

ml. bryg. dr inż. Jerzy GAŁAJ
SGSP, Katedra Techniki Pożarniczej

ANALIZA PORÓWNAWCZA ZMIAN TEMPERATURY ORAZ STĘŻEŃ TLENU I TLENKU WĘGLA W POMIESZCZENIU NIE WENTYLOWANYM PODCZAS POŻARU PIANKI POLIURETANOWEJ I DREWNA SOSNOWEGO

W artykule omówiono stanowisko pomiarowe oraz ogólną koncepcję badań pożarów w pełnej skali.

The description of measuring stand and the general idea of fire investigation in full-scale in unventilated compartment were presented.

1. Wstęp

Badania pożarów w pełnej skali prowadzone w różnych ośrodkach naukowo-badawczych na świecie, najczęściej w USA, skupionych wokół NIST [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 17] i niektórych ośrodkach europejskich, takich jak na przykład Fire Safety Engineering Research and Technology Centre na uniwersytecie w Belfaście, mają zazwyczaj na celu albo walidację już istniejących, bądź aktualnie tworzonych komputerowych strefowych i polowych modeli pożarów albo też analizę rozwoju pożarów, które miały lub mogą mieć miejsce w rzeczywistości. Czasami badania dotyczą przypadków konkretnych obiektów budowlanych, takich jak budynki wielokondygnacyjne [10, 25], tunele [12], silosy [18] lub budynki atrialne [22]. Celem niektórych eksperymentów jest badanie zmian stężeń wybranych gazów pożarowych [15, 23, 24]. W Polsce jedynym ośrodkiem, w którym prowadzi się badania pożarów jest ITB. Jednak, zgodnie ze specyfiką tej instytucji, głównym ich celem jest badanie własności palnych materiałów stosowanych w budownictwie, w tym dymotwórczości. Wyniki takich eksperymentów zostały zamieszczone w pracy [13]. Z powyższych rozważań wynika, że do tej pory nie

prowadzono ani w Polsce, ani na świecie kompleksowych badań pożarów w pełnej skali, podczas których analizowano by jednocześnie rozkłady przestrzenne temperatur, stężeń tlenu i gazów pożarowych, takich jak tlenek i dwutlenek węgla oraz gęstości optycznej dymu w pomieszczeniu. Ponadto interesujące wydaje się badanie tych rozkładów przy różnych materiałach palnych, parametrach wentylacji oraz podczas gaszenia za pomocą tryskacza lub dysz mgłowych. Jednym z podstawowych wielkości charakteryzujących pożar jest ilość ciepła, jaka wydziela się podczas palenia materiału palnego. Może ona być pośrednio obserwowana poprzez ubytek jego masy.

Celem planowanych badań pożarów w Szkole Głównej Służby Pożarniczej jest otrzymanie:

- a) zmian generacji ciepła podczas badanych pożarów pośrednio poprzez pomiar ubytku masy materiału palnego (przy znanej wartości ciepła spalania),
- b) rozkładu przestrzennego temperatur podczas pożarów wybranych materiałów palnych (tworzywa sztuczne i różne gatunki drewna) usytuowanych w środku, w rogu lub przy ścianie pomieszczenia,
- c) rozkładów w pomieszczeniu stężeń gazów, takich jak tlen, tlenek i dwutlenek węgla, zmian gęstości optycznej dymu w różnych punktach pomieszczenia,
- d) rozkładów przestrzennych temperatur oraz stężeń tlenu, tlenku i dwutlenku węgla podczas gaszenia pożaru wybranych materiałów palnych za pomocą tryskacza oraz dysz mgłowych strumieniowo-wirowej i wirowej,
- e) zmian gęstości optycznej dymu podczas gaszenia pożarów metodami wymienionymi w punkcie e),
- f) rozkładów temperatury, stężeń gazów i optycznej gęstości dymu przy różnych zadanych wydajnościach systemu wentylacji poziomej.

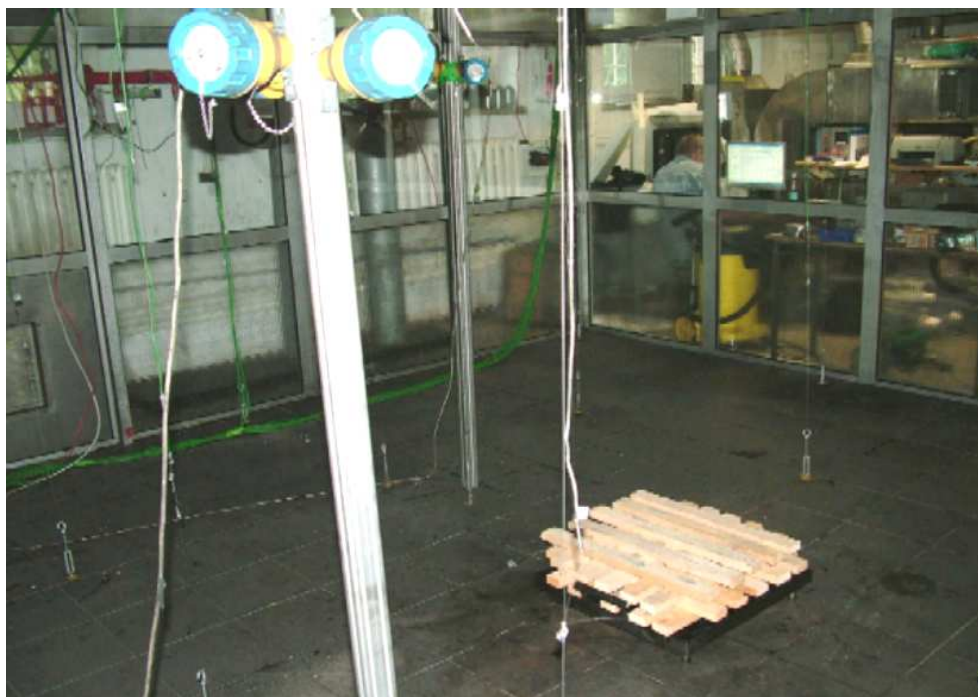
Jednym z istotniejszych celów badań jest walidacja komputerowych modeli pożarów zarówno takich, które są już dobrze znane na świecie (CFAST i FDS), jak i takich, które powstały (strefowy opracowany w 1998 r. i obecnie modyfikowany) lub aktualnie powstają w SGSP (hybrydowy, łączący zalety modelu strefowego i polowego).

Prace naukowo-badawcze w całości są finansowane ze środków KBN przeznaczonych na badania statutowe.

W niniejszym artykule zostanie omówione stanowisko i metody pomiarowe, a także zostanie podany planowany program badań. Otrzymane wyniki badań w postaci przebiegów temperatur oraz stężeń gazów uzyskanych podczas dwóch testowych pożarów, jednego z zastosowaniem pianki poliuretanowej i drugiego z zastosowaniem drewna sosnowego, zostaną przeanalizowane, a następnie porównane ze sobą zarówno pod kątem występowania wartości ekstremalnych, jak i warunków ewakuacji ludzi z pomieszczenia.

