

dr hab. inż. Jadwiga Fangrat, prof. ITB¹⁾*)

ORCID: 0000-0002-7871-0032

dr inż. Bartłomiej Papis¹⁾

ORCID: 0000-0002-8711-905X

Building products heat of combustion evaluation using cone calorimeter

Ocena ciepła spalania wyrobów budowlanych za pomocą kalorymetru stożkowego

DOI: 10.15199/33.2025.07.21

Abstract. The combustion process of building products was discussed based on experimental data in the context of building fire safety. Data were obtained using three standard methods: an ISO 5660 cone calorimeter, an EN ISO 1716 oxygen bomb calorimeter, and an EN ISO 1182 small cylindrical furnace. Various categories of building products were tested: cellulose-based products (particle boards and plywood), concrete, ceramics, insulation materials (thermal and/or acoustic), boards (wall/ceiling), mortars, adhesives, and thin coatings. The studied products exhibited very different fire properties, ranging from non-combustible to highly combustible. To differentiate non-combustible from combustible building products more effectively, a modified value of the heat of combustion was calculated using an extensive collection of test results according to the above-mentioned standard methods. A proposal is presented to modify the criteria for Euroclasses A1 and A2 to obtain a more realistic reaction-to-fire evaluation. The proposed approach relies on the modified heat of combustion as a convenient tool for fast and cost-effective initial non-combustibility evaluation. This approach appears to be an improvement over the current methods for distinguishing between non-combustible and combustible building products because it is a better representation of the actual physical combustion process.

Keywords: building products; cone calorimeter; heat of combustion; fire safety; fire safety engineering.

Streszczenie. Omówiono proces spalania wyrobów budowlanych na podstawie danych doświadczalnych w odniesieniu do bezpieczeństwa pożarowego budynków. Dane uzyskuje się za pomocą trzech standardowych metod: kalorymetru stożkowego ISO 5660, kalorymetru z bombą tlenową EN ISO 1716 oraz małego pieca cylindrycznego EN ISO 1182. Badaniom poddano różne kategorie produktów budowlanych: produkty na bazie celulozy (płyty wiórowe, sklejka), beton, ceramikę, materiały izolacyjne (termiczne i/lub akustyczne), płyty (ścienne/sufitowe), zaprawy, kleje i cienkie powłoki. Badane produkty wykazywały bardzo różne właściwości palne, od niepalnych do łatwopalnych. W celu skuteczniejszego odróżnienia wyrobów budowlanych niepalnych od palnych, obliczono zmodyfikowaną wartość ciepła spalania dla obszernego zbioru wyników własnych badań zgodnie z wyżej wymienionymi standardowymi metodami. Przedstawiono propozycję modyfikacji kryteriów dla Euroklas A1 i A2 w celu uzyskania bardziej realistycznej oceny reakcji na ogień. Proponowane podejście opiera się na zmodyfikowanym cieple spalania jako wygodnym narzędziu do szybkiej i optymalnej kosztowo wstępnej oceny niepalności. Wydaje się, że podejście to stanowi postęp w stosunku do obecnych metod rozróżniania niepalnych i palnych produktów budowlanych, ponieważ lepiej odzwierciedla rzeczywisty proces spalania fizycznego.

Słowa kluczowe: wyroby budowlane; kalorymetr stożkowy; ciepło spalania; bezpieczeństwo pożarowe; inżynieria bezpieczeństwa pożarowego.

Fires constitute a serious economic, social and environmental problem. Despite the growing awareness of the threat, increasing expenditure on education and fire protection, and the progress of technology and the growing costs of fire protection, there are nearly 35000 building fires per year (mostly residential buildings), and this number has not fallen in recent years (Figure 1).

An analysis of the available Polish statistical data in this area is given in [1, 2]. They showed that in Poland, although the number of fatalities in building fires decreased from 605 in 2005 to 365 in 2023, with a simultaneous increase in the number of injured people, the total number of building fires has not decreased significantly. In general, losses caused by all fires amount

Pożary stanowią poważny problem gospodarczy, społeczny i środowiskowy. Pomimo rosnącej świadomości zagrożenia, coraz większych wydatków na edukację i ochronę przeciwpożarową oraz postępu technologicznego i rosnących kosztów ochrony przeciwpożarowej, rocznie dochodzi w Polsce do blisko 35000 pożarów budynków (głównie mieszkalnych), a liczba ta nie spadła w ostatnich latach (rysunek 1).

Analiza dostępnych polskich danych statystycznych w tym zakresie znajduje się w [1, 2]. Wynika z nich, że w Polsce, choć liczba ofiar śmiertelnych pożarów budynków zmniejszyła się z 605 w 2005 r. do 365 w 2023 r., przy jednoczesnym wzroście liczby osób poszkodowanych, to łączna liczba pożarów budynków nie zmniejszyła się znacząco. Ogólnie rzecz biorąc, straty spowodowane przez wszystkie pożary wyniosły około 1% produktu krajowego brutto rocznie w krajach europejskich, w tym w Polsce.

