

STRUCTURE AND ENVIRONMENT

ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENTAL ENGINEERING, ENERGY AND GEOMATIC

No. 3/2018 vol. 10 PL ISSN 2081-1500 www.sae.tu.kielce.pl KIELCE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Contents

structure

MAREK TELEJKO, ALEKSANDRA STACHERA

THERMAL COMFORT IN UNIVERSITY COMPUTER LABORATORIES

KOMFORT CIEPLNY W PRACOWNIACH KOMPUTEROWYCH UCZELNI WYŻSZEJ 201

ANDRZEJ BOROWY, BOGDAN WRÓBLEWSKI

APPLICATION OF THE FIRE RESISTING SUSPENDED CEILINGS

ZASTOSOWANIE SUFITÓW PODWIESZONYCH O OKREŚLONEJ ODPORNOŚCI OGNIOWEJ 211

STANISŁAW PLECHAWSKI, STANISŁAW B. FIC

DIAGNOSTICS OF CONCRETE ELEMENTS AFTER THE FIRE

DIAGNOSTYKA ELEMENTÓW BETONOWYCH PO POŻARZE 223

RYSZARD DACHOWSKI, KATARZYNA KOMISARCZYK, KAMILA KOMISARCZYK

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FACTORS INCREASING THE CHARACTERISTICS OF AUTOCLAVED PRODUCTS USING THE DEMATEL METHOD

ANALIZA WPŁYWU CZYNNIKÓW KSZTAŁTUJĄCYCH CECHY TWORZYW AUTOKŁAWIZOWANYCH PRZY UŻYCIU METODY DEMATEL 237

environment

PAULINA KOSTRZEWA, ANNA STĘPIEŃ, KATARZYNA DZIADEK, ARTUR SZMIDT

TECHNOLOGICAL ASPECT OF BRICK PRODUCTION USING THE METHOD OF AUTOCLAVING

TECHNOLOGICZNE ASPEKTY PRODUKCJI CEGIEŁ METODĄ AUTOKŁAWIZACJI 249

ANATOLIY M. PAVLENKO, HANNA V. KOSHLAK

THERMAL INSULATION MATERIALS WITH POROUS STRUCTURE

MATERIAŁY TERMOIZOLACYJNE O STRUKTURZE POROWATEJ 258

ROBERT KOWALIK, LIDIA BARTKIEWICZ

OVERVIEW OF MODERN ANAEROBIC WASTEWATER TREATMENT METHODS

PRZEGLĄD NOWOCZESNYCH METOD BEZTLENOWEGO OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW 266

JOANNA CIOPIŃSKA, ELŻBIETA BEZAK-MAZUR

PHOSPHORUS SOLUBILIZING BACTERIA – REVIEW ARTICLE

BAKTERIE SOLUBILIZUJĄCE FOSFOR – PRZEGLĄD 278

ABSTRACTS 288

HOW TO PREPARE THE MANUSCRIPT 293

THE REVIEW PROCESS 294

Editor-in-Chief:

Prof. Zdzisław OWSIAK – Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology (Poland)

International Advisory Board:

Chairman: Prof. Wiesław TRĄMPczyński – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Vadim ABIZOW – Kyiv's National University of Culture and Art (Ukraine)
Prof. Satoshi AKAGAWA – Hokkaido University, Sapporo (Japan)
Prof. Tomasz ARCISZEWSKI – George Mason University (USA)
Prof. Elżbieta BEZAK-MAZUR – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Mark BOMBERG – McMaster University (Canada)
Prof. Jan BUJNAK – University of Žilina (Slovakia)
Prof. Dorota CHWIEDUK – Warsaw University of Technology (Poland)
Prof. Barbara GOSZCZYŃSKA – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Krystyna GURANOWSKA-GRUSZECKA – Warsaw University of Technology (Poland)
Prof. Jerzy HOŁA – Wrocław University of Science and Technology (Poland)
Prof. Go IWAHANA – University of Alaska Fairbanks (USA)
Prof. Lucjan KAMIONKA – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Andrej KAPJOR – University of Žilina (Slovakia)
Prof. Zbigniew KOWAL – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Tomasz KOZŁOWSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Andrzej KULICZKOWSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Jozef MELCER – University of Žilina (Slovakia)
Prof. Mikhail NEMCHINOV – Moscow State Automobile and Road Technical University MADI (Russia)
Prof. Andrzej S. NOWAK – Auburn University (USA)
Prof. Ana Cristina Dinis Vicente PARDAL – Polytechnic Institute of Beja (Portugal)
Prof. Wojciech G. PIASTA – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Jorge Cruz PINTO – Universidade de Lisboa (Portugal)
Prof. Jerzy Z. PIOTROWSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Karel POSPÍŠIL – The Transport Research Centre CDV (Czech Republic)
Prof. Claude VAN ROOTEN – Belgian Road Research Centre (Belgium)
Prof. Zbigniew RUSIN – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Wacław SERUGA – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Jacek SZEWCZYK – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Jerzy WAWRZENCZYK – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Bogdan WOLSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Maria ŻYGADŁO – Kielce University of Technology (Poland)

Associate Editors:

Prof. Lidia DĄBEK – Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering, Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Marek IWĄŃSKI – Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology (Poland)

Secretary of the Editor Board:

Łukasz ORMAN, Ph.D., D.Sc. – Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering, Kielce University of Technology (Poland)

www.sae.tu.kielce.pl

sae@tu.kielce.pl

The quarterly printed issues of Structure and Environment are their original versions

The Journal published by the Kielce University of Technology

PL ISSN 2081-1500

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2018

25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, tel. 41 34 24 581

www.wydawnictwo.tu.kielce.pl

Index Copernicus Value (ICV): 75,2.

The journal is listed in the scored journals list, with the MNiSW score = 9.



Kielce University of Technology
2018

INDEX  COPERNICUS
I N T E R N A T I O N A L



structure
structure

THERMAL COMFORT IN UNIVERSITY COMPUTER LABORATORIES

KOMFORT CIEPLNY W PRACOWNIACH KOMPUTEROWYCH UCZELNI WYŻSZEJ

DOI: 10.30540/sae-2018-020

Abstract

Thermal comfort defines the state of satisfaction of a person or a group of people with thermal conditions of the environment in which the person, or the group of people is staying. The state of satisfaction depends on the balance between the amount of heat produced by the organism in the process of metabolism and heat loss from the organism to the surrounding environment. It has an effect on the quality and efficiency at work, and indirectly also on the presence of symptoms of Sick Building Syndromes (SBS).

Due to differences in body structure, metabolism, clothing etc., it is not possible to create a satisfactory thermal environment for all the people staying in it. However, there are parameter values, which maintained at an appropriate level, allow to meet thermal expectations of even 95% of people staying in this environment. The article presents the results of tests conducted in the university computer rooms. The studies included measurements and analysis of typical internal microclimate parameters: temperature, relative humidity and CO₂ concentration. The results raised considerable reservations and therefore in order to assess fully the conditions of use, it has been decided to conduct evaluation of thermal comfort in rooms analysed. In addition, the surrounding surface radiation temperature and clothing insulation of users have been specified. On the basis of the obtained data, PPD and PMV index values were determined in accordance with the standard EN ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria [3].

Keywords: Thermal comfort, PMV, PPD, microclimate, indoor air quality

Streszczenie

Komfort cieplny określa stan zadowolenia osoby lub grupy osób z warunków termicznych środowiska, w którym osoba ta lub grupa osób przebywa. Ten stan zadowolenia zależy od równowagi pomiędzy ilością ciepła wytwarzanego przez organizm w procesie metabolizmu a stratami ciepła z organizmu do otaczającego go środowiska. Ma on wpływ na jakość i wydajność pracy, a pośrednio również na występowanie symptomów syndromów chorego budynku (SBS).

Na skutek różnic w budowie ciała, metabolizmie, ubiorze etc. nie ma możliwości stworzenia środowiska cieplnego odpowiadającego wszystkim przebywającym w nim osobom. Istnieją jednak wartości parametrów, które utrzymane na odpowiednim poziomie, pozwalają na spełnienie oczekiwań termicznych nawet 95% ludzi przebywających w tym środowisku. W artykule zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych w pomieszczeniach komputerowych uczelni wyższej. Badania obejmowały pomiary oraz analizę typowych parametrów mikroklimatu wewnętrznego: temperatury, wilgotności względnej oraz stężenia CO₂. Uzyskane wyniki budziły spore zastrzeżenia, dlatego w celu pełnej oceny warunków użytkowania zdecydowano się na przeprowadzenie oceny komfortu termicznego analizowanych pomieszczeń. Dodatkowo określono zatem temperaturę promieniowania powierzchni otaczających i izolacyjność odzieży użytkowników. Na podstawie otrzymanych danych wyznaczono wartości wskaźników PPD i PMV, zgodnie z normą EN ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria [3].

Słowa kluczowe: komfort cieplny, PMV, PPD, mikroklimat, jakość powietrza wewnętrznego

1. INTRODUCTION

The level of satisfaction with the surrounding thermal environment is called human thermal comfort [1]. Scientists have long tried to describe the human thermal environment with the help of physical variables that could be easily regulated. From the beginning of the twentieth century to the present, a lot of indices have been offered defining thermal comfort, among others: effective temperature, standard effective temperature, resulting temperature, subjective temperature, or operative temperature. However, due to the interest of individual authors only with selected parameters affecting thermal sensations, they have limited application possibilities [2]. The most satisfactory, and at the same time the most complex, approach to the problem was presented in the second half of the 20th century by professor Ole Fanger. His thermal comfort equation has been successfully used up to now and has been the basis for determining PMV and PPD indices used to specify satisfaction with local thermal comfort according to EN ISO 7730:2005 [3].

Due to differences in metabolism, ability to acclimatisation and thermal insulation of clothing of individuals staying in the same room, it is not possible to obtain such microclimate parameters which would be assessed as comfortable by all people in the room. This applies in particular to thermal comfort [2]. In addition, the sense of thermal comfort or lack of it depends on environmental factors such as [4-7, 16] air temperature in the room, air-flow rate in the room, relative humidity of the indoor air, surface radiation temperature, asymmetry of the temperature distribution in the room. Therefore, it seems extremely important to determine the thermal comfort evaluation in such rooms as selected by the authors for analysis. They are characterised by rapid and relatively large changes in the parameters listed above [8]. These changes result from the characteristic equipment of computer laboratories and the specificity of their users' behaviour (regular airing of rooms during breaks between classes).

In addition to the computational determination of PMV and PPD indices, it is still possible to assess the subjective comfort using survey tests filled by people staying in the room. For this evaluation, seven point scales of thermal comfort are used [2].

1. WPROWADZENIE

Komfortem cieplnym człowieka nazywa się poziom zadowolenia z otaczającego go środowiska cieplnego [1]. Naukowcy od dawna starają się opisać środowisko cieplne człowieka przy pomocy zmiennych fizycznych, które można byłoby w prosty sposób regulować. Od początku XX wieku do chwili obecnej zaproponowanych zostało wiele wskaźników określających komfort cieplny, m.in.: temperatura efektywna, standardowa temperatura efektywna, temperatura wynikowa, temperatura subiektywna czy też temperatura operatywna. Jednak ze względu na zainteresowanie poszczególnych twórców jedynie wybranymi parametrami wpływającymi na odczucia cieplne mają one ograniczone możliwości zastosowania [2]. Najbardziej zadowalające, a jednocześnie najbardziej złożone, ujęcie problemu przedstawił w drugiej połowie XX wieku profesor Ole Fanger. Jego równanie komfortu cieplnego stosowane jest z powodzeniem do dziś i stanowiło podstawę określenia wskaźników PMV i PPD służących do określenia zadowolenia z lokalnego komfortu cieplnego wg EN ISO 7730:2005 [3].

Ze względu na różnice w metabolizmie, zdolności do aklimatyzacji oraz izolacyjności cieplnej odzieży poszczególnych osób przebywających w tym samym pomieszczeniu nie można uzyskać takich parametrów mikroklimatu, które przez wszystkie osoby w pomieszczeniu oceniane byłyby jako komfortowe. Dotyczy to zwłaszcza komfortu cieplnego [2]. Ponadto poczucie komfortu termicznego bądź też jego braku zależy od takich czynników środowiskowych jak [4-7, 16]: temperatury powietrza w pomieszczeniu, prędkości przepływu powietrza przez pomieszczenie, wilgotności względnej powietrza wewnętrznego, temperatury promieniowania powierzchni, asymetrii rozkładu temperatury w pomieszczeniu. Zatem niezmiennie ważne wydaje się określenie oceny komfortu termicznego w takich pomieszczeniach jak wybrane przez autorów do analizy. Charakteryzują się one szybkimi i dość dużymi zmianami wymienionych powyżej parametrów [8]. Zmiany te wynikają z charakterystycznego wyposażenia pracowni komputerowych oraz specyfiki zachowań ich użytkowników (regularne wietrzenie pomieszczeń w przerwach pomiędzy zajęciami).

Poza obliczeniowym wyznaczeniem wskaźników PMV oraz PPD możliwa jest jeszcze subiektywna ocena komfortu określana przy użyciu testów ankietowych, uzupełnianych przez osoby przebywające w pomieszczeniu. Do oceny tej stosowane są siedmiostopniowe skale komfortu cieplnego [2].

2. SUBJECT AND SCOPE OF RESEARCH

The tests were conducted in two computer laboratories located on the second floor of a five-storey university building. The rooms were located in the middle part of the floor with windows overlooking only the South. The external walls of the building were insulated with styrofoam 15 cm thick and the flat roof was insulated with mineral wool 20 cm thick. The building was equipped with a gravity ventilation system. For each of the analysed rooms, with dimensions of 8.81 x 6.21 x 3.32 m, outdoor air was supplied through 2 window air inlets with a capacity of 50 m³/h. It was removed by means of two exhaust ducts 14 x 14 cm, placed approx. 20 cm from the ceiling. The tests were conducted from November 2015 to October 2017 excluding summer months.

During this time, 5 series of tests were conducted. Each measurement series lasted 7 days and the interval of recording the measured values was set to 3 minutes. During the tests, the outdoor air temperature values ranged from -8°C do +10°C and relative humidity was from 46% to 99%. Concentration of carbon dioxide in the outdoor air ranged from 380 to 630 ppm. The wind speed during the tests did not exceed the value of 5.5 m/s.

In addition to the registration of outdoor air parameters during the measurements, the registration of basic microclimate factors inside the rooms was conducted, i.e.: concentration of carbon dioxide as a quality determinant of indoor air, temperature and relative humidity of air in the rooms. In addition, the temperature of the surrounding surfaces, the air-flow rate in the room and in the ventilation ducts were measured.

3. RESULTS OF MICROCLIMATE PARAMETER MEASUREMENTS

The obtained results of microclimate measurements from all measurement series in both rooms had the same characteristic course of variability (Fig. 1). The lowest values of the parameters were recorded early in the morning, before starting classes. After starting to use the rooms, values of all measured quantities increased. If during the break the rooms were aired, there was a visible decrease in the value of the analysed parameters, especially the concentration of CO₂ and temperature. After starting the next classes in the room, the value of the measured parameters increased again. If the rooms were not aired during the break, the drop in the measured values was small or non-

2. PRZEDMIOT I ZAKRES BADAŃ

Badania prowadzone były w dwóch pracowniach komputerowych zlokalizowanych na drugiej kondygnacji pięciokondygnacyjnego budynku uczelni wyższej. Pomieszczenia zlokalizowane były w środkowej części kondygnacji z jednostronną, południową, orientacją okien. Ściany zewnętrzne budynku ocieplone były styropianem o grubości 15 cm, a stropodach ocieplono wełną mineralną grubości 20 cm. Budynek wyposażono w system wentylacji grawitacyjnej. Do każdego z rozpatrywanych pomieszczeń, o wymiarach 8,81 x 6,21 x 3,32 m, powietrze zewnętrzne dostarczane było poprzez dwa okienne nawiewniki powietrza o wydajności 50 m³/h. Usuwane zaś poprzez dwa kanały wywiewne o wymiarach 14 x 14 cm, umieszczone w odległości ok. 20 cm od stropu. Badania prowadzone były od listopada 2015 do października 2017 r. z pominięciem miesięcy letnich.

W tym czasie zrealizowano pięć serii badań. Każda seria pomiarowa trwała siedem dni, a interwał zapisu mierzonych wartości ustalono na trzy minuty. W trakcie badań wartości temperatury powietrza zewnętrznego wynosiły od -8°C do +10°C, a wilgotność względna 46÷99%. Stężenie dwutlenku węgla w powietrzu zewnętrznym wahało się w zakresie 380÷630 ppm. Prędkość wiatru w trakcie prowadzenia badań nie przekraczała wartości 5,5 m/s.

Poza rejestracją parametrów powietrza zewnętrznego w czasie pomiarów prowadzono rejestrację podstawowych czynników mikroklimatu wewnątrz pomieszczeń, tj.: stężenia dwutlenku węgla jako wyznacznika jakości powietrza wewnętrznego, temperatury oraz wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniach. Dodatkowo mierzono temperaturę powierzchni otaczających, prędkość przepływu powietrza w pomieszczeniu oraz w kanałach wentylacyjnych.

3. WYNIKI POMIARÓW PARAMETRÓW MIKROKLIMATU

Uzyskane wyniki pomiarów mikroklimatu ze wszystkich serii pomiarowych w obydwu pomieszczeniach miały ten sam charakterystyczny przebieg zmienności (rys. 1). Wartości najniższe parametrów odnotowywano w godzinach wczesnoporannych, przed rozpoczęciem zajęć. Po rozpoczęciu użytkowania pomieszczeń wartości wszystkich mierzonych wielkości wzrastały. Jeżeli w czasie przerwy wietrzono pomieszczenia, następował widoczny spadek wartości analizowanych parametrów, zwłaszcza stężenia CO₂ i temperatury. Po rozpoczęciu w sali kolejnych zajęć następował ponowny wzrost wartości mierzonych parametrów. Jeżeli w czasie przerwy nie wietrzono po-

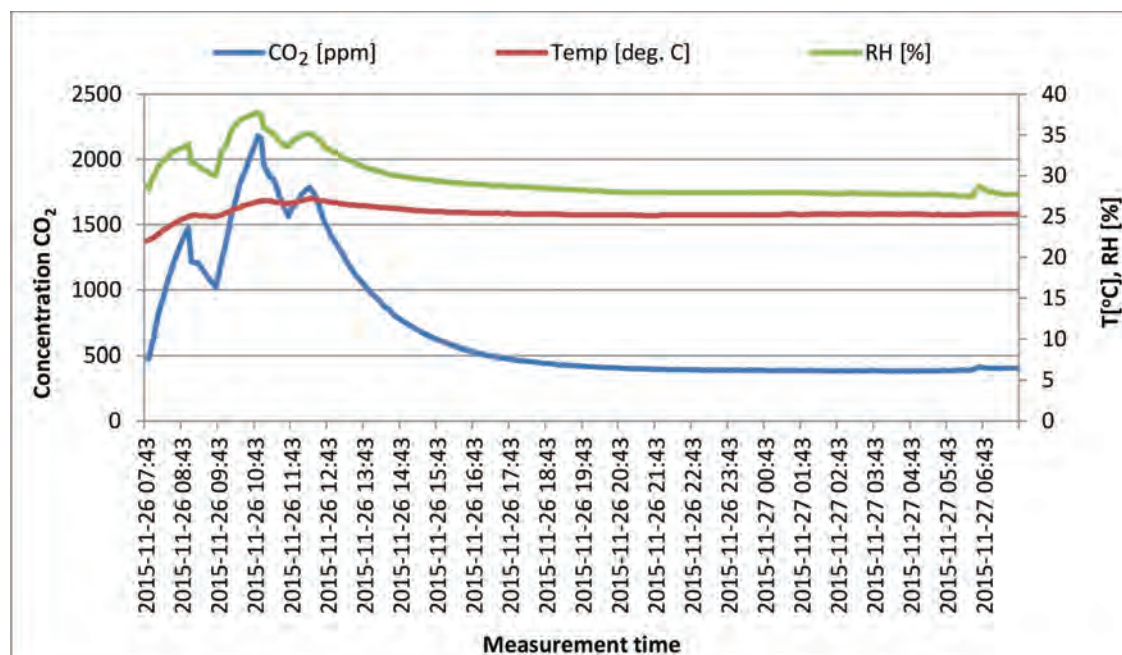


Fig. 1. The course of variability of the indoor air parameters tested for one of the tested rooms on the selected test day (start of the measurement at 7.30 am, measuring step 3 minutes)

Rys. 1. Przebieg zmienności badanych parametrów powietrza wewnętrznego dla jednej z badanych sal w wybranym dniu badań (start pomiaru o godzinie 7.30, krok pomiarowy trzy minuty)

existent. The size of the group and its composition influenced the rate of increase in the parameter value and the fact whether the recorded maximum value of carbon dioxide during the classes reached values higher than during the previous classes. For the measured values of relative humidity and indoor air temperature this dependence was not as clearly visible. However, regardless of the size of the group at the end of the classes (in the case of closed windows during classes), CO_2 concentration and temperature exceeded the recommended values (Fig. 1). The maximum recorded indoor air temperature values obtained on particular days were from 25.3°C to as much as 28.5°C with average values from 23.38°C to 26.48°C . Maximum recorded CO_2 concentration values ranged from 1437 ppm for a small group to 2902 ppm for the most numerous group. The average daily values of this parameter ranged from 504 ppm to 933 ppm. In both rooms, in all measurement series, the relative humidity (RH) values were virtually within the recommended limits. Only for the third measurement series, in both rooms, the values of this parameter dropped below 30%.

mieszkań, spadek mierzonych wartości był niewielki lub nie występował w ogóle. Liczebność grupy oraz jej skład osobowy wpływały na tempo wzrostu wartości parametrów oraz fakt, czy zanotowana w trakcie zajęć wartość maksymalna stężenia dwutlenku węgla osiągała wartości wyższe niż w czasie poprzednich zajęć. Dla zmierzonych wartości wilgotności względnej i temperatury powietrza wewnętrznego zależność ta nie była aż tak wyraźnie widoczna. Bez względu jednak na liczebności grupy pod koniec zajęć (w przypadku gdy w czasie zajęć zamknięte pozostawały okna) wartości stężenia CO_2 i temperatury osiągały wartości przekraczające wielkości zalecane (rys. 1). Maksymalne zanotowane wartości temperatury powietrza wewnętrznego uzyskane w poszczególnych dniach wynosiły od $25,3^\circ\text{C}$ do nawet $28,5^\circ\text{C}$, przy wartościach średnich od $23,38^\circ\text{C}$ do $26,48^\circ\text{C}$. Maksymalne zarejestrowane wartości stężenia CO_2 wynosiły od 1437 ppm, w przypadku mało liczebnej grupy, do 2902 ppm w przypadku grupy najliczniejszej. Wartości średnie dobowe tego parametru wahały się od 504 ppm do 933 ppm. W obydwu pomieszczeniach we wszystkich seriach pomiarowych wartości wilgotności względnej (RH) mieściły się w zalecanych granicach. Jedynie dla trzeciej serii pomiarowej, w obydwu pomieszczeniach, wielkości tego parametru spadły poniżej 30%.

Table 1. Maximum, minimum and average values as well as standard deviations of the measured parameters [9 and own research]

Tabela 1. Wartości maksymalne, minimalne, średnie oraz odchylenia standardowe mierzonych parametrów [9 oraz badania własne]

Series		I		II		III		IV*	V*
Room		A	B	A	B	A	B	A	A
Air temperature [°C]	max	26.0	26.1	27.8	25.6	28.5	27.2	25.3	25.8
	min	23.2	24.6	24.7	23.3	22.1	22	22.6	20.9
	average	24.85	25.4	25.58	24.18	26.48	25.44	23.84	23.38
	standard deviation	0.89	0.33	0.73	0.69	0.96	0.73	0.48	0.93
Relative humidity RH [%]	max	48.2	44.7	42.8	40.4	35.8	37.8	53.8	57.0
	min	36.9	37.4	33.0	32.6	26.6	27.4	37.8	38.2
	average	41.4	40.7	34.79	35.49	29.38	29.6	43.15	47.43
	standard deviation	2.91	1.45	1.29	1.21	2.62	2.57	4.16	4.57
Concentration of carbon dioxide CO ₂ [ppm]	max	1885	1592	2902	1437	2457	2179	1536	2857
	min	432	456	445	460	412	382	485	415
	average	770.57	797.33	667.42	555.52	880.65	704.99	504.76	933.28
	standard deviation	404.79	238.21	318.61	244.93	549.55	477.49	351.02	608.79

*no possibility to conduct measurements in B room

It was the result of low outdoor temperatures, and thus intensive operation of the heating system, which affected the lower relative air humidity in the room.

The measured flow rate of the air stream removed from the rooms (at the inlet to the exhaust ducts) ranged from 0.07 to 1.20 m/s. The air streams determined for the maximum values, flowing through the rooms were from 2.16 dm³/s to 47.04 dm³/s and did not meet the standard requirements [10, 11]. Bearing in mind the research into the dependence between the flow of outdoor air supplied to the rooms and the efficiency of work (Fig. 2), which was made by Wargocki [12], it can be concluded that there are unfavourable working conditions for students and lecturers in both analysed computer laboratories.

Było to wynikiem niskich temperatur zewnętrznych, a więc intensywnego działania systemu grzewczego, co wpływało na niższą wilgotność względną powietrza w pomieszczeniu.

Zmierzona prędkość przepływu strumienia powietrza usuwanego z pomieszczeń (przy wlocie do kanałów wywiewnych) wynosiła od 0,07 m/s do 1,20 m/s. Wyznaczone dla wartości maksymalnych strumienie powietrza przepływające przez pomieszczenia wynosiły od 2,16 dm³/s do 47,04 dm³/s i nie spełniły wymagań normowych [10, 11]. Mając na uwadze badania nad zależnością między strumieniem powietrza zewnętrznego dostarczanego do pomieszczeń a wydajnością pracy (rys. 2), które zostały wykonane przez Wargockiego [12], można stwierdzić, że w obydwu rozpatrywanych pracowniach komputerowych wystąpią niekorzystne warunki pracy dla studentów i prowadzących zajęcia.

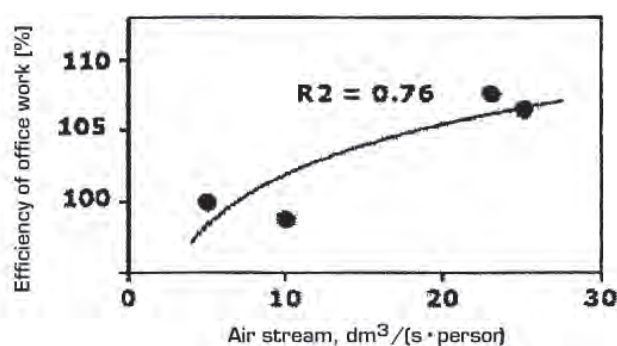


Fig. 2. The dependence between the efficiency of office work and the ventilation air stream [12]

Rys. 2. Związek pomiędzy wydajnością pracy biurowej a strumieniem powietrza wentylacyjnego [12]

4. DETERMINATION OF PMV AND PPD INDICES AND SURVEY TEST RESULTS

EN ISO 7730:2005 standard was the basis for the evaluation of the thermal environment in the rooms [3]. The values of environmental microclimate parameters for determining PMV and PPD indices were adopted in accordance with the measurement results described above. At the same time, measurements of the radiation temperature of the partitions and the equipment of the rooms were conducted.

On the basis of table B1 of the standard [3], the level of metabolic heat production of room users was determined. Due to the nature of the activities performed, it was assumed that all users perform office work and energy expenditure was 70 W/m². As indicated in table C1 of this standard, the average value of the thermal insulation of user clothing in the room was specified and was an average of 0.92 clo (0.144 m²K/W). In addition, it was assumed that distribution of the air-flow rate was homogeneous. Based on the above findings, and in view of large spans in the average values of the basic parameters of microclimate (table 2), it was decided to specify the values of the PMV and PPD indices for each room separately. Determination of the values of these indices was conducted in accordance with the procedure described in the standard [3].

4. OKREŚLENIE WSKAŹNIKÓW PMV I PPD ORAZ WYNIKI TESTÓW ANKIETOWYCH

Podstawą oceny środowiska termicznego w pomieszczeniach była norma EN ISO 7730:2005 [3]. Wartości parametrów mikroklimatu środowiska do określania wskaźników PMV i PPD przyjęto zgodnie z opisanymi powyżej wynikami badań pomiarowych. W tym samym czasie realizowano pomiary wartości temperatury promieniowania przegród oraz wyposażenia pomieszczeń.

Na podstawie tabeli B1 normy [3] określono poziom metabolicznej produkcji ciepła użytkowników pomieszczeń. Ze względu na charakter wykonywanych czynności przyjęto, że wszyscy użytkownicy wykonują prace biurowe i ich wydatek energetyczny wynosi 70 W/m². Zgodnie z tabelą C1 tej normy określono średnią wartość izolacyjności cieplnej odzieży użytkowników pomieszczeń, która wynosiła średnio 0,92 clo (0,144 m²K/W). Ponadto przyjęto, że rozkład prędkości przepływu powietrza w pomieszczeniach jest jednorodny.

Na podstawie powyższych ustaleń oraz mając na uwadze duże rozpiętości średnich wartości podstawowych parametrów mikroklimatu (tabela 2), zdecydowano się na określenie wielkości PMV i PPD dla każdego pomieszczenia odrębnie. Wyznaczenie wartości tych wskaźników przeprowadzono zgodnie z procedurą zamieszczoną w normie [3].

Table 2. Values of the PMV and PPD indices for average values from obtained measurements

Tabela 2. Wartości wskaźników PMV i PPD dla wartości średnich z uzyskanych pomiarów

Series	I		II		III		IV		V	
Room	A	B	A	B	A	B	A	B*	A	B*
PMV	0.25	0.34	0.47	0.03	0.65	0.38	0.02	–	-0.07	–
PPD	6.3	7.4	9.6	5.0	13.8	8.1	5.0	–	5.1	–

*no possibility to conduct measurements in B room

As already mentioned, in section 3 of the article, large fluctuations of the indoor air temperature during different classes were the characteristic feature of the tested rooms. Due to the relatively long exposure time of the room users to temperature variables, it was decided to estimate the values of the PPD and PMV indices also for the obtained minimum and maximum values, with the use of, registered at the time, corresponding values of the remaining parameters. In the case of maximum temperatures, the average insulation of clothing was estimated at 0.65 clo, for minimum values it remained unchanged.

Jak już wspomniano w punkcie 3 artykułu, cechą charakterystyczną badanych pomieszczeń były duże wahania temperatury powietrza wewnętrznego w czasie trwania poszczególnych zajęć. Ze względu na dość długi czas ekspozycji użytkowników pomieszczeń na zmienne temperatury zdecydowano się oszacować wartości wskaźników PMV i PPD również dla uzyskanych wartości minimalnych i maksymalnych, przyjmując do obliczeń zarejestrowane w danej chwili odpowiadające im wartości pozostałych parametrów. W przypadku temperatur maksymalnych średnią izolacyjność odzieży oszacowano na 0,65 clo, dla wartości minimalnych wartość pozostała niezmienną.

Table 3. Values of the PMV and PPD indices for minimum values from obtained measurements

Tabela 3. Wartości wskaźników PMV i PPD dla wartości minimalnych z uzyskanych pomiarów

Series	I		II		III		IV		V	
Room	A	B	A	B	A	B	A	B*	A	B*
PMV	0.16	0.45	0.36	-0.05	-0.34	-0.3	-0.07	–	-0.46	–
PPD	5.5	9.2	7.7	5.1	7.4	6.9	5.1	–	9.4	–

*no possibility to conduct measurements in B room

Table 4. Values of the PMV and PPD indices for maximum values from obtained measurements

Tabela 4. Wartości wskaźników PMV i PPD dla wartości maksymalnych z uzyskanych pomiarów

Series	I		II		III		IV		V	
Room	A	B	A	B	A	B	A	B*	A	B*
PMV	0.47	0.42	1.04	0.28	1.18	0.86	0.31	–	0.48	–
PPD	9.6	8.6	27.8	6.6	34.2	20.5	7.0	–	9.8	–

*no possibility to conduct measurements in B room

In order to verify the obtained results of calculations, the authors decided to conduct simple survey tests among users of computer rooms analysed. People using the laboratory had to assess the level of thermal comfort in accordance with the Bedford seven-point scale by choosing one of the possible ratings at the beginning of the classes, and one just before leaving the room, after finishing the classes. Laboratory users were 21-23 years. The size of groups ranged from 10 to 16 people, and women comprised 10 to 50% of the group. All of the people from the group that used the room during the tests participated in the surveys. In total, about 400 people participated in the tests.

W celu weryfikacji uzyskanych wyników obliczeń autorzy zdecydowali się na przeprowadzenie wśród użytkowników analizowanych sal komputerowych prostych testów ankietowych. Osoby korzystające z pracowni miały za zadanie, ocenić poziom komfortu cieplnego według siedmiostopniowej skali Bedforda, wybierając jedną z możliwych ocen na początku zajęć oraz jedną tuż przed wyjściem z sali, po zakończeniu zajęć. Użytkownikami pracowni były osoby w wieku 21-23 lat. Liczebność grup wynosiła od 10 do 16 osób, przy czym kobiety stanowiły 10÷50% grupy. W ankietach brały udział wszystkie osoby z grupy korzystającej z sali w trakcie badań. W sumie w badaniach brało udział ok. 400 osób.

Table 5. The survey test results of the users of one of the computer laboratories tested on the selected date

Tabela 5. Wyniki testów ankietowych użytkowników jednej z badanych pracowni komputerowych w wybranym dniu

Classes	1		2		3		4	
Time of classes	beginning	end	beginning	end	beginning	end	beginning	end
Number of people assessing the environment as comfortable	9	11	5	2	12	12	0	1
Number of people assessing the environment as uncomfortable	4	2	11	14	0	0	10	9
Number of people in the room	13	13	16	16	12	12	10	10
Percentage of dissatisfied people	30.77	15.38	68.75	87.50	0.00	0.00	100.00	90.00

The analysis of the results obtained allows the conclusion that the percentage of dissatisfied people is from 0 up to even 100% during different classes. It should be noted that this percentage increased along with further classes during the day. A large impact

Analiza otrzymanych wyników pozwala stwierdzić, że procent osób niezadowolonych wynosi od 0 do nawet 100% na poszczególnych zajęciach. Należy zaznaczyć, że procent ten wzrastał wraz z odbywaniem się kolejnych zajęć danego dnia. Duży

is the fact that after finished classes, and before starting the next ones, indoor air parameters did not have initial values and they were much higher at the beginning of the classes. In this way, after four consecutive classes in the room, the authors noted situations when there were 100% negative evaluations of thermal comfort. As shown in table 5, there were also situations in which at the end of the classes, the number of people dissatisfied with thermal comfort was lower than at the beginning of the classes, or when 100% of users were satisfied with the conditions of thermal comfort throughout the classes. Such situations can be justified by the fact of airing the laboratory during classes or lack of consequence in thermal feeling evaluation. Comparison of the results obtained from the survey tests with calculated PPD index values showed that they were consistent only in few cases. The maximum determined PPD value amounted to 34.2%, and as already mentioned above, the survey tests gave results of even 100% people dissatisfied with thermal comfort.

5. DISCUSSION

In Poland, from the point of view of ensuring conditions of thermal comfort in rooms, winter is the most difficult period. This is mainly due to ensuring properly high indoor temperature. A further complication might be equipment of the rooms, as was the case in the rooms analysed by the authors. A large number of computers that worked without even a break for about 9 hours affected the internal microclimate parameters. In conjunction with the little efficient gravity ventilation system and the lack of the possibility to adjust its work resulted in large fluctuations of the internal microclimate parameters throughout the day, and especially the values of the indoor air temperature and CO_2 concentration.

The conducted accurate analyses involving determination of thermal comfort indices, did not give positive results. For specific average values of microclimate parameters, the determined PMV index values are not within the limits of the thermal comfort, i.e. $-0.5 < \text{PMV} < 0.5$. The maximum value of the PMV index for these values amounted to 0.65, and the percentage of people dissatisfied with the microclimate parameters (PPD) reached even 13.8%. For the registered maximum values of the parameters measured, the percentage of people dissatisfied with the conditions of thermal environment, calculated according to the standard [3],

wpływ ma na to fakt, iż po zakończonych zajęciach, a przed rozpoczęciem następnych, parametry powietrza wewnętrznego nie przyjmowały wartości początkowych i już na początku zajęć były o wiele wyższe. W ten sposób po czterech kolejnych zajęciach w danej sali autorzy odnotowali sytuacje, gdzie wystąpiło 100% negatywnych ocen komfortu cieplnego. Jak wynika z tabeli 5 zdarzały się również sytuacje, w których na końcu zajęć liczba osób niezadowolonych z komfortu cieplnego była mniejsza niż na początku zając lub gdy 100% użytkowników była zadowolona z warunków komfortu cieplnego przez cały czas ich trwania. Sytuacje takie można uzasadnić faktem wietrzenia pracowni w czasie zajęć lub też brakiem konsekwencji oceny odczuć termicznych. Porównanie otrzymanych wyników z testów ankietowych z wyznaczonymi obliczeniowo wartościami wskaźnika PPD wykazały, że tylko w nielicznych przypadkach są one ze sobą zbieżne. Maksymalna wyznaczona wartość PPD wyniosła 34,2%, a jak już wspomniano powyżej, testy ankietowe dały wyniki nawet 100% niezadowolonych z komfortu cieplnego.

5. PODSUMOWANIE

W Polsce najtrudniejszym okresem z punktu widzenia zapewnienia warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach jest zima. Wiąże się to głównie z zapewnieniem odpowiednio wysokiej temperatury wewnętrznej. Dodatkowym utrudnieniem może być wyposażenie pomieszczeń, jak miało to miejsce w rozpatrywanych przez autorów pomieszczeniach. Duża ilość komputerów, które pracowały bez przerwy nawet przez ok. 9 godzin, wpływała na parametry mikroklimatu wewnętrznego. W połączeniu z mało wydajnym systemem wentylacji grawitacyjnej oraz brakiem możliwości regulacji jego pracy skutkowało to dużymi wahaniami parametrów mikroklimatu wewnętrznego w ciągu doby, a zwłaszcza wartości temperatury powietrza wewnętrznego oraz stężenia CO_2 .

Przeprowadzone dokładne analizy, polegające na wyznaczeniu wskaźników komfortu termicznego, nie dały pozytywnych wyników. Dla określonych średnich wartości parametrów mikroklimatu wyznaczone wartości wskaźnika PMV nie mieszczą się w granicach komfortu termicznego, tj. $-0,5 < \text{PMV} < 0,5$. Maksymalna wartość PMV dla tych wartości wynosiła 0,65, a odsetek osób niezadowolonych z parametrów mikroklimatu (PPD) sięgnął nawet 13,8%. Dla zarejestrowanych wartości maksymalnych mierzonych parametrów wyliczony zgodnie z normą [3] odsetek osób niezadowolonych z warunków środowiska termicznego wy-

amounted to 34.2%, and the maximum value of the PMV index was even 1.18. Only for minimum values, the received indices do not raise significant reservations. It should be noted, however, that the minimum values were temporary and registered only and solely at the beginning of the classes. In contrast, the results of survey tests conducted among the room users are surprising. In most cases, more than 50% of respondents in the group of students that used the laboratory defined the temperature inside the rooms as uncomfortable. In the case of certain groups of students, even 100% of the respondents negatively rated thermal comfort in the room.

The test results of microclimate parameters presented in the article indicate unequivocally that the indoor air quality in the analysed rooms is poor. Taking the maximum recorded CO₂ concentration values into consideration, the quality can be specified as the category IDA 4 according to the requirements of the standard [13]. The maximum content of carbon dioxide in the indoor air exceeded 2900 ppm. The already mentioned standard [13] and ASHRAE guidelines [14] in the rooms intended for permanent stay of people consider this parameter as limit value at 700 ppm above the level of carbon dioxide content in the air outside the building. For the concentrations of CO₂ obtained during measurements in the outdoor air, the limit value can therefore be considered as approximately 1100 ppm. Also, the maximum temperature values in the analysed rooms exceeded the values recommended for thermal comfort. In the vast majority the average temperature values obtained in the computer laboratories analysed, exceeded 24°C. Only the recorded values of the relative humidity, except for one measurement series, did not raise major reservations.

In conclusion, it should be noted that computer laboratories are a very specific type of rooms and obtaining the appropriate internal microclimate parameters and a comfortable temperature in them is very difficult in the case of applying gravity ventilation. The introduction of requirements to install mechanical devices for controlling indoor air parameters in these types of rooms seems to be proper.

The obtained discrepancies between the calculated values of the PPD parameter and survey test results must be verified again in a larger group of respondents.

niósł 34,2%, a maksymalna wartość wskaźnika PMV aż 1,18. Jedynie dla wartości minimalnych otrzymane wskaźniki nie budzą większych zastrzeżeń. Należy jednak zaznaczyć, że wartości minimalne były wartościami chwilowymi rejestrowanymi tylko i wyłącznie na początku zajęć. Zaskakujące są natomiast wyniki przeprowadzonych testów ankietowych wśród użytkowników pomieszczeń. W większości przypadków ponad 50% badanych w danej grupie studentów korzystającej z pracowni określiło temperaturę wewnątrz pomieszczeń jako niekomfortową. W przypadku niektórych grup studentów nawet 100% ankietowanych negatywnie oceniło komfort termiczny w sali.

Przedstawione w artykule wyniki badań parametrów mikroklimatu wskazują jednoznacznie, że w rozpatrywanych pomieszczeniach jakość powietrza wewnętrznego jest niska. Mając na uwadze maksymalne zanotowane wartości stężenia CO₂, jakość tę można określić kategorią IDA 4 według wymagań normy [13]. Maksymalna zawartość dwutlenku węgla w powietrzu wewnętrznym osiągnęła ponad 2900 ppm. Wspomniana już norma [13] oraz wytyczne ASHRAE [14] w pomieszczeniach przeznaczonych na stały pobyt ludzi za wartość graniczną tego parametru uznają wielkość 700 ppm powyżej poziomu zawartości dwutlenku węgla w powietrzu na zewnątrz budynku. Dla uzyskanych w trakcie pomiarów wartości stężenia CO₂ w powietrzu zewnętrznym za wartość graniczną można zatem uznać około 1100 ppm. Również maksymalne wartości temperatury w badanych pomieszczeniach przekraczały wartości zalecane dla komfortu cieplnego. W zdecydowanej większości uzyskane wartości średnie temperatury w rozpatrywanych pracowniach komputerowych przekraczały 24°C. Jedynie odnotowane wartości wilgotności względnej, poza jedną serią pomiarową, nie budziły większych zastrzeżeń.

Podsumowując, należy stwierdzić, że pracownie komputerowe stanowią bardzo specyficzny rodzaj pomieszczeń i osiągnięcie w nich właściwych parametrów mikroklimatu wewnętrznego oraz temperatury komfortowej jest bardzo trudne w przypadku zastosowania wentylacji grawitacyjnej. Słusznym wydaje się wprowadzenie wymagań, aby w tego typu pomieszczeniach instalowane były urządzenia mechaniczne pozwalające na kontrolowanie parametrów powietrza wewnętrznego.

Uzyskane rozbieżności pomiędzy obliczonymi wartościami parametru PPD a wynikami testów ankietowych muszą być jeszcze zweryfikowane na większej grupie ankietowanych.

References

- [1] McIntyre D.A., *Seven point scales of warmth*, ECRC/M957, Copenhurst, Chester, 1976.
- [2] Śliwowski L., *Mikroklimat wewnątrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach* [Interior microclimate and thermal comfort of people in rooms], Publishing House of the Wrocław University of Technology, Wrocław 2000.
- [3] EN ISO 7730:2005: *Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*.
- [4] Popiołek Z., *Energy efficient development of the internal environment*, Department of Heating, Ventilation and extraction techniques, Silesian University of Technology, Gliwice 2005 (in Polish).
- [5] Wargocki P., Wyon D., Matysiak B., Irgens S., *The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on performance of school work by children*, Proceedings of Indoor Air 2005, The 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Beijing, China 2005, pp. 368 372.
- [6] Nantka M.B., *Natural air exchange and the tightness of the housing*, Ventilation Forum 2005, Warsaw 2005 (in Polish).
- [7] Popiołek Z., *Proceedings of Workshop Measurement and Control Techniques for HVAC System and Indoor Climate*, ENER-INDOOR, Gliwice 2005.
- [8] Telejko M., *Attempt to improve indoor air quality in computer laboratories*, Procedia Engineering, Volume: 172, Issue: 2017, Pages: 1154-1160.
- [9] Stachera A., Smorenda K., *Mikroklimat w pracowniach komputerowych Politechniki Świętokrzyskiej* [Microclimate in computer laboratories of the Kielce University of Technology], Engineer thesis under the supervision of dr inż. M. Telejko, Kielce University of Technology, WBiA, Kielce 2016.
- [10] PN-83/B-03430 *Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania*, PKN, 1983 (Ventilation in dwellings and public utility buildings. Specification).
- [11] PN-83/B-03430:Az03 *Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Requirements. Zmiana Az3*, PKN, 2000 (Ventilation in dwelling and public utility buildings. Specification. Amendment Az3).
- [12] Popiołek Z., *Jakość powietrza wewnętrznego a zużycie energii (w:) Energooszczędne kształtowanie środowiska wewnętrznego* [Indoor air quality and energy consumption (in:) Energy-efficient shaping of the internal environment], Z. Popiołka; Gliwice 2005.
- [13] PN-EN 16798-3:2017-09 *Charakterystyka energetyczna budynków. Wentylacja budynków. Część 3: Wentylacja budynków niemieskalnych. Wymagania dotyczące właściwości systemów wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń* [The energy performance of buildings. Ventilation of the buildings. Part 3: Ventilation for non-residential buildings. Performance requirements for ventilation and room conditioning systems].
- [14] ASHRAE Standard 62.1-2016, "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality".
- [15] PN-EN 15251:2012 *Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego dotyczące projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków, obejmujące jakość powietrza wewnętrznego, środowisko cieplne, oświetlenie i akustykę* [Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics].
- [16] Zender-Świercz E., *Analysis of the impact of the parameters of outside air on the condition of indoor air*. International Journal of Environmental Science and Technology August 2017, Volume 14, Issue 8, pp. 1583-1590.