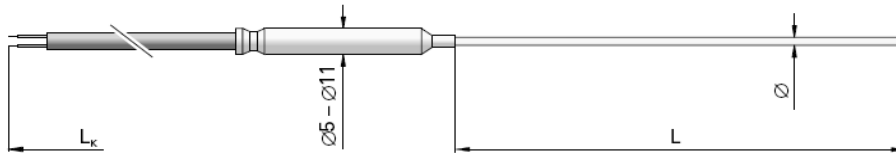
2. Stanowisko i metody pomiarowe

Pomieszczenie, w którym były prowadzone badania pożarów, znajduje się w Laboratorium Technicznych Systemów Zabezpieczeń. Ma ono następujące wymiary: długość 5 m, szerokość 5 m i wysokość 2,8 m. Widok ogólny pomieszczenia pokazano na rys. 1. Dwie ściany pomieszczenia są wykonane ze szkła o zwiększonej odporności, natomiast pozostałe są pokryte od podłogi do sufitu płytkami ceramicznymi. Pomieszczenie komunikuje się z pozostałą częścią laboratorium za pomocą jednej pary szczelnych drzwi aluminiowo-szklanych.

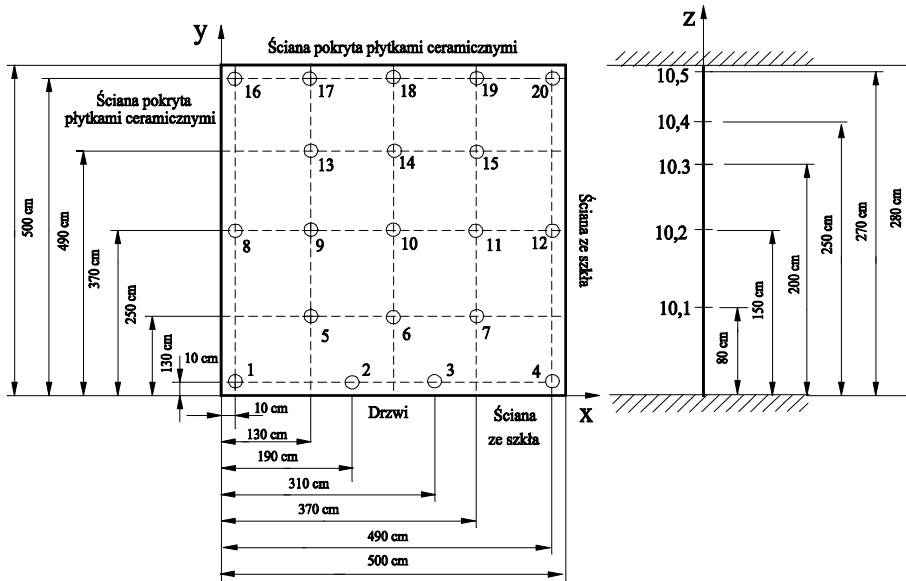


Rys. 1. Widok ogólny pomieszczenia laboratoryjnego [28]

W pomieszczeniu zamontowano 20 drzewek termopar typu K, przy czym na każdym drzewku umieszczono po 5 termopar. Na każdym drzewku zostały one zainstalowane na tych samych pięciu różnych wysokościach: 0,8 m (poziom 1), 1,5 m (poziom 2), 2,0 m (poziom 3), 2,5 m (poziom 4) i 2,7 m (poziom 5). Schemat pojedynczej termopary pokazano na rys. 2, natomiast ich rozmieszczenie w płaszczyźnie poziomej i pionowej oraz numerację na rys. 3 (przykładowo pokazano tylko drzewko numer 10). Do badań zastosowano dwa rodzaje osłon przewodów termopar. Drzewka znajdujące się w pobliżu źródła ognia mają osłonę z plecionki stalowej bardziej odporną na działanie wysokich temperatur, natomiast dalej położone posiadają osłonę wykonaną z tworzywa sztucznego (niższy koszt termopar).



Rys. 2. Schemat ogólny termopary typu K [25]



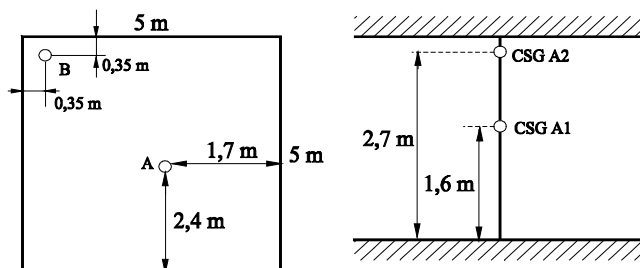
Rys. 3. Schemat rozmieszczenia termopar w pomieszczeniu [28]

Dane techniczne termopary [26]:

- a) typ TP 201K-300-15,
- b) producent: Czaki Thermo-Product, Raszyn-Rybie,
- c) termoelement płaszczy: NiCr – NiAl (K),
- d) materiał osłony: Inconel (T, J, K),
- e) średnica termopary: 0,5 mm,
- f) maksymalna temperatura pomiaru: 900 °C,
- g) długość termopary: 300 mm,
- h) długość przewodu kompensacyjnego: 1,5 m,
- i) dokładność pomiaru: 1,5 °C (-40 – 375 °C) lub 0,4% (375 – 900 °C).

Czujniki stężenia tlenu, tlenku węgla i dwutlenku węgla zamontowano na dwóch słupkach o zmiennej długości, z których jeden umieszczono w pobliżu

środku, a drugi w rogu pomieszczenia. Czujniki zamocowano do słupków na dwóch różnych wysokościach tuż pod sufitem oraz na poziomie oczu człowieka o przeciętnym wzroście. Ich rozmieszczenie oraz numerację w środku i w rogu pokazano odpowiednio na rys. 4.



Rys. 4. Schemat rozmieszczenia czujników stężeń tlenu, tlenku i dwutlenku węgla [28]

Dane techniczne czujników stężeń gazów [27]:

- typ głowicy pomiarowej: MG-72,
- producent: ALTER SA Tarnowo Podgórne,
- czas odpowiedzi T_{90} : ≤ 20 s dla tlenu i ≤ 30 s dla tlenku węgla,
- sygnał wyjściowy prądowy: 4-20 mA,
- maksymalny zakres napięcia zasilania: 5-6 V DC,
- zakres: 0-100% w przypadku O_2 i CO_2 oraz 0-500 ppm w przypadku CO,
- dokładność: 0,5%.

Widok zamontowanych czujników oraz pojedynczego czujnika stężenia gazu pokazano na rys. 5 i 6, natomiast widok pomieszczenia z zamontowanymi termoparami i czujnikami zamieszczono na rys. 7.



