

dr hab. inż. Krzysztof Chudyba, prof. PK<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0001-8880-5222

dr hab. inż. Piotr Matysek, prof. PK<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-7105-639X

# Fire resistance verification for masonry walls

## Weryfikacja odporności ogniowej ścian murowych

DOI: 10.15199/33.2024.10.02

**Abstract.** The paper presents some selected issues of structural fire design of masonry structures within the aspect of the new European code EN 1996-1-2:2022 project. Special attention is paid to the changes and additions introduced into this pre-standard in comparison with the code PN-EN 1996-1-2:2010 which is currently in force in Poland. There were analyzed the questions that in the nearest future will influence the process of design and construction of masonry structures.

**Keywords:** masonry structure; masonry wall; fire resistance.

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia projektowania konstrukcji murowych ze względu na warunki pożarowe w aspekcie projektu nowej normy europejskiej EN 1996-1-2:2022. Szczególną uwagę zwrócono na zmiany i uzupełnienia wprowadzone w projekcie nowej wersji normy w stosunku do obecnie obowiązującej w Polsce PN-EN 1996-1-2:2010. Analizie poddano te zagadnienia, które wpłyną na proces projektowania i wykonywania konstrukcji murowych.

**Słowa kluczowe:** konstrukcje murowe; ściany murowe; odporność ogniowa.

Fire safety constitutes one of the basic requirements for building objects. Detailed criteria for fire resistance, with regard to the load-bearing function (R) and/or insulation function (REI), are determined based on the national regulations – in Poland the document *Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* [1] should be applied. But the verification of such formulated criteria for designed buildings is carried out by appropriate parts of structural Eurocodes and for masonry structures the proper document is the code PN-EN 1996-1-2:2010 [2]. The code [2] represents the first generation of Eurocodes that were published within the years 2002 – 2007. In recent years there have been started the process of preparation of the new European codes. Technical Committee CEN/TC 250 elaborated projects of the new standards also for masonry structures. One of such documents is the project of new code prEN 1996-1-2:2022 [3], for the analysis of masonry structures in fire conditions, prepared by the special task group (Project Team SC6. T2). In the future, this document is to be substituted presently binding code PN-EN 1996-1-2:2010 [2] with the later changes. In Poland Technical Committee PKN/KT nr 252 is responsible for codes regarding design of masonry structures.

Even cursory reading of the new code version [3] indicates that there are a lot of changes in comparison with the current code [2]. They are of different character, from editorial changes to the important substantive ones, which will significantly influence in the coming years the process of design and construction of buildings with masonry walls.

In the paper there are presented and discussed the basic requirements within the frame of verification of masonry walls load-bearing capacity in fire situations within the light of the new code [3]. There were taken into account the changes resulted both from the development of the masonry

bezpieczeństwo pożarowe jest jednym z podstawowych wymagań stawianych obiektom budowlanym. Szczegółowe kryteria odporności ogniowej, w odniesieniu do funkcji nośnej (R) lub/i izolacyjnej (EI/REI), ustala się na podstawie przepisów krajowych. W Polsce właściwym dokumentem w tym względzie jest *Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* [1]. Weryfikacji tych kryteriów, w przypadku projektowanych obiektów dokonuje się natomiast z wykorzystaniem odpowiednich części Eurokodów konstrukcyjnych. Konstrukcji murowych dotyczy norma PN-EN 1996-1-2:2010 [2], która stanowi część pierwszej generacji Eurokodów opublikowanych w latach 2002 – 2007. Od kilku lat trwa proces przygotowywania nowych norm europejskich. Komitet Techniczny CEN/TC 250 opracował projekty nowych norm m.in. dotyczących konstrukcji murowych. Jednym z takich dokumentów jest projekt nowej normy prEN 1996-1-2:2022 [3], obejmującej analizę konstrukcji murowych z uwagi na warunki pożarowe, przygotowany przez specjalny zespół (Project Team SC6. T2). W przyszłości dokument ten ma zastąpić obowiązującą normę EN 1996-1-2:2005 [4] i opracowaną na jej podstawie PN-EN 1996-1-2:2010 [2] z późniejszymi zmianami. W Polsce odpowiedzialnym za normy projektowania konstrukcji murowych jest Komitet Techniczny PKN/KT nr 252.

Nawet pobieżna lektura nowej wersji normy [3] wskazuje, że dużo jest zmian w porównaniu z obowiązującą normą [2]. Mają one różny charakter, od redakcyjnych po istotne zmiany merytoryczne, co wpłynie w najbliższych latach na proces projektowania i wykonywania budynków ze ścianami murowymi.

W artykule przedstawiono i omówiono podstawowe wymagania dotyczące sprawdzania nośności ścian murowych w sytuacjach pożarowych w świetle wymagań nowej normy [3]. Uwzględniono zmiany wynikające zarówno z rozwoju rynku materiałów murowych, jak również z badań ogniowych murów przeprowadzonych w ostatnich latach w różnych laboratoriach europejskich [5 ÷ 7].

<sup>1)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

<sup>\*</sup>) Correspondence address: kchudyba@pk.edu.pl

materials market and from the fire test results for masonry walls executed within the last years in different European laboratories [5 ÷ 7].

The aim of the paper is to present the basic directions in which the process of masonry structures design shaped by regulations included in the code [3] is heading as well as the resulting consequences in constructing the masonry buildings.

### Fire resistance of masonry walls

The behaviour of masonry wall in fire conditions depends not only on material factors and walls geometry, but also on its location in the structure and the load level. Among the material factors the most important role play the type of masonry elements and mortars used for wall's construction, as well as the method of its finishing. The type of joints and the level of its filling up are also significant. Whereas the geometrical and loading parameters that influences the fire resistance of masonry wall are the following: wall thickness and height, values of load eccentricity and load level. From the presented information it may be clearly concluded that the total number of parameters determining the behaviour of masonry wall in fire conditions is very large. Hence, the analysis of masonry walls in fire situation is a very complex issue.

Verification of fire resistance for different types of masonry walls (load-bearing, non load-bearing) is presently carried out by one of the following methods: based on fire tests, with the application of tabulated data, with the use of different models and calculation methods.

