

Contents

structure

MICHAŁ BAKALARZ, PAWEŁ KOSSAKOWSKI

LOAD-BEARING CAPACITY OF SOLID TIMBER BEAMS WITH SMALL CROSS SECTION HEIGHT STRENGTHENED WITH COMPOSITE SHEETS

NOŚNOŚĆ NA ZGINANIE LITYCH BELEK O NISKIM PRZĘKROJU POPRZECZNYM WZMOCNIONYCH

MATAMI KOMPOZYTOWYMI 301

JERZY HOŁA, LEONARD RUNKIEWICZ

METHODS AND DIAGNOSTIC TECHNIQUES USED TO ANALYSE THE TECHNICAL STATE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

METODY I TECHNIKI DIAGNOSTYCZNE STOSOWANE W OCENIE STANU TECHNICZNEGO

KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH 309

PAWEŁ MIECZKOWSKI

THE EFFECT OF AN ORGANOMETALLIC CATALYST ON THE PROPERTIES OF PEN GRADE BITUMENS

WPŁYW KATALIZATORA METALOORGANICZNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI ASFALTÓW DROGOWYCH 338

environment

PAWEŁ JĘDRZEJOWSKI, JOLANTA LATOSIŃSKA, PAULINA MASTERNAK, PIOTR MICHNO

COMPARISON OF ENERGY EFFICIENCY OF THE MUNICIPAL WASTE TREATMENT PLANT IN KRAKOW AND BIALYSTOK

PORÓWNANIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ INSTALACJI TERMICZNEGO PRZETWARZANIA

ODPADÓW KOMUNALNYCH W KRAKOWIE I BIAŁYMSTOKU 357

ALEKSANDER SZKAROWSKI, SYLWIA JANTA-LIPIŃSKA

IMPROVING OF BOILER EFFICIENCY BY CONTROLLING THE HARMFUL SUBSTANCES CONCENTRATION IN THE COMBUSTION PRODUCTS

POPRAWA SPRAWNOŚCI KOTŁA POPRZECZ STEROWANIE STĘŻENIEM SZKODLIWYCH SUBSTANCJI

W PRODUKTACH SPALANIA 367

MARLENA DĘBICKA, MARIA ŻYGADŁO

ANALYSIS OF RESPIRATORY QUOTIENT RQ IN PROCESS OF BIOMASS DECOMPOSITION IN THE LAB TECHNIQUES

ANALIZA WSPÓŁCZYNNIKA ODDECHOWEGO RQ W PROCESIE ROZKŁADU BIOMASY TECHNIKĄ LABORATORYJNĄ 376

PETER ĎURČANSKÝ, RADOVAN NOSEK

MODELLING AND APPLICATION OF STIRLING ENGINE WITH RENEWABLE SOURCES IN ELECTRICITY PRODUCTION

MODELOWANIE I ZASTOSOWANIE SILNIKA STIRLINGA NAPEŁDZANEGO ODNAWIALNYMI ŹRÓDŁAMI ENERGII

DO PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ 386

ABSTRACTS 391

HOW TO PREPARE THE MANUSCRIPT 397

THE REVIEW PROCESS 398

Editor-in-Chief:

Prof. Zdzisława 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. Józef 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 WAWRZEŃCZYK – 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 IWAŃSKI – 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) za rok 2017 = 86.59

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



MICHAŁ BAKALARZ
PAWEŁ KOSSAKOWSKI
Kielce University of Technology
e-mail: mbakalarz@tu.kielce.pl

Manuscript submitted 2018.06.29 - revised 2018.08.22
initially accepted for publication 2018.09.29, published in December 2018

LOAD-BEARING CAPACITY OF SOLID TIMBER BEAMS WITH SMALL CROSS SECTION HEIGHT STRENGTHENED WITH COMPOSITE SHEETS

NOŚNOŚĆ NA ZGINANIE LITYCH BELEK O NISKIM PRZEKROJU POPRZECZNYM WZMOCNIONYCH MATAMI KOMPOZYTOWYMI

DOI: 10.30540/sae-2018-029

Abstract

The paper presents the results of experimental tests focused on strengthening a solid pine beams with lightweight plastics. Glass fiber reinforced sheets S&P G-Sheet E 90/10 B and carbon fiber reinforced sheets S&P C-Sheet 240 applied to the soffit of the element were used as a reinforcement. The four point bending strength test were carried out on the laboratory scale elements. Test results indicated a significant increase in ductile behavior as well as increase in load bearing capacity of beams.