Rys. 5. Widok ogólny czujników stężeń tlenu, tlenku i dwutlenku węgla zamontowanych na słupkach [28]



Rys. 6. Widok ogólny czujnika stężenia gazu [26]



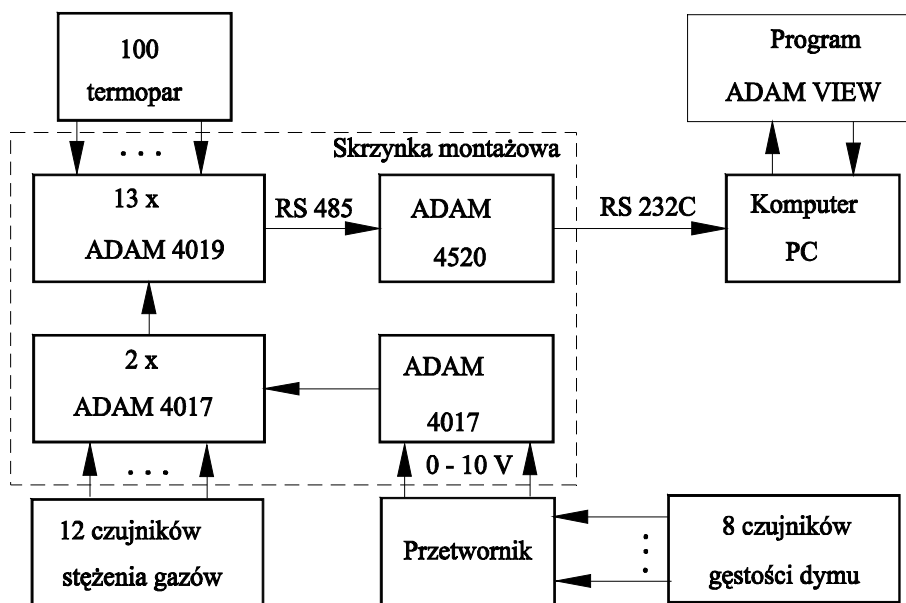
Rys. 7. Widok ogólny pomieszczenia z zamontowanymi termoparami i czujnikami [28]

Do pomiaru gęstości optycznej dymu zastosowano specjalizowane czujniki posiadające umieszczone naprzeciwko siebie w odpowiedniej odległości nadajniki i odbiorniki promieniowania podczerwonego lub ultrafioletowego. Obecność dymu powoduje odpowiednie osłabienie poziomu tego promieniowania, którego wartość po odpowiednim przetworzeniu jest zamieniana na sygnał analogowy o napięciu od 0 do 10 V. Ogólny widok tych czujników zamontowanych na specjalnym ruchomym stelażu pokazano na rys. 8.

W celu zdalnego rejestrowania na bieżąco w komputerze wartości wszystkich sygnałów pomiarowych odpowiadających wartościom temperatur (sygnały z termopar), stężeń gazów (sygnały z czujników stężeń gazów) oraz gęstości optycznej dymu (sygnały analogowe z wyjścia przetwornika) zastosowano moduły pomiarowe zawierające przetworniki analogowo-cyfrowe firmy ADVANTECH z serii ADAM. Użyto następujących typów modułów: ADAM 4019 do przetwarzania sygnałów z termopar typu K, ADAM 4017 do przetwarzania sygnałów z czujników gazów i przetwornika współpracującego z czujnikami gęstości optycznej dymu oraz ADAM 4520 do zamiany sygnału w formacie RS 485 do formatu zgodnego ze standardowym komputerowym złączem szeregowym typu RS 232. Uproszczony schemat układu przeznaczony do pomiaru temperatur, stężeń gazów i gęstości optycznej dymu pokazano na rys. 9.



Rys. 8. Widok ogólny czujników gęstości dymu zamontowanych na ruchomym stelażu [28]



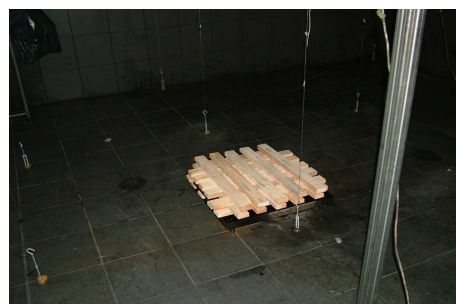
Rys. 9. Schemat układu przeznaczonego do pomiaru temperatur, stężeń gazów i gęstości optycznej dymu [28]

3. Program badań

W ramach pierwszych badań w pomieszczeniu zamkniętym nie wentylowanym przeprowadzono dwa pożary testowe. W pierwszym z nich użyto jako materiału palnego pianki poliuretanowej, natomiast w drugim z nich drewna sosnowego. Materiał palny umieszczono w środku pomieszczenia. Materiał palny układano w stos na specjalnej tacy umieszczonej w środku pomieszczenia, przy czym w pierwszym przypadku wzięto 5 arkuszy pianki o wymiarach $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ważących 835 g, co daje średnią gęstość $16,7\text{ kg/m}^3$, a w drugim wykorzystano 20 deseczek o wymiarach $600\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 26\text{ mm}$ ważących 4470 g, co daje średnią gęstość 596 kg/m^3 . Sposób ułożenia materiału palnego pokazano na rys. 10 i 11. Do zapalenia materiału palnego użyto ok. 250 ml denaturatu. Podczas pożaru rejestrowano co 7 s w komputerze następujące wielkości: temperatury w 100 różnych punktach pomieszczenia oraz stężenia tlenu, tlenku i dwutlenku węgla w czterech różnych punktach pomieszczenia. Widok palącej się pianki oraz drewna pokazano na rys. 12 i 13. Wybrane wyniki przeprowadzonych badań zaprezentowano w rozdziale 4.



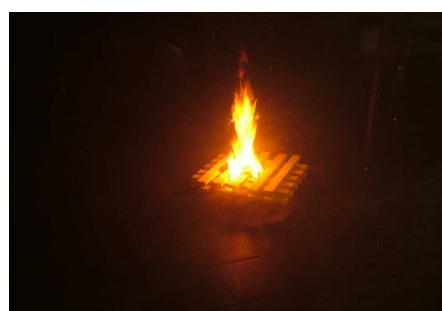
Rys. 10. Widok stosu pianki poliuretanowej w środku pomieszczenia przed podpaleniem [28]



Rys. 11. Widok stosu drewna sosnowego w środku pomieszczenia przed podpaleniem [28]



Rys. 12. Widok płonącego stosu pianki poliuretanowej w środku pomieszczenia [28]



Rys. 13. Widok płonącego stosu drewna sosnowego w środku pomieszczenia [28]

4. Analiza wyników badań

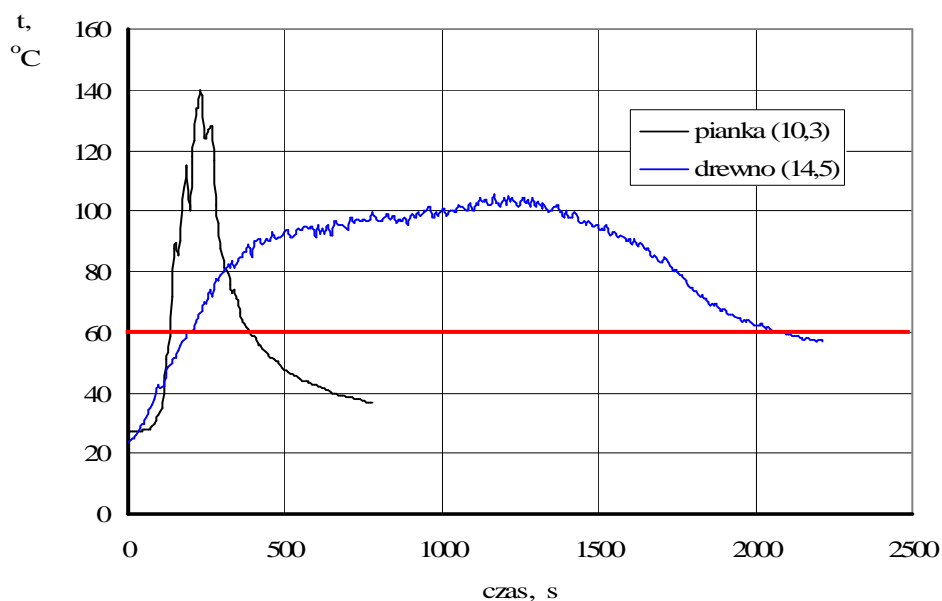
Ze względu na dużą liczbę otrzymanych wyników skupiono się na dwóch do tej pory często pomijanych zagadnieniach. Jednym z nich jest wyznaczenie położenia, w którym zarejestrowano maksymalne wartości mierzonego parametru (temperatury lub stężeń gazów) oraz charakteru ich zmian, drugim zaś wyznaczenie miejsca najbardziej krytycznego z punktu widzenia bezpieczeństwa ludzi oraz oszacowanie zmian najbardziej istotnych parametrów pożaru wzdłuż najbardziej prawdopodobnej drogi ewakuacji.

