

Andrzej Kolbrecki*

O DYMOTWÓRCZOŚCI WYROBÓW BUDOWLANYCH W CZASIE POŻARU

W artykule przedstawiono zależności pomiędzy ilością, wielkością cząstek dymu, właściwościami optycznymi dymu (osłabianie światła) a warunkami spalania różnych materiałów. Podano również parametry do klasyfikacji materiałów ze względu na właściwości dymotwórcze. Przedstawiono wpływ dymu na widzialność (ograniczenie możliwości ewakuacji) i wykrywanie pożaru (stosowanie czujek pożarowych).

1. Wstęp

Pożar oddziałuje na środowisko budynku powodując zmiany [1]:

- warunków termicznych,
- ciśnienia,
- składu chemicznego atmosfery (toksyczność),
- zakresu widzialności.

Wartości tych oddziaływań mają wpływ na stan bezpieczeństwa pożarowego rozumianego jako możliwość ewakuacji na zewnątrz lub do części bezpiecznej budynku i charakteryzowanego poprzez:

- stan wyłączenia konstrukcji,
- stan środowiska z uwagi na fizjologiczne oddziaływanie na użytkownika.

Stan środowiska z uwagi na oddziaływanie na użytkowników jest określony przez temperaturę, natężenie promieniowania, stężenie produktów toksycznych, zasięg widzialności (stopień zadymienia).

Temperatura około 120°C powoduje oparzenia I stopnia po około 8 min, temperatura powyżej 200°C – po około 2–3 min. Promieniowanie o natężeniu około 3,5 kW/m² może być tolerowane przez człowieka w ciągu 60 s. Przez dłuższy czas człowiek znosi promieniowanie cieplne o natężeniu około 2 kW/m².

Stany krytyczne ze względu na stężenie produktów toksycznych i ograniczenie zasięgu widzialności są związane z dymem.

* dr inż. – adiunkt w ITB

Dym składa się z dwóch podstawowych części składowych:

- niewidzialnej fazy gazowej odpowiedzialnej za toksyczność środowiska pożaru (zagadnienia te zostaną omówione w następnym artykule) oraz
- widzialnej fazy składającej się z cząstek stałych i ciekłych, odpowiedzialnej za ograniczenie zasięgu widzialności (zagadnienia omówione w niniejszym artykule).

2. Właściwości dymotwórcze materiałów

Emisja cząstek stałych, tak jak emisja cząstek gazowych, jest zależna od natury chemicznej związku chemicznego (wyrobu budowlanego) i warunków spalania. Przewidywanie ilości i rozkładu wymiarów cząstek stałych i ciekłych powstałych podczas spalania jest bardzo trudne. Jedyną drogą poznania pozostają badania ogniowe i obserwacje pożarów rzeczywistych. Na podstawie badań stwierdzono następujące fakty:

- Polimery aromatyczne, np. polistyren, wydzielają więcej dymu niż polimery alifatyczne z pojedynczymi wiązaniami, np. polipropylen, polietylen.
- W warunkach płomieniowych (spalanie zapoczątkowane od płomienia pilotowego, płomień utrzymuje się na próbce podczas badania) cząstki mają mniejsze wymiary niż przy spalaniu bezpłomieniowym i składają się przede wszystkim z węgla (sadzy). W spalaniu bezpłomieniowym (pirolizie i tleniu) w cząstkach dymu mogą się znajdować cząsteczki monomeru, produkty częściowego utlenienia, kawałki łańcucha polimerowego.
- Cząstki ciekłe nadają dymowi białawe zabarwienie.

