

**Andrzej Kolbrecki\***

**Marek Konecki\*\***

**Bartłomiej Papis\*\*\***

## **BADANIE EMISJI CIEPŁA I DYMU Z MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH METODĄ KALORYMETRU STOŻKOWEGO WEDŁUG ISO 5660**

W artykule podano podstawy metodyki badań z zastosowaniem kalorymetru stożkowego według ISO 5660. Wykonano analizę niepewności pomiarowych szybkości wydzielania ciepła. Przedstawiono i przedyskutowano wyniki badań otrzymane przy spalaniu wybranych materiałów budowlanych.

### **1. Wprowadzenie**

Z uwagi na akumulację energii cieplnej i zadymienie w obszarze budynku objętego pożarem właściwości materiałów budowlanych charakteryzowane są za pomocą parametrów związanych z szybkością wydzielania ciepła i emisją dymu. Ostatnio dane z małej skali kalorymetru stożkowego, przy użyciu zależności korelacyjnych, są wykorzystywane do obliczeń parametrów szybkości wydzielania ciepła i dymu metodą średniej skali SBI, które decydują o klasie wyrobu w zakresie reakcji na ogień. Istnieje więc potrzeba badań eksperymentalnych zarówno materiałów powszechnie stosowanych jako wyroby budowlane (wykończeniowe, izolacyjne i różnych zastosowań), jak i materiałów wyposażeniowych wewnątrz budowlanych o zróżnicowanym składzie i właściwościach fizycznych. Przedstawione wyniki badań zawierają się w prowadzonej w Zakład Badań Ogniwych ITB tematyce naukowo-badawczej dotyczącej rozwoju pożaru i zasad ewakuacji.

### **2. Teoretyczne podstawy metody badawczej**

Badania prowadzono za pomocą metody kalorymetru stożkowego zgodnie z normą ISO 5660 [1]. Metoda pozwala na pomiar szybkości wydzielania ciepła i dymu z materiałów poddawanych oddziaływaniu strumienia promieniowania cieplnego. W metodzie wy-

---

\* dr inż. – adiunkt w Zakładzie Badań Ogniwych ITB

\*\* dr hab. – prof. w Szkole Głównej Służby Pożarniczej

\*\*\* mgr inż. – asystent w Zakładzie Badań Ogniwych ITB

korzystano zasadę Thorntona [2], zgodnie z którą ciepło wydzielane podczas całkowitego spalania cieczy organicznych i gazów na jednostkę masy zużytego tlenu jest wartością stałą.

W przypadku większości materiałów palnych (drewno, materiały celulozopochodne, tworzywa sztuczne, ciecze organiczne i inne) w czasie ich spalania na 1 kg skonsumowanego tlenu uwalniane jest średnio 13,1 MJ energii cieplnej [3]. Odchylenia od wartości średniej dla różnych materiałów wynoszą średnio  $\pm 5\%$ .

Podczas badania próbki materiałów poddawane są działaniu zewnętrznego strumienia promieniowania cieplnego symulującego ekspozycję cieplną I fazy rozwoju pożaru.

Rozkład termiczny zachodzi na powierzchni próbki materiału, aby po czasie  $t_{ig}$  przejść w spalanie płomieniowe. W przypadku materiałów grubych termicznie (w których gradient temperatury nie może być pominięty)  $t_{ig}$  jest zależny od składu i bezwładności cieplnej materiału oraz wartości padającego strumienia promieniowania cieplnego. W przypadku oddziaływania stałego strumienia ciepła promieniowania  $\dot{q}_r$ , na powierzchnię ciała stałego, zmiany gęstości strumienia ciepła  $\dot{q}''$  płynącego przez ciało półnieskończone mogą być opisane za pomocą ogólnego równania przewodnictwa.

Otrzymuje się rozwiązanie dla przypadku jednowymiarowego (oś  $x$  prostopadła do płaszczyzny powierzchni materiału),  $x > 0$  i  $t > 0$ , przyjmując warunek brzegowy  $\dot{q}'' = \dot{q}_r$ , przy  $x = 0$  oraz  $t > 0$ , w postaci

$$T - T_0 = \frac{2\dot{q}_r''}{k} \left\{ \left( \frac{at}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) - \frac{x}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \right\} \quad (1)$$

gdzie:  $T$  – temperatura materiału dla danej wartości  $x$  po czasie  $t$ , K,  
 $T_0$  – temperatura początkowa materiału, K,  
 $k$  – współczynnik przewodnictwa cieplnego materiału, kW/m·K,  
 $a$  – dyfuzyjność cieplna materiału, określona jako  $k/\rho c$ , m<sup>2</sup>/s, gdzie:  $\rho$  – gęstość materiału, kg/m<sup>3</sup>;  $c$  – ciepło właściwe, kJ/kgK.

Teoria zapalenia zakłada, że każdy materiał może być charakteryzowany krytyczną temperaturą zapłonu  $T_{ig}$  [4], temperaturą powierzchni, przy której następuje zapłon od bodźca punktowego. Przyjmując teorię przewodnictwa cieplnego, dla termicznie grubych materiałów czas do zapłonu  $t_{ig}$  dany jest z równania (1) rozwiązanego dla  $x = 0$  (dla powierzchni materiału i warunku  $T = T_{ig}$ ) jako [5]:

$$t_{ig} = \frac{\pi}{4} k \rho c \frac{(T_{ig} - T_0)^2}{(\dot{q}_r'' - \dot{q}_{st}'')^2} \quad (2)$$

gdzie:  $T_{ig}$  – temperatura zapłonu, K,  
 $T_0$  – temperatura początkowa materiału, K,  
 $\dot{q}_r''$  – gęstość strumienia promieniowania padającego na powierzchnię materiału, kW/m<sup>2</sup>,  
 $\dot{q}_{st}''$  – gęstość strumienia ciepła traconego na drodze radiacji i konwekcji, kW/m<sup>2</sup>.

Porowate materiały polimerowe stanowiące wykończenie wewnątrz o małym  $kp_c$  powodują bardzo szybki rozwój pożaru, skracając czas jego trwania. Czas do zapłonu  $t_{ig}$  ma bezpośredni wpływ na szybkość wydzielania ciepła i prędkość rozprzestrzeniania płomienia po powierzchni materiału niezależnie od skali eksperymentu [6].

Szybkość wydzielania ciepła  $\dot{Q}(t)$  (inaczej *HRR* – ang. *Heat Release Rate*) po czasie  $t$  oddziaływania zewnętrznego strumienia ciepła na powierzchnię materiału, przy wykorzystaniu podanej wyżej zasady zużycia tlenu, może być określona z zależności:

$$\dot{Q}(t) = 1,10 \left( \frac{\Delta h_s}{r_0} \right) Y_{O_2}^a \left[ \frac{\phi - 0,172(1-\phi) \frac{Y_{CO}}{Y_{CO_2}}}{(1-\phi) + 1,105\phi} \right] \dot{m}_e \quad (3)$$

gdzie:  $\Delta h_s / r_0 = h$  – standardowe zużycie tlenu – 13,1; MJ/kg,  
 $\Delta h_s$  – ciepło spalania netto,  
 $r_0$  – stechiometryczny współczynnik masy tlen/materiał palny,  
1,10 – stosunek ciężarów cząsteczkowych tlenu i powietrza, [-],  
 $Y_{O_2}^a$  – wartość stężenia tlenu w otoczeniu wyrażonego jako ułamek molowy, [-],  
 $Y_{O_2}, Y_{CO}, Y_{CO_2}$  – wartości stężeń tlenu, CO i CO<sub>2</sub> po czasie  $t$  wyrażone jako ułamki molowe, [-],  
 $\dot{m}_e = C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_c}}$  – strumień masy gazów w przewodzie kominowym:  $C$  – stała wyznaczona dla stanowiska badawczego,  $kg^{0,5} m^{0,5} K^{0,5}$ ,  $\Delta p$  – spadek ciśnienia na kryzje pomiarowej, Pa;  $T_c$  – temperatura gazów opuszczających system, K.