Ekstremalne przebiegi temperatury oraz stężeń tlenu i tlenku węgla podczas pożarów pianki poliuretanowej (test 1) i drewna sosnowego (test 2) pokazano na rys. 14, 15 i 16. Charakterystyki ekstremalne tych samych parametrów, ale ograniczone tylko do obszaru nie przekraczającego wysokości 2,0 m, w którym mogą przebywać ludzie (odpowiada poziomowi nr 3), przedstawiono na rys. 17 i 18. Z kolei na rys. 19, 20 i 21 pokazano przebiegi temperatur pomierzone w wybranych punktach (termopary 12,3 i 4,3 przy szklanej ścianie i 3,3 przy drzwiach) prawdopodobnej drogi ewakuacji ludzi z pomieszczenia.

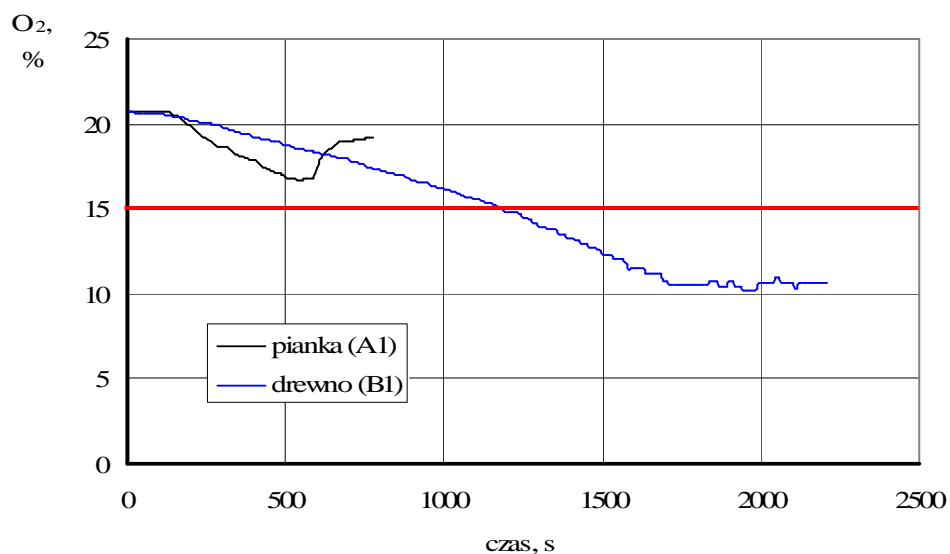
W celu porównania odpowiadających sobie przebiegów parametrów uzyskanych podczas testu 1 i 2 zdefiniowano następujące wielkości: maksymalna wartość temperatury t_{\max} w $^{\circ}\text{C}$ i stężenia tlenku węgla CO_{\max} w ppm, minimalna wartość stężenia tlenu $\text{O}_{2\min}$ w %, tempo przyrostu temperatury v_t w $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ i stężenia tlenku węgla v_{CO} w ppm/s, tempo obniżania stężenia tlenu v_{O_2} w %/s, czas odpowiadający maksymalnej temperaturze τ_t i stężeniu tlenku węgla τ_{CO} w s, czas odpowiadający minimalnemu stężeniu tlenu τ_{O_2} w s, czasy przekroczenia krytycznych wartości temperatury $\tau_{t\min}$ oraz stężeń tlenu $\tau_{\text{O}_2\min}$ i tlenku węgla $\tau_{\text{CO}\min}$ w s, czasy osiągnięcia przez temperaturę wartości „bezpiecznych” $\tau_{t\max}$, w s.

Wymienione wyżej czasy są liczone od momentu zapalenia materiału palnego. Zgodnie z [20, 21] przyjęto następujące wartości krytyczne mierzonych parametrów pożaru, których przekroczenie jest niebezpieczne dla człowieka: temperatura – 60°C , tlenek węgla – 100 ppm, tlen – 15%.

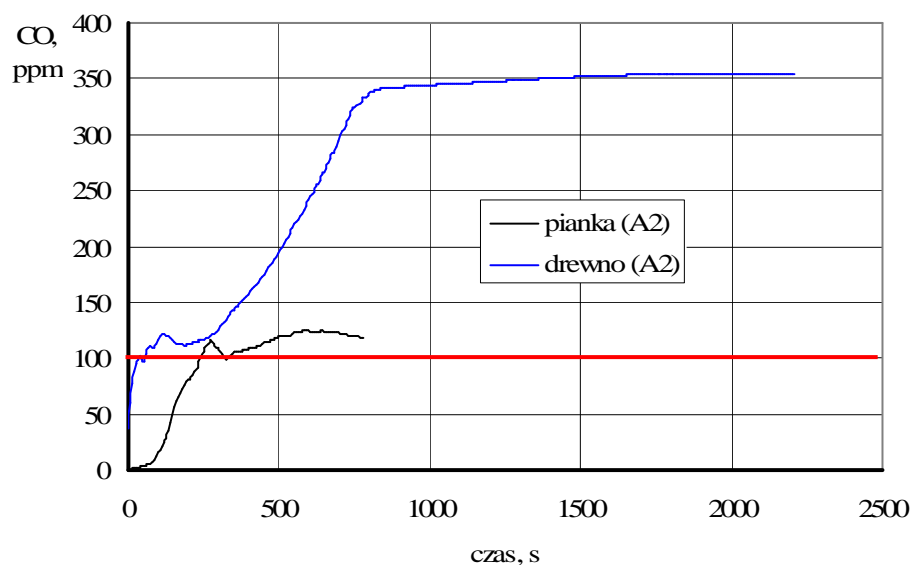
Na rysunkach wartości krytyczne zostały oznaczone poziomą czerwoną linią. W tab. 1 i 2 zestawiono wartości zdefiniowanych wyżej parametrów odpowiadające warunkom ekstremalnym w całym pomieszczeniu i w obszarze ograniczonym do wysokości 2 m podczas pożaru pianki (test 1) i drewna (test 2). W tab. 3 podano dla obydwu pożarów wartości parametrów odpowiadające przebiegom temperatur zarejestrowanych przez termopary 12,3 i 4,3 (przy ścianie) oraz 3,3 (koło drzwi) położone na najbardziej prawdopodobnej drodze ewakuacji ludzi z pomieszczenia.