Acknowledgments:

This work was supported by Kielce University of Technology, Grant No. 02.0.05.00/2.01.01.01.0028 MNSP BKTO.15.003

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Świętokrzyską, grant nr 02.0.05.00/2.01.01.01.0028 MNSP BKTO.15.003

APPLICATION OF THE FIRE RESISTING SUSPENDED CEILINGS

ZASTOSOWANIE SUFITÓW PODWIESZONYCH O OKREŚLONEJ ODPORNOŚCI OGNIOWEJ

DOI: 10.30540/sae-2018-021

Abstract

This paper presents the rules of performing fire resistance tests and classification of suspended ceilings constituting independent barriers and suspended ceilings constituting horizontal membranes protecting the floor/roof over them. The consequences for the way of using suspended ceilings in buildings, taking into account the requirements of the regulations, were discussed.

Keywords: suspended ceiling, fire resistance, floor, testing

Streszczenie

W artykule przedstawiono zasady wykonywania badań oraz klasyfikowania w zakresie odporności ogniowej sufitów podwieszonych stanowiących samodzielne przegrody oraz sufitów podwieszonych stanowiących poziome membrany zabezpieczające strop/dach nad nimi. Omówiono konsekwencje dla sposobu zastosowania sufitów podwieszonych w budynkach z uwzględnieniem wymagań przepisów.

Słowa kluczowe: sufit podwieszony, odporność ogniowa, strop, badania

1. INTRODUCTION

In today's buildings, the demands on the interior finish of the building are increasing. These requirements apply both to the aesthetic side and, above all, to the functional aspects. Suspended ceilings may have several functions at the same time. They can be used e.g. to cover installation elements (in particular ventilation and air-conditioning installation), to improve acoustic parameters of the room, to install loudspeakers and lighting installation elements directly in the ceiling, but also to increase fire resistance of the floor/roof (floor/roof system + suspended ceiling). Therefore, suspended ceilings are often installed in general construction facilities, e.g. in hospitals, schools, kindergartens, hotels, offices, banks, sports and entertainment halls, shopping malls, shopping halls, production halls, social

1. WPROWADZENIE

We wznoszonych obecnie budynkach coraz wyższe wymagania stawiane są wykończeniu wnętrza budynku. Wymagania te dotyczą zarówno strony estetycznej, jak i przede wszystkim kwestii użytkowych. Sufity podwieszone mogą pełnić jednocześnie kilka funkcji. Mogą być wykorzystywane np. do zasłonięcia elementów instalacji (w szczególności instalacji wentylacyjnej i klimatyzacyjnej), poprawienia parametrów akustycznych pomieszczenia, montażu bezpośrednio w suficie głośników i elementów instalacji oświetleniowej, ale także do zwiększenia odporności ogniowej stropu/dachu (układu strop/dach + sufit podwieszony). Dlatego też sufity podwieszone są chętnie montowane w obiektach budownictwa ogólnego, np.: w szpitalach, szkołach, przedszkolach, hotelach, biurach, bankach, salach sportowych i widowiskowych, centrach han-

welfare homes, health centres, boarding houses and guesthouses. Depending on the needs and accepted design solutions, different construction and material solutions are used. A structural element is usually a steel grid, to which various panels are fixed or supported, e.g. gypsum plasterboards, gypsum-fibre boards, cement boards, cement-particle boards, or mineral wool (also pressed) boards, but also various panels.

If fire resistance of the suspended ceiling is not required in a given area or if it is not required that the suspended ceiling contributes to the fire resistance of the floor-ceiling system (roof-ceiling), then suspended ceilings with a purely decorative/finishing function may be used to cover structural elements and/or installations laid in the space between the suspended ceiling and the floor, i.e. either as finished surface themselves or to provide a final finish (e.g. paints, wallpaper, etc.).

2. THE FUNCTIONS OF SUSPENDED CEILINGS

Due to fire safety requirements, suspended ceilings may have the following functions:

- increase the fire resistance of the floor,
- protect users (for a limited period of time) from fire in the space between the suspended ceiling and the floor,
- protect the installations laid in the space between the suspended ceiling and the floor from fire in the room.

In order to improve the fire resistance class of the floor, suspended ceilings are used as independent barriers, classified according to the criteria of fire integrity and fire insulation under fire exposure from the below – from the room side. This scenario is illustrated in Figure 1. The floor construction shown in Figure 1 should meet the load-bearing capacity requirements at normal temperature. A suspended ceiling, which constitutes an independent barrier of a specified fire resistance, ensures fire integrity and fire insulation of the entire system for the required time. The temperature increase in the space between the suspended ceiling and the floor/roof, and consequently in the steel beams of the floor, is small and does not lead to a significant change in the properties of the steel nor, as a result, to the loss of the load-bearing capacity of the structure. Also for other floor/roof structures – composite, concrete or timber – the temperature increase in the space between the suspended ceiling and the floor/roof will not lead to significant changes in the properties of the structural

dłowych, pawilonach handlowych, halach produkcyjnych, domach opieki społecznej, ośrodkach zdrowia, internatach i pensjonatach. W zależności od potrzeb i przyjętych rozwiązań projektowych stosowane są różne rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe. Elementem konstrukcyjnym jest na ogół ruszt stalowy, do którego mocuje się lub opiera się na nim różne płyty, np.: gipsowo-kartonowe, gipsowo-włóknowe, cementowe, cementowo-wiórowe czy z wełny mineralnej (także prasowanej), ale także różne panele.

Jeśli w danym obszarze w stosunku do sufitów podwieszonych nie stawia się wymagań w zakresie odporności ogniowej lub nie jest wymagany udział sufitu podwieszonego w odporności ogniowej układu strop-sufit (dach-sufit), mogą być stosowane sufity podwieszone pełniące wyłącznie funkcję dekoracyjną/wykończeniową w celu zasłonięcia elementów konstrukcyjnych i/lub instalacji prowadzonych w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem, i albo same stanowią wykończenie powierzchni, albo umożliwiają wykonanie docelowego wykończenia (np. farbami, tapetą itp.).

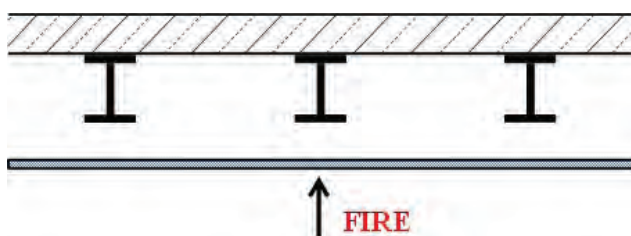
2. FUNKCJE SUFITÓW PODWIESZONYCH

Z uwagi na wymagania w zakresie bezpieczeństwa pożarowego, sufity podwieszone mogą pełnić następujące funkcje:

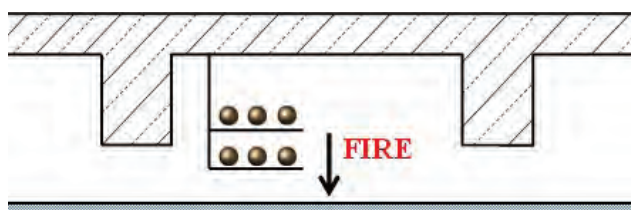
- podwyższać odporność ogniową stropu,
- chronić użytkowników (przez określony czas) przed pożarem w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem,
- ochraniać przed pożarem w pomieszczeniu instalacje prowadzone w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem.

W celu podwyższenia klasy odporności ogniowej stropu stosowane są sufity podwieszone, stanowiące samodzielne przegrody sklasyfikowane z uwagi na kryteria szczelności ogniowej i izolacyjności ogniowej przy oddziaływaniu ognia od dołu – od strony pomieszczenia. Scenariusz ten zilustrowano na rysunku 1. Przedstawiona na rysunku 1 konstrukcja stropu spełnia wymagania nośności w temperaturze normalnej. Sufit podwieszony stanowiący samodzielną przegrodę o określonej odporności ogniowej, samodzielnie zapewnia szczelność ogniową i izolacyjność ogniową całego układu przez wymagany czas. Przyrost temperatury w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem/dachem, a w konsekwencji w belkach stalowych stropu, jest niewielki i nie prowadzi do istotnej zmiany właściwości stali, ani w konsekwencji do utraty nośności konstrukcji. Także w przypadku innych konstrukcji

materials and, consequently, to a loss of load-bearing capacity of the structure. This scheme is valid for all properly designed floors (as well as roofs) of any construction, unless it is sensitive to a temperature increase of 200°C.



In order to protect users from fire in the space between the suspended ceiling and the floor/roof, suspended ceilings are used as independent barriers, classified according to the fire integrity and fire insulation criteria, under fire exposure from the top – from the space between the suspended ceiling and the floor/roof. This scenario is illustrated in Figure 2. The floor construction shown in Figure 2 should meet the requirements for loadbearing capacity, fire integrity and fire insulation (in the case of a roof – loadbearing capacity and fire integrity) under fire exposure from below for the required time. A suspended ceiling constituting independent barrier of specified fire resistance in the case of fire exposure from above, independently ensures fire integrity and fire insulation in the case of such fire exposure for the required period of time.



If there is a need to provide protection of the installations laid in the space between the suspended ceiling and the floor/roof against fire in the room, the suspended ceilings constituting independent barriers classified according to the criteria of fire integrity and fire insulation under fire exposure from below – from the room are used. This scenario is illustrated in Figure 3. The floor structure shown in Figure 3

stropu/dachu – zespolonych, betonowych czy drewnianych – przyrost temperatury w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem/dachem nie będzie prowadził do istotnych zmian właściwości materiałów konstrukcyjnych, a w konsekwencji do utraty nośności konstrukcji. Schemat ten obowiązuje dla wszystkich prawidłowo zaprojektowanych stropów (a także dachów) o dowolnej konstrukcji, o ile nie będzie ona wrażliwa na przyrost temperatury rzędu 200°C.

Fig. 1. Suspended ceiling used to increase the fire resistance of the floor

Rys. 1. Sufit podwieszony stosowany w celu podwyższenia odporności ogniowej stropu [źródło: rysunek własny]

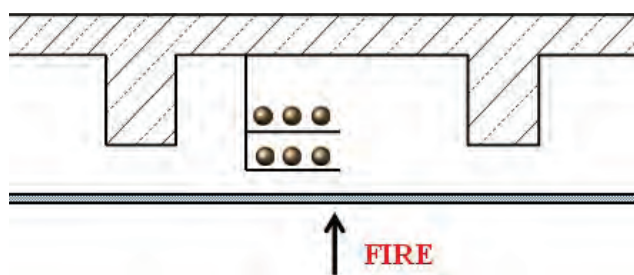
W celu zapewnienia ochrony użytkowników przed pożarem instalacji w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem/dachem stosowane są sufity podwieszone stanowiące samodzielne przegrody sklasyfikowane z uwagi na kryteria szczelności ogniowej i izolacyjności ogniowej przy oddziaływaniu ognia od góry – od strony przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem/dachem. Scenariusz ten zilustrowano na rysunku 2. Przedstawiona na rysunku 2 konstrukcja stropu powinna spełniać wymagania nośności ogniowej, szczelności ogniowej i izolacyjności ogniowej (w przypadku dachu – nośności ogniowej i szczelności ogniowej) przy oddziaływaniu ognia od dołu przez wymagany czas. Sufit podwieszony, stanowiący samodzielną przegrodę o określonej odporności ogniowej przy oddziaływaniu ognia od góry, samodzielnie zapewnia szczelność ogniową i izolacyjność ogniową przy takim oddziaływaniu ognia przez wymagany czas.

Fig. 2. Suspended ceiling used to protect users from fire of installations laid between the suspended ceiling and the floor/roof

Rys. 2. Sufit podwieszony stosowany w celu ochrony użytkowników przed pożarem instalacji prowadzonych w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem/dachem [źródło: rysunek własny]

W przypadku potrzeby zapewnienia ochrony instalacji prowadzonych w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem/dachem przed pożarem w pomieszczeniu stosowane są sufity podwieszone stanowiące samodzielne przegrody sklasyfikowane z uwagi na kryteria szczelności ogniowej i izolacyjności ogniowej przy oddziaływaniu ognia od dołu – od strony pomieszczenia. Scenariusz ten zilustrowano

should meet the loadbearing capacity requirements for a specified period of time (generally unrelated to the installation fire protection time). The suspended ceiling constituting independent barrier of specified fire resistance, independently ensures fire integrity and fire insulation of the entire system. The increase of temperature in the space between the suspended ceiling and the floor/roof shall not lead to damage or destruction of the installations laid in that space for the required period of time.



3. FIRE RESISTANCE TESTS AND CLASSIFICATION OF SUSPENDED CEILINGS

3.1. Suspended ceilings fire resistance tests

The first fire resistance tests of suspended ceilings in ITB at the Fire Research Department took place in 1975-77 commissioned by the Central Research and Development Centre for General Construction, Warsaw, Wierzbowa street. A series of fire resistance tests of suspended ceilings made of gypsum plasterboards in a wood-fired polygon chamber were carried out at that time. At present, in Fire Research Department of ITB in Pionki fire resistance tests are carried out in modern gas-fired furnaces, and the dimensions of the test elements may range from 3.3 x 4.3 m to 11.2 x 4.3 m.

Since 1998, in Poland, fire resistance tests of suspended ceilings have been carried out in accordance with the PN-B-02875 [1] standard, which included both testing of the suspended ceiling as a independent barrier, as well as testing of the floor with the suspended ceiling constituting a horizontal protective membrane. The European standard PN-EN 1364-2 [2] (as well as the new just published version [3]) covers only fire resistance tests of suspended ceilings being independent barriers. The standard PN-EN 13381-1 [4] concerning fire resistance testing of floor with suspended ceilings constituting horizontal protective membranes was published in 2014.

na rysunku 3. Przedstawiona na rysunku 3 konstrukcja stropu powinna spełniać wymagania nośności ogniowej, przez określony czas (na ogół niezwiązany z czasem ochrony instalacji). Sufit podwieszony, stanowiący samodzielną przegrodę o określonej odporności ogniowej, samodzielnie zapewnia szczelność ogniową i izolacyjność ogniową całego układu. Przyrost temperatury w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem/dachem nie prowadzi do uszkodzenia bądź zniszczenia instalacji prowadzonych w tej przestrzeni przez wymagany czas.

Fig. 3. Suspended ceiling used to protect installations in the space between a suspended ceiling and the floor/roof from fire in the room

Rys. 3. Sufit podwieszony stosowany w celu ochrony instalacji prowadzonych w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem/dachem przed pożarem w pomieszczeniu [źródło: rysunek własny]

3. BADANIA ODPORNOŚCI OGNIOWEJ I KLASYFIKACJA SUFITÓW PODWIESZONYCH

3.1. Badania odporności ogniowej sufitów podwieszonych

Pierwsze badania odporności ogniowej sufitów podwieszonych w ITB w Zakładzie Badań Ogniowych odbyły się w latach 1975-77 na zlecenie Centralnego Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Budownictwa Ogólnego, Warszawa, ul. Wierzbowa. Przeprowadzono wówczas serię badań odporności ogniowej sufitów podwieszonych z płyt gipsowo-kartonowych w poligonowej komorze opalanej drewnem. Obecnie w ITB w Zakładzie Badań Ogniowych w Pionkach przeprowadza się badania odporności ogniowej w nowoczesnych piecach opalanych gazem, a wymiary elementów badanych mogą mieć od 3,3 x 4,3 m do 11,2 x 4,3 m.

Od 1998 roku w Polsce badania odporności ogniowej sufitów podwieszonych wykonywane były według normy PN-B-02875 [1], która obejmowała zarówno badanie sufitu podwieszonego jako samodzielnej przegrody, jak również badanie stropu z sufitem podwieszonym stanowiącym poziomą membranę zabezpieczającą. Norma europejska PN-EN 1364-2 [2] (a także właśnie opublikowana jej nowa wersja [3]) obejmuje tylko badania odporności ogniowej sufitów podwieszonych stanowiących samodzielne przegrody. Normę PN-EN 13381-1 [4] dotyczącą badania odporności ogniowej stropu z sufitem podwieszonym, stanowiącym poziomą membranę zabezpieczającą, opublikowano w 2014 roku.

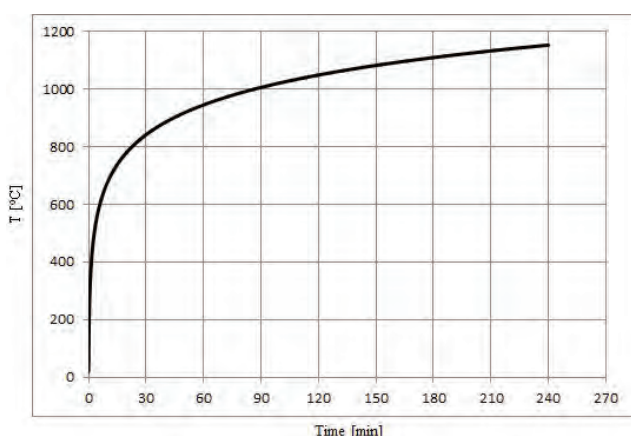
3.2. Fire resistance tests of suspended ceilings constituting independent barriers

Fire resistance tests of suspended ceilings, which are independent barriers, are performed according to the standard PN-EN 1364-2 [2]. This standard describes how the test is to be carried out both when exposed to fire from below and when exposed to fire from above. In both cases, the same thermal exposure defined by the standard time/temperature curve specified in PN-EN 1363-1 [5], defined by the formula (1), is applied:

$$T = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) + 20 \quad (1)$$

where: T is the average temperature in the furnace, in degrees Celsius, t is time, in minutes.

The time/temperature curve is illustrated in Figure 4.



In the case of fire from below, the pressure in the furnace measured at a distance of 100 mm below the bottom surface of the suspended ceiling should not exceed 20 Pa, with tolerances given in PN-EN 1363-1 [5].

In the case of fire from above, the difference between the pressure in the furnace measured at a distance of 100 mm above the surface of the suspended ceiling and the pressure in the furnace in the empty space under the suspended ceiling should not exceed 10 Pa, in accordance with PN-EN 1364-2 [2].

The view of the suspended ceiling with gypsum plasterboard lining from the unexposed side during the fire resistance test is shown in Photo 1.

3.2. Badania odporności ogniowej sufitów podwieszonych stanowiących samodzielne przegrody

Badania odporności ogniowej sufitów podwieszonych stanowiących samodzielne przegrody są wykonywane według normy PN-EN 1364-2 [2]. W normie opisano sposób przeprowadzenia badania zarówno przy oddziaływaniu ognia od dołu, jak i przy oddziaływaniu ognia od góry. W obu przypadkach stosowane jest to samo oddziaływanie termiczne zdefiniowane standardową krzywą czas/temperatura podaną w PN-EN 1363-1 [5], określoną wzorem (1):

$$T = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) + 20 \quad (1)$$

gdzie: T jest średnią temperaturą w piecu, w stopniach Celsjusza, t jest czasem, w minutach.

Krzywą czas/temperatura zilustrowano na rysunku 4.

Fig. 4. Standard time/temperature curve

Rys. 4. Standardowa krzywa czas/temperatura (źródło: PN-EN 1363-1:2012)

Ciśnienie w piecu przy oddziaływaniu ognia od dołu, mierzone w odległości 100 mm poniżej spodniej powierzchni sufitu podwieszonego, nie powinno przekraczać 20 Pa, z tolerancjami podanymi w normie PN-EN 1363-1 [5].

Przy oddziaływaniu ognia od góry różnica pomiędzy ciśnieniem w piecu, mierzonym w odległości 100 mm powyżej powierzchni sufitu podwieszonego, a ciśnieniem w piecu w pustej przestrzeni pod sufitem podwieszonym nie powinna przekraczać 10 Pa, zgodnie z normą PN-EN 1364-2 [2].

Na fotografii 1 przedstawiono widok sufitu podwieszonego z okładzinami z płyt gipsowo-kartonowych podczas badania odporności ogniowej od strony nie-nagrzewanej.

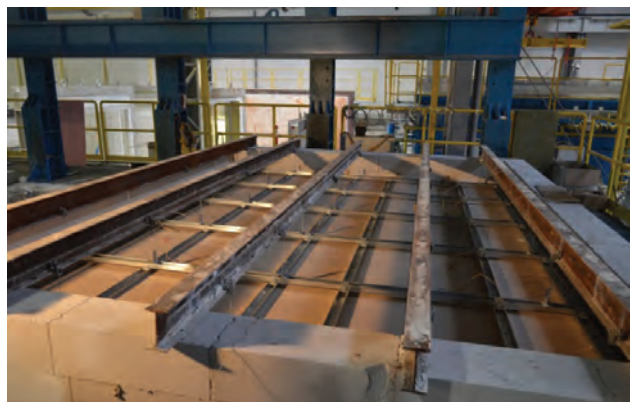


Photo 1. View of the suspended ceiling during the fire resistance test from the unexposed side

Fot. 1. Widok sufitu podwieszonego podczas badania odporności ogniowej od strony nienagrzewanej (źródło: archiwum ITB)

In the classification standard PN-EN 13501-2 [6] the fire resistance classification criteria are given for all building elements listed in the standard, including suspended ceilings constituting independent barriers.

The criteria for assessing the fire resistance of a suspended ceiling constituting independent barriers are as follows:

Fire integrity (E):

The assessment of fire integrity shall be made on the basis of the following three aspects:

- a) gaps or openings in excess of the specified dimensions;
- b) ignition of a cotton pad;
- c) sustained flaming on the unexposed side.

Fire insulation (I):

The assessment of fire insulation shall be made on the basis of the following two aspects:

- a) the mean temperature rise on the unexposed face is exceeded by 140 K above the initial average temperature;
- b) the maximum temperature rise on the unexposed face is exceeded by 180 K above the initial average temperature.

The view of the suspended ceiling with gypsum plasterboard lining from the exposed side after the fire resistance test is shown in Photo 2.



W normie klasyfikacyjnej PN-EN 13501-2 [6] podano kryteria klasyfikacyjne w zakresie odporności ogniowej w odniesieniu do wszystkich wymienionych w tej normie elementów budynku, w tym dla sufitów podwieszonych stanowiących samodzielne przegrody.

Kryteria oceny odporności ogniowej sufitów podwieszonych stanowiących samodzielne przegrody są następujące:

Szczelność ogniowa (E):

Oceny szczelności ogniowej należy dokonać na podstawie następujących trzech aspektów:

- a) przekroczenia przez szczeliny lub otwory określonych wymiarów;
- b) zapalenia tamponu z waty bawełnianej;
- c) wystąpienia utrzymywania się płomienia na stronie nienagrzewanej.

Izolacyjność ogniowa (I):

Oceny izolacyjności ogniowej należy dokonać na podstawie następujących dwóch aspektów:

- a) przekroczenia przyrostu średniej temperatury powierzchni nienagrzewanej o 140 K powyżej początkowej średniej temperatury;
- b) przekroczenia przyrostu maksymalnej temperatury powierzchni nienagrzewanej o 180 K powyżej początkowej średniej temperatury.

Na fotografii 2 przedstawiono widok sufitu podwieszonego z okładzinami z płyt gipsowo-kartonowych po badaniu odporności ogniowej od strony nagrzewanej.

Photo 2. View of the suspended ceiling with gypsum plasterboard lining from the exposed side after the fire resistance test

Fot. 2. Widok sufitu podwieszonego po badaniu odporności ogniowej od strony nagrzewanej (źródło: archiwum ITB)

3.3. Fire resistance tests of systems: suspended ceiling-floor

Fire resistance tests of systems: suspended ceiling-floor are carried out according to the standard PN-EN 13381-1 [4]. The standard also refers to standards specifying the requirements of the test conditions and the criteria used: PN-EN 1363-1 [5] and PN-EN 13501-2 [6].

In the fire resistance test, a test specimen with the minimum dimensions of length (L_{exp}) of 4 m and width (W_{exp}) of 3 m shall also be subjected to the heat action defined by the standard time/temperature curve (1).

During the test, the test specimen is loaded with the load determined in accordance with EN 1363-1 [5]. The load magnitude is chosen so that it represents the actual imposed load. Normally, a uniformly distributed load is used.

The assessment consists in determining the influence of the horizontal protective membrane constituting the fire protection of the structural element, using the temperatures measured in the space between the suspended ceiling and the floor, under the heated surface of the structural element of the building. Fire resistance rating applies to the entire horizontal barrier – floor-suspended ceiling system.

4. FIRE RESISTANCE CLASSIFICATION OF SUSPENDED CEILINGS

The fire resistance classification of suspended ceilings is carried out in accordance with PN-EN 13501-2 [6]. In accordance with the principles of fire resistance testing of suspended ceilings described in paragraph 3 above, there are three possible cases of the test(s):

- 1) suspended ceiling constituting an independent barrier subjected to fire resistance test(s) in accordance with PN-EN 1364-2 [2] standard, under fire exposure from below;
- 2) suspended ceiling constituting an independent barrier subjected to fire resistance test(s) in accordance with PN-EN 1364-2 [2] standard, under fire exposure from above;
- 3) suspended ceiling not constituting an independent barrier, but applied as a protection of the floor (horizontal protective membrane), subjected to fire resistance test(s) in accordance with PN-EN 13381-1 [4] standard, as an element of the floor-suspended ceiling system (fire action as for the floor element – from below).

3.3. Badania odporności ogniowej układów: strop-sufit podwieszony

Badania odporności ogniowej układów: strop-sufit podwieszony wykonuje się według normy PN-EN 13381-1 [4]. Z uwagi na wymagania dotyczące warunków badań oraz stosowanych kryteriów norma ta odwołuje się także do norm: PN-EN 1363-1 [5] oraz PN-EN 13501-2 [6].

W badaniu odporności ogniowej element próbny o minimalnych wymiarach: długość (L_{exp}) – 4 m i szerokość (W_{exp}) – 3 m, poddawany jest także oddziaływaniu cieplnemu zdefiniowanemu standardową krzywą czas/temperatura (1).

Element próbny jest obciążony podczas badania obciążeniem wyznaczonym według PN-EN 1363-1 [5]. Wielkość obciążenia dobrana jest tak, aby reprezentowała rzeczywiste obciążenia użytkowe. Normalnie stosuje się obciążenie równomiernie rozłożone.

Ocena polega na ustaleniu wpływu poziomej membrany zabezpieczającej, stanowiącej zabezpieczenie ogniochronne elementu konstrukcyjnego, wykorzystując temperatury zmierzone w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem, pod nagrzewaną powierzchnią konstrukcyjnego elementu budynku. Ocena nośności ogniowej dotyczy całej przegrody poziomej – układu strop-sufit podwieszony.

4. KLASYFIKACJA W ZAKRESIE ODPORNOŚCI OGNIOWEJ SUFITÓW PODWIESZONYCH

Klasyfikacja w zakresie odporności ogniowej sufitów podwieszonych przeprowadzana jest zgodnie z normą PN-EN 13501-2 [6]. Zgodnie z opisanymi w punkcie 3 zasadami wykonywania badań odporności ogniowej sufitów podwieszonych możliwe są trzy przypadki wykonania badania(-ń):

- 1) sufit podwieszony stanowiący samodzielną przegrodę poddany badaniu(-om) odporności ogniowej według normy PN-EN 1364-2 [2], przy oddziaływaniu ognia od dołu;
- 2) sufit podwieszony stanowiący samodzielną przegrodę poddany badaniu(-om) odporności ogniowej według normy PN-EN 1364-2 [2], przy oddziaływaniu ognia od góry;
- 3) sufit podwieszony niestanowiący samodzielnej przegrody, lecz zastosowany jako zabezpieczenie stropu (pozioma membrana zabezpieczająca), poddany badaniu(-om) odporności ogniowej według normy PN-EN 13381-1 [4] jako element układu strop-sufit podwieszony (oddziaływanie ognia jak dla elementu stropowego – od dołu).

In the first case, the classification is completed by the symbols ($a \leftarrow b$), which means that the classification remains valid for the suspended ceiling in question only when exposed to fire from below.

In the latter case, the classification is completed by the symbols ($a \rightarrow b$), meaning that the classification remains valid for the suspended ceiling only when exposed to fire from above.

Where the fire resistance tests of suspended ceiling constituting an independent barrier have been carried under both exposures: fire from below and fire from above, the classification supplemented by symbols ($a \leftrightarrow b$) is possible, i.e. what means that the classification remains valid for the suspended ceiling both when exposed to fire exposure from below and when exposed to fire exposure from above.

Symbols “a” and “b” are taken from the English words: “above” and “below”.

In Table 1 possible fire resistance classifications of suspended ceilings constituting independent barriers are presented.

W pierwszym przypadku nadawana klasyfikacja jest uzupełniana symbolami ($a \leftarrow b$), co oznacza, że klasyfikacja pozostaje ważna dla danego sufitu podwieszonego tylko przy oddziaływaniu ognia od dołu.

W drugim przypadku nadawana klasyfikacja jest uzupełniana symbolami ($a \rightarrow b$), co oznacza, że klasyfikacja pozostaje ważna dla danego sufitu podwieszonego tylko przy oddziaływaniu ognia od góry.

W przypadku gdy badania odporności ogniowej sufitu podwieszonego, stanowiącego samodzielną przegrodę, zostały przeprowadzone zarówno przy oddziaływaniu ognia od dołu, jak i przy oddziaływaniu ognia od góry, możliwe jest nadanie klasyfikacji uzupełnionej symbolami ($a \leftrightarrow b$), co oznacza, że klasyfikacja pozostaje ważna dla danego sufitu podwieszonego zarówno przy oddziaływaniu ognia od dołu, jak i przy oddziaływaniu ognia od góry.

Symbole „a” i „b” przyjęto od angielskich określeń: powyżej – „above”, poniżej – „below”.

W tabeli 1 zestawiono możliwe klasyfikacje sufitów podwieszonych stanowiących samodzielne przegrody w zakresie odporności ogniowej.

Table 1. Fire resistance classes of suspended ceilings constituting independent barriers according to EN 13501-2 [6]

Tabela 1. Klasy odporności ogniowej sufitów podwieszonych stanowiących samodzielne przegrody według normy PN-EN 13501-2 [6]

Fire exposure from above	Fire exposure from below	Fire exposure from above and fire exposure from below
EI 15 ($a \rightarrow b$)	EI 15 ($a \leftarrow b$)	EI 15 ($a \leftrightarrow b$)
EI 30 ($a \rightarrow b$)	EI 30 ($a \leftarrow b$)	EI 30 ($a \leftrightarrow b$)
EI 45 ($a \rightarrow b$)	EI 45 ($a \leftarrow b$)	EI 45 ($a \leftrightarrow b$)
EI 60 ($a \rightarrow b$)	EI 60 ($a \leftarrow b$)	EI 60 ($a \leftrightarrow b$)
EI 90 ($a \rightarrow b$)	EI 90 ($a \leftarrow b$)	EI 90 ($a \leftrightarrow b$)
EI 120 ($a \rightarrow b$)	EI 120 ($a \leftarrow b$)	EI 120 ($a \leftrightarrow b$)
EI 180 ($a \rightarrow b$)	EI 180 ($a \leftarrow b$)	EI 180 ($a \leftrightarrow b$)
EI 240 ($a \rightarrow b$)	EI 240 ($a \leftarrow b$)	EI 240 ($a \leftrightarrow b$)

In all cases, in addition to determining the direction of fire exposure for which a classification is established, the scope of application of the classification should be determined, taking into account, for example, the permissible dimensions of the ceiling in relation to the size of the test specimen, the spacing of the structural elements, the method of fixing the ceiling, the height of the space between the suspended ceiling and the floor, the spacing and length of the hangers, the possibility of installing cables and pipes in the space above the suspended ceiling or the possibility of installing light accessories in the ceiling. PN-EN 1364-2 [2] specifies the range of changes that may be

We wszystkich przypadkach, poza określeniem kierunku oddziaływania ognia, dla którego klasyfikacja została ustalona, należy określić zakres zastosowania nadanej klasyfikacji, uwzględniając takie aspekty, jak np. dopuszczalne rozmiary sufitu w zależności od wielkości elementu badanego, rozstaw elementów konstrukcyjnych, sposób zamocowania sufitu, wysokość przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem, rozstaw i długość wieszaków, możliwość umieszczenia w przestrzeni nad sufitem podwieszonym kabli i rur czy umieszczenie w suficie opraw oświetleniowych. W normie PN-EN 1364-2 [2] określono zakres zmian, które mogą być wprowadzone do

introduced to the tested ceiling construction, which shall not change the fire resistance classification.

In the case of ceilings providing fire protection (protective membrane) of the floor, but not being independent barriers of a specified fire resistance, fire resistance, or precisely only loadbearing capacity of the floor-suspended ceiling system is determined as a result of fire resistance tests of the entire system and it depends on the limiting temperatures recorded in the space (cavity) between the tested floor and suspended ceiling, the limiting temperatures recorded on the surface of the structural elements of the tested floor and the type of the tested floor to which the ceiling is suspended. Limiting temperatures are the temperatures (defined for both cavity and surface) at which a floor made of a particular structural material will no longer be able to carry the load.

The adopted limiting temperatures determined for the temperature recorded in the cavity in the test specimen for each specified type of structural material, on the basis of which the loadbearing capacity is determined, are as follows:

- 600°C for all reinforced concrete building members;
- 530°C for building members containing steel beams plus reinforced concrete slabs;
- 450°C for reinforced concrete building members containing pre-stressed rebars/wires or strands;
- 400°C for building members containing steel/concrete composites;
- 370°C for cold formed steel building members;
- 300°C for building members containing timber joists or structures with wooden floor boards.

The adopted limiting temperatures determined for the temperature recorded on the surface of the structural elements of the tested floor for each specified type of structural material, on the basis of which the loadbearing capacity is determined, are as follows:

- 510°C for building members containing steel beams plus reinforced normal or aerated concrete slabs (temperature measured on the steel beam);
- 350°C for cold formed steel building members (temperature measured on the steel element);
- 350°C for building members containing steel/concrete composites (temperature measured on the profiled steel sheet of the composite slab).

Although for floors with horizontal protective membranes it is primarily expected that the loadbearing capacity (R) criterion will be met, also

zbadanej konstrukcji sufitu, które nie zmieniają nadanej klasyfikacji w zakresie odporności ogniowej.

W przypadku sufitów stanowiących zabezpieczenie ogniochronne (membranę zabezpieczającą) stropu, ale niestanowiących samodzielnych przegród o określonej odporności ogniowej, odporność ogniowa, a dokładnie tylko nośność ogniowa, układu strop-sufit podwieszony ustalana jest w wyniku badań odporności ogniowej całego układu i jest ona uzależniona od temperatur granicznych zarejestrowanych w przestrzeni (pustce) pomiędzy badanym stropem a sufitem podwieszonym, temperatur granicznych zarejestrowanych na powierzchni elementów konstrukcyjnych stropu badanego oraz od rodzaju badanego stropu, do którego sufit jest podwieszony. Temperatury graniczne są temperaturami (zdefiniowanymi zarówno dla pustki, jak i dla powierzchni), w których strop zbudowany z określonego materiału konstrukcyjnego będzie niezdolny do dalszego przenoszenia obciążenia.

Przyjęte wartości temperatur granicznych ustalone dla temperatury rejestrowanej w pustce elementu badanego dla każdego określonego rodzaju materiału konstrukcji, na podstawie których określa się nośność ogniową, są następujące:

- 600°C dla wszystkich żelbetowych elementów budynku;
- 530°C dla elementów budynku zawierających belki stalowe plus płyty żelbetowe;
- 450°C dla wszystkich żelbetowych elementów budynku zawierających sprężone pręty/druty lub sploty;
- 400°C dla elementów budynku zawierających elementy zespolone stalowo-betonowe;
- 370°C dla zimnogiętych stalowych elementów budynku;
- 300°C dla elementów budynku zawierających drewniane żebrza lub konstrukcje podłogowe z desek drewnianych.

Przyjęte wartości temperatur granicznych ustalone dla temperatury rejestrowanej na powierzchni elementów konstrukcyjnych stropu badanego dla każdego określonego rodzaju materiału konstrukcji, na podstawie których określa się nośność ogniową, są następujące:

- 510°C dla elementów budynku zawierających belki stalowe plus płyty żelbetowe z betonu zwykłego lub betonu komórkowego (temperatura mierzona na belce stalowej);
- 350°C dla zimnogiętych stalowych elementów budynku (temperatura mierzona na elemencie stalowym);

the fire integrity (E) and fire insulation (I) criteria can be determined according to the procedures specified in the standard for the fire resistance testing of floors PN-EN 1365-2 [7].

5. APPLICATION OF THE FIRE RESISTING SUSPENDED CEILINGS

A suspended ceiling intended for the protection of the floor and its loadbearing structure can be designed as:

1. Part of the system: suspended ceiling – floor slab (or loadbearing structure of the floor slab), which together meets the requirements of the relevant fire resistance class with regard to load-bearing capacity (R), fire insulation (I) and fire integrity (E).
2. Independent barrier, which meets the criteria of fire integrity (E) and fire insulation (I).

In the first case it should be remembered that the fire resistance classification refers only to the exposure of fire from below (from the room side). This classification does not apply to the fire exposure from above. A fire in the space between the suspended ceiling (horizontal protective membrane) and the floor may occur if there are combustible materials in this space. As a result, the established assessment of the fire protection capability of the horizontal protective membrane may be invalidated by the presence of combustible materials in the space above the membrane. As it is difficult to determine the “representative” quantity of combustible materials that can be contained within this space, it is also difficult to determine the “representative” fire exposure.

Limitation of the possibility of presence of combustible materials and products in the space above the suspended ceiling/protective membrane is reflected in Polish building regulations. § 232.1 of the Regulation of the Minister of Infrastructure of 12 April 2002 on technical conditions to be met by buildings and their location [8] states that: “*Walls and ceilings that are part of the fire separation elements shall be made of non-combustible materials ...*” Therefore, when a horizontal barrier consisting of a floor and a suspended ceiling is used as a fire separating element, no combustible material will be allowed in the space between the suspended ceiling and the floor.

Taken into account that tests are generally performed without the presence of combustible materials in this space, the scope of application of the test and evaluation results generally does not cover the presence of combustible materials in the

- 350°C dla elementów budynku zawierających elementy zespolone stalowo-betonowe (temperatury mierzone na profilowanej blasze stalowej płyty zespolonej).

Chociaż w odniesieniu do stropów z poziomymi membranami zabezpieczającymi oczekuje się przede wszystkim spełnienia kryterium nośności ogniowej (R), również kryteria szczelności ogniowej (E) i izolacyjności ogniowej (I) mogą być ustalane zgodnie z procedurami określonymi w normie dotyczącej badań odporności ogniowej stropów PN-EN 1365-2 [7].

5. STOSOWANIE SUFITÓW PODWIESZONYCH O OKREŚLONEJ ODPORNOŚCI OGNIOWEJ

Sufit podwieszony, przeznaczony do ochrony stropu i jego konstrukcji nośnej, można projektować jako:

1. Część układu: sufit podwieszony–płyta stropowa (ewentualnie konstrukcja nośna płyty stropowej), który łącznie spełnia wymagania odpowiedniej klasy odporności ogniowej w zakresie nośności (R), izolacyjności ogniowej (I) i szczelności ogniowej (E).
2. Samodzielną przegrodę, która spełnia kryteria szczelności ogniowej (E) oraz izolacyjności ogniowej (I).

W pierwszym przypadku należy pamiętać, że nadana klasyfikacja w zakresie odporności ogniowej dotyczy tylko oddziaływania ognia od dołu przegrody (od strony pomieszczenia). Klasyfikacja ta nie dotyczy oddziaływania ognia od góry. Pożar w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym (poziomą membraną zabezpieczającą) a stropem może wystąpić, jeśli w tej przestrzeni będą znajdować się materiały palne. W efekcie ustalona ocena zdolności do zabezpieczania ogniochronnego poziomej membrany zabezpieczającej może zostać unieważniona na skutek obecności materiałów palnych w przestrzeni nad membraną. Ponieważ trudno określić „reprezentatywną” ilość materiałów palnych, które mogą znaleźć się w tej przestrzeni, trudno także określić „reprezentatywne” oddziaływanie ognia.

Ograniczenie możliwości występowania materiałów i wyrobów palnych w przestrzeni nad sufitem podwieszonym/membraną zabezpieczającą znajduje odzwierciedlenie w polskich przepisach techniczno-budowlanych. W § 232.1 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [8], stwierdza się, że: „*Ściany i stropy stanowiące elementy oddzielenia przeciwpożarowego powinny być wykonane z materiałów niepalnych, ...*”. Zatem gdy przegroda pozioma

space between the membrane and the floor. The test configuration would need to take into account both the amount and the location of such materials and the final assessment would need to be limited to the test configuration. The maximum quantity of combustible materials that may be present in the space between the suspended ceiling (horizontal protective membrane) and the floor shall then be determined by national regulations.

In the latter case, if the suspended ceiling classification is specified for the fire exposure from below only or both from below and from above, the fire resistance of the floor is ensured, regardless of the fire resistance of the structure above the suspended ceiling; the installations are also protected against fire for the required period of time. The classification of a suspended ceiling as an independent barrier under fire exposure from above applies to the suspended ceiling only. It should be noted that more and more often the solutions of suspended ceilings for the fire exposure from below and for the fire exposure from above are differentiated, e.g. by using for the same structural solution an additional insulation layer laid on the ceiling for the fire exposure from above. As a result, two separate solutions are classified: one for the fire exposure from below (without insulation) and one for the fire exposure from above (with insulation).

In Polish building regulations [8], additional designations regarding fire resistance classes of suspended ceilings: $(a \leftarrow b)$, $(a \rightarrow b)$ and $(a \leftrightarrow b)$, specifying the direction of the fire exposure are not used. The fire performance requirements for floors and roofs (including suspended ceilings) apply only to the fire exposure from below.

złożona ze stropu i sufitu podwieszonego będzie pełnił funkcję oddzielenia przeciwpożarowego w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym a stropem nie będą mogły znajdować się żadne materiały palne.

Biorąc pod uwagę, że badania wykonuje się na ogół bez obecności materiałów palnych w tej przestrzeni, zakres zastosowania wyników badania i oceny nie obejmuje na ogół występowania materiałów palnych w przestrzeni pomiędzy membraną a stropem. Konfiguracja badania musiałaby uwzględniać zarówno ilość, jak i umiejscowienie takich materiałów, a końcowa ocena musiałaby być ograniczona do konfiguracji badanej. Dopuszczalna ilość materiałów palnych, które mogą znajdować się w przestrzeni pomiędzy sufitem podwieszonym (poziomą membraną zabezpieczającą) a stropem, powinna być wówczas określona w przepisach krajowych.

W drugim przypadku, jeśli klasyfikacja sufitu podwieszonego została określona dla oddziaływania ognia tylko od dołu lub od dołu i od góry, zapewniona jest odporność ogniowa stropu, niezależnie od tego, jaka jest odporność ogniowa konstrukcji znajdującej się powyżej sufitu podwieszonego; także instalacje są chronione przed pożarem przez wymagany czas. Klasyfikacja sufitu podwieszonego jako samodzielnej przegrody przy oddziaływaniu ognia od góry, dotyczy wyłącznie sufitu podwieszonego. Należy zwrócić uwagę, że coraz częściej rozwiązania sufitów podwieszonych dla oddziaływania ognia od dołu i dla oddziaływania ognia od góry są różnicowane, np. przy tym samym rozwiązaniu konstrukcyjnym poprzez zastosowanie dodatkowej warstwy izolacyjnej ułożonej na suficie dla oddziaływania ognia od góry. W rezultacie klasyfikowane są odrębne dwa rozwiązania: jedno dla oddziaływania ognia od dołu (bez izolacji) i drugie dla oddziaływania ognia od góry (z izolacją).

W polskich przepisach techniczno-budowlanych [8] dodatkowe oznaczenia dotyczące klas odporności ogniowej sufitów podwieszonych: $(a \leftarrow b)$, $(a \rightarrow b)$ i $(a \leftrightarrow b)$, precyzujących kierunek oddziaływania ognia, nie są wykorzystywane. Wymagania w zakresie odporności ogniowej w odniesieniu do stropów i dachów (łącznie z sufitami podwieszonymi) odnoszą się wyłącznie do oddziaływania od dołu.