$\phi$  – współczynnik zużycia tlenu określony jest zależnością:

$$\phi = \frac{Y_{O_2}^o (1 - Y_{CO_2} - Y_{CO}) - Y_{O_2} (1 - Y_{CO_2}^o)}{Y_{O_2}^o (1 - Y_{CO_2} - Y_{CO} - Y_{O_2})} \quad (4)$$

gdzie:  $Y_{O_2}^o$  – początkowa wartość stężenia tlenu wyrażonego jako ułamek molowy, wartość bezwymiarowa,  
 $Y_{CO_2}^o$  – początkowa wartość stężenia CO<sub>2</sub> wyrażonego jako ułamek molowy, wartość bezwymiarowa.

Szybkość wydzielania ciepła z jednostki powierzchni materiału  $\dot{q}''$  otrzymana w wyniku pomiarów jest używana powszechnie w modelach szybkości wydzielania ciepła w pełnej skali wraz z modelami rozprzestrzeniania płomienia [7–9].

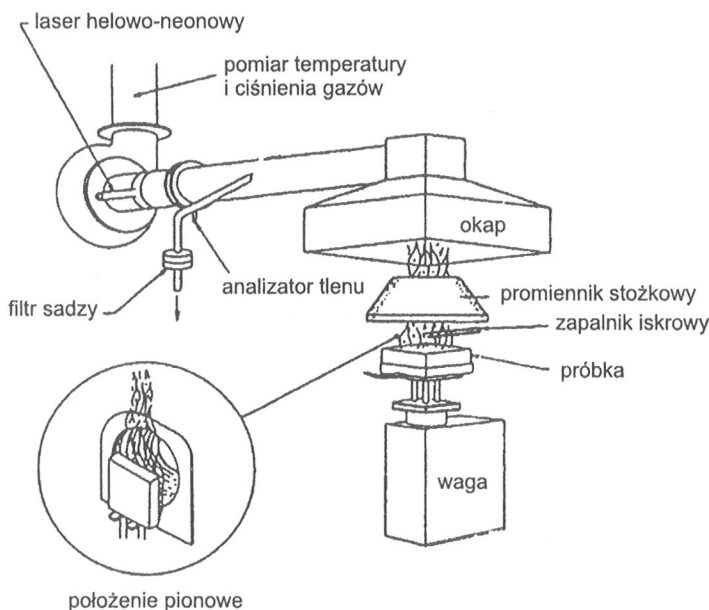
Uważa się, że metoda kalorymetru stożkowego jest obecnie najlepiej symulującą warunki pożarowe metodą małej skali [10–13].

### 3. Metodyka badań

Badanie polega na spalaniu próbki materiału palnego w powietrzu w warunkach pokojowych, zorientowanej poziomo lub pionowo w stosunku do radiatora stożkowego

poddanej strumieniowi promieniowania cieplnego o stałej wartości w zakresie gęstości od 0 do 100 kW/m<sup>2</sup>.

Zapoczątkowanie reakcji spalania odbywa się na drodze zapłonu (użycie zapalnika iskrowego) lub samozapłonu (bez zapalnika iskrowego). Badania prowadzone są zarówno w zakresie spalania płomieniowego, jak i bezpłomieniowego.



Rys. 1. Schemat ideowy kalorymetru stożkowego [1]  
Fig. 1. Scheme of cone calorimeter [1]

Powstałe produkty spalania, na drodze przepływu wymuszonego przepływają przez okap i przewód kominowy, gdzie są analizowane. Za pomocą paramagnetycznego analizatora tlenu mierzone jest jego stężenie w gazach spalinowych. Analizatory CO i CO<sub>2</sub> umożliwiają dodatkowo pomiar stężeń tych produktów spalania. Układ optyczny z fotodiodą krzemową i laserem helowo-neonowym umożliwia ciągły pomiar gęstości optycznej dymu. Zmiany natężenia wiązki światła laserowego o długości fali  $\lambda = 632,8$  nm przechodzącej przez strumień produktów spalania są opisywane za pomocą prawa Bouguera. Ponadto wykonywany jest pomiar temperatury i ciśnienia gazów spalinowych w przewodzie kominowym, a także pomiar ubytku masy spalanej próbki materiału.

### Sposób przygotowania próbek

Do badań przygotowano po trzy próbki każdego rodzaju materiału o wymiarach 100 mm × 100 mm i grubości do 15 mm. Przed badaniem próbki kondycjonowano do stałej masy w temperaturze 23°C ± 2°C oraz wilgotności względnej 50% ± 5%. Próbki owijano folią aluminiową, pozostawiając nieosłoniętą powierzchnię 0,0088 m<sup>2</sup>, osłanianą z tyłu kocem ceramicznym, aby zmniejszyć straty ciepła, a następnie umieszczano w ko-

norze spalania kalorymetru stożkowego. Urządzenie ważące próbki materiałów miało dokładność  $\pm 0,1$  g.

### Kalibracja

Przed przystąpieniem do wykonywania serii pomiarów przeprowadzano każdorazowo kalibrację wagi, grzejnika, analizatora tlenu i szybkości wydzielania ciepła zgodnie z normą [1].

Kalibrację grzejnika wykonywano również przy każdej zmianie wartości gęstości promieniowania cieplnego. Błąd określenia gęstości strumienia ciepła wynosił  $\pm 2\%$ . Układ pomiaru gęstości optycznej kalibrowano za pomocą dwóch filtrów rozpraszających o optycznych gęstościach 0,3 i 0,8 oraz przy transmitancji 100%.

Prędkość przepływu w wyciągu ustawiano na  $0,024 \text{ m}^3/\text{s} \pm 0,002 \text{ m}^3/\text{s}$ . Wahania wartości szybkości wydzielania ciepła przy spalaniu metanu (głównie pod wpływem turbulencji płomienia) wynosiły  $\pm 1,5\%$ . W przypadku paliw stałych jednorodność spalania jest zależna od jednorodności rozkładu termicznego powierzchni, który w pewnych warunkach może wykazywać znaczne fluktuacje.

### Wykonanie badań

Próbki materiałów poddano działaniu strumienia promieniowania cieplnego o gęstości  $50 \text{ kW}/\text{m}^2$ , symulującej ekspozycję cieplną końca I fazy pożaru [1]. Zgodnie z ustaleniami ISO [1] dotyczącymi badań parametrów pożarowych podana wartość gęstości strumienia ciepła odpowiada spalaniu większości materiałów przed momentem rozgorzenia.

Stosowano inicjację reakcji spalania przez zapłon przy użyciu iskry elektrycznej. W badaniach zastosowano poziome ustawienie próbek materiałów w stosunku do radiatora.

Błąd określenia temperatury przyjęto jako  $0,5^\circ\text{C}$  dla kanałów pomiaru temperatury oraz  $\pm 0,01\%$  na wyjściu przyrządów dla innych kanałów pomiarowych.

### Wielkości mierzone

Mierzono szybkość wydzielania ciepła na jednostkę powierzchni  $\dot{q}''$  ( $t$ ) po czasie  $t$  w  $\text{kW}/\text{m}^2$ , określoną zależnością

$$\dot{q}''(t) = \frac{\dot{Q}(t)}{A_s} \quad (5)$$

gdzie:  $\dot{Q}(t)$  – szybkość wydzielania ciepła, kW,

$A_s$  – powierzchnia początkowa ekspozowanej próbki materiału równa  $0,0088 \text{ m}^2$ .

Ponadto określono wartość średnią szybkości wydzielania ciepła z jednostki powierzchni materiału  $\bar{\dot{q}}''$ ,  $\text{kW}/\text{m}^2$ , czas do zapłonu próbki materiału  $t_{ig}$ , s, maksima na krzywej  $\dot{q}'' = \dot{q}''(t)$ ,  $\dot{q}''_{|pik}$  i  $\dot{q}''_{||piko}$ ,  $\text{kW}/\text{m}^2$ , całkowite ciepło wydzielone z jednostki powierzchni materiału  $q''_{tot}$ ,  $\text{MJ}/\text{m}^2$ , oraz średnie efektywne ciepło spalania  $\Delta h_{eff}$ ,  $\text{MJ}/\text{kg}$ , zgodnie ze wzorem

$$\Delta h_{eff} = \frac{\sum \dot{Q}(t) \Delta t}{m_s - m_f} \quad (6)$$

gdzie:  $m_s$  – masa próbki materiału w momencie zapłonu, kg,  
 $m_f$  – masa końcowa próbki materiału, kg.

Procedury obliczania średniej szybkości wydzielenia ciepła z jednostki powierzchni materiału  $\dot{q}$ , kW/m<sup>2</sup>, i całkowite ciepło wydzielone z jednostki powierzchni materiału  $q''_{tot}$ , MJ/m<sup>2</sup>, podano w normie [1].