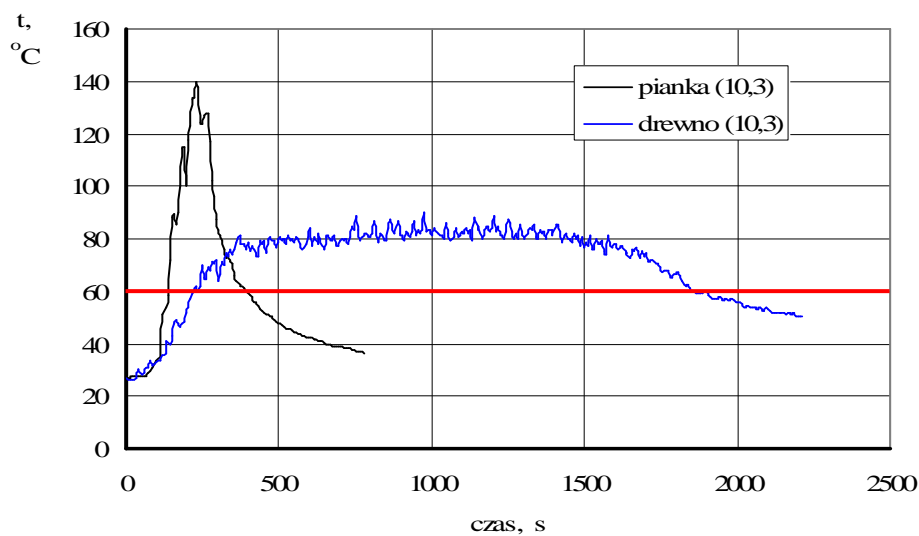
Rys. 14. Przebiegi ekstremalnych temperatur w odniesieniu do całego pomieszczenia zarejestrowane podczas pożaru pianki poliuretanowej i drewna sosnowego (w nawiasie podano numery termopar) [28]



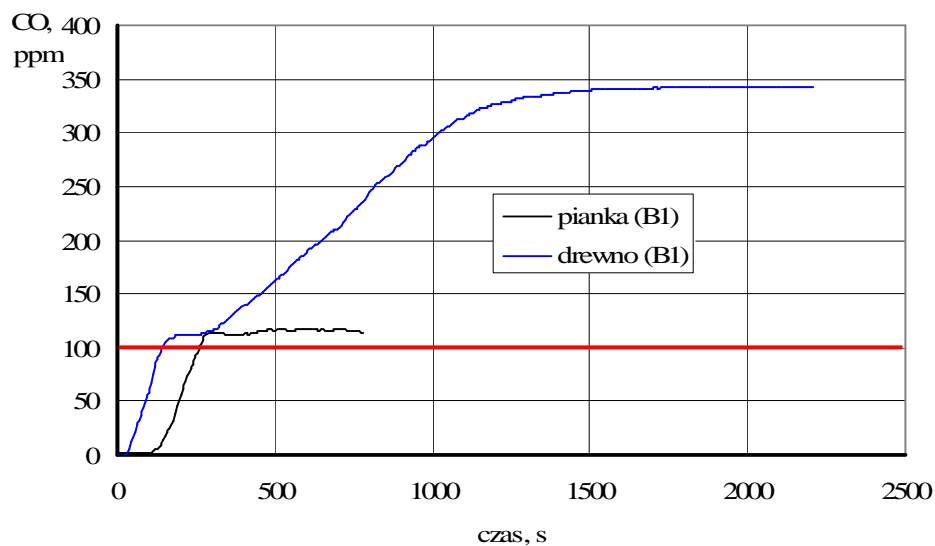
Rys. 15. Przebiegi ekstremalnych stężeń tlenu w odniesieniu do całego pomieszczenia zarejestrowane podczas pożaru pianki poliuretanowej i drewna sosnowego (w nawiasie podano numery czujek) [28]



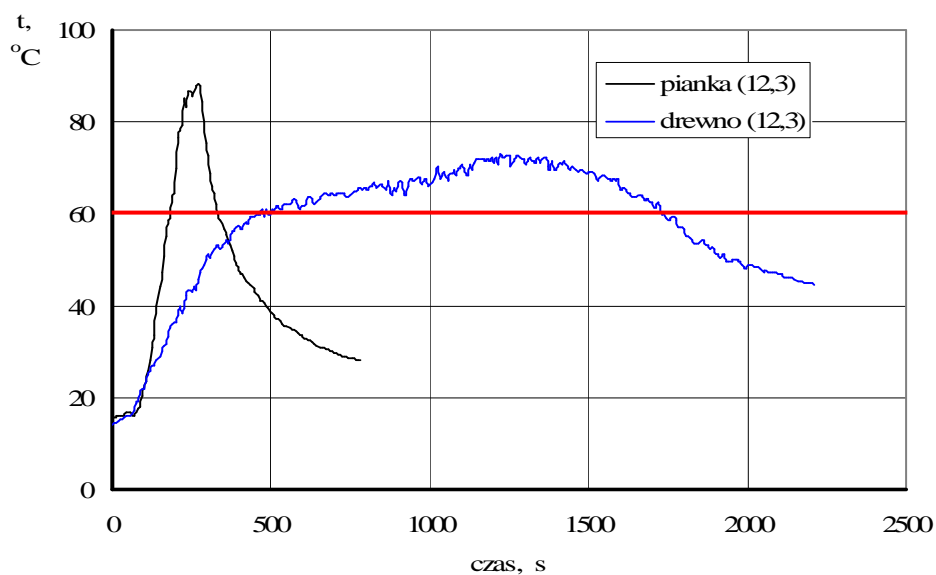
Rys. 16. Przebiegi ekstremalnych stężeń tlenku węgla w odniesieniu do całego pomieszczenia zarejestrowane podczas pożaru pianki poliuretanowej i drewna sosnowego (w nawiasie podano numery czujek) [28]



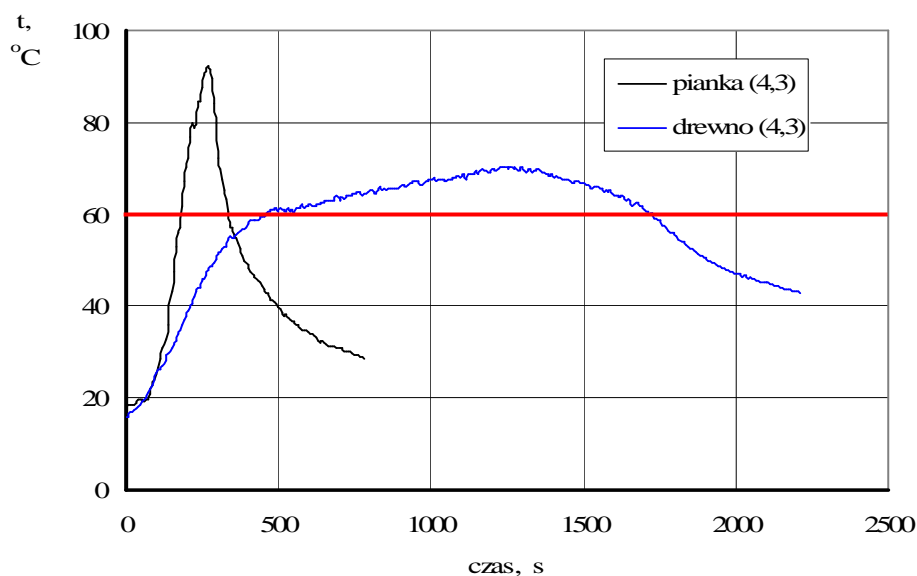
Rys. 17. Przebiegi ekstremalnych temperatur w odniesieniu do obszaru przebywania ludzi zarejestrowane podczas pożaru pianki poliuretanowej i drewna sosnowego (w nawiasie podano numery termopar) [28]