¹⁾ Building Research Institute, Fire Research Department

*) Correspondence address: j.fangrat@itb.pl

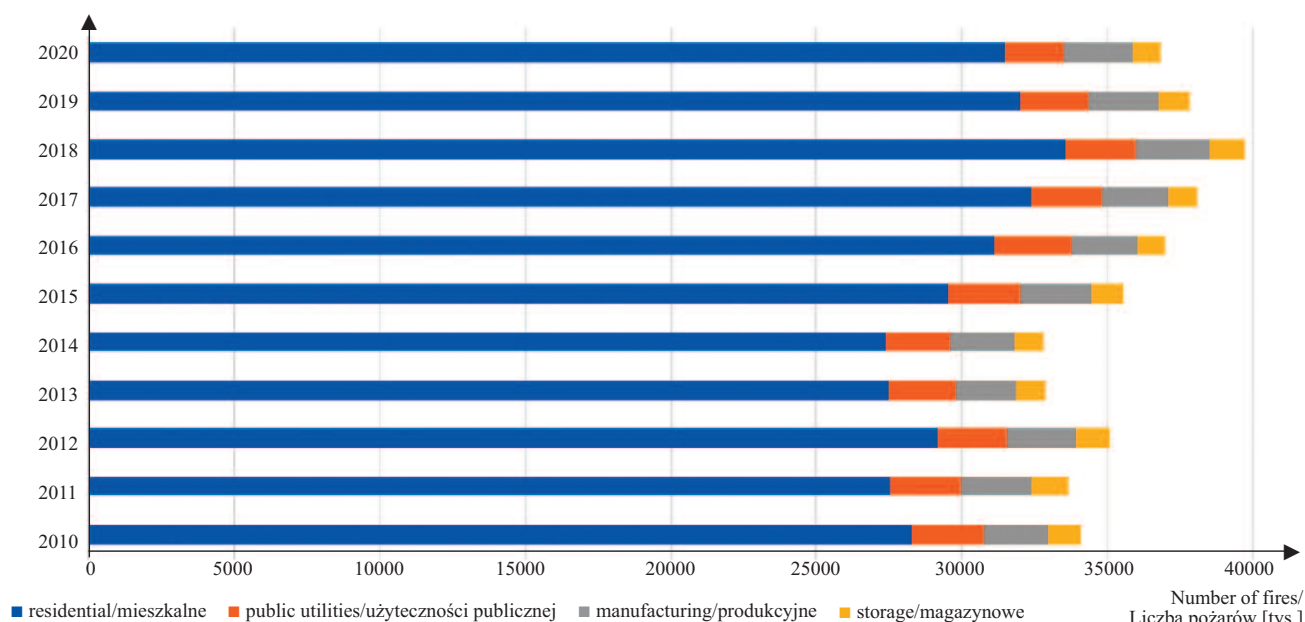


Fig. 1. Statistical data concerning the number of fires of buildings in Poland in the years 2010 – 2020

Own study based on The National Headquarters of The State Fire Service database of 2021 in Poland; source: www.kgsp.gov.pl, access 20.10.2021 [1-3]

Rys. 1. Dane statystyczne dotyczące liczby pożarów budynków w Polsce w latach 2010 – 2020

Opracowanie własne na podstawie bazy danych Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej z 2021 r.; źródło: www.kgsp.gov.pl, dostęp 20.10.2021 [1-3]

ted to approximately 1% of the gross domestic product per year in European countries, including Poland.

A fire may burn with or without flames (smouldering or glowing). Flameless combustion results from the deficiency of oxidisers in the reaction zone [3, 4]. This situation is frequently observed under real fire conditions, particularly in the initial or decay phases. Sometimes flameless combustion may occur in buildings without being noticed for a long time (several days), creating a fire hazard, which applies particularly to insulation composed of sandwich panels [5]. Combustible products become fuel during a fire. Fire causes thermal and chemical degradations. Even non-combustible materials may pose a threat to evacuees and rescue teams because of the loss of their properties, which affects the fire safety of a building (e.g. high-strength concrete, steel) [6, 7]. The addition of retardants may only have short-term effects on fire conditions and cause environmental and health problems for people evacuated from buildings. This issue is often omitted or downplayed in a general fire safety strategy.

In the case of load-bearing construction elements, even for those made of non-combustible materials, there is a possibility of loss of structural capacity, which is dangerous for the entire construction, evacuation of occupants, and firefighter intervention. However, problems related to building products have not been sufficiently addressed in fire safety research and strategies [8]. The current approach of using „global parameters” does not increase knowledge in this field and is (and will continue to be) a barrier to the future development of new products and their application in construction. It is necessary to better connect the test results with the real processes which products undergo in a fire. The concept of modified heat of combustion presented below is an attempt to improve this relationship.

Pożar może przebiegać z płomieniami lub bez płomieni (tlenie lub żarzenie). Spalanie bezpłomieniowe wynika z niedoboru utleniacza w strefie reakcji [3, 4]. Sytuacja ta jest często obserwowana w rzeczywistych warunkach pożaru, szczególnie w fazie początkowej lub fazie gaśnięcia. Zdarza się, że w budynkach może dojść do bezpłomieniowego spalania niezauważonego przez długi czas (kilka dni), stwarzając zagrożenie pożarowe, co dotyczy w szczególności izolacji płyt warstwowych [5]. Produkty palne stają się paliwem podczas pożaru. Pożar powoduje degradację termiczną i chemiczną. Nawet materiały niepalne mogą stanowić zagrożenie dla osób ewakuowanych i służb ratowniczych ze względu na straty materialne, co wpływa na bezpieczeństwo pożarowe budynku (np. beton o wysokiej wytrzymałości, stal). [6, 7] Dodanie środków opóźniających spalanie może mieć jedynie krótkotrwałe skutki w warunkach pożaru i powodować problemy środowiskowe i zdrowotne u osób ewakuowanych z budynków. Ta kwestia jest często pomijana lub bagatelizowana w ogólnej strategii bezpieczeństwa pożarowego.

W przypadku nośnych elementów konstrukcyjnych, nawet tych wykonanych z materiałów niepalnych, istnieje możliwość utraty nośności, co jest niebezpieczne dla całej konstrukcji, ewakuacji osób przebywających w obiekcie oraz interwencji straży pożarnej. Problemy związane z wyrobami budowlanymi nie zostały jednak w wystarczającym stopniu uwzględnione w badaniach i strategiach dotyczących bezpieczeństwa pożarowego [8]. Obecne podejście polegające na stosowaniu „parametrów globalnych” nie zwiększa wiedzy w tej dziedzinie i stanowi (i będzie stanowiło) barierę dla przyszłego rozwoju nowych wyrobów i ich zastosowania w budownictwie. Konieczne jest lepsze powiązanie wyników badań z rzeczywistymi procesami, jakim poddawane są produkty podczas pożaru. Przedstawiona poniżej koncepcja zmodyfikowanego ciepła spalania jest próbą poprawy tej zależności.

The technical aspects of the fire safety of buildings linked to combustion vary depending on the fire phase. One may distinguish:

- 1) in the phase before the flashover:
 - providing means of egress for people and protection against injuries;
 - limiting initial flame effects;
 - **reducing the rate of fire development in the room of fire origin;**
 - **limiting the possibility of fire propagation to other rooms of a building;**
- 2) in the phase after flashover:
 - considering the safety of emergency responders
 - safe evacuation of people from the building;
 - limiting fire propagation to other separated areas in the building, including the so-called safe zones;
 - fire spread to adjacent objects and structures;
 - protection of property and continuation of building functions.