Fire tests allow to get the insight into the real behaviour of masonry walls in fire situation by possibility to observe the different processes and phenomena associated with the high temperature action as well as to estimate the fire resistance level for the specific masonry static scheme. Fire tests are also necessary to determine the basic parameters for masonry materials – physical, thermal and mechanical – as a function of temperature. While conducting the fire tests there are to be applied appropriate codes regulations that define the detailed procedures of conducting tests. Fire tests carried out in compliance with codes [8, 9] by accredited laboratories on commission of masonry elements and mortar producers make it possible to elaborate the guidelines for design of masonry walls within the given system. Examples and descriptions of such tests may be found in [10, 11].

Simple method of masonry walls fire resistance verification constitute tables with the values of minimum required thickness for a given level of fire resistance. Verification is based on the wall thickness – if only the thickness of wall for the established structural and material solution is greater than the minimum thickness in the table, then it is concluded that the fire resistance is sufficient. In tables included in the current code [2] for many types of masonry walls either it is not determined the minimum thickness or are given very wide values ranges for minimum thickness. Hence, the application of simple tabulated method in many cases is now limited, which complicates the design process.

Celem artykułu jest zaprezentowanie kierunków, w jakich zmierzają proces projektowania konstrukcji murowych z uwagi na warunki pożarowe, kształtowany przez zalecenia podane w projekcie nowej normy [3], a także wynikające z tego konsekwencje w realizacji budynków murowych.

### Odporność ogniowa ścian murowych

Zachowanie ścian murowych w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury zależy zarówno od czynników materiałowych, geometrii ściany, jak również od sposobu jej usytuowania w konstrukcji i poziomu wyteżenia. Wśród czynników materiałowych podstawowe znaczenie ma rodzaj elementów murowych i zapraw użytych do wykonania ściany, a także sposób wykończenia jej powierzchni. Istotne znaczenie ma również rodzaj spoin zastosowanych w murze i stopień ich wypełnienia. Natomiast parametry geometryczne i obciążeniowe, które wpływają na odporność ogniową ścian murowych, to grubość ścian, ich wysokość, wielkości mimośrodków obciążenia oraz stopień wyteżenia. Z podanego zestawienia wynika, że liczba parametrów warunkujących zachowanie się ścian murowych w warunkach pożaru jest bardzo duża, dlatego też analiza tych ścian w warunkach pożarowych jest zagadnieniem bardzo złożonym.

Weryfikację odporności ogniowej ścian murowych różnych typów (konstrukcyjnych lub niekonstrukcyjnych) przeprowadza się obecnie na podstawie badań ogniowych, z zastosowaniem metody tabelarycznej oraz z wykorzystaniem różnych modeli i metod obliczeniowych.

Badania ogniowe pozwalają uzyskać wgląd w rzeczywiste zachowanie ścian murowych w sytuacji pożaru, przez możliwość obserwacji różnych procesów i zjawisk towarzyszących oddziaływaniu wysokiej temperatury, a także ocenić poziom odporności ogniowej konkretnego ustroju murowego. Badania doświadczalne są również niezbędne do określenia podstawowych parametrów materiałowych murowych – fizycznych, termicznych, mechanicznych – w funkcji temperatury. Przy realizacji badań ogniowych murów zastosowane są odpowiednie przepisy normowe, określające szczegółowe procedury ich prowadzenia. Badania prowadzone zgodnie z normami [8, 9] przez akredytowane laboratoria na zlecenie producentów elementów murowych i zapraw pozwalają na opracowanie wytycznych projektowania ścian murowych w danym systemie. Przykłady i opisy takich badań można znaleźć w publikacjach [10, 11].

Prostym sposobem weryfikacji kryteriów odporności ogniowej ścian murowych są tabele, w których podano minimalną grubość ścian w przypadku danego poziomu odporności ogniowej. Sprawdzeniu podlega grubość projektowanej ściany. W przypadku, gdy jest ona większa od minimalnej grubości podanej w tabeli, to przyjmuje się, że odporność ogniowa ściany jest wystarczająca. W tabelach podanych w aktualnie obowiązującej normie [2] wiele rodzajów ścian murowych nie ma określonej minimalnej grubości lub podano szerokie przedziały wartości minimalnej grubości. Zastosowanie prostej metody tabelarycznej jest więc obecnie w wielu przypadkach ograniczone, co utrudnia projektowanie budynków.

For the case of calculation methods the analysis of structure in fire situation includes few steps:

1) **selection of the appropriate fire scenario** describing the course of the temperature changes during the fire with the application of information and detailed models given in the code PN-EN 1991-1-2 [12];

2) **conducting the thermal analysis of structure**, i.e. determination of temperature distribution for the individual points of the structure for a given moment in time of fire duration according to assumed fire scenario;

3) **carrying out the mechanical analysis of structure** – determination of the structure response to a given temperature field;

4) **verification of the appropriate criteria for fire resistance**.

In order to conduct the complex analysis of masonry structures it is necessary to determine the values of numerous physical, thermal and mechanical parameters for masonry elements and mortars applied for the structure as well as the factors determining (qualitative and quantitative) the effect of heat flow in fire situation. Advanced models are rather seldom used in practice. More frequently is applied the simplified method based on the reduced cross-section proposed in code [2]. Examples of practical use of simplified method as well as resulting conclusions are presented in [13, 14].

### New European code prEN 1996-1-2:2022

New European code prEN 1996-1-2:2022, regarding the masonry structures design in fire situation, takes into account the experiences collected during the time of application of the first generation of Eurocodes. They caused that the detailed scope and arrangement of contents of pre-standard prEN 1996-1-2:2022 [3] were subjected to many changes in comparison with the code PN-EN 1996-1-2 [2]. The main text of the pre-standard includes only 18 pages and consists of 7 chapters. This is one of the few European codes for which the total volume of the main text was reduced in comparison with the currently valid document. The foreword was omitted and some chapters were shortened, but for both version the same general requirements and definitions apply.

Significant changes were introduced within the frame of codes appendixes. Appendix A, where there were given the general guidelines as to the parameters influencing the behaviour of masonry walls in fire, was completely removed from the new code. There was also omitted the simplified calculation method based on the reduced cross-section which was included in Appendix C of the code [2]. There was introduced completely new information as to the determination of material properties for the analysis of structure in fire situation (Appendix B of code [3]). Finally, in pre-standard [3] there are included 3 appendixes instead of 5 as in the current version.

