Bielszowickiej, c – „Ruda” po wprowadzeniu do reaktora, rozgrzanego do temperatury 180°C, mieszaniny gazowej o składzie 21,3% obj. tlenu i 78,7% obj. azotu

**Fig. 2.** Temperature changes of samples from the dump: a – “Waleska”, b – in the Bielszowicka street, c – “Ruda” after the introduction into the reactor, heated up to the temperature of 180°C, of the gas mixture composed of 21.3% by volume of oxygen and 78.7% by volume of nitrogen



**Rys. 3.** Zmiany temperatury próbek ze zwalowiska: a – „Wrzosa”, b – „Szyby Zachodnie” po wprowadzeniu do reaktora, rozgrzanego do temperatury 180, 200 i 210°C, mieszaniny gazowej o składzie 21,3% obj. tlenu i 78,7% obj. azotu

**Fig. 3.** Temperature changes of samples from the dump: a – “Wrzosa”, b – “Szyby Zachodnie” after the introduction into the reactor, heated up to the temperature of 180, 200, and 210°C, of the gas mixture composed of 21.3% by volume of oxygen and 78.7% by volume of nitrogen

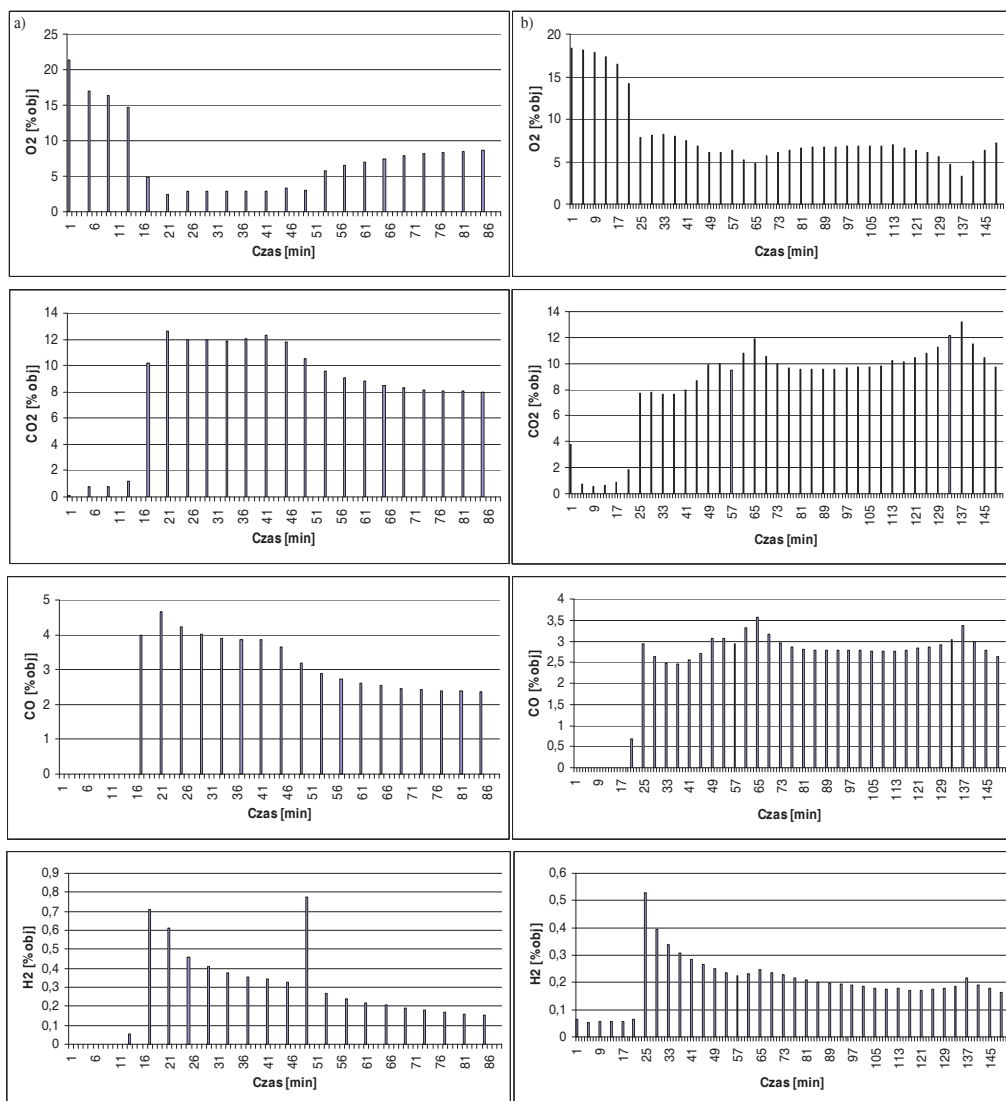
W przypadku krzywej temperatury dla próbek z obiektów przy ul. Bielszowickiej i „Ruda” różnicę można zaobserwować wyłącznie w początkowej fazie pożaru, co tłumaczy się wolniejszym jego rozprzestrzenianiem się w usypanym w reaktorze złożu. Z kolei wyraźne różnice w przebiegu krzywej zmian temperatury, w badaniach prowadzonych nad określaniem temperatury samozapłonu próbek z obiektu „Waleska”, świadczą o niejednorodności badanego materiału. Mimo niewielkich różnic w prędkościach rozprzestrzeniania się zapłonu dla próbek z obiektów przy ul. Bielszowickiej i „Ruda”, jak i różnych przebiegów krzywej temperatury dla próbek z obiektu „Waleska”, można wyciągnąć kilka wniosków. Na wszystkich zaprezentowanych wykresach rysuje się zatem wyraźny podział na dwa etapy. Pierwszy z nich to etap związany z rozgrzewaniem się materiału. Obserwuje się tu powolny wzrost temperatury wskutek zachodzących egzotermicznych procesów utleniania. Po skumulowaniu się odpowiedniej ilości ciepła następuje gwałtowny wzrost temperatury, wywołany samozapłonem odpadów. Jest to drugi etap, czyli tzw. rozprzestrzenianie się pożaru. Temperaturę, podczas której następuje samozapłon odpadów, na potrzeby niniejszej pracy, przyjęto nazywać temperaturą krytyczną  $T_k$ . W przypadku obiektu uformowanego z odpadów powęglowych w wyniku pożaru obserwuje się wzrost tej temperatury do pewnej wartości granicznej, a następnie temperatura ta utrzymuje się