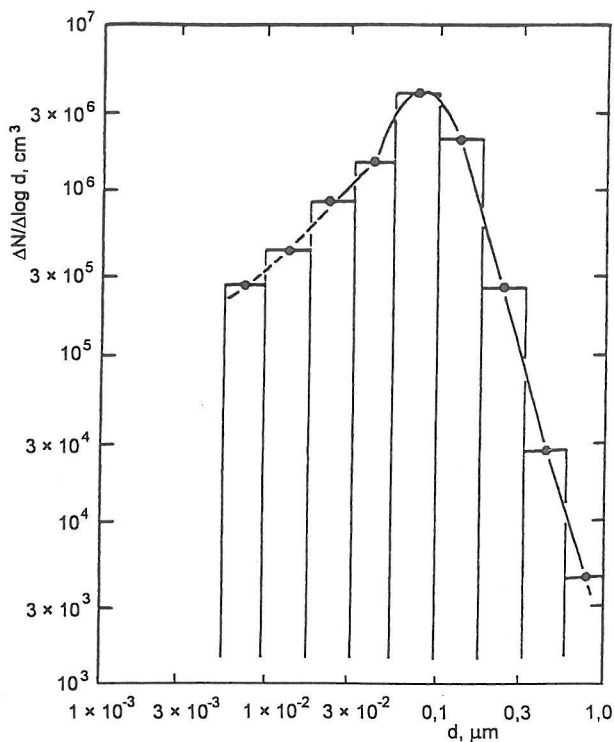
W tabelicy 1 [2] przedstawiono zależność masy powstających cząstek ciekłych i stałych (wyrażonej jako stosunek masy tych cząstek do masy materiału spalanego, ϵ od rodzaju materiału i warunków spalania. Materiały podane w tabelicy często wchodzi w skład wyrobów budowlanych.

Tabela 1. Zależność masy powstających cząstek ciekłych i stałych od rodzaju materiału i warunków spalania

Lp.	Materiał	ϵ	Warunki spalania
1	Sosna	0,03 – 0,17	piroliza
2	Sosna	0,01 – 0,025	spalanie płomieniowe
3	Płyta pilśniowa twarda	0,0004 – 0,001	spalanie płomieniowe
4	Płyta wiórowa	0,005 – 0,01	spalanie płomieniowe
5	PVC	0,03 – 0,12	piroliza
6	PVC	0,12	spalanie płomieniowe
7	Pianka PU elastyczna	0,07 – 0,15	piroliza
8	Pianka PU elastyczna	0,01 – 0,035	spalanie płomieniowe
9	Pianka PU sztywna	0,06 – 0,19	piroliza

Lp.	Materiał	ϵ	Warunki spalania
10	Pianka PU sztywna	0,09	spalanie płomieniowe
11	Polistyren	0,17 (w tlenie 30%)	spalanie płomieniowe
12	Polistyren	0,15 (w tlenie 23%)	spalanie płomieniowe
13	Polipropylen	0,12	piroliza
14	Polipropylen	0,016	spalanie płomieniowe
15	Polipropylen	0,08 (w tlenie 23%)	spalanie płomieniowe
16	Polimetakrylan metylu	0,02 (w tlenie 23%)	spalanie płomieniowe
17	Polioksymetylen	około 0	spalanie płomieniowe
18	Izolacja celulozowa	0,01 – 0,12	tlenie

Reasumując, wielkość cząstek dymu może się zawierać między 10–3 mm i 1 mm i zależy od składu wyrobu oraz warunków spalania. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowo wykres rozkładu wymiarów cząstek dymu powstałego podczas tlenia materiału celulozowego [2].



Rys. 1. Wykres rozkładu wymiarów cząstek dymu powstałego podczas tlenia materiału celulozowego

Podane powyżej charakterystyki dymu, tj. masa dymu powstająca z jednostki masy i rozkład wielkości cząstek, mają decydujący wpływ na pogorszenie widzialności w warunkach pożaru ale z drugiej strony również na wykrycie pożaru.

3. Właściwości dymu wykorzystywane w ochronie przeciwpożarowej

3.1. Pochłanianie światła

Światło przechodzące przez aerozol dymowy podlega osłabieniu na skutek rozpraszania, pochłaniania i odbicia. Zjawisko to wykorzystuje się do pomiarów różnicujących materiały i wyroby budowlane w celu wyboru materiałów mniej dymotwórczych (lub odrzucenia materiałów bardziej dymotwórczych). Ma ono również wpływ na ograniczenie widzialności w dymie (ograniczenie możliwości ewakuacji) i detekcję dymu (z czym związana jest detekcja pożaru).