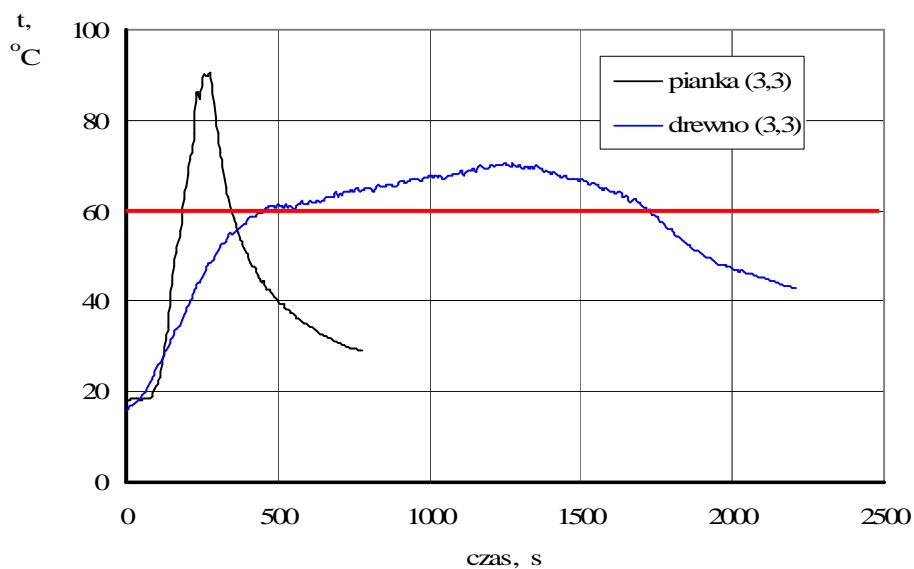
Rys. 18. Przebiegi ekstremalnych stężeń tlenku węgla w odniesieniu do obszaru przebywania ludzi zarejestrowane podczas pożaru pianki poliuretanowej i drewna sosnowego (w nawiasie podano numery czujek) [28]



Rys. 19. Przebiegi temperatur w odniesieniu do obszaru przebywania ludzi zarejestrowane podczas pożaru pianki poliuretanowej i drewna sosnowego przez termoparę 12,3 usytuowaną na prawdopodobnej drodze ewakuacji [28]



Rys. 20. Przebiegi temperatur w odniesieniu do obszaru przebywania ludzi zarejestrowane podczas pożaru pianki poliuretanowej i drewna sosnowego przez termoparę 4,3 usytuowaną na prawdopodobnej drodze ewakuacji [28]



Rys. 21. Przebiegi temperatur w odniesieniu do obszaru przebywania ludzi zarejestrowane podczas pożaru pianki poliuretanowej i drewna sosnowego przez termoparę 3,3 usytuowaną na prawdopodobnej drodze ewakuacji [28]

Tabela 1a. Wartości parametrów charakteryzujących ekstremalne przebiegi temperatury oraz stężeń tlenu i tlenku węgla zarejestrowane podczas pożarów pianki poliuretanowej i drewna sosnowego (część a) [28]

Rodzaj materiału palnego	t_{\max} °C	CO_{\max} ppm	$O_2 \min$ %	v_t °C/s	v_{CO} ppm/s	v_{O_2} %/s
pianka poliuretanowa	140	124,4	16,7	14	0,7	-0,010
drewno sosnowe	105	355	10,3	0,2	2	-0,007

Tabela 1b. Wartości parametrów czasowych charakteryzujących ekstremalne przebiegi temperatury oraz stężeń tlenu i tlenku węgla zarejestrowane podczas pożarów pianki poliuretanowej i drewna sosnowego (część b) [28]

Rodzaj materiału palnego	τ_t s	τ_{CO} s	τ_{O_2} s	$\tau_{t \min}$ s	$\tau_{CO \min}$ s	$\tau_{O_2 \min}$ s	$\tau_{t \max}$ s
pianka poliuretanowa	269	269	544	138	240	∞	390
drewno sosnowe	1209	1935	1942	187	38	1182	2070

Tabela 2a. Wartości parametrów charakteryzujących ekstremalne przebiegi temperatury oraz stężeń tlenu i tlenku węgla odnoszące się do strefy, w której mogą przebywać ludzie (poniżej wysokości 2 m), zarejestrowane podczas pożarów pianki poliuretanowej i drewna sosnowego (część a) [28]

Rodzaj materiału palnego	t_{\max} °C	CO_{\max} ppm	v_t °C/s	v_{CO} ppm/s
pianka poliuretanowa	140	117,7	14	0,62
drewno sosnowe	90	342	0,2	0,50

Tabela 2b. Wartości parametrów czasowych charakteryzujących ekstremalne przebiegi temperatury oraz stężeń tlenu i tlenku węgla odnoszące się do strefy, w której mogą przebywać ludzie (poniżej wysokości 2 m), zarejestrowane podczas pożarów pianki poliuretanowej i drewna sosnowego (część b) [28]

Rodzaj materiału palnego	τ_t s	τ_{CO} s	$\tau_{t \min}$ s	$\tau_{CO \min}$ s	$\tau_{t \max}$ s
pianka poliuretanowa	269	605	138	264	390
drewno sosnowe	974	2177	218	147	1855

Tabela 3. Wartości parametrów charakteryzujących przebiegi temperatury zarejestrowane na wysokości 2 m wzdłuż najbardziej prawdopodobnej drogi, zmierzone przez termopary 12,3; 4,3 i 3,3 podczas pożarów pianki poliuretanowej i drewna sosnowego [28]

Rodzaj materiału palnego	Nr termopary	t_{\max} °C	v_t °C/s	τ_t s	$\tau_{t \min}$ s	$\tau_{t \max}$ s
pianka poliuretanowa	12,3	88	0,47	265	186	335
	4,3	92	0,53	269	180	337
	3,3	90	0,57	255	185	345
drewno sosnowe	12,3	73	0,14	1223	465	1730
	4,3	70	0,14	1276	460	1720
	3,3	72	0,14	1176	468	1738

Na podstawie uzyskanych przebiegów temperatur oraz stężeń tlenu i tlenku węgla pokazanych na rys. 14–21 oraz wartości parametrów zebranych w tab. 1–3 sformułowano następujące wnioski:

1. Ze względu na własności materiału palnego czas trwania pożaru drewna sosnowego jest wielokrotnie dłuższy, niż czas trwania pożaru pianki poliuretanowej. Biorąc pod uwagę kryterium braku płomienia jako moment zakończenia pożaru (drewno może tlić się jeszcze dłuższy czas), przybliżony czas trwania pożaru pianki trwał około 700 s, podczas gdy czas trwania pożaru drewna był ponad trzykrotnie dłuższy i wyniósł ponad 2200 s.
2. Maksymalna wartość temperatury, jaką zarejestrowano podczas pożaru pianki poliuretanowej (128 °C) jest o ponad 20 °C wyższa od temperatury, jaką uzyskano podczas pożaru drewna sosnowego (105 °C). Średnia prędkość narastania temperatury w przypadku pianki jest znacznie większa i wynosi ok. 14 °C/s, podczas gdy w przypadku drewna jest ona równa tylko ok. 0,2 °C/s. Czas osiągnięcia maksymalnej temperatury jest znacznie dłuższy podczas pożaru drewna (1209 s) niż podczas pożaru pianki (269 s). Podczas testu 1 (pożar pianki) najwyższą temperaturę zanotowano w środku pomieszczenia na wysokości 2 m (termopara 10,3), co może być związane z bezpośrednim oddziaływaniem płomieni (dla pozostałych drzewek termopar potwierdza się reguła, że im wyżej, tym wyższa temperatura). Podczas testu 2 (pożar drewna sosnowego) najwyższą temperaturę zanotowano pod sufitem (termopara 14,5) na drzewku leżącym niedaleko, ale nie najbliższym źródła ognia (drzewko 10). Różnica pomiędzy temperaturami zmierzonymi przez termopary 14,5 i 10,5 jest jednak niewielka i nie przekracza kilku stopni, co może być spowodowane błędem pomiarowym termopary oraz nieprecyzyjnym ustawieniem źródła ognia.
3. Podczas pożaru drewna sosnowego zanotowano znacznie wyższą wartość maksymalną stężenia tlenku węgla (355 ppm) niż podczas pożaru pianki poliureta-

nowej (124,4 ppm). W obydwu przypadkach zostało ono zarejestrowane przez czujnik umieszczony pod sufitem w środku pomieszczenia (A2). Wzrost stężenia można podzielić na kilka faz. W pierwszej następuje szybki wzrost stężenia ze średnią szybkością ok. 0,7 ppm/s w przypadku pianki i 2 ppm/s w przypadku drewna (tab. 1a). Po osiągnięciu pierwszego ekstremum następuje niewielki spadek stężenia, po czym ponowny jego wzrost, tym razem znacznie wolniejszy niż na początku. Podczas pożaru drewna po czasie ok. 800 s stężenie tlenu węgla osiąga ustaloną wartość oscylującą wokół 350 ppm. Z kolei podczas pożaru pianki, po osiągnięciu wartości maksymalnej po około 269 s (tab. 1b) stężenie tlenu węgla zaczyna powoli maleć.

4. Ze względu na znacznie dłuższy czas palenia się drewna sosnowego zapotrzebowanie na tlen było wówczas znacznie większe niż podczas palenia się pianki. Spowodowało to po czasie około 1700 s obniżenie jego stężenia w powietrzu do ustalonej wartości około 10% ze średnią prędkością równą 0,007%/s (tab. 1a). Średni spadek stężenia tlenu podczas pożaru pianki był nieco większy i wyniósł około 0,01%/s. Po około 530 s stężenie tlenu osiągnęło minimum równe 16,7% (tab. 1a), po czym nastąpił jego wzrost do ustalonej wartości wynoszącej około 19% (rys. 15). Minimalne wartości stężeń tlenu zostały zarejestrowane przez czujniki umieszczone na wysokości 1,6 m. W przypadku pożaru pianki był to czujnik A1 umieszczony w środku pomieszczenia, natomiast w przypadku pożaru drewna czujnik B1 umieszczony w rogu pomieszczenia.
5. Z punktu widzenia bezpieczeństwa ludzi przebywających w pomieszczeniu istotne są czasy, po którym następuje przekroczenie założonych krytycznych wartości mierzonych parametrów: 60 °C w przypadku temperatury, 100 ppm w przypadku tlenu węgla i 15% w przypadku tlenu. W tym przypadku czas ewakuacji τ_e powinien być porównywany z najkrótszym z trzech ww. czasów, który oznaczymy przez τ_k , czyli musi być spełniony warunek $\tau_e < \tau_k$. Analizując wartości podane w tab. 1b i 2b, można stwierdzić, że w przypadku pożaru pianki najbardziej niebezpiecznym czynnikiem jest temperatura, bowiem wówczas $\tau_k = \tau_{t \min} = 138$ s. Dla porównania pozostałe czasy są równe: $\tau_{CO \min} = 264$ s i $\tau_{O_2 \min} = \infty$ s, co oznacza, że krytyczna wartość stężenia tlenu w tym przypadku nigdy nie zostanie osiągnięta. Podczas pożaru drewna sytuacja jest zupełnie inna. Teraz z kolei najbardziej niebezpiecznym czynnikiem staje się tlenek węgla, którego wartość krytyczna zostaje przekroczona już po 147 s. Jednocześnie pozostałe czasy są znacznie dłuższe i wynoszą odpowiednio 218 s w przypadku temperatury i 1182 s w przypadku stężenia tlenu. Podane wartości odnoszą się do obszaru pomiędzy podłogą a płaszczyzną poprowadzoną na wysokości 2 m (założona przestrzeń, gdzie mogą przebywać ludzie). Biorąc pod uwagę całe pomieszczenie, krytyczne stężenie tlenu węgla zostaje przekroczone już po 38 s, licząc od momentu inicjacji procesu spalania. Ochłodzenie do temperatury

60 °C po zakończeniu procesu palenia następuje po czasie 390 s w przypadku pożaru pianki i 1855 s przypadku pożaru drewna sosnowego.

6. Biorąc pod uwagę najbardziej prawdopodobną drogę ewakuacji (wzdłuż szklanej ściany do drzwi), czas ewakuacji podczas pożaru pianki może być nieco dłuższy. Z tab. 3 wynika, że najkrótszy czas osiągnięcia wartości krytycznej temperatury jest równy około 180 s. Podobnie jest w przypadku pożaru drewna sosnowego, z tym, że tam o czasie ewakuacji decyduje stężenie tlenku węgla, które nie było mierzona wzdłuż drogi ewakuacji. Można przypuszczać, że wskutek braku wentylacji transport produktów spalania był raczej równomierny, a więc wartości tego stężenia były porównywalne do zmierzonych w innym miejscu na tej samej wysokości (w badanym przypadku było to 1,6 m).

5. Podsumowanie i wnioski

Zaprezentowane badania pożarów w pełnej skali w wyznaczonym do tego celu pomieszczeniu są wynikiem pierwszych prac, jakie będą prowadzone w ciągu kilku najbliższych lat w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. Ich głównym celem, jak już wcześniej wspomniano, była walidacja komputerowych modeli pożarów, które powstały i nadal są rozwijane (model strefowy), a także tych, które są w trakcie opracowywania (model hybrydowy). Na podstawie zaprezentowanej w niniejszym artykule ogólnej idei planowanych badań, można stwierdzić, że posiadają one charakter uniwersalny i obejmują bardzo szeroki wachlarz zagadnień związanych dynamiką pożarów wewnętrznych w zamkniętych pomieszczeniach z ewentualnym uwzględnieniem wentylacji wymuszonej i procesu gaszenia za pomocą tryskaczy i dysz mgłowych. wpływu rodzaju materiału palnego i jego usytuowania na przebieg stężeń tlenu, oraz tlenku i dwutlenku węgla w badanych punktach pomieszczenia.

Uzyskane wyniki pierwszych testów obejmujących pożar z użyciem pianki poliuretanowej i drewna sosnowego jako materiałów palnych usytuowanych w środku pomieszczenia pokazały, że pomimo niewielkiej mocy cieplnej pożaru, praktycznie we wszystkich badanych przypadkach zostały przekroczone przyjęte za krytyczne dla człowieka wartości temperatury i stężenia tlenku węgla. Czas ewakuacji zarówno dla pianki, jak i drewna nie powinien przekraczać 140 s (nieco ponad 2 min), przy czym w przypadku pianki decydującym czynnikiem jest temperatura, natomiast jeżeli chodzi o drewno, to jest nim stężenie tlenku węgla.