na stałym poziomie. Wówczas można mówić o trzecim etapie (pełny proces zapożarowania hałdy), który jednak nie jest możliwy do zaobserwowania w reaktorze o ograniczonej objętości. Zamiast tego etapu, w przypadku eksperymentów prowadzonych w reaktorze ze złożem stałym na przedstawionych wykresach (rys. 2), obserwuje się obniżenie temperatury, które jest spowodowane wypaleniem się resztek węgla, zawartych w badanej próbce odpadu.

Istotne, z punktu widzenia przeprowadzonych badań, jest określenie temperatury inicjacji zapłonu odpadów powęglowych, co jednak nie jest możliwe wyłącznie na podstawie analizy zmiany temperatury obiektu w czasie wprowadzania do reaktora mieszaniny gazowej o składzie zbliżonym do składu powietrza. W przypadku analizy zmian temperatury w czasie badań można mówić jedynie o pewnym jej zakresie, w którym następuje samozapłon próbki. W celu określenia początku drugiego etapu związanego z samozapłonem, konieczne jest posłużenie się wynikami analizy gazów wylotowych z reaktora. Pozwoli to na znalezienie wskaźnika, określającego etap rozgrzewania nasypów obiektu czy już zapożarowania. Do analizy składu gazu wylotowego z reaktora wykorzystano mikrochromatograf gazowy AGILENT 3000A. Analiza chromatograficzna pozwoliła określić objętościowy udział w gazie następujących składników: tlen, azot, dwutlenek węgla, tlenek węgla, wodór i metan. Z punktu widzenia badania procesu samozapłonu próbek odpadów powęglowych z hałd istotne było przede wszystkim śledzenie zmian zawartości w otrzymanywanym gazie: tlenu, dwutlenku węgla, tlenku węgla i wodoru. Wyniki analiz poszczególnych składników w otrzymanywanym gazie dla przeprowadzonych prób badań samozapłonu odpadów z obiektów „Waleska”, hałd przy ul. Bielszowickiej i „Ruda” przedstawiono na rysunkach 4–6.