Parametry charakteryzujące emisję dymu z materiału to:

1. Średnia powierzchnia ekstynkcji właściwej w czasie spalania płomieniowego próbki  $\sigma_f$ , m<sup>2</sup>/kg, określona zależnością

$$\sigma_f = (m_s - m_f) \sum_{t_{ig}}^t K_s \dot{V}_s \Delta t \quad (7)$$

gdzie:  $m_s, m_f$  – masa próbki w momencie zapoczątkowania ciągłego spalania płomieniowego i masa końcowa, kg,

$K_s$  – współczynnik ekstynkcji, zakładany jako stały w przedziale czasu  $\Delta t$ , m<sup>-1</sup>,

$\dot{V}_s$  – szybkość przepływu objętościowego dymu, m<sup>3</sup>/s,

$t_{ig}$  – czas, po którym następuje zapłon próbki materiału, s.

2. Całkowita ilość wytworzonego dymu z jednostki powierzchni po zapłonie próbki materiału  $TSR$ , m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, obliczana ze wzoru

$$TSR \text{ (ang. Total Smoke Release)} = A_s^{-1} \sum_{t_{ig}}^t K_s \dot{V}_s \Delta t \quad (8)$$

gdzie  $A_s$  – powierzchnia początkowa próbki materiału, m<sup>2</sup>. Pozostałe wielkości jak we wzorze (7).

Parametr  $\sigma_f$  jest najbardziej użytecznym parametrem charakteryzującym emisję dymu z materiałów w warunkach dynamicznych (przepływowch) z uwagi na niezależność od skali pożaru. Parametry  $\sigma_f$  określone w małej i pełnej skali w tych samych warunkach cieplno-przepływowch spalania mają zbliżone wartości.

Ponadto z pomiarów stężeń gazowych produktów spalania oznaczono wydzielanie  $Y_{CO}$ ,  $Y_{CO_2}$  określające ilości produktu spalania (CO, CO<sub>2</sub>) w kilogramie powstające z 1 kg masy materiału palnego.

## 4. Badane materiały

Do badań wybrano materiały stosowane powszechnie do wyrobów budowlanych (wykończeniowych, izolacyjnych) oraz materiały wyposażeniowe wewnątrz budowlanych o zróżnicowanym składzie i właściwościach fizycznych.

Wykaz materiałów, ich skład oraz wybrane właściwości fizyczne i termochemiczne przedstawiono w tabelicy 1.

Tablica 1. Wybrane właściwości fizyczne i termochemiczne badanych materiałów  
 Table 1. Selected physical and thermochemical properties of tested materials

Wyrób/materiał	Opis składu materiału/producent	Grubość mm	Gęstość powierzchniowa, kg/m <sup>2</sup>	Gęstość kg/m <sup>3</sup>	Współczynnik efektywności spalania β* [-]
Wyroby/materiały wykończeniowe (wykładziny podłogowe i ścienne)					
1. Wykładzina podłogowa PP	polipropylen, podkład niepalny** – „Sintelon” Jugosławia	4	średnia: 1,45 runa: 0,4	–	0,65
2. Wykładzina podłogowa PA	poliamid, podkład niepalny** – „Balta” Belgia	4,5	średnia: 1,68 runa: 0,4	–	0,66
3. Wykładzina ścienna PCW	PCW twardy (Anwipur) – „Anwil”, Włocławek	5	2,7	540	0,93
Wyroby/materiały izolacyjne					
1. Polistyren spieniony PS 1	polistyren, rdzeń płyty warstwowej „Metalplast” SC 140	30	0,6	20	0,99
2. Polistyren spieniony PS 2	polistyren z retardant-retardantami, EPS 100 wg PN-EN 13163	25	0,7	23	0,99
Wyroby/materiały wyposażeniowe					
1. Materac PU1***	pianka poliuretanowa elastyczna, na bazie diizocjanianotoluenu (TDI)	35	1,9	55	0,98
2. Materac PU2***	pianka poliuretanowa elastyczna, na bazie diizocjanianodifenylometanu (MDI)	60	3,4	57	0,97
3. Siedzisko krzesła ze sklejki lakierowanej	drewno liściaste, lakier poliestrowy – „Ataman”, Dąbrowa Chełmińska	9	6,9	760	0,93
4. Siedzisko krzesła PP	polipropylen + antypiren Lifofilam – „ZSS-Polsport”, Toruń	6	6,0	1000	0,98
5. Siedzisko krzesła PA	poliamid 6 (Durethan B40SK) – „S. Schroeder & Henzelmann, Niemcy	4,5	4,9	1090	0,99
6. Siedzisko krzesła PE	polimal 1604 (żywica poliestrowa) z włóknem szklanym – „PPHU Tago”, Koźmin	3	4,0	13000	0,64

Wyrób/materiał	Opis składu materiału/producent	Grubość mm	Gęstość powierzchniowa, kg/m <sup>2</sup>	Gęstość kg/m <sup>3</sup>	Współczynnik efektywności spalania $\beta^*$ [-]
Wyroby/materiały do różnych zastosowań					
1. Płyta poliwęglanowa	strukturajednokomorowa AKYVER SUNTYPE – „Kayserberg”, Francja	10	1,4	140	0,93
2. Płyta gipsowo-kartonowa	zgodnie z normą [14] – „Knauf sp. z o.o., Warszawa	12	9,5	790	0,18
Wyroby/materiały wykończeniowe					
1. Płyta pilśniowa porowata	zgodnie z normą [15] – Koniecpolskie Zakłady Płyt Pilśniowych SA	10	2,4	240	0,98
2. Płyta OSB o włóknach orientowanych, ang. <i>Oriented Strand Board</i> )	zgodnie z normą [15] – „Kronospan” Sp. z o.o., Żary	20	13,1	660	0,85
3. Sklejka liściasta	zgodnie z normą [15] – „Biaform” SA, Białystok	10	6,9	690	0,94
4. Płyta MDF (ang. <i>Medium Density Fibreboard</i> )	zgodnie z normą [15] – „Kronospan” Sp. z o.o., Mielec	20	14,0	700	0,79
5. Płyta wiórowa	zgodnie z normą [15] – „Prospan” Zakłady Płyt Wiórowych, Wieruszów	12	8,8	730	0,87
6. Drewno dębowe (boazeria)	zgodnie z normą [16] (75% celuloza, 25% lignina)	10	7,8	780	0,92
7. Płyta pilśniowa twarda	zgodnie z normą [15] – Koniecpolskie Zakłady Płyt Pilśniowych SA	5	4,8	960	0,98
<p>*<math>\beta = \Delta m/m</math> określono przy oddziaływaniu strumienia promieniowania cieplnego o gęstości 50 kW/m<sup>2</sup> na powierzchnię materiału równą 0,0088 m<sup>2</sup>; <math>\Delta m</math> oznacza całkowity ubytek masy próbki materiału w czasie spalania, a <math>m</math> jego masę początkową,  ** – juta nasączona lateksem z wypełnieniem nieorganicznym,  *** – pianka poliuretanowa bez pokrycia.</p>					