References

- [1] PN-B-02875:1998 *Ochrona przeciwpożarowa budynków – Metoda badania odporności ogniowej i skuteczności ogniochronnej sufitów podwieszonych. Fire protection of buildings – Method of testing for fire resistance and fire protection effectiveness of suspended ceilings.*
- [2] PN-EN 1364-2:2001 *Badania odporności ogniowej elementów nienośnych – Część 2: Sufity EN 1364-2:1999 Fire resistance tests for non-loadbearing elements – Part 2: Ceilings.*

- [3] PN-EN 1364-2:2018-02 *Badania odporności ogniowej elementów nienośnych – Część 2: Sufity EN 1364-2:2018 Fire resistance tests for non-loadbearing elements – Part 2: Ceilings.*
- [4] PN-EN 13381-1:2014-12 *Metody badań w celu ustalania wpływu zabezpieczeń na odporność ogniową elementów konstrukcyjnych – Część 1: Poziome membrany zabezpieczające EN 13381-1:2014. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 1: Horizontal protective membranes.*
- [5] PN-EN 1363-1:2012 *Badania odporności ogniowej – Część 1: Wymagania ogólne. EN 1363-1:2012 Fire resistance tests – Part 1: General Requirements.*
- [6] PN-EN 13501-2:2016-07 *Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków – Część 2: Klasyfikacja na podstawie wyników badań odporności ogniowej, z wyłączeniem instalacji wentylacyjnej EN 13501-2:2016. Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services.*
- [7] PN-EN 1365-2:2014-12 *Badania odporności ogniowej elementów nośnych – Część 2: Stropy i dachy EN 1365-2:2014. Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 2: Floors and roofs.*
- [8] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. Nr 75 poz. 690, z późniejszymi zmianami. Regulation of the Minister of Infrastructure of 12 April 2002 on the technical conditions to be met by buildings and their location.

Acknowledgments:

The work was financed by Building Research Institute

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Instytut Techniki Budowlanej

DIAGNOSTICS OF CONCRETE ELEMENTS AFTER THE FIRE

DIAGNOSTYKA ELEMENTÓW BETONOWYCH PO POŻARZE

DOI: 10.30540/sae-2018-022

Abstract

The paper presents selected methods for determining the influence of fire on the load capacity of concrete elements – diagnostics and damages arising after application of fire temperatures. The subject may not seem new in terms of the well-known drop in the strength of concrete in fire conditions, but an important aspect discussed in the paper is the fracture toughness of concrete depending on high temperatures.

Destructions, caused by fire temperatures, affects the physical and mechanical properties of concrete, and their size can be assessed using the stress intensity factor. According to our own research, the critical stress intensity factor K_{IC} of concrete decreases faster than the dynamic modulus of elasticity, and also faster than compressive and tensile strength. The paper describes selected methods of diagnostics of construction elements from concrete damaged by fire.

Keywords: diagnostics, fire temperatures, damage, cracks, fractures, non-destructive testing, destructive testing, strength, dynamic modulus of elasticity, stress intensity factor

Streszczenie

W referacie przedstawiono wybrane metody określania wpływu pożaru na nośność elementów betonowych – diagnostykę oraz uszkodzenia powstające po aplikacji temperatur pożarowych. Temat może nie wydaje się nowy w aspekcie, powszechnie znanego spadku wytrzymałości betonu w warunkach pożarowych, jednak istotnym zagadnieniem poruszonym w referacie jest odporność betonu na pękanie w zależności od wysokich temperatur.

Destrukcje powstałe pod wpływem temperatur pożarowych wpływają na właściwości fizykomechaniczne betonu, a ich wielkość może być oceniana za pomocą współczynnika intensywności naprężeń. Z badań własnych wynika, że krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} betonu zmniejsza się szybciej niż dynamiczny moduł sprężystości E_{dyn} , a także szybciej niż wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie.

W referacie opisano wybrane metody diagnostyki elementów konstrukcyjnych z betonu, uszkodzonych przez pożar.

Słowa kluczowe: diagnostyka, temperatury pożarowe, uszkodzenia, zarysowania, spękania, badania nieniszczące, niszczące, wytrzymałość, dynamiczny moduł sprężystości, współczynnik intensywności naprężeń

1. INTRODUCTION

The subject of this paper is the diagnostics of concrete elements after a fire and the assessment of concrete behavior after the application of fire temperatures including fracture mechanics. Proper assessment of concrete fracture toughness based on the conducted tests, by determining the size of the stress intensity factor at fire temperatures, will enable proper assessment of concrete destruction resulting from high temperatures action.

In their professional activity, the authors of this paper have often participated in the development of design documentation for structural elements that

1. WPROWADZENIE

Przedmiotem niniejszego referatu jest diagnostyka elementów betonowych po pożarze i ocena zachowania się betonu po aplikacji temperatur pożarowych z uwzględnieniem mechaniki pękania. Właściwa ocena odporności na pękanie betonu na podstawie prowadzonych badań, poprzez ustalenie wielkości współczynnika intensywności naprężeń w temperaturach pożarowych, umożliwi właściwą ocenę destrukcji betonu wynikającą z działania wysokich temperatur.

W swojej działalności zawodowej autorzy niniejszego referatu niejednokrotnie brali udział w opracowywaniu dokumentacji projektowych elementów

had to meet the requirements of fire resistance to high temperatures in fire conditions. Current methods of designing structures in such conditions as well as their fire diagnostics are based mainly on taking into account the decrease of concrete strength as the temperature increases, not the drop in fracture toughness parameters, which may be important in determining fire resistance, especially of bent concrete structures (slabs, beams).

2. ACTION OF FIRE TEMPERATURES ON THE CONCRETE

Many researchers dealt with this problem, but most of them studied mainly the effect of high temperatures on the strength of concrete, changes in its physical, chemical, mechanical, structural and phase composition.

Transformations that occur in concrete during the increase of fire temperatures are described, among others in [1-3]. They can be accurately determined in particular temperature ranges:

- 105°C – evaporation of free (capillary) water contained in the concrete (chem.) Beginning of dehydration of ettringite $\text{Ca}_6\text{A}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, causing its reduction in the cement matrix,
- 120÷163°C – decomposition of the gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – decrease of its content in the cement matrix,
- 180°C – total reduction of physically bound water (eg from capillaries to 0.1 mm) – increase in capillary porosity and microcracks. Dehydration of ettringite and hydrated CSH calcium silicates,
- 190÷300°C – sudden breakout at the edges and scaling of the concrete surface (*spalling*),
- 300°C – the end of ettringite dehydration and further dehydration of CSH, the concrete still has a compact structure,
- 250÷350°C – the drop in strength starts at a temperature of approx. 300°C. Pink-red coloration of the aggregates caused by the oxidation of iron compounds (also about 300°C),
- approx. 500°C – dehydroxylation of portlandite (calcium hydroxide), which converts into a free lime with the possibility of rebinding: $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ and reduction of chemically bound water, followed by rehydration of CaO (atmospheric humidity or pouring concrete water during extinguishing [4]): $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$,
- 600÷700°C – due to the above-mentioned reaction and due to decomposition of calcium carbonate ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) there is a large increase

konstrukcji, które musiały spełniać wymogi odporności ogniowej na działanie wysokich temperatur w warunkach pożaru. Aktualne metody projektowania konstrukcji w takich warunkach, jak i ich diagnostyki po pożarze opierają się głównie na uwzględnianiu spadku wytrzymałości betonu wraz ze wzrostem temperatury, a nie spadku parametrów odporności na pękanie, która może mieć istotne znaczenie w określaniu nośności pożarowej, zwłaszcza zginanych konstrukcji betonowych (płyty, belek).

2. DZIAŁANIE TEMPERATUR POŻAROWYCH NA BETON

Wielu badaczy zajmowało się tym problemem, jednak większość z nich badała głównie wpływ wysokich temperatur na wytrzymałość betonu, zmiany jego cech fizycznych, chemicznych, mechanicznych, strukturalnych i składu fazowego.

Przemiany, które zachodzą w betonie podczas wzrostu temperatur pożarowych opisano m.in. w [1-3]. Można je w miarę dokładnie określić w poszczególnych zakresach temperatur:

- 105°C – odparowanie wody wolnej (kapilarnej) zawartej w betonie (chem.) Początek dehydratacji ettringitu $\text{Ca}_6\text{A}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ powodujący jego redukcję w matrycy cementowej,
- 120÷163°C – rozkład gipsu $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – spadek jego zawartości w matrycy cementowej,
- 180°C – całkowita redukcja wody związanej fizycznie (np. z kapilar do 0,1 μm) – wzrost porowatości kapilarnej i mikropeknięć. Dehydratacja ettringitu i uwodnionych krzemianów wapnia CSH,
- 190÷300°C – nagłe odpajanie na krawędziach i łuszczenie powierzchni betonu (*spalling*),
- 300°C – koniec dehydratacji ettringitu i dalsza dehydratacja CSH, beton zachowuje jeszcze strukturę zwartą,
- 250÷350°C – spadek wytrzymałości rozpoczyna się w temperaturze ok. 300°C. Różowoczerwone przebarwienie kruszywa spowodowane utlenianiem związków żelaza (też ok. 300°C),
- ok. 500°C – dehydroksylacja portlandytu (wodorotlenku wapnia), który przechodzi w wolne wapno posiadające możliwość powtórnego wiązania: $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ i redukcja wody związanej chemicznie, a następnie powtórne nawodnienie CaO (wilgoć atmosferyczna lub polewanie betonu wodą w czasie gaszenia [4]): $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$,
- 600÷700°C – skutek ww reakcji oraz z powodu rozkładu węglanu wapnia ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) następuje duży przyrost objętości związków wap-

in the volume of calcium compounds (about 40%), which results in increased cracking of concrete and a significant decrease in its strength (chem.). Beginnings and development of cracks and weakening of bonds between aggregate and paste in concrete, possible beginnings of degradation. Increase in porosity of the paste. Concrete construction unsuitable after heating at temperatures of 550÷600°C – strength drops above 50%, and for temperatures of 800°C approx. 80%,

- 573°C – phase transformation of quartz from low temperature variety β into high temperature variety α ; the process of rebuilding the structure occurs with intensive enlargement of the concrete volume (on the aggregate with silicon content) and is the main factor of its low strength during the operation of high temperatures (chem.),
- 100÷800°C – dehydration of CSH cement matrix components,
- 350÷900°C – transformations occurring in the aggregate: volume changes, phase transitions and chemical decomposition reactions,
- 700÷800°C – decomposition of limestone aggregates – calcium carbonate CaCO_3 (chem.),
- 1200÷1350°C – melting (softening) of concrete.

As stated in [5], concrete heated to a temperature of approx. 500÷600°C, shows such a significant drop in strength that in a fire or after a fire, this concrete can be classified as not useful in terms of structural load capacity. Therefore, the behavior of concrete at a temperature exceeding 600°C, practically no have a grand significance, while the information presented above is used to deepen the knowledge related to the impact of high temperatures on concrete.

The reduction of compressive strength of concrete by approx. 50÷60% at a temperature above 500°C respects the standard 500°C isothermal method [6], according to which static parts of the concrete cross-section are not included in the calculations, where the temperature exceeded this value.

3. STATE OF CONCRETE STRUCTURES AFTER THE FIRE

In the literature on the subject [7], it was noted that concrete is a composite that stands fairly well the effect of significant temperatures. The concrete heats up quite slowly because of the not too high thermal conductivity coefficient, so that the reinforcing steel warms up after some time. Increase in temperature in concrete causes thermal deformation of its components, evaporation of water contained in it, increase in pressure in pores and partial depreciation of

nia (ok. 40%), co powoduje wzmożone pękanie betonu i znaczny spadek jego wytrzymałości (chem.). Początki i rozwój rys oraz osłabienie więzi między kruszywem i zaczynem w betonie, możliwe początki degradacji. Przyrost porowatości zaczynu. Beton konstrukcyjnie nieprzydatny po nagrzaniu w temperaturach 550÷600°C – spadki wytrzymałości powyżej 50%, a dla temperatury 800°C ok. 80%,

- 573°C – przemiana fazowa kwarcu z odmiany niskotemperaturowej β w odmianę wysokotemperaturową α ; proces z przebudową struktury zachodzi z intensywnym powiększeniem kubatury betonu (na kruszywie z zawartością krzemu) i jest zasadniczym czynnikiem jego niskiej wytrzymałości podczas działania wysokich temperatur (chem.),
- 100÷800°C – dehydratacja komponentów matrycy cementowej CSH,
- 350÷900°C – przemiany zachodzące w kruszywie: zmiany objętości, przemiany fazowe i reakcje rozkładu chemicznego,
- 700÷800°C – rozkład kruszyw wapiennych – węglanu wapnia CaCO_3 (chem.),
- 1200÷1350°C – topnienie (mięknienie) betonu.

Jak podano w [5] beton ogrzany do temperatury ok. 500÷600°C wykazuje tak znaczny spadek wytrzymałości, że w warunkach pożaru lub po pożarze beton ten można klasyfikować jako nieużyteczny pod kątem nośności konstrukcji. W związku z tym zachowania betonu w temperaturze przekraczającej 600°C praktycznie mają już niewielkie znaczenie, natomiast informacje przedstawione powyżej służą do pogłębienia wiedzy związanej z oddziaływaniem wysokich temperatur na beton.

Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonu o ok. 50÷60% w temperaturze ponad 500°C respektuje normowa metoda izotermy 500°C [6], według której nie uwzględnia się w obliczeniach statycznych części przekroju betonowego, gdzie temperatura przekroczyła tę wielkość.

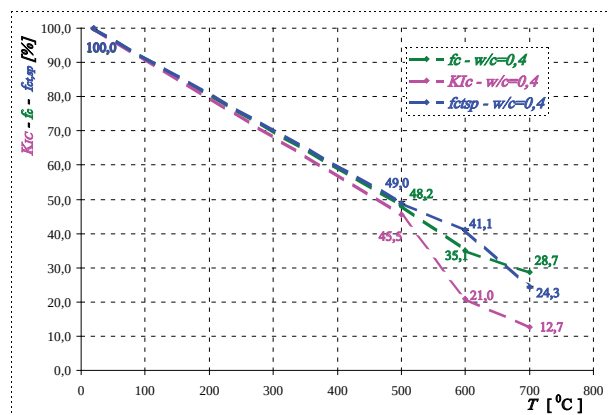
3. STAN BETONU W KONSTRUKCJI PO POŻARZE

W literaturze przedmiotu [7] odnotowano, że beton jest kompozytem znoszącym dość dobrze oddziaływania znacznych temperatur. Beton nagrzewa się dosyć wolno z powodu niezbyt wysokiego współczynnika przewodności cieplnej, przez co stal zbrojeniowa rozgrzewa się dopiero po pewnym czasie. Wzrost temperatury w betonie powoduje odkształcenia termiczne jego składników, odparowywanie zawartej w nim wody, wzrost ciśnienia w porach oraz częściową deprecjację własności mechanicznych

mechanical properties of both concrete and reinforcing steel. Concrete after their rapid heating may undergo the phenomenon of spalling occurring under the temperature of $190\div350^{\circ}\text{C}$, which manifests itself in the rapid detachment of concrete pieces or peeling of its surface and can expose reinforcement and has direct impact of high temperature on it, as well as decrease or even loss load bearing capacity of reinforced concrete structure [8].

In fire conditions, the heat slowly penetrates into the material, but as a result of the slow pace of its course in the concrete, there are significant differences in temperature between the plane of the element and its interior. The effect of temperature gradients is the degradation of concrete, defined mainly by the change in compressive strength f_c and stretching $f_{ct,sp}$, but also, as our own studies show [9], the reduction in fracture toughness expressed by the stress intensity factor K_{IC} . From the graph (Fig. 1) it follows that, for example at 600°C , the fracture toughness decreases by nearly 79%, while the compressive strength decreases by about 65%, and by tensile strength about 59%.

It can therefore be concluded that the stress intensity factor should be more indicated in the diagnosis of concrete structure after fire than the strength of concrete.



Research works determine the that a process of changing strength depending on the temperature results, among others, from the concrete composition (type of aggregate, of w/c ratio, presence of additives, etc.), but also depends on the speed of heating and of duration of action of temperatures [10]. Gradual degradation of concrete is the result of physico-chemical changes taking place in concrete at fire temperatures [11].

The influence of high fire temperatures on the basic characteristics of concrete is very important.

zarówno betonu, jak i stali zbrojeniowej. Betony po ich gwałtownym podgrzaniu mogą ulegać zjawisku *spallingu* pojawiającego się pod działaniem temperatury $190\div350^{\circ}\text{C}$, co uzewnętrznia się raptownym odspajaniem kawałków betonu lub złuszczeniem jego powierzchni i może powodować odsłonięcie zbrojenia oraz bezpośrednie oddziaływanie nań wysokiej temperatury, a także spadek lub nawet utratę nośności konstrukcji żelbetowej [8].

W warunkach pożarowych ciepło powoli przenika w głąb materiału, ale w następstwie wolnego tempa jego przebiegu w betonie występują znaczne różnice temperatur między płaszczyzną elementu a jego wnętrzem. Wynikiem gradientów temperatury jest degradacja betonu, definiowana głównie zmianą wytrzymałości na ściskanie f_c i rozciąganie $f_{ct,sp}$, ale też, jak dowodzą badania własne [9], obniżeniem odporności na pękanie, wyrażonej współczynnikiem intensywności naprężeń K_{IC} . Z rysunku 1 wynika, że przykładowo w temperaturze 600°C odporność na pękanie spada o blisko 79%, podczas gdy wytrzymałość na ściskanie spada o ok. 65%, a na rozciąganie ok. 59%. Można zatem uznać, że współczynnik intensywności naprężeń powinien być bardziej wskazany w diagnostyce konstrukcji z betonu po pożarze niż wytrzymałość betonu.

Prace badawcze określają, że proces zmian wytrzymałości w zależności od temperatury wynika m.in.

Fig. 1. K_{IC} dependencies f_c and $f_{ct,sp}$ – T of concrete with $w/c = 0.4$ at fire temperatures

Rys. 1. Zależności K_{IC} ; f_c i $f_{ct,sp}$ – T betonu o $w/c = 0.4$ w temperaturach pożarowych

ze składu betonu (rodzaj kruszywa, wskaźnik w/c, obecność dodatków itp.), ale zależny jest także od szybkości nagrzewania i czasu działania temperatur [10]. Stopniowa degradacja betonu to wynik przemian fizykochemicznych zachodzących w betonie w temperaturach pożarowych [11].

Wpływ wysokich temperatur pożarowych na podstawowe cechy betonu jest bardzo istotny. Zmniejsza się jego wytrzymałość na ściskanie [12] i rozciąganie (która determinuje zarysowanie i pękanie),

Its compressive [12] and tensile strength (which determines cracking and fracturing), the elastic modulus (also the dynamic module – Fig. 5) is reduced, and the deformation increases, often to the destruction of the structure [13]. Accurate determination of the range and impact of these phenomena should be thoroughly examined in order to develop the best methods for diagnosing as well as designing and making concrete as much as possible, in given conditions and capabilities, fire resistance. The use of fracture mechanics seems to be a promising tool that can contribute to a better understanding of these issues [14-16].

4. ASSESSMENT OF CONCRETE STRUCTURES AFTER FIRE ACTION

The primary purpose of repairing a structure after a fire is to restore it to its condition and destiny precede the condition before the fire. It should be demonstrated that after repair works (cleaning and securing the reinforcement, reconstructing the geometry of concrete cross-sections and other required operations) the structure will be characterized by the same durability as before the fire, as well as the same load-bearing capacity and fire resistance.

The course of proceedings in assessing the technical condition of a concrete structure after a fire [17]:

- Establishing data on the course of the fire; this should be done as soon as possible before the facility is started. Valuable information about the course of the fire, its temperature in particular places of the structure can give a visual inspection of various materials in the facility (eg steel, wood, plastics, glass).
- Inspection, inventory, measurement, research and analysis of damage – a detailed description of their nature, scope and location.
- Damage classification – defining structural defects, scope and impact on the safety level of a building.
- Determination of mechanical properties of materials (concrete and reinforcing steel) in the structure taking into account the destructive influence of high temperature using non-destructive and/or destructive test methods.
- Final assessment based on the analysis of the technical condition and the level of safety of the structure and considering the economic factor – selection of the most appropriate method of repair or decree on the necessity of demolition of the structure.

In Polish [7] and foreign [3] literature, a 5-level scale of damage categories is presented for the

moduł sprężystości (również moduł dynamiczny rys. 5), a wzrastają odkształcenia, niejednokrotnie aż do zniszczenia konstrukcji [13]. Dokładne określenie zasięgu i wpływu tych zjawisk powinno być wnikliwie zbadane w celu opracowania jak najlepszych metod diagnozowania, ale też i projektowania oraz wykonania betonu o jak największej, w danych warunkach i możliwościach, odporności na działanie ognia. Zastosowanie mechaniki pękania wydaje się obiecującym narzędziem, które może przyczynić się do lepszego rozpoznania tych zagadnień [14-16].

4. OCENA KONSTRUKCJI BETONOWEJ PO DZIAŁANIU POŻARU

Podstawowym celem naprawy konstrukcji po pożarze jest przywrócenie jej do stanu i przeznaczenia poprzedzającego stan przed pożarem. Należy wykazać, że po pracach naprawczych (oczyszczeniu i zabezpieczeniu zbrojenia, odtworzeniu geometrii przekrojów betonowych i innych wymaganych zabiegach) konstrukcja charakteryzować się będzie taką samą trwałością, jak przed pożarem, a także taką samą nośnością i odpornością ogniową.

Tok postępowania w ocenie stanu technicznego konstrukcji betonowej po pożarze [17]:

- Ustalenie danych dotyczących przebiegu pożaru; należy to zrobić jak najprędzej, przed rozpoczęciem porządkowania obiektu. Cennych wiadomości o przebiegu pożaru, jego temperaturze w poszczególnych miejscach konstrukcji mogą dać oględziny różnych materiałów w obiekcie (np. stali, drewna, tworzyw sztucznych, szkła).
- Oględziny, inwentaryzacja, pomiary, prace badawcze i analizy zaistniałych uszkodzeń – szczegółowe określenie ich charakteru, zakresu i lokalizacji.
- Klasyfikacja uszkodzeń – zdefiniowanie defektów konstrukcji, zakresu i wpływu na poziom bezpieczeństwa budowli.
- Określenie właściwości mechanicznych materiałów (betonu i stali zbrojeniowej) w konstrukcji z uwzględnieniem destrukcyjnego wpływu wysokiej temperatury przy zastosowaniu nieniszczących lub/i niszczących metod badawczych.
- Ocena końcowa dokonana na podstawie analizy stanu technicznego i poziomu bezpieczeństwa konstrukcji oraz przy rozważeniu czynnika ekonomicznego – wybór najwłaściwszej metody naprawy lub orzeczenie o konieczności rozbiórki konstrukcji.

W literaturze polskiej [7] i zagranicznej [3] prezentowana jest pięciostopniowa skala kategorii uszko-

standard of visual assessment of concrete after a fire.

Simplified visual classification of fire damages:

0. "Cosmetic" repair – thermally undamaged concrete (discoloration on the surface).
1. Surface repair – damage to concrete surface and cover, dropping of lagging with limited range and range, presence of soot and entrenchment, visible network of micro-cracks.
2. General repair – moderate cracks (> 0.5 mm) and concrete chippings (up to 10 mm in size), slight deformation and corrosion on the surfaces of reinforcing steel rods, up to 25% of exposed reinforcing bars, surface color pink red.
3. Basic repair – structural damage at the cross-section level (significant cracks and defects of the reinforcement concrete cover), structural deformations lowering the bearing capacity or significant displacements causing lack of proper connection of adjacent elements or parts of the structure, up to 50% of exposed reinforcing bars, color of the pink surface red or whitish-gray.
4. Main repair (overhaul) – structural damage at the level of elements or parts of the structure (significant and serious damage to structural elements, local damage and large deformations), advanced loss of concrete cover, damage to the squeezed zone of the elements and exposure or damage to the reinforcement, color whitish – Gray.

Assessment of concrete structure after a fire can be made on the basis of non-destructive and destructive tests. Non-destructive testing includes: visual assessment of the construction status, inventory of corroded areas and locations where cracks and fractures, sclerometric, radiological, acoustic and electromagnetic methods are found

5. VISUAL ASSESSMENT OF CONCRETE AFTER FIRE

An ad hoc method of assessing the size of the fire temperature affecting the concrete constructions is the visual assessment carried out at the site of the incident. This assessment can be considered as preliminary and auxiliary, but gives a specific view of fire damage. This preliminary assessment of the suitability of the concrete structure after the fire, which can be visually estimated on the basis of the color of the heated concrete, should set the directions for further actions and more detailed tests.

dzeń dla ujednolicenia wzrokowej oceny betonu po pożarze.

Uproszczona wizualna klasyfikacja uszkodzeń pożarowych:

0. Naprawa „kosmetyczna” – beton nieuszkodzony termicznie (przebarwienia na powierzchni).
1. Naprawa powierzchniowa – uszkodzenia powierzchni i otuliny betonowej, odpadanie otuliny o ograniczonym zasięgu i zakresie, obecność sadzy i okopceń, widoczna sieć mikrozarysowań.
2. Naprawa ogólna – umiarkowane zarysowania (o rozwarości $> 0,5$ mm) i odpryski otuliny betonowej (wielkości do 10 mm), niewielkie deformacje i korozja na powierzchniach prętów stali zbrojeniowej, do 25% odkrytych prętów zbrojeniowych, kolor powierzchni różowoczerwony.
3. Naprawa zasadnicza – uszkodzenia konstrukcyjne na poziomie przekroju (znaczne zarysowania i ubytki otuliny betonowej zbrojenia), deformacje konstrukcji obniżające nośność lub znaczne przemieszczenia powodujące brak właściwego powiązania ze sobą przyległych elementów lub części konstrukcji, do 50% odkrytych prętów zbrojeniowych, kolor powierzchni różowoczerwony lub białawoszary.
4. Naprawa główna (remont kapitalny) – uszkodzenia konstrukcyjne na poziomie elementów lub części konstrukcji (znaczne i poważne uszkodzenia elementów konstrukcyjnych, z lokalnym zniszczeniem i dużymi deformacjami), zaawansowana utrata otuliny betonowej, uszkodzenia strefy ściskanej elementów i odsłonięcie bądź uszkodzenie zbrojenia, kolor białawoszary.

Oceny konstrukcji betonowej po pożarze można dokonać na podstawie badań nieniszczących i niszczących. Do badań nieniszczących zalicza się: ocenę wizualną stanu konstrukcji, inwentaryzację obszarów skorodowanych oraz miejsc, gdzie znajdują się rysy i pęknięcia, metody sklerometryczne, radiologiczne, akustyczne oraz metody elektromagnetyczne.

5. OCENA WIZUALNA BETONU PO POŻARZE

Doraźną metodą oceny wielkości temperatury pożarowej oddziałującej na konstrukcję betonową jest ocena wizualna przeprowadzona w miejscu zdarzenia. Ocena ta może być traktowana jako wstępna i pomocnicza, ale dająca określony pogląd na uszkodzenia wywołane pożarem. Ta wstępna ocena przydatności konstrukcji betonowej po pożarze, którą można wizualnie oszacować na podstawie zabarwienia wygrzanego betonu, powinna wyznaczać kierunki dalszych działań i bardziej szczegółowych badań.

In the visual assessment, the coloration of the concrete surface, resulting from fire temperatures, is important. In the literature [18], the color of the concrete surface was specified depending on the size of the fire temperature:

Temperature [°C]: Color:

- up to 120°C - gray,
- up to 300°C - light gray,
- up to 500°C - light gray with a shade of pink,
- up to 600°C - light gray with a yellow shade.

Based on own research, after heating concrete samples at temperatures of 500°C, 600°C and 700°C, colors of concrete were obtained, shown in the pictures Figures 2 and 3. The tests were carried out on 70 × 15 × 8 cm on concrete samples heated to appropriate temperatures in a chamber furnace. The rate of samples heating to the set temperature was 4.3÷6.7°C/min. and it was comparable with of datas reported in the literature [19, 20] and RILEM recommendations [21]. For reasons described in the literature, explosive phenomena of heated concrete samples [22], it was not decided to heat them according to the standard standard time-temperature heating curve [23], according to which the initial temperature rise rate is dizzy (115°C/min) and known from practice are cases of sample explosion and destruction of the furnace.

W ocenie wizualnej istotne są przebarwienia powierzchni betonu powstałe wskutek działania temperatur pożarowych. W literaturze [18] podano zabarwienie powierzchni betonu w zależności od wielkości temperatury pożarowej:

Temperatura [°C]: Zabarwienie:

- do 120°C - szare,
- do 300°C - jasnoszare,
- do 500°C - jasnoszare z odcieniem różowym,
- do 600°C - jasnoszare z odcieniem żółtym.

Na podstawie badań własnych, po ogrzewaniu próbek betonowych w temperaturach 500°C, 600°C i 700°C, otrzymano zabarwienia betonu pokazane na zdjęciach rysunkach 2 i 3. Badania prowadzono na próbkach betonowych o wymiarach 70 × 15 × 8 cm, nagrzewanych do odpowiednich temperatur w piecu komorowym. Szybkość nagrzewania próbek do zadanej temperatury wynosiła 4,3÷6,7°C/min, i była porównywalna z wielkościami podawanymi w literaturze przedmiotu [19, 20] oraz zaleceniami RILEM [21]. Z powodów, opisywanych w literaturze zjawisk eksplozyjnych nagrzewanych próbek betonowych [22] nie zdecydowano się na ich wygrzewanie wg nominalnej standardowej krzywej nagrzewania „czas-temperatura” [23], według której początkowe tempo przyrostu temperatury jest zawrotne (115°C/min) i znane z praktyki są przypadki wystąpienia eksplozji próbek oraz zniszczenia pieca.

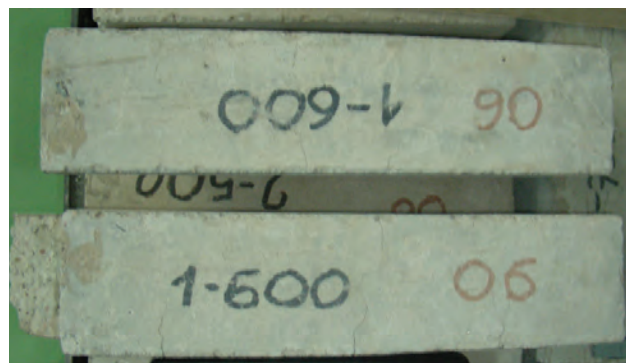


Fig. 2. View of concrete samples $w/c = 0.6$ after application of fire temperatures

Rys. 2. Widok próbek betonowych $w/c = 0,6$ po aplikacji temperatur pożarowych

The slower pace of heating is also motivated by the fact that in many practical design cases (eg: auditoria, sports halls or other facilities with low fire load) it is not economically justified to use a nominal curve [24]).

Analysis of the color of the samples (Figs. 2 and 3) indicates that in the case of applying the temperature of 500°C, the concrete color with $w/c = 0.5$ and $w/c = 0.6$ is basically consistent with the literature data [18].

Regarding samples after applying the temperature of 600°C, the compatibility of the color with the data from the literature is already rather less pronounced, while the yellow shade is more visible on the samples heated at 700°C.

Generalizing – as the temperature rises, differences in the color of the concrete are visible. Compared to the color of concrete at normal temperature, in which the color is determined to be gray, the color of the samples changes as the temperature rises: after a temperature of 500°C, the color changes to light gray with a slight pink shade, at a temperature of 600°C – light gray with a slight shade of yellow, then at 700°C in light gray with a more pronounced yellow color.

Wolniejsze tempo nagrzewania jest umotywowane również tym, że w wielu praktycznych przypadkach projektowania (np. hal widowiskowych, sportowych lub innych obiektów o niskim obciążeniu ogniowym) nie jest ekonomicznie uzasadnione stosowanie krzywej nominalnej [24].

Analizy zabarwienia próbek (rys. 2 i 3) wskazują, że w przypadku aplikacji temperatury 500°C zabarwienie betonu o $w/c = 0,5$, jak i $w/c = 0,6$ jest w zasadzie zgodne z danymi literaturowymi [18].

Odnosnie próbek po aplikacji temperatury 600°C zgodność koloru z danymi z literatury jest już mniej wyraźna, a żółty odcień widoczny jest bardziej na próbkach wygrzewanych w temperaturze 700°C.

Uogólniając, wraz ze wzrostem temperatury widoczne są różnice w kolorze betonu. W porównaniu do zabarwienia betonu w temperaturze normalnej, w której barwę określa się jako szarą, wraz ze wzrostem temperatury zmienia się kolor próbek: po działaniu temperatury 500°C kolor zmienia się w jasnoszary z lekkim odcieniem różowym, po temperaturze 600°C w jasnoszary z lekkim odcieniem żółtym, a następnie w temperaturze 700°C w jasnoszary z wyraźniejszym żółtym zabarwieniem.

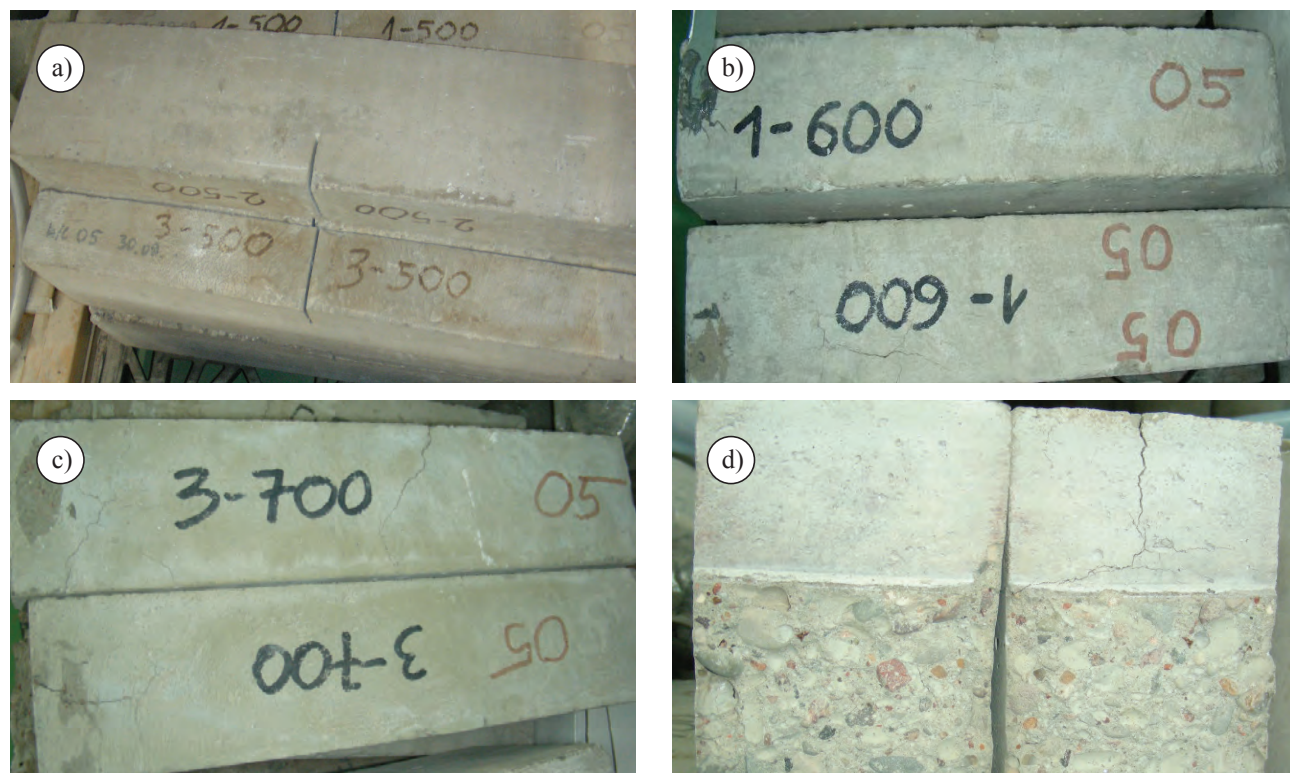


Fig. 3. View of concrete samples $w/c = 0.5$ after application of fire temperatures: a) 500°C, b) 600°C, c) 700°C, d) breakthroughs of the sample from the Figure c)

Rys. 3. Widok próbek betonowych $w/c = 0,5$ po aplikacji temperatur pożarowych: a) 500°C, b) 600°C, c) 700°C, d) przełomy próbki z rysunku c)

One should also pay attention to other symptoms of fire temperatures on concrete such as cracks, fractures, spalling and surface peeling of concrete [25]. In Figure 3d shows the fractures of the concrete sample with $w/c = 0.5$ visible in Figure 3c, after applying the temperature of 700°C – in addition to the mentioned damage, longitudinal cracks are also noticeable. In breakthroughs, damages in concrete under the influence of fire temperature, were formed mainly on the boundary of coarse grains and paste. This is proof of the drop in strength under the influence of high temperatures, especially the transition zone between the matrix and the aggregate, but also the decrease in the strength of the paste and cement mortar contained in the concrete.

6. NON-DESTRUCTIVE TESTING

If it is not possible to take samples boreholes from the structure, it is possible and necessary to pre-evaluate changes in the strength of concrete in the surface layers of structural elements after a fire by means of sclerometer tests using a Schmidt hammer. This device certainly knows and has every construction expert, so the method will not be discussed here.

Non-destructive diagnostic tests of concrete objects also use the ultrasound method, which has been known for quite a long time. A relatively new, little-known method is the impact-echo impulse method (hammer method). The publication [26] confirmed experimentally that this method can be used to assess the degree of degradation of “post-fire” concrete. This is a future issue, because further research is necessary to determine experimentally the relationship between signal parameters (amplitude, frequency, waveform time, reflected wave speed) and mechanical properties of the material under investigation. The devices for this research are so specialized and expensive that the average expert has no possibility of using them directly, and also not all technical universities and laboratories have them.

An important test, which can be done in a very simple way, but with the help of specialist equipment, is to determine the dynamic modulus of elasticity of concrete. The test of the dynamic elastic modulus is a non-destructive test, which is aimed at demonstrating the destructive changes occurring in the concrete, both under the influence of the variable w/c ratio as well as under the influence of temperature. In this case, the word “non-destructive” refers to the samples, unfortunately, when evaluating an existing structure, the samples must be cut out. The quantity

Należy też zwrócić uwagę na inne objawy oddziaływania temperatur pożarowych na beton, jak spękania, zarysowania, *spalling*, odpryski i złuszczenia powierzchniowe betonu [25]. Na rysunku 3d pokazano przełomy próbki betonu o $w/c = 0,5$ widocznej na rysunku 3c, po aplikacji temperatury 700°C – oprócz wymienionych uszkodzeń zauważalne są również spękania podłużne. W przełomach, uszkodzenia w betonie pod działaniem temperatury pożarowej powstały głównie na granicy ziaren kruszywa grubego i zaczynu. Jest to dowód spadku wytrzymałości pod wpływem wysokich temperatur, zwłaszcza strefy przejściowej pomiędzy matrycą a kruszywem, ale także spadku wytrzymałości zaczynu i zaprawy cementowej zawartych w betonie.

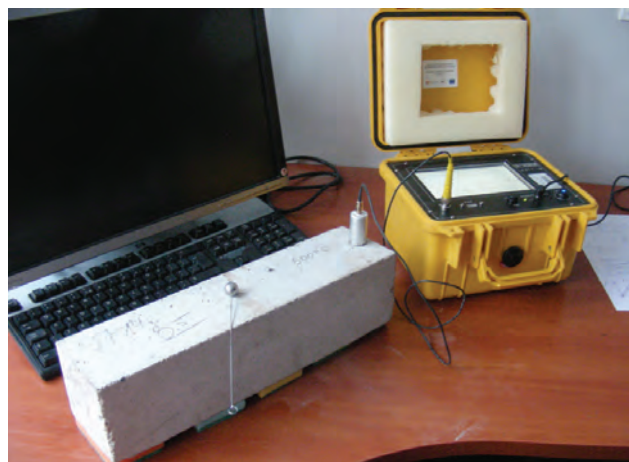
6. BADANIA NIENISZCZĄCE

W przypadku braku możliwości pobrania odwierćników z konstrukcji, można i należy wstępnie oszacować zmiany wytrzymałości betonu w warstwach powierzchniowych elementów konstrukcji po pożarze za pomocą badań sklerometrycznych młotkiem Schmidta. Urządzenie to na pewno zna i posiada każdy rzeczoznawca budowlany, w związku z czym metoda nie będzie tu omawiana.

W nieniszczących badaniach diagnostycznych obiektów betonowych wykorzystuje się też, znaną już od dość dawna, metodę ultradźwiękową. Stosunkowo nową, mało jeszcze u nas znaną metodą, jest metoda impulsowa impact-echo (metoda młoteczkowa). W publikacji [26] potwierdzono doświadczalnie, że metoda ta może być wykorzystana do oceny stopnia degradacji betonu „popożarowego”. Jest to kwestia przyszłościowa, ponieważ konieczne są dalsze badania w celu określenia na drodze doświadczalnej wzajemnych relacji pomiędzy parametrami sygnału (amplituda, częstotliwość, czas przejścia fali, prędkość fali odbitej) a właściwościami mechanicznymi badanego materiału. Urządzenia do tych badań są na tyle specjalistyczne i drogie, że przeciętny rzeczoznawca nie ma możliwości bezpośredniego ich stosowania, a też i nie wszystkie uczelnie techniczne oraz laboratoria je posiadają.

Ważnym badaniem, które można wykonać w bardzo prosty sposób, ale za pomocą specjalistycznej aparatury, jest ustalenie dynamicznego modułu sprężystości betonu. Badanie dynamicznego modułu sprężystości to badanie nieniszczące, które ma na celu wykazanie zmian destrukcyjnych powstałych w betonie zarówno pod wpływem zmiennego wskaźnika w/c , jak również pod działaniem temperatury. W tym przypadku

of destructions created in the macrostructure of concrete affects changes in wavelength and resonance frequency. Depending on the w/c ratio and temperature changes, defects in the concrete are formed to varying degrees.



słowo „nieniszczące” odnosi się do próbek, niestety w przypadku oceny istniejącej konstrukcji próbki trzeba z niej wyciąć. Ilość powstałych destrukcji w makrostrukturze betonu wpływa na zmiany długości fal i wielkość częstotliwości rezonansowej. W zależności od wskaźnika w/c i zmian temperatury w różnym stopniu kształtują się defekty w betonie.

Fig. 4. Apparatus for testing the dynamic modulus of elasticity with the sample under test

Rys. 4. Aparatura do badania dynamicznego modułu sprężystości wraz z badaną próbką

The measuring device shown in Figure 4 calculates the resonant frequency of the samples during tensile, twisting and bending. Because these are non-destructive tests of samples, at first should determine the dynamic modulus of elasticity, and then other tests can be performed on the same samples, eg strain measurements and tensile strength for bending and compression.

The only data to enter is the dimensions and mass of the sample. The results of measurements of E_{Ldyn} and transverse elastic modulus E_{Tdyn} are read automatically from the meter of the measuring apparatus. The example of results from the work [9] are shown in the Figures 5 and 6 graphs. In these studies, there were clear relationships: with the increase of temperature and concrete w/c ratio, the size of dynamic elastic modulus decreased and the decrease of longitudinal elasticity modulus is very similar to the drop in the strength of concrete, both for compression and stretching, especially after application of temperatures of 600°C and 700°C.

The presented apparatus can be used to test both rectangular and cylindrical shapes, which is important in the collection of samples; it is known that sample-borehole is easier to pick up and does not require such processing as a rectangular one.

The instructions do not specify the minimum or maximum dimensions of the samples, it is important that the length of the sample is at least twice as large as its width or diameter. For possible comparative tests it can be assumed that prismatic samples should

Pokazany na rysunku 4 przyrząd pomiarowy oblicza częstotliwość rezonansową próbek przy rozciąganiu, skręcaniu i zginaniu. Ponieważ są to badania nieniszczące próbek, w pierwszej kolejności należy ustalić dynamiczny moduł sprężystości E_d , a następnie na tych samych próbkach można wykonać inne badania, np. pomiary odkształceń oraz wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i na ściskanie.

Jedynie dane, jakie należy wprowadzić, to wymiary i masa próbki. Wyniki pomiarów dynamicznego modułu sprężystości podłużnej E_{Ldyn} i poprzecznej E_{Tdyn} odczytywane są automatycznie z licznika aparatury pomiarowej. Przykładowe wyniki badań z pracy [9] przedstawiono na rysunkach 5 i 6. W badaniach tych stwierdzono wyraźne zależności: wraz ze wzrostem temperatury oraz wskaźnika w/c betonu zmniejszała się wielkość dynamicznego modułu sprężystości oraz spadek modułu sprężystości podłużnej jest bardzo zbliżony do spadku wytrzymałości betonu zarówno na ściskanie, jak i rozciąganie, zwłaszcza po aplikacji temperatur 600°C i 700°C.

W prezentowanym aparacie można badać próbki o kształcie zarówno prostopadłościennym, jak i walcowym, co ma istotne znaczenie w pobieraniu próbek; wiadomo, że próbki-odwierty są łatwiejsze do pobrania i nie wymagają takiej obróbki jak prostopadłościenne.