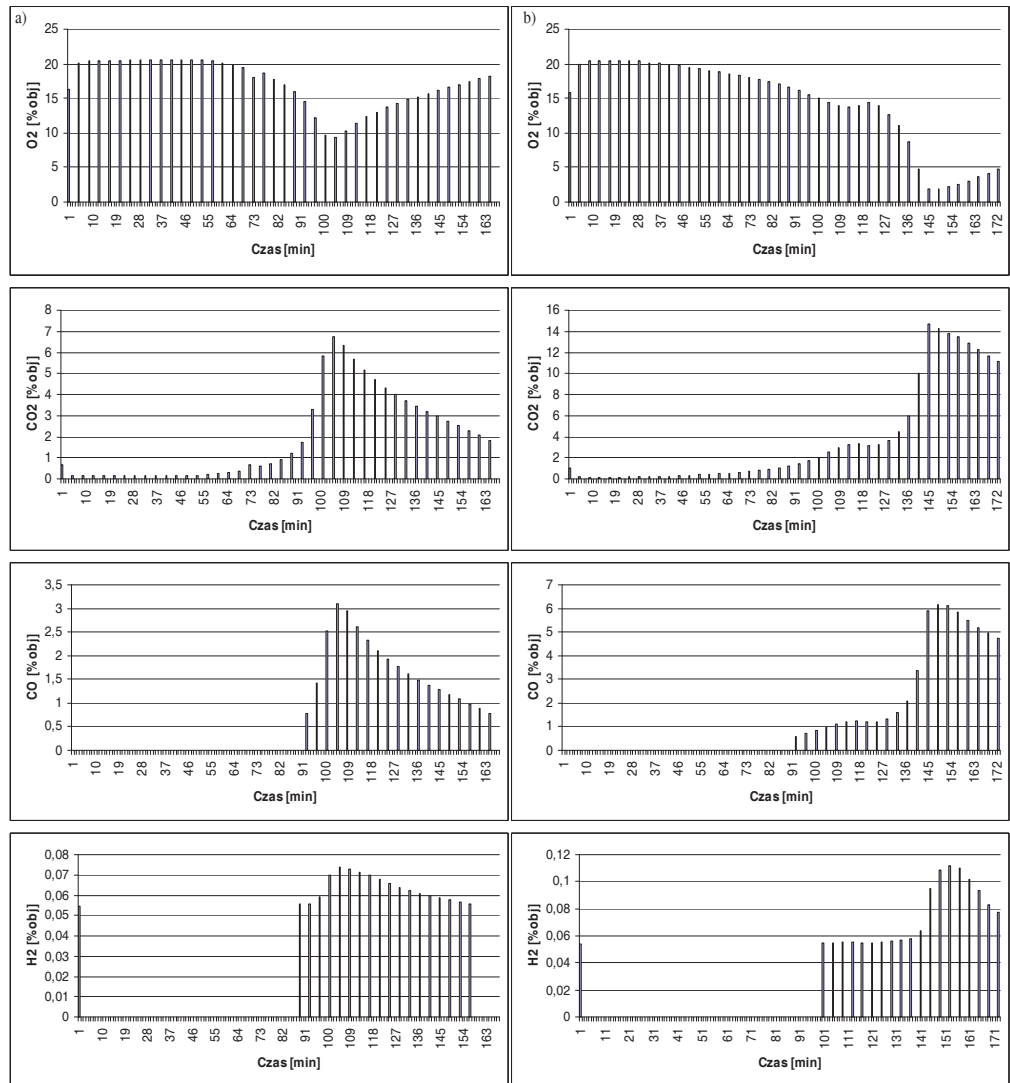
Jednoczesna interpretacja krzywej przedstawiającej zmiany temperatury w czasie badań z analizą składu gazów wylotowych z reaktora pozwala na bardziej dogłębne poznanie zjawiska samozapłonu obiektów uformowanych z odpadów powęglowych. W przypadku obiektów przy ul. Bielszowickiej i „Ruda”, dla których krzywe zmian temperatury w procesie zapożarowania były powtarzalne w obu eksperymentach, można zauważyć, że pierwszy etap związany z rozgrzewaniem się materiału trwał odpowiednio do 89 i 69 minuty eksperymentu. Stopniowy, intensywny wzrost temperatury, następujący w miarę upływu czasu, wynika z coraz szybszego przebiegu procesu utleniania, a to potwierdza wzrost udziału CO<sub>2</sub> w gazach wylotowych i wzrost zużycia O<sub>2</sub>. Zdecydowane przyspieszenie procesu można zaobserwować od 55 i 44 minuty (odpowiednio dla obiektu przy ul. Bielszowickiej i „Ruda”), gdy widoczny jest znaczący spadek zawartości tlenu w gazach wylotowych z reaktora oraz zdecydowany wzrost zawartości CO<sub>2</sub>. Jako moment samozapłonu przyjmuje się chwilę, w której w gazach wylotowych oprócz CO<sub>2</sub> pojawia się również CO, co świadczy o chwilowym niedoborze O<sub>2</sub> do całkowitego utlenienia. Temperatura, przy której pojawia się CO, traktowana jest jako temperatura krytyczna  $T_k$ . W przypadku próbki z obiektu przy ul. Bielszowickiej  $T_k$  wynosi średnio 285°C, natomiast w przypadku obiektu „Ruda”  $T_k$  wynosi średnio 233°C. Pojawienie się H<sub>2</sub> można również traktować jako pośredni marker samozapłonu. Pochodzi on bowiem najprawdopodobniej z odgazo-