The problems addressed in this study are related to the aforementioned issues. One of the most important fire safety problems is the differentiation between combustible and non-combustible products. For example, in the European reaction-to-fire classification system [9], the methods and criteria currently used for Euroclasses A1 and A2 (Table 1) allow for a comparison of raw materials based on arbitrary criteria for the defined classification groups. These criteria are not based on the fire development process. For instance, flashover occurs at room temperature between 500°C and 600°C [10, 11], whereas the EN ISO 1182 non-combustibility test [12] is performed at the temperature of 750°C. Compared with the range of post-flashover temperatures, the allowed temperature increase ΔT is relatively insignificant. However, there is no technical basis for limiting these values.

Table 1. Exemplary requirements for building products – Euroclasses A1 and A2

Tabela 1. Przykładowe wymagania dla wyrobów budowlanych – Euroklasy A1 i A2

Test method/Metoda badania	Criterion/Kryterium	A1	A2
EN ISO 1182 [12]	furnace temperature rise ΔT [°C]/wzrost temperatury pieca ΔT [°C]	≤ 30	≤ 50
	sample mass loss Δm [%]/utrata masy próbki Δm [%]	≤ 50	≤ 50
	duration of flaming combustion t_f [s]/czas spalania płomieniowego t_f [s]	0	≤ 20
EN ISO 1716 [13]	gross heat of combustion HC [MJ/kg]/ciepło spalania brutto HC [MJ/kg]	$\leq 2,0$ $\leq 1,4^*$	$\leq 3,0$ $\leq 4,0^*$

* for the secondary component of an internally homogenous product/* dla drugorzędowego składnika wyrobu jednorodnego wewnątrznie

Experiments

Experimental data were obtained for typical commercially available building products using the standard test method ISO 5660 cone calorimeter [14] on horizontally oriented samples 10 cm × 10 cm in size, placed in a steel holder under a hood (Figure 2a) connected to the exhaust system. The typical sample for test acc. to ISO 5660 before and after test is showed on Photo 1.

The sample was exposed to the external heat flux generated by the electrical cone heater. During the test, the holder with the sample was placed on an electronic load cell, which

Techniczne aspekty bezpieczeństwa pożarowego budynków związane ze spalaniem różnią się w zależności od fazy pożaru. Można wyróżnić następujące wnioski:

- 1) w fazie przed rozgorzeniem:
 - zapewnienie środków ewakuacji osób i ochrony przed urazami;
 - ograniczenie początkowych efektów płomienia;
 - **zmniejszenie szybkości rozwoju pożaru w pomieszczeniu, w którym powstał pożar;**
 - **ograniczenie możliwości rozprzestrzeniania się ognia na inne pomieszczenia budynku;**
- 2) fazie po rozgorzeniu:
 - bezpieczeństwo służb ratowniczych
 - bezpieczna ewakuacja osób z budynku
 - ograniczenie rozprzestrzeniania ognia do innych wydzielonych obszarów w budynku, w tym tzw. stref bezpiecznych
 - rozprzestrzenił się pożaru na sąsiednie obiekty i konstrukcje;
 - ochrona mienia i kontynuacja funkcji budynku.

Problemy poruszone w niniejszym opracowaniu są związane z wyżej wymienionymi zagadnieniami. Jednym z najważniejszych problemów bezpieczeństwa pożarowego jest rozróżnienie między produktami palnymi i niepalnymi. Na przykład w europejskim systemie klasyfikacji reakcji na ogień [9] metody i kryteria stosowane obecnie dla Euroklas A1 i A2 (tabela 1) pozwalają na porównanie wyrobów w oparciu o arbitralne kryteria dla zdefiniowanych grup klasyfikacyjnych. Kryteria te nie są oparte na procesie rozwoju pożaru. Na przykład rozgorzenie następuje w temperaturze pokojowej między 500 °C a 600 °C [10, 11], podczas gdy test niepalności EN ISO 1182 [12] przeprowadza się w temperaturze 750°C. W porównaniu z zakresem temperatur po rozgorzeniu, dopuszczalny wzrost temperatury ΔT jest stosunkowo nieznaczny. Nie ma jednak podstaw technicznych do ograniczania tych wartości.

Badania

Dane doświadczalne uzyskano dla typowych dostępnych na rynku wyrobów budowlanych przy użyciu standardowej metody badawczej kalorymetru stożkowego ISO 5660 [14] na poziomie zorientowanych próbkach o wielkości 10 cm × 10 cm, umieszczonych w stalowym uchwycie pod okapem (rysunek 2a) podłączonym do systemu wentylacyjnego. Typową próbkę przed i po badaniu wg. ISO 5660 pokazano na fotografii 1.

Próbkę poddano działaniu zewnętrznego strumienia ciepła wydzielanego przez elektryczny promiennik stożkowy. Podczas badania uchwyt z próbką umieszczano na wadze elektro-

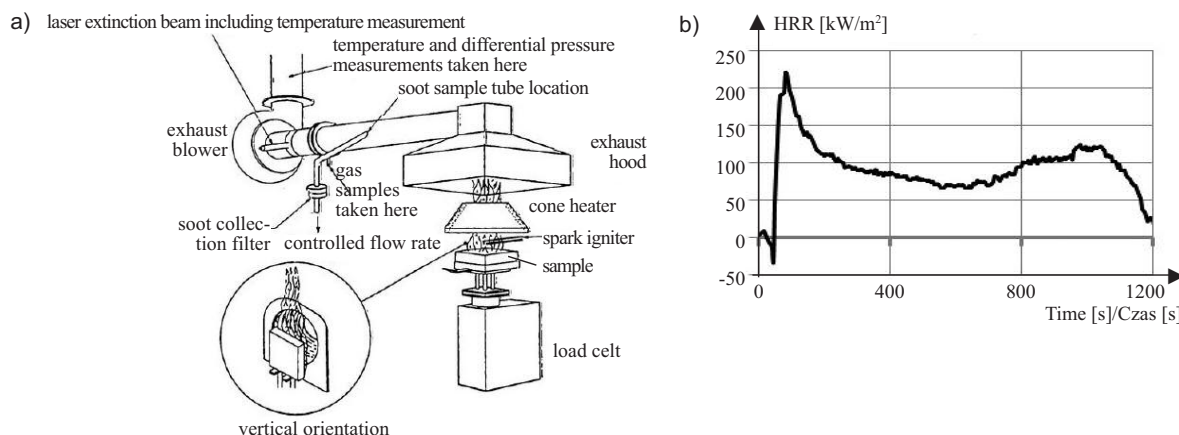


Fig. 2. Cone Calorimeter apparatus according to ISO 5660 [14]: a) scheme of the apparatus; b) exemplary graph of heat release rate (HRR) as a function of time for the OSB board