Instrukcja nie podaje minimalnych lub maksymalnych wymiarów próbek, ważne jest, aby długość próbki była co najmniej dwukrotnie większa niż jej szerokość lub średnica. Dla ewentualnych badań porównawczych można przyjąć, że próbki przyzma-

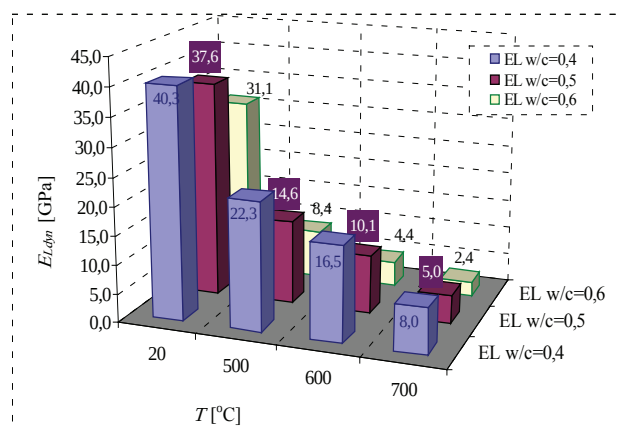


Fig. 5. Dependences of the dynamic longitudinal elasticity modulus EL_{dyn} from T and w/c

Rys. 5. Zależności dynamicznego modułu sprężystości podłużnej EL_{dyn} od T i w/c

not be smaller than $16 \times 4 \times 4$ cm, and cylindrical ones with a diameter of min. 50 mm.

7. DESTRUCTIVE TESTING

These tests are the most reliable, but it is not always possible to take samples from the construction, especially those weakened by the action of high fire temperatures.

In the case of the possibility to take samples, the basic method of determining the compressive strength of concrete is the sclerometric method, supported and correlated with the results of destructive tests of compressive strength of samples. Tensile strength is very important (tested most often by bending or Brazilian method for splitting), because as mentioned, fracture toughness of concrete falls faster in fire conditions than its compressive and tensile strength. Knowing the size of tensile strength, we can calculate the basic fracture toughness parameter – K_{IC} stress intensity factor, and thus realistically estimate the suitability of concrete degraded by fire for possible further exploitation.

In this group, one should also mention petrographic studies, which according to publication [3] are the most important and decisive in determining the depth of fire damage in concrete. They should be performed by experienced of petrographs in the laboratory using optical microscopes. Concrete samples are subjected to low-power visual microscopy and then more thoroughly examined using high-powered microscopes. A petrographic study is invaluable in determining the history of concrete heating, because it can determine whether the characteristics observed

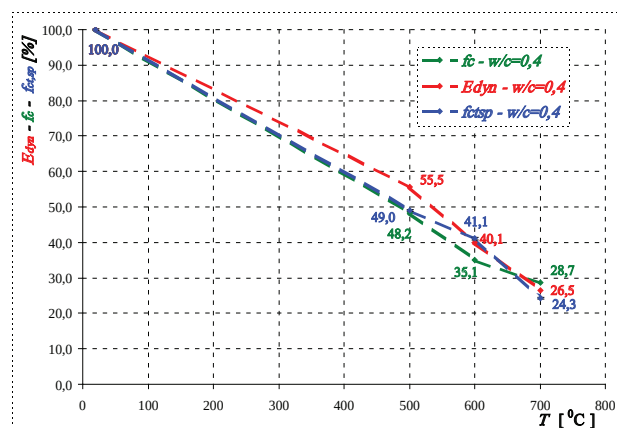


Fig. 6. Dependences of EL_{dyn} ; f_c and $f_{ct,sp}$ – T of concrete with $w/c = 0.4$ at fire temperatures

Rys. 6. Zależności EL_{dyn} ; f_c i $f_{ct,sp}$ – T betonu o $w/c = 0.4$ w temperaturach pożarowych

tyczne nie powinny być mniejsze niż $16 \times 4 \times 4$ cm, a walcowe o średnicy min. 50 mm.

7. BADANIA NISZCZĄCE

Badania te są najbardziej wiarygodne, jednak nie zawsze możliwe jest pobranie próbek z konstrukcji, zwłaszcza już osłabionej działaniem wysokich temperatur pożarowych.

W przypadku możliwości pobrania próbek, również podstawową metodą określenia wytrzymałości na ściskanie betonu jest metoda sklerometryczna, poparta i skorelowana z wynikami niszczących badań wytrzymałości na ściskanie próbek. Bardzo ważna jest wytrzymałość na rozciąganie (badana najczęściej przy zginaniu lub metodą brazylijską przy rozłupywaniu), gdyż jak wspomniano, odporność na pękanie betonu spada szybciej w warunkach pożaru niż jego wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie. Znając wielkość wytrzymałości na rozciąganie, możemy wyliczyć podstawowy parametr odporności na pękanie – współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} , a tym samym realnie oszacować przydatność betonu zdegradowanego przez pożar do ewentualnej dalszej eksploatacji.

W tej grupie należy jeszcze wymienić badania petrograficzne, które według publikacji [3] są najważniejsze i rozstrzygające w określaniu głębokości uszkodzeń ogniowych w betonie. Powinny być wykonywane przez doświadczonych petrografów w laboratorium przy użyciu mikroskopów optycznych. Próbkę betonu poddaje się wizualnemu badaniu mikroskopowemu o małej mocy, a następnie bardziej szczegółowemu badaniu za pomocą mikroskopów

are actually caused by high temperature, and not by some other factor.

In addition to the color changes of the aggregate, the heating temperature can be compared with changes in the cement matrix and physical characteristics such as cracking and microcracks. These tests may determine, among others: approximate classification of coarse and fine aggregate, type of cement and its content, w/c ratio, porosity, depth of carbonation. The recognition of microscopic features allows printing of thermal contours by the depth of individual concrete elements. You can plot outlines for 105°C (increased porosity of cement matrix), 300°C (red discoloration of aggregate), 500°C (cement matrix becomes completely isotropic), 600°C (transition α - to β -quartz), 800°C (calcination of limestone) and 1200°C (first signs point).

8. SUMMARY

The paper discusses only a part of the extensive range of concrete elements after a fire, interested in this issue, we refer to numerous publications in this field, including: [27, 28].

This article presents the possibility of using the K_{IC} factor as a good indicator of the level of destruction of concrete exposed to high temperatures. It can therefore be concluded that the stress intensity factor should be more widely recommended for determining the fire resistance of elements in the diagnosis of concrete structures (especially those working on bending) than the strength of concrete.

The destructive processes created in the structure of concrete after the fire temperature can be determined also by measuring the dynamic modulus of elasticity of E_{dyn} . The quantity of destruction in the macrostructure of concrete influence on changes in wavelength and resonance frequency. Depending on the w/c ratio and temperature changes, defects in the concrete are formed to varying degrees. There is a significant dependence of the dynamic modulus of elasticity, deformation of samples and of stress intensity factor of concrete from the w/c ratio and temperature.

In the diagnosis of concrete structures after a fire, it is also possible to take advantage of very similar (nearly identical at 600°C and 700°C) relative (percentage) reduction of the dynamic modulus of elasticity to a decrease in compressive and tensile strength.

o dużej mocy. Badanie petrograficzne jest nieocenione w ustaleniu historii nagrzewania betonu, ponieważ może określić, czy cechy obserwowane wizualnie są faktycznie spowodowane wysoką temperaturą, a nie jakimś innym czynnikiem.

Oprócz zmian koloru kruszywa, temperaturę ogrzewania można porównać ze zmianami w matrycy cementowej i cechami fizycznymi, takimi jak pękanie i mikropęknięcia. Badania te mogą określić m.in.: przybliżoną klasyfikację kruszywa grubego i drobnego, rodzaj cementu i jego zawartość, wskaźnik w/c, porowatość, głębokość karbonatyzacji. Rozpoznanie cech mikroskopowych umożliwia drukowanie konturów termicznych przez głębokość poszczególnych elementów betonowych. Można wykreślić kontury dla 105°C (zwiększona porowatość matrycy cementowej), 300°C (czerwone przebarwienia kruszywa), 500°C (matryca cementowa staje się całkowicie izotropowa), 600°C (przejście α - do β -kwarcu), 800°C (kalcynacja wapienia) i 1200°C (pierwsze oznaki topnienia).

8. PODSUMOWANIE

W referacie omówiono tylko część z bogatego wachlarza badań elementów betonowych po pożarze, zainteresowanych tym zagadnieniem odsyłamy do licznych publikacji w tym zakresie, m.in.: [27, 28].

Niniejszy artykuł przedstawia możliwości zastosowania współczynnika K_{IC} jako dobrego wskaźnika poziomu destrukcji betonu poddanego wpływom wysokich temperatur. Można zatem uznać, że współczynnik intensywności naprężeń powinien być szerzej zalecany do określania spadku odporności ogniowej elementów w diagnostyce konstrukcji z betonu (zwłaszcza pracujących na zginanie) niż wytrzymałość betonu.

Procesy destrukcyjne powstałe w strukturze betonu po oddziaływaniu temperatury pożarowej można określić również przez pomiar dynamicznego modułu sprężystości E_{dyn} . Ilość destrukcji w makrostrukturze betonu wpływa na zmiany długości fal i wielkość częstotliwości rezonansowej. W zależności od wskaźnika w/c i zmian temperatury w różnym stopniu kształtują się defekty w betonie. Występuje istotna zależność dynamicznego modułu sprężystości, odkształceń próbek oraz współczynnika intensywności naprężeń betonu od wskaźnika w/c i temperatury.

W diagnostyce konstrukcji betonowych po pożarze można korzystać również z zależności bardzo zbliżonego (niemal identycznego w temperaturach 600°C i 700°C) względnego (procentowego) zmniejszenia dynamicznego modułu sprężystości do spadku wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie.

It is indicated to develop, between others using the results of the work [9], of the program of further tests of fracture toughness of concrete at high temperatures. Based on previous research and analyzes, it can be concluded that there is a need to develop guidelines that take into account the use of fracture mechanics in the diagnosis of concrete structures (especially which are bending) after fire temperatures.

Wskazane jest opracowanie, m.in. z wykorzystaniem wyników pracy [9], programu dalszych badań odporności na pękanie betonu w wysokich temperaturach. Na podstawie dotychczasowych badań i analiz można stwierdzić, że istnieje potrzeba opracowania wytycznych uwzględniających stosowanie mechaniki pękania w diagnostyce konstrukcji betonowych (zwłaszcza zginanych) po działaniu temperatur pożarowych.

References

- [1] Kowalski R.: *Obliczeniowa ocena nośności zginanych elementów żelbetowych w sytuacji pożaru*. Politechnika Warszawska. Prace naukowe – Budownictwo. Z. 149. Warszawa 2008.
- [2] Ogrodnik P., Zegardło B., Halicka A.: *Wstępna analiza możliwości zastosowania odpadów ceramiki sanitarnej w funkcji kruszywa do betonów pracujących w warunkach wysokich temperatur*. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, nr 2012/1, s. 49-56.
- [3] Concrete Society: *Assessment, Design and Repair of Fire-Damaged Concrete Structures*. Technical Report No. 68, The Concrete Society, London, United Kingdom 2008.
- [4] Runkiewicz L., Sołomonow W., Kuźniecowa I.: *Ocena bezpieczeństwa konstrukcji żelbetowych po pożarze*, Inżynieria i Budownictwo nr 12/1993, s. 518-522.
- [5] Kowalski R., *Zabezpieczenie pożarowe konstrukcji żelbetowych*. XXV Konferencja Ogólnopolska „Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji” Szczyrk 2010, t. 2. s. 183-232.
- [6] PN-EN 1992-1-2: 2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu; Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.
- [7] Hager I., Chudyba K.: *Metodyka oceny stanu technicznego konstrukcji z betonu po pożarze*. Przegląd Budowlany 6/2010, s. 40-44.
- [8] Kosiorek M., Pogorzelski J.A., Laskowska Z., Pilich K.: *Odporność ogniowa konstrukcji budowlanych*. Arkady, Warszawa 1988.
- [9] Plechawski S.: *Wpływ temperatur pożarowych na wybrane parametry struktury betonów*. Praca doktorska. Politechnika Lubelska, WBiA, Lublin 2017.
- [10] Thelandersson S.: *Effect of High Temperatures on Tensile Strength of Concrete*. Bulletin 26, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden 1972.
- [11] Shah A.H., Sharma U.K., Bhargava P.: *Outcomes of a major research on full scale testing of RC frames in post earthquake fire*. Construction and Building Materials 155 (2017) p. 1224-1241.
- [12] Malhotra H.L.: *The effect of temperature on the compressive strength of concrete*. Magazine of Concrete Research Vol 8, 1956, No 23, p. 85-94.
- [13] Kodur V.: *Properties of Concrete at Elevated Temperatures*. Hindawi Publishing Corporation, ISRN Civil Engineering, Article ID 468510, 15, Volume 2014.
- [14] Duan K., Hu X., Wittmann F.H.: *Boundary effect on concrete fracture and non-constant fracture energy distribution*. Engineering Fracture Mechanics 70, Australia, Zurich 2003, p. 2257-2268.
- [15] Elices M., Planas J.: *Fracture Mechanics Parameters of Concrete*. Advanced Cement Based Materials, Madrid, 1996, p. 116-127.
- [16] Mi Z., Hu Y., Li Q.: *Effect of curing humidity on the fracture properties of concrete*. China. Construction and Building Materials 169 (2018) p. 403-413.
- [17] Chudyba K.: *Bezpieczeństwo pożarowe konstrukcji z betonu według eurokodów (norm PN-EN)*, Wydawnictwo CNBOP-PIB, BiTP Vol. 41 Issue 1, 2016, pp. 85-96,
- [18] Bednarek Z., Krzywobłocka-Laurów R., Drzymała T.: *Wpływ wysokiej temperatury na strukturę, skład fazowy i wytrzymałość betonu*. Zeszyty Nauk. SGSP Nr 38/2009, s. 5-27.
- [19] Baker G.: *The effect of exposure to elevated temperatures on the fracture energy of plain concrete*. (Materials and Structures, Vol. 29, July 1996, p. 383-388).
- [20] Bazant Z.P., Prat P.C.: *Effect of Temperature and Humidity on Fracture Energy of Concrete*. ACI Materials Journal – July-August 1988.

- [21] RILEM TC 129-MHT: *Test Methods for Mechanical Properties Concrete at High Temperatures*. Recommendations: Part 6 – Thermal Strain. Materials and Structures, Supplement March, 1997, p. 17-21.
- [22] Olsen N.H.: *Heat-induced Explosion in High Strength Concrete*. Copyright © by Nicholaus Holkmann Olsen, 1990, Afdelingen for Baerende Konstruktioner Danmarks Tekniske Højskole Lyngby.
- [23] PN-B-02851-1:1997: Ochrona przeciwpożarowa budynków. Badania odporności ogniowej elementów budynków. Wymagania ogólne i klasyfikacja.
- [24] Smardz P.: *Wyznaczanie odporności ogniowej elementów konstrukcji wg Eurokodów*. Ochrona Przeciwpożarowa 1/2010.
- [25] Ma Q., Guo R., Zhao Z., Lin Z., He K.: *Mechanical properties of concrete at high temperature A review*. China. Construction and Building Materials 93 (2015) p. 371-383.
- [26] Hager I., Krzemień K.: *Metoda impact-echo i wstępna próba jej zastosowania do oceny stopnia uszkodzeń betonu poddanego działaniu wysokiej temperatury*. XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna „Awary Budowlane”, Międzyzdroje 2013.
- [27] Hager I., *Metody oceny stanu betonu w konstrukcji po pożarze*, Dwumiesięcznik: Cement Wapno Beton, lipiec/sierpień 2009 r., nr 4, s. 167-178.
- [28] Chudyba K., *Uszkodzenia pożarowe betonu konstrukcyjnego*, Inżynieria i Budownictwo, nr 1/2010, s. 30-33.

Acknowledgments:

The work was financed by Lublin University of Technology

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Lubelską

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FACTORS INCREASING THE CHARACTERISTICS OF AUTOCLAVED PRODUCTS USING THE DEMATEL METHOD

ANALIZA WPŁYWU CZYNNIKÓW KSZTAŁTUJĄCYCH CECHY TWORZYW AUTOKLAWIZOWANYCH PRZY UŻYCIU METODY DEMATEL

DOI: 10.30540/sae-2018-023

Abstract

Sand-lime products are characterized by advantageous features: compressive strength, thermal accumulation and acoustic insulation. Product features are resultative choice of decisions made at individual stages of the production process: method of thickening the raw material mixture, time and temperature of autoclaving and the pressure of saturated steam. The above factors may affect on the characteristics of sand-lime products not only directly, but also through other factors. However, there is no suggestion in the literature about the relationship between these factors. The aim of this article is to find answers to the following questions: which stage of the technological process is the most important? What impact does the individual stages have on each other? Whether and to what extent modification of a given stage will affect the compressive strength of finished products? The authors carried out an analysis using the DEMATEL method to identify factors that have a key influence on autoclaved materials. The results show that using the right amount of water in the raw material mixture is the most important factor. To a slightly lesser extent, proper selection of amount of the quick lime is important. The least important factor is the method of forming silicate products. Although the time of autoclaving has a large contribution in the creation of the impact network, however it is caused by the influence of thermal and humidity conditions, the amount of lime, water and, in the low extent, the molding method.

Keywords: DEMATEL method, autoclaved materials, production technology

Streszczenie

Wyroby wapienno-piaskowe charakteryzują się korzystnymi cechami użytkowymi: wytrzymałością na ściskanie, akumulacją ciepłą oraz izolacyjnością akustyczną. Cechy wyrobów stanowią pochodną wyboru decyzji podejmowanych na poszczególnych etapach procesu produkcji: sposobu zagęszczania mieszanki surowcowej, czasu i temperatury autoklawizacji oraz ciśnienia nasyconej pary wodnej. Powyższe czynniki mogą oddziaływać na cechy wyrobów wapienno-piaskowych nie tylko bezpośrednio, lecz także za pośrednictwem pozostałych czynników. Jednak w literaturze brak jest sugestii dotyczących zależności pomiędzy tymi czynnikami. Celem artykułu jest znalezienie odpowiedzi na pytania: który z etapów procesu technologicznego jest najważniejszy? Jaki wpływ poszczególne etapy wywierają na siebie? Czy i w jakim stopniu modyfikacja danego etapu wpłynie na wytrzymałość na ściskanie gotowych wyrobów? Autorzy przeprowadzili analizę z wykorzystaniem metody DEMATEL w celu wskazania czynników mających kluczowy wpływ na autoklawizowane materiały. Wyniki pokazują, że zastosowanie odpowiedniej ilości wody w mieszaninie surowcowej jest najistotniejszym czynnikiem. W niewiele mniejszym stopniu ważny jest właściwy dobór ilościowy wapna palonego. Najmniej ważnym czynnikiem

jest sposób formowania wyrobów silikatowych. Wprowadzie czas autoklawizacji ma duży udział w tworzeniu sieci wpływu, jednak jest to spowodowane wpływem warunków cieplno-wilgotnościowych, ilością wapna, wody i w najmniejszym stopniu sposobem formowania.

Słowa kluczowe: metoda DEMATEL, tworzywa autoklawizowane, technologia produkcji

1. INTRODUCTION

In the domestic silicate industry, sand-lime bricks with a compression strength class of 20 MPa or 25 MPa are obtained. Although, there is a demand for lime-sand products with strength characteristics corresponding to class 35 and higher, on the building materials market. The improvement of these features can be achieved in several ways. However, they are a function of many factors, both physical (physical properties of quartz sand, conditions and method of forming products) as well as chemical factors (chemical composition of aggregate and binder, molar ratio CaO/SiO_2 , conditions of hydrothermal treatment – pressure and curing time) [5, 12]. The microstructure of sand-lime products, so the mineral composition, the morphology of the synthesis products (hydrated calcium silicates) and porosity, is the main factor determining the strength characteristics of finished products. In the article, the authors have attempted to investigate causal relationships between technological factors affecting the utilitarian parameters of silicates. The aim of this article is to find answers to the following questions: which stage of the technological process is the most important? What impact does the individual stages have on each other? Whether and to what extent modification of a given stage will affect the compressive strength of finished products?

2. RESEARCH METHODOLOGY

2.1. Technological factors

The selection of technological process factors was made on the basis of experimental research and literature review. The following factors were analyzed in the work:

C1 – autoclaving time. Appropriately changing time of hydrothermal treatment with the appropriate range of water vapor pressure and temperature leads to the desired compressive strengths of finished products. For each water vapor pressure value, the temperature during hydrothermal treatment is known. Ensuring the right time during the autoclaving process affects on putting in order the structure of the C-S-H (I) phase and its transformation into tobermorite. In turn, the tobermorite may be transformed into a higher phase, ksonotlitium or other [13, 14]. The researchers claim that the excessive extension of the

1. WPROWADZENIE

W warunkach krajowego przemysłu silikatowego otrzymuje się cegły wapienno-piaskowe o klasie wytrzymałości na ściskanie równej 20 MPa lub 25 MPa. Na rynku materiałów budowlanych istnieje jednak zapotrzebowanie na wyroby wapienno-piaskowe o cechach wytrzymałościowych odpowiadających klasie 35 i wyższej. Poprawę owych cech można osiągnąć na kilka sposobów. Są one jednak funkcją wielu czynników, zarówno fizycznych (właściwości fizyczne piasku kwarcowego, warunki i sposób formowania wyrobów), jak i czynników chemicznych (skład chemiczny kruszywa i spoiwa, stosunek molowy CaO/SiO_2 , warunki obróbki hydrotermalnej – ciśnienie i czas utwardzania) [5, 12]. Mikrostruktura tworzyw wapienno-piaskowych, czyli skład mineralny, morfologia produktów syntezy (uwodnione krzemiany wapnia) oraz porowatość, jest głównym czynnikiem determinującym cechy wytrzymałościowe gotowych wyrobów. W artykule autorzy podjęli próbę zbadania związków przyczynowo-skutkowych między czynnikami technologicznymi wpływającymi na parametry użytkowe silikatów. Celem artykułu jest znalezienie odpowiedzi na pytania: który z etapów procesu technologicznego jest najważniejszy? Jaki wpływ poszczególne etapy wywierają na siebie? Czy i w jakim stopniu modyfikacja danego etapu wpłynie na wytrzymałość na ściskanie gotowych wyrobów?

2. METODOLOGIA BADAŃ

2.1. Czynniki technologiczne

Selekcji czynników procesu technologicznego dokonano na podstawie badań doświadczalnych i przeglądu literatury. W pracy przeanalizowano następujące czynniki:

C1 – czas autoklawizacji. Odpowiednio zmieniający się czas obróbki hydrotermalnej przy odpowiednio stosowanym zakresie ciśnień pary wodnej i temperatury prowadzi do uzyskania zamierzonych wytrzymałości na ściskanie gotowych wyrobów. Dla każdej wartości ciśnienia pary wodnej znana jest temperatura podczas obróbki hydrotermalnej. Zapewnienie właściwego czasu w trakcie procesu autoklawizacji wpływa na porządkowanie struktury fazy C-S-H(I) i przekształcenie się jej w tobermoryt. Z kolei tobermoryt może ulegać przekształceniu w fazę wyższą, ksonotlit lub inne [13, 14]. Naukowcy twierdzą, że nadmierne wydłużenie

hardening time of silicate products may, however, affect the compression strength of autoclaved products, which is probably related to structural changes [10].

C2 – thermal and humid conditions. The autoclaving process is usually accompanied by a temperature of $150\div 200^{\circ}\text{C}$ and water vapor pressure of equivalent values, adequate to the given temperature range, i.e. $0.8\div 1.6$ MPa. In a few silicates factories, especially in Western Europe, the applied pressure is from 0.8 MPa to even 2.5 MPa. During the hydrothermal treatment, the solubility of quartz increases several times, which determines the reaction speed between silica and calcium hydroxide, forming in result of the hydration of burnt lime [11]. During the process proceeded in the autoclave, hydrated calcium silicates are formed with different chemical compositions and different internal structure arrangement [7]. The reaction products of calcium ions with silica have a very positive affect on the utilitarian properties of finished sand-lime products, i.e. compressive strength, low water absorption and good frost resistance.

C3 – pressing. Traditionally, the sand-lime brick is pressed at a pressure of about $15\div 20$ MPa. The pressure value should be high enough to ensure an adequate degree of compaction of the raw material mixture, which has no plastic properties. The researchers, in their works use different variants: two-stage pressing with interstage de-aeration at a pressure of 10 MPa and 20 MPa [9], single-stage pressing with a pressure of 25.5 MPa [3]. A significant increase in pressure may, however, lead to the cracking of sand grains, which in turn will reduce the compressive strength of finished products.

C4 – application of vibropressing. This method is used, among others, for compacting concrete pavement slabs [15], paving stones [8], masonry bricks [1], etc. Based on research carried out by scientists, we can conclude that the use of vibropressing in sand-lime products has a more beneficial effect on the compressive strength of the finished product than pressing. It gives a result of a higher degree of compaction, which translates into a reduction in porosity.

C5 – amount of lime. Lime is a substance that bonds individual grains of quartz sand. The consumption of lime in the range of $4\div 12\%$ CaO in the raw material mixture is directly proportional to the compressive strength of finished products. In order to obtain the best physical parameters of finished products, the

czasu hartowania wyrobów silikatowych może jednak wpłynąć na obniżenie wytrzymałości na ściskanie autoklawizowanych wyrobów, co prawdopodobnie związane jest ze zmianami strukturalnymi [10].

C2 – warunki cieplno-wilgotnościowe. Procesowi autoklawizacji towarzyszy zwykle temperatura $150\div 200^{\circ}\text{C}$ oraz ciśnienie pary wodnej o wartościach równoważnych, adekwatnych do podanego zakresu temperatur, tj. $0,8\div 1,6$ MPa. W niewielu zakładach produkcji silikatów, zwłaszcza na zachodzie Europy, stosuje się ciśnienie od 0,8 MPa do nawet 2,5 MPa. W czasie obróbki hydrotermalnej kilkakrotnie wzrasta rozpuszczalność kwarcu, co determinuje prędkość reakcji pomiędzy krzemionką a wodorotlenkiem wapnia powstającym w wyniku hydratacji wapna palonego [11]. W trakcie procesu przebiegającego w autoklawie dochodzi do utworzenia uwodnionych krzemianów wapnia, o zróżnicowanym składzie chemicznym i różnym uporządkowaniu struktury wewnętrznej [7]. Produkty reakcji jonów wapnia z krzemionką wpływają bardzo korzystnie na cechy użytkowe gotowych wyrobów wapienno-piaskowych, tj. wytrzymałość na ściskanie, niską nasiąkliwość i dobrą mrozoodporność.

C3 – prasowanie. Tradycyjnie cegłę wapienno-piaskową prasuje się pod ciśnieniem ok. $15\div 20$ MPa. Wartość ciśnienia powinna być na tyle duża, aby zapewniała odpowiedni stopień zagęszczenia mieszaniny surowcowej, nie wykazującej właściwości plastycznych. Badacze w swoich pracach wykorzystują różne warianty: prasowanie dwustopniowe i dwuetapowe z międzystopniowym odpowietrzeniem przy wartości ciśnienia 10 MPa i 20 MPa [9], prasowanie jednostopniowe o wartości ciśnienia 25,5 MPa [3]. Znaczny wzrost wartości ciśnienia może jednak doprowadzić do pęknięcia ziaren piasku, co w konsekwencji wpłynie na obniżenie wytrzymałości na ściskanie gotowych wyrobów.

C4 – zastosowanie wibroprasowania. Metoda wykorzystywana między innymi do zagęszczania betonowych płyt chodnikowych [15], kostki brukowej [8], cegieł murarskich [1] itd. Na podstawie badań przeprowadzonych przez naukowców można wnioskować, że zastosowanie wibroprasowania w wyrobach wapienno-piaskowych ma korzystniejszy wpływ na wytrzymałość na ściskanie gotowego wyrobu niż prasowanie. Uzyskuje się dzięki temu większy stopień zagęszczenia, co przekłada się na zmniejszenie porowatości.

C5 – ilość wapna. Wapno jest substancją spajającą poszczególne ziarna piasku kwarcowego. Zużycie wapna zawierającego się w granicach $4\div 12\%$ CaO w mieszaninie surowcowej jest wprost proporcjonalne do wytrzymałości na ściskanie gotowych wy-

CaO/SiO₂ molar ratio should stand at 0.09. In the production process, lime plays an important role both at the stage of forming products (it fulfills the function of plasticizer) and during the hardening process. For it is a source of calcium ions, which after passing to the high pH liquid phase react with silicate ions. As a result of the occurring synthesis, mainly amorphous C-S-H phase and crystalline tobermorite (C₅S₆H₅) are formed [9, 10]. It should be noted that in addition to the quantitative share of quicklime in the mixture, the quality factor (value of active CaO, lime activity, fragmentation) is equally important.

C6 – the amount of water. Water is essential for complete hydration of CaO and MgO contained in burnt lime. It ensures the appropriate rheological properties of the raw material mass, which guarantees proper forming of products. The amount of water added to the mixture depends on the sand grain composition and the lime content. The water should be used in amounts ensuring humidity of the mixture at the level of 4÷8%. Using too much water in the mixture causes the samples to expand and crack [16]. Water is also used during hydrothermal treatment, to produce a sufficient amount of water vapor in an autoclave.

2.2. Multi-attribute analysis of decisions

Among the multi-attribute analysis methods, the most popular are: AHP, ANP, DEMATEL, REMBRANT. The DEMATEL method was used for the study, giving the opportunity to study phenomena through cause and effect analysis. The calculation algorithm in the DEMATEL method was divided into five stages.

Stage 1

Development of a cause-and-effect graph.

Stage 2

Creation of a direct impact matrix (matrix A). In the square matrix n x n individual lines are dedicated to the factors appearing in the comparisons first, while the columns are dedicated to the factors that appear in the comparisons as the second [2]. The direct impact matrix is not a symmetric matrix. Intensity of the influence of individual factors on other factors can be expressed on a scale of 0÷4. For the identical relation of the influence of factors, the given word of matrix A assumes the value 0.

robów. W celu uzyskania najlepszych parametrów fizycznych gotowych wyrobów stosunek molowy CaO/SiO₂ powinien wynosić 0,09. W procesie produkcji wapno pełni istotną rolę zarówno na etapie formowania wyrobów (spełnia funkcję plastyfikatora), jak i podczas procesu hartowania. Jest bowiem źródłem jonów wapnia, które po przejściu do fazy ciekłej o wysokim pH reagują z jonami krzemianowymi. W wyniku zachodzącej syntezy powstaje głównie amorficzna faza C-S-H oraz krystaliczny tobermoryt (C₅S₆H₅) [9, 10]. Należy zwrócić uwagę, że oprócz ilościowego udziału wapna palonego w mieszaninie, równie ważnym jest czynnik jakościowy (wartość aktywnego CaO, aktywność wapna, rozdrobnienie).

C6 – ilość wody. Woda jest niezbędna do całkowitej hydratacji CaO i MgO zawartych w wapnie palonym. Zapewnia odpowiednie właściwości reologiczne masy surowcowej, co gwarantuje właściwe formowanie wyrobów. Ilość wody dodawanej do mieszaniny zależna jest od składu ziarnowego piasku i zawartości wapna. Wodę powinno stosować się w ilościach zapewniających wilgotność mieszanki na poziomie 4÷8%. Zastosowanie zbyt dużej ilości wody w mieszaninie powoduje rozprężanie się próbek i ich pękanie [16]. Woda wykorzystywana jest również podczas obróbki hydrotermalnej do wytworzenia odpowiedniej ilości pary wodnej w autoklawie.

2.2. Wieloatrybutowa analiza decyzji

Spośród metod wieloatrybutowej analizy najbardziej popularnymi są: AHP, ANP, DEMATEL, REMBRANT. Do badań została zastosowana metoda DEMATEL, dająca możliwość badania zjawisk poprzez analizę przyczynowo-skutkową.

Algorytm obliczeń w metodzie DEMATEL podzielono na pięć etapów.

Etap 1

Opracowanie grafu przyczynowo-skutkowego.

Etap 2

Utworzenie macierzy bezpośredniego wpływu (macierz A). W macierzy kwadratowej n x n poszczególne wiersze są dedykowane czynnikom występujących w porównaniach jako pierwsze, natomiast kolumny są dedykowane czynnikom, które występują w porównaniach jako drugie [2]. Macierz bezpośredniego wpływu nie jest macierzą symetryczną. Intensywność wpływu poszczególnych czynników na inne czynniki można wyrazić oceną w skali 0÷4. Dla tożsamyh relacji wpływu czynników dany wyraz macierzy A przyjmuje wartość 0.

Stage 3

Normalization of matrix A according to the formula:

$$BN = \frac{1}{\lambda} A$$

wherein:

$$\lambda = \max \left(\max_j \sum_{i=1}^n a_{ij} : \max_i \sum_{j=1}^n a_{ij} \right)$$

where: i – line number, j – column number.

Stage 4

Creation of a total impact matrix (matrix T) [6]

$$T = BN + P$$

where:

$$P = BN^2(I - BN)^{-1}$$

I = unit matrix.

Stage 5

Determination of Z significance indicators and R relationship indicators [4]

$$Z = \sum_{j=1}^n t_{ij} + \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad R = \sum_{j=1}^n t_{ij} - \sum_{j=1}^n t_{ji}$$

3. RESEARCH RESULTS

Participants in the construction investment process took part in the survey. Each expert determined the impact strength of factors on a scale of 0÷4 (0 – no impact, 1 – very low impact, 2 – low impact, 3 – high impact, 4 – very high impact). Based on this, 6 partial direct impact matrices were created, counting the dominants:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & 2 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & 4 & 4 & 4 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

Relationships between individual factors have been assigned numerical assessments. The line styles express the influence of particular factors on other factors. The solid line indicates the effect of C1, the dashed line impact C2, the wave-shaped line impact C3, the line with the system: dash-dot-dash influence C4, line with signs „x” C5 influence and line in the zigzag shape impact C6.

Etap 3

Znormalizowanie macierzy A zgodnie ze wzorem:

$$BN = \frac{1}{\lambda} A$$

przy czym:

$$\lambda = \max \left(\max_j \sum_{i=1}^n a_{ij} : \max_i \sum_{j=1}^n a_{ij} \right)$$

gdzie: i – numer wiersza, j – numer kolumny.

Etap 4

Utworzenie macierzy całkowitego wpływu (macierz T) [6]

$$T = BN + P$$

gdzie:

$$P = BN^2(I - BN)^{-1}$$

I = macierz jednostkowa.

Etap 5

Wyznaczenie wskaźników znaczenia Z i wskaźników relacji R [4]

$$Z = \sum_{j=1}^n t_{ij} + \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad R = \sum_{j=1}^n t_{ij} - \sum_{j=1}^n t_{ji}$$

3. REZULTATY BADAŃ

W badaniu udział wzięli uczestnicy procesu inwestycyjnego budowlanego. Każdy ekspert określił siłę wpływu czynników w skali 0÷4 (0 – brak wpływu, 1 – bardzo niski wpływ, 2 – niski wpływ, 3 – wysoki wpływ, 4 – bardzo duży wpływ). Na tej podstawie stworzono sześć cząstkowych macierzy bezpośredniego wpływu, licząc dominanty:

Relacjom między poszczególnymi czynnikami zostały przypisane oceny w postaci liczbowej. Kroje linii wyrażają wpływ poszczególnych czynników na pozostałe czynniki. Linia ciągła oznacza wpływ C1, linia przerywana wpływ C2, linia w kształcie fali wpływ C3, linia o układzie: kreska-kropka-kreska wpływ C4, linia o układzie: kreska-kropka-kreska wpływ C4, linia ze znakami „x” wpływ C5 oraz linia w kształcie zygzakowatym wpływ C6.

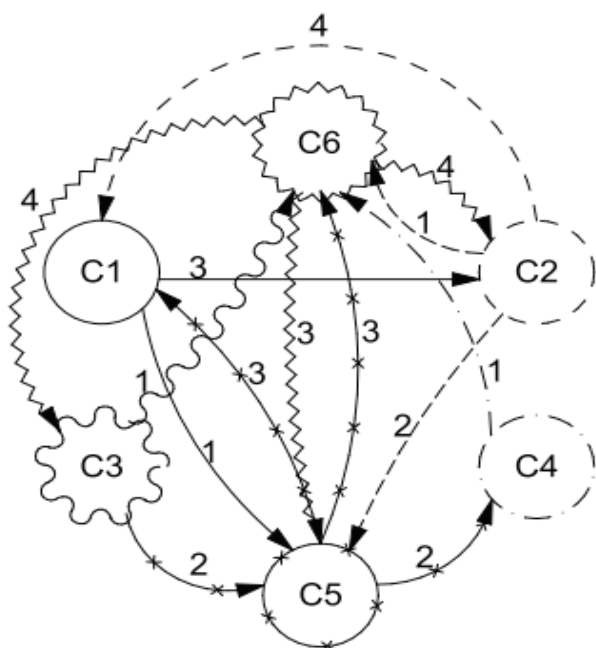


Fig. 1. Cause and effect graph
Rys. 1. Graf przyczynowo-skutkowy

Sixth row of the matrix A is characterized by the largest value, while rows 3 and 4 are the smallest value of the sum of elements. The direct impact matrix A has been subjected to normalization:

$$BN = \begin{bmatrix} 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0,0667 & 0 \\ 0,2667 & 0 & 0 & 0 & 0,1333 & 0,0667 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0667 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0667 \\ 0,2 & 0 & 0,1333 & 0,1333 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0,2667 & 0,2667 & 0,2667 & 0,2 & 0 \end{bmatrix}$$

On the basis of the direct influence matrix, the indirect influence matrix P was calculated:

$$P = \begin{bmatrix} 0,0828 & 0,0274 & 0,0256 & 0,0256 & 0,044 & 0,0407 \\ 0,0646 & 0,0981 & 0,0575 & 0,0575 & 0,059 & 0,0527 \\ 0,0095 & 0,0219 & 0,0224 & 0,0224 & 0,0185 & 0,0081 \\ 0,0095 & 0,0219 & 0,0224 & 0,0224 & 0,0185 & 0,0081 \\ 0,0477 & 0,1169 & 0,0784 & 0,0784 & 0,0826 & 0,0525 \\ 0,143 & 0,0612 & 0,0696 & 0,0696 & 0,0777 & 0,1222 \end{bmatrix}$$

and the matrix of total affect T:

Wiersz szósty macierzy A charakteryzuje się największą, a wiersze 3 i 4 najmniejszą wartością sumy elementów. Macierz bezpośredniego wpływu A poddano normowaniu:

Na podstawie macierzy wpływu bezpośredniego wyliczono macierz wpływu pośredniego P:

oraz macierz wpływu całkowitego T:

$$T = \begin{bmatrix} 0,0828 & 0,2274 & 0,0256 & 0,0256 & 0,1106 & 0,0407 \\ 0,3313 & 0,0981 & 0,0575 & 0,0575 & 0,1924 & 0,1193 \\ 0,0095 & 0,0219 & 0,0224 & 0,0224 & 0,0185 & 0,0748 \\ 0,0095 & 0,0219 & 0,0224 & 0,0224 & 0,0185 & 0,0748 \\ 0,2477 & 0,1169 & 0,2117 & 0,2117 & 0,0826 & 0,2525 \\ 0,143 & 0,3279 & 0,3363 & 0,3363 & 0,2777 & 0,1222 \end{bmatrix}$$

The obtained P matrix defines only indirect influences, therefore the values in the P and T matrices are the same wherever in the BN matrix there are zeros. The values of the matrix T indicate the degree of influence of factors on themselves and on other factors, taking into account both direct influences and indirect influences [4, 17]. From here, it can be seen that all impact values have increased. Some even to a fairly large extent. The effect of C6 on C1 increased from 0 to 0.143. This is due to the fact that C6 has a very high impact on C2 (at 0.3279). C2, on the other hand, has a large impact on C5, which consequently gives a high indirect impact on C1. In turn, the impact of C5 on C2 increased from 0 to 0.1169. The reason for this is the high impact of C5 on C6 (0.2525), and C6 strongly affects C2, which causes a large indirect influence of C5 on C2.

Z indexes and ratios of R relations were determined:

$$Z := \begin{bmatrix} 1,3365 \\ 1,6700 \\ 0,8455 \\ 0,8455 \\ 1,8234 \\ 2,2278 \end{bmatrix}$$

On the basis of the obtained results, the thermal-humid conditions (C2), the amount of lime (C5) and the amount of water (C6) have positive values of the relation ratio. This means that their impact on other factors is stronger than the impact of others on them. The amount of water (C6) has a very high value of the indicator of meaning and relation. It results from the fact that it has a large share in the creation of the impact network (meaning indicator) and that this participation is primarily based on the impact on other factors (large, positive value of the indicator of relations). The obtained results also indicate that pressing (C3) and vibropressing (C4), and to a lesser extent also the time of autoclaving (C1) remain under the clear influence of other factors. At the same time, they have little influence on other factors. Dependencies between indicators of significance and relations are presented in the graph shown in Figure 2.

Uzyskana macierz P określa tylko wpływy pośrednie, dlatego wartości w macierzy P i T są takie same wszędzie tam, gdzie w macierzy BN są zera. Wartości macierzy T wskazują stopień wpływu czynników na siebie i na inne czynniki, uwzględniający zarówno wpływy bezpośrednie, jak i wpływy pośrednie [4, 17]. Stąd można zauważyć, że wszystkie wartości wpływu uległy zwiększeniu. Niektóre nawet w dość znacznym zakresie. Wpływ C6 na C1 zwiększył się z 0 do 0,143. Wynika to z faktu, że C6 ma bardzo wysoki wpływ na C2 (na poziomie 0,3279). C2 ma natomiast duży wpływ na C5, co w konsekwencji daje duży wpływ pośredni na C1. Z kolei wpływ C5 na C2 zwiększył się z 0 do 0,1169. Przyczyną jest tutaj duży wpływ C5 na C6 (0,2525), a C6 bardzo mocno wpływa na C2, co powoduje duży pośredni wpływ C5 na C2.

Wyznaczono wskaźniki znaczenia Z i wskaźniki relacji R:

$$R = \begin{bmatrix} -0,3110 \\ 0,0421 \\ -0,5063 \\ -0,5063 \\ 0,4228 \\ 0,8589 \end{bmatrix}$$

Na podstawie uzyskanych wyników warunki cieplno-wilgotnościowe (C2), ilość wapna (C5) i ilość wody (C6) mają dodatnie wartości wskaźnika relacji. Oznacza to, że ich oddziaływanie na inne czynniki jest silniejsze niż oddziaływanie innych na nie. Ilość wody (C6) ma bardzo dużą wartość wskaźnika znaczenia i relacji. Wynika z tego, że ma duży udział w tworzeniu sieci wpływu (wskaźnik znaczenia) oraz że udział ten polega przede wszystkim na wpływie na inne czynniki (duża, dodatnia wartość wskaźnika relacji). Otrzymane wyniki wskazują również na to, że prasowanie (C3) i wibroprasowanie (C4), a w mniejszej mierze także czas autoklawizacji (C1), pozostają pod wyraźnym wpływem innych czynników. Jednocześnie słabo wpływają one na pozostałe czynniki. Zależności między wskaźnikami znaczenia i relacji przedstawiono na rysunku 2.

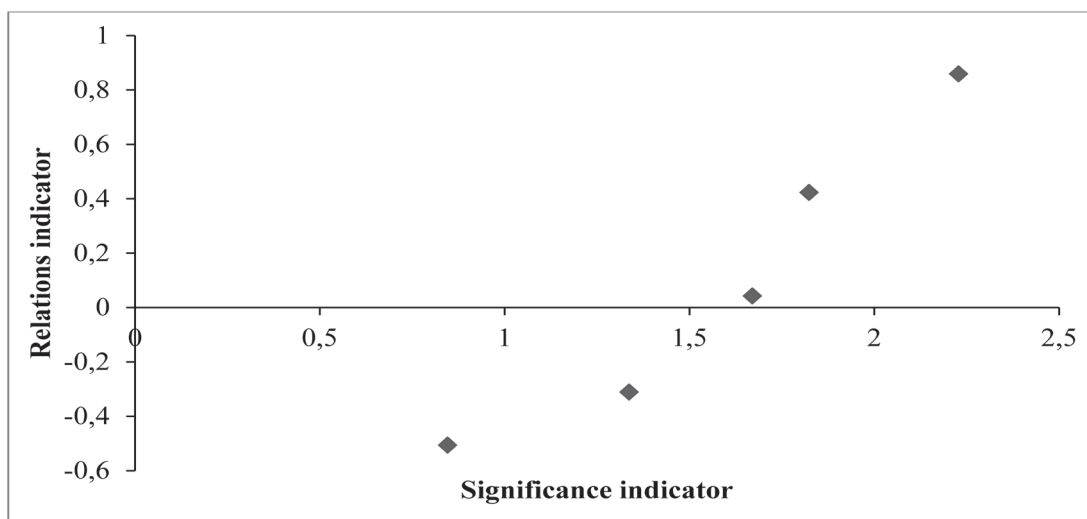


Fig. 2. Graph of the significance and influence of the analyzed variables – final results of the analysis
Rys. 2. Wykres znaczenia wpływu badanych zmiennych – ostateczne wyniki analizy

4. CONCLUSIONS

The application of the presented method to determine causal relationships between technological factors affecting the utilitarian parameters of silicate products, causes that the decision support process is more objective and does not focus only on the intuition of the decision maker.

Based on the results obtained, it is concluded that:

- applying the right amount of water (C6) in the raw material mixture is the most important factor, because water has a very large share in the creation of the impact network of factors and strongly affects other factors,
- the correct selection of the amount of quick lime is important in a less extent,
- the least important factors were C3 and C4, related to the formation of silicate products,
- thermal and humid conditions (C2), the amount of lime (C5) and the amount of water (C6) have a stronger impact on other factors than others on them,
- although the time of autoclaving has a large share in the creation of the impact network, however it is caused by the impact of thermal and humidity conditions, the amount of lime, water and, in a less extent, the forming method.