Oslabienie natężenia światła przechodzącego przez warstwę dymu można opisać za pomocą równania Bougera-Lamberta-Beera:

$$I = I_0 \exp(-a l)$$

gdzie: I_0 – natężenie światła padającego na warstwę aerozolu,
 I – natężenie światła po przejściu przez warstwę aerozolu,
 l – grubość warstwy,
 a – współczynnik osłabienia;

lub po przekształceniu:

$$\log \frac{I_0}{I} = 0.434 a l$$

Do oceny właściwości dymotwórczych materiałów stosuje się następujące parametry tego równania (bezpośrednie lub po przekształceniach):

- gęstość optyczna dymu, D , czyli $\log \frac{I_0}{I}$,
- gęstość optyczna właściwa, $D_s = \frac{D V}{(A l)}$ – wielkość niezależna od geometrii próbki,
gdzie: V – objętość komory kumulującej dym,
 A – powierzchnia próbki,
 l – grubość warstwy dymu,
- wartość maksymalna gęstości optycznej właściwej oznaczana jako D_{SM} (wartość D_s zmienia się podczas badania: wzrasta do osiągnięcia maksimum, a potem zmniejsza się),
- masowa gęstość optyczna, $MOD = D_s \frac{A}{m} = \frac{V}{(ml)} D$, gdzie m – masa próbki; jest to również wielkość stosowana do oceny i różnicowania materiałów, najmniej zależna od parametrów próbki i układu badawczego.

W tabelicy 2 przedstawiono wartości maksymalnej optycznej gęstości właściwej D_{SM} i masowej gęstości optycznej MOD dla różnych materiałów i warunków spalania [2].

Tablica 2. Wartości maksymalnej optycznej gęstości właściwej D_{SM} i masowej gęstości optycznej MOD dla różnych materiałów i warunków spalania

Lp.	Materiał	D_{SM}	MOD	Warunki spalania
1	Płyta pilśniowa twarda	67		spalanie płomieniowe
2	Płyta pilśniowa twarda	600		piroliza
3	Sklejka	110		spalanie płomieniowe
4	Sklejka	290		piroliza
5	Polistyren	660		spalanie płomieniowe
6	Polistyren	370		piroliza
7	PVC	660		spalanie płomieniowe
8	PVC	300		piroliza
9	Pianka PU	20		spalanie płomieniowe
10	Pianka PU	16		piroliza
11	Wykładzina poliamidowa	270		spalanie płomieniowe
12	Wykładzina poliamidowa	320		piroliza
13	Włókno akrylowe	110		spalanie płomieniowe
14	Włókno akrylowe	160		piroliza
15	Sklejka	530	0,29	piroliza
16	Polimetakrylan etylu	720	0,15	piroliza
17	PVC	180	0,12	piroliza
18	PVC plastyfikowany	350	0,64	piroliza
19	Neopren	880	0,55	piroliza
20	Sosna	620	0,28	piroliza
21	Polipropylen	400	0,53	spalanie płomieniowe
22	Polietylen	290	0,29	spalanie płomieniowe – 1*
23	Parafina	230	0,23	spalanie płomieniowe – 1
24	Polistyren		1,40	spalanie płomieniowe – 1
25	PVC		0,96	spalanie płomieniowe – 1

c.d. tablicy 2

Lp.	Materiał	D_{SM}	MOD	Warunki spalania
26	Polioksymetylen		0,34	spalanie płomieniowe – 1
27	PU (7A)	210		spalanie płomieniowe – 1
28	PU (7A)	150		spalanie płomieniowe
29	Wełna	220		spalanie płomieniowe
30	PU (MO1)		0,22	spalanie płomieniowe – 1
31	Bawełna (MO3)		0,12	spalanie płomieniowe – 1
32	Lateks (MO4)		0,65	spalanie płomieniowe – 1
33	Neopren (MO4)		0,40	spalanie płomieniowe – 1
34	Polistyren (7)		0,79	spalanie płomieniowe – 1
35	Polistyren spieniony (16)		0,79	spalanie płomieniowe – 1
36	ABS (18)		0,52	spalanie płomieniowe – 1
* 1 – próbka pozioma				

3.2. Widzialność w dymie

Widzialność w dymie, na przykład znaków ewakuacyjnych, wyjść, okien itp., ma istotne znaczenie w przypadku ewakuacji. Widzialność polega na odróżnianiu obiektu od otaczającego tła na zasadzie kontrastu. W przypadku obiektów izolowanych kontrast C może być zdefiniowany jako:

$$C = \frac{B}{B_0} - 1$$

gdzie: B – luminancja (natężenie światła) obiektu,
 B_0 – luminancja tła.