## 5. Wyniki badań i dyskusja

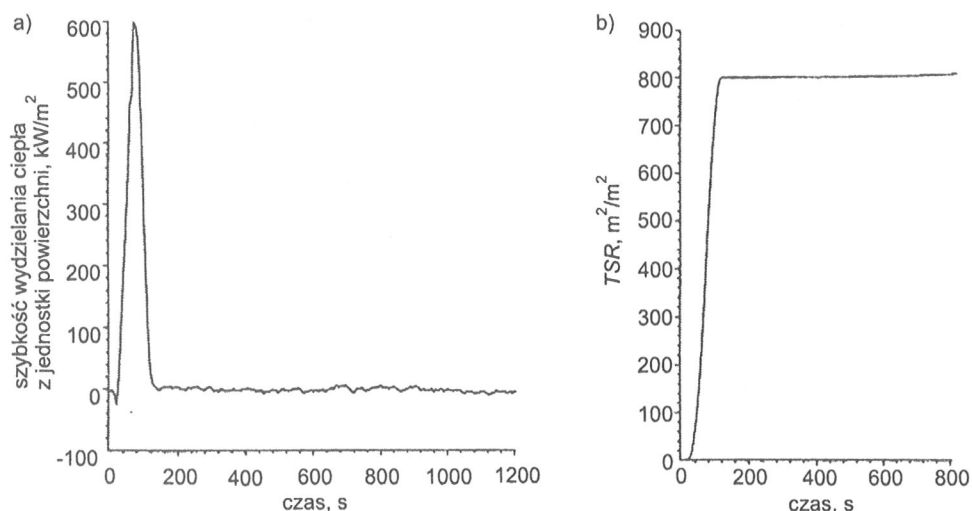
Zależności szybkości wydzielania ciepła z jednostki powierzchni materiału  $\dot{q}''$  od czasu w przypadku różnych materiałów mają przebieg zbliżony do siebie w sensie jakościowym. Początkowy odcinek krzywej opisuje stan ogrzewania materiału do zapło-



nu. W chwili zapłonu następuje gwałtowny wzrost  $\dot{q}''$  – pojawia się jeden pik na krzywej (rys. 2). Szerokość pików i jego wysokość jest zależna od rodzaju materiału i określa całkowite ciepło emitowane  $q_{tot}$  z jednostki powierzchni. W przypadku szerokich pików otrzymano większe wartości  $q_{tot}$ . Maksimum krzywej opisuje stan spalania płomieniowego całej powierzchni próbki materiału. Po osiągnięciu maksymalnej wartości  $\dot{q}''$  szybkość wydzielenia ciepła maleje w wyniku zmniejszania się powierzchni próbki objętej spalaniem płomieniowym.

Ustalenie się emisji dymu określane przez stałość wartości parametru  $TSR$ , określającego własności optyczne cząstek dymu emitowanych z jednostki powierzchni materiału, następuje w momencie spalania całej powierzchni próbki.

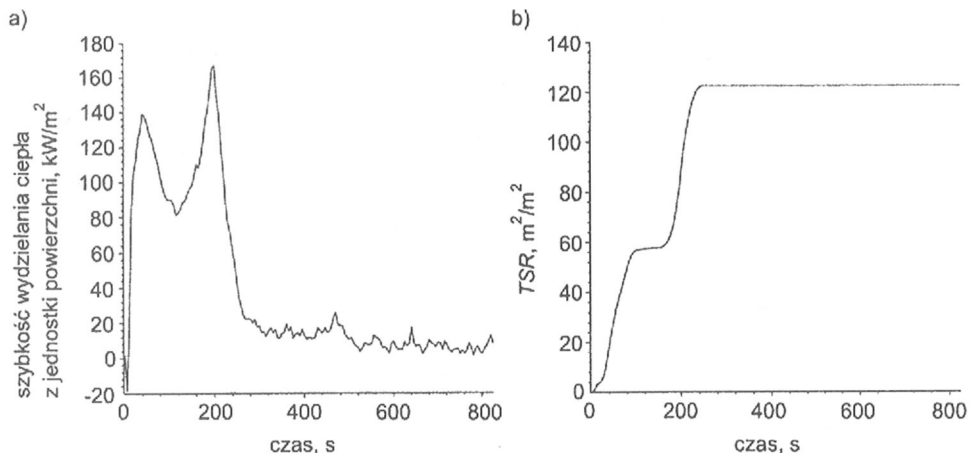
Przykładem materiału, w wyniku badań którego otrzymano jeden pik, jest wykładzina podłogowa z polipropylenu PP (rys. 2). Również w przypadku wykładziny podłogowej z poliamidu PA otrzymano podobną zależność, jak w badaniu innych polimerów termoplastycznych ulegających stopieniu pod wpływem strumienia promieniowania cieplnego.



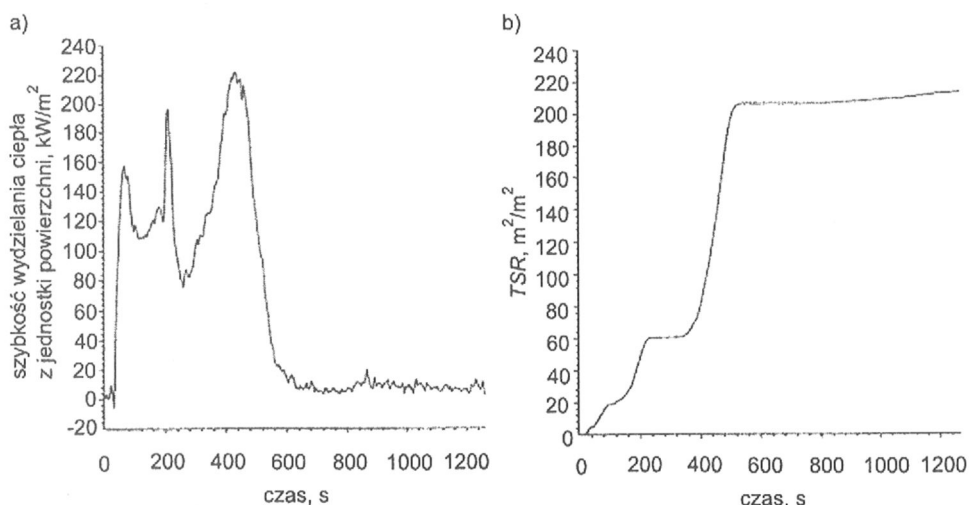
Rys. 2. Zależność szybkości wydzielenia ciepła z jednostki powierzchni  $\dot{q}''$  (a) oraz całkowitej ilości wytworzonego dymu z jednostki powierzchni  $TSR$  (b) wykładziny podłogowej z polipropylenu (PP) – od czasu

Fig. 2. Time-dependence of heat release rate per unit area  $\dot{q}''$  (a) and total smoke release per unit area  $TSR$  (b), emitted from polypropylene floor covering

W przypadku grubych termicznie materiałów zwęglających się po okresie spadku  $\dot{q}''$  następuje ponowny wzrost szybkości wydzielenia ciepła i powstanie drugiego, a czasami i trzeciego pików na krzywej  $\dot{q}'' = \dot{q}''(t)$  – rys. 3, 4. Pojawienie się kolejnych pików jest związane z warstwową strukturą materiału. Wzrost grubości warstwy zwęglonej o małym przewodnictwie cieplnym powoduje malenie  $\dot{q}''$ . Z czasem naprężenia mechaniczne powodują jej pęknięcie i gazyfikację, co prowadzi do znacznego wzrostu temperatury głębokich warstw materiału i jego zapalenie, wskutek czego szybkość wydzielenia ciepła ponownie rośnie, co przejawia się w obecności kolejnych pików  $\dot{q}''$ .



Rys. 3. Zależność szybkości wydzielania ciepła z jednostki powierzchni  $\dot{q}''$  (a) oraz całkowitej ilości wytworzonego dymu z jednostki powierzchni TSR (b) płyty pilśniowej porowatej – od czasu  
 Fig. 3. Time-dependence of heat release rate per unit area  $\dot{q}''$  (a) and total smoke release per unit area TSR (b) emitted from porous fibre-board



Rys. 4. Zależność szybkości wydzielania ciepła z jednostki powierzchni  $\dot{q}''$  (a) oraz całkowitej ilości wytworzonego dymu z jednostki powierzchni TSR (b) sklejki liściastej – od czasu  
 Fig. 4. Time-dependence of heat release rate per unit area  $\dot{q}''$  (a) and total smoke release per unit area TSR (b) emitted from leaved plywood

Wielkość pików  $\dot{q}''$  zależy od rodzaju materiału i warunków cieplnych testu. Wyniki doświadczalne wskazują na to, że przebieg szybkości wydzielania ciepła w czasie spalania materiałów jest funkcją ich składu i struktury chemicznej, własności fizycznych,

takich jak gęstość i mechaniczna stabilność warstwy zwęglonej, a także zależy od warunków cieplno-przepływowych testu. Dotychczasowe wyniki prac pokazują, że gęstość wpływa silnie na szybkość zwęglania różnych gatunków drewna, co jest jedną z przyczyn różnic w szybkości wydzielania ciepła. W przypadku materiałów wielowarstwowych, takich jak sklejka liściasta (rys. 4) i sklejka liściasta lakierowana, przebieg funkcji  $\dot{q}'' = \dot{q}''(t)$  wykazuje pojawienie się trzeciego maksimum, o największej wartości w porównaniu z poprzednimi. Świadczy to, że procesom spalania ulega jednocześnie materiał wszystkich warstw.