Keywords: pine wood, timber structures, glass fibers, carbon fibers, strengthening

Streszczenie

W pracy przedstawione zostały wyniki próby wzmocnienia litych belek sosnowych, wykorzystując lekkie tworzywa sztuczne. Zbrojenie stanowiły maty zbrojonej włóknem szklanym S&P G-Sheet E 90/10 B oraz maty z włóknem węglowym S&P C-Sheet 240 przyklejone do podbitki elementów. Próby te przeprowadzone zostały na elementach w skali laboratoryjnej poddanych czteropunktowemu zginaniu. Wyniki badań wskazały na istotny wzrost ciągliwości elementów oraz przyrost wytrzymałości na zginanie.

Słowa kluczowe: drewno sosnowe, konstrukcje drewniane, włókna szklane, włókna węglowe, wzmacnianie

1. INTRODUCTION

In today's buildings, the demands on the interior finish of the building are increasing.

The first research on the application of composite sheets as a reinforcement of timber structures appeared already in the 1960s. One of the first scientist to made this trials was Theakston, who studied influence of glass fibre reinforced fabrics on load bearing capacity of glulam beams [11]. Further investigations in this sense were undertaken by other researchers in the 1970s and 1980s [1, 12], whose results indicated a potential development of this field. Currently, a large diversification in types of fibers used in laboratory research such as aramid [14], basalt [10], glass, carbon fibres and their hybrids [13] is noticeable.

1. WPROWADZENIE

Pierwsze badania nad zastosowaniem tkanin do wzmacniania konstrukcji drewnianych ukazały się już w latach 60. ubiegłego wieku. Jednym z pierwszych naukowców wykonujących te próby był Theakston, który badał wpływ tkanin zbrojonych włóknem szklanym oraz typu kleju na nośność belek z drewna klejonego warstwowo [11]. Prace w tym kierunku podjęte zostały także przez innych badaczy w latach 70. i 80. [1, 12], a ich wyniki wskazały na istniejący potencjał rozwoju tej dziedziny. Obecnie występuje duże zdywersyfikowanie w stosowanych w badaniach laboratoryjnych rodzajach włókien, do których zaliczyć można włókna: aramidowe [14], bazaltowe [10], szklane, węglowe, a także ich hybrydy [13].

The most common fibre reinforced composites are laminates [2, 5], rods [4] and fabrics [3, 6].

Fabrics for strengthening structures are manufactured as uni- or bidirectional reinforced sheets. Major advantages, which opt in favor of using these materials to strengthen wooden structures, are as follows: low density, high tensile strength, high stiffness, corrosion resistance and flexibility.

2. MATERIALS AND METHODOLOGY

2.1. Timber

Pine wood beams was used in preliminary research. The grade class assessed by visual method was C24 [8]. The cross section of the beam was 80 x 80 mm. The total length of the beam was 1.6 m with a clear span of 1.44 m.

2.2. FRP sheets

Glass fiber reinforced polymer sheets S&P G-Sheet E 90/10 B and carbon fiber polymer sheets S&P C-Sheet 240 were used as a reinforcement. Selected material properties of sheets are shown in Table 1.

Parameter	Glass sheets S&P G-Sheet E 90/10 B	Carbon sheets S&P C-Sheet 240 600 g/m ²
Elastic modulus [kN/mm ²]	≥ 73	≥ 265
Tensile strength [N/mm ²]	≥ 3400	≥ 5100
Fibre weight – longitudinal [g/m ²]	800	600
Weight per unit area of sheet [g/m ²]	880	630
Density [g/cm ³]	2.60	1.80
Elongation at rupture [%]	4.5	≥ 1.7 ÷ 1.9
Design thickness [mm]	0.308	0.333

2.3. Adhesive

Two component S&P Resin 55 epoxy resin adhesive, mixed with 2:1 ratio, was used to apply on the beam surface and composite sheet in order to obtain proper bonding. Surface of the elements was grinded and cleaned before the application of adhesive. Modulus of elasticity and elongation at break, according to manufacturer data sheets [4], are 3200 MPa and 1.73%, respectively.