The basic condition that should be satisfied for masonry structures in fire situation didn't change:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (1)$$

Analiza konstrukcji w sytuacji pożarowej z wykorzystaniem metod obliczeniowych obejmuje kilka etapów:

1) **wyбір właściwego scenariusza pożarowego**, opisującego przebieg zmian temperatury w czasie trwania pożaru z wykorzystaniem informacji i szczegółowych modeli podanych w normie PN-EN 1991-1-2 [12];

2) **przeprowadzenie analizy termicznej**, czyli określenie rozkładu temperatury w poszczególnych punktach konstrukcji w danej chwili trwania oddziaływania pożarowego wg przyjętego scenariusza pożarowego;

3) **dokonanie analizy mechanicznej**, czyli ustalenie odpowiedzi konstrukcji murewnej na zadane pole temperatury;

4) **weryfikacja odpowiednich kryteriów odporności ogniowej**.

W celu przeprowadzenia kompleksowej analizy konstrukcji murowych konieczna jest znajomość wielu parametrów fizykochemicznych oraz mechanicznych zastosowanych w konstrukcji elementów murowych oraz zapraw, a także parametrów determinujących zjawisko przepływu ciepła w sytuacji pożaru. Zaawansowane modele są w praktyce stosowane niezwykle rzadko. Częściej wykorzystuje się natomiast zaproponowaną w normie [2] metodę uproszczoną bazującą na przekroju zredukowanym. Przykłady zastosowania metody uproszczonej i wnioski z nich wynikające przedstawiono w pracach [13, 14].

### Nowa norma europejska prEN 1996-1-2:2022

Nowa norma europejska prEN 1996-1-2:2022 dotycząca projektowania konstrukcji murowych z uwagi na warunki pożarowe uwzględnia doświadczenia zebrane przez okres stosowania pierwszej generacji Eurokodów. Spowodowały one, że szczegółowy zakres i układ treści projektu normy prEN 1996-1-2:2022 [3] uległy wielu zmianom w porównaniu z normą PN-EN 1996-1-2 [2]. Tekst główny projektu nowej wersji normy liczy 18 stron i składa się z 7 rozdziałów. Jest to jedna z niewielu norm europejskich, których objętość części podstawowej uległa zmniejszeniu w stosunku do obecnie obowiązującego dokumentu normowego. Zrezygnowano z przedmowy i skrócono niektóre rozdziały, natomiast w obu wersjach obowiązują te same wymagania ogólne i definicje.

Znaczne zmiany dotyczą załączników do normy. Z nowej wersji normy usunięto Załącznik A, w którym podane są ogólne wskazówki dotyczące czynników wpływających na zachowanie ścian murowych w warunkach pożaru i ustalania odporności ogniowej na podstawie badań. Zrezygnowano również z uproszczonej metody obliczeń na podstawie przekroju zredukowanego, zamieszczonej w Załączniku C normy [2]. Wprowadzono natomiast zupełnie nowe informacje o sposobie określania cech materiałowych do przeprowadzenia analizy konstrukcji w warunkach pożarowych (Załącznik B normy [3]). Ostatecznie w projekcie normy [3] zamieszczono 3 załączniki zamiast 5, jak w wersji dotychczasowej.

Warunek podstawowy, jaki muszą spełniać konstrukcje murowe w sytuacji pożarowej, nie uległ zmianie:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (1)$$

where:

$E_{d,fi}$  – design value of actions effect in fire situation determined according to the code [12], taking into account the effects of thermal strains;

$R_{d,fi}$  – corresponding load-bearing capacity in fire situation.

Compliance with this condition should be demonstrated on the base of structural analysis according to the code prEN 1990:2020 [15]. New code version [3] states that this condition may also be satisfied by tabulated data or based on the fire tests results. Tabulated data method is given in the pre-standard in Appendix A. This appendix has normative character, and not informative one like all the others appendixes to the new code [3] that includes the details for calculation methods.

So the basic method of fire resistance verification for masonry walls will probably remain codes **tables with given values of minimum walls thickness ( $t_f$ )**. Values of tabulated data adopted in previous codes were based on the fire tests results. For the case of code [2] they were mainly tests executed in different countries, often still according to national regulations and not according to codes [8, 9], and that is why there was no full compliance as to the values of minimum required wall thickness. Analysis and researches of this type were conducted also in our country. As a consequence, the code of the Eurocode first generation didn't include the specific values of  $t_f$  but the ranges of this parameter – in some cases quite wide. Within the range of work of teams preparing the new code version, there were gathered documentation and fire test results from the member countries that finally constituted the basis for proposed values, but this process concerned mainly the load-bearing walls. As a result of these researches and analysis, while working out the new code there were only used results obtained based on procedures given in codes [8, 9] and the modified in such manner values were finally included in Appendix A of the new code [3]. There should be pointed out here one important change with quantitative character, concerning the minimum thickness for walls with given material and structural solution and required fire resistance level. In the code EN 1996-1-2:2005 [4] and currently used in Poland PN-EN 1996-1-2 [2] for many cases there were given ranges of values for minimum wall thickness (for ex. :100/140 mm), whereas the new code version [3] applies almost exclusively the single value, which is almost always the minimum value from previously given range. Including the specific value of minimum wall thickness instead of the values range is beneficial from practical design reasons. Designers will not have to carry out any additional analysis in order to estimate which values from the given range is appropriate for their case – this will accelerate and simplify the process of building design. Exemplary comparison of minimum thickness for walls load-bearing capacity (REI criterion) determined based on tabulated data from [2] and [3] is presented in fig. 1.

In Poland there are traditionally applied load-bearing masonry walls with the thickness not smaller than 180 mm. It results, among the others, from the requirements of currently valid code PN-EN 1996-1-1 [16], where the value of 180 mm is recommended as minimum thickness for structural stiffening walls. In table there are presented the results of conducted

gdzie:

$E_{d,fi}$  – obliczeniowy efekt oddziaływań w warunkach pożarowych, wyznaczony zgodnie z normą [12], uwzględniający efekty odkształceń termicznych;

$R_{d,fi}$  – odpowiadająca nośność obliczeniowa w sytuacji pożarowej.