4. WNIOSKI

Zastosowanie przedstawionej metody do określenia związków przyczynowo-skutkowych między czynnikami technologicznymi wpływającymi na parametry użytkowe wyrobów silikatowych powoduje, że proces wspomaganie decyzji jest bardziej obiektywny i nie skupia się jedynie na intuicji decydenta.

Na podstawie uzyskanych wyników wnioskuje się, że:

- zastosowanie odpowiedniej ilości wody (C6) w mieszaninie surowcowej stanowi najistotniejszy czynnik, gdyż woda ma bardzo duży udział w tworzeniu sieci wpływu czynników oraz silnie oddziałuje na pozostałe czynniki,
- w niewiele mniejszym stopniu ważny jest właściwy dobór ilościowy wapna palonego,
- najmniej istotnymi okazały się czynniki C3 i C4, związane z formowaniem wyrobów silikatowych,
- warunki cieplno-wilgotnościowe (C2), ilość wapna (C5) i ilość wody (C6) silniej oddziałują na inne czynniki niż inne na nie,
- wprowadzenie czasu autoklawizacji ma duży udział w tworzeniu sieci wpływu, jednak jest to spowodowane wpływem warunków cieplno-wilgotnościowych, ilością wapna, wody i w najmniejszym stopniu sposobem formowania.

References

- [1] Burciaga-Díaz O., Díaz-Guillén M.R., Fuentes A.F., Escalante-García J.I.: *Mortars of alkali-activated blast furnace slag with high aggregate: binder ratios*. Construction and Building Materials 44, 2013, 607-614.
- [2] Dytczak M., Ginda G., Wojtkiewicz T.: *Analiza związków przyczynowo-skutkowych w awarii konstrukcji przy użyciu metody DEMATEL*, XXV Konferencja Naukowo-techniczna „Awary Budowlane 2011”. 419-426.

- [3] Georgiev D., Bogdanov B. i inni: *Building material from calcium silicate – preparation and properties Tom 4 International conference on the applications of traditional & high performance materials in harsh environment*.
- [4] Hsu, C.-W., Kuo, T.-C., Chen, S.-H., & Hu, A. H.: *Using DEMATEL to develop a carbon management model of supplier selection in green supply chain management*. Journal of Cleaner Production 56. 164-172, 2013.
- [5] Małolepszy J. i inni: *Podstawy technologii materiałów budowlanych i metody badań*. Kraków. Wydawnictwo AGH, 2013.
- [6] Nermend K.: *Metody analizy wielokryterialnej i wielowymiarowej we wspomaganiu decyzji*. Warszawa. Wydawnictwo PWN 2017.
- [7] Nocuń-Wczelik W.: *Struktura i właściwości uwodnionych krzemianów wapniowych*. Kraków. Polskie Wydawnictwo Ceramiczne 1999.
- [8] Novosad P., Příkryl J., Louda P. i inni: *Functional vibro pressed pavement with ecological benefits*. Advanced Materials Research 787, 328-332.
- [9] Pytel Z.: *Wpływ dodatków mineralnych na właściwości tworzyw wapienno-piaskowych*. Polskie Wydawnictwo Ceramiczne, Kraków 2016.
- [10] Pytel Z.: *Modyfikowanie składu fazowego i mikrostruktury autoklawizowanych tworzyw wapienno-piaskowych*. Kraków. Polskie Wydawnictwo Ceramiczne, Kraków 2014.
- [11] Rademaker P.D., Reiman V.: *Autoclaving silicate bricks*. Zement-Kalk-Gips, 1994.
- [12] Sastry B. S. R.: *Investigations on Sand Lime Bricks-Part I*. Transactions – Indian Ceramic Society 10 (1): 62-67, 2014.
- [13] Stępień A.: *The impact of glass additives on the functional and microstructural properties of sand-lime bricks*. International Journal of Civil and Environmental Engineering 4 (3), 2017.
- [14] Stępień A., Kostrzewa P.: *Autoclaved sand-lime products with a Polypropylene Mesh*. Materials Science and Engineering. 245, 2017.
- [15] Suleymanova L. A., Kara K. A. i inni: *The influence of technological factors on the basic Properties vibressed concrete paving slabs*. Research Journal of Applied Sciences 9 (11): 874-878, 2014.
- [16] Walker R. C., Purton M. J.: *Some observations on calcium silicate brick specimens in the autoclave*. Journal of Applied Chemistry and Biotechnology. 23 (12): 879-886, 2007.
- [17] Wu, H.-H., & Chang, S.-Y.: *A case study of using DEMATEL method to identify critical factors in green supply chain management*. Applied Mathematics and Computation. 256. 394-403, 2015.

Acknowledgments:

The work was financed by Kielce University of Technology, part of the statutory work No. 02.0.05.00/2.01.01.01.0002 MNSP.BKTO.17.002

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Świętokrzyską, w ramach pracy statutowej nr: 02.0.05.00/2.01.01.01.0002 MNSP.BKTO.17.002



environment
environment

TECHNOLOGICAL ASPECT OF BRICK PRODUCTION USING THE METHOD OF AUTOCLAVING

TECHNOLOGICZNE ASPEKTY PRODUKCJI CEGIEŁ METODĄ AUTOKLAWIZACJI

DOI: 10.30540/sae-2018-024

Abstract

Production of sand-lime bricks using the autoclaving method is a well-known process, especially in Europe. During the autoclaving process, also called the hydrothermal treatment or hardening the materials with lime and/or cement binder, a series of microstructural changes occur. Primarily, hydrated silicates of lime are created, which are responsible for physical-mechanical features of aerated materials. The article aims at characterizing the process of brick production using the method of autoclaving and estimation of their microstructural properties.

Keywords: autoclave, sand-lime products, microstructure

Streszczenie

Produkcja cegieł wapienno-piaskowych metodą autoklawizacji jest procesem znanym szczególnie w Europie. Podczas autoklawizacji, nazywanej również obróbką hydrotermalną bądź utwardzaniem materiałów o spoiwie wapiennym i/lub cementowym, zachodzi szereg zmian mikrostrukturalnych. Powstają przede wszystkim uwodnione krzemiany wapnia, które są odpowiedzialne za właściwości fizykomechaniczne materiałów autoklawizowanych. Artykuł ma na celu charakterystykę procesu produkcji cegieł metodą autoklawizowanych oraz ocenę charakterystyk mikrostrukturalnych materiałów autoklawizowanych.

Słowa kluczowe: autoklaw, wyroby wapienno-piaskowe, mikrostruktura

1. INTRODUCTION

In 21st century, the building materials industry is developing dynamically, especially in highly developed countries. In Poland and Slovakia, where for a long time the fire resistance tests of aerated bricks were performed, aerated materials, such as autoclaved aerated concrete blocks and sand-lime bricks are popular among investors and contractors. The materials gained their popularity because of their excellent physical-mechanical properties, low radiant factor and competitive price. Very good qualities of autoclaved aerated concrete and sand-lime products result from chemical changes during hardening in autoclaves [1, 2].

1. WPROWADZENIE

Przemysł materiałów budowlanych w XXI wieku rozwija się niezwykle dynamicznie, szczególnie w krajach wysoko rozwiniętych. W Polsce czy Słowacji (gdzie przez długi czas wykonywano badania ognioodporności cegieł autoklawizowanych) inwestorzy i wykonawcy chętnie sięgają po materiały autoklawizowane, tj. bloczki z betonu komórkowego oraz cegły wapienno-piaskowe. Przedmiotowe materiały zyskały popularność z uwagi na bardzo dobre parametry fizykomechaniczne, niski współczynnik promieniowania oraz konkurencyjną cenę. Bardzo dobre właściwości betonu komórkowego oraz wyrobów wapienno-piaskowych są wynikiem przemian chemicznych zachodzących podczas hartowania w autoklawach [1, 2].

The aim of the article is to characterize the process of brick production using the autoclaving method regarding their microstructure.

2. AUTOCLAVES – THEIR BUILT AND DIVISION

An autoclave is a hermetically sealed container, in which during the heating process the pressure rises, enabling to reach the temperature higher than 100°C.



Reaching the higher temperature fosters occurrence of various chemical processes. In the case of sand-lime brick, commonly known as silicate brick, calcium (CaO) stimulates silicate ingredients of quartz sand (SiO_2), creating solid compounds, the so-called hydrated calcium silicate. This reaction gives high durability and resistance to external factors to the products. The additional advantages of this process are a slight deformation of the final product and limitation of its shrinking (high accuracy is preserved during the process) [3].

The process of brick production using the autoclaving method may be shortly summarized by numbers 1+6+1, each of which represents a particular stage of brick hardening (in hours): heating of an autoclave, proper autoclaving in the temperature of 200°C and cooling. Depending on its capabilities and designation of the final product (including the resistance class), it is advisable to leave the bricks in an autoclave for more than 1 hour during the cooling process of the machine (which additionally minimizes the shrinking processes and prolongs the durability of the product) [3].

The class of the final product depends not only in the quality of the substrates used (CaO , H_2O , SiO_2), or diligence during particular stages of production, but also on the time of the proper autoclaving stage. In justified cases, the time of autoclaving may be prolonged to for example 8-9 hours, which is connected with additional costs of production and may have an impact on the environment (heating of the autoclave with resources such as coal).

Celem artykułu jest charakterystyka procesu produkcji cegieł metodą autoklawizacji w odniesieniu do ich mikrostruktury.

2. AUTOKLAWY – BUDOWA I PODZIAŁ

Autoklaw to hermeticznie zamknięty zbiornik, w którym podczas podgrzewania następuje wzrost ciśnienia, dzięki czemu możliwe jest osiągnięcie temperatury wyższej niż 100°C.

Fig. 1. Industrial autoclaves

Rys. 1. Autoklawy przemysłowe

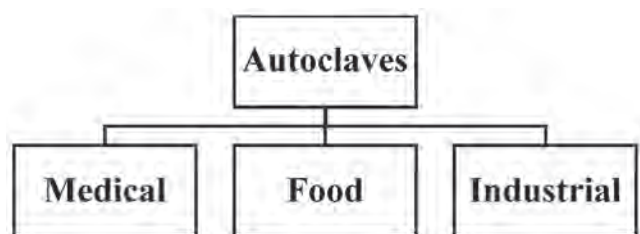
Uzyskanie wyższej temperatury sprzyja przebiegowi różnorodnych procesów chemicznych. W przypadku cegły wapienno-piaskowej, zwanej potocznie cegłą silikatową, wapno (CaO) aktywizuje krzemianowe składniki piasku kwarcowego (SiO_2), tworząc związki stałe, tzw. uwodnione krzemiany wapnia. Reakcja ta nadaje wyrobom wysoką wytrzymałość i odporność na działanie czynników zewnętrznych. Dodatkową zaletą tego procesu są niewielkie odkształcenia produktu końcowego i ograniczenie skurczu elementu (zachowana jest wysoka dokładność podczas produkcji) [3].

Proces produkcji cegieł metodą autoklawizacji można krótko zawrzeć w cyfrach 1+6+1, co oznacza etapy postępu hartowania cegieł (wyrażone w godzinach): ogrzewanie autoklawu, autoklawizację właściwą w temperaturze ok. 200°C i chłodzenie. W zależności od możliwości i przeznaczenia produktu końcowego (w tym od klasy wytrzymałości) korzystnym jest pozostawienie cegieł w autoklawie dłużej niż 1 godzinę w trakcie chłodzenia urządzenia (co dodatkowo minimalizuje procesy skurczowe i wydłuża trwałość wyrobu) [3].

Klasa produktu końcowego zależy nie tylko od jakości zastosowanych substratów (CaO , H_2O , SiO_2) czy staranności podczas wykonywania poszczególnych etapów produkcji, ale również od długości autoklawizacji właściwej. W uzasadnionych przypadkach czas autoklawizacji może zostać wydłużony, np. do 8-9 h, co jednak wiąże się z kosztami produkcji i możliwością oddziaływania na środowisko (ogrzewanie autoklawów materiałem surowcowym, np. węglem).

To minimize the energy loss, costs and negative impact on the environment, the quality of the components used in production should be thoroughly controlled. Laboratory simulations have been performed, proving that lime and highly reactive sand of suitable class, may shorten the time of autoclaving to 5-5.5 hours [4].

There are many types of autoclaves, which differ in size, shape and parameters. Small containers, which are commonly used in medicine in the process of sterilization, occur in several classes, varying for example in the type of input. Bigger autoclaves are used in the food industry and in factories producing sand-lime bricks and autoclaved aerated concrete blocks. The machines which are used for production of the materials, less commonly for wood drying, are called industrial autoclaves [5, 6].



An autoclave, regardless of its designation, consists of the main container and its cover made of thick walls (with high pressure resistance), manometer, thermometer, and overpressure relief valve. The valve functions as a protection in case too high pressure appears in an autoclave.

Characteristic features of an autoclave are:

- usable capacity – factual capacity of the compartment that may be used. In many cases, it is much smaller than the nominal capacity (it is advised to take using small forms into consideration, even those of several centimeters);
- usable length – similarly to usable capacity, usable length of the compartment is usually smaller than the nominal one. This is the key parameter when it comes to sterilizing long tools or forms;
- sterilization cycles – approximate time of input sterilization of the two most commonly used cycles (134°C normal cycle for packed utensils, 134°C fast cycle for unpacked utensils) is presented in two columns;
- energy consumption – in the last column, approximate value of electric energy needed for a specific autoclave is presented. This is a crucial economic element of an autoclave exploitation, which is usually checked when the machine is

W celu minimalizacji strat energii, kosztów oraz negatywnego wpływu na środowisko, należy w sposób szczególny kontrolować jakość stosowanych do produkcji komponentów. Przeprowadzone zostały symulacje laboratoryjne, które dowiodły, że odpowiedniej klasy wapno i piasek wysoko reaktywny może skrócić czas autoklawizacji do 5-5,5 godziny [4].

Istnieje wiele rodzajów autoklawów, które różnią się między sobą gabarytami, kształtem oraz osiąganymi parametrami. Małe zbiorniki są powszechnie używane w medycynie w procesie sterylizacji, można wyróżnić w nich kilka klas różniących się między innymi typem wsadu. Większe autoklawy są stosowane w przemyśle spożywczym oraz w zakładach produkcji cegieł silikatowych czy bloczków betonu komórkowego. Duże autoklawy wykorzystywane do produkcji wspomnianych materiałów budowlanych, a rzadziej do suszenia drewna, nazywane są autoklawami przemysłowymi [5, 6].

Fig. 2. Division of autoclaves depending on their designation
Rys. 2. Podział autoklawów ze względu na przeznaczenie

Autoklaw bez względu na przeznaczenie składa się zwyczajowo z naczynia głównego i pokrywy, wykonanych z grubych ścian (zdolnych wytrzymać wysokie ciśnienie), manometru, termometru oraz zaworu ciśnieniowego, który pełni rolę zabezpieczenia na wypadek powstania zbyt dużego ciśnienia.

Cechami określającymi urządzenia typu autoklaw są:

- pojemność użyteczna – faktyczna pojemność komory do wykorzystania przez użytkownika. W wielu wypadkach jest ona znacznie mniejsza od pojemności nominalnej (należy liczyć się ze stosowaniem form mniejszych nawet do kilku centymetrów);
- długość użyteczna komory – podobnie jak w przypadku pojemności jest najczęściej mniejsza od nominalnej. Parametr ten jest ważny w przypadku oceny przydatności danego autoklawu do sterylizacji długich narzędzi lub form;
- cykle sterylizacyjne – w dwóch kolumnach podajemy przybliżone czasy sterylizacji wsadów w dwóch najczęściej wykorzystywanych cyklach (134°C normalny dla narzędzi opakowanych oraz 134°C w szybkim cyklu dla narzędzi nieopakowanych);
- zużycie energii – w ostatniej kolumnie podajemy przybliżone wartości zapotrzebowania autoklawu na energię elektryczną. Jest to istotny element ekonomiczny, na który zwraca się uwagę dopiero w trakcie

already in use, but may have a detrimental effect on old electric installations.

3. BOILERS IN AUTOCLAVES

An integral element of an industrial autoclave used in hardening process of building materials is a boiler. Autoclaves are connected with the boiler by a number of pipes. A sterilizing agent is overheated saturated water vapor under higher pressure, which enables reaching the temperature over 100°C. Boiling water brings the water vapor to overpressure, which becomes saturated after total air suppression. Every vapor boiler, which has an individual power supply or fixed tank (if it has an external power supply), is a subject to Technical Inspection. It must regularly undergo a technical review, and must have its service book (Dz.U. 2012, poz. 1468).

The Office of Technical Inspection performs leak tests, internal and external inspection of autoclaves with varied frequency. The frequency of inspection depends on the pressure in the pressure tanks, time of exploitation of the autoclave and its technical condition. Another key document that every autoclave needs to have is a certification for the overpressure relief valve [6]. Autoclaves which are used in production of sand-lime bricks, because of the use of high pressure, undergo the technical inspection more often and with greater attention.

Autoclaves (vapor boilers) may be powered by various fuels. Finding the suitable fuel is crucial on economic and ecologic grounds. In the case of autoclaves used in sand-lime brick hardening, the boilers are usually powered by bituminous coal, culm, or gas. The choice of fuel is usually based on economy and local conditions, which does not mean other fuels may not be used. The boilers may be powered by wood, pellet, biofuels, sawdust or even straw. However, every available source of energy has a lot of advantages and disadvantages [7].

4. THE COURSE OF AUTOCLAVING PROCESS

Autoclaving means hardening products with lime and/or cement binder using vapor. The typical technological process of receiving aerated products, consists of several phases: stock of raw materials, mass preparation, forming of semi-finished products, hardening, cooling, quality control and stock of finished products [8].

Resources used in production of autoclaved materials are lime and/or cement as binders, quartz sand (in justified cases quartz powder as an aggregate containing silica). Hardening is performed

użytkowania urządzenia, a który może mieć również wpływ na trwałość starych instalacji elektrycznych.

3. KOTŁY W AUTOKŁAWACH

Nieodłącznym elementem autoklawów przemysłowych wykorzystywanych do hartowania wyrobów budowlanych jest kocioł. Autoklawy są połączone z kotłem szeregiem rur. Czynnikiem wyjąłającym jest przegrzana nasycona para wodna pod zwiększonym ciśnieniem, która umożliwia osiągnięcie temperatury powyżej 100°C. Gotująca woda doprowadza do nadciśnienia parę wodną, która ulega nasyceniu po pełnym wyparciu powietrza. Każdy kocioł parowy, który posiada własne zasilanie lub zbiornik stały (jeśli posiada zasilanie zewnętrzne), podlega dozorowi technicznemu. Musi być poddawany regularnym przeglądom technicznym oraz posiadać książkę (Dz.U. 2012, poz. 1468).

Urząd Dozoru Technicznego przeprowadza próby szczelności, przeglądy wewnętrzne oraz zewnętrzne autoklawów z różną częstotliwością. Częstotliwość przeglądów zależy od wysokości ciśnienia zbiorników ciśnieniowych, czasu eksploatacji autoklawu oraz jego stanu technicznego. Kolejnym istotnym dokumentem, który każdy autoklaw powinien posiadać jest certyfikat na zawór bezpieczeństwa [6]. Autoklawy do produkcji cegły silikatowej, w związku z wykorzystywaniem wysokiego ciśnienia, są poddawane dokładnym oraz częstym rewizjom.

Autoklawy (kotły parowe) mogą być zasilane różnymi paliwami. Dobór paliwa jest niezwykle istotny ze względów ekonomicznych, jak również ekologicznych. W przypadku autoklawów przeznaczonych do hartowania cegieł wapienno-piaskowych, kotły są zazwyczaj zasilane węglem kamiennym, miałem energetycznym bądź gazem. Wybór paliwa podyktowany jest ekonomią i warunkami lokalnymi, nie oznacza to jednak, że nie można stosować innych źródeł energii. Kotły mogą być opalane drewnem, peletem, biopaliwami, trocinami czy nawet słomą. Wszystkie dostępne surowce posiadają zarówno wiele zalet, jak i wad [7].

4. PRZEBIEG PROCESU AUTOKŁAWIZACJI

Przez autoklawizację rozumie się parowe utwardzanie wyrobów o spoiwie wapiennym i/lub cementowym. Typowy proces technologiczny otrzymywania autoklawizowanych produktów składa się z kilku faz: magazynowanie surowców, przygotowanie masy, formowanie półfabrykatów, hartowanie, chłodzenie, kontrola jakości i składowanie gotowych wyrobów [8].

Surowcami wejściowymi do produkcji wyrobów autoklawizowanych są wapno i/lub cement jako spoiwa, piasek kwarcowy (w uzasadnionych przypad-

in autoclaving boiler, under pressure of saturated vapor at a level of 1.2 MPa to 1.6 MPa and in the temperature of 200°C for 6 to 8 hours. It is a time consuming process and it involves the most energy compared to the rest of stages.

kach mączka kwarcowa jako kruszywo zawierające krzemionkę). Utwardzanie następuje w kotle autoklawizacyjnym pod ciśnieniem pary nasyconej około 1,2 MPa do 1,6 MPa i przy temperaturze około 200°C przez 6 do 8 godzin. Proces ten jest czasochłonny i wymaga dostarczenia największej ilości energii w porównaniu do pozostałych etapów.



Fig. 3. Particular phases of sand-lime production process [9]

Rys. 3. Etapy produkcji wyrobów wapienno-piaskowych [9]

Silica ingredients of quartz sand (or powder), under the high temperature and pressure, become partly digested and activated by lime in binder. At the same time, they create solid compounds, usually in the form of hydrated silicates of lime, for instance the C-S-H phase or tobermorite [10, 11].

In the reaction of lime-silica, hydrated silicates of lime show high durability and resistance – they become similar to the products of cement hydration. This is why the mixtures, in which a meaningful part was replaced by quartz powder, prove high resistance in few hours. Autoclaving of mixtures without proper silica ingredients in aggregate leads to lower resistance than with traditional hardening.

Krzemianowe składniki piasku kwarcowego (lub mączki) pod działaniem wysokiej temperatury i ciśnienia zostają przez wapno spoiwa nadtrawione i zaktywizowane; wchodzi one przy tym w trwałe związki, zwykle w postaci uwodnionych krzemianów wapnia, np. faza C-S-H oraz tobermoryt [10, 11].

Przy reakcji „wapno-krzemionka” powstające uwodnione krzemiany wapnia wykazują wysoką wytrzymałość i odporność, stają się podobne do produktów hydratacji cementu. Dlatego nawet mieszaniny, w których duża część cementu została zastąpiona przez mączkę kwarcową, w ciągu kilku godzin osiągną wysokie wytrzymałości. Autoklawizacja mieszanin bez odpowiednich składników krzemionkowych w kruszywie prowadzi do niższych wytrzymałości niż przy normalnym twardnieniu.



Fig. 4a. Production of silicates on industrial scale today
Rys. 4a. Produkcja silikatów na skalę przemysłową

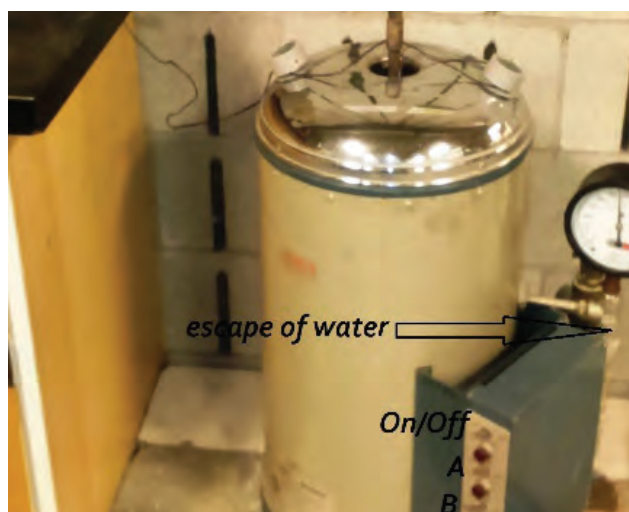


Fig. 4b. Laboratory autoclave
Rys. 4b. Autoklaw laboratoryjny



Fig. 4c. Laboratory autoclave
Rys. 4c. Autoklaw laboratoryjny

Autoclaving influences also the phenomenon of deformation during drying (shrinking). Aerated products with lime or cement binding slightly deform with the change of humidity, form 3% to 8% volume. Cement stone, hardening in a traditional way, already during drying in higher humidity, shows much bigger shrinking.

Because of hydrated lime silica, which is difficult to dissolve, and other chemical compounds, aerated

Przez autoklawizację wpływa się także na zjawisko deformacji przy wysychaniu (skurcz). Autoklawizowane wyroby o spoiwie wapiennym i/lub cementowym odkształcają się nieznacznie przy zmianie wilgotności, od 3% do 8% objętości. Normalnie twardniejący kamień cementowy, już przy wysychaniu w zakresie wyższych wilgotności, wykazuje znacznie większy skurcz.

Przez tworzenie się trudno rozpuszczalnych uwodnionych krzemianów wapnia i innych związków che-

products are resistant to aggression from chemical substances (sulfate solution). Autoclaving has a detrimental effect on tightness, therefore on frost resistance and protection from corrosion. The reason for lower protection from corrosion is, apart from lower tightness of concrete layer covering steel – wear of strongly alkaline calcium hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$ by the reaction of ‘lime-silica’. This is why the pH indicator drops lower than the range of 9-13 which is essential for steel surface passivation, which leads to the fact that steel rusts.

4.1. Working of laboratory autoclave

Standard laboratory autoclave, designated for production of building materials should be filled with water in the amount suitable for the capacity of the autoclave.

micznych, wyroby autoklawizowane są odporne na agresję ze strony substancji chemicznych (np. roztworów siarczanów). Autoklawizacja ujemnie oddziałuje na szczelność i tym samym na mrozoodporność i ochronę zbrojenia przed korozją. Przyczyną zmniejszonej ochrony przed korozją jest oprócz zmniejszonej szczelności warstwy betonowej przykrywającej stal – zużycie silnie alkalicznego wodorotlenku wapniowego $\text{Ca}(\text{OH})_2$ przez reakcję “wapno-krzemionka”. Przez to odczyn pH spada poniżej zakresu 9-13 niezbędnego dla pasywacji powierzchni stali. Skutek – stal rdzewieje.

4.1. Działanie autoklawu laboratoryjnego

Standardowe autoklawy laboratoryjne przeznaczone do produkcji materiałów budowlanych należy uzupełniać wodą w ilości uzależnionej od pojemności autoklawu w celu wytworzenia pary wodnej i ciśnienia.

Table 1. Sample distribution of pressure and temperature in a laboratory autoclave

Tabela 1. Próbkę rozkładu ciśnienia i temperatury w autoklawie laboratoryjnym

Lp.	Time [h]	Temperature [°C]	Pressure [MPa]
1	14.30	22	0
2	15.00	109	0.03
3	15.10	124	0.2
4	15.15	137	0.3
5	15.25	162	0.8
6	15.30	176	1.2
7	15.40	192	1.9
8	15.45	198	2.0
9	15.55	197	2.0
10	16.00	196	1.9
12	16.15	194	1.9
13	16.25	194	1.8
14	16.30	196	1.9
15	16.50	194	1.9
16	17.05	192	1.9
17	17.15	195	1.8
18	17.45	200	2.1
19	19.00	166	0.86
20	7.00 (next day)	30	0

One should remember that performance of the laboratory autoclave is not fully automated and relation of pressure and temperature is connected with the amount of water in the autoclave (saturation of water vapor). Performance of the autoclave depends also on the quality of the mixture undergoing the hydrothermal treatment, which already has a particular level of hydration. In some cases (especially in the case

Należy pamiętać, że działanie autoklawów laboratoryjnych nie jest w pełni zautomatyzowane i zależność ciśnienia i temperatury ma związek z ilością wody w autoklawie (a tym samym nasycenie pary wodnej) oraz od właściwości masy poddanej obróbce hydrotermalnej (która posiada pewien stopień nawodnienia) i jakości zastosowanych komponentów. W niektórych przypadkach (szczególnie przy kom-

of amorphous components), the so-called ‘swelling of materials’ may occur. However, this is usually the effect of a questionable quality of components, mistakes made during the production process, too low temperature and/or pressure during autoclaving.

5. THE USE OF INDUSTRIAL AUTOCLAVES

Industrial autoclaves are used especially for production of sand-lime bricks. However, it is advisable to use them in the production of autoclaved aerated concrete, silicate concrete, and typical one, as well (especially for boosting operating characteristics and concrete durability/resistance) [12, 13].

- a. Autoclaved aerated concrete (AAC) – this is the process of production of the material with vapor hardening along with the occurrence of air pores. The pores guarantee beneficiary thermal qualities. AAC is produced from cement and lime (as binders), finely ground aggregate, rich in silicates (for example quartz powder) and a blowing agent. Autoclaving of AAC products lasts for 6-12 hours in the atmosphere of saturated vapor in 190°C and 1.2 MPa. With volume density of between 0.30 and 1.00 kg/dm³, compressive strength of 2.5 to 10.0 N/mm² is gained. The shrinking parameter is lower than 0.2 mm/m.
- b. Sand-lime bricks – sand-lime bricks (for example full sand-lime bricks) are presented in the state of humid soil from lime hardening on air and quartz sand, which are immediately hardened in an autoclave in 200°C and 1.6 MPa for about 4 to 6 hours. High resistance is based on the ‘lime-silica’ reaction; carbonization does not occur during the production. Cement is totally omitted as a binder.
- c. Silicate concrete – starting materials are usually lime and finely ground natural sand. Because of autoclaving, concrete for precast with compressive strength up to 100 N/mm² may be produced. However, the reinforcement must be protected from corrosion.
- d. Plain corrosion – because of the fact that the investment and exploiting costs of autoclaving are relatively high, in Germany, precast form plain concrete is not used for autoclaving.

6. MICROSTRUCTURE OF AERATED PRODUCTS

During the hydrothermal treatment of sand-lime materials (so-called silicate bricks), aqueous lime silicates, such as C-S-H phase (C-S-H gel occurs in concrete in the temperature of 20°C), the tobermorite phase of various stages of hydration, and in particular

ponentach amorficznych) może dochodzić do tzw. „puchnięcia materiałów”. Jest to jednak często efekt wątpliwej jakości komponentów, błędów podczas produkcji wyrobów, zbyt niskiej temperatury i/lub ciśnienia podczas autoklawizacji.

5. ZASTOSOWANIE AUTOKLAWÓW PRZEMYSŁOWYCH

Autoklawy przemysłowe stosuje się szczególnie w produkcji cegieł wapienno-piaskowych, jednak ich użyteczność wskazana jest również przy produkcji betonu komórkowego, silikatowego i zwykłego (szczególnie do wzmacniania charakterystyk użytkowych i trwałości materiału) [12, 13].

- a. Beton komórkowy – w tym przypadku to proces produkcji wyrobu z utwardzaniem parowym i powstawaniem porów powietrznych, które gwarantują korzystne właściwości termiczne materiału. Beton komórkowy wytwarza się z cementu i wapna (jako spoiw), drobno zmielonego kruszywa, bogatego w krzemiany (np. mączki kwarcowej), oraz środka porotwórczego. Autoklawizacja wyrobów z betonu komórkowego odbywa się przez 6 do 12 godzin w atmosferze pary nasyconej w 190°C i 1,2 MPa. Przy gęstości objętościowej między 0,30 a 1,00 kg/dm³ osiąga się wytrzymałości na ściskanie od 2,5 do 10,0 N/mm². Wartość skurczu leży poniżej 0,2 mm/m.
- b. Cegły wapienno-piaskowe – prasuje się je np. cegły pełne w stanie wilgotnej ziemi z wapna twardniejącego na powietrzu i piasku kwarcowego, zaraz potem utwardza w autoklawie w 200°C i przy 1,6 MPa około 4 do 6 godzin. Wysokie wytrzymałości opierają się na reakcji „wapno-krzemionka”; przy produkcji nie występuje karbonatyzacja. Całkowicie rezygnuje się z cementu jako spoiwa.
- c. Beton silikatowy – materiałami wyjściowymi są przeważnie wapno i drobno zmielony piasek naturalny. Przez autoklawizację można produkować beton do prefabrykatów o wytrzymałości na ściskanie do 100 N/mm². Zbrojenie musi być jednak chronione przed korozją.
- d. Beton zwykły – ponieważ koszty inwestycyjne i eksploatacyjne przy autoklawizacji są stosunkowo wysokie, w Niemczech nie stosuje się autoklawizacji prefabrykatów z betonu zwykłego.

6. MIKROSTRUKTURA PRODUKTÓW AUTOKLAWIZACJI

Podczas obróbki hydrotermalnej w materiale wapienno-piaskowym (tj. cegle silikatowej) powstają tzw. uwodnione krzemiany wapna, jak na przykład faza C-S-H (żel C-S-H powstaje w betonach w temperaturze zaledwie 20°C), faza tobermorytowa o róż-

cases also xonolite (the temperature of autoclaving of more than 170°C). Surface area of subject phases changes along with the change of temperature and pressure (as a result of water loss).

7. SUMMARY

Research on the autoclaves and means of brick production have lasted for almost 200 years. These are the so-called mechanical means of finding artificial stone. Depending on the market needs and demands for material of specified parameters, not only the mixture from which an artificial stone – a brick is created undergoes alteration, but also its process of production. What is altered is, among others, pressure in press that operates on the mixture, method of dosing the ingredients, the temperature of autoclaving etc.

nym stopniu uwodnienia, a w określonych przypadkach xonolit (temperatura autoklawizacji powyżej 170°C). Powierzchnia właściwa przedmiotowych faz zmienia się wraz ze zmianą temperatury i ciśnienia (na skutek m.in. utraty wody).

7. PODSUMOWANIE

Prace nad autoklawami i sposobem produkcji cegieł trwają od prawie 200 lat. Są to tak zwane mechaniczne sposoby pozyskiwania sztucznego kamienia. W zależności od potrzeb rynku i zapotrzebowania na materiał o określonych parametrach, modyfikacjom poddawana jest nie tylko sama mieszanka, z której powstaje cegła, czyli sztuczny kamień, ale również proces produkcji. Zmianom poddaje się m.in.: ciśnienie w prasie, jakim działa się na formowaną mieszankę, sposób dozowania składników, temperaturę autoklawizacji itp.

References

- [1] Major M., Major I., *Complex structures in sustainable construction*, Construction with an optimized energy potential, 2 (16) 2015, pp. 51-56.
- [2] Sawicki J., *Silicates in construction*, IZOLACJE, 2009.
- [3] Dachowski R., Kostrzewa P., *The effect of modification of lime-sand products on their compressive strength and absorbability*, monography Innovations in Polish Science - an overview of the current research topics of the chemical industry, 2016, pp. 87-95.
- [4] Stępień A., *The influence of modifications of the composition of silicate products on their microstructure and useful properties*, PhD dissertation, Kielce University of Technology, WBiA, Kielce 2013.
- [5] <http://www.autoklawy.com.pl>, access on July 5, 2017.
- [6] <http://autoklaw-sterylizator.com>, access on July 5, 2017.
- [7] Dziadek K., Szmidt A., *The project of the technological process of brick production by autoclaving*. Engineering work, Politechnika Świętokrzyska, Faculty of Management and Computer Modeling (Production Engineering), Kielce 2015.
- [8] Dachowski R., Kostrzewa P., *Silicates in the light of ecology and economics*, Construction with an Optimized Energy Potential no 1(19) 2017.
- [9] <http://www.sil-pro.pl/proces-produkcji>, access on July 5, 2017.
- [10] Gębarowski P., Łaskawiec K., Skorniewska M., *The influence of autoclaving conditions on the properties of silicate materials*. ICiMB's work 2015 no 20: 23-33, ISSN 1899-3230, Warsaw-Opole 2015.
- [11] Stępień A., *The modification of the sand-lime products*, Building Materials, vol. 12, pp. 29-31, 2015.
- [12] <http://solidnydom.pl/autoklawizacja.html>, access on July 5, 2017.
- [13] Zapotoczna-Sytek G., Balkovic S., *Autoclaved cellular concrete*. Technology, properties, application, PWN Scientific Publisher, Warsaw 2013.

Acknowledgments:

The work was financed by Kielce University of Technology, part of the statutory work No. 02.0.05.00/2.01.01.02.0057 MNSC.BKTO.16.005

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Świętokrzyską, w ramach pracy statutowej nr: 02.0.05.00/2.01.01.02.0057 MNSC.BKTO.16.005

THERMAL INSULATION MATERIALS WITH POROUS STRUCTURE

MATERIAŁY TERMOIZOLACYJNE O STRUKTURZE POROWATEJ

DOI: 10.30540/sae-2018-025

Abstract

The raw mix of silica-containing technogenic component – fly ash of thermal power plants – and the methods of preparing waterproof porous thermal insulating materials of extended application on its base according to the powder low-temperature technology has been developed using multifunctional properties of soluble glass as: a) a binding component; b) blowing agent; c) the raw mix hardening rate regulator. The physical and chemical, technological aspects of obtaining and using the suggested alkaline-silicate compositions have been considered.

Keywords: fly ash, soluble glass, alkaline-silicate composite heat-insulating materials, thermal foaming

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie produkcji wodoodpornych materiałów termoizolacyjnych przy wykorzystaniu mieszanek zawierających krzem i popiół lotny, pochodzący z elektrowni w oparciu o niskotemperaturową technologię proszkową. Opiera się ona o wykorzystanie szerokich właściwości szkła wodnego, tj. jako: a) element łączący, b) element spulchniający, c) regulator twardnienia. W pracy rozpatrzono fizyczno-chemiczne i technologiczne aspekty wytworzenia i wykorzystania tego typu kompozytów.

Słowa kluczowe: popiół lotny, szkło wodne, kompozyty krzemowe, materiały termoizolacyjne, spienianie termiczne

1. STATEMENT OF THE PROBLEM

Alkali-silicate porous materials obtained by means of thermal or cold foaming of alkali metals silicates aqueous solutions (soluble glass) or solid alkali silicate hydrogels [1-5], are referred to the present-day, efficient inorganic insulants, promising due to the ability to achieve low values of the relative density and thermal conductivity while maintaining sufficient structure strength and easy handling of foaming and induration processes within a wide range of composition formulations. The above benefits are based on the equilibrium and homogeneity of the main raw mixture component: soluble glass and hydrogels based on it.

Composite alkaline-silicate porous thermal-insulating materials, both granulated and block-type, contain significant amounts of the gas phase. There

are various technological approaches to obtaining such materials at gas development directly in the strata of the formed composition. Moreover, the process of gas development at high temperatures can be based both on the special additives reactions, and on the crystallization and chemically bound water vapors liberation.

2. RECENT RESEARCH ANALYSIS

To manufacture foam glass, special gas forming agents are used. Normally, the process of making the foam glass lies in preparing the batch, consisting of 95-97% of powdered glass and 5-3% of the gas forming agents (carbonate, such as limestone, or carbon, such as charcoal, coke, carbon dust), heating the batch to the temperature of silicates' pyroplastic state. At this temperature glass grains are sintered and gases formed as a result of the gas-forming agents

decomposition, blow highly viscous glass melt. After annealing and cooling, porous material is formed with high thermal insulation properties and high mechanical strength [6]. General issues to obtain the foam glass, including granular one, are described in monographs [7, 8]. The foaming temperature of foam glass usually lies between 750°C and 900°C.

Another method is the heat processing of glassy silicates containing water, which gasifies at high temperatures and foams the silicate base. Raw material in this process can be both natural [9] and synthetic water-containing materials.

To obtain blocks of heat-insulating material, the granular thermal insulating silicate filler can be used, as suggested by the authors [10]. In this case, the use of a silicate binding component permits forming blocks of the required size and shape, and dehydration of the latter occurs at temperatures within 100-350°C.

The feed silicate composition can be obtained by artificial means. In this case, it is often possible to avoid energy-intensive and technologically costly operation of obtaining highly dispersed silicate powders. The raw materials basis for such technical solutions, are water soluble silicates, most frequently sodium silicates. Obtaining of sodium silicates solutions is performed in compliance with the schemes of the technical product synthesis: soluble glass, or by means of silicon oxide dissolution in a strong caustic, or by autoclave dissolution of pre-fused silicate (silicate-blocks). Further, aqueous solution of sodium silicate in one way or another is converted into a gel, for example by adding acids or strong electrolytes, and the resulting material is accessible to heat treatment, when water is removed from it and the product foams, increasing its volume significantly. In this case, if heat treatment of the material is performed in a rigid metal form, then while foaming, the material fills the entire free volume of the form, forming blocks of the given configuration.

Amorphous silica is frequently used to produce sodium silicate with the required $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ratio. Normally, microsilica-wastes from the production of crystalline silicon are used for these purposes [11].

Another option to obtain light porous silicate blocks is mixing the finished granulated lightweight silicate with any binding material, followed by hardening of the composition and obtaining the required blocks. Both of the described approaches to obtaining light silicates have been implemented in numerous technical solutions. At the same time, examples of the particular lightweight products manufacture may have some differences both in the composition of the

starting materials and in their processing technology.

As it was noted above, one of the ways to obtain foamed silicate in the form of blocks or slabs is heat treatment in rigid forms of sodium silicates pre-transformed into the gel state with various additives.

For the raw material transformation from the fluid to the thickened pasty state and the subsequent granulation, it is possible to add not only the hydrophobic agent, but also the acidic components to it. Thus, in [12], the option of adding boric acid is suggested. In [13], it is suggested to increase the content of acid oxides in the composition due to adding not only mineral acid, but dispersed acid oxides as well, preferably SiO_2 and Al_2O_3 , due to adding burnt clay: naturally burnt clay (which constituents content is close to that of the TPP fly ash); in [14] – fly ash of thermal power plants is directly suggested.

Modification of additives to soluble glass is also proposed in the study [15]. In the invention described, soluble glass is mixed with portland cement and sodium hexafluorosilicate. The resulting mass is poured into the forms and undergoes heat treatment in the furnace, where the raw mass is additionally blown up and acquires the necessary properties.

Currently, the two technologies for thermal insulating materials manufacturing of rare-glass compositions are suggested. The main difference between them is the method of the starting rare-glass composition preparation. These are process flow diagrams with the use of liquid [16] and mechanical granulation. The both technologies are two-staged and include stages of the prepared rare-glass composition granulation and the subsequent granules heating in a closed form at the temperatures within 400-450°C.

With the use of technologies for liquid granulation of composite systems, there arise difficulties connected with the large fillers granulation, which are difficult to pass through the bushing openings; with maintaining the necessary concentration of Al, Ca, Mg chlorides solutions and their mixtures in the operation cycle and with the worked-out brine utilization.

The indicated problems do not occur while using mechanical granulation, it is possible to use standard equipment. At the moment, the processing technical procedure, which includes mechanical granulation, is the most processable, promising and used in our suggested developments.

An interesting technical solution of the set assignment is the suggested variant of using the starting raw materials mix and the technology used in the production of alkaline-silicate insulation material:

“aerated glass” TOV “Stroyevolutsia” [17]. Under its regulations, heat treatment of the soluble glass mixture, a creaming agent (slightly hydrated sodium silicate) and hydrophobe agents are provided. The process of obtaining a granulated “aerated glass” includes homogenizing by mixing the components of the above starting mixture and subsequent heat treatment at 110-115°C. In the course of the transformation, the mass viscosity is significantly growing and the initial liquid system is transformed into a plastic-solid mass. Cooled to the room temperature, the product is completely solidified and acquires fragility, necessary for the subsequent crushing into pieces. After crushing, it is fractionated and “beads” are obtained. The air-entrainment to such “beads” is performed in a boiling layer or in a drum oven at 350-600°C.

The use of such a procedure causes a number of technological problems connected with rheological and environmental difficulties of introducing in this way hydrophobe agents into the composite system, with the possibility to reproduce the dimensions and regularity of pores, the granules macrostructure strength in general and the reduction of internal tension in the products.

Identification of previously unsettled parts of the general problem.

Analysis of the existing suggested raw mixtures formulations and methods of obtaining thermal insulating materials proves that introducing a significant gel formers amount has a serious drawback: the gelling agent breaks the soluble glass structure to form hydrosilicic acid gel, which is capable of retaining less water than soluble glass. This adversely affects the porosity of the resulting rare glass compositions. Therefore, there is a need to introduce such substances that are inert to soluble glass at the normal temperature.

In addition, a significant drawback of the known methods is performing air-entrainment at fixed temperatures in the furnace within the range of 300 – 700°C. Such a mode of heat treatment reveals several contradictory trends.

At relatively low temperatures, the air-entrainment process is complicated due to the low warming-up rate of the raw mass internal areas, resulting in the increased duration of its air-entrainment process.

At the same time, the slow warming up of rare-glass mixtures also leads to significant losses of chemically bound water, due to which air-entrainment of the mixtures occurs. The high rate and unevenness of their heating is manifested in the size, regularity of the pores and the strength of the entire porous structure,

in the internal tensions of the products. Therefore, an important prerequisite for obtaining the expanded material possessing a set of required properties and their reproduction, is compliance with the principle of correspondence between the rate of crystallization and chemically bound water isolation and the rate of new solid silicate structures formation.

In all of the above-described methods, the first stage is to obtain a solid or plastic composition from soluble glass which can then be subjected to heat treatment. At the same time it is not necessary to use different additives that cause coagulation of silicates. It is possible to obtain a plastic composition using soluble glass simply by means of adding an inert disperse component.