Zarówno wykładzina podłogowa PP (rys. 2), jak i wykładzina podłogowa PA o zbliżonym efektywnym cieple spalania, dwa razy większym niż w przypadku materiałów lignocelulozowych, wykazują różne wartości  $\dot{q}''$  (tabl. 2). Wykładzina PP wykazuje wartość  $\dot{q}''$  około dwukrotnie większą niż wykładzina PA, co znajduje potwierdzenie w pracach Babrauskasa i innych [17, 18].

W przypadku wykładzin podłogowych na wartość emisji ciepła – obok składu chemicznego – mają silny wpływ procesy destrukcji, polegające na kurczeniu, topieniu, rozrywaniu warstwy runa i spalaniu polimeru na „rusztowaniu” z niepalnego podkładu. Różnice w emisji ciepła badanych wykładzin PP i PA, o długim prostym runie i zbliżonej gęstości powierzchniowej, były związane głównie z różnicami w budowie chemicznej włókien. Różnica w całkowitej emisji dymu *TSR* w przypadku obu wykładzin koresponduje z różnicą emisji dymu oznaczoną w warunkach statycznych [19].

Wykładziny, w tym PCW, mają dużo większe wartości powierzchni ekstynkcji właściwej  $\sigma_f$  niż pozostałe badane materiały. Otrzymano  $\sigma_f(\text{PCW}) > \sigma_f \text{PP} > \sigma_f \text{PA}$ , tak samo jak przy użyciu parametru emisji dymu – współczynnika osłabienia kontrastu  $Y_m$  oznaczonego metodą statyczną [20].

Tablica 2. Wyniki badań parametrów emisji ciepła i dymu wyrobów wykończeniowych (wykładzin podłogowych i ściennych). Gęstość strumienia ciepła – 50 kW/m<sup>2</sup>

Table 2. Values of heat and smoke parameters for finishing products (floor and wall coverings). Heat flux – 50 kW/m<sup>2</sup>

Materiał / wyrób	$\dot{Q}$ kW	$\dot{q}''$ kW/m <sup>2</sup>	$t_{ig}$ s	$\dot{q}''_{lplik}$ kW/m <sup>2</sup>	$\dot{q}''_{llplik}$ kW/m <sup>2</sup>	$q''_{tot}$ MJ/m <sup>2</sup>	$\Delta h_{eff}$ MJ/kg	$\sigma_f$ m <sup>2</sup> /kg	<i>TSR</i> m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Wykładzina podłogowa PP	0,72	81,8	20	600	–	31,4	27,94	740	807
Wykładzina podłogowa PA	0,34	38,7	32	540	–	22,1	26,24	479	404
Wykładzina PCW	0,12	13,2	101	74,7	70,0	13,3	6,68	818	1684

Polistyreny spienione, jak należało się spodziewać, wykazują największe wartości – średnia powierzchnia ekstynkcji właściwej  $\sigma_f \cong 1100$  m<sup>2</sup>/kg – jak i wartości *TSR* (tabl. 3).

W przypadku materiałów wyposażeniowych, jak polipropylen (siedzisko krzesła PP), o największym ze wszystkich materiałów  $\Delta h_{eff} = 39,05$  MJ/kg, wykazuje również najwię-

kszą wartość  $\dot{q}''$  (tabl. 4). Największe wartości  $\sigma_f$  i  $TSR$  otrzymano w badaniach poliestru (siedzisko krzesła PE), polipropylenu (siedzisko krzesła PP) i pianki poliuretanowej elastycznej (materac PU1) – tablica 4. Uzyskane wyniki nie korespondują z uzyskanymi uprzednio wynikami badań parametrów statycznych emisji dymu [20].

Wyniki badań potwierdzają, że czas do zapalenia  $t_{ig}$  zależy silnie od gęstości materiału. Pianka poliuretanowa elastyczna PU1, mająca najmniejszą gęstość wśród materiałów wyposażeniowych i dekoracyjnych (tabl. 4) wykazuje najmniejszą wartość  $t_{ig} = 6$  s.

Tablica 3. Wyniki badań parametrów emisji ciepła i dymu wyrobów izolacyjnych. Gęstość strumienia ciepła – 50 kW/m<sup>2</sup>

Table 3. Values of heat and smoke parameters for insulation products. Heat flux – 50 kW/m<sup>2</sup>

Materiał / wyrób	$\dot{Q}$ kW	$\dot{q}''$ kW/m <sup>2</sup>	$t_{ig}$ s	$\dot{q}''_{1pik}$ kW/m <sup>2</sup>	$\dot{q}''_{2pik}$ kW/m <sup>2</sup>	$q''_{tot}$ MJ/m <sup>2</sup>	$\Delta h_{eff}$ MJ/kg	$\sigma_f$ m <sup>2</sup> /kg	$TSR$ m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Polistyren spieniony PS1	0,53	60,7	78	352	–	19,3	32,64	1111	665
Polistyren spieniony PS2	0,39	44,8	109	205	–	14,3	18,15	1132	839

Tablica 4. Wyniki badań parametrów emisji ciepła i dymu wyrobów wyposażeniowych. Gęstość strumienia ciepła – 50 kW/m<sup>2</sup>

Table 4. Values of heat and smoke parameters for materials used in products for equipment. Heat flux – 50 kW/m<sup>2</sup>

Materiał / wyrób	$\dot{Q}$ kW	$\dot{q}''$ kW/m <sup>2</sup>	$t_{ig}$ s	$\dot{q}''_{1pik}$ kW/m <sup>2</sup>	$\dot{q}''_{2pik}$ kW/m <sup>2</sup>	$q''_{tot}$ MJ/m <sup>2</sup>	$\Delta h_{eff}$ MJ/kg	$\sigma_f$ m <sup>2</sup> /kg	$TSR$ m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Siedzisko krzesła PP	4,1	472	37	970	–	115,7	39,05	337	997
Materac PU2	1,6	182	31	373	–	67,1	19,14	288	1011
Materac PU1	1,3	149	6	215	347	43,2	20,11	337	726
Siedzisko krzesła PA	1,2	142	48	739	–	134,3	26,22	94,7	526
Siedzisko krzesła ze sklejk lakierowanej	0,41	46,9	21	162	212*	84,5	11,19	30,1	238
Siedzisko krzesła PE	0,26	29,4	35	173	–	34,5	8,46	587	1930

Wyniki badań parametrów emisji ciepła i dymu wyrobów różnych zastosowań przedstawiono w tablicy 5.

Wartości  $\dot{q}''$  materiałów lignocelulozowych zawierają się w przedziale (22,6–65,3) kW/m<sup>2</sup> (tabl. 6). Największą wartość otrzymano w badaniach płyt MDF i OSB, materiałów o największej gęstości powierzchniowej i grubości, co wskazuje na dominującą rolę procesów penetracji termicznej materiału w mechanizmach emisji ciepła. Potwierdza to dane

otrzymane w pracy [21]. Drewno dębowe wykazuje najmniejszą wartość  $\dot{q}'' = 22,6 \text{ kW/m}^2$ , co jest związane z najmniejszą wartością  $\Delta h_{eff}$ .

Czasy do zapłonu materiałów lignocelulozowych są zbliżone (tabl. 6). Płyta pilśniowa porowata ulega zapaleniu po 8 s, co jest związane z trzykrotnie mniejszą gęstością materiału w stosunku do pozostałych materiałów drewnopochodnych. W przypadku sklejki liściastej lakierowanej (tabl. 4) zapłonowi ulega lakier poliesterowy, stąd mniejszy  $t_{ig} = 21 \text{ s}$ . Otrzymane wyniki potwierdzają, że czas do zapalenia  $t_{ig}$  w przypadku materiałów lignocelulozowych zależy głównie od gęstości materiału.