wania resztek węgla występujących w odpadach, a więc świadczy o osiągnięciu odpowiednio wysokiej temperatury złoża w reaktorze.



**Rys. 4.** Zawartość O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO i H<sub>2</sub> w gazach wylotowych z reaktora podczas przeprowadzania prób badania samozapłonu obiektu „Waleska”: a – eksperyment I, b – eksperyment II

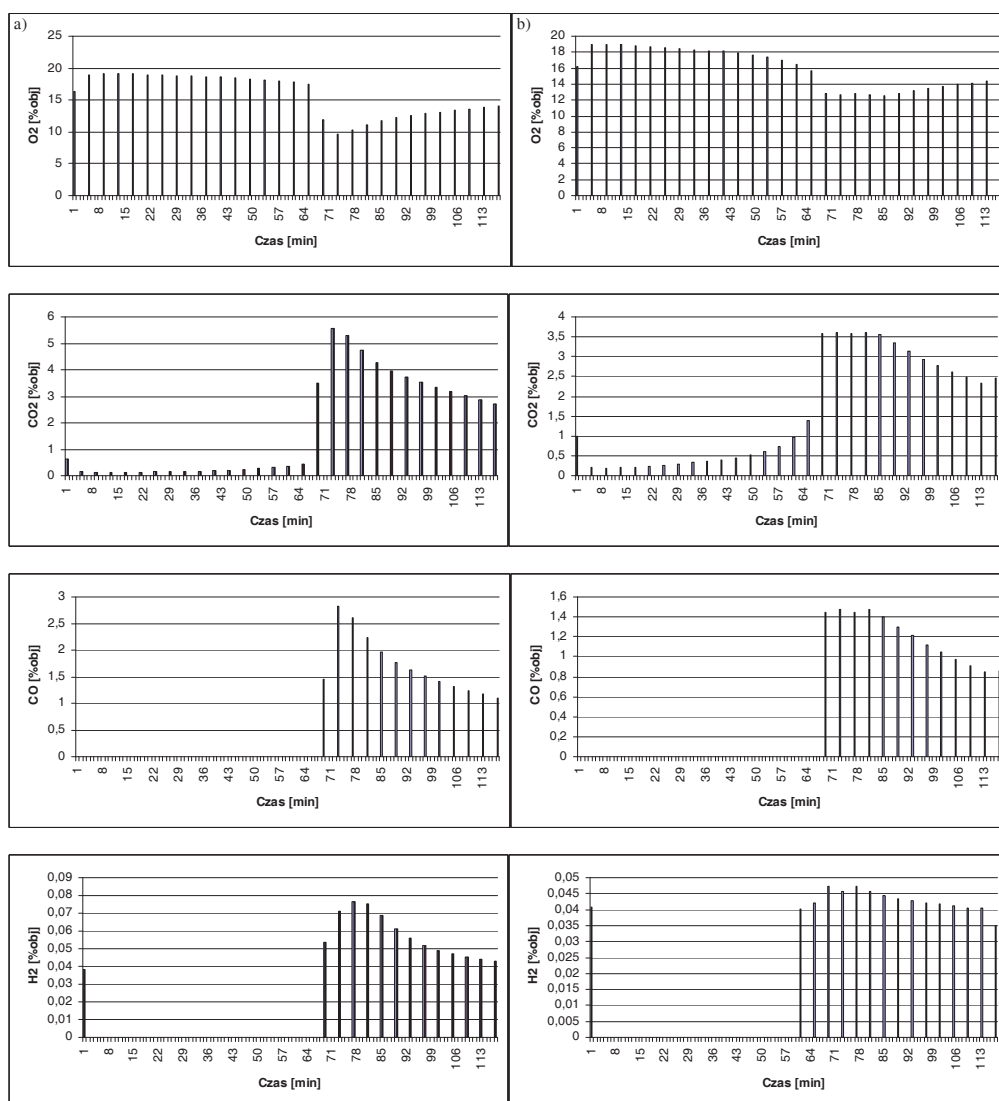
**Fig. 4.** Content of O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO and H<sub>2</sub> in outlet gases from the reactor during the performance of trials of spontaneous ignition testing of the object “Waleska”: a – experiment I, b – experiment II