Spełnienie tego warunku należy wykazać na podstawie analizy konstrukcji zgodnie z normą prEN 1990:2020 [15]. Nowa wersja normy [3] podaje, że spełnienie warunku (1) można również wykazać, stosując metodę tabelaryczną lub wykorzystując wyniki badań ogniowych. Metodę tabelaryczną podano w Załączniku A nowej wersji normy. Ma on charakter normatywny, a nie informacyjny, jak pozostałe załączniki, które podają szczegóły dotyczące metod obliczeniowych.

Podstawowym sposobem weryfikacji odporności ogniowej ścian murowych pozostaną więc zapewne zamieszczone w normie **tabele z minimalną grubością ścian ( $t_f$ )**. Wartości tabelaryczne przyjmowane w dotychczasowych normach bazowały na wynikach badań doświadczalnych. W przypadku normy [2] były to przede wszystkim testy wykonane w różnych krajach, często jeszcze wg krajowych procedur, a nie norm [8, 9], i dlatego też nie było pełnej zgodności co do wartości minimalnej grubości ścian. Analizy i badania tego typu prowadzono również w naszym kraju. W konsekwencji norma pierwszej generacji Eurokodów nie zawierała konkretnych wartości  $t_f$ , a przedziały tego parametru były w wielu przypadkach dość szerokie. W ramach prac zespołu opracowującego nową wersję normy europejskiej zebrano z krajów członkowskich dokumentację i wyniki badań ogniowych ścian murowych, które stanowią podstawę proponowanych wartości tabelarycznych. Proces ten dotyczył przede wszystkim ścian nośnych. Przy opracowaniu nowej normy uwzględniono tylko wyniki uzyskane na podstawie badań zgodnych z procedurami badawczymi podanymi w normach [8, 9] i zmodyfikowane wartości zamieszczono ostatecznie w Załączniku A nowej wersji normy [3]. Należy w tym miejscu wskazać jedną istotną zmianę o charakterze ilościowym, dotyczącą minimalnej grubości ścian w przypadku danego rozwiązania materiałowo-konstrukcyjnego i wymaganego poziomu odporności ogniowej. W normie EN 1996-1-2:2005 [4] oraz obowiązującej w Polsce PN-EN 1996-1-2 [2] podawano w wielu przypadkach przedział wartości minimalnej grubości ściany, np. 100/140 mm, podczas gdy w projekcie nowej wersji normy [3] operuje się już niemal wyłącznie jedną wartością. Prawie zawsze jest to wartość najmniejsza z podawanego wcześniej przedziału. Podanie konkretnej minimalnej grubości ściany zamiast przedziału wartości jest bardzo korzystne ze względów projektowych. Projektanci nie będą bowiem musieli wykonywać dodatkowych analiz w celu oceny, która wartość z przedziału jest w danym przypadku właściwa. Przyspieszy to więc i uprości proces projektowania budynków. Przykładowe porównanie minimalnych grubości ścian nośnych (kryterium REI), określonych na podstawie danych tabelarycznych, zamieszczonych w [2 i 3], przedstawiono na rysunku 1.

W Polsce tradycyjnie stosowane są konstrukcyjne ściany murowe o grubości nie mniejszej niż 180 mm. Wynika to m.in. z zapisów obecnie obowiązującej normy PN-EN 1996-1-1 [16], która zaleca grubość 180 mm jako minimalną w przypadku usztywniających ścian konstrukcyjnych. W tabeli po-

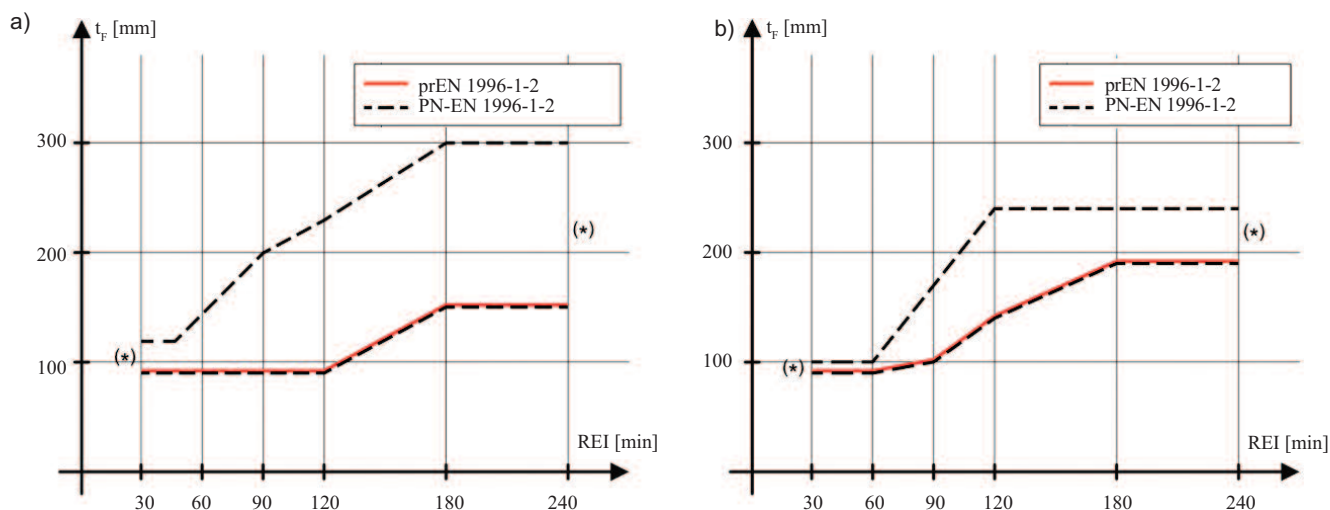


Fig. 1. Comparison of masonry wall minimum thickness required for fire resistance according to tabulated data in [2 and 3]: a) values for masonry walls from autoclaved aerated concrete masonry units ( $2 \text{ MPa} \leq f_b \leq 4,0 \text{ MPa}$ ;  $350 \leq \rho \leq 500$ ); b) values for masonry walls from clay units of group 2 ( $5 \text{ MPa} \leq f_b \leq 35 \text{ MPa}$ ;  $800 < \rho \leq 2200$ ); (\*) range of values;  $f_b$  – normalized compressive strength for masonry units;  $\rho$  – volume density of masonry units in  $\text{kg/m}^3$