3. STATEMENT OF ASSIGNMENT AND METHODS OF ITS SOLVING

The study performed is aimed at the search and development of an optimized raw material mixture variant of the silicon oxide containing technogenic component: fly ash of thermal power plants and methods of obtaining the fly ash based porous alkaline-silicate composite thermal insulating materials of extended application, differing from the analogues by their composition, the content of the starting raw mass, the sequence and modes of the target product formation, the applied technological equipment.

4. STUDY RESULTS AND THEIR DISCUSSION

In the present project, the set task of making the targeted porous thermal insulating material is achieved by means of the raw mass hot foaming technology, which procedure includes the four main stages:

- 1) preparation of the starting raw mixture components and homogenization of the latter;
- 2) the composite system “gaging” by soluble glass and formation of a persistent gel; fragmentation of the hardened raw mass and placement of the granulate into lined dismountable molds;
- 3) heating and transferring of the workpieces’ substance into the pyroplastic state (110-115°C);
- 4) further hot foaming and reproduction of the regular porous macrostructure of composite systems (130-220°C) and formation of the targeted processed product’s properties (500-550°C).

The blowing agent in this case is water (mainly silanol or molecular, strongly bound by hydrogen bonds with unbridged oxygen atoms), which is released during heat treatment of composite systems.

In the raw mixture, the industrial soluble glass, thermal power plants fly ash of the mixed chemical

composition (see Table 1), sticky portland cement and, additionally, a thickener (pre-staged partially dehydrated hardened “dry glass”) are used.

Table 1. Chemical composition of the thermal power plants fly ash, mass %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Mn ₂ O ₄	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅
51.68	16.75	14.47	0.88	4.38	0.35	2.58	0.04	0.86	4.24	0.49

In the prepared samples, the fly ash provides good reinforcing properties, high thermal stability, sufficient resistance to aggressive media, has a small bulk density.

At the same time, the results of the authors' studies [18, 19] (on the ability of alkaline-silicate systems with Al₂O₃ in alkaline media to form insoluble products of Na₂O·Al₂O₃·2SiO₂·nH₂O) permit to consider aluminum oxide contained in ash to be a modifying component that provides the raw mix with the properties necessary for the targeted product formation.

In forming the raw mix, the results were taken into account on improving the water resistance of alkali silicate composition by means of replacing the two-calcium silicate (belit) hydrophobe components with the sticky Portland cement; the results are presented in [20].

The “setting” rate control of the suggested raw mix during the formation of hydrosilicic acid xerogel (depending on the executed tasks purposes) was performed by means of varying properties of the thickener used and by means of regulating the hardened processed mass fragmentation in the further processes and its subsequent hot foaming.

The raw mix prepared according to the optimized formulation, in contrast to the previously considered analogues, starts hardening at the usual temperature from the moment of its “gaging” with soluble glass and forms a plastic cake with the properties necessary for further fragmentation.

The suggested raw mix also permits to overcome the difficulties associated with drying of viscous rare-glass mix to remove a large output amount of water (56-62%) to the water content of 33-38% needed to obtain a rigid hydrogel capable of thermal blowing.

The optimized formulation of the raw mix allows processing of the compositions in various ways, with the formation of thermal insulating materials of extended application. An important prerequisite for their reproduction with the necessary properties system is strict compliance with the regulatory requirements established by the previous empirical studies.

In parallel with the formulation development, the technology of samples manufacturing was being tried.

Thereat, the decisive factor, in contrast to the regulations [17], the exclusion of the raw mix granulation stage after heat treatment 110-115°C and the use of sealed closed forms at their temperature annealing.

The suggested hot air entrainment of the silicate compositions structure “blowing” of the systems in a xerogel form passes quickly, avoiding the viscous-adhesive state. The determining factor in the process of the systems thermal activation was the technical performing of their heating reproduced rate [see 21].

The conscious choice of its optimal mode is motivated by empirical data to determine the thermal foaming features of composite systems obtained by the method of differential-thermal analysis (DTA) presented in Figure 1.

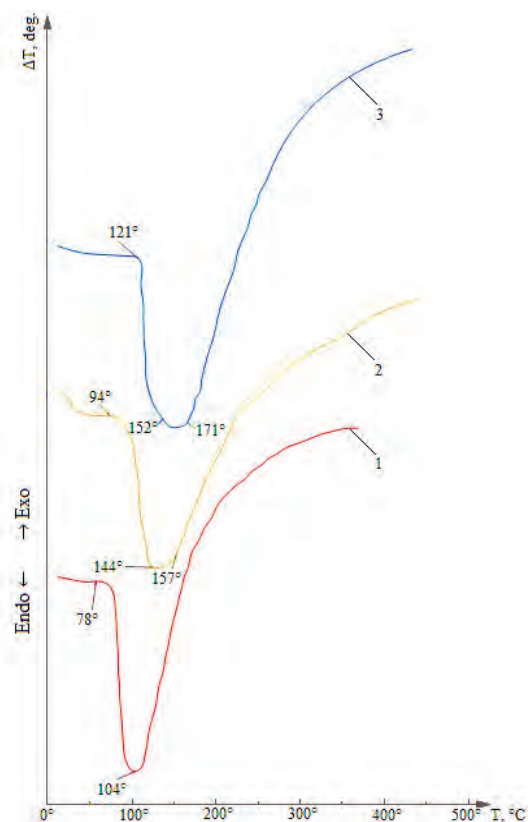


Fig. 1. DTA thermograms of sodium rare-glass composites xerogels in coordinates $\Delta T - T$, recorded at heating the samples in adequate conditions at different rates: curve 1-4 deg./min.; curve 2-7 deg./min.; curve 3-20 deg./min.

The air entrainment process includes three main stages, the duration and nature of which depend on the type and amount of water containing the raw mix:

- within the range of 100-110°C, the hardened composite system partially transforms into the pseudopyroplastic state and begins to deform with increasing volume;

- within the range of 130-147°C, an intensive release of free and adsorbed water and intensive air entrainment of the sample mass occurs;
- at the temperature values above 147°C, the removal of constitutional moisture, the completion of restructuring, physical and chemical transformations of composite systems are observed.

Based on the analysis of the thermographic data and the macrostructure of the samples obtained, it can be concluded that the greatest contribution to the formation of the product's structure with maximum homogeneity is made by the constitutional water, while removal of the excess adsorption moisture at the initial stages leads to the formation of large through pores and capillary channels in the raw mass. Therefore, the initial rare-glass composition should contain a minimum amount of free and adsorbed water.

As the efficient ways to reduce the free water's effects, the following ones can be recommended:

- direct thermal dehydration and transformation of soluble glass into xerogel (the basis of the present variant of the suggested technical solution);
- liquid granulation of composite systems (for example, in Al, Ca, Zn, Mg chlorides solutions or their mixtures);
- introducing of mineral fillers or chemical additives into the rare-glass composite system, which leads to the development of gelation processes.

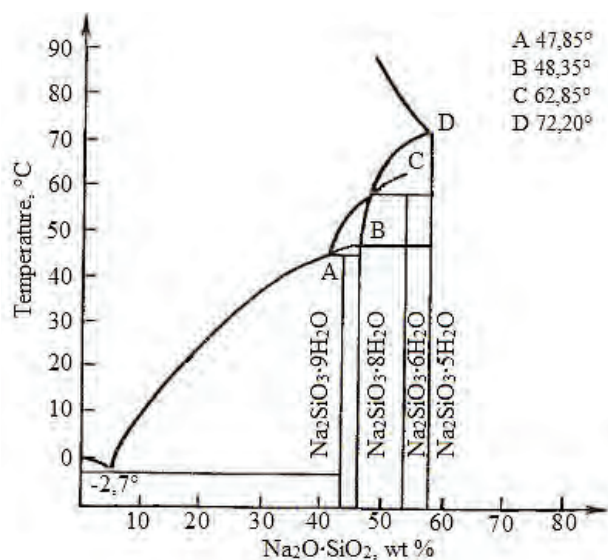


Fig. 2. Solubility in the $\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ system

According to the results of the study [22], alkaline-silicate compositions in solutions at heating form a number of hydrated associates with differing properties (see Fig. 2). This permits modifying the properties of the raw mix thickener – grated “dry glass”

– by means of the partial unwatering of the purchased product in a liquid state at different temperature values, in the conditions of the technological cycle for the target product formation, simultaneously with the same equipment, without the use of additional equipment. Meanwhile, the empirically determined physicochemical behavior of composite silicate systems, the features of unwatering and the viscosity state passing, strong adhesion of the intermediate transformation products to metals, ceramics, glass allow to suggest technological regulations, stages, sequence of operations during processing, development and selection of the equipment materials, variations in the methods of obtaining and using porous targeted composites.

Laboratory practice proves that the excess amount of the soluble glass introduced in a liquid state during the “gaging”, on the one hand improves the rheological properties, the plasticity of the treated raw mix, and on the other hand, during the subsequent heat treatment, causes additional viscosity of the system, deteriorates the heat transfer conditions, requires more prolonged temperature holding at higher temperature values and leads to the increased energy costs. Therefore, a necessity arises to find an efficient way of regulating the rate of gelling, using the method of shifting the equilibrium of physical and chemical processes of the disperse systems dehydration by adding less hydrated forms of the dried soluble glass; with the degree of the grated “dry glass” dispersion, with its dosage and regulating the processes of the hardened processed mix fragmentation during the granulate formation and the subsequent hot air entrainment.

The improved formulation of the raw mix preparing allows processing compositions in various ways with the formation of insulating materials of extended application: granular insulating filler (Fig. 3), materials for thermal insulation for the structures complicated in the form (Fig. 4), the plate and film-like types of insulating materials (Fig. 5) This task (depending on the purpose and features of the performed tasks) is solved by the capability of performing the final stages by means of several different ways of the products obtaining.

The use of the two stages procedure of the suggested renovation in the technology of preparing the porous thermal insulating materials determines: 1) the nature and the behavior peculiarities of the rare-glass composite systems components during the heat treatment, their strong adhesion manifestation related to most structural materials; 2) the necessity to

solve the problem of easy workpieces removal from the formation molds; 3) the choice of the method for lining the internal surfaces of dismountable equipment molds; 4) thermophysical and chemical properties of the used lining material.

The features of the suggested project are:

- ease and availability of obtaining components and preparing the raw mix;
- formation of the raw mix directly at its “gaging” with soluble glass under the normal conditions;
- the thermal insulation method is fast;
- the possibility of easy formation and fragmentation of the raw workpieces, their inherent properties makes it possible to spread in time and space separate stages of thermal insulation: the stage of preparation, formation of granulate (possibly, in a specialized site); storage; transportation; technological packing in the working area complying with the increased resistance requirements to the heat transfer (possibly, in the construction site);
- processing of complicated working areas: selection of the raw mix cake thickness, the size and shape

of the starting fragmented elements (depending on the target task and in order to provide more tight packing);

- the versatility of the thermal insulation method (based on the manifestation of significant adhesion ability of alkaline-silicate composite systems in relation to most structural materials: metals, ceramics, glass, wood);
- low shrinkage with the suggested formulation of the raw mix and the method of treatment;
- indifference to most components and stability of the thermal insulation material properties, high thermal and chemical resistance, non-combustibility, ability to withstand significant temperatures; combination of the valuable properties set: low thermal conductivity factor, thermal stability, incombustibility, durability, low cost.

5. CONCLUSIONS

The raw mix of silica-containing technogenic component – fly ash of thermal power plants – and the methods of preparing waterproof porous thermal insulating materials of extended application on

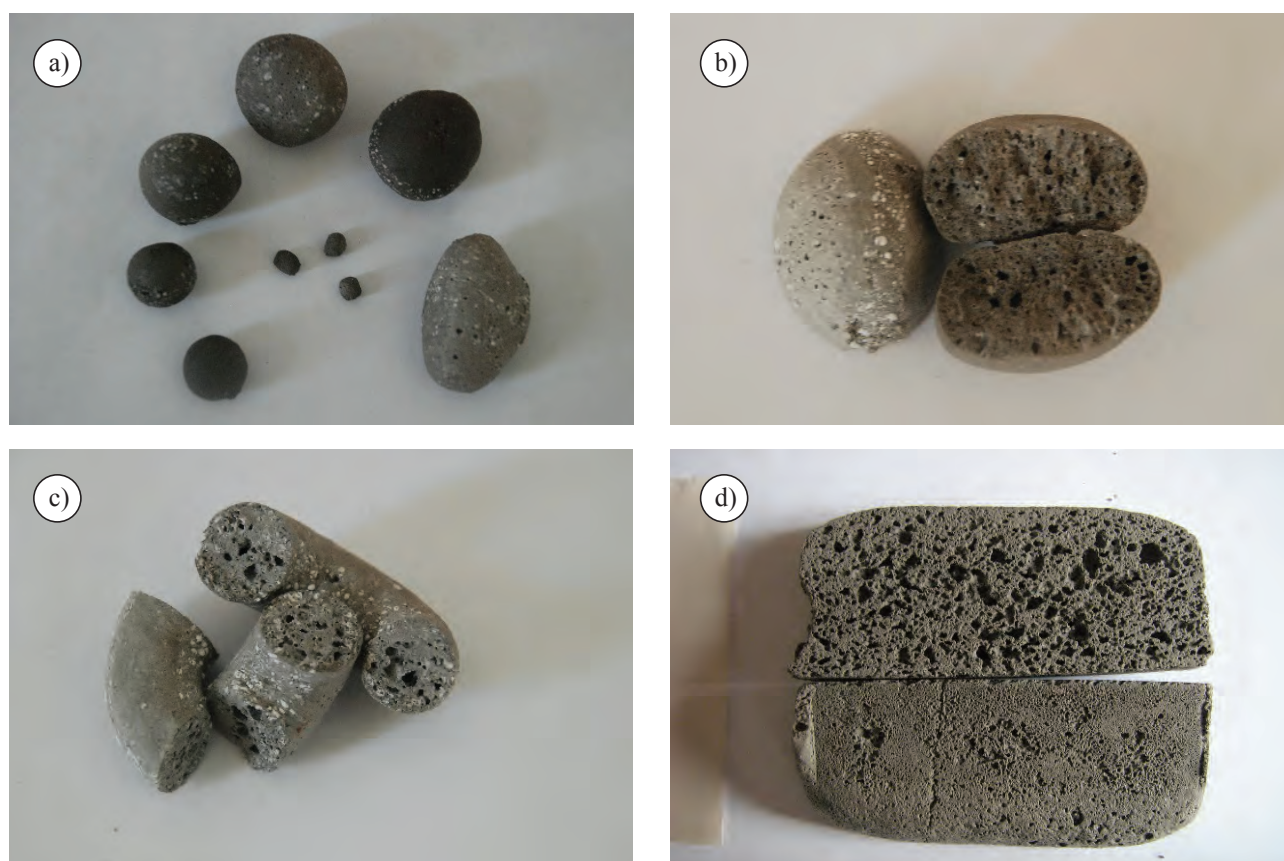


Fig. 3. Illustration of the granular thermal insulating fillers' samples, obtained in the lined molds without limitation of formation volume: a), b) cutting of iso-sized elements; c) cutting elements of plastic hardened raw cake of the set preformed thickness; d) of workpieces, formed in separate dismountable molds



Fig. 4. Illustration of fragments of thermal insulation zones sections in complicated form structures performed by the working zone filling with fragmented elements and the subsequent heat treatment in dismantable equipment of varying complexity: a) without limiting the free volume of formation; b) with restriction of formation space



Fig. 5. Illustration of the items fragments formed: a) in the form of plates; b) in the form of films

its base according to the powder low-temperature technology has been developed using multifunctional properties of soluble glass as: a) a binding component; b) blowing agent; c) the raw mix hardening rate

regulator. The physical and chemical, technological aspects of obtaining and using the suggested alkaline-silicate compositions have been considered.

References

- [1] Pavlenko, A., Koshlak, H. Production of porous material with projected thermophysical characteristics/ Metallurgical and Mining Industry, 2015.-№1ю, p. 123-127.
- [2] Malyavsky N.I. Shchelochno-silikatnyie utepliteli. Svoistva i khimicheskiye osnovy proizvodstva [Alkaline silicate heat insulants. Properties and chemical bases of production] / N.I. Maliavsky // Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal – Russian Chemical Journal (Zh. Ros. khim. ob-va im. D.I. Mendeleeva – Journ. of D.I. Mendeleev Russian Chemical Society)]. – 2003. – V. XLVII. – No. 4, p. 39-45.
- [3] Leonovich S.N. Osobennosti polucheniya Shchelochno-silikatnykh teplozoliatsionnykh materialov [Features of obtaining alkaline-silicate heat-insulating materials] / S.N. Leonovich, G.L. Shchukin, A.L. Belanovich et al. // Nauka i tekhnika [Science and Technology]. – 2012. – No. 6, p. 45-50 (in Byelorussia).
- [4] Figovskiy O.L. Zhydkoye steklo i vodnyie rastvory silikatov kak perspektivnaya osnova tekhnologicheskikh protsessov polucheniya novykh nanokompozitsionnykh materialov [Soluble glass and aqueous solutions of silicates as a promising basis for the technological processes of obtaining new nanocomposite materials] / O.L. Figovskiy, P.G. Kudryavtsev // Elektronnyi nauchnyi zhurnal: Inzhenernyi vestnik Dona. [Electronic scientific journal: Engineering bulletin of Don.] – 2014. – V. 29. – No. 2. – Doc. 2448, p. 55-97.
- [5] Fei SHI, Lijiu WANG, Jingxiao LIU, Miao ZENG. Effect of heat treatment on silica aerogels prepared via ambient drying // J. Mater. Sci. Technol. – 2007. – Vol.23. – No. 3, p. 402-406 (in Chinese).

- [6] Pavlenko, A., Koshlak, H. Design of processes of thermal bloating of silicates Metallurgical and Mining Industry, 2015.-№1, p.118-122.
- [7] A.M Pavlenko, H.V Koshlak, JZ Piotrowski. Determination of heat transfer coefficient in the phase-change heat storage device/ Structure and Environment, 2016.-№4, p. 278-281.
- [8] H.V. Koshlak, A Pavlenko, JZ Piotrowski. The energy parameters of formation of the porous structure/Structure and Environment 8 (3), p. 206-210.
- [9] A. Pavlenko. Dimensions of the nucleus agent pore former closed spherical pores/ A. Pavlenko, H. Koshlak // Aktualne zagadnienia energetyki, budownictwa i inżynierii środowiska.- Koszalin 2016. - pp.75-83.
- [10] Patent of the Russian Federation No. 2161142, IPC (International Patent Classification) C04B 28/24. Sposob polucheniya teploizolatsionno-konstruktsionnogo materiala na osnove vspuchennogo vermikulita [Method of obtaining heat-insulating construction material based on expanded vermiculite]. A.V. Pariy, N.S. Nikonova, E.A. Bazhanov – Claimed on June 6, 2000 – Published on 27.12.2000.
- [11] Patent of the Russian Federation No. 2097362, IPC C04B 38/00. Syryevaya smes dlia polucheniya penosilikatnogo teploizolatsionnogo materiala [Raw mix for obtaining foam-silicate insulation material.] N.F. Artemenko, V.I. Golubev, S.D. Bondar, R.F. Valeyev, S.V. Malofeyev, V.N. Shevelev, M.M. Mubarakshin, G.K. Mardamshin – Claimed on May 17, 1995 – Published on November 27, 1997.
- [12] Patent of the Russian Federation No. 2220927, IPC C04 B 28/26. Syryevaya smes i sposob polucheniya granulirovannogo teploizolatsionnogo materiala [Raw material mix and method of obtaining a granulated heat-insulating material.] T.N. Radina, M.Yu. Ivanov – Claimed on April 19, 2002 – Published on 01.10.2004.
- [13] Patent of the Russian Federation No. 2220928, IPC C04B 28/26. Syryevaya smes i sposob polucheniya granulirovannogo teploizolatsionnogo materiala [Raw material mix and method of obtaining a granulated heat-insulating material.] T.N. Radina, M.Yu. Ivanov – Claimed on April 29, 2002 – Published on 01.10.2004.
- [14] Patent of the Russian Federation No. 2246463, IPC C04B 28/26. Syryevaya smes i sposob polucheniya zernistogo teploizolatsionnogo materiala [Raw material mix and method of obtaining a grain heat-insulating material] / T.N. Radina, A.I. Kudyakov, M.Yu. Ivanov – Claimed on 22.10.2003. – Published on 20.02.2005.
- [15] Patent of the Russian Federation No. 2134668, IPC C04B 28/26. Sposob izgotovleniya poristyykh silikatnykh materialov [Method for manufacturing porous silicate materials.] S.I. Brykov, V.M. Busygin, R.G. Valeyev, L.G. Reisin, K.S. Galimov, F.A. Zakirov, V.I. Korneyev, N.A. Mochalov, I.H. Mukhametov, Yu.A. Poddubnyi, T.D. Tikhonova, A.A. Fedurin – Claimed on May 29, 1998 – Published on 08.20.1999.
- [16] Patent of the Russian Federation No. 2268248 (13), IPC C04B 38/00. Vspenennyi material i sposob yego izgotovleniya [Foam material and the method of its manufacture.] V.A. Lotov, K.A. Rudik – Claimed on July 06, 2004 – Published on January 20, 2006.
- [17] Koshlak H.V. Use of burshtyn tpp ash for the production of expanded gas concrete/ Energy, energy saving and rational nature use. - №2 (5) 2016, p. 87-95.
- [18] Koshlak H. Heat exchange in a confined space / H. Koshlak // Problem of energy saving and nature use 2013. - Budapest, 2014, p. 87-92.
- [19] Ovcharenko G.I., Tseolity v stroitelnykh materialakh [Zeolites in Building Materials] / GI I. Ovcharenko, V.L. Sviridov, L.K. Kazantseva. – Barnaul: AltGTU, 2000, p. 320.
- [20] Maliavsky N.I., Zvereva V.V. Kaltsiy-silikatnyie otverditeli zhidkogo stekla dlia polucheniya vodostoykikh shchelochno-silikatnykh utepliteley [Calcium-silicate liquid glass hardeners for obtaining water-resistant alkaline-silicate insulants] ISSN 1994-0351. Internet-vestnik [Internet-bulletin] of the VolgASU. 2015. Issue 2 (38). www.vestnik.vgasu.ru
- [21] Koshlak H. Temperature state plate in conditions convective heat transfer / A. Pavlenko , H. Koshlak // Collection of scientific articles «Energy, energy saving and rational nature use». - Radom: Kazimierz Pułaski University of technology and Humanities in Radom.- № 1 (4) 2015, p. 108-114.
- [22] Koshlak A. Solution of equations thermal conductivity / A. Koshlak // Collection of scientific articles «Energy, energy saving and rational nature use».- Radom: Kazimierz Pułaski University of technology and Humanities in Radom.- №2 (3).- 2014, p. 38-49.

Acknowledgments:

The work was financed by Kielce University of Technology, part of the statutory work No. 05.0.08.00/2.01.01.01.0019 MNSP.IKFB.14.002

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Świętokrzyską, w ramach pracy statutowej nr: 05.0.08.00/2.01.01.01.0019 MNSP.IKFB.14.002

OVERVIEW OF MODERN ANAEROBIC WASTEWATER TREATMENT METHODS

PRZEGLĄD NOWOCZESNYCH METOD BEZTLENOWEGO OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW

DOI: 10.30540/sae-2018-026

Abstract

The paper presents an overview of modern anaerobic wastewater treatment technologies. Characterised reactors for anaerobic wastewater treatment include UASB, ABR, AMBR, ASBR, AnMBR and EGSB reactors. Comparison with aerobic methods shows that use of anaerobic reactors allows for at least three times reduction of the amount sludge. Analysing the disadvantages and advantages of anaerobic wastewater treatment reactors, it can be concluded that their use is beneficial in wastewater treatment plants with problems of high COD concentrations in incoming wastewater and problems of the amount of sewage sludge produced.

Keywords: Wastewater treatment, modern wastewater treatment methods, anaerobic reactors, ABR, UASB, AMBR, ASBR, AnMBR, EGSB.

Streszczenie

W artykule przedstawiono przegląd nowoczesnych metod beztlenowego oczyszczania ścieków. Scharakteryzowano reaktory UASB, ABR, AMBR, ASBR, AnMBR i EGSB. Następnie porównano z metodami tlenowymi, co pokazało, że zastosowanie reaktorów beztlenowych pozwala na co najmniej trzykrotne zmniejszenie ilości osadu. Analizując wady i zalety beztlenowych reaktorów do oczyszczania ścieków, można stwierdzić, że ich zastosowanie jest korzystne w oczyszczalniach ścieków, w których występują problemy z wysokimi stężeniami ChZT w ściekach napływających oraz problemy z ilością wytwarzanego osadu ściekowego.

Słowa kluczowe: oczyszczanie ścieków, nowoczesne metody oczyszczania ścieków, reaktory beztlenowe, ABR, UASB, AMBR, ASBR, AnMBR, EGSB

1. INTRODUCTION

Increase in requirements for the quality of treated and discharged sewage from wastewater treatment plants, has made it necessary to search for modern wastewater treatment technologies that increase both technological and economic efficiency.

One of the most significant changes in the process of anaerobic wastewater treatment is the application of the UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) already at the end of the 1970s in the Netherlands by Letting and his coworkers [1]. The principal types of anaerobic sludge blanket processes include the original UASB process, as well as modifications to the original solution, the anaerobic baffled reactor (ABR) and anaerobic migrating blanket reactor (AMBR). The ABR process was developed by McCarty and

1. WPROWADZENIE

Wzrost wymagań wobec jakości ścieków oczyszczonych odprowadzanych z oczyszczalni, spowodował konieczność poszukiwania nowoczesnych technologii oczyszczania ścieków, zwiększających ich efektywność pod względem zarówno technologicznym, jak i ekonomicznym.

Jedną z najbardziej znaczących zmian w procesach beztlenowego oczyszczania ścieków jest zastosowanie już pod koniec lat siedemdziesiątych w Holandii przez Lettinga i jego współpracowników reaktora beztlenowego UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) [1]. Główne rodzaje beztlenowego procesu powstawania kożucha osadowego zawierają oryginalną wersję procesu UASB oraz modyfikacje pierwotnego rozwiązania pod nazwą: beztlenowy przegrodzony reaktor ABR

coworkers at Stanford University in the early 1980s [1]. Treatment of wastewater in anaerobic reactors exploit the process of methanogenesis, that is methane fermentation. Methanogenic processes are used for the treatment of industrial organic waste water, sewage sludge, sewage containing phenol compounds and petroleum-based compounds. Methanogenic bacteria belonging to the *Archebacteria* group participate in the methane fermentation process. These bacteria are mostly anaerobic thermophilic organisms of varied morphology [2].

In biological-anaerobic reactors, the resulting sediment is in the form of pellets and the microorganisms forming it merge to form specific aggregates as shown in Figure 1.

Wastewater flowing through the reactor is in contact with granules of activated sludge, biodegradable with the release of methane containing gas.

The main advantages of such reactors are that they can be used:

- no necessity to aerate sewage,
- only 2% to 6% of the removed COD is converted into excess sludge,
- biogas is obtained from 200 dm³ to 1000 dm³ per kg of dry weight of waste,
- half of organic matter is decomposed.



The combination of aerobic and anaerobic systems makes it possible to achieve such good pollutant degradation effects that the treated wastewater is re-used in production processes.

2. UASB REACTORS

In UASB (Upflow Anaerobic Sludge Bed) reactors, the effluent is fed to the lower reactor section, and then it flows into the upper section of the reactor. The most important elements of the UASB reactors are sewage inlet and outflow systems and special designs for the reception of biogas called bells [4].

(Anaerobic Baffled Reactor) oraz reaktor beztlenowy z migracją kożucha AMBR (Anaerobic Migrating Blanket Reactor). Reaktor ABR został wprowadzony przez McCarty'ego i współpracowników na Uniwersytecie Stanford w połowie lat osiemdziesiątych [1]. Oczyszczanie ścieków w beztlenowych reaktorach wykorzystuje proces metanogenezy, czyli fermentacji metanowej. Procesy metanogenezy są wykorzystywane przy oczyszczaniu ścieków organicznych przemysłowych, osadów ściekowych, ścieków zawierających związki fenolu i związki ropopochodne. W procesie fermentacji metanowej udział biorą bakterie metanogenne należące do grupy *Archebacteria*. Bakterie te są w większości organizmami termofilnymi, beztlenowcami o zróżnicowanej morfologii [2].

W reaktorach biologiczno-beztlenowych powstający osad ma formę granuli, a tworzące go mikroorganizmy, scalając się, tworzą specyficzne agregaty przedstawione na rysunku 1.

Ścieki przepływając przez reaktor są w kontakcie z granulami osadu czynnego, ulegając biodegradacji z wydzieleniem gazu zawierającego metan.

Główne zalety wykorzystania takich reaktorów to:

- brak konieczności napowietrzania ścieków,
- jedynie od 2% do 6% usuwanego ChZT przekształca się w osad nadmierny,
- uzyskuje się od 200 dm³ do 1000 dm³ biogazu na 1 kg suchej masy odpadów,
- połowa substancji organicznych ulega rozkładowi.

Fig. 1. Anaerobic activated sludge in the form of pellets [3]
 Rys. 1. Beztlenowy osad czynny w formie granulat [3]

Połączenie systemów tlenowych i beztlenowych umożliwia uzyskanie tak dobrych efektów degradacji zanieczyszczeń, że oczyszczone ścieki są ponownie wykorzystywane w procesach produkcyjnych.

2. REAKTORY UASB

W reaktorach typu UASB (Upflow Anaerobic Sludge Bed) ścieki doprowadzane są do dolnej części reaktora, następnie przepływają w górną jego część. Najważniejszymi elementami reaktorów UASB są instalacje dopływu i odpływu ścieków oraz specjalne konstrukcje do odbioru biogazu, nazywane dzwo-

Modifications to the UASB reactors can be applied by adding an additional sedimentation tank with reversal of sedimentation or internal closure for increased growth above the activated sludge level. Both modifications are intended to ensure a more effective removal of particulate matter or to change the characterisation and density of the activated sludge [5]. A characteristic process in UASB reactors is the development of dense granulated sludge, which allows the application of high COD loads in comparison to other anaerobic processes.

Due to the formation of flocculant sludge, the solids concentration ranges between 50 and 100 g/dm³ at the reactor bottom and 5 to 40 g/dm³ in the more diffuse zone at the top of UASB reactor. Granulated sludge particles have a size range of 1.0 to 3.0 mm [5]. The development of flocculation depends on the characteristics of the wastewater. Granulation is very effective for wastewater with high content of carbohydrates or sugars, while it is worse for wastewater with high content of protein, which results in more fluffy structure of flocs [6]. Other factors influencing the development of flocculants are pH, flow velocity and nutrients. The pH should be maintained near 7.0, and a recommended COD:N:P ratio during startup should be 300:5:1 and 600:5:1 during further use [7].

The resulting anaerobic sludge has a specific composition of biocenosis. Acidogenic bacteria formed on the outer part of the flocs, homoocetic bacteria binding hydrogen with carbon dioxide and forming acetates and bacteria reducing sulphates. Methane bacteria *Methanosarcina* are also found in this layer, using different substrates in the methane fermentation process. Homoocetic bacteria and methane bacteria formed under the outer layer, using hydrogen and carbon dioxide in biochemical processes. Methane bacteria multiply in the central part of the sludge, using acetates as a substrate for biochemical changes. These are mainly *Methanosaeta* bacteria [8].

Such a structure of flocculants makes it possible that organic odorous gases are not emitted from the UASB reactors, but the presence of hydrogen sulphide is always found in biogas. Therefore, structural elements above the sewage surface must be made of materials resistant to biochemical corrosion by aerobic sulphuric bacteria [9].

Table 1 provides guidance for the design of anaerobic UASB reactors operating under psychrophilic conditions.

nami [4]. Można zastosować modyfikacje reaktorów UASB poprzez włączenie dodatkowego zbiornika sedymentacji z zawracaniem osadu lub zamknięcie wewnętrzne dla zwiększonego wzrostu powyżej poziomu osadu czynnego. Obie modyfikacje mają na celu zapewnienie skuteczniejszego usuwania cząstek stałych lub zmianę charakterystyki osadu czynnego i jego gęstości [5]. Charakterystycznym procesem w reaktorach UASB jest rozwój gęstego osadu granulowanego, co pozwala na zastosowanie wysokich obciążeń ładunkiem ChZT w stosunku do innych procesów beztlenowych.

Poprzez powstawanie kłaczkowego osadu stężenie cząstek stałych waha się między 50 a 100 g/dm³ w dnie reaktora oraz między 5 a 40 g/dm³ w strefach większego rozproszenia górnej części reaktora. Granulowane cząstki osadu wahają się w swoich rozmiarach od 1,0 do 3,0 mm [5]. Rozwój kłaczków zależy od charakterystyki ścieków. Granulacja jest bardzo skuteczna dla ścieków z dużą zawartością węglowodanów lub cukrów, natomiast gorzej wypada przy ściekach z wysoką zawartością białka, co prowadzi do powstawania bardziej puszystej budowy kłaczków [6]. Innymi czynnikami wpływającymi na rozwój kłaczków są: pH, prędkość przepływu oraz dodatek składników odżywczych. Rekomendowany odczyn powinien być utrzymany w okolicach pH równego 7. Stosunek ChZT:N:P w fazie uruchomienia powinien wynosić 300:5:1, natomiast podczas dalszego użytkowania 600:5:1 [7].

Powstający osad beztlenowy ma specyficzny skład biocenozy. Na zewnętrznej części kłaczków rozwijają się bakterie kwasogenne, bakterie homooctanowe wiążące wodór z dwutlenkiem węgla i tworzące octany oraz bakterie redukujące siarczany. W warstwie tej znajdują się także bakterie metanowe *Methanosarcina*, wykorzystujące różne substraty w procesie fermentacji metanowej. Pod zewnętrzną warstwą rozwijają się bakterie homooctanowe oraz bakterie metanowe wykorzystujące w procesach biochemicznych wodór i dwutlenek węgla. W centralnej części osadu namnażają się bakterie metanowe, wykorzystujące octany jako substrat przemian biochemicznych. Są to głównie bakterie *Methanosaeta* [8].

Taka budowa struktury kłaczków powoduje, że nie wydzielają się z reaktorów UASB organiczne gazy odorowe, ale w biogazie zawsze stwierdza się obecność siarkowodoru. Z tego względu elementy konstrukcyjne, znajdujące się powyżej powierzchni ścieków, muszą być wykonane z materiałów odpornych na korozję biochemiczną wywołaną przez tlenowe bakterie siarkowe [9].

Table 1 Table of UASB wastewater treatment plants operation parameters, own elaboration based on [5]

Tabela 1. Tabela dotycząca parametrów użytkowania reaktorów UASB na oczyszczalni, opracowanie własne na podstawie [5]

Process parameter or design recommendation	Unit	Value
Outdoor air temperature	°C	above 18
Sludge temperature	°C	12 ÷ 25
Volatile suspensions in biodegradable sediments	%	50
Biomass growth factor of methane bacteria	g dm/g removal COD	0.06 ÷ 0.08
Minimum sludge retention time	days	32 ÷ 38
Sludge concentration in reactor	kg/m ³	65 ÷ 70
Wastewater flow velocity in the clarification zone with a medium input to the reactor	m/h	0.52 ÷ 0.58
Maximum sediment height in relation to the total height of the gas collector bell	%	80 ÷ 85
Duration of wastewater stay in reactor	h	8 ÷ 12
Maximum flow velocity of sewage flow holes	m/h	5
Volume load of the UASB reactor with organic compounds	kg COD/m ³ d	1.15 ÷ 1.25
Bell width for gas extraction	m	0.44 ÷ 0.50
Part of sedimentation area in total reactor area	%	75
Angle of inclination of the biogas collection bell	°	50
Angle of inclination of the partitions limiting the discharge of sludge by sewage	°	45
Height of overlapping partitions limiting the discharge of sewage sludge in relation to the walls of the bell for receiving biogas	m	0.15 ÷ 0.20
Surface of sewage entry openings into the sludge zone	m ²	0.25
Distance between biogas bells	m	3.0 ÷ 4.0
Flow velocity in pipes	m/s	1,0
Suspensions removal	%	75 ÷ 80
COD removal	%	75 ÷ 80
BOD removal	%	65 ÷ 70
Methane content of biogas	%	60 ÷ 65

3. ABR REACTORS

The construction scheme of the ABR reactor is shown in Figure 2. The reactor is equipped with partitions to force the direction of sewage flow through a series of chambers. The inlet sewage to the reactor septum is directed vertically downwards, and then on the outlet upwards. The sludge in the reactor floats and sinks, flowing between the chambers producing biogas [10]. The sewage flow is carried out at low speed, which causes the time of sewage contact with the granules of the activated sludge, leading to improved treatment processes. Different types of modifications to the ABR reactor improve efficiency on a case-by-case basis. ABR reactors are characterized by simple construction, easy to operate and high resistance to hydraulic loads. The sectional construction allows for separation of wastewater retention time with hydraulic retention time, which results in anaerobic wastewater treatment in short

W tabeli 1 przedstawiono wytyczne do projektowania beztlenowych reaktorów UASB pracujących w warunkach psychrofilnych.

3. REAKTORY ABR

Schemat budowy reaktora ABR został przedstawiony na rysunku 2. Reaktor został wyposażony w przegrody w celu wymuszenia kierunku przepływu ścieków przez serię komór. Ścieki na dopływie do przegrody reaktora kierowane są pionowo w dół, a następnie na odpływie do góry.

Osad w reaktorze unosi się i opada, przepływając między komorami, produkując biogaz [10]. Przepływ ścieków odbywa się z małą prędkością co powoduje wydłużenie czasu kontaktu ścieków z granulami osadu czynnego, prowadząc do poprawy procesów oczyszczania. Różne rodzaje modyfikacji reaktora ABR poprawiają wydajność w zależności od konkretnego przypadku. Reaktory

time units, usually several hours [11]. ABR reactors are suitable for a wide range of urban wastewater as well as industrial wastewater, but their efficiency decreases with an increase in organic content.

Table 2 shows the reductions in COD of effluent entering the reactor according to its origin. Therefore, ABR reactors are particularly suitable for wastewater with a high percentage of solids that do not drop down and a narrow BOD-COD ratio. These reactors are usually used in local wastewater treatment plants, in combination with other treatment processes [12].

ABR charakteryzują się prostą budową, łatwością w obsłudze, a także dużą odpornością na obciążenia hydrauliczne. Przegrodowa konstrukcja pozwala na zróżnicowanie czasu zatrzymania ścieków z czasem retencji hydraulicznej, dzięki czemu oczyszczanie ścieków w warunkach beztlenowych odbywa się w czasie zaledwie kilku godzin [11]. Reaktory ABR są odpowiednie dla szerokiego zakresu ścieków komunalnych, jak również ścieków przemysłowych, jednakże ich efektywność spada wraz ze wzrostem zawartości substancji organicznych. W tabeli 2 przedstawiono redukcje ChZT ścieków dopływających do reaktora w zależności od ich pochodzenia. W związku z tym reaktory ABR są szczególnie odpowiednie dla ścieków z wysokim procentem zawartości nieopa-

Table 2. Table showing the type of effluent entering the ABR reactor and the COD reductions. Own adaptation based on [1]
Tabela 2. Tabela przedstawiająca rodzaj ścieków dopływających do reaktora ABR oraz redukcje ChZT. Własna adaptacja na podstawie [1]

Wastewater	Temperature [°C]	Number of chambers	Influent COD [gCOD/m ³]	COD loading [kg COD/ d]	% COD removal
Malasses	35	3	115 ÷ 900	4.3 ÷ 28	49 ÷ 88
Swine manure	35	3	58.5	4	62 ÷ 69
Municipal wastewater	18 ÷ 28	3	0.26 ÷ 0.55	2.2	90
Slaughterhouse	25 ÷ 30	4	0.45 ÷ 0.55	0.9-4.7	75 ÷ 90
Pharmaceutical	35	5	20	20	36 ÷ 68
Industrial	15	8	0.31	0.9	70

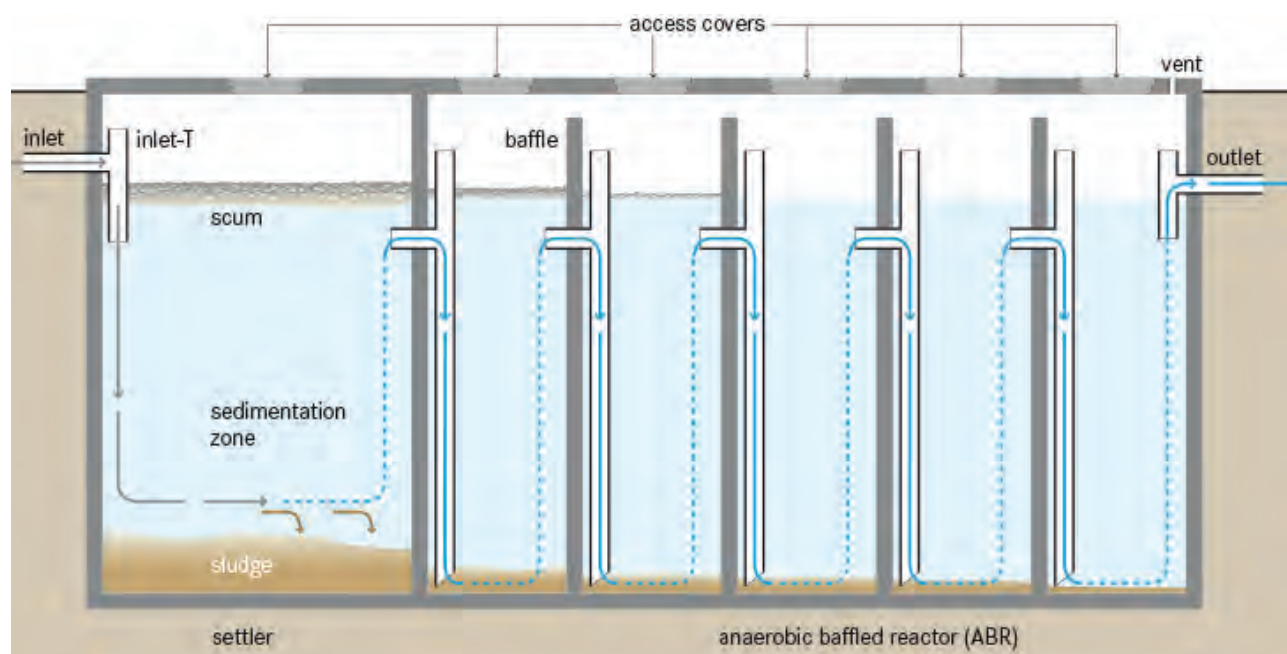
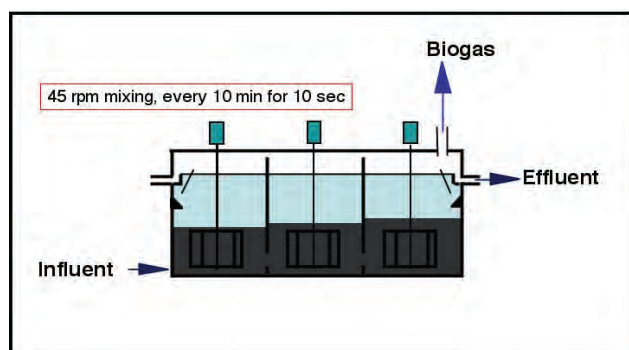


Fig. 2. Schematic of ABR reactor operation [13]

Rys. 2. Schemat działania reaktora ABR [13]

4. AMBR REACTORS

The principle of AMBR (Anaerobic Migrating Blanket Reactor) operation is similar to that of ABR reactors with adding mechanical mixing in each chamber to maintain the sludge in continuous operation. The feeder sewage flow point is periodically changed with the outlet point, which is the original inlet point. In this way, the active sludge blanket in an anaerobic reactor remains more homogeneous. The direction of sewage flow is reversed when a significant amount of solids has settled in the last chamber [14]. The principle of operation of the AMBR is shown in Figure 3.



dających zawiesin stałych oraz wąskim stosunkiem BZT do ChZT. Reaktory te są zwykle stosowane w lokalnych oczyszczalniach ścieków w połączeniu z innymi procesami oczyszczania [12].

4. REAKTORY AMBR

Zasada działania reaktora AMBR (Anaerobic Migrating Blanket Reactor) jest podobna jak przy reaktorach ABR z dodatkiem mechanicznego mieszania w każdej komorze w celu utrzymania osadu w ciągłym ruchu. Punkt dopływu ścieków zasilających jest okresowo zmieniany z punktem odpływu, ten natomiast zajmuje pierwotne miejsce dopływu. W ten sposób warstwa kożucha osadu czynnego w reaktorze beztlenowym pozostaje bardziej jednorodna. Kierunek przepływu ścieków zostaje odwrócony gdy znaczna ilość ciał stałych osadziła się w ostatniej komorze [14]. Zasadę działania reaktora AMBR przedstawiono na rysunku 3.