**Rys. 5.** Zawartość O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO i H<sub>2</sub> w gazach wylotowych z reaktora podczas przeprowadzania prób badania samozapłonu obiektu przy ul. Bielszowickiej: a – eksperyment I, b – eksperyment II

**Fig. 5.** Content of O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO and H<sub>2</sub> in outlet gases from the reactor during the performance of trials of spontaneous ignition testing of the object in the Bielszowicka street: a – experiment I, b – experiment II





**Rys. 6.** Zawartość O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO i H<sub>2</sub> w gazach wylotowych z reaktora podczas przeprowadzania prób badania samozapłonu obiektu „Ruda”: a – eksperyment I, b – eksperyment II

**Fig. 6.** Content of O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO and H<sub>2</sub> in outlet gases from the reactor during the performance of trials of spontaneous ignition testing of the object „Ruda”: a – experiment I, b – experiment II

W przypadku badań próbek z obiektu „Waleska” zaobserwowano wyraźne różnice w przebiegu krzywych zmian temperatury w czasie. Z analizy składu gazów można wnioskować, że etap rozgrzewania się próbki do temperatury krytycznej jest znacznie krótszy niż w przypadku próbek z obiektu przy ul. Bielszowickiej. Tlenek węgla wskazujący jednoznacznie na fakt zapożarowania pojawia się w gazach wylotowych z reaktora w obu przeprowadzonych eksperymentach już po 18 minutach od momentu