Rys. 1. Porównanie minimalnej grubości ścian murowych, podanych w tabelach normowych zamieszczonych w [2 i 3] w przypadku ścian: a) z bloczków z betonu komórkowego ( $2 \text{ MPa} \leq f_b \leq 4,0 \text{ MPa}$ ;  $350 \leq \rho \leq 500$ ); b) z elementów ceramicznych grupy 2 ( $5 \text{ MPa} \leq f_b \leq 35 \text{ MPa}$ ;  $800 < \rho \leq 2200$ ); (\*) przedział wartości;  $f_b$  – znormalizowana wytrzymałość na ściskanie elementów murowych,  $\rho$  – gęstość objętościowa elementów murowych w  $\text{kg/m}^3$

analysis based on the tables from Appendix A of the new code [3] – fire resistance (REI criterion) for load-bearing walls constructed from different masonry elements type with thickness equal to 180 mm are compiled, whereby there were taken into account walls from masonry elements of group 1S, 1 and 2.

From this summary it may be concluded that masonry walls with thickness 180 mm meet the REI criterion or in many cases – even higher. This results are very satisfactory. But still for many structural and material solutions there are not given in tables in Appendix A of the code [3] numerical values for wall thickness, that will cause the necessity of fire resistance verification by the other methods.

Significant changes introduced by the prEN 1996-1-2 [3] concern the calculation methods applied for the verification of masonry walls fire resistance. In pre-standard all information as to the calculation methods is provided in Appendix B (informative) titled „Entry parameteres for calculation methods”. The basis for the proposed changes within this document constituted conducted experimental researches that

**Comparison of values of fire resistance for separating load-bearing masonry walls with thickness equal to 180 mm (criteria REI) – walls from masonry elements group 1S, group 1 or group 2 – mortars: general purpose, thin layer, lightweight – masonry walls with filled joints**

Odporność ogniowa oddzielających nośnych ścian murowych o grubości 180 mm (kryteria REI) – ściany z elementów murowych grupy 1S, grupy 1 lub grupy 2 na zaprawach zwykłych, do cienkich spoin lub lekkich z wypełnionymi spoinami

REI	Type of masonry elements for wall construction/Rodzaj elementów murowych, z których wykonano ścianę				
	ceramic/ceramiczne	silicate/silikatowe	light concrete/beton lekki	concrete/beton zwykły	autoclaved aerated concrete/autoklawizowany beton komórkowy
REI120*)	180	180	240	240	240

Note 1: values given in table concern walls with gipsium plaster on both sides with thickness at least equal to 1 mm or other plaster increasing wall fire resistance according to [3]/Uwaga 1: podane w tabeli wartości dotyczą ścian z obustronnym tynkiem gipsowym o grubości co najmniej 10 mm lub innym tynkiem zwiększającym odporność ogniową ścian wg [3]

Note 2: values given in table correspond to the load level  $\mu_0 \leq 0,7$  – coefficient  $\mu_0$  is the ratio of design vertical load for wall in fire situation to design capacity of wall according to PN-EN 1996-1-1/Uwaga 2: podane w tabeli wartości odpowiadają poziomowi obciążenia  $\mu_0 \leq 0,7$  – współczynnik  $\mu_0$  jest ilorazem obliczeniowego obciążenia pionowego ściany w sytuacji pożaru do nośności obliczeniowej ściany zgodnie z PN-EN 1996-1-1.

\*) except walls with ceramic elements of group 1 with density less than  $1000 \text{ kg/m}^3$ , for which REI90/z wyjątkiem ścian z elementów ceramicznych grupy 1 o gęstości mniejszej niż  $1000 \text{ kg/m}^3$ , w przypadku których REI90

dano wyniki przeprowadzonej przez nas analizy na podstawie tabel zamieszczonych w Załączniku A nowej wersji normy [3]. Zestawiono odporność ogniową (kryterium REI) ścian konstrukcyjnych z różnych rodzajów elementów murowych w przypadku grubości ściany 180 mm, przy czym uwzględniono ściany z elementów murowych grup: 1S; 1 oraz 2.

Z zestawienia wynika, że ściany murowe o grubości 180 mm spełniają kryterium REI120, a w wielu przypadkach nawet je przekraczają. Są

to bardzo satysfakcjonujące wyniki. Nadal jednak w przypadku wielu rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych ścian murowych nie podano wartości liczbowych w tabelach z Załącznika A nowej normy [3], co powoduje konieczność weryfikacji odporności ogniowej innymi metodami.

Istotne zmiany wprowadzane normą prEN 1996-1-2 [3] dotyczą metod obliczeniowych stosowanych do weryfikacji odporności ogniowej ścian murowych. W projekcie nowej wersji normy wszystkie informacje dotyczące metod obliczeniowych podano w Załączniku B (informacyjnym), który zatytułowano „Parametry/dane wejściowe do modeli obliczeniowych”. Podstawę wprowadzonych w tym dokumencie zmian

are described in publications [5, 6, 7]. It was stated that simplified method based on the reduced cross-section was not sufficiently experimentally verified and that is why it was omitted – as previously mentioned – from the new code text together with all design aids (for ex.: temperature profiles for walls cross-section for different types of masonry materials).

But it was preserved in the pre-standard [3], without any changes or modifications in comparison with code [2], relationships for determining design values of physical and thermal properties (density, thermal conductivity, specific heat) for different masonry elements that are used for thermal analysis. As for the determination of mechanical properties, there are introduced changes in defining reduction coefficient  $k_\theta$ , which is the function of the temperature. Values of mechanical properties  $X$  for a given temperature level  $\theta$  are determined as  $k_\theta X$  and hence design values may be presented as:

$$X_{d,fi} = k_\theta X_k / \gamma_{M,fi} \quad (2)$$

where:

$X_k$  – characteristic value of material property at normal temperature conditions;

$\gamma_{M,fi}$  – partial safety factor for appropriate material property in fire conditions.