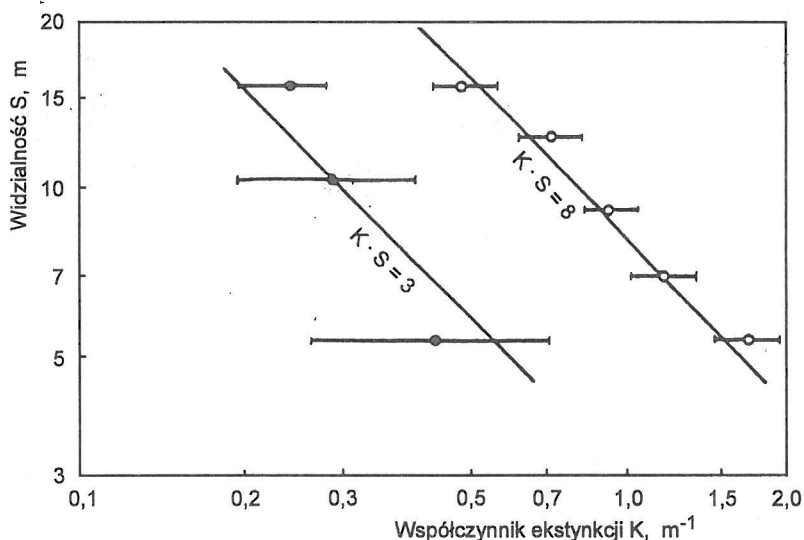
W warunkach światła naturalnego przyjmuje się, że wartością graniczną kontrastu jest $-0,02$.

Ilościowo widzialność obiektu S to taka od niego odległość, by kontrast zmniejszył się do $-0,02$. Widzialność zależy od wielu parametrów, takich jak właściwości optyczne dymu (współczynnik pochłaniania światła), oświetlenie pomieszczenia, od tego czy znak jest emisyjny (emitujący światło własne, np. znaki podświetlane) czy refleksyjny (odbijający światło), od długości fali światła emitowanego czy odbijanego. Ponadto zależy od zdolności osobniczych, a także od dostosowania się oka do widzenia w dymie (w szczególności, gdy występują w nim produkty drażniące).

Na rysunku 2 przedstawiono zależność między widzialnością znaków emisyjnych ($KS = 8$) i refleksyjnych ($KS = 3$) a współczynnikiem ekstynkcji światła, $K = D/m \cdot 2,3$. Jak widać,

widzialność znaków emisyjnych jest od dwóch do trzech razy większa od widzialności znaków refleksyjnych przy tych samych wartościach współczynnika ekstynkcji.

Ograniczenie widzialności przez dym może być także przedstawiane w jednostkach optycznej gęstości na jednostkę długości (D/m); przyjmuje się, że ewakuacja może nastąpić, jeśli ten współczynnik wynosi $0,15/m$ w przypadku dróg ewakuacyjnych nierzalnych i $0,5/m$, jeżeli drogi są znane ewakuowanym [3].



Rys. 2. Zależność między widzialnością znaków emisyjnych i refleksyjnych a współczynnikiem ekstynkcji światła

3.3. Wykrywanie pożaru

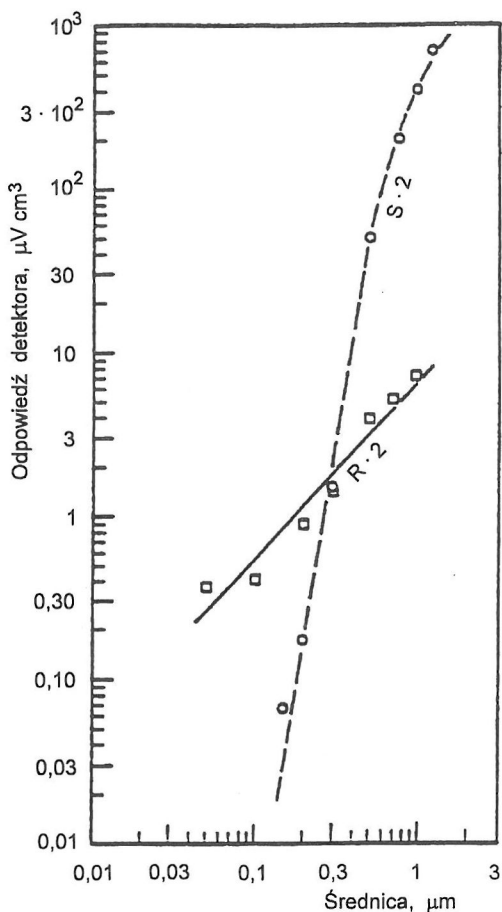
Do wykrywania pożaru (z wykorzystaniem właściwości dymu) służą czujki dymowe optyczne (wykorzystujące zjawisko osłabiania światła przez dym) i jonowe (wykorzystujące obecność jonów w dymie jako nośniki prądu). W obydwóch przypadkach właściwości dymu (optyczne lub „jonowe”) są przekształcane na sygnał elektryczny. Sygnał ten jest proporcjonalny do:

- wielkości cząstek,
- ilości cząstek,
- właściwości samego detektora.

Ad a. Na rysunku 3 przedstawiono zależność między sygnałem elektrycznym czujek optycznych (S-2) i jonowych (R-2) a wielkością cząstek. Jak widać, czujki jonowe są czulsze (generują sygnał elektryczny o większej wartości) wobec małych cząstek (poniżej $0,3 \mu m$), zaś czujki optyczne w przypadku cząstek o większych wymiarach (największą czułość wykazują wobec cząstek o wielkości zbliżonej do długości fali stosowanego światła).

Ad b. Sygnał elektryczny czujek jonowych jest proporcjonalny do ilości tych cząstek. Jeśli chodzi o czujki optyczne, zależność powyższa występuje w przypadku cząstek większych niż $0,3 \mu\text{m}$.

Ad c. Próg czułości czujek dymowych przyjmuje się w zależności od współczynnika pochłaniania światła w dymie, wyrażanego jako gęstość optyczna na jednostkę długości. Wartość ta powinna wynosić 0,06 dla dymu szarego i 0,14 dla dymu czarnego.



Jak z powyższego wynika, możliwości wykrycia pożaru zależą od właściwego stosowania czujek – optymalnie jest ich łączne stosowanie. Jak widać z rysunku 3, czujki jonowe lepiej wykrywają dym o małych cząstkach (ze spalania drewna, papieru i materiałów celulozowych), zaś czujki optyczne są właściwsze do wykrywania dymu o większych wymiarach cząstek (dymu pochodzącego ze spalania tworzyw i produktów petrochemicznych).

Rys. 3. Zależność między sygnałem elektrycznym czujek optycznych (S-2) i jonowych (R-2) a wielkością cząstek

4. Właściwości toksyczne dymu

W fazie gazowej znajdują się gazy narkotyczne, podczas gdy produkty drażniące mogą najdłować się w obydwu fazach. Mogą to być cząsteczki gazowe, stałe (również cząstki

gazowe i ciekłe zaokludowane na cząstkach stałych). Z punktu widzenia działania toksycznego istotna jest wielkość cząstek, od tego zależy bowiem głębokość wnikania do układu oddechowego. Cząstki o wielkości poniżej 5 mikronów mogą wnikać aż do płuc, podczas gdy cząstki większe zatrzymują się w górnych częściach układu oddechowego. Produkty rozkładu bezpłomieniowego zawierają cząstki o małych wymiarach (około 1 mikrometra) i łatwo przedostają się do układu oddechowego. Dym ze spalania płomieniowego zawiera cząstki o większych wymiarach – w dużych stężeniach mogą się tworzyć aglomeraty zatykające układ oddechowy. Istotne znaczenie ma również duża pojemność cieplna tych cząstek, co powoduje poparzenia w płucach.

5. Metody badania dymotwórczości materiałów

Jeśli próbkę badanego materiału umieści się w zamkniętej przestrzeni (w komorze), a następnie będzie się prowadziło jej rozkład termiczny (termoutleniający i spalanie), wówczas w komorze będą się gromadziły produkty rozkładu i spalania, a przechodzące przez nią światło będzie ulegało osłabieniu. Najprościej rzecz ujmując, jest to podstawowa zasada pomiaru właściwości dymotwórczych materiałów, które następnie służą do oceny tychże materiałów.