Rys. 2. Kalorymetr stożkowy zgodnie z ISO 5660 [14]: a) schemat aparatu; b) przykładowy wykres szybkości wydzielania ciepła (HRR) w funkcji czasu dla płyty OSB

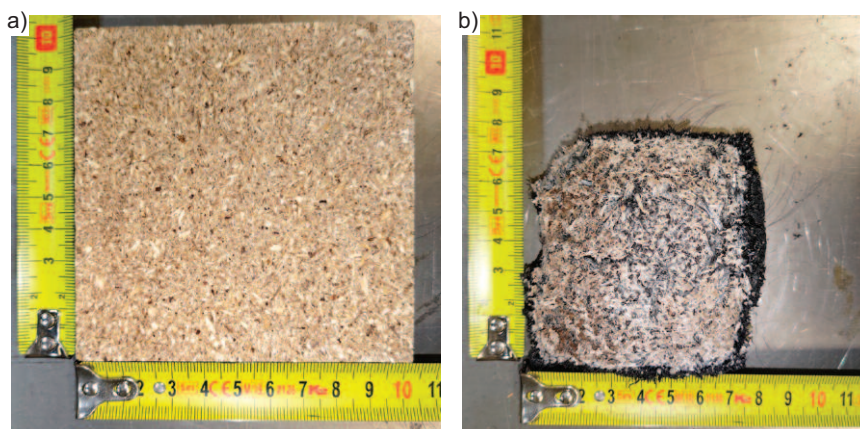


Photo 1. Typical specimen before (a) and after (b) test acc. to ISO 5660
Fot. 1. Typowa próbka do badań przed (a) i po (b) badaniu wg ISO 5660

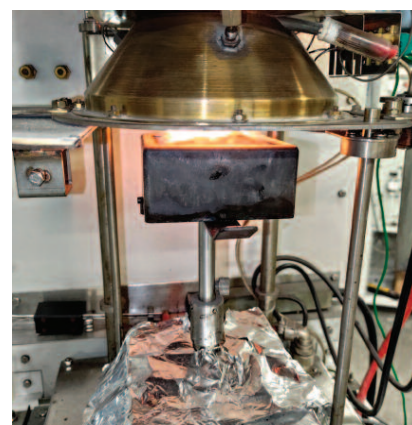


Photo 2. Specimen in holder on a load cell
Fot. 2. Próbkę w uchwycie umieszczoną na wadze

allowed the mass loss of the sample to be recorded as a function of time (Figure 2b). The sample in holder placed on a load cell is showed on Photo 2. The ignition source was an electrical spark generated 10 mm above the surface of a sample at its geometrical centre. For 15 min (or less if the sample burns out sooner), the following measurements were taken: time to ignition, heat release rate (HRR) – Figure 2b, total heat release (THR), smoke production rate, concentration of O_2 , CO , CO_2 , flow rate, and temperature in the measuring section of the exhaust duct. The results reported in the next section were obtained from measurements performed on the horizontal samples exposed to an external heat flux of 50 kW/m^2 .

Concept of modified heat of combustion

Cylindrical furnace application. Problems with the direct use of the heat of combustion data for building materials in real fire analysis have been reported in the literature [15, 16]. One of the most common problems with charring materials is that the heat of combustion of volatiles is not equal to that of the entire material. To address these problems, a modified heat of combustion method was proposed in [6], which is defined as follows:

nicznej, co pozwoliło na zarejestrowanie ubytku masy próbek w funkcji czasu. Źródłem zapłonu była iskra elektryczna generowana 10 mm nad powierzchnią próbki w jej geometrycznym środku. Ramkę z próbką umieszczoną w aparacie przedstawiono na fotografii 2. Przez 15 minut (lub mniej, do czasu wypalenia próbki) wykonywano następujące pomiary: czas do zapłonu, szybkość wydzielania ciepła (HRR) (rysunek 2b), całkowite wydzielanie ciepła (THR), szybkość wytwarzania dymu, stężenie O_2 , CO , CO_2 , natężenie przepływu i temperaturę w sekcji pomiarowej kanału wentylacyjnego. Wyniki przedstawione w następnej sekcji uzyskano z pomiarów wykonanych na próbkach poziomych poddanych działaniu zewnętrznego strumienia ciepła o mocy 50 kW/m^2 .

Koncepcja zmodyfikowanego ciepła spalania

Zastosowanie w piecu cylindrycznym. W literaturze opisano problemy z bezpośrednim wykorzystaniem ciepła spalania materiałów budowlanych w rzeczywistej analizie pożarowej [15, 16]. Jednym z najczęstszych problemów związanych ze zwęglonymi materiałami jest to, że ciepło spalania substancji lotnych nie jest równe ciepłu wydzielanemu z całego materiału. Aby rozwiązać te problemy, w [6] zaproponowano zmodyfikowaną metodę ciepła spalania, która jest zdefiniowana w następujący sposób:

$$\text{MHC} = \text{HC} \cdot \Delta m \text{ [MJ/kg]} \quad (1)$$

where:

MHC – modified heat of combustion [MJ/kg];

HC – gross heat of combustion [MJ/kg] according to EN ISO 1716 [13];

Δm – sample mass loss relative to initial sample mass according to EN ISO 1182 [12].

The MHC concept uses measurements from both the oxygen bomb calorimeter and the cylindrical furnace and increases the possibility of distinguishing non-combustible (class A1) from combustible products (the remaining classes). This concept was validated based on an analysis of test results for 66 commercial building products, which were grouped into five categories depending on their intended use in the building [5]: concrete and ceramic, thermal/acoustic insulation materials, covering boards (wall/ceiling), mortars and adhesives, and thin coatings. The heat of combustion (HC) data (Figure 3) covers a very wide range. For products under endothermic chemical reactions, HC values below zero were found for 18 of 66 measured was approximately 46 MJ/kg for regular polystyrene foam, whereas for fire-retarded samples, mostly in the group of mortars and adhesives. The highest HC value, that is, that of polystyrene foam, was lower and approximately equal to 37 MJ/kg. These HC levels are even higher than reported for real industrial coals for which HC values were found between 7.5 MJ/kg (low-rank brown coal [17]) and 28 MJ/kg (anthracite coal [18]). For wood, the HC can be as high as 18.5 MJ/kg [17].