In the code version [3] it was assumed that the value of material property at given temperature may be expressed as second degree polynomial:

$$X_\theta = A_0 + A_1 \theta + A_2 \theta^2 \quad (3)$$

where:

$A_0, A_1, A_2$  – parameters determined on the base of analysis of regression curve for experimental results.

Ultimately, then reduction coefficient may be defined as:

$$k_\theta = 1 + (A_1/A_0)\theta + (A_2/A_0)\theta^2 \quad (4)$$

Values of mechanical parameters determined within the application of this formula constitute the basis of calculation analysis for masonry walls in fire conditions. There are admitted two methods for determining parameters ( $A_0, A_1, A_2$ ) in equations (3 and 4). First method is testing the samples made of considered material according to detailed procedure [17, 18] and then analysis of obtained results to define the required parameters with the aid of statistic tools. In the second approach, there may be used directly data given in appendix which are presented in the form numerical values of parameters ( $A_1/A_0$  and  $A_2/A_0$ ) from equation (4).

In fig. 2 there are given values of coefficient  $k_\theta$  for compressive strength determined according to new code [3]. It is worth noticing that code [3] doesn't specify the values for ceramic elements – for this case values in fig. 2 were calculated based on results presented in publications included as bibliography for the code [3]. Values of  $k_\theta$  for ceramic are then very close to results obtained based on the current code [2] – differences are within the range of 5%.

According to graphs in fig. 2, for temperatures exceeding 400°C there is observed significant decrease in masonry materials parameters. For temperature level 700°C reduc-

stanowiły analizy i zrealizowane badania doświadczalne, które zostały opisane m.in. w publikacjach [5, 6, 7]. Stwierdzono, że metoda bazująca na przekroju zredukowanym nie została wystarczająco zweryfikowana doświadczalnie i w związku z tym usunięto ją – jak już wcześniej wspomniano – z tekstu nowej normy wraz z wszystkimi pomocami projektowymi, np. rozkładami/profilami temperatury w przekroju muru z różnych rodzajów materiałów.

W projekcie nowej wersji normy zachowano natomiast, bez żadnych zmian czy modyfikacji w porównaniu z normą [2], zależności do określania wartości obliczeniowych właściwości fizycznych i termicznych (gęstość, przewodność cieplna, ciepło właściwe) różnych elementów murowych, które stosowane są do analizy termicznej. W przypadku określania właściwości mechanicznych wprowadzono zmiany w definiowaniu współczynnika redukcyjnego  $k_\theta$ , który jest funkcją temperatury. Wartości właściwości mechanicznych  $X$  przy danym poziomie temperatury  $\theta$  określa się jako  $k_\theta X$  i dlatego wartości obliczeniowe podaje wzór:

$$X_{d,fi} = k_\theta X_k / \gamma_{M,fi} \quad (2)$$

gdzie:

$X_k$  – wartość charakterystyczna cechy materiałowej w temperaturze zwykłej;  
 $\gamma_{M,fi}$  – częściowy współczynnik bezpieczeństwa w przypadku odpowiedniej cechy materiałowej w sytuacji pożarowej.

W nowej wersji normy [3] przyjęto, że wartość cechy materiałowej w danej temperaturze może być wyrażona jako wielomian drugiego stopnia:

$$X_\theta = A_0 + A_1 \theta + A_2 \theta^2 \quad (3)$$

gdzie:

$A_0, A_1, A_2$  – parametry określone na podstawie analizy krzywej regresji wyników badań eksperymentalnych.

Ostatecznie, współczynnik redukcyjny może być zdefiniowany jako:

$$k_\theta = 1 + (A_1/A_0)\theta + (A_2/A_0)\theta^2 \quad (4)$$

Określone przy wykorzystaniu tej formuły wartości parametrów mechanicznych są podstawą analiz obliczeniowych dotyczących nośności ścian murowych w warunkach pożarowych. Dopuszczono dwa możliwe sposoby ustalania parametrów  $A_0, A_1, A_2$  występujących w równaniach (3 i 4). Pierwszy z nich to przeprowadzenie badań na próbkach wykonanych z rozważanego materiału wg dokładnie określonej procedury [17, 18], a następnie analiza uzyskanych wyników w celu określenia wymaganych parametrów, z wykorzystaniem narzędzi statystycznych. W drugim przypadku można wykorzystać bezpośrednio dane zamieszczone w załączniku nowej wersji normy w postaci wartości liczbowych parametrów  $A_1/A_0$  i  $A_2/A_0$ , występujących w równaniu (4).

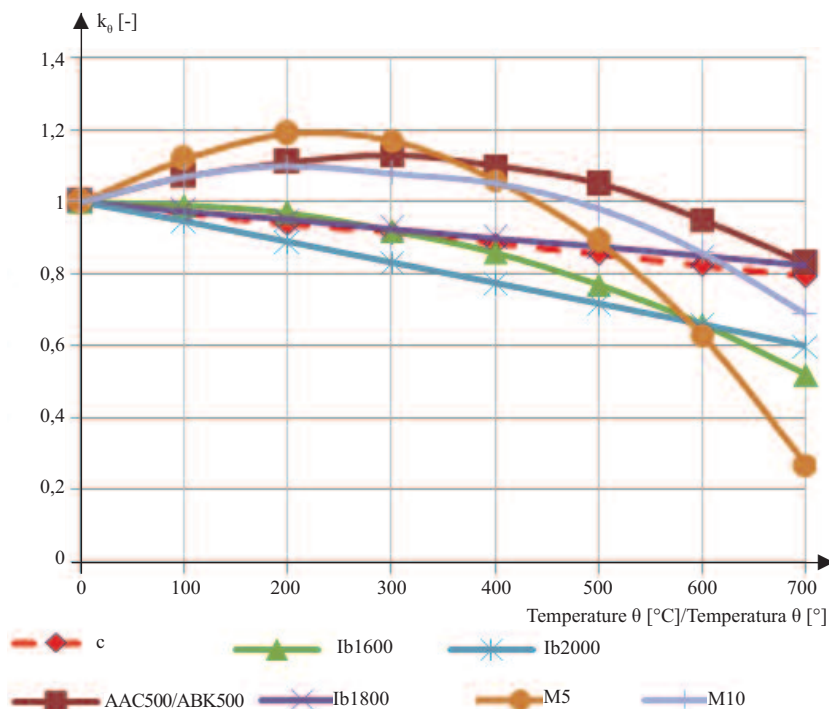
Na rysunku 2 podano wartości współczynnika  $k_\theta$ , w odniesieniu do wytrzymałości na ściskanie, określone zgodnie z nową wersją normy [3]. Warto zaznaczyć, że w normie tej nie zamieszczono wartości współczynnika  $k_\theta$  w przypadku ceramiki, dlatego też na rysunku 2 podano je, wykorzystując wyniki badań przedstawionych w publikacjach zamieszczonych jako bibliografia do nowej wersji normy [3]. Są one bardzo zbliżone do wartości podanych w aktualnie obowiązującej normie [2], gdyż różnice nie przekraczają 5%.