2.4. Experimental program

The tests were conducted at the Laboratory for the Strength of Materials of the Kielce University of Technology.

Najpopularniejszymi rodzajami kompozytów FRP są laminaty [2, 5], pręty [4] oraz tkaniny [3, 6].

Tkaniny do wzmacniania konstrukcji produkowane są w postaci jedno- bądź wielokierunkowych zbrojonych mat. Decydującymi zaletami przemawiającymi za zastosowaniem ich do wzmacniania konstrukcji drewnianych są: mały ciężar własny, wysoka wytrzymałość na rozciąganie, wysoka sztywność, odporność na korozję i elastyczność.

2. MATERIAŁY I METODOLOGIA

2.1. Drewno

Belki z drewna sosnowego wykorzystano w badaniach wstępnych. Klasa drewna na podstawie sortowania wizualnego określona została jako C24 [7]. Przekrój poprzeczny belek przyjęto o wymiarach 80 x 80 mm. Długość całkowita belek wynosiła 1,6 m, a w świetle podpór 1,44 m.

2.2. Maty kompozytowe

W badaniach wykorzystano maty zbrojone włóknem szklanym S&P G-Sheet E 90/10 B oraz maty zbrojone włóknem węglowym S&P C-Sheet 240. Wybrane parametry techniczne mat przedstawione zostały w tabeli 1.

Table 1. Selected material properties of applied composite sheets [4]

Tabela 1. Wybrane właściwości materiałowe zastosowanych mat kompozytowych [4]

2.3. Klej

Do aplikacji zbrojenia zastosowany dwuskładnikowy klej na bazie żywicy epoksydowej S&P Resin 55, wymieszane w proporcjach 2:1. By uzyskać właściwe połączenie mieszanka nałożona została na powierzchnię drewna i matę kompozytową. Przed aplikacją powierzchnia elementów została wyszlifowana i oczyszczona. Zgodnie z kartami technicznymi producenta moduł sprężystości oraz wydłużenie przy zniszczeniu kleju wynoszą odpowiednio 3200 MPa i 1,73% [4].

2.4. Program eksperymentu

Badania przeprowadzone zostały w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach.

The subject of the own research was analysis of static work of solid pine beams strengthened with composite sheets bonded to the external surface of elements. Analysis involved strengthening tensile zone of bent elements by applying one layer of sheet reinforced with glass fibers S&P G-Sheet E 90/10 B and sheet reinforced with carbon fiber S&P C-Sheet 240. Sheets were applied along the entire length of beams. For this purpose three series of elements was prepared (three elements in each series), as follows:

- BD – reference beams,
- BDG – beams strengthened with glass sheets,
- BDC – beams strengthened with carbon sheets.

The four point bending test static scheme setup is shown on Figure 1. The bending strength tests were carried out with accordance to [8].

Przedmiotem badań własnych była analiza pracy statycznej litych belek sosnowych o wzmocnionych matami kompozytowymi przyklejanych do zewnętrznych powierzchni elementów. Analiza ta uwzględniała wzmocnienie strefy rozciąganej elementów zginanych poprzez doklejenie na całej jej długości jednej warstwy maty zbrojonej włóknem szklanym S&P G-Sheet E 90/10 B oraz maty z włóknem węglowym S&P C-Sheet 240. W tym celu przygotowane zostały trzy serie próbek (trzy elementy w każdej):

- BD – belki referencyjne,
- BDG – belki wzmocnione matami szklanymi,
- BDC – belki wzmocnione matami węglowymi.

Do badań przyjęto schemat statyczny tzw. „czteropunktowego” zginania przedstawiony na rysunku 1. Próby wytrzymałości na zginanie wykonano według zaleceń normy [8].