Tablica 5. Wyniki badań parametrów emisji ciepła i dymu wyrobów różnych zastosowań. Gęstość strumienia ciepła –  $50 \text{ kW/m}^2$

Table 5. Values of heat and smoke parameters for different application products. Heat flux –  $50 \text{ kW/m}^2$

Materiał / wyrób	$\dot{Q}$ kW	$\dot{q}''$ kW/m <sup>2</sup>	$t_{ig}$ s	$\dot{q}''_{I\text{pik}}$ kW/m <sup>2</sup>	$\dot{q}''_{II\text{pik}}$ kW/m <sup>2</sup>	$q''_{tot}$ MJ/m <sup>2</sup>	$\Delta h_{eff}$ MJ/kg	$\sigma_f$ m <sup>2</sup> /kg	TSR m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Płyta poliwęglanowa	0,36	40,7	251	268	–	56,3	14,11	745	2875
Płyta gipsowo-kartonowa	0,01	1,0	61	13,0	40	0,8	0,08	17,4	35,4

Tablica 6. Wyniki badań parametrów emisji ciepła i dymu wyrobów wykończeniowych (ściennych). Gęstość strumienia ciepła –  $50 \text{ kW/m}^2$

Table 6. Values of heat and smoke parameters for wall finishing products. Heat flux –  $50 \text{ kW/m}^2$

Materiał / wyrób	$\dot{Q}$ kW	$\dot{q}''$ kW/m <sup>2</sup>	$t_{ig}$ s	$\dot{q}''_{I\text{pik}}$ kW/m <sup>2</sup>	$\dot{q}''_{II\text{pik}}$ kW/m <sup>2</sup>	$q''_{tot}$ MJ/m <sup>2</sup>	$\Delta h_{eff}$ MJ/kg	$\sigma_f$ m <sup>2</sup> /kg	TSR m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Płyta MDF	0,57	65,3	38	190	150	117,6	9,34	66,2	837
Płyta OSB	0,56	63,5	47	221	126	115	9,09	68,2	861
Płyta wiórowa	0,47	53,6	47	192	149	92,6	10,91	52,0	498
Sklejka liściasta	0,39	43,9	32	158	196*	79,1	10,75	29,6	227
Płyta pilśniowa twarda	0,39	43,8	42	435	–	66,7	13,73	96,6	524
Płyta pilśniowa porowata	0,30	33,6	8	140	168	33,1	12,01	19,3	122
Drewno dębowe (boazeria)	0,20	22,6	39	140	128	46,0	6,82	22,9	143
* – III pik $222 \text{ kW/m}^2$									

Wielkość  $\sigma_f$  charakteryzuje własności optyczne dymu emitowanego z jednostki powierzchni materiału. Dla płyt MDF i OSB ma wartości zbliżone. Większa o 50% wartość  $\sigma_f$  w przypadku płyty pilśniowej twardej jest związana z innymi warunkami spalania (płomieniowe) niż bezpłomieniowe (warunki maksymalnej emisji dymu). Emisja dymu

z jednostki powierzchni materiału tak samo szereguje materiały – z wyjątkiem płyty pilśniowej twardej, gdzie  $TSR$  jest mniejsza, co wynika z mniejszej gęstości powierzchniowej i grubości materiału.

## 6. Analiza niepewności średnich wyników badań

Przeprowadzono analizę niepewności pomiarowych oznaczonych parametrów. Do wyznaczenia niepewności wyników badań parametrów emisji ciepła i dymu wykorzystano metodykę zawartą w Poradniku ITB [22].

Niżej przedstawiono przykład liczbowego wyrażania niepewności średniej szybkości wydzielania ciepła generowanej z siedziska krzesła PP. Zbliżone wyniki otrzymuje się w przypadku pozostałych badanych materiałów.

### 6.1. Badanie podstawowej wielkości emisji ciepła – szybkości wydzielania ciepła

Wartość średniej szybkości wydzielania ciepła  $\dot{Q}$ , kW, obliczono na podstawie wyników badań  $n = 5$  normowych próbek materiału stanowiącego siedzisko krzesła PP.

#### A. Zestawienie wyników badań

Średnią szybkość wydzielania ciepła  $\dot{Q}$ , kW, dla danego materiału określono przy zastosowaniu wzoru (3) jako wartość uśrednioną po czasie badania  $t$ , otrzymując 4,1 kW (tabl. 4).

Odchylenie standardowe obliczono dla przypadku serii wyników badań liczebności  $3 \leq n \leq 6$  na podstawie rozstępu wyników za pomocą zależności

$$s = \frac{R}{\alpha_n}, \quad R = y_n - y_l$$

gdzie:  $R$  – różnica między wynikami badań: największym  $y_n$  i najmniejszym  $y_l$ ,  
 $\alpha_n$  – współczynnik zależny od liczby pomiarów  $n$ , przy  $n = 5$  wynosi 2,45 [22].

$$s = \frac{4,6 - 3,6}{2,45} = 0,41 \text{ kW}$$

#### B. Wyrażenie funkcji wielkości wyjściowej $\dot{Q}$

$$\dot{Q} = 1,10 h Y_{O_2}^a \phi_x C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_c}}$$

$$\phi = 0,172 (1 - \phi) \frac{Y_{CO}}{Y_{CO_2}}$$

gdzie:  $\phi_x = \frac{\phi - 0,172 (1 - \phi) \frac{Y_{CO}}{Y_{CO_2}}}{(1 - \phi) + 1,105 \phi}$

Opis występujących wielkości podano wyżej, pod wzorami (3) i (4).

### C. Obliczenie składowych $u_i(\dot{Q})$ złożonej niepewności standardowej

a) składowa związana z określeniem  $h = \Delta h_s / r_o$  (standardowego zużycia tlenu)

Przyjęcie standardowej wartości zużycia tlenu  $\Delta h_s / r_o$  równej 13,1 MJ/kg w przypadku spalania wszystkich badanych materiałów polimerowych daje błąd systematyczny rzędu  $\pm 5\%$ . W przypadku materiałów jednorodnych tylko z jednym mechanizmem rozkładu termicznego niepewność ta może być zredukowana na drodze określenia  $\Delta h_c$  przy użyciu bomby kalorymetrycznej i  $r_o$  na podstawie analizy elementarnej składu materiału. Nie ma to praktycznego znaczenia w odniesieniu do zastosowanych na użytek niniejszej pracy próbek materiałów niejednorodnych, ulegających różnym reakcjom degradacji termicznej.

- niepewność standardową typu B określono ze wzoru

$$u(h) = \frac{\delta h}{\sqrt{3}} = 0,05 \cdot 13100 \cdot 0,577 = 378 \text{ kJ/kg}$$

gdzie  $\delta h$  oznacza błąd bezwzględny określenia wielkości  $h$ .

- pochodna cząstkowa  $\dot{Q}$  względem  $h$

$$\frac{\partial \dot{Q}}{\partial h} = 1,10 Y_{\text{CO}_2}^a \phi_x C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_c}} = 1,1 \cdot 0,21 \cdot 0,0470 \cdot 0,041 \sqrt{\frac{101}{412}} = 0,00022 \text{ kg/s}$$

Wielkości  $\phi$ ,  $\phi_x$  obliczono, przyjmując następujące wartości średnie poszczególnych stężeń gazów (w ułamkach molowych):

$$Y_{\text{O}_2} = 0,1969, Y_{\text{CO}} = 0,0009, Y_{\text{CO}_2} = 0,0064, Y_{\text{O}_2}^o = 0,21, Y_{\text{CO}_2}^o = 0,0004$$

i otrzymując  $\phi = 0,069896$ ,  $\phi_x = 0,047013$ . Stała  $C = 0,04127 \text{ kg}^{0,5} \text{ m}^{0,5} \text{ K}^{0,5}$ ,  $\Delta p = 101 \text{ Pa}$ ,  $T_c = 412 \text{ K}$ .

- składowa złożonej niepewności standardowej

$$u_h(\dot{Q}) = \left| \frac{\partial \dot{Q}}{\partial h} \right| u(h) = 0,00022 \cdot 378 = 0,083 \text{ kW}$$

b) składowa związana z określeniem  $Y_{\text{O}_2}^a$  (stężenia tlenu w otoczeniu)

System gromadzenia danych miał dokładność oznaczenia stężenia tlenu 50 ppm (błąd określenia stężenia tlenu wynosił  $\pm 0,01\%$  – ułamek molowy określony z błędem bezwzględnym  $\pm 0,0001$  – podobnie jak innych gazowych produktów spalania).