podania mieszaniny gazowej zawierającej tlen. Jednocześnie należy zwrócić uwagę na brak możliwości dokładnego określenia temperatury samozapłonu, ze względu na istotne różnice w przebiegu krzywych zmian temperatury w czasie. W przypadku pierwszego testu proces zapożarowania przebiegał gwałtownie, a temperatura, przy której pojawił się CO wyniosła 344°C. Szybkość przyrostu temperatury świadczy o tym, że samozapłon nastąpił w zdecydowanie niższej temperaturze (w przedziale temperatur 195–230°C), co przemawiałoby za przyjęciem jako temperatury krytycznej wartości z tego przedziału. W przypadku drugiego eksperymentu CO pojawił się w gazie wylotowym z reaktora w temperaturze 218°C i tę temperaturę można uznać za temperaturę krytyczną.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń oraz przeprowadzonych obserwacji obiektów uformowanych z odpadów powęglowych (Falcon 1986) można zaproponować przedstawienie samozapłonu zwałowiska jako procesu składającego się z trzech faz: powolnego utleniania, rozwoju pożaru (samozapłon) oraz pożaru (płonący obiekt). Każdy z etapów posiada swoje cechy charakterystyczne. Poniżej przedstawiono opis każdej z faz. Należy zaznaczyć, że prezentowana koncepcja stanowi hipotezę i próbę ujęcia procesu rozwoju pożaru na obiekcie w proces złożony z szeregu etapów, nie stanowi jednak gotowego rozwiązania; nie ma charakteru kompletnej teorii tego zjawiska. Podczas rozważania procesów zachodzących na obiekcie przyjęto założenie, że materiał na nim ulokowany, składa się z drobin węgla otoczonych drobinami materiału skalnego. Ułożenie drobin jest na tyle luźne, że zachodzi transport powietrza atmosferycznego z zewnętrznych obszarów obiektu w otoczenie rozważanej drobinę węgla oraz odprowadzanie produktów gazowych zachodzących reakcji chemicznych na zewnątrz. Proponuje się założenie, że szybkość zjawisk transportu może być porównywalna z szybkością zachodzących reakcji chemicznych lub ją przewyższać. O podatności obiektu na samozapłon będzie decydowała: zawartość węgla, dostępność powietrza (a dokładniej zawartego w nim tlenu) oraz skuteczność odprowadzania ciepła z obszaru bryły obiektu. Charakterystyka faz samozapłonu obiektu obejmuje fazy powolnego utleniania, rozwoju pożaru oraz samego pożaru.

Podczas rozpatrywania procesów zachodzących w zdeponowanej na obiekcie materii wyróżniono fazę powolnego utleniania, w której panująca temperatura jest zbliżona do temperatury otoczenia i nie są obserwowane żadne zjawiska świadczące o zachodzeniu gwałtownych przemian fizykochemicznych w jego bryle. Postulowane jest zachodzenie w tej fazie powolnego utleniania węgla do CO<sub>2</sub>, czemu towarzyszy powolne wydzielanie ciepła. Szybkość tej reakcji w warunkach temperatury rzędu kilkudziesięciu stopni Celsjusza jest niewielka. Badając drobinę węgla, otoczoną materiałem skalnym, można stwierdzić, że zachodzące zjawiska transportu (dostarczanie tlenu i odprowadzanie produktów spalania) zachodzą dostatecznie szybko, aby zapewnić wystarczającą ilość tlenu w pobliżu drobinę węgla (czynnikiem limitującym szybkość procesu jest kinetyka zachodzącej reakcji). Również skuteczność odprowadzania ciepła jest wystarczająca do rozproszenia energii wydzielanej w wyniku zachodzenia reakcji chemicznej. Nie jest obserwowany istotny wzrost temperatury, wynikający z zachodzących procesów, a jej zmiany zachodzą powoli i są silnie związane ze zmianami temperatury otoczenia drobin węgla. Drobinę węgla wraz z otoczeniem,

traktowana jako układ dynamiczny, znajduje się w punkcie stabilnym. Możliwe jest jednak wytrącenie układu z tego stanu, co może doprowadzić do samozapłonu. Zmiana taka możliwa jest np. przez doprowadzenie dodatkowej porcji energii cieplnej spoza układu lub zmianę efektywności odprowadzania ciepła (zmniejszenie).