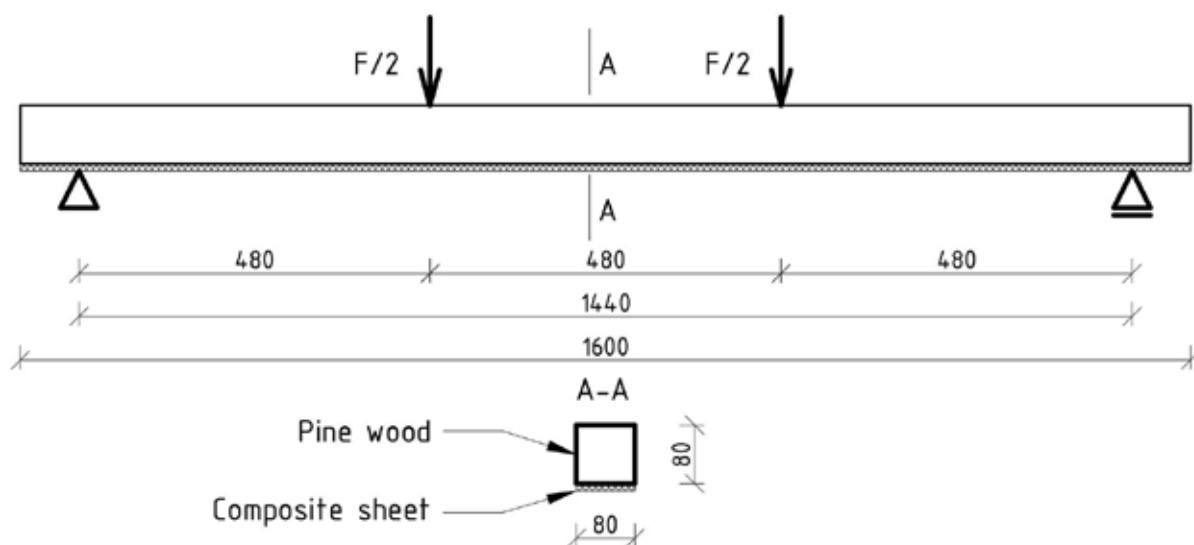


Fig. 1. Scheme of the static test setup

Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Hydraulic universal testing machine MTS-322 was used for bending strength tests. The loading rate of an actuator was set to 7 mm/min. The loading force, test time and displacement of actuator were continuously measured during tests. Frequency measurement was set to 5 Hz. After the static tests, documentation of failure mode was created and the moisture content of all the specimens was checked using a TANEL WRD-100.

The bending strength f_m was determined on the basis of the test results from the following equation [8]:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$$

W badaniach wykorzystano uniwersalną maszynę wytrzymałościową MTS-322, z ustaloną prędkością przesuwu napór obciążających równą 7 mm/min. W trakcie badań w sposób ciągły rejestrowano siłę obciążającą, czas badania oraz przemieszczenie napór. Częstotliwość rejestracji tych pomiarów przyjęto równą 5 Hz. Po przeprowadzonych badaniach udokumentowano postać zniszczenia oraz skontrolowano wilgotność wszystkich próbek za pomocą wilgotnościomierza WRD-100 firmy TANEL.

Na podstawie uzyskanych wyników badań wartość wytrzymałości na zginanie f_m oszacowana została według wzoru [8]:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$$

where:

a – distance between a loading position and the nearest support, in millimeters;

F – loading force, in newtons;

b – width of cross section, in millimeters;

h – height of cross section, in millimeters.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

Figure 2 shows the relationship between the loading force and displacement in the axis of loading force for tested elements. On the diagram three groups of elements are presented, including reference beams marked with BD symbol, and two groups of strengthened elements: BDG – beams strengthened with GFRP sheets and BDC – beams strengthened with CFRP sheets. Each group consist of three elements. In the case of unstrengthened beams, curves indicates almost linear behavior through the entire range of tests. Deviation of the course of individual curves are sporadically visible for these specimens. Beams strengthened with glass fiber reinforced polymer sheets are characterized by the longest time of the test what is equivalent to the longest plastic range of work for each specimen. The transition into non-linear range of work took place quite early and caused flattening of each curve. There are also numerous faults, especially in the final phase of the research, resulting from the propagation of the crack perpendicular to the fibers in the axis of loading forces. Failure of these elements occurred in steps, until final destruction. Last type of specimens obtained the greatest increase in load-bearing capacity. However, it was also characterized by the biggest discrepancies in time to destruction of different elements in the group. These differences was caused by heterogeneity identified with defects in wood specimens.

w którym:

a – odległość od punktu przyłożenia siły skupionej do osi najbliższej podpory, w milimetrach;

F – wartość siły obciążającej, w niutonach;

b – wymiary przekroju poprzecznego, w milimetrach;

h – wymiary przekroju poprzecznego, w milimetrach.