The obtained heat of combustion (HC) and modified heat of combustion (MHC) values were compared (Figure 4) for samples suitable for testing in cylindrical furnaces [12] which were basically those declared as „non-combustible”;

$$\text{MHC} = \text{HC} \cdot \Delta m \text{ [MJ/kg]} \quad (1)$$

gdzie:

MHC – zmodyfikowane ciepło spalania [MJ/kg];

HC – ciepło spalania brutto [MJ/kg] wg EN ISO 1716 [13];

Δm – ubytek masy próbki w stosunku do początkowej masy próbki wg EN ISO 1182 [12].

Koncepcja MHC wykorzystuje pomiary zarówno z kalorymetru bomby tlenowej, jak i pieca cylindrycznego i zwiększa możliwość odróżnienia produktów niepalnych (klasa A1) od palnych (pozostałe klasy). Koncepcja ta została zwalidowana na podstawie analizy wyników badań 66 komercyjnych wyrobów budowlanych, które w zależności od ich przeznaczenia w budynku pogrupowano w pięć kategorii: I. ceramika, II. materiały do izolacji termicznej/akustycznej, III. płyty okładzinowe (ściana/sufit), IV. zaprawy i kleje, V. cienkie powłoki. Dane dotyczące ciepła spalania (HC) (rysunek 3) obejmują bardzo szeroki zakres. Dla wyrobów poddanych endotermicznym reakcjom chemicznym o wartości HC poniżej zera stwierdzono dla 18 z 66 mierzonych wartości, głównie w grupie zapraw i klejów, natomiast maksymalną wartość HC ok. 46 MJ/kg uzyskano dla zwykłego polistyrenu spienionego. Dla uniepalnionego polistyrenu spienionego wartość HC była niższa i wynosiła w przybliżeniu 37 MJ/kg. Te poziomy HC są nawet wyższe niż odnotowane dla rzeczywistych węgla przemysłowych, dla których wartości HC określono w zakresie między 7,5 MJ/kg (niskiej jakości węgiel brunatny [17]) a 28 MJ/kg (antracyt [18]). W przypadku drewna HC może wynosić nawet 18,5 MJ/kg [17].

Uzyskane wartości ciepła spalania (HC) i zmodyfikowanego ciepła spalania (MHC) porównano (rysunek 4) dla próbek nadających się do badania w piecu cylindrycznym [12], które były zasadniczo tymi, które zostały zadeklarowane przez producentów jako „niepalne”;

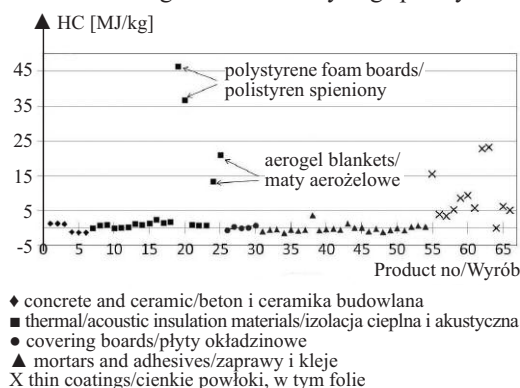


Fig. 3. Results for heat of combustion for 66 commercial building products; based on work [5]

Rys. 3. Wyniki badania ciepła spalania w przypadku 66 komercyjnych produktów budowlanych; na podstawie pracy [5]

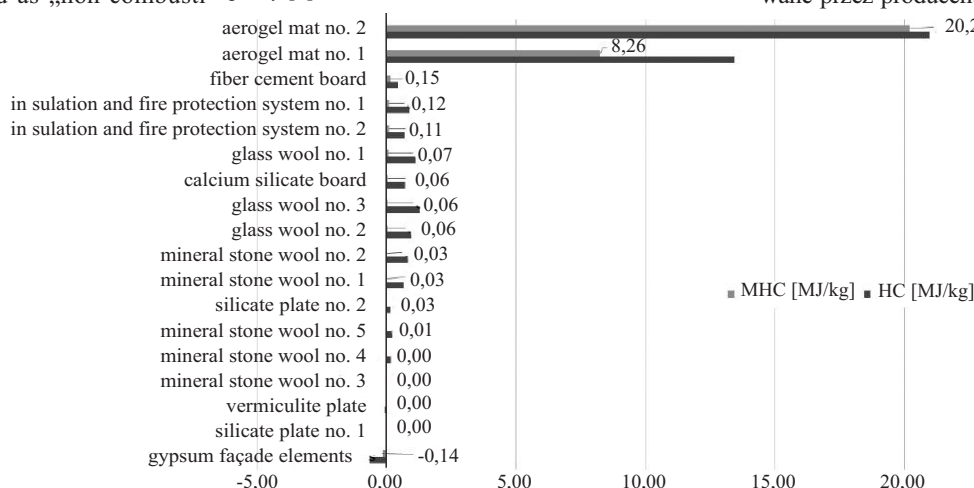


Fig. 4. Comparison of heat of combustion and modified heat of combustion for 18 commercial building products declare as „non-combustible”; based on previous work [7]

Rys. 4. Porównanie ciepła spalania i modyfikowanego ciepła spalania dla 18 komercyjnych wyrobów budowlanych zadeklarowanych jako „niepalne”; na podstawie wcześniejszej pracy [7]

ble” by the producers. A limitation of this approach is that it does not necessarily classify materials with an excessive flaming duration in EN ISO 1182 as combustible.

Based on the results presented in Figures 3 and 4, it is proposed to reanalyse and modify the classification criteria for noncombustible and combustible products. Moreover, the results show that there is no clear need for the two different limits of the A1 and A2 classes for the heat of combustion in the CEN system. Therefore, the simplification of the classification system seems justified and reasonable.

Cone Calorimeter application. The Cone Calorimeter has an advantage over the cylindrical furnace and oxygen bomb calorimeter tests in that materials can be tested under realistic fire conditions in their end-use form. Consequently, it may be a more suitable method for evaluating the combustibility of layered materials. In fact, a Cone Calorimeter has already been used in Japan for that purpose. The Japanese Building Standards Law classifies materials as non-combustible if the peak heat release rate and total heat released in a 20-minute test at 50 kW/m² is 200 kW/m² or less and 8 MJ/m² or less, respectively.