tion in compressive strength reaches the value from 76% (mortar M5) to 17% (autoclaved aerated concrete). It may be stated that new Appendix B in [3] provides detailed procedures that may lead to reliable data in the form of defined material properties as a function of fire temperature. Detailed data are yet included only for selected group of materials from which masonry elements are produced and only for two types of mortars. For other cases it is necessary to

carry out experimental tests according to appropriate code procedures. Simultaneously, it is worth emphasizing that reliable data for materials constitute the basis for all advanced calculation methods for thermo-mechanical analysis of different masonry structures [19 ÷ 23] (for ex.: walls with the openings). Each of the advanced calculation method should be based on the recognized principles and assumptions as to the heat flow theory and mechanics of structure, taking into account the change in material properties as the effect of fire temperature. All calculation methods should be positively experimentally verified. As in the pre-standard [3] there was omitted the simplified calculation method, in practice the fire resistance verification for masonry walls by calculation methods will be rather seldom applied – the basic method of verification will remain tabulated data method.

## Summary

Detailed calculation analysis for masonry walls in fire situations is a complex issue due to numerous factors conditioning the behaviour of walls at elevated temperatures. The basic factors influencing the fire resistance of masonry walls are: type of materials (masonry elements and mortar) used for construction, geometrical parameters of wall (thickness, height), load level, type and method of surface finishing. Additionally, in analysis there should be taken into



**Fig. 2.** Values of  $k_0$  for different masonry materials according to [3]: AAC500 – autoclaved aerated concrete with density of 500 kg/m<sup>3</sup>; Ib1600, Ib1800, Ib2000 – light concrete with density of 1600, 1800 and 2000 kg/m<sup>3</sup>, respectively; M5 – mortar with strength 5 MPa; M10 – mortar with strength 10 MPa, c – ceramic; ( $f_0$  – compressive strength for material at temperature level  $\theta$ )

*Rys. 2.* Wartości współczynnika  $k_0$  różnych materiałów murowych wg [3]: ABK500 – autoklawizowany beton komórkowy o gęstości 500 kg/m<sup>3</sup>; Ib1600, Ib1800, Ib2000 – betony lekkie o gęstości odpowiednio 1600, 1800 i 2000 kg/m<sup>3</sup>; M5 – zaprawa o wytrzymałości 5 MPa; M10 – zaprawa o wytrzymałości 10 MPa; c – ceramika ( $f_0$  – wytrzymałość na ściskanie materiału w temperaturze  $\theta$ )

Jak wynika z rysunku 2, w temperaturze powyżej 400°C następuje wyraźny spadek wytrzymałości materiałów murowych. W temperaturze 700°C redukcja wytrzymałości na ściskanie wynosi od 76% (zaprawa M5) do 17% (autoklawizowany beton komórkowy). Należy podkreślić, że nowy Załącznik B podaje szczegółowe procedury, które mają służyć uzyskaniu wiarygodnych danych w postaci zdefiniowania cech materiałowych w funkcji narastającej temperatury pożarowej. Szczegółowe dane dotyczą w normie jedynie wybranej grupy materiałów, z których produkowane są elementy murowe, oraz dwóch rodzajów zapraw. W pozostałych przypadkach wymagane jest wykonanie badań doświadczalnych wg odpowiednich procedur normowych.

Należy jednocześnie podkreślić, że wiarygodne dane materiałowe są podstawą wszystkich zaawansowanych modeli obliczeniowych do przewidywania termomechanicznego zachowania różnych konstrukcji murowych [19 ÷ 23]. Każda z zaawansowanych metod obliczeniowych powinna bazować na uznanych zasadach i założeniach teorii przepływu ciepła oraz mechaniki konstrukcji, uwzględniających zmianę właściwości mechanicznych materiałów murowych wraz z temperaturą. Metody takie powinny zostać pozytywnie zweryfikowane doświadczalnie. W związku z tym, że z nowej normy [3] usunięto metodę uproszczoną, w praktyce weryfikacja odporności ogniowej ścian murowych na podstawie obliczeń będzie, naszym zdaniem, rzadko stosowana. Podstawową metodą weryfikacji pozostanie metoda tabelaryczna.

## Podsumowanie

Szczegółowa analiza obliczeniowa ścian murowych w warunkach pożarowych jest zagadnieniem złożonym ze względu na wiele czynników, które warunkują zachowanie się ścian podczas działania temperatury pożarowej. Do podstawowych czynników wpływających na odporność ogniową ścian murowych zaliczyć należy: rodzaj materiałów (elementów murowych i zapraw) użytych do wykonania konstrukcji murowej; parametry geometryczne ściany (grubość, wysokość), poziom jej wyteżenia; rodzaj i sposób wykończenia powierzch-

account the appropriate, realistic fire scenario, changes in material properties as the effect of high temperature as well as thermal strains and deformations of walls. Hence, codes for design of masonry structures in fire situations provide also other than calculation analysis methods for fire resistance verification.

Most frequently used in design practice is tabulated data method that is also presented in pre-standard [3] elaborated within the process of preparation of the second generation of Eurocodes. In new version of code prEN 1996-1-2 [3] there were taken into account results of researches and analysis from the last dozen of years. As it was indicated in the paper, load-bearing masonry walls with the thickness traditionally applied in Poland are characterised with the high fire resistance.