Uzyskane wartości maksymalne temperatur ze względu na niezbyt dużą moc cieplną źródła ognia i wielkość pomieszczenia nie były wysokie i nie przekroczyły 140 °C w przypadku pianki i 105 °C w przypadku drewna.

W kolejnych pracach z tego zakresu planowane jest:

- a) badanie nierównomierności rozkładu temperatur w punktach pomieszczenia położonych na tych samych wysokościach,
- b) badanie rozkładów pionowych temperatur w różnych punktach pomieszczenia,

- c) porównanie otrzymanych rozkładów temperatury z założeniami przyjmowanymi dla strefowych modeli pożarów,
- d) badanie wpływu przepływów podsufitowych i ściennych na przebiegi temperatur zmierzone przez termopary umieszczone w pobliżu ścian i sufitu (poziom 5),
- e) badanie rozkładów temperatur, stężeń gazów i zadymienia podczas pożarów wentylowanych zadaną stałą wydajnością strumienia powietrza,
- f) badanie rozkładów temperatur, stężeń gazów i zadymienia podczas pożarów z uwzględnieniem gaszenia za pomocą tryskaczy lub systemów mgłowych.

S U M M A R Y

Jerzy GAŁAJ

COMPARATIVE ANALYSIS OF OXYGEN, KARBON MONOXIDE CONCENTRATIONS AND TEMPERATURE CHANGES IN UNVENTILATED COMPARTMENT DURING POLYURETHANE FOAM AND PINWOOD FIRE

The general idea of fire investigation in full-scale in unventilated compartment was presented. It contains the main goals of investigations, measuring system description and schedule of the fire tests. A polyurethane foam (PUF) and pine wood (PW) were used as flammable materials located in the centre of the compartment. The changes in temperature, oxygen and carbon monoxide concentrations during the fire with PUF and PW were compared. The various possibilities concerned with intended researches were mentioned especially with reference to validation of existing and future fire models.

PIŚMIENNICTWO

1. Babrauskas V.: Upholstered Furniture Room Fires-Measurements, Comparison with Furniture Calorimeter Data and Flashover Prediction. *Journal of Fire Sciences* 1984, Nr 4, s. 5–19.
2. Chow W.K., Yin R.: Discussion on Two Plume Formulae with Computational Fluid Dynamics. *Journal of Fire Sciences* 2002, Nr 20, s. 179–201.
3. Coles A., Wolski A., Lautenberg C.: Using Fire Dynamics Simulator for Flame Spread and Fire Growth Modeling. Proceedings of International Conference INTERFLAM 2007, London, 2007, s. 1479–1484.
4. Cooper L.Y., Harkleroad M., Quintiere J.G., Rinkinen W.J.: An Experimental Study of Upper Hot Layer Stratification in Full-Scale Multiroom Fire Scenarios, *Journal of Heat Transfer* 1982, Nr 104, s. 741.

5. Dembsey N.A., Pagni P.J., Williamson R.B.: Compartment Fire Experiments: Comparison With Models. *Fire Safety Journal* 1995, vol. 25, Nr 3, s. 187.
6. Duong D.Q.: The Accuracy of Computer Fire Models: Some Comparisons with Experimental Data from Australia. *Fire Safety Journal* 1990, Nr 16, s. 415.
7. Ferraris S., Wen J., Hume B., Fay J., Bosley K.: Computer Modelling of Basement Fires. Proceedings of International Conference INTERFLAM 2007, London 2007, s. 517–529.
8. Hamins A., Maranghides A., McGrattan K.B., Anleitner R.: Experiments to Validate Models of Fire Growth and Spread for use in the World Trade Center Investigation. NIST Special Publication 1000-10E, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, September 2004.
9. Haynes G., Morris M.: Investigation of a Multiple Fatality Dormitory Fire at Seton Hall University. Proceedings of International Conference INTERFLAM 2007, London 2007, s. 1205–1217.
10. He Y., Beck V.: Smoke Spread Experiment in a Multi-Storey Building and Computer Modeling. *Fire Safety Journal* 1997, vol. 28, nr 2, s. 139.
11. Heskestad G., Hill J.P.: Propagation of Fire and Smoke in a Corridor, Proceedings of the 1987 ASME: JSME Thermal Engineering Joint Conference, Honolulu 1987, HI, s. 371–379.
12. Kim E., Dembsey N.A.: A Study of Fire Dynamics Simulator version 4.0 for Tunnel Fire Scenarios with Forced Longitudinal Ventilation. Proceedings of International Conference INTERFLAM 2007, London 2007, s. 503–516.
13. Konecki M.: Wpływ szybkości wydzielania ciepła i emisji dymu na rozwój pożaru w układzie pomieszczeń. Rozprawa habilitacyjna. Wydawnictwo SGSP, Warszawa 2007.
14. Luo M., He Y., Beck V.: Comparison of Existing Fire Model Predictions with Experimental Results from Real Fire Scenarios. *Journal of Applied Fire Science* 1996/1997, vol. 6, nr 4, s. 357.
15. Mahalingam A., Jia F., Patel M.K., Galea E.R.: Modelling Generation and Transport of Toxic Combustion Products in Enclosure Fires Using Bench-scale Test Data. Proceedings of International Conference INTERFLAM 2007, London 2007, s. 1631–1636.
16. Novozhilov V.: Computational fluid dynamics modeling of compartment fires. *Progress in Energy and Combustion Science* 2001, nr 27, s. 611–666.
17. Peacock R.D., Jones W.W., Bukowski R.W.: Verification of a Model of Fire and Smoke Transport. *Fire Safety Journal* 1993, nr 21, s. 89–129.
18. Persson H., Blomqvist P.: Fire and Fire Extinguishment in Silos. Proceedings of International Conference INTERFLAM 2007, London 2007, s. 365–377.
19. Pitts W.M., Braun E., Peacock R.D., Mitler H.E., Johnsson E.L., Reneke P.A., Blevins L.G.: Temperature Uncertainties for Bare-Bead and Aspirated

- Thermocouple Measurements in Fire Environments. Proceedings of Thermal Measurements: The Foundation of Fire Standards. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 2001, 1427.
20. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 roku w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dz. U. 2002, Nr 217, poz. 1833.
 21. Sawicki T.: Czynniki zagrażające bezpieczeństwu strażaków w warunkach pożaru. *Bezpieczeństwo Pracy* 2004, nr 7-8, s. 35-38.
 22. Schneider V.: Mathematical and Physical Modelling of Smoke Spread in Atria-type Experimental Set-ups. Proceedings of International Conference INTERFLAM 2007, London 2007, s. 541–551.
 23. Tewarson A., Khan M.: Carbon Monoxide and Smoke Emissions in Fires. Proceedings of International Conference INTERFLAM 2007, London 2007, s. 1059–1069.
 24. Wang Z., Jia F., Galea E.R., Patel M.P.: Predicting Toxic Species Concentrations in a Full-Scale Vitiated Fire. Proceedings of International Conference INTERFLAM 2007, London 2007, s. 1047–1058.
 25. Zehfuss J., Hosser D.: A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. *Fire Safety Journal* 2007, vol. 42, nr 2, s. 115–126.
 26. <http://www.czaki.pl>, 03.02.2008.
 27. <http://www.altersa.pl>, 10.05.2008.
 28. Źródło własne.