Assuming that the (first) peak heat release rate for a homogeneous material is proportional to the maximum temperature rise in the EN ISO 1182 cylindrical furnace, the idea of combining several criteria of the non-combustibility tests can be accomplished by defining a modified peak heat release rate as follows:

$$\text{MPHRR} = \text{PHRR} \cdot \Delta m \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad (2)$$

where:

MPHRR – modified peak heat release rate [kW/m²];
PHRR – first peak heat release rate measured in the Cone Calorimeter [kW/m²];
 Δm – total sample mass loss measured in the Cone Calorimeter relative to initial mass [-].

In Table 2, the non-combustible materials are represented by specimens 16 and 17, while the remaining specimens are combustible at various rates of combustibility. The difference in thermal parameters between combustible and non-combustible materials is much better demonstrated in the case of the MPHRR than in the case of the PHRR (see specimens 15 and 16 in Table 2); therefore, the MPHRR parameter has a much hi-

Table 2. Exemplary results for building products evaluated using this novel concept

Tabela 2. Przykładowe wyniki dla wyrobów budowlanych ocenione przy użyciu tej nowatorskiej koncepcji

No.	Material/Product/Material/Wyrób	PHRR [kW/m ²]	Relative mass loss [-]/Względny ubytek masy [-]	MPHRR [kW/m ²]
1	Fiberboard/Płyta pilśniowa	436	0,98	428
2	Polycarbonate board 1/ Płyta poliwęglanowa 1	301	0,99	297
3	Expanded polystyrene (EPS) 1/ Polistyren ekspandowany (EPS) 1	291	1,00	291
4	Expanded polystyrene (EPS) 2/ Polistyren ekspandowany (EPS) 2	256	0,99	254
5	Polycarbonate board 2/Płyta poliwęglanowa 2	240	0,98	236
6	Polycarbonate board 3/Płyta poliwęglanowa 3	268	0,82	219
7	OSB board/Płyta OSB	221	0,82	181
8	Chipboard/Płyta wiórowa	201	0,88	176
9	Plywood 1/Sklejka 1	216	0,78	168
10	Fiberboard soft/Płyta pilśniowa miękka	167	1	167
11	Douglas fir plywood/Sklejka z drewna daglezi	196	0,82	161
12	MDF board/Płyta MDF	191	0,79	151
13	Oak wood paneling/Boazeria dębowa	141	0,96	135
14	FR Douglas fir plywood/Sklejka z drewna daglezi uniepalniona	106	0,76	81
15	Plywood 2/Sklejka 2	79	1	79
16	Gypsum board 1/Płyta gipsowa 1	66	0,05	3,3
17	Gypsum board 2/Płyta gipsowa 2	66	0,02	1,3

ne”. Ograniczeniem tego podejścia jest to, że niekoniecznie klasyfikuje ono materiały o zbyt długim czasie spalania w badaniu według normy EN ISO 1182 jako palne.

Na podstawie wyników przedstawionych na rysunkach 3 i 4 proponuje się ponowną analizę i modyfikację kryteriów klasyfikacji wyrobów niepalnych i palnych. Ponadto wyniki pokazują, że nie ma wyraźnej potrzeby stosowania dwóch różnych wartości granicznych klas A1 i A2 dla ciepła spalania w systemie CEN. Ponadto wyniki pokazują, że nie ma wyraźnej potrzeby stosowania dwóch różnych wartości granicznych klas A1 i A2 dla ciepła spalania w systemie CEN. W związku z tym uproszczenie systemu klasyfikacji wydaje się uzasadnione i racjonalne.

Zastosowanie w kalorymetrze stożkowym. Kalorymetr stożkowy ma przewagę nad testami w piecu cylindrycznym i bombie tlenowej, ponieważ wyroby mogą być badane w realistycznych warunkach pożaru w ich końcowej formie. W związku z tym może to być bardziej odpowiednia metoda oceny palności materiałów warstwowych. W rzeczywistości kalorymetr stożkowy jest już używany w Japonii do tego celu. Japońskie przepisy budowlane klasyfikują materiały jako niepalne, jeśli maksymalna szybkość wydzielania ciepła i całkowite ciepło wydzielane w 20-minutowym teście przy 50 kW/m² wynosi odpowiednio 200 kW/m² lub mniej i 8 MJ/m² lub mniej.

Zakładając, że (pierwsza) maksymalna szybkość wydzielania ciepła dla jednorodnego materiału jest proporcjonalna do maksymalnego wzrostu temperatury w piecu cylindrycznym zgodnym z normą EN ISO 1182, ideę połączenia kilku kryteriów badań niepalności można zrealizować poprzez zdefiniowanie zmodyfikowanej maksymalnej szybkości wydzielania ciepła w następujący sposób:

$$\text{MPHRR} = \text{PHRR} \cdot \Delta m \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad (2)$$

gdzie:

MPHRR – zmodyfikowana maksymalna szybkość wydzielania ciepła [kW/m²];
PHRR – pierwszy pik szybkości wydzielania ciepła zmierzony w kalorymetrze stożkowym [kW/m²];
 Δm – względny ubytek całkowitej masy próbki zmierzony w kalorymetrze stożkowym w odniesieniu do masy początkowej.

W tabeli 2 materiały niepalne są reprezentowane przez próbki 16 i 17, podczas gdy pozostałe próbki są palne przy różnym stopniu palności. Różnica w parametrach termicznych między materiałami palnymi i niepalnymi jest znacznie lepiej pokazana w przypadku MPHRR niż w przypadku PHRR (patrz próbki 15 i 16 w tabeli 2); w związku z tym parametr MPHRR ma znacznie większy potencjał różnicowania w porównaniu do PHRR. Ponadto próbki drewna dębowego (nr 13 w tabeli 2) można traktować jako

gher differentiation potential compared to PHRR. Moreover, the oak wood specimens (no. 13 in Table 2) can be treated as a model of hardly ignitable material; therefore, it should be additionally tested at an external heat flux of 30 kW/m² to study its behaviour under conditions that better represent the initial stage of fire. Neither the MPHR nor PHRR parameters are good representations of the limit values for such materials at 50 kW/m².