Metody badawcze można różnicować na podstawie:

- źródła ciepła do rozkładu; najczęściej stosuje się promienniki ciepłe, ale także palniki czy piece węgłowe,
- parametrów mierzonych do klasyfikacji; gęstość optyczna dymu w różnych odmiannach, ale także parametry kontrastu umożliwiające określenie widzialności (znak „Exit” czy paski białe i czarne),
- badania w warunkach bezpłomieniowych lub płomieniowych (najprościej przez wprowadzenie palnika pilotowego),
- stosowania komór statycznych i dynamicznych (z wymuszonym przepływem powietrza),
- parametrów mierzonych w celu określenia mechanizmu dymotwórczości: wpływ dostępu utleniacza (różne przepływy powietrza, badanie w atmosferze wzbogaconej lub zubożonej w tlen), określanie możliwości sedimentacji, wydzielania lotnych produktów rozkładu i spalania, rejestracja strat masy.

Dotychczas nie opracowano w Unii Europejskiej metody badania dymotwórczości materiałów w skali laboratoryjnej (komorowej).

Badania dymotwórczości materiałów prowadzi się w Polsce zgodnie z PN-89/B-02856 [4].

Do oceny właściwości dymotwórczych materiału służą następujące wielkości:

- współczynnik osłabienia kontrastu Y_m określający odwrotność zasięgu widzialności przez warstwę dymu o grubości 1 m, wytwarzanego w objętości 1 m³ w czasie rozkładu termicznego i spalania 1 kg materiału,
- maksymalna szybkość zmian współczynnika osłabienia kontrastu Y_m określająca maksymalny przyrost wartości współczynnika osłabienia kontrastu w jednostce czasu.

Kryteria klasyfikacji materiałów pod względem dymotwórczości podano w tablicy 3.

Tablica 3. Kryteria klasyfikacji materiałów pod względem dymotwórczości

Maksymalna szybkość zmian współczynnika osłabienia kontrastu Y_m $m^2/kg \cdot s$	Współczynnik osłabienia kontrastu Y_m m^2/kg	Właściwości dymotwórcze materiałów
$20 < Y_m$	$1400 < Y_m$	materiały intensywnie dymiące (BD)
$7 < Y_m \leq 20$	$800 < Y_m \leq 1400$	materiały o średniej intensywności dymienia (D)
$Y_m \leq 7$	$Y_m \leq 800$	materiały o małej intensywności dymienia, materiały łzawiące (UD)

W pracach badawczych oprócz metod laboratoryjnych stosowane są metody, które ze względu na gabaryty badanych elementów lub charakter pomieszczeń należy zaliczyć do badań w skali naturalnej lub zbliżonej do naturalnej. Najbardziej znaną metodą w tej skali jest metoda Room Corner [5] (wprowadzona również jako europejska metoda – odniesienia do metody SBI). W metodzie tej badanie dymu przeprowadza się w kanale wylotowym. Przez pomiary optyczne mierzy się dwie zmienne:

- całkowite wydzielanie dymu, P , otrzymywane przez całkowanie, z uwzględnieniem przepływu masowego w kanale,
- wydzielanie masowe otrzymywane przez podzielenie całkowitego wydzielania dymu przez ubytek masy.

Należy podkreślić, że badania w skali pełnej są bardziej zbliżone do pożaru rzeczywistego (umożliwiają aranżację wnętrza i badanie zjawisk w pełnej skali – sedymentacja i rozwarstwienie dymu), są jednak drogie i dają wyniki trudne do interpretacji.

Literatura i dokumenty

- [1] Kosiorek M.: Oddziaływanie pożaru na budynek, Konferencja nauk.-techn. „Awarie budowlane”, Szczecin – Międzyzdroje, 19–22 maja 1999
- [2] Mulholland G.W.: Smoke production and properties in Fire protection Engineering, 2nd Edition, 1995
- [3] Purser D.A.: Toxicity assessment of combustion products, in SFPE Handbook Fire Protection Engineering, 1995
- [4] PN-89/B-02856 Ochrona przeciwpożarowa budynków. Metoda badania właściwości dymotwórczych materiałów
- [5] PN-ISO 9705 Ochrona przeciwpożarowa. Badania ogniowe. Badanie wyrobów powierzchniowych w pomieszczeniu pełnej skali

Praca wpłynęła do Redakcji 20 VII 2000