Values in codes for tabulated data don't cover all possible cases for walls – for several situations it is thus necessary to carry out experimental tests and/or calculation analysis. In European codes worked out many years ago there were included procedures for testing masonry walls and such researches are being conducted in many laboratories. But the new code prEN 1996-1-2 [3] gives additional recommendations as to the methods of determination of mechanical parameters for masonry materials that is essential within the process of creation and verification of calculation models for masonry structures and analysis of such types of objects in fire situations. Providing the unified procedures for masonry materials testing in fire temperatures is particularly important for the cases of new material solutions that still appear due to the dynamic development of building market.

Received: 28.01.2024  
Revised: 15.09.2024  
Published: 22.10.2024

ni. Dodatkowo w analizach należy uwzględnić odpowiedni realistyczny scenariusz pożarowy, zmienność cech materiałowych w funkcji temperatury oraz odkształcenia termiczne i deformacje ścian. Z tych względów normy projektowania konstrukcji murowych w warunkach pożarowych podają inne, poza analizą obliczeniową, metody weryfikacji odporności ogniowej ścian murowych.

Najczęściej w praktyce projektowej stosowana jest metoda tabelaryczna, uwzględniona również w nowej wersji normy opracowanej w procesie tworzenia drugiej generacji Eurokodów. W nowej wersji normy prEN 1996-1-2 [3] uwzględniono wyniki badań i analiz z ostatnich kilkunastu lat. Jak wykazano w artykule, ściany murowe konstrukcyjne o grubościach tradycyjnie stosowanych w Polsce charakteryzują się dużą odpornością ogniową.

Dane w tabelach normowych nie obejmują wszystkich możliwych przypadków ścian. W wielu sytuacjach konieczne jest więc prowadzenie odpowiednich badań doświadczalnych i/lub analiz obliczeniowych. W normach europejskich opracowanych wiele lat temu podano procedury badania ścian murowych i takie badania są prowadzone w specjalistycznych laboratoriach. Nowa norma prEN 1996-1-2 [3] zawiera natomiast dodatkowo zalecenia dotyczące sposobów określania parametrów mechanicznych materiałów murowych w danej temperaturze, co ma podstawowe znaczenie w procesie tworzenia i weryfikacji modeli obliczeniowych konstrukcji murowych i analizach tych konstrukcji w warunkach pożarowych. Podanie normowych ujednoczonych procedur badań materiałów murowych w wysokiej temperaturze jest szczególnie ważne w przypadku nowych rozwiązań materiałowych, które wciąż pojawiają się na skutek dynamicznego rozwoju rynku materiałów budowlanych.

Artykuł wpłynął do redakcji: 28.01.2024 r.  
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 15.09.2024 r.  
Opublikowano: 22.10.2024 r.

## Literature

- [1] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z 27 października 2023 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie – Dz.U. 2023 poz. 2442.
- [2] PN-EN 1996-1-2:2010 – Eurokod 6 – Projektowanie konstrukcji murowych – Część 1-2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe, 2010.
- [3] prEN 1996-1-2:2022 – Eurocode 6 – Design of masonry structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, September 2022.
- [4] EN 1996-1-2:2005 – Eurocode 6 – Design of masonry structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, 2005.
- [5] Andreini M, Caciolai M, La Mendola S, Mazziotti L, Sassu M. Mechanical behaviour of masonry materials at high temperatures. *Fire and Materials*. 2015; 39 (1): 41 – 57.
- [6] Andreini M, De Falco A, Sassu M. Stress-strain curves for masonry materials exposed to fire action. *Fire Safety Journal*. 2014; 69.
- [7] Meyer U, van der Pluijm R, Andreini M, Pettit G, Miccoli L. Design of masonry panels subjected to fire in Europe: an overview on the new draft of EN 1996-1-2, Proceedings of the 17th International Brick and Block Masonry Conference (IB2MaC 2020), July 5-8th 2020, Kraków, Poland, CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group, 2020.
- [8] EN 1363-1 Fire resistance tests – Part 1: General requirements.
- [9] EN 1365-1 Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 1: Walls.
- [10] Chudyba K, Matysek P. Odporność ogniowa ścian murowych. *Czasopismo Techniczne/Technical Transactions*, 2-B/2011, zeszyt 18, rok 108, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, ISSN 0011-4561, str. 3-22.
- [11] Chudyba K, Matysek P. Projektowanie ścian murowych z uwagi na warunki pożarowe w świetle wymagań Eurokodów. *Materiały Budowlane*. 2012; 7 (479): 84 – 87.

- [12] PN-EN 1991-1-2:2006: Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-2: Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.
- [13] Chudyba K, Kozłowski K. Określanie odporności ogniowej ścian murowych metodą uproszczoną wg PN-EN 1996-1-2. *Materiały Budowlane*. 2014; 7 (503): 10 – 12.
- [14] Turkowski P, Roszkowski P, Sulik P. Projektowanie konstrukcji murowych z uwagi na warunki pożarowe według Eurokodu 6, ITB 2016.
- [15] prEN 1990:2020: Basis of structural design.
- [16] PN-EN 1996-1-1:2010 – Eurokod 6 – Projektowanie konstrukcji murowych – Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych, 2010.
- [17] EN 12390-1 Testing hardened concrete – Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds.
- [18] EN 12390-3 Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens.
- [19] Andreini M, Sassu M. Behavior of masonry walls subjected to fire: experimental tests and analytical model. Proceedings of SEMC 2010, September 2010, Cape Town – South Africa. In *Advances and Trends in Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Press/Balkema, Leiden, 2010.
- [20] O'Meagher AJ, Bennets ID. Modelling of concrete walls in fire, *Fire Saf. J*. 1991; 17: 315 – 335.
- [21] Nadjai A, O'Garra M, Ali FA. Finite element modelling of compartment masonry walls in fire, *Comput. Struct.* 81 (18-19) 2003: 1923 – 1930.
- [22] Nadjai A, O'Garra M, Ali FA, Laverty D. A numerical model for behavior of masonry under elevated temperature. *Fire Mater.* 2003; 27: 163 – 182.
- [23] Nguyen TD, Fekri M, Chammas R, Mebarki A. The behaviour of masonry walls subjected to fire: modelling and parametrical studies in the case of hollow burnt-clay bricks. *Fire Saf. J*. 2009; 44: 629 – 641.