The results of tests in a cone calorimeter and the calculated modified thermal parameters of typical building products are presented graphically (Figure 5). The advantage of the modified peak heat release rate is that the two components, PHRR and Δm , can be measured with relatively high accuracy. Therefore, the approach shows promise in addressing the main problem with the Japanese classification system, that is, the fact that the accumulation of systematic errors, particularly over 20 minutes, can easily result in incorrect classification of borderline materials.

The latter was the primary reason for the development of the modified Cone Calorimeter described in ISO 5660-4 [19]. More work is required to demonstrate the general applicability of the modified peak heat release rate concept.

model materiału trudno zapalnego, w związku z czym należy go dodatkowo przetestować przy zewnętrznym strumieniu ciepła 30 kW/m², aby zbadać jego zachowanie w warunkach, które lepiej odzwierciedlają początkową fazę pożaru. Ani parametry MPHR, ani PHRR nie są dobrym odzwierciedleniem wartości granicznych dla takich materiałów na poziomie 50 kW/m².

Wyniki badań w kalorymetrze stożkowym oraz obliczone zmodyfikowane parametry cieplne typowych wyrobów budowlanych przedstawiono w formie graficznej (rysunek 5). Zaletą zmodyfikowanej maksymalnej szybkości wydzielania ciepła jest to, że dwa składniki, PHRR i Δm , mogą być mierzone ze stosunkowo dużą dokładnością. W związku z tym podejście to jest obiecujące, jeśli chodzi o rozwiązanie głównego problemu japońskiego systemu klasyfikacji, czyli faktu, że nagromadzenie błędów systematycznych, zwłaszcza w ciągu 20 minut, może łatwo doprowadzić do nieprawidłowej klasyfikacji materiałów granicznych. To ostatnie było głównym powodem opracowania zmodyfikowanego kalorymetru stożkowego opisanego w ISO 5660-4 [19]. Potrzebne są dalsze prace, aby wykazać ogólne zastosowanie koncepcji zmodyfikowanej maksymalnej szybkości wydzielania ciepła.

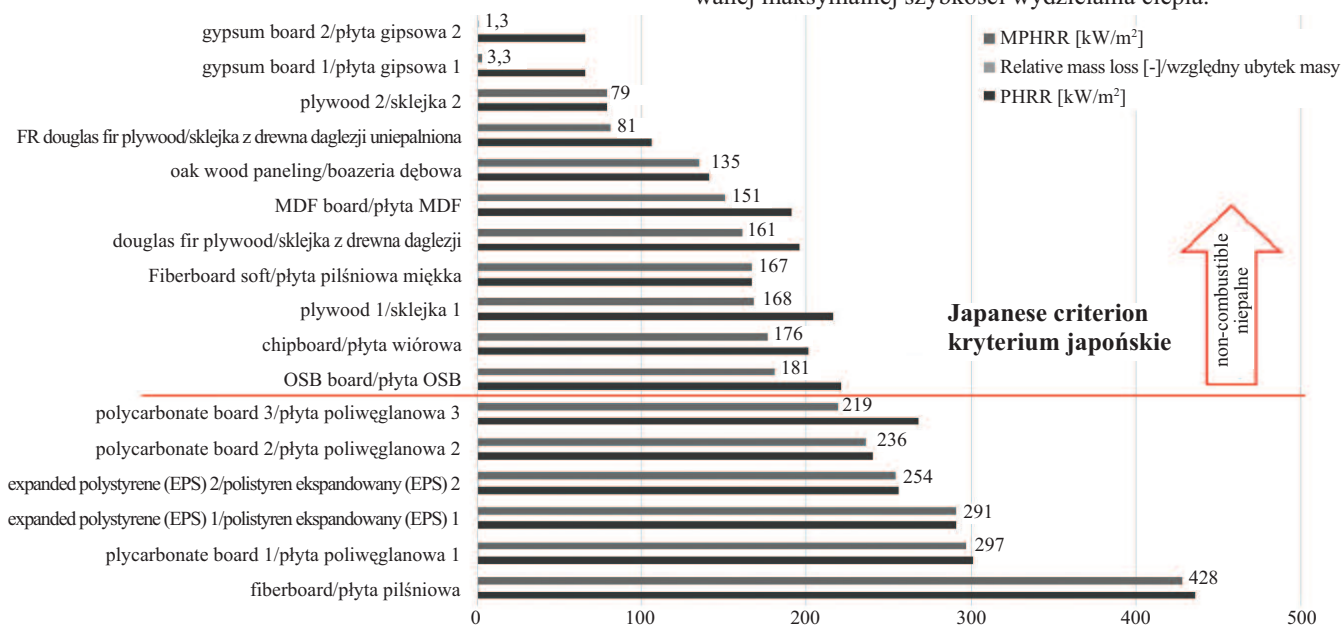


Fig. 5. Modified Heat Release Rate (MPHRR) for specimens with varying degrees of combustibility and Japanese Building Standards Law criterion PHRR ≤ 200 kW/m²

Rys. 5. Modyfikowana szybkość wydzielania ciepła (MPHRR) dla próbek o różnym stopniu palności i kryterium japońskiego prawa i norm budowlanych PHRR ≤ 200 kW/m²

Conclusions

In this study, a new research area was identified within building fire safety, which is essential because of the increasing significance of future environmental requirements. An original approach to research and analysis is to explain the physical phenomena occurring in construction products in the initial phase of fire development, consequently affecting the level of fire safety in buildings. The primary findings were as follows:

- development of a modified heat of combustion concept as a single quantity that combines the results of both current

Wnioski

W niniejszej pracy zidentyfikowano nowy obszar badawczy w zakresie bezpieczeństwa pożarowego budynków, który jest istotny ze względu na rosnące znaczenie przyszłych wymagań środowiskowych. Oryginalnym podejściem do badań i analiz jest wyjaśnienie zjawisk fizycznych zachodzących w wyrobach budowlanych w początkowej fazie rozwoju pożaru, a w konsekwencji wpływających na poziom bezpieczeństwa pożarowego w budynkach. Podstawowe ustalenia były następujące:

- opracowanie koncepcji zmodyfikowanego ciepła spalania jako pojedynczej wielkości, która łączy wyniki obu obecnych

non-combustibility test methods. The modified heat of combustion is more suitable than the gross heat of combustion for characterising the fire properties of building materials;