3. REZULTATY BADAŃ

Rysunek 2 przedstawia wykres zależności pomiędzy siłą obciążającą element a przemieszczeniem w osiach napór obciążających elementów. Na wykresie widoczne są trzy grupy elementów, belki referencyjne oznaczone symbolem BD oraz dwie grupy belek wzmocnionych: BDG – belki wzmocnione matami szklanymi i BDC – belki wzmocnione matami węglowymi. Każda z grup zawiera trzy elementy. W przypadku belek niewzmocnionych krzywe wskazują na niemal liniową zależność przez cały zakres badania. Sporadycznie widoczne są skoki w przebiegu poszczególnych krzywych. Belki wzmocnione matami szklanymi charakteryzowały się najdłuższym czasem badania, równoważnym z najdłuższym zakresem pracy niesprężystej elementu. Przejście belek w nieliniowy zakres pracy następowało dość wcześnie i powodowało spłaszczenie wykresu. Widoczne są także liczne uskoki, szczególnie w końcowej fazie badania, będących następstwem propagacji pęknięcia prostopadłego do włókien w osi napór obciążających. Zniszczenie tych elementów następowało skokowo. Ostatni typ elementów uzyskał największy przyrost nośności, jednak charakteryzował się największymi rozbieżnościami w czasie do zniszczenia próbki. Spowodowały to niejednorodności pierwszego rodzaju elementów utożsamiane z wadami materiałowymi.

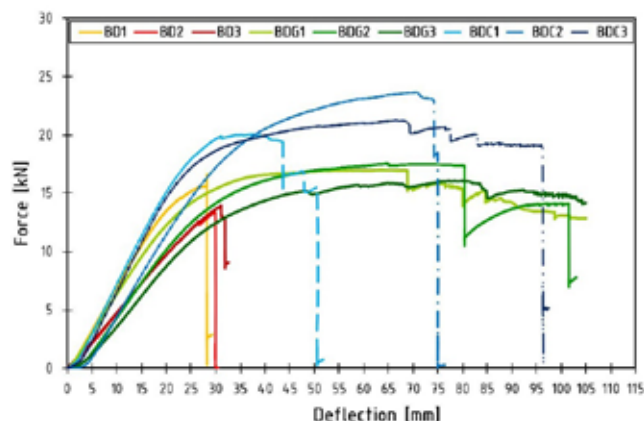


Fig. 2. Load-deflection curves of tested elements

Rys. 2. Krzywe obciążenia i ugięcia badanych elementów

Failure of the unstrengthened beams occurred in the maximum bending moment zone. It was caused by exceeding the tensile strength in wood fibers (Fig. 3).



Zniszczenie belek niewzmocnionych następowało w miejscu występowania maksymalnego momentu zginającego. Spowodowane było przekroczeniem wytrzymałości na rozciąganie w skrajnych włóknach dolnych (rys. 3).

Fig. 3. Typical failure mode of reference beams

Rys. 3. Typowa postać zniszczenia belek referencyjnych

Figure 4 shows typical failure of specimens strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets which consisted of failure occurred in compression zone caused by exceeding compression strength perpendicular to the wood fibers and the shear failure along the wood fibers. In the final phase of the test the rupture of carbon fibers occurred.

Na rysunku 4 przedstawiono typowe zniszczenie belek wzmocnionych matami zbrojonymi włóknem węglowym. Składało się ono ze zniszczenia w strefie ściskanej, wynikającego z przekroczenia nośności na ściskanie prostopadłe do włókien drewna oraz ścięcia wzdłuż włókien w strefie przypodporowej. W końcowej fazie badania nastąpiło przerwanie ciągłości tkaniny równoległe do kierunku głównego maty.