Fig. 3. Schematic of the three-chamber AMBR reactor [15]

Rys. 3. Schemat trzykomorowego reaktora AMBR [15]

5. ASBR REACTORS

The ASBR is a modern high performance anaerobic reactor. Its development is attributed to research in the early 1960s by the Dague (1967). In his research Dague studied the influence of biofloculation on sludge and its deposition under anaerobic conditions. The reactors used in the study were operated in batch mode with separation of solids. Studies have shown that the batch process was capable of separating the sludge retention time from hydraulic retention time. The process is called „anaerobic active sludge” [3]. Recent research at the Iowa State University has expanded Dague’s previous studies on the development of a modern, high performance anaerobic anaerobic process, which has been named ASBR (Anaerobic Sequencing Batch Reactor) [ASBR – US patent No. 5,185,079]. The ASBR process consists of four sequential steps: growth, reaction, settle phase, decant phase, as shown in Figure 4; during the growth phase, the substrate is added to a reactor where continuous mixing takes place in the reactor. The substrate concentration and metabolic factors increase to their maximum value during the

5. REAKTORY ASBR

Reaktor ASBR jest nowoczesnym wysoko wydajnym reaktorem beztlenowym. Jego rozwój przypisywany jest do badań na początku lat sześćdziesiątych przez Dague (1967). W swoich badaniach Dague zajmował się wpływem bioflokulacji na osad i jego osadzanie w warunkach beztlenowych. Reaktory użyte w badaniach były eksploatowane w trybie wsadowym z separacją ciał stałych. Badania wykazały, że proces wsadowy był zdolny do oddzielenia czasu retencji osadu od czasu zatrzymania. Proces nazwano „bztlenowym osadem czynnym” [3]. Niedawne badania na Iowa State University rozszerzyły wcześniejsze studia Dague na temat opracowania nowoczesnego, wysoko wydajnego procesu beztlenowego, który nazwano reaktorem ASBR (Anaerobic Sequencing Batch Reactor) [Reaktor ASBR – patent USA nr 5,185,079]. Proces działania reaktora ASBR obejmuje cztery sekwencyjne etapy: wzrostu, reakcji, osadzania i dekantacji, co przedstawia rysunek 4. Podczas etapu wzrostu następuje dodanie substratu do reaktora, podczas którego w reaktorze odbywa się stałe mieszanie. Stężenie substratów i wskaźniki metaboliczne wzrastają

growth phase. The volume of the substrate depends on many factors, including the desired retention time [7], organic load and expected sediment values. The reaction stage is crucial for the conversion of organic substances into biogas. The time needed to react depends on the required leakage quality and biomass concentration, temperature, substrate properties and loading rate of organic substances. The settle phase requires only mixing, allowing the biomass to settle inside the reactor. The required time for the settle stage depends on biomass concentration, temperature and the type of biomass (floculant or granulate) [16]. Once settle is complete, decanting takes place. The ASBR reactor system has unique characteristics that make it possible to achieve a high level of organic particles removal. One of them is the change in the substrate concentration in the reactor from high concentrations during and immediately after low concentrations at the end of the reaction cycle, just before biomass deposition and wastewater discharge. This causes the nutrient and microbial ratio to be high immediately after growth and low just before deposition, as shown in Figure 5 [17].

do ich maksymalnej wartości w trakcie etapu wzrostu. Objętość substratu zależy od wielu czynników, w tym pożądanego czasu zatrzymania [7], obciążenia organicznego oraz oczekiwanych wartości osadowych. Etap reakcji jest kluczowy w przemianie substancji organicznych do biogazu. Czas potrzebny na reakcję jest zależny od wymaganej jakości wycieku oraz od stężenia biomasy, temperatury, właściwości podłoża oraz współczynnika załadunku substancji organicznych. Etap osadzania wymaga wyłącznie mieszania, umożliwiając osadzenie się biomasy wewnątrz reaktora. Wymagany czas dla etapu osadzania zależy od stężenia biomasy, temperatury oraz od rodzaju biomasy (flokulant lub granulat) [16]. Po zakończeniu osadzania następuje proces dekantacji. System reaktorów ASBR posiada unikalne cechy charakterystyczne, umożliwiające osiągnięcie wysokiego poziomu usuwania substancji organicznych. Jedną z nich jest zmiana stężenia substratu w reaktorze z wysokich stężeń podczas i bezpośrednio po podaniu do niskich stężeń w zakończeniu cyklu reakcji, tuż przed osadzaniem biomasy i odprowadzaniem ścieków. To powoduje, że stosunek pożywki do mikroorganizmów jest wysoki zaraz po wzroście, a niski tuż przed osadzaniem, co przedstawia rysunek 5 [17].

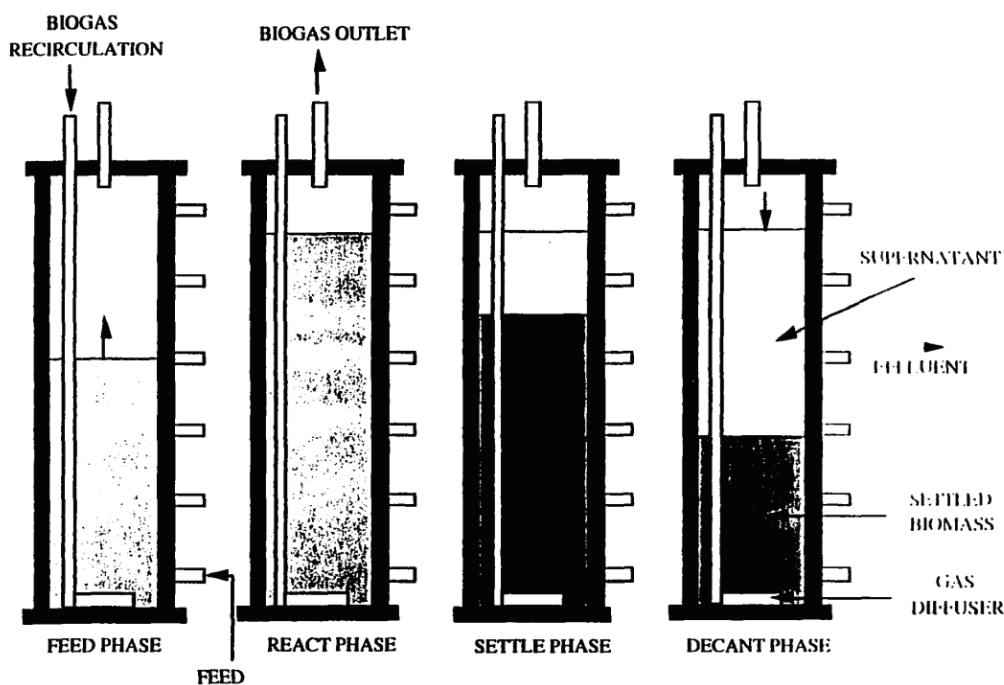


Fig. 4. Schematic of ASBR reactor operation [17]

Rys. 4. Schemat działania reaktorów ASBR [17]

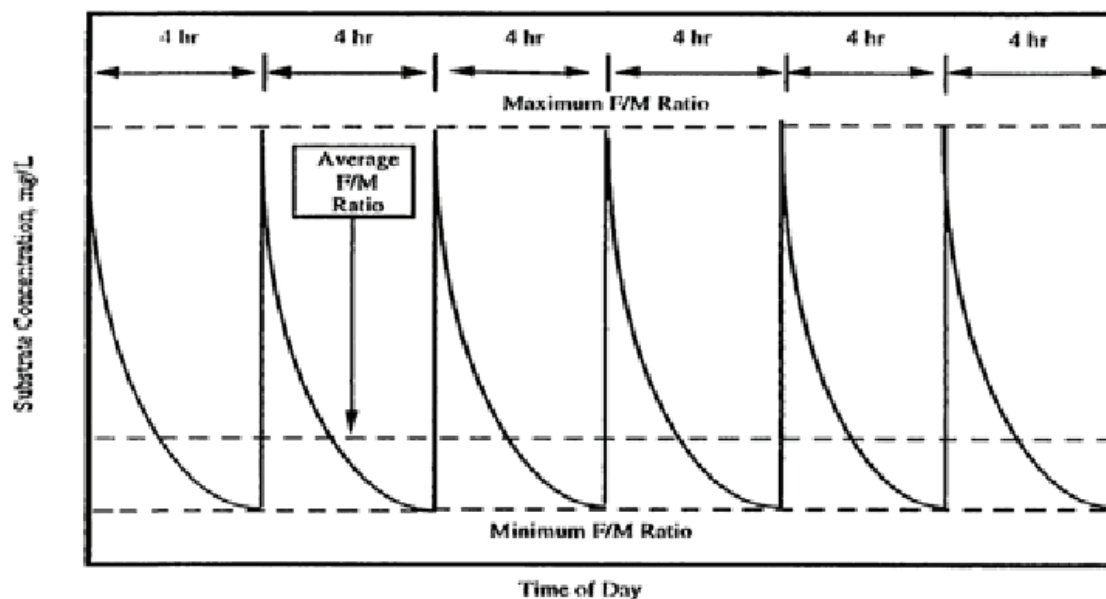


Fig. 5. The ratio of culture medium to micro-organisms after growth phase and before deposition [17]

Rys. 5. Stosunek pożywki do mikroorganizmów po fazie wzrostu i przed fazą osadzania [17]

6. AnMBR REACTORS

One of the most advanced solutions to improve the efficiency of anaerobic wastewater treatment is the use of an anaerobic reactor integrated with the filtration membrane. In this system, during the membrane filtration process, treated sewage can be separated from anaerobic biomass and at the same time biomass can be concentrated in the bioreactor to the desired level [17]. The AnMBR concept was developed in the 1980s, but the use of this technology was limited by concerns about membrane pollution and energy consumption in membrane processes. However, with the success of MBR technology in recent years, membrane filtration has become increasingly common in biological wastewater treatment [18]. These advances have stimulated increased research interest in AnMBR technology. Anaerobic membrane bioreactor is an integrated system of anaerobic bioreactor and low-pressure ultrafiltration or membrane microfiltration. These membranes may retain solid suspensions, including biomass and inert solids [18]. AnMBR technology can achieve complete separation of the sewage retention time from the hydraulic retention time, regardless of sewage quality, biological processes and sediment conditions and properties. As shown in Figure 6, the filtration membrane can be integrated with a bioreactor in three different forms: internal immersion (a), external submersion (b) and cross-flow (c). AnMBR systems have been tested to treat

6. REAKTORY AnMBR

Jedną z bardziej zaawansowanych rozwiązań poprawiających skuteczność beztlenowego oczyszczania ścieków jest użycie beztlenowego reaktora zintegrowanego z membraną filtracyjną. W tym systemie podczas procesu filtracji membranowej można oddzielić oczyszczone ścieki od beztlenowej biomasy, a jednocześnie koncentrować biomasę w bioreaktorze do pożądanego poziomu [17]. Koncepcja AnMBR została opracowana w latach osiemdziesiątych, jednakże stosowanie tej technologii zostało ograniczone przez obawy dotyczące zanieczyszczenia środowiska przez membrany oraz zużycia energii przy procesach membranowych. Jednak wraz z sukcesem technologii MBR, w ostatnich latach zaczęto coraz częściej stosować filtrację membranową przy biologicznym oczyszczaniu ścieków [18]. Te postępy stymulowały zwiększone zainteresowanie badawcze dotyczące technologii AnMBR. Bioreaktor beztlenowy membranowy jest zintegrowanym systemem bioreaktora beztlenowego i ultrafiltracji pod niskim ciśnieniem lub mikrofiltracji membranowej. Membrany te mogą zatrzymywać zawiesiny stałe, w tym biomasę i obojętne ciała stałe [18]. Technologia AnMBR może osiągnąć całkowite oddzielenie czasu retencji cząstek stałych od czasu retencji hydraulicznej, niezależnie od jakości ścieków, procesów biologicznych oraz warunków i właściwości osadów. Jak przedstawiono na rysunku 6, membrana filtracyjna może być zintegrowana z bioreaktorem

a wide range of wastewater. It has been shown with AnMBR that can reach 90% or more of the COD reductions. The load of COD varies from 5 to 30 kg/m³d, hydraulic retention time from 1 to 25 days, methane production from 0.25 to 0.35 m³ CH₄/kg COD, suspended solids from 15 to 30 g/m³. Laboratory cost analysis showed that the cost of using AnMBR can be as much as 1/3 of the costs using oxygen processes [19]. Methane production energy can balance the energy required to treat membrane biogas. The temperature range for effective anaerobic wastewater treatment ranges from 20°C to 30°C, which may make it difficult to treat wastewater during the frostier winter, as it is not possible to heat a large amount of wastewater for economic reasons [20].

wtrzech różnych formach: wewnętrznej zanurzeniowej (a), zewnętrznej zanurzeniowej (b) oraz zewnętrznej z przepływem krzyżowym (c). Systemy AnMBR zostały testowane w celu oczyszczania szerokiego zakresu ścieków. Wykazano że AnMBR mogą osiągnąć wartości 90% lub więcej redukcji ChZT. Obciążenie ładunkiem ChZT waha się od 5 do 30 kg/m³d, czas retencji hydraulicznej od 1 do 25 dni, wytwarzanie metanu od 0,25 do 0,35 m³ CH₄/kg ChZT, cząstki stałe zawieszone od 15 do 30 g/m³. Analiza kosztów przeprowadzona laboratoryjnie wykazała, że koszt użytkowania AnMBR może wynosić nawet 1/3 kosztów przy użyciu procesów tlenowych [19]. Energia wytwarzana przy produkcji metanu może zrównoważyć energię wymaganą do oczyszczenia biogazu membranowego. Zakres temperatur dla skutecznego oczyszczania beztlenowego ścieków wynosi od 20°C do 30°C, przez co kłopotliwe może się okazać oczyszczanie ścieków w czasie mroźniej zimy, ponieważ ze względów ekonomicznych nie jest możliwe podgrzanie dużej ilości ścieków [20].

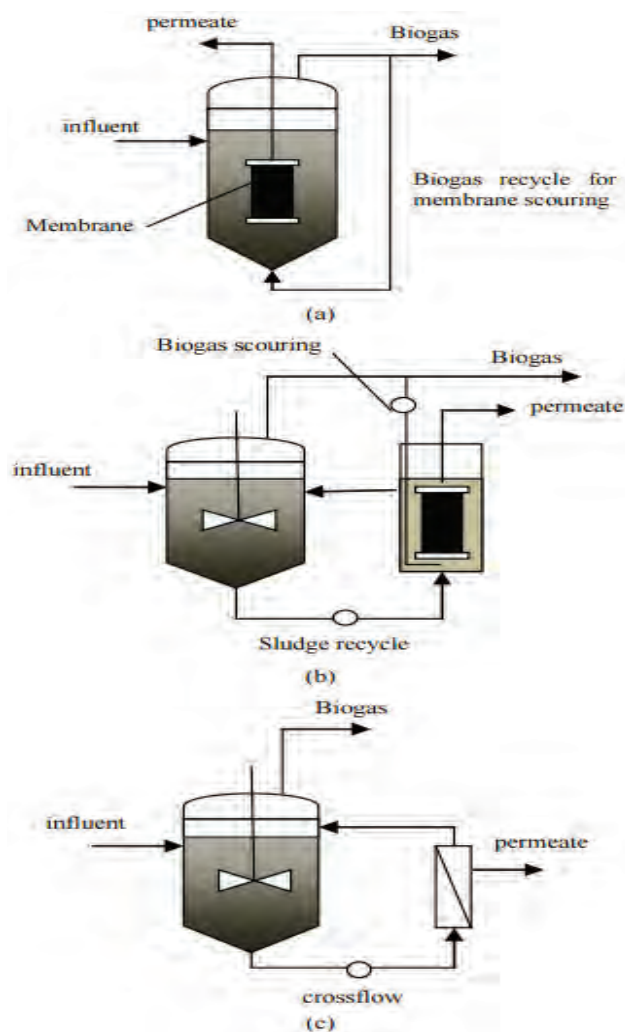


Fig. 6. Different configurations of AnMBR reactors: a) AnMBR submerged membrane system; b) AnMBR submerged separately; c) AnMBR submerged separately and cross-flow [21]

Rys. 6. Różne konfiguracje reaktorów AnMBR: a) system zanurzonej membrany AnMBR; b) AnMBR z zanurzoną oddzielnie membraną; c) AnMBR z zanurzoną oddzielnie membraną i przepływem krzyżowym [21]

7. EGSB REACTORS

The EGSB reactor is a modified version of the UASB reactor. The reactor is a vertical tank 13 to 16 m high [22]. It is characterized by a sewage flow rate of more than 6 m/h, while in UASB reactors it is from 0.5 to 1.0 m/h [23]. The reactor provides maximum stability thanks to an automatically adjustable external recirculation system. Due to such a high flow rate (which means that the mixing capacity is increased), granules are more likely to come into contact with wastewater. Another advantage of the higher velocity is the ability to separate the dispersed sludge from the mature granules in the reactor. The outflow concentration of COD is generally lower than $1 \div 2 \text{ g/m}^3$ [24]. Biogas is discharged under low overpressure. Additional biogas facilities such as dehumidifiers, compressors or biogas tanks are therefore not necessary [22].

7. REAKTORY EGSB

Reaktor EGSB jest zmodyfikowaną wersją reaktora UASB. Reaktor jest pionowym zbiornikiem o wysokości od 13 do 16 m [22]. Charakteryzuje się prędkością przepływu ścieków utrzymującą się powyżej 6 m/h, podczas gdy w reaktorach UASB wynosi ona od 0,5 do 1,0 m/h [23]. Reaktor zapewnia maksymalną stabilność pracy dzięki automatycznie regulowanemu systemowi recyrkulacji zewnętrznej. Ze względu na tak dużą prędkość przepływu (co oznacza zwiększenie wydajności mieszania) granulaty mają większą możliwość kontaktu ze ściekami. Dzięki temu reaktor oczyszcza ścieki przy wysokim obciążeniu ładunkiem związków organicznych nawet do 30 kg ChZT/d m^3 . Kolejną zaletą wyższej prędkości jest możliwość oddzielenia rozproszonego osadu od dojrzałych granул w reaktorze. Stężenie ChZT na wypływie jest przeważnie niższe niż $1 \div 2 \text{ g/m}^3$ [24]. Biogaz odprowadzany jest pod małym nadciśnieniem. Dodatkowe urządzenia biogazowe, takie jak: osuszacze, sprężarki lub zbiorniki biogazowe, nie są zatem konieczne [22].

8. COMPARISON OF AEROBIC AND ANAEROBIC METHODS

Table 3 shows the basic parameters of anaerobic sludge with the removal of organic compounds (carbon compounds), in the methane fermentation process and active sludge working under aerobic conditions (aerobic-anoxic-anaerobic) suitable for the removal of carbon, nitrogen and phosphorus compounds. When treating sewage under anaerobic

8. PORÓWNANIE METOD TLENOWYCH I BEZTLENOWYCH

W tabeli 3 przedstawiono podstawowe parametry osadu czynnego beztlenowego z usuwaniem związków organicznych (związków węgla) w procesie fermentacji metanowej oraz osadu czynnego pracującego w warunkach tlenowych (tlenowo-anoksyczno-beztlenowych), przystosowanego do usuwania związków węgla, azotu i fosforu. Podstawową korzyścią wynika-

Table 3. Comparison of basic technological parameters of anaerobic and aerobic sludge [8]

Tabela 3. Porównanie podstawowych parametrów technologicznych osadu czynnego beztlenowego i tlenowego [8]

Characteristic feature of the process	Wastewater treatment in anaerobic conditions. Anaerobic sludge	Conducting wastewater treatment in aerobic conditions Aerobic activated sludge
Loading chamber volume applied		$0.5 \div 1.5 \text{ kg COD/m}^3 \text{ d}$
Psychophilic conditions temperature $10 \div 20^\circ\text{C}$	to $4.0 \text{ kg COD/m}^3 \text{ d}$	
Mesophilic conditions temperature $30 \div 37^\circ\text{C}$	to $20.0 \text{ kg COD/m}^3 \text{ d}$	
Thermophilic conditions temperature $40 \div 50^\circ\text{C}$	to $40 \text{ kg COD/m}^3 \text{ d}$	
Biomass increase index	$0.05 \div 0.15 \text{ g dm/g COD}$	$0.35 \div 0.45 \text{ g dm/g COD}$
Charged load of COD of sludge dry mass	$0.75 \div 1.50 \text{ g COD/g dm}$	$0.15 \div 0.75 \text{ g COD/g dm}$
Time of wastewater retention in the activated sludge chambers	20 ÷ 24 hours	16 ÷ 24 hours
Time of working of the activated sludge chambers		1 ÷ 3 weeks
Psychophilic conditions $10 \div 20^\circ\text{C}$	3 ÷ 4 months	
Mesophilic conditions $30 \div 37^\circ\text{C}$	1 ÷ 2 months	
Thermophilic conditions $40 \div 50^\circ\text{C}$	2 ÷ 3 months	

conditions, the main benefit results from lower, on average around 4 times, growths of excess sludge compared to aerobic conditions, which significantly reduces the costs of sewage sludge disposal.

9. CONCLUSION

The use of anaerobic reactors allows for at least three times reduction of the amount sludge ($0.05 \div 0.15 \text{ g dm}^3/\text{g COD}$) in comparison to oxygen conditions ($0.35 \div 0.45 \text{ g dm}^3/\text{g COD}$). The anaerobic activated sludge is characterised by the permissible load capacity of COD up to 30 kg/d-m^3 (EGSB high-performance reactors). Anaerobic activated sludge is an advantageous solution in case of high COD load loads. The big advantage of using anaerobic systems is the reduction of plant operating costs by using biogas.

Anaerobic reactor defects are highly sensitive to environmental changes (temperature, pH). It is not possible to effectively remove nutrients. It is also necessary to treat wastewater by aerobic methods and use equalization tanks.

Analysing the disadvantages and advantages of anaerobic wastewater treatment reactors, it can be concluded that their use is beneficial in wastewater treatment plants with problems of high COD concentrations in incoming wastewater and problems of the amount of sewage sludge produced.

jąca z oczyszczania ścieków w warunkach beztlenowych jest zmniejszenie prawie czterokrotnie przyrostu osadu nadmiernego, w porównaniu do warunków tlenowych, a to przekłada się na znaczne obniżenie kosztów utylizacji osadów ściekowych.

9. WNIOSKI

Zastosowanie beztlenowych reaktorów pozwala na co najmniej trzykrotne zmniejszenie ilości powstających osadów ($0,05 \div 0,15 \text{ g s.m./g ChZT}$) w porównaniu do warunków tlenowych ($0,35 \div 0,45 \text{ g s.m./g ChZT}$). Beztlenowy osad czynny charakteryzuje się dopuszczalną wielkością obciążenia ładunkiem ChZT nawet do 30 kg/d-m^3 (wysokosprawne reaktory EGSB). Beztlenowy osad czynny sprawdza się jako korzystne rozwiązanie w przypadku wysokich obciążeń ładunkiem ChZT. Dużą zaletą wykorzystywania systemów beztlenowych jest obniżenie kosztów eksploatacyjnych oczyszczalni poprzez wykorzystanie powstającego biogazu.

Wadą beztlenowych reaktorów jest znaczna wrażliwość bakterii metanogennych na zmiany środowiskowe (temperatura, pH). Nie ma możliwości efektywnego usunięcia związków biogennych. Konieczne jest także doczyszczanie ścieków metodami tlenowymi oraz zastosowanie zbiorników wyrównawczych.

Analizując wady i zalety beztlenowych reaktorów służących do oczyszczania ścieków, można stwierdzić, że korzystne jest ich zastosowanie w oczyszczalniach borykających się z problemami wysokich stężeń ładunków ChZT w ściekach dopływających oraz z problemami ilości powstających osadów ściekowych.

References

- [1] Metcalf & Eddy Inc.; George Tchobanoglous.; Franklin L Burton.; H.David Stensel. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse 4th Edition*. Chicago 2003.
- [2] Gumińska J., Barbusiński K.: *Kierunki rozwoju innowacyjnych technologii oczyszczania wody i ścieków w perspektywie 2015–2020. Aktualne Zagadnienia w Inżynierii Środowiska (Barbusiński K. red.)*. Monografia. Politechnika Śląska, Gliwice 2015, p. 119-130.
- [3] http://www.apec-vc.or.jp/e/modules/tinyd00/?id=81&kh_open_cid_00=2 access 23.10.2017
- [4] Wojtachnio K.: *Nowoczesne technologie w inżynierii środowiska. „Biuletyn Politechniki Śląskiej”* 12/2015
- [5] Hulshoff Pol. L. S., de Zeeuw, W. J.; Velzeboer, C. T. M.; and Lettinga, G. *Granulation in UASB-Reactor*. Water Science and Technology, 15,291-304. 1983.
- [6] Barbusiński K., *Innowacyjne technologie oczyszczania ścieków komunalnych – kierunki rozwoju*, Napędy i Sterowanie 2016, p. 40-45.
- [7] Draaijer, H., Maas, J. A., Schaapman J. E., Chan A., *Performance of the 5 MLD UASB Reactor for Sewage Treatment at Kanpur, India*. Water Science Technology, 123-133.1992.
- [8] Jules B. Van Lier, Anand Vashi, Jeroen Van Der Lubbe, Barry Heffernan, *Anaerobic Sewage Treatment using UASB Reactors*, Engineering and Operational Aspects. Environmental Anaerobic Technology: pp. 59-89. 2010.
- [9] Mahmoud, N., Zeeman, G. and van Lier J.B. *Adapting UASB technology for sewage treatment in Palestine and Jordan*. Wat. Sci. Technol. 57(3), 361-366. 2008.
- [10] Barber, W. P., Stuckey, D. C., *The use of anaerobic baffled reactor (ABR) for the wastewater treatment: A review*. Water Research, v. 33, n. 7, p. 1559-1578 (1999).

- [11] Motteran F., Pereira E.L., Campos C.M., *The behaviour of an anaerobic baffled reactor (ABR) as the first stage in the biological treatment of hog farming effluents*; Brazilian Journal of Chemical Engineering. Sao Paulo 2013.
- [12] Herum, B.A., *Effects of Applied Vacuum on the Performance of the Anaerobic Sequencing Batch Reactor*. Proceedings of the 48th Annual Industrial Waste Conference, Purdue University, West Lafayette, Indiana, May 1993.
- [13] <http://www.sswm.info/category/implementation-tools/wastewater-treatment/hardware/semi-centralised-wastewater-treatments-8> access 23.10.2017.
- [14] Angenent L.T., and Sung S., (2001). *Development of anaerobic migrating blanket reactor (AMBR), a novel anaerobic treatment system*. 1739-1747 Department of Civil and Construction Engineering, Iowa State University, 2001.
- [15] https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Methanogenic_Anaerobic_Digestion_of_Wastewater access 23.10.2017
- [16] Pidaparti S.R., *Anaerobic Sequencing Batch Reactor Treatment of Swine Wastes at 35°C and 25°C*. M Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa 1992.
- [17] Ndon, U.J., *Anaerobic sequencing batch reactor treatment of low strength wastewater*, Iowa State University, Iowa. 1995.
- [18] Lew B., Tarre S., Beliaevski M., Dosoretz C., Green M., *Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) for Domestic Wastewater Treatment*, Desalination, Vol. 243, No. 1-3, 2009, pp. 251-257.
- [19] Baek S. H., Pagilla K. R., Kim H. J., *Lab-Scale Study of an Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) for Dilute Municipal Wastewater Treatment*, Biotechnology and Bioprocess Engineering, Vol. 15, No. 4, 2010, pp. 704-708.
- [20] Anderson G.K., Kasapgil B., Ince O., *Microbial Kinetics of a Membrane Anaerobic Reactor*, Environmental Technology, Vol. 17, No. 5, 1996, p. 449.
- [21] Chang S., *Anaerobic Membrane Bioreactors (AnMBR) for Wastewater Treatment*. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2014, 4, 56-61, School of Engineering, University of Guelph, Guelph, Canada 2014.
- [22] <http://www.ppeko.com.pl/produkty/oczyszczanie-beztlenowe/Reaktory%20wiezowe.aspx> access 23.10.2017.
- [23] Medhat M.A. Saleh, Usama F. Mahmood,; *UASB/EGSB APPLICATIONS FOR INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT* Seventh International Water Technology Conference Egypt 1-3 April 2003.
- [24] Yoochatchaval W., Ohashi, A., Harada H., Yamaguchi T., Syutsubo K., *Characteristics of Granular Sludge in an EGSB Reactor for Treating low Strength Wastewater*. Int. J. Environ. Res., 2(4): 319-328, Niigata Japan 2008.

Acknowledgments:

The work was financed by Kielce University of Technology, part of the statutory work No. 05.0.10.00/2.01.01.01.0007 MNSP.IKTW.17.002

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Świętokrzyską, w ramach pracy statutowej nr: 05.0.10.00/2.01.01.01.0007 MNSP.IKTW.17.002

PHOSPHORUS SOLUBILIZING BACTERIA – REVIEW ARTICLE

BAKTERIE SOLUBILIZUJĄCE FOSFOR – PRZEGLĄD

DOI: 10.30540/sae-2018-027

Abstract

This article reviews the Phosphorus Solubilizing Bacteria, discusses the types of organic acids produced by them, as well as the impact on economy with non-renewable sources, such as phosphate rocks. In addition, the phosphorus solubilization mechanism is discussed.

Keywords: solubilization, phosphorus, bacteria solubilizing phosphorus, organic acids

Streszczenie

W niniejszym artykule dokonano przeglądu bakterii solubilizujących fosfor, omówiono rodzaje produkowanych przez nie kwasów organicznych, a także ich wpływ na gospodarkę źródłem nieodnawialnym, jakim są złoża fosforytowe. Ponadto skomentowano mechanizm solubilizacji fosforu.

Słowa kluczowe: solubilizacja, fosfor, bakterie solubilizujące fosfor, kwasy organiczne

1. INTRODUCTION

The mobility of phosphorus in the soil is limited, which is related to low accessibility for living organisms. As a result of the ions precipitation processes, i.e. Al^{3+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} or Mg^{2+} , hardly soluble salts are formed which inhibits the migration of this element. Organic matter naturally present in the soil has a partially protective role in the formation of phosphorus compounds which are hard to access for plants. This is the result of a possibility of forming various chelate bonds with ions (e.g. Ca^{2+} , Al^{3+}), thus preventing the formation of hardly soluble phosphate salts [1, 20].

Phosphorus in soil solution occurs in three forms, depending on its availability to plants. The first of these is active phosphorus, occurring in the soil in the form of PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- ions, separated as a result of the dissociation of orthophosphoric acid.

The next form is mobile phosphorus. These are the most common phosphates of aluminum, iron, calcium, calcium and magnesium hydrogen phosphates ($\text{Ca}(\text{HPO}_4)_2$, $\text{Mg}(\text{HPO}_4)_2$) and wivianite ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$). In addition, mobile phosphorus also includes compounds of this element, which are adsorbed on the surface of iron and aluminum oxides, present in the hydrated form, adsorbed on calcium

1. WPROWADZENIE

Ruchliwość fosforu w glebie jest ograniczona, co wiąże się z tym, że jest on mało dostępny dla organizmów żywych. W wyniku procesów strącania jonami, tj. Al^{3+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} czy Mg^{2+} , powstają trudno rozpuszczalne sole, które hamują migrację tego pierwiastka. Materia organiczna naturalnie występująca w glebie pełni częściowo funkcję ochronną w procesie powstawania związków fosforu trudno dostępnych dla roślin. Wynika to z możliwości tworzenia różnych połączeń chelatowych z jonami (na przykład Ca^{2+} , Al^{3+}), przez co zapobiega powstawaniu trudno rozpuszczalnych soli fosforanowych [1, 20].

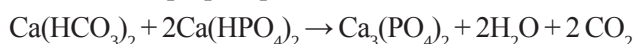
Fosfor w roztworze glebowym występuje w trzech formach, zależnie od jego dostępności dla roślin. Pierwszą z nich jest fosfor aktywny znajdujący się w glebie w formie jonów PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , wyodrębnionych w wyniku dysocjacji kwasu ortofosforowego.

Kolejną formą jest fosfor ruchomy. Są to najczęściej fosforany glinu, żelaza, wapnia, wodorofosforany wapnia i magnezu ($\text{Ca}(\text{HPO}_4)_2$, $\text{Mg}(\text{HPO}_4)_2$) oraz wivianit ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$). Ponadto, do fosforu ruchomego należą również związki tego pierwiastka, które zostają zaadsorbowane na powierzchni tlenków żelaza oraz glinu, występujących w postaci uwodnio-

carbonate molecules and some organic compounds, i.e. phospholipids, phytate or nucleic acids [3, 20].

The last form is supplemental phosphorus, which includes apatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$), variscite ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), strengit ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), phosphate rock ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$).

With the increase pH value in soil, dissociation of phosphoric acid contained in it increases, which leads to a reduction in the form of mobile phosphorus [13]. The amount of phosphorus available to plants in the soil depends on its pH, humidity and organic matter content. The most available phosphorus occurs in soils with a slightly acid reaction. On soils with an acidic, very acidic or alkaline reaction, phosphorus is re-established, which leads to a decrease in the number of bioavailable forms [21]. At slightly acidic pH, i.e. pH above 5, this element is in the form of H_2PO_4^- ions, which can be immediately absorbed by plants. In soils of neutral or alkaline reaction, containing large amounts of Ca^{2+} ions, reactions occur with superphosphate:



In contrast, in acidic soils with significant amounts of Al^{3+} and Fe^{3+} ions, insoluble AlPO_4 and FePO_4 compounds are formed. As a result, phosphorus is re-established in soil solutions, which means that there are no forms available to plants despite nourishing the soil with phosphate containing fertilizers [3, 6, 20, 21].

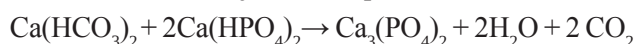
The soil flora consists of various species of microorganisms. Their occurrence is related to the pH of the soil. The alkaline and rich in humus soils are dominated by bacteria with a smaller number of fungi. Soil properties are conditioned by the activity of microorganisms living in the soil. Phosphorus bacteria that live in the soil have particular importance for phosphoric plant nutrition [6]. These microorganisms accumulate themselves within the rhizosphere, where, as a result of life activities, they can influence the transformation of phosphorus in the soil. Phosphorus solubilizing bacteria (PSB – *Phosphorus Solubilizing Bacteria*) produce, among others, organic acids, a product of metabolic processes by which they dissolve hardly accessible forms of phosphorus. Surpluses resulting from these processes can be used by plants. [15].

Some plants in conditions of deficiency of bioavailable phosphorus emit organic acids, among others citric acid, apple acid, amber acid. Then, in the root zone, the soil solution becomes acidic and

nej, adsorbowane na cząsteczkach węglanu wapnia i niektórych związkach organicznych, tj. fosfolipidy, fityna czy kwasy nukleinowe [3, 20].

Ostatnią formą jest fosfor zapasowy, do którego należą apatyt ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$), waryscyt ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), strengit ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), fosforyt ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$).

Wraz ze wzrostem pH gleby, wzrasta dysocjacja kwasu fosforowego w niej zawartego, co prowadzi do zmniejszenia się form ruchomych fosforu [13]. Ilość fosforu dostępnego dla roślin w glebie zależy od jej odczynu, wilgotności oraz zawartości materii organicznej. Najwięcej fosforu przyswajalnego znajduje się w glebach o odczynie lekko kwaśnym. Na gruntach o odczynie kwaśnym, bardzo kwaśnym bądź alkalicznym dochodzi do uwstecznienia fosforu, co prowadzi do zmniejszenia się ilości form biodostępnych [21]. Przy odczynie lekko kwaśnym, tj. pH powyżej 5, pierwiastek ten występuje w formie jonów H_2PO_4^- , które mogą być od razu wchłaniane przez rośliny. W glebach o odczynie obojętnym lub zasadowym, zawierających duże ilości jonów Ca^{2+} , zachodzą reakcje z tzw. superfosfatem:



Natomiast w glebach o odczynie kwaśnym, gdzie występują znaczne ilości jonów Al^{3+} i Fe^{3+} , tworzą się nierozpuszczalne związki AlPO_4 i FePO_4 . W wyniku tego dochodzi do tzw. uwsteczniania się fosforu w roztworach glebowych, co oznacza, że nie ma form przyswajalnych dla roślin pomimo nawożenia gleby nawozami zawierającymi fosfor [3, 6, 20, 21].

W skład flory glebowej wchodzi różnorodne gatunki mikroorganizmów. Ich występowanie jest związane między innymi z odczynem pH gleby. W glebach zasadowych i bogatych w próchnicę dominują bakterie, mniej jest grzybów. Właściwości gleby uwarunkowane są działalnością mikroorganizmów bytujących w glebie. Szczególne znaczenie dla odżywiania roślin fosforem mają bytujące w glebie bakterie fosforowe [6]. Drobnoustroje te kumulują się w obrębie ryzosfery, gdzie w wyniku działalności życiowej mogą wpływać na przemiany fosforu w glebie. Bakterie solubilizujące fosfor (PSB – *Phosphorus Solubilizing Bacteria*) wytwarzają m.in. kwasy organiczne, będące produktem procesów metabolicznych, dzięki którym rozpuszczają trudnodostępne formy fosforu. Nadwyżki powstałe w wyniku tych procesów mogą być wykorzystane przez rośliny [15].

Niektóre rośliny w warunkach niedoboru biodostępnego fosforu wydzielają kwasy organiczne, m.in. kwas cytrynowy, jabłkowy, bursztynowy. Wówczas w strefie korzeniowej dochodzi do zakwaszenia roz-

thus the solubility of the phosphates contained in it is increased. This activity is particularly exhibited by legume and cruciferous plants [7]. To improve the process of nutrient uptake and to reduce abiotic stress of plants, it is important to conduct an optimized form of fertilization, thus not jeopardizing the diversity of soil bacteria. Additionally, in order to make the best use of phosphorus in the soil, a selection of microorganisms should be introduced to determine which of them are the most effective for converting forms that are difficult to access into bioavailable forms. This group includes phosphorus solubilizing bacteria – PSB, the use of which seems to be both an economical and environmentally safe alternative [5, 9, 16].

The purpose of this work was to review individual bacteria from the PSB group, thus enabling their use for the production of fertilizer biopreparations depending on the destination.

2. PHOSPHORUS SOLUBILIZING BACTERIA

In recent years, research focussed on the use of phosphorus hardly available in soil has been initiated. Different strains of bacteria belonging to the PSB group were used for this purpose.

Depending on the soil type and its abundance in phosphorus, the phosphorus biopreparations can be applied. On the soil rich in this element, there is no need to introduce additional quantities of biopreparations, while on soils with low phosphorus level it is necessary to consider the possibility of its recovery from waste using bacteria from the PSB group. Such sources include sewage sludge, ashes after biomass and bone combustion. Labuda et al. undertook research into the solubilization of phosphorus from poultry bones and sewage sludge after the third stage of treatment. For the purpose of the experiment, *Bacillus megaterium* bacteria were applied to bone meal tests [11]. It has been proven that the strain is capable of solubilizing phosphorus and the material treated as waste can be used for phosphorus recovery. The same scientific team also conducted experiments on bone meal, introducing this time *Acidithiobacillus* bacteria, which are capable of producing sulfuric acid, what enables intensive dissolution of phosphoric stock. The experiment showed that these bacteria are able to achieve twice the concentration of P_2O_5 in the analyzed samples. This is due to the effect on the bone of sulfuric acid, which is a much stronger acid than organic acids produced by

tworu glebowego, a tym samym do zwiększenia rozpuszczalności fosforanów w nim zawartych. Aktywność tę szczególnie wykazują rośliny z rodziny motylkowatych i krzyżowych [7]. Aby usprawnić proces pobierania składników odżywczych oraz ograniczyć stres abiotyczny roślin, ważne jest, aby prowadzić zoptymalizowaną formę nawożenia, nie zagrażając tym samym różnorodności bakterii glebowych. Dodatkowo, w celu możliwie jak najlepszego wykorzystania zasobów fosforu w glebie, należy wprowadzić selekcję mikroorganizmów, pozwalającą określić, które z nich są najbardziej skuteczne do przeprowadzania form trudnodostępnych w formy biodostępne. Do tej grupy należą bakterie solubilizujące fosfor – PSB, których wykorzystanie wydaje się być zarówno ekonomiczną, jak i bezpieczną dla środowiska alternatywą [5, 9, 16].

Celem niniejszej pracy był przegląd poszczególnych bakterii z grupy PSB, który może pozwolić na ich wykorzystanie do produkcji biopreparatów nawozowych w zależności od przeznaczenia.

2. BAKTERIE SOLUBILIZUJĄCE FOSFOR

W ostatnich latach rozpoczęto badania ukierunkowane na wykorzystanie fosforu trudnodostępnego w glebie. Do tego celu zastosowano różne szczepy bakterii należące do grupy PSB. W zależności od rodzaju gleby i jej zasobności w fosfor można aplikować biopreparaty fosforowe. Na glebach bogatych w ten pierwiastek nie ma potrzeby wprowadzania dodatkowych ilości biopreparatów, natomiast na glebach ubogich w fosfor należy rozpatrywać możliwość jego odzysku z odpadów z wykorzystaniem bakterii z grupy PSB. Do tego typu źródeł zalicza się osady ściekowe, popiół po spaleniu biomasy oraz kości. Labuda i in. podjęli się badań nad solubilizacją fosforu z kości drobiowych oraz osadu ściekowego po trzecim stopniu oczyszczania. Na potrzeby eksperymentu do prób z mączką kostną zostały zaaplikowane szczepy z gatunku *Bacillus megaterium* [11]. Udowodniono, że bakterie te są zdolne do solubilizacji fosforu, a materiał traktowany jako odpad może zostać wykorzystany do odzyskiwania z niego fosforu. Ten sam zespół naukowy przeprowadził doświadczenie również na mączce kostnej, wprowadzając tym razem bakterie z rodzaju *Acidithiobacillus*, które są zdolne do wytwarzania kwasu siarkowego, co umożliwia intensywne roztwarzanie surowca fosforowego. Eksperyment wykazał, że bakterie te są zdolne uzyskać dwukrotnie większe stężenia P_2O_5 w analizowanych próbach. Wynika to z działania na kości dużo silniejszym kwasem, jakim jest kwas siarkowy, aniżeli

B. megaterium [10, 11]. Studies on solubilization of phosphorus from sewage sludge were also conducted by Bezak-Mazur et al. The experiment showed that the application of *Bacillus megaterium* bacteria on the sludge submitted to hygienization with a large dose of calcium oxide effectively affected the dissolution of hard-to-access phosphorus forms, thus increasing the bioavailable ones [2].

In 2007, G. Selvakumar et al. studied the effect of low temperature on the ability to solubilize phosphorus by *Serratia marcescens* strain (MTCC 8708). The experiment was carried out under three temperature conditions, i.e. 4°C, 15°C i 30°C on wheat. Studies have shown that these microorganisms solubilized phosphorus even at the lowest temperature, while biomass and nutrient uptake by wheat seedlings increased significantly [22].

Then in 2009, Malboobi et al. conducted an experiment on potato bulbs by applying three isolates of phosphorus solubilizing bacteria, i.e. the *Pantelea agglomerans*, the *Microbacterium laevaniformans* and the *Pseudomonas putida* to the rhizosphere. It has been shown that the proposed microorganisms effectively hydrolyze insoluble phosphorus. In addition, the introduction of mineral fertilizer containing phosphorus without applied bacteria did not significantly affect the potato yield, while the simultaneous use of *P. agglomerans* and *P. putida* strain allowed the yield to be increased by up to 25% [12].

The study involved the investigation of the influence of phosphorus solubilizing bacteria on the symbiosis of legumes with rhizobia. *Sinorhizobium meliloti* strain, which is a good solubilizer for iron and phosphorus and *Pseudomonas putida* strain which increases phosphorus solubility were applied to alfalfa seedlings. However, *Bradyrhizobium japonicum* and *Pseudomonas putida* were introduced into soybean seedlings. As a result of this experiment there were changes in the root system in soybean seedlings, but not in alfalfa in the presence of *Pseudomonas* strains [18].

Two-year field studies were also conducted to investigate the effects of two types of phosphorus-dissolving bacteria, *Pantoea cypripedii* and *Pseudomonas plecoglossicida*. These bacteria were inoculated for wheat and maize crops alone or together with calcium phosphate fertilization. This experiment was compared to the cycle of cultivation of these plants using fertilization with phosphate fertilizer (diammonium phosphate, DAP). Observations were

kwasy organiczne wytwarzane przez *B. megaterium* [10, 11]. Badania nad solubilizacją fosforu z osadu ściekowego prowadzili również Bezak-Mazur i in. Eksperyment wykazał, że aplikacja bakterii z rodzaju *Bacillus megaterium* na zhygienizowany tlenkiem wapnia osad skutecznie wpłynęła na rozpuszczenie form trudnodostępnych fosforu, a tym samym zwiększenie form biodostępnych [2].

W 2007 roku G. Selvakumar i in. badali wpływ niskiej temperatury na zdolność solubilizacji fosforu szczepu z rodzaju *Serratia marcescens* (MTCC 8708). Eksperyment przeprowadzono w trzech warunkach temperaturowych, tj. 4°C, 15°C i 30°C na pszenicy. Badania wykazały, że mikroorganizmy wykorzystane do doświadczenia solubilizowały fosfor nawet w najniższej temperaturze, a biomasa i pobór składników odżywczych przez sadzonki pszenicy znacznie się zwiększyły [22].

Z kolei w 2009 roku Malboobi i in. przeprowadzili badania na bulwach ziemniaków, wprowadzając w strefę ryzosfery trzy szczepy bakterii solubilizujących fosfor, tj. *Pantelea agglomerans*, *Microbacterium laevaniformans* i *Pseudomonas putida*. Wykazano, że zaproponowane mikroorganizmy skutecznie hydrolizowały nierozpuszczalny fosfor. Dodatkowo, wprowadzenie nawozu mineralnego zawierającego fosfor bez zaaplikowanych bakterii nie wpłynęło znacząco na plon ziemniaka, natomiast zastosowanie jednocześnie szczepu *P. agglomerans* i *P. putida* pozwoliło na zwiększenie plonu do 25% [12].