- niepewność standardowa typu B:

$$u(Y_{\text{O}_2}^a) = \frac{\delta Y_{\text{O}_2}^a}{\sqrt{3}} = 0,0001 \cdot 0,21 \cdot 0,577 = 0,00001$$

- pochodna cząstkowa  $\dot{Q}$  względem  $Y_{\text{O}_2}^a$ :

$$\frac{\partial \dot{Q}}{\partial Y_{\text{O}_2}^a} = 1,10 h \phi_x C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_c}} = 1,1 \cdot 13100 \cdot 0,0470 \cdot 0,041 \sqrt{\frac{101}{412}} = 13,745 \text{ kW}$$

- składowa złożonej niepewności standardowej

$$u_{Y_{O_2}^a}(\dot{Q}) = \left| \frac{\partial \dot{Q}}{\partial Y_{O_2}^a} \right| u(Y_{O_2}^a) = 13,745 \cdot 0,00001 = 0,00014 \text{ kW}$$

- c) składowa związana z określeniem współczynnika  $\phi_x$

Przyjęto błąd bezwzględny określenia współczynnika  $\phi_x$  jako tego samego rzędu, co błąd bezwzględny stężeń gazów:  $\pm 0,0001$ .

- niepewność standardowa typu B

$$u(\phi_x) = \frac{\partial \phi_x}{\sqrt{3}} = 0,0001 \cdot 0,0470 \cdot 0,577 = 0,000003$$

- pochodna cząstkowa  $\dot{Q}$  względem  $\phi_x$

$$\frac{\partial \dot{Q}}{\partial \phi_x} = 1,10 \text{ h } Y_{O_2}^a C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_c}} = 1,1 \cdot 13100 \cdot 0,21 \cdot 0,041 \cdot 0,495 = 61,41 \text{ kW}$$

- składowa złożonej niepewności standardowej

$$u_{\phi_x}(\dot{Q}) = \left| \frac{\partial \dot{Q}}{\partial \phi_x} \right| u(\phi_x) = 61,41 \cdot 0,000003 = 0,00018 \text{ kW}$$

d) składowa związana z określeniem  $\dot{m}_e = C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_c}}$  (strumienia masy gazów w przewodzie kominowym)

Wartości niepewności standardowych typu B:  $u(C) = 0,001$ ,  $u(\Delta p) = 1$ ,  $u(T_c) = 1$  wzięto z pracy [23]:

- pochodna cząstkowa  $\dot{Q}$  względem  $C$

$$\frac{\partial \dot{Q}}{\partial C} = 1,10 \text{ h } Y_{O_2}^a \phi_x \sqrt{\frac{\Delta p}{T_c}} = 1,1 \cdot 13100 \cdot 0,21 \cdot 0,0470 \cdot 0,495 = 70,4 \text{ kg}^{1,5} \text{ m}^{1,5} \text{ s}^{-2} \text{ K}^{0,5}$$

- składowa złożonej niepewności standardowej

$$u_c(\dot{Q}) = \left| \frac{\partial \dot{Q}}{\partial C} \right| u(C) = 70,4 \cdot 0,001 = 0,0704 \text{ kW}$$

- pochodna cząstkowa  $\dot{Q}$  względem  $\Delta p$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{Q}}{\partial \Delta p} &= 1,10 \text{ h } Y_{O_2}^a \phi_x C \sqrt{\frac{1}{T_c}} \cdot 0,5 \cdot \Delta p^{-0,5} = 1,1 \cdot 13100 \cdot 0,21 \cdot 0,0470 \cdot 0,041 \cdot 0,0493 \cdot 0,0497 = \\ &= 0,0143 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$



- składowa złożonej niepewności standardowej

$$U_{\Delta p}(\dot{Q}) = \left| \frac{\partial \dot{Q}}{\partial \Delta p} \right| u(\Delta p) = 0,0143 \cdot 1 = 0,0143 \text{ kW}$$

- pochodna cząstkowa  $\dot{Q}$  względem  $T_c$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{Q}}{\partial T_c} &= 1,10 \text{ h } Y_{O_2}^a \phi_x C \sqrt{\Delta p} \cdot 0,5 \cdot T_c^{-1,5} = 1,1 \cdot 13100 \cdot 0,21 \cdot 0,0470 \cdot 0,041 \cdot 10,05 \cdot 0,00006 = \\ &= 0,00352 \text{ kW/K} \end{aligned}$$

- składowa złożonej niepewności standardowej

$$u_{T_c}(\dot{Q}) = \left| \frac{\partial \dot{Q}}{\partial T_c} \right| u(T_c) = 0,00352 \cdot 1 = 0,000352 \text{ kW}$$

#### D. Obliczenie złożonej niepewności standardowej $u_c(\dot{Q})$

$$\begin{aligned} u_c(\dot{Q}) &= \sqrt{\sum_{i=1}^6 \left( \frac{\partial \dot{Q}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} = \sqrt{0,083^2 + 0,00014^2 + 0,00018^2 + 0,0704^2 + 0,0143^2 + 0,000352^2} = \\ &= 0,1098 \text{ kW} \end{aligned}$$

#### E. Obliczenie wypadkowej liczby stopni swobody $v_{eff}$

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(\dot{Q})}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(\dot{Q})}{v_i}} = \frac{0,1098^4}{0,083^4 + 0,0704^4 + 0,0143^4} \cdot 4 \approx 8$$

gdzie  $v_i$  oznacza liczbę swobody związaną z oszacowaniami poszczególnych niepewności standardowych  $u_i(\dot{Q})$ . Wielkości  $u_i(\dot{Q})$  szacowano na podstawie serii wyników pomiarów o liczności  $n$ , w związku z czym liczbę stopni swobody  $v_i$  obliczono ze wzoru [22]:  $v_i = n - 1 = 5 - 1 = 4$ .

#### F. Wyznaczenie współczynnika rozszerzenia $k_p$

Przyjętemu w ocenach szybkości wydzielania ciepła poziomowi ufności  $p = 0,95$  oraz obliczonej liczby stopni swobody  $v_{eff} = 8$  odpowiada wartość współczynnika rozszerzenia  $k_p = 2,306$  [22]. W badaniach parametrów emisji ciepła i dymu przyjmuje się, że oznaczane wielkości  $y$  są zmiennymi losowymi mającymi rozkład normalny. W związku z tym odpowiednie jako współczynniki rozszerzenia są statystyki rozkładu t-Studenta  $t_p$ , czyli  $k_p = t_p$  [22]. W tym przypadku dla poziomu ufności  $p = 0,95$  oraz liczby stopni swobody  $v = n - 1 = 4$  z tablicy 2 [22] otrzymuje się  $k_p = 2,776 \approx 2,8$ . Tę ostatnią większą wartość  $k_p$  przyjęto do szacowania niepewności rozszerzonej  $U_p$ .

### G. Wyznaczenie niepewności rozszerzonej (całkowitej) $U_p$

Wartość niepewności rozszerzonej średniej szybkości wydzielania ciepła określono z zależności [22]:

$$U_p = k_p u_c(\dot{Q}) = 2,8 \cdot 0,1098 = 0,31 \text{ kW}$$

Stanowi to około 7,5% wartości średniej szybkości wydzielania ciepła z siedziska krzesła PP,  $\dot{Q} = 4,1 \text{ kW}$ .

Z przeprowadzonej analizy wynika, że o dokładności wyznaczenia  $\dot{Q}$  decydują dokładności określenia wielkości  $\frac{\Delta h_c}{r_o}$ ,  $Y_{O_2}$ ,  $Y_{CO}$ ,  $Y_{CO_2}$  oraz  $\dot{m}_e$ . Przyczynki do niepewności złożonej pomiaru związane z niepewnością określenia wartości zużycia tlenu  $\frac{\Delta h_c}{r_o}$  oraz stałej  $C$  są dużo większe niż niepewności określenia pozostałych wielkości.

Z uwagi na bardzo małe stężenie CO pozostającego w produktach spalania w kalorymetrze stożkowym, jego wpływ na szybkość wydzielania ciepła opisany wzorem (3) jest niewielki. W wielu przypadkach spalania płomieniowego materiałów w warunkach nieograniczonego dostępu tlenu może być pominięty [1]. Otrzymane wyniki są porównywalne z danymi innych autorów [23, 24]. Sychta [23] poprawił dokładność pomiaru szybkości wydzielania ciepła przez uwzględnienie korekty błędu dynamicznego, co ma szczególne znaczenie przy analizie funkcji  $\dot{Q} = \dot{Q}(t)$  otrzymanej w kalorymetrze stożkowym.