■ testing the gross heat of combustion is a very effective method for the preliminary determination of the fire properties of products, particularly those with combustible organic content. EN ISO 1716 is a convenient and reliable method for the time and cost-effective evaluation of building products for their combustibility. Based on a single HC value, it is possible to predict the fire evaluation, particularly to differentiate non-combustible and combustible building products. This would be useful for the future design and implementation of new products in the construction industry. However, one should bear in mind that the third criterion of auto-ignition in the second non-combustibility test EN ISO 1182 could influence the final A1 classification of the building product. A relatively simple and low-cost measurement of the gross heat of combustion is proposed for all Euroclasses of building products with different limit values;

■ having such a suitable method for the preliminary assessment of combustible products with high accuracy is important at the stage of the design and implementation of new products in the construction industry;

■ a similar concept, which is, the combination of two characteristics pertaining to the combustibility of a material, can also be applied to the Cone Calorimeter data. However, more work is needed to appraise the evaluation of properties of the construction products obtained by means of this method.

Further studies should focus on the connection between the results of the experimental tests concerning the reaction to fire and calculations. This will gradually become possible as additional data are analysed and new products emerge.

Received: 03.03.2025

Revised: 05.05.2025

Published: 23.07.2025

metod badania niepalności. Zmodyfikowane ciepło spalania jest bardziej odpowiednie niż ciepło spalania brutto do scharakteryzowania właściwości ogniowych materiałów budowlanych;

■ badanie ciepła spalania brutto jest bardzo skuteczną metodą wstępnego określania właściwości ogniowych wyrobów, w szczególności tych z zawartością palnych substancji organicznych. Norma EN ISO 1716 to wygodna i niezawodna metoda oceny wyrobów budowlanych pod kątem ich palności. Na podstawie pojedynczej wartości HC można przewidzieć ocenę w zakresie reakcji na ogień, w szczególności w celu rozróżnienia niepalnych i palnych wyrobów budowlanych. Byłoby to przydatne przy przyszłym projektowaniu i wdrażaniu nowych materiałów i wyrobów w budownictwie. Należy jednak pamiętać, że trzecie kryterium samozapłonu w badaniu niepalności EN ISO 1182 może mieć wpływ na ostateczną klasyfikację A1 wyrobu budowlanego. Stosunkowo prosty i tani pomiar ciepła spalania brutto jest proponowany dla wszystkich Euroklas wyrobów budowlanych o różnych wartościach granicznych;

■ posiadanie tak odpowiedniej metody wstępnej oceny wyrobów palnych z dużą dokładnością jest istotne na etapie projektowania i wdrażania nowych materiałów i wyrobów w budownictwie;

■ podobną koncepcję, czyli połączenie dwóch cech odnoszących się do palności materiału, można również zastosować do danych z kalorymetru stożkowego. Potrzebne są jednak dalsze prace nad oceną właściwości wyrobów budowlanych uzyskanych tą metodą.

Dalsze badania powinny koncentrować się na powiązaniu wyników badań eksperymentalnych dotyczących reakcji na ogień z obliczeniami. Będzie to stopniowo możliwe w miarę analizowania dodatkowych danych i pojawiania się nowych wyrobów.

Artykuł wpłynął do redakcji: 03.03.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 05.05.2025 r.

Opublikowano: 23.07.2025 r.

Literature

- [1] www.kgsp.pl (dostęp 20.10. 2021) – in Polish.
- [2] Mazur R. Statistic analysis of fires in Poland. In: Red book of fires. Part II. Fire statistic. 1st ed. Józefów: CNBOP – in Polish.
- [3] Ohlemiller TJ. Smouldering combustion propagation through permeable horizontal fuel layer. Combustion and Flame. 1990; 81, pp. 341-354.
- [4] Ohlemiller TJ. Smouldering combustion. In: DiNunno, P. J. ed. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4th ed., Quincy: NFPA, Publication No: HFPE08. 2008; pp. 2-229 – 2-259.
- [5] Fangrat J. On non-combustibility of commercial building materials. Fire and Materials. 2017. DOI: 10.1002/fam. 2369.
- [6] Fangrat J, Janssens ML. Modified heat of combustion as a tool for evaluating of building products combustibility. 15th International Fire and Materials Conference, San Francisco, USA, 06-08 February 2017, London: Interscience Communications – CD-ROM, pp. 878-888, 2017.
- [7] Fangrat J. Effect of increased organic content on fire properties of building product. Materiały Budowlane. 2012; 12, pp. 35-40 – in Polish.
- [8] Fangrat J. A paradigm for building fire safety. Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci. 2025. DOI: 10.24425/bpasts. 2024.152606.
- [9] EN 13501-1 Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using test data from reaction to fire tests. CEN, Brussels.
- [10] Walton WD, Thomas PH. Estimating Temperatures in compartment fires. In: DiNunno, P. J. ed. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4th ed., Quincy: NFPA, Publication. 2008; No: HFPE08, pp. 3-204.

- [11] Thomas PH. Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms. Fire and Materials. 1981; 5 (3), pp. 103-111.
- [12] EN ISO 1182 Reaction to fire of building materials – Non combustibility test, CEN, Brussels.
- [13] EN ISO 1716 Reaction to fire of building materials – Determination of gross calorific value, CEN, Brussels.
- [14] ISO 5660-1: 2015 Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement). International Organisation for Standardization, Geneva, 2020.
- [15] Dietenberger M. Update for combustion properties of wood components. Fire and Materials. 2002; 26, pp. 255-260.
- [16] Madrigal J, Guijarro M, Hernando C, Diez C, Marino E. Effective heat of combustion for flaming combustion of Mediterranean forest fuels. Fire Technology. 2011; 47, pp. 461-474.
- [17] Pawlak-Kruczek H. Co-firing of biomass with pulverised coal in oxygen enriched atmosphere. Chemical and Process Engineering. 2013; 34 (2), pp. 215-226.
- [18] Pawlak-Kruczek H. Problems of the combustion of young low-metamorphism rank fossil fuels, 1st ed., Wrocław: Wroc. Tech. Univ. 2003 – in Polish.
- [19] ISO/TS 5660-4: 2016 Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 4: Measurement of low levels of heat release. International Organisation for Standardization, Geneva, 2020.