Badano również wpływ bakterii solubilizujących fosfor na symbiozę roślin strączkowych z bakteriami brodawkowymi. Na sadzonki lucerny siewnej zaaplikowano szczep *Sinorhizobium meliloti*, który jest dobrym solubilizatorem żelaza i fosforu, oraz szczep *Pseudomonas putida* zwiększający rozpuszczalność fosforu. Natomiast na sadzonki soi wprowadzono *Bradyrhizobium japonicum* i *Pseudomonas putida*. W wyniku tego eksperymentu zaobserwowano zmiany w systemie korzeniowym w sadzonkach soi. Obecność *Pseudomonas putida* w sadzonkach lucerny nie wpłynęła na wzrost korzeni tych roślin [18].

Przeprowadzono także dwuletnie badania terenowe w celu zbadania wpływu dwóch rodzajów bakterii rozpuszczających fosfor, tj. *Pantoea cypripedii* i *Pseudomonas plecoglossicida*. Bakterie te zostały zaszczerpione na uprawy pszenicy i kukurydzy pojedynczo lub wraz z nawożeniem fosforanem wapnia. Eksperyment ten porównano do cyklu uprawy tychże roślin z wykorzystaniem nawożenia nawozem fosforowym (fosforan diamonu, DAP). Obserwacje pro-

made in terms of crop size, soil fertility and economic profits. PSB inoculation together with calcium phosphate fertilization increased yield growth in terms of shoot height, dry biomass of shoots and roots, grain yield in both maize and wheat crops. Soil fertility in terms of phosphorus availability for plants and the PSB population in both crops was significantly improved with PSB inoculation along with calcium phosphate fertilization. Fertilizing with mineral fertilizer did not give such effects. These studies suggest that the use of phosphate biopreparations together with calcium phosphate fertilization was more economical due to the reduction of fertilizer consumption costs and an increase in the yield [8].

Rojas et. al. conducted an experiment in which the synergy between nitrogen-fixing microorganisms and phosphorus solubilizing bacteria was investigated. For this purpose, two species of bacteria were applied to mangrove seedlings; binding nitrogen *Phyllobacterium sp.* and phosphorus-soluble *Bacillus licheniformis*. Studies have shown that after applying both strains at the same time, nitrogen binding and phosphorus solubilization increased compared to the effects observed during the addition of individual cultures [17].

In 2013, an experiment was carried out to determine the effect of phosphorus solubilizing bacteria, i.e. *Kocuria sp.* and *Bacillus subtilis* on coffee plantation of the Castillo variety. The experiment was performed in greenhouse conditions using bacterial strains and calcium phosphate fertilization. The study showed that the best effect was obtained using both variants simultaneously [4].

Recent research (2017) shows that the application of nitrogen and phosphorus bacteria at the same time can significantly affect the yield increase. Rugheim et al. conducted field experiments on fenugreek, for which they used bacteria of the genus *Bacillus megaterium* and *Sinorhizobium meliloti*. The use of *Bacillus megaterium* alone resulted in an increase in the dry weight of the root, while the inoculation of *Sinorhizobium meliloti* on its own facilitated the growth of the plant and the increase in the dry matter of the shoots. The simultaneous application of both types of microorganisms significantly contributed to the growth of roots, shoots and also increased the number of fenugreek seeds [19].

Table 1 presents a list of bacteria capable of solubilizing phosphorus in soil. The solubilization mechanism is related to the production of organic acids by the occurring microorganisms in the soil.

wadzano pod kątem wielkości plonu, żyzności gleby i zysków ekonomicznych. Inokulacja PSB wraz z nawożeniem fosforanem wapnia zwiększyła wzrost plonu pod względem wysokości pędów, suchej biomasy pędów i korzeni, plonu ziarna zarówno w uprawach kukurydzy, jak i pszenicy. Żyzność gleby pod względem dostępności fosforu dla roślin i populacji PSB w obu uprawach uległa znacznej poprawie przy inokulacji PSB wraz z nawożeniem fosforanem wapnia. Nawożenie nawozem mineralnym bez wzbogacenia nie dało takich efektów. Przeprowadzone badania sugerują, że stosowanie biopreparatów fosforowych wraz z nawożeniem fosforanem wapnia było bardziej ekonomiczne ze względu na zmniejszenie kosztów zużycia nawozu i zwiększenie wielkości plonu [8].

Rojas i in. przeprowadzili doświadczenie, w którym badano synergizm pomiędzy mikroorganizmami wiążącymi azot a bakteriami solubilizującymi fosfor. Do tego celu na sadzonki mangrowca zaaplikowano dwa gatunki bakterii: wiążące azot *Phyllobacterium sp.* i rozpuszczające fosfor *Bacillus licheniformis*. Badania wykazały, że po zastosowaniu obu szczepów jednocześnie wiązanie azotu, jak i solubilizacja fosforu uległa zwiększeniu w porównaniu z efektami obserwowanymi podczas dodawania pojedynczych hodowli [17].

W 2013 roku prowadzono eksperyment mający na celu określenie wpływu bakterii solubilizujących fosfor, tj. *Kocuria sp.* i *Bacillus subtilis*, na plantację kawy odmiany Castillo. Doświadczenie prowadzono w warunkach szklarniowych z wykorzystaniem szczepów bakterii, jak i nawożenia fosforanem wapnia. Badania wykazały, że najlepszy efekt został uzyskany przy zastosowaniu obu wariantów jednocześnie [4].

Najnowsze badania (2017 r.) wykazują, że aplikacja bakterii azotowych i fosforowych jednocześnie może istotnie wpływać na zwiększenie plonu. Rugheim i in. prowadzili doświadczenia polowe na kozieradce, do których wykorzystali bakterie z rodzaju *Bacillus megaterium* oraz *Sinorhizobium meliloti*. Zastosowanie jedynie *Bacillus megaterium* spowodowało zwiększenie suchej masy korzeni, natomiast inokulacja tylko *Sinorhizobium meliloti* wpłynęła na wysokość rośliny i zwiększenie suchej masy pędów. Jednoczesna aplikacja obu rodzajów mikroorganizmów znacząco przyczyniła się do wzrostu korzeni, pędów, a także spowodowała wzrost liczby nasion kozieradki [19].

W tabeli 1 podano bakterie zdolne do solubilizacji fosforu w glebie. Mechanizm solubilizacji jest powiązany z produkcją kwasów organicznych przez mikroorganizmy występujące w glebie.

Genus	Species
Bacillus	B. amyloliquefaciens
	B. licheniformis
	B. polymyxa
	B. megaterium
	B. pumilus
	B. circulans
	B. subtilis
	B. atropheus
Enterobacter	E. intermedium
	E. aerogenes
	E. taylorae
	E. asburiae
Pseudomonas	P. fluorescens
	P. putida
	P. mendocina
	P. striata
	P. rathonis
	P. aeruginosa

Table 1. Genera of bacteria involved in phosphorus solubilization in soil

Tabela 1. Gatunki bakterii biorących udział w solubilizacji fosforu w glebie

Source: Authors' study based on R. Dhankhar, S. Sheoran, et al. The role of Phosphorus Solubilizing Bacteria (PSB) in soil management – an overview, international Journal of Development Research vol. 3, Issue, 9, 2013, p. 33

3. THE MECHANISM OF PHOSPHORUS SOLUBILIZATION

The production of acid phosphatases and phytases is the main mechanism of mineralization of organic phosphorus forms. Phosphatases use organic phosphorus as a substrate to convert it to inorganic one. These enzymes hydrolyze the organic part of phosphorus contained in the soil. Phytase is the enzyme responsible for the mineralization of organic phosphorus due to the degradation of phytate, which is the main source of organic phosphorus. The following diagram (Fig. 1) shows the mechanism of phosphorus solubilization and mineralization in soil.

3. MECHANIZM SOLUBILIZACJI FOSFORU

Głównym mechanizmem mineralizacji form fosforu organicznego jest produkcja fosfataz kwasowych i fitazy. Fosfatazy wykorzystują fosfor organiczny jako substrat do przekształcania go w nieorganiczny. Enzymy te hydrolizują organiczną część fosforu zawartego w glebie. Fitaza zaś jest enzymem odpowiedzialnym za mineralizację fosforu organicznego wskutek degradacji fitynianów, które są głównym źródłem fosforu organicznego. Na rysunku 1 przedstawiono mechanizm solubilizacji i mineralizacji fosforu w glebie.

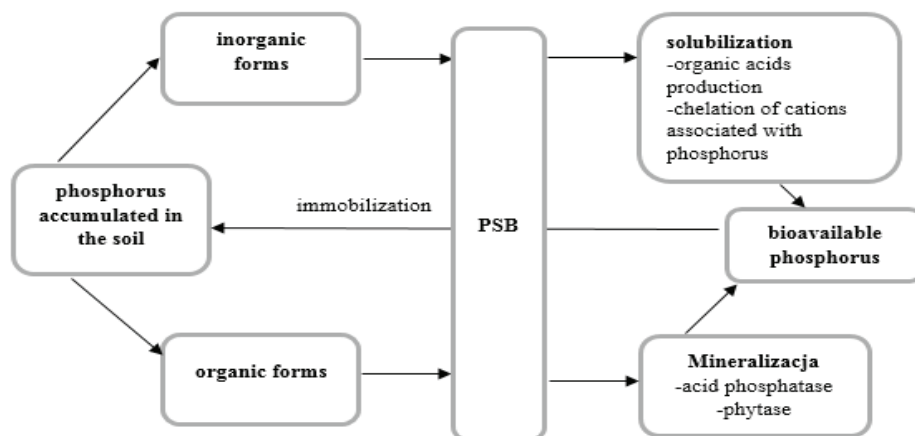


Fig. 1. Mechanism of phosphorus solubilization and mineralization in soil with the participation of PSB

Rys. 1. Mechanizm solubilizacji i mineralizacji fosforu w glebie przy udziale PSB

Source: Authors' study based on S.B. Sharma, R.Z. Sayyed, M.H. Trivedi, T.A. Gobi, Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils, PMC, 2013

Phosphorus bacteria secrete organic acids, which reduces the pH level of the environment in which they occur. These acids can dissolve phosphate by chelation of calcium, iron or aluminum ions that are bound to phosphates. The ability of bacteria to solubilize is not the same, because individual species emit different organic acids, which may affect this process in a different way. The bacterial growth phases are characteristic of particular species as well as the conditions of culture [9, 16]. These stages can be determined based on the curve designated for a given culture of microorganisms and divided into four stages. Phase I is a phase of stagnation. Bacteria at this stage adapt to the new environment, it covers the period from the moment of application to the beginning of intensive cell division. The number of ribosomes and the RNA content are increased. The length of this process depends on the conditions in which the microorganisms are located. Phase II is the logarithmic – exponential phase, during which the number of cells increases rapidly. This stage is of particular importance when using microorganisms belonging to the PSB group for the dissolution of phosphorus. Rapid multiplication of microorganisms depending on the species leads to the production of organic acids by metabolic processes that alter the pH value of the environment, which affects the solubilization of this element. After completing the logarithmic phase, the balance phase follows. Then the reproduction of cells is stopped and their number is balanced. In the last stage, i.e. the dieback phase, the number of living cells decreases, some microorganisms change into spores [23].

The Table 2 presents the acids produced by these microorganisms.

Table 2. Types of organic acids produced by individual PSB

Tabela 2. Rodzaje kwasów organicznych produkowanych przez poszczególne PSB

Type of PSB	Type of organic acid produced	Parameters of individual phases of bacterial growth		
		initial pH (stagnation phase)	final pH (end of the logarithmic phase)	Logarithmic phase [h]
Arthrobacter Hy-505	citric acid gluconic acid lactic acid oxalic acid	7.0-7.5	5.5	120
Arthrobacter sp. (CC-BC03)	citric acid lactic acid	6.8-7.0	4.9	72
A. ureafaciens (CC-BC02)	citric acid	6.8-7.0	5.0	72
Azotobacter Hy-510	succinic acid fumaric acid gluconic acid lactic acid oxalic acid tartaric acid	7.0-7.5	4.7	120

Bakterie fosforowe wydzielają kwasy organiczne, co powoduje obniżenie poziomu pH środowiska, w jakim występują. Kwasy te mogą rozpuszczać fosforany poprzez chelatację jonów wapnia, żelaza lub glinu, które są związane z fosforanami. Zdolność bakterii do solubilizacji nie jest jednakowa, bowiem poszczególne gatunki wydzielają różne kwasy organiczne, które mogą inaczej wpływać na ten proces. Fazy wzrostu bakterii są charakterystyczne dla poszczególnych gatunków, a także warunków hodowli [9, 16]. Etapy te można określić na podstawie krzywej wyznaczanej dla danej hodowli mikroorganizmów i podzielić na cztery etapy w cyklu życiowym kolonii bakterii. Faza I to faza zastoju. Bakterie na tym etapie przystosowują się do nowego środowiska, obejmuje ona okres od momentu aplikacji do momentu rozpoczęcia się intensywnych podziałów komórkowych. Zwiększa się ilość rybosomów oraz zawartość RNA. Długość tego procesu jest zależna od warunków, w jakich drobnoustroje się znajdują. Faza II to faza wzrostu logarytmicznego, podczas której liczba komórek gwałtownie wzrasta. Etap ten ma szczególne znaczenie przy wykorzystaniu mikroorganizmów należących do grupy PSB do roztwarzania fosforu. Szybkie namnażanie się drobnoustrojów w zależności od gatunku prowadzi do wytwarzania w procesach metabolicznych kwasów organicznych, które zmieniają odczyn środowiska, a to z kolei wpływa na solubilizację tego pierwiastka. Po zakończeniu fazy logarytmicznej następuje faza równowagi, w której reprodukcja komórek zostaje zatrzymana, a ich liczba się równoważy. W ostatnim etapie, tj. fazy zamierania, spada liczba żywych komórek, część mikroorganizmów przechodzi w formy przetrwalnikowe [23].

W tabeli 2 podano kwasy produkowane przez te mikroorganizmy.

<i>Bacillus megaterium</i> (CC-BC10)	citric acid lactic acid propionic acid	6.8-7.0	5.1	72
<i>Chryseobacterium</i> (CC-BC05)	citric acid	6.8-7.0	6.0	72
<i>Delftia</i> (CC-BC05)	succinic acid	6.8-7.0	6.0	72
<i>Enterobacter</i> sp. Fs-11	gluconic acid malic acid	7.0	4.5	240
<i>Enterobacter</i> Hy-401	succinic acid citric acid fumaric acid gluconic acid malic acid lactic acid oxalic acid	7.0-7.5	4.3	120
<i>Enterobacter</i> Hy-402	succinic acid citric acid fumaric acid gluconic acid lactic acid oxalic acid tartaric acid	7.0-7.5	4.7	120
<i>Phyllobacterium</i> <i>myrsinacearum</i> (CC-BC19)	gluconic acid	6.8-7.0	5.2	72
<i>Pseudomonas</i> spp. (BIHB 751)	gluconic acid malic acid 2α-ketogluconic acid formic acid oxalic acid	6.8-7.2	4.2	120
<i>Pseudomonas</i> <i>trivialis</i> (BIHB 769)	succinic acid gluconic acid malic acid 2α-ketogluconic acid lactic acid formic acid	6.8-7.2	3.7	120
<i>P. poae</i> (BIHB 808)	succinic acid citric acid gluconic acid malic acid 2α-ketogluconic acid	6.8-7.2	3.6	120
<i>Rhodococcus</i> <i>erythropolis</i> (CC-BC11)	gluconic acid	6.8-7.0	5.3	72
<i>Serratia marcescens</i> (CC-BC14)	succinic acid citric acid gluconic acid lactic acid	6.8-7.0	4.9	72

Source: M. Khan, A. Zaidi, M. Oves, *Functional aspect of phosphate solubilizing bacteria: importance in crop production [in:] Bacteria in agrobiolgy: crop productivity. Berlin, 2013*

Based on the Table 2 it can be concluded that the initial pH during the stagnation phase in all presented strains was at a similar level. The largest reduction of pH at the end of the logarithmic phase occurred in *Pseudomonas* bacteria and in particular in the species *Pseudomonas. poae* (BIHB 808) (pH = 3.6) and *Pseudomonas trivialis* (BIHB 769) (pH = 3.7). This may be due

Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 2 można stwierdzić, że pH początkowe podczas fazy zastoju u wszystkich przedstawionych szczepów było na podobnym poziomie. Do największego obniżenia pH przy końcu fazy logarytmicznej doszło u bakterii z rodzaju *Pseudomonas*, a w szczególności u gatunków *Pseudomonas. poae* (BIHB 808) (pH = 3,6) oraz *Pseudomonas trivialis* (BIHB 769)

to the fact that these microorganisms are able to produce several acids simultaneously as opposed to *Chryseobacterium* bacteria that produce only citric acid or *Delftia* sp. secreting only succinic acid. In both cases there was a slight decrease in pH value. In addition, an analysis of the values mentioned in Table 2 can be helpful in the production of phosphorus biopreparations and their selection considering soil conditions. Hypothetically, with alkaline soils requiring acidification, it would be appropriate to use *Pseudomonas* bacteria, while in the lower alkalinity soils the *Chryseobacterium* sp. or *Delftia* sp. application seems to be a good choice. Moreover, strain selection can be considered in terms of biopreparation duration. At the required long-term period of operation it is reasonable to use *Enterobacter* sp. *Fs-11* bacteria, whose logarithmic phase time is up to 240 hours.

4. SUMMARY

The above review of phosphorus solubilizing bacteria allows for a comprehensive insight into the properties of these microorganisms. The presented research results confirm that the PSB's share in fertilization gives much better effects than the superphosphate used so far. The ability of these microorganisms to convert hard-to-access phosphorus forms into the bioavailable ones, makes it possible to use the phosphorus present in the soil without introducing additional amounts of this element. Thus, phosphorous biopreparations reduce the use of chemical fertilizers, which at the same time limits the costs of agricultural economy. In addition, materials that are treated as a waste, i.e. sewage sludge or bones, can be used for this purpose. In combination with microorganisms that solubilize phosphorus, they become an invaluable fertilizer material. The use of the acquired knowledge may contribute to the development of the production of fertilizer biopreparations and simultaneous reduction in the depletion of non-renewable sources, such as phosphate rock.

(pH = 3,7). Może to być spowodowane tym, że mikroorganizmy te są zdolne do wytwarzania kilku kwasów jednocześnie, w przeciwieństwie do bakterii *Chryseobacterium* sp., które produkują jedynie kwas cytrynowy, czy *Delftia* sp. wydzielające wyłącznie kwas bursztynowy. W obu przypadkach doszło do nieznacznego obniżenia odczynu pH. Dodatkowo, analiza wytwarzanych kwasów przez poszczególne PSB może być przydatna przy produkcji biopreparatów fosforowych. Analiza ta pozwoli na dobranie odpowiednich mikroorganizmów do danych warunków glebowych. Hipotetycznie, przy glebach zasadowych wymagających zakwaszenia, odpowiednie mogłoby być zastosowanie bakterii *Pseudomonas*, natomiast na ziemiach o niższej zasadowości dobrym wyborem wydaje się być aplikacja *Chryseobacterium* sp. czy *Delftia* sp. Ponadto dobór szczepu można rozpatrywać pod względem długości działania biopreparatu. Przy wymaganym długoterminowym okresie działania zasadne jest wykorzystanie bakterii *Enterobacter* sp. *Fs-11*, których czas fazy wzrostu logarytmicznego wynosi aż 240 godzin.

4. PODSUMOWANIE

Powyższy przegląd bakterii solubilizujących fosfor pozwala na szersze zapoznanie się z właściwościami tych mikroorganizmów. Przedstawione wyniki badań potwierdzają, że udział PSB w nawożeniu daje znacznie lepsze efekty niż stosowany do tej pory superfosfat. Zdolność tych drobnoustrojów do przekształcania fosforu trudnodostępnego w biodostępny daje możliwość wykorzystania fosforu obecnego w glebie, bez wprowadzania dodatkowych ilości tego pierwiastka. Tym samym biopreparaty fosforowe ograniczają zużycie nawozów chemicznych, co jednocześnie obniża koszty gospodarki rolnej. Ponadto na ten cel mogą być wykorzystane surowce, które są traktowane jako odpad, tj. osady ściekowe czy kości. W połączeniu z mikroorganizmami solubilizującymi fosfor stają się nieocenionym materiałem nawozowym. Wykorzystanie zdobytej wiedzy może przyczynić się do rozwoju produkcji biopreparatów nawozowych przy jednoczesnym ograniczeniu eksploatacji złóż fosforytowych.

References

- [1] Bezak-Mazur E., Stoińska R., *The importance of phosphorus in the environment review article* [in:] Archive of Waste Management and Environmental Protection, 2013, 15 (3), 33-42.
- [2] Bezak-Mazur E., Stoińska R., Szelać B., *The influence of the Bacillus megaterium on speciation and phosphorus in the sewage sludge* [in:] Architecture Civil Engineering Environment 2015, (4), 81-87.
- [3] Chemistry: phosphorus compounds in chemistry, agriculture, medicine and environmental protection. Group work. Scientific Works of the University of Economics in Wrocław, Wrocław 2008, 4, (1204).
- [4] Cisneros-Rojas C.A., Sánchez-de Prager M., Menjivar-Flores J.C., *Effect of phosphate solubilizing bacteria coffee*. Mesoamerican Agronomy: Vol. 28, Issue 1, 149-158.
- [5] Dhankhar R., Sheoran S., et al. *The role of Phosphorus Solubilizing Bacteria (PSB) in soil management - an overview*, International Journal of Development Research, 2013, 3, (9), 31-36.
- [6] Gorlach E., Mazur T., *Agricultural chemistry*, PWN Publisher, 2002 Warsaw.
- [7] Grzebisz W., Potarzycki J., *Mechanisms of phosphorus uptake by arable crops - from theory to practice*. [in:] Scientific papers of the University of Economics Oskar Lange in Wrocław. Chemistry. Phosphorus compounds in chemistry, agriculture and medicine, 2004, No. 1017, 88-99.
- [8] Gurdeep Kaur G., Reddy M.S., *Effects of Phosphate-Solubilizing Bacteria, Rock Phosphate and Chemical Fertilizers on Maize-Wheat Cropping Cycle and Economics* [in:] Pedosphere Volume 25, Issue 3, June 2015, 428-437
- [9] Khan M., Zaidi A., Oves M., *Functional aspect of phosphate solubilizing bacteria: importance in crop production* [in:] Bacteria in agrobiolgy: crop productivity. Berlin, 2013, 29-43.
- [10] Labuda M., Saeid A., Chojnacka K., Górecki H., *The use of Bacillus megaterium in solubilisation of phosphorus* [in:] Przemysł Chemiczny, 2012, 91 (5), 837-840.
- [11] Labuda M., Saeid A., Chojnacka K., Wyciszkievicz M., *The use of microorganisms in the production of phosphate fertilizers* [in:] Przemysł Chemiczny, 2012, 91 (5), 956-958.
- [12] Malboobi M. A., Behbahani M., Owlia P., *Performance evaluation of potent phosphate solubilizing bacteria in potato rhizosphere* [in:] World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2009, 9-38.
- [13] Mercik S., *Agricultural chemistry*, Wydawnictwo SGGW, Warsaw 2002.
- [14] Mohammadi K., *Phosphorus Solubilizing Bacteria: Occurrence, Mechanisms and their role in crop production*, Resources and Environment 2012, 2 (1), 80-85.
- [15] Ponmurugan P., Gopi C., *In vitro production of growth regulators and phosphatase activity by phosphate solubilizing bacteria*. [in:] African Journal of Biotechnology. 2006, 5 (4): 348-350.
- [16] Rodríguez H., Fraga R., *Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion*. Biotechnol Adv. 1999 Oct; 17 (4-5): 319-339.
- [17] Rojas A., Gina Holguin G., Glick B.R., Bashan Y., *Synergism between Phyllobacterium sp. (N₂-fixer) and Bacillus licheniformis (P-solubilizer), both from a semiarid mangrove rhizosphere* [in:] FEMS Microbiology Ecology, Volume 35, Issue 2, 1 April 2001, 283-292.
- [18] Rosas S., Andrés J., Rovera M., Correa N., *Phosphate-solubilizing Pseudomonas putida can influence the rhizobia-legume symbiosis* [in:] Soil Biology and Biochemistry Volume 38, Issue 12, December 2006, 3325-3520.
- [19] Rugheim A., *Influence of nitrogen fixing and phosphorus solubilizing bacteria inoculation on fenugreek symbiotic properties, growth and yield* [in:] International journal of Horticulture, Agriculture and Food Science (IJHAF), 2014, 42-47.
- [20] Sapek A., *Phosphorus in the human food chain and the environment in Poland* [in:] Inżynieria Ekologiczna, 2009, 21, 62-73.
- [21] Sapek B., *Nagromadzanie i uwalnianie fosforu w glebach – źródła, procesy, przyczyny*. [in:] WODA-ŚRODOWISKO-OBSZARY WIEJSKIE, 2014 (I-III). T. 14. Z. 1 (45), 77-100.
- [22] Selvakumar G., Mohan M., Kundu S., Gupta A.D., Joshi P., Nazim S., Gupta H.S., *Cold tolerance and plant growth promotion potential of Serratia marcescens strain SRM (MTCC 8708) isolated from flowers of summer squash (Cucurbita pepo)* [in:] Letters in Applied Microbiology 2008, 171-175.
- [23] Schlegel H.G., *Mikrobiologia ogólna*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 1996.
- [24] Sharma S.B., Sayyed R.Z., Trivedi M.H., Gobi T.A., *Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils*, PMC, 2013, 2:587.

Acknowledgments:

The work was financed by Kielce University of Technology, part of the statutory work No. 05.0.10.00/2.01.01.01.0034. MNSP.IKTW.16.001

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Świętokrzyską, w ramach pracy statutowej nr: 05.0.10.00/2.01.01.01.0034. MNSP.IKTW.16.001

MAREK TELEJKO
ALEKSANDRA STACHERA

THERMAL COMFORT IN UNIVERSITY COMPUTER LABORATORIES

KOMFORT CIEPLNY W PRACOWNIACH KOMPUTEROWYCH UCZELNI WYŻSZEJ

Structure and Environment No. 3/2018, vol. 10, p. 201

DOI: 10.30540/sae-2018-020

Abstract

Thermal comfort defines the state of satisfaction of a person or a group of people with thermal conditions of the environment in which the person, or the group of people is staying. The state of satisfaction depends on the balance between the amount of heat produced by the organism in the process of metabolism and heat loss from the organism to the surrounding environment. It has an effect on the quality and efficiency at work, and indirectly also on the presence of symptoms of Sick Building Syndromes (SBS). Due to differences in body structure, metabolism, clothing etc., it is not possible to create a satisfactory thermal environment for all the people staying in it. However, there are parameter values, which maintained at an appropriate level, allow to meet thermal expectations of even 95% of people staying in this environment. The article presents the results of tests conducted in the university computer rooms. The studies included measurements and analysis of typical internal microclimate parameters: temperature, relative humidity and CO₂ concentration. The results raised considerable reservations and therefore in order to assess fully the conditions of use, it has been decided to conduct evaluation of thermal comfort in rooms analysed. In addition, the surrounding surface radiation temperature and clothing insulation of users have been specified. On the basis of the obtained data, PPD and PMV index values were determined in accordance with the standard EN ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria [3].

Streszczenie

Komfort cieplny określa stan zadowolenia osoby lub grupy osób z warunków termicznych środowiska, w którym osoba ta lub grupa osób przebywa. Ten stan zadowolenia zależy od równowagi pomiędzy ilością ciepła wytwarzanego przez organizm w procesie metabolizmu a stratami ciepła z organizmu do otaczającego go środowiska. Ma on wpływ na jakość i wydajność pracy, a pośrednio również na występowanie symptomów syndromów chorego budynku (SBS). Na skutek różnic w budowie ciała, metabolizmie, ubiorze etc. nie ma możliwości stworzenia środowiska cieplnego odpowiadającego wszystkim przebywającym w nim osobom. Istnieją jednak wartości parametrów, które utrzymane na odpowiednim poziomie, pozwalają na spełnienie oczekiwań termicznych nawet 95% ludzi przebywających w tym środowisku. W artykule zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych w pomieszczeniach komputerowych uczelni wyższej. Badania obejmowały pomiary oraz analizę typowych parametrów mikroklimatu wewnętrznego: temperatury, wilgotności względnej oraz stężenia CO₂. Uzyskane wyniki budziły spore zastrzeżenia, dlatego w celu pełnej oceny warunków użytkowania zdecydowano się na przeprowadzenie oceny komfortu termicznego analizowanych pomieszczeń. Dodatkowo określono zatem temperaturę promieniowania powierzchni otaczających i izolacyjność odzieży użytkowników. Na podstawie otrzymanych danych wyznaczono wartości wskaźników PPD i PMV, zgodnie z normą EN ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria [3].

ANDRZEJ BOROWY
BOGDAN WRÓBLEWSKI

APPLICATION OF THE FIRE RESISTING SUSPENDED CEILINGS

ZASTOSOWANIE SUFITÓW PODWIESZONYCH O OKREŚLONEJ ODPORNOŚCI OGNIOWEJ

Structure and Environment No. 3/2018, vol. 10, p. 211

DOI: 10.30540/sae-2018-021

Abstract

This paper presents the rules of performing fire resistance tests and classification of suspended ceilings constituting independent barriers and suspended ceilings constituting horizontal membranes protecting the floor/roof over them. The consequences for the way of using suspended ceilings in buildings, taking into account the requirements of the regulations, were discussed.

Streszczenie

W artykule przedstawiono zasady wykonywania badań oraz klasyfikowania w zakresie odporności ogniowej sufitów podwieszonych stanowiących samodzielne przegrody oraz sufitów podwieszonych stanowiących poziome membrany zabezpieczające strop/dach nad nimi. Omówiono konsekwencje dla sposobu zastosowania sufitów podwieszonych w budynkach z uwzględnieniem wymagań przepisów.

STANISŁAW PLECHAWSKI
STANISŁAW B. FIC

DIAGNOSTICS OF CONCRETE ELEMENTS AFTER THE FIRE DIAGNOSTYKA ELEMENTÓW BETONOWYCH PO POŻARZE

Structure and Environment No. 3/2018, vol. 10, p. 223

DOI: 10.30540/sae-2018-022

Abstract

The paper presents selected methods for determining the influence of fire on the load capacity of concrete elements – diagnostics and damages arising after application of fire temperatures. The subject may not seem new in terms of the well-known drop in the strength of concrete in fire conditions, but an important aspect discussed in the paper is the fracture toughness of concrete depending on high temperatures.

Destructions, caused by fire temperatures, affects the physical and mechanical properties of concrete, and their size can be assessed using the stress intensity factor. According to our own research, the critical stress intensity factor K_{IC} of concrete decreases faster than the dynamic modulus of elasticity, and also faster than compressive and tensile strength.

The paper describes selected methods of diagnostics of construction elements from concrete damaged by fire.

Streszczenie

W referacie przedstawiono wybrane metody określania wpływu pożaru na nośność elementów betonowych – diagnostykę oraz uszkodzenia powstające po aplikacji temperatur pożarowych. Temat może nie wydaje się nowy w aspekcie, powszechnie znanego spadku wytrzymałości betonu w warunkach pożarowych, jednak istotnym zagadnieniem poruszonym w referacie jest odporność betonu na pękanie w zależności od wysokich temperatur.

Destrukcje powstałe pod wpływem temperatur pożarowych wpływają na właściwości fizykomechaniczne betonu, a ich wielkość może być oceniana za pomocą współczynnika intensywności naprężeń. Z badań własnych wynika, że krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} betonu zmniejsza się szybciej niż dynamiczny moduł sprężystości E_{dyn} , a także szybciej niż wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie. W referacie opisano wybrane metody diagnostyki elementów konstrukcyjnych z betonu, uszkodzonych przez pożar.

RYSZARD DACHOWSKI
KATARZYNA KOMISARCZYK
KAMILA KOMISARCZYK

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FACTORS INCREASING THE CHARACTERISTICS OF AUTOCLAVED PRODUCTS USING THE DEMATEL METHOD

ANALIZA WPŁYWU CZYNNIKÓW KSZTAŁTUJĄCYCH CECHY TWORZYW AUTOKLAWIZOWANYCH PRZY UŻYCIU METODY DEMATEL

Structure and Environment No. 3/2018, vol. 10, p. 237

DOI: 10.30540/sae-2018-023

Abstract

Sand-lime products are characterized by advantageous features: compressive strength, thermal accumulation and acoustic insulation. Product features are resultative choice of decisions made at individual stages of the production process: method of thickening the raw material mixture, time and temperature of autoclaving and the pressure of saturated steam. The above factors may affect on the characteristics of sand-lime products not only directly, but also through other factors. However, there is no suggestion in the literature about the relationship between these factors. The aim of this article is to find answers to the following questions: which stage of the technological process is the most important? What impact does the individual stages have on each other? Whether and to what extent modification of a given stage will affect the compressive strength of finished products? The authors carried out an analysis using the DEMATEL method to identify factors that have a key influence on autoclaved materials. The results show that using the right amount of water in the raw material mixture is the most important factor. To a slightly lesser extent, proper selection of amount of the quick lime is important. The least important factor is the method of forming silicate products. Although the time of autoclaving has a large contribution in the creation of the impact network, however it is caused by the influence of thermal and humidity conditions, the amount of lime, water and, in the low extent, the molding method.

Streszczenie

Wyroby wapienno-piaskowe charakteryzują się korzystnymi cechami użytkowymi: wytrzymałością na ściskanie, akumulacją ciepłą oraz izolacyjnością akustyczną. Cechy wyrobów stanowią pochodną wyboru decyzji podejmowanych na poszczególnych etapach procesu produkcji: sposobu zagęszczania mieszanki surowcowej, czasu i temperatury autoklawizacji oraz ciśnienia nasyconej pary wodnej. Powyższe czynniki mogą oddziaływać na cechy wyrobów wapienno-piaskowych nie tylko bezpośrednio, lecz także za pośrednictwem pozostałych czynników. Jednak w literaturze brak jest sugestii dotyczących zależności pomiędzy tymi czynnikami. Celem artykułu jest znalezienie odpowiedzi na pytania: który z etapów procesu technologicznego jest najważniejszy? Jaki wpływ poszczególne etapy wywierają na siebie? Czy i w jakim stopniu modyfikacja danego etapu wpłynie na wytrzymałość na ściskanie gotowych wyrobów? Autorzy przeprowadzili analizę z wykorzystaniem metody DEMATEL w celu wskazania czynników mających kluczowy wpływ na autoklawizowane materiały. Wyniki pokazują, że zastosowanie odpowiedniej ilości wody w mieszaninie surowcowej jest najistotniejszym czynnikiem. W niewiele mniejszym stopniu ważny jest właściwy dobór ilościowy wapna palonego. Najmniej ważnym czynnikiem jest sposób formowania wyrobów silikatowych. Wprawdzie czas autoklawizacji ma duży udział w tworzeniu sieci wpływu, jednak jest to spowodowane wpływem warunków cieplno-wilgotnościowych, ilością wapna, wody i w najmniejszym stopniu sposobem formowania.

PAULINA KOSTRZEWA
ANNA STĘPIEŃ
KATARZYNA DZIADEK
ARTUR SZMIDT

TECHNOLOGICAL ASPECT OF BRICK PRODUCTION USING THE METHOD OF AUTOCLAVING

TECHNOLOGICZNE ASPEKTY PRODUKCJI CEGIEŁ METODĄ AUTOKLAWIZACJI

Structure and Environment No. 3/2018, vol. 10, p. 249

DOI: 10.30540/sae-2018-024

Abstract

Production of sand-lime bricks using the autoclaving method is a well-known process, especially in Europe. During the autoclaving process, also called the hydrothermal treatment or hardening the materials with lime and/or cement binder, a series of microstructural changes occur. Primarily, hydrated silicates of lime are created, which are responsible for physical-mechanical features of aerated materials. The article aims at characterizing the process of brick production using the method of autoclaving and estimation of their microstructural properties.

Streszczenie

Produkcja cegieł wapienno-piaskowych metodą autoklawizacji jest procesem znanym szczególnie w Europie. Podczas autoklawizacji, nazywanej również obróbką hydrotermalną bądź utwardzaniem materiałów o spoiwie wapiennym i/lub cementowym, zachodzi szereg zmian mikrostrukturalnych. Powstają przede wszystkim uwodnione krzemiany wapnia, które są odpowiedzialne za właściwości fizyko mechaniczne materiałów autoklawizowanych. Artykuł ma na celu charakterystykę procesu produkcji cegieł metodą autoklawizowanych oraz ocenę charakterystyk mikrostrukturalnych materiałów autoklawizowanych.

ANATOLIY M. PAVLENKO
HANNA V. KOSHLAK

THERMAL INSULATION MATERIALS WITH POROUS STRUCTURE

MATERIAŁY TERMOIZOLACYJNE O STRUKTURZE POROWATEJ

Structure and Environment No. 3/2018, vol. 10, p. 258

DOI: 10.30540/sae-2018-025

Abstract

The raw mix of silica-containing technogenic component – fly ash of thermal power plants – and the methods of preparing waterproof porous thermal insulating materials of extended application on its base according to the powder low-temperature technology has been developed using multifunctional properties of soluble glass as: a) a binding component; b) blowing agent; c) the raw mix hardening rate regulator. The physical and chemical, technological aspects of obtaining and using the suggested alkaline-silicate compositions have been considered.

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie produkcji wodoodpornych materiałów termoizolacyjnych przy wykorzystaniu mieszanek zawierających krzem i popiół lotny, pochodzący z elektrowni w oparciu o niskotemperaturową technologię proszkową. Opiera się ona o wykorzystanie szerokich właściwości szkła wodnego, tj. jako: a) element łączący, b) element spulchniający, c) regulator twardnienia. W pracy rozpatrzono fizyczno-chemiczne i technologiczne aspekty wytworzenia i wykorzystania tego typu kompozytów.

ROBERT KOWALIK
LIDIA BARTKIEWICZ

OVERVIEW OF MODERN ANAEROBIC WASTEWATER TREATMENT METHODS PRZEGLĄD NOWOCZESNYCH METOD BEZTLENOWEGO OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW

Structure and Environment No. 3/2018, vol. 10, p. 266

DOI: 10.30540/sae-2018-026

Abstract

The paper presents an overview of modern anaerobic wastewater treatment technologies. Characterised reactors for anaerobic wastewater treatment include UASB, ABR, AMBR, ASBR, AnMBR and EGSB reactors. Comparison with aerobic methods shows that use of anaerobic reactors allows for at least three times reduction of the amount sludge. Analysing the disadvantages and advantages of anaerobic wastewater treatment reactors, it can be concluded that their use is beneficial in wastewater treatment plants with problems of high COD concentrations in incoming wastewater and problems of the amount of sewage sludge produced.

Streszczenie

W artykule przedstawiono przegląd nowoczesnych metod beztlenowego oczyszczania ścieków. Scharakteryzowano reaktory UASB, ABR, AMBR, ASBR, AnMBR i EGSB. Następnie porównano z metodami tlenowymi, co pokazało, że zastosowanie reaktorów beztlenowych pozwala na co najmniej trzykrotne zmniejszenie ilości osadu. Analizując wady i zalety beztlenowych reaktorów do oczyszczania ścieków, można stwierdzić, że ich zastosowanie jest korzystne w oczyszczalniach ścieków, w których występują problemy z wysokimi stężeniami ChZT w ściekach napływających oraz problemy z ilością wytwarzanego osadu ściekowego.

JOANNA CIOPÍŃSKA
ELŻBIETA BEZAK-MAZUR

PHOSPHORUS SOLUBILIZING BACTERIA – REVIEW ARTICLE BAKTERIE SOLUBILIZUJĄCE FOSFOR – PRZEGLĄD

Structure and Environment No. 3/2018, vol. 10, p. 278

DOI: 10.30540/sae-2018-027

Abstract

This article reviews the Phosphorus Solubilizing Bacteria, discusses the types of organic acids produced by them, as well as the impact on economy with non-renewable sources, such as phosphate rocks. In addition, the phosphorus solubilization mechanism is discussed.

Streszczenie

W niniejszym artykule dokonano przeglądu bakterii solubilizujących fosfor, omówiono rodzaje produkowanych przez nie kwasów organicznych, a także ich wpływ na gospodarkę źródłem nieodnawialnym, jakim są złoża fosforytowe. Ponadto skomentowano mechanizm solubilizacji fosforu.

Uniform requirements for manuscripts submitted to “Structure and Environment”

All manuscripts should be submitted in English and Polish.

Given name(s) and surname(s) of each author
Institutional affiliation(s)
Author's e-mail

Title

Format for the paper:

- Abstract
- Keywords
- Introduction
- Subsequent headings
- Summary
- References

The text should be single-spaced throughout. The font should be 11 pt Times New Roman. All paragraphs should be indented 0.5 cm.

Formulas, tables, figures and photographs should be numbered consecutively

Figures and photographs with a resolution of 300 dpi or higher must be submitted in *.TIFF, *.EPS, *.JPG, *.WMF format.

Figures, photographs and tables should be in English, but their captions should be given in English and Polish.

References: The paper submitted for publication must comply with copyright law provisions. Authors have to document sources of the photographs, figures, quotes and borrowings used in the article. References should be cited in square brackets through the text. The full list of references arranged in the citing order as they appear in the text should be placed at the end of the paper (with one language version only). The reference style is defined by the standard PN-ISO 690:2012 Information and documentation. Guidelines for bibliographic references and citations to information resources.

Examples

Whole books

- [1] Author's surname followed by the initials: Title of the book. Place of publication: Publisher, Year of publication, ISBN number.

Edited books

- [2] Surname and initials of the editor (Ed.): Title of the book. Place of publication: Publisher, Year of publication, ISBN number.

Chapters in edited books

- [3] Author's surname followed by the initials: Title of the chapter. (in): Title of the book. Place of publication: Publisher, Year of publication, page numbers (for example: pp. 10-20), ISBN number.

Journal articles

- [4] Author's surname followed by the initials: Title of the article. "journal title" Year, Number, page numbers (for example: pp. 10-20), ISSN number

Web references

- [5] Author's surname followed by the initials: Title of the work. [type of the source, for example: online]. [date when the reference was last Accessed: ...]. Available online: web page

Podstawowe wymagania edytorskie dotyczące pisania artykułów do czasopisma „Structure and Environment”

Artykuł powinien być napisany w dwóch wersjach językowych: angielskiej oraz polskiej.

Imię i nazwisko autora
Nazwa uczelni
e-mail autora

Tytuł artykułu

Struktura artykułu:

- Streszczenie
- Słowa kluczowe
- Wprowadzenie
- Kolejne podtytuły
- Podsumowanie
- Bibliografia

Tekst artykułu powinien być napisany czcionką Times New Roman 11, interlinia pojedyncza, wcięcie akapitowe 0,5 cm.

Wzory, tabele, rysunki oraz zdjęcia powinny być ponumerowane zgodnie z kolejnością ich występowania w tekście.

Rysunki oraz zdjęcia o rozdzielczości 300 dpi lub wyższej, format *.TIFF, *.EPS, *.JPG, *.WMF.

Rysunki, zdjęcia oraz tabele zamieszczamy w wersji angielskiej, a ich tytuły podajemy zarówno w języku angielskim, jak i języku polskim.

Bibliografia: Artykuł przeznaczony do publikacji musi być przygotowany zgodnie z postanowieniami ustawy „Prawo autorskie”, które nakłada na autora obowiązek wykazania źródeł wykorzystanych zdjęć, rysunków cytowań, zapożyczeń. Źródła takie należy umieszczać w tekście w nawiasach kwadratowych. Zbiorcze zestawienie bibliografii umieszczamy na końcu artykułu w kolejności cytowania (tylko przy jednej wersji językowej).

Styl bibliograficzny definiuje norma: **PN-ISO 690:2012** *Informacja i dokumentacja. Wytyczne opracowania przypisów bibliograficznych i powołań na zasoby informacji*.

Przykłady

Pozycje książkowe

[1] Nazwisko i inicjały imion autora: *Tytuł: podtytuł*. Miejsce wydania: Wydawca, Rok, Numer ISBN.

Praca zbiorowa

[2] Nazwisko i inicjały imion redaktora (red): *Tytuł: podtytuł*. Miejsce wydania: Wydawca, Rok, Numer ISBN.

Rozdziały książek

[3] Nazwisko i inicjały imion autora: *Tytuł: podtytuł rozdziału*. [w]: *Tytuł publikacji*. Miejsce wydania: Wydawca, Rok, Strony (np. s. 10-20), Numer ISBN.

Artykuły w czasopismach

[4] Nazwisko i inicjały imion autora: *Tytuł artykułu*. „Tytuł czasopisma” Rok, Numer, Strony (np. s. 8-27), Numer ISSN.

Strony internetowe

[5] Nazwisko i inicjały imion autora: *Tytuł*. [typ nośnika (np. online)]. [data dostępu: ...]. Dostępny w internecie: Adres strony internetowej

THE REVIEW PROCESS

The following requirements need to be met by the paper:

- the title should reflect the content of the paper
- the content should be within the thematic scope of the journal
- the paper should be properly and clearly divided into paragraphs
- original elements need to be part of the paper
- the research method should be properly selected
- adequate references need to be cited
- interpretation and conclusions should match the presented test results
- the paper should not contain parts indicating commercial use