### 6.2. Badanie pozostałych wielkości określających emisję ciepła i dymu

Zgodnie z podaną wyżej procedurą obliczono niepewności rozszerzone  $U_p$  pozostałych wielkości określanych przy zastosowaniu metody kalorymetru stożkowego. Otrzymano następujące wartości niepewności względnych, 100%  $U_c(Y) / X$ : w przypadku szybkości wydzielania ciepła z jednostki powierzchni materiałów  $\dot{q}''$ ,  $\dot{q}''_{I,plik}$ ,  $\dot{q}''_{II,plik}$  – 10%, w przypadku całkowitego wydzielania ciepła z jednostki powierzchni  $q''_{tot}$  – 10,5%, w przypadku czasu do zplonu  $t_{ig}$  – 8%, w przypadku efektywnego ciepła spalania  $\Delta h_{eff}$  – 10%.

Niepewności rozszerzone średniej powierzchni ekstynkcji właściwej  $\sigma_f$  i całkowitej ilości wytworzonego dymu z jednostki powierzchni  $TSR$  wynosiły odpowiednio 22% i 23%. Otrzymano je na drodze badania precyzji (rozrzutu) wyników pomiarów.

Otrzymane w niniejszej pracy wyniki analizy niepewności potwierdzają dane dotyczące precyzji metody badawczej kalorymetru stożkowego (wyniki badań porównawczych dotyczące powtarzalności i odtwarzalności) zawarte w publikacji [1].

## 7. Podsumowanie

Badania parametrów emisji ciepła i dymu wybranych materiałów metodą małej skali przy zastosowaniu kalorymetru stożkowego wskazują na duże różnice w wartościach szybkości wydzielania ciepła z jednostki powierzchni materiału  $\dot{q}''$  dla strumienia ciepła

padającego na próbkę materiału o gęstości 50 kW/m<sup>2</sup>. Czas do zapłonu materiałów jest wprost proporcjonalny do ich bezwładności cieplnej.

Potwierdzono, że parametrem różnicującym emisje ciepła z materiałów, w przypadku istnienia pojedynczego maksimum na krzywej  $\dot{q}'' = \dot{q}''(t)$ , może być wysokość pik  $\dot{q}''_{\text{pik}}$ . Największe wartości  $\dot{q}''$  otrzymano dla polipropylenu PP, poliuretanowych pianek elastycznych PU, poliamidu PA w zakresie od 81,8 kW/m<sup>2</sup> do 472 kW/m<sup>2</sup>. Badane materiały lignocelulozowe wykazują wartości  $\dot{q}''$  mniejsze, w granicach od 22,6 kW/m<sup>2</sup> do 65,3 kW/m<sup>2</sup>.

Największe wartości emisji dymu z jednostki powierzchni materiału określone przy użyciu średniej powierzchni ekstynkcji właściwej  $\sigma_f$  otrzymano w przypadku polistyrenów spienionych, wykładziny PCW, płyty poliwęglanowej i wykładziny podłogowej PP. Materiały lignocelulozowe wykazywały  $\sigma_f$  dużo mniejsze. Otrzymano:  $\sigma_f(\text{PCW}) > \sigma_f(\text{PP}) > \sigma_f(\text{PA})$ , (podobnie jak uszeregowanie wartości emisji dymu otrzymanych za pomocą metody statycznej w komorze dymowej, przy tej samej gęstości strumienia promieniowania padającego na powierzchnię materiału). Wykładziny mają dużo większe wartości  $\sigma_f$  niż materiały lignocelulozowe.

Wyniki doświadczeń wskazują na to, że przebieg szybkości wydzielania ciepła i emisja dymu w czasie spalania materiałów są funkcjami ich składu i struktury chemicznej, własności fizycznych, takich jak gęstość i mechaniczna stabilność warstwy zwęglonej, a także zależą od warunków cieplno-przepływowych testu.

## Bibliografia

- [1] ISO 5660 (2002) Reaction to fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Rate of heat release from building products. Part 2: Smoke production rate (dynamic measurement) – Cone calorimeter method
- [2] Thornton W.: The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds. *Philosophical Magazine and J. of Science*, 1917, vol. 33, nr 196
- [3] Huggett C.: Estimation of rate heat release by means of oxygen consumption measurements. *Fire and Materials*, 1980, vol. 4, s. 61–65
- [4] Thomson H. E., Drysdale D. D., Beyler C. L.: An experimental evaluation of critical surface temperature as a criterion for piloted ignition of solid fuels. *Fire Safety Journal*, 1988, nr 13, s. 185–196
- [5] Drysdale D. D.: *An Introduction to Fire Dynamics*. John Wiley and Sons. New York 1985, s. 43
- [6] Babrauskas V.: Bench scale methods for prediction of full scale fire behaviour of furnishings and wall linings. Technical Report 84-10, Society of Fire Protection Engineers, Boston 1984
- [7] Quintiere J.: Growth of fire in building compartments. *Fire Standards and Safety*. ASTM STP 614, 1977, s.131–167
- [8] Sundström B.: *Fire Safety of Upholstered Furniture – the final report on the CBUF (Combustion Behaviour of Upholstered Furniture) research programme*. Interscience Communications, European Commission Measurement and Testing Report EUR 16477 EN, London 1995
- [9] Karlsson B.: A mathematical model for calculating heat release rate in the room corner test. *Fire Safety Journal*, 1993, nr 20, s. 93–113

- [10] Babrauskas V.: Development of the cone calorimeter – A bench scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption. *Fire and Materials*, 1984, vol. 8, s. 81
- [11] Babrauskas V., Baroudi D., Myllymaki J., Kokkala M.: The Cone Calorimeter Used for Predictions of the Full-scale Burning Behaviour of Upholstered Furniture. *Fire and Materials*, 1997, nr 21, s. 95–105
- [12] Azhakesan M. A., Shields T. J., Silcock G. W. H.: Towards the Translation and Classification of Building Materials Using Combustion Calorimetry. *J. Applied Fire Science*, 1997–1998, nr 71, s. 17–28.
- [13] Urbas J.: Effects of retainer frame, irradiance level and specimen thickness on cone calorimeter test results. *Fire and Materials*, 2005, vol. 29, s. 1–13
- [14] PN-EN 520:2004 (E) Płyty gipsowo-kartonowe. Definicje, wymagania i metody badań
- [15] PN-EN 13986:2002 Płyty drewnopochodne stosowane w budownictwie. Właściwości, ocena zgodności i znakowanie
- [16] PN-EN 12775:2002 Płyty z drewna litego. Klasyfikacja i terminologia
- [17] Babrauskas V., Greyson S.: Heat release in fires. E & F.N. Spon, London 1992
- [18] Tewarson A.: Generation of Heat and Chemical Compounds in Fire. Section 1/Chapter, 13, w: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. NFPA, 1998, USA
- [19] Kolbrecki A., Konecki M.: Rozwój pożaru i zasady ewakuacji. Bezpieczeństwo pożarowe budynków. Praca naukowo-badawcza ITB, temat NP-45/02, 2003–2006, maszyn., biblioteka ITB
- [20] Konecki M., Półka M., Zaleski B.: Dynamics of smoke generation from materials characterized by rate of change the contrast attenuation coefficient. 6th International Symposium on Fire Safety Science. International Association for Fire Safety Science, University of Poitiers, 1999
- [21] Papis B.: Weryfikacja eksperymentalna i teoretyczna metod SBI i kalorymetru stożkowego, *Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik*, 2007, nr 3 (143)
- [22] Brunarski L.: Wyznaczanie niepewności wyników badań wytrzymałościowych. Instrukcja ITB 435/2008. Seria: Instrukcje, Wytyczne, Poradniki. ITB, Warszawa 2008
- [23] Sychta K.: Analiza porównawcza badań intensywności wydzielania ciepła przez materiały okrętowe oraz metoda poprawy dokładności pomiaru. Rozprawa doktorska. Politechnika Szczecińska, Wydział Techniki Morskiej, Szczecin 2006
- [24] Brohez S. (2005) Uncertainty analysis of heat release rate measurement from oxygen consumption calorimetry. *Fire and Materials*, 2005, vol. 29, s. 383–384

TEST OF HEAT AND SMOKE EMISSION  
FROM SELECTED BUILDING MATERIALS  
USING CONE FIRE TEST METHOD ISO 5660

Summary

The paper includes the test methodology for cone calorimeter using according to ISO 5660. The uncertainty analysis of obtained results was presented. The test results for selected building materials has been shown and discussed.

*Praca wpłynęła do Redakcji 12 I 2009 r.*