Jeżeli szybkość wydzielania się ciepła podczas reakcji tlenu z węglem przewyższa ilość możliwą do rozproszenia przez otoczenie drobin węгля, powodując tym samym wzrost temperatury w jej otoczeniu, proces wchodzi w kolejną fazę – rozwoju pożaru. Wzrost temperatury przekłada się na zwiększenie szybkości reakcji (zgodnie z prawem Arrheniusa), co z kolei prowadzi do wydzielenia większej ilości ciepła oraz wzrostu temperatury. Proces w tej fazie jest procesem dynamicznym, jego stan zmienia się wraz z upływem czasu. Oprócz charakterystycznego dla tej fazy wzrostu temperatury, obserwuje się pojawienie się substancji chemicznych, takich jak wodór czy tlenek węgla. Ich obecność świadczy o zachodzeniu, oprócz utleniania węgla do  $\text{CO}_2$ , również innych reakcji chemicznych. Moment pojawienia się tych substancji może być traktowany jako znacznik rozpoczęcia zapłonu materiału, a odpowiadająca pojawieniu się tych substancji temperatura, temperaturą krytyczną, której osiągnięcie oznacza faktyczne rozpoczęcie reakcji spalania. Obecność gazów, takich jak  $\text{CO}$ , może świadczyć o niewystarczającej ilości  $\text{O}_2$  dostarczonej do rozważanej drobin węгля, co sugeruje, że istotnymi czynnikami wpływającymi na szybkość procesu, oprócz kinetyki chemicznej, są zachodzące zjawiska transportu masy. Faza druga kończy się w chwili, gdy ponownie zostanie osiągnięty stan równowagi pomiędzy szybkością wydzielania się energii cieplnej w wyniku zachodzenia reakcji egzotermicznych, a jej pobieraniem przez zachodzące reakcje endotermiczne oraz rozproszeniem do otoczenia. Po osiągnięciu stanu równowagi materiał płonie i rozpoczyna się trzecia faza procesu – pożar. Charakteryzuje się ona dużą stabilnością. Wszystkie zachodzące reakcje chemiczne przebiegają ze stałą (średnią) prędkością, a zjawiska transportu masy i energii są wystarczająco efektywne do podtrzymania procesu na tym poziomie, ale za mało efektywne, aby możliwy był dalszy wzrost temperatury. Materiał zwałowiska znajduje się w tej fazie aż do chwili wyczerpania węgla niezbędnego do zachodzenia reakcji spalania. Alternatywnie, faza trzecia może się zakończyć przez ograniczenie dostępu tlenu lub gwałtowne obniżenie temperatury. Należy jednak zaznaczyć, że obniżenie temperatury doprowadzi do spowolnienia zachodzących reakcji egzotermicznych do tego stopnia, aby rozpraszanie uwalnianej w wyniku ich zachodzenia energii cieplnej było wystarczające do przeciwdziałania wzrostowi temperatury zwałowiska.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaproponowany opis rozwoju zjawisk pożarowych na obiektach uformowanych z odpadów powęglowych jako proces trzyetapowy pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zapobieganie powstawaniu pożarów na obiektach uformowanych z odpadów powęglowych, powinno obejmować działania pozwalające na utrzymywanie procesu w fazie pierwszej. Technologiczny sposób takich działań powinien być dostosowany do konkretnego rodzaju odpadu powęglowego i charakterystyki obiektu.

2. Na ryzyko zapożarowania mają wpływ warunki lokalnie występujące w danym miejscu zwałowiska. Podgrzanie materiału pochodzącego z różnych miejsc zwałowiska do tej samej temperatury nie musi prowadzić do tych samych zjawisk. Dla niektórych obszarów może nastąpić po takim podgrzaniu przejście do fazy drugiej, inne mogą nadal pozostać w fazie pierwszej.
3. Pojawienie się gazów, takich jak CO czy H<sub>2</sub> jest wskaźnikiem osiągnięcia przez zwałowisko stanu inicjacji zapożarowania.

**Literatura**

1. Arisoy A., Beamish B., Cetegen E. (2006): Modeling Spontaneous Combustion of Coal. Turkish Journal of Engineering and Environmental Science Vol. 30, s. 193–201.
2. Cygankiewicz J. (2000): About determination of susceptibility of coals to spontaneous combustion using an adiabatic test method. Archives of Mining Sciences Vol. 45, issue 2, s. 247–273.
3. Drenda J., Róžański Z., Słota K., Wrona P. (2007): Zagrożenie pożarowe na zwałowiskach odpadów powęglowych. Górnictwo i Geoinżynieria t. 31, z. 3/1.
4. Falcon R.M. (1986): Spontaneous combustion of the organic matter in discards from the Witbank coalfield. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy Vol. 86, no. 7, s. 243–250.
5. Gumińska J., Róžański Z. (2005): Analiza aktywności termicznej śląskich składowisk odpadów powęglowych. Karbo nr 1.
6. Korsi J., Hensłok P., Bodynek P. (2004): Doświadczenia z likwidacji zapożarowania składowiska odpadów powęglowych „Skalny” w Łaziskach Górnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo nr 1650, s. 463–473.
7. Sawicki T. (2004): Samozapalenie węgla w zawale jako przyczyna pożarów. Karbo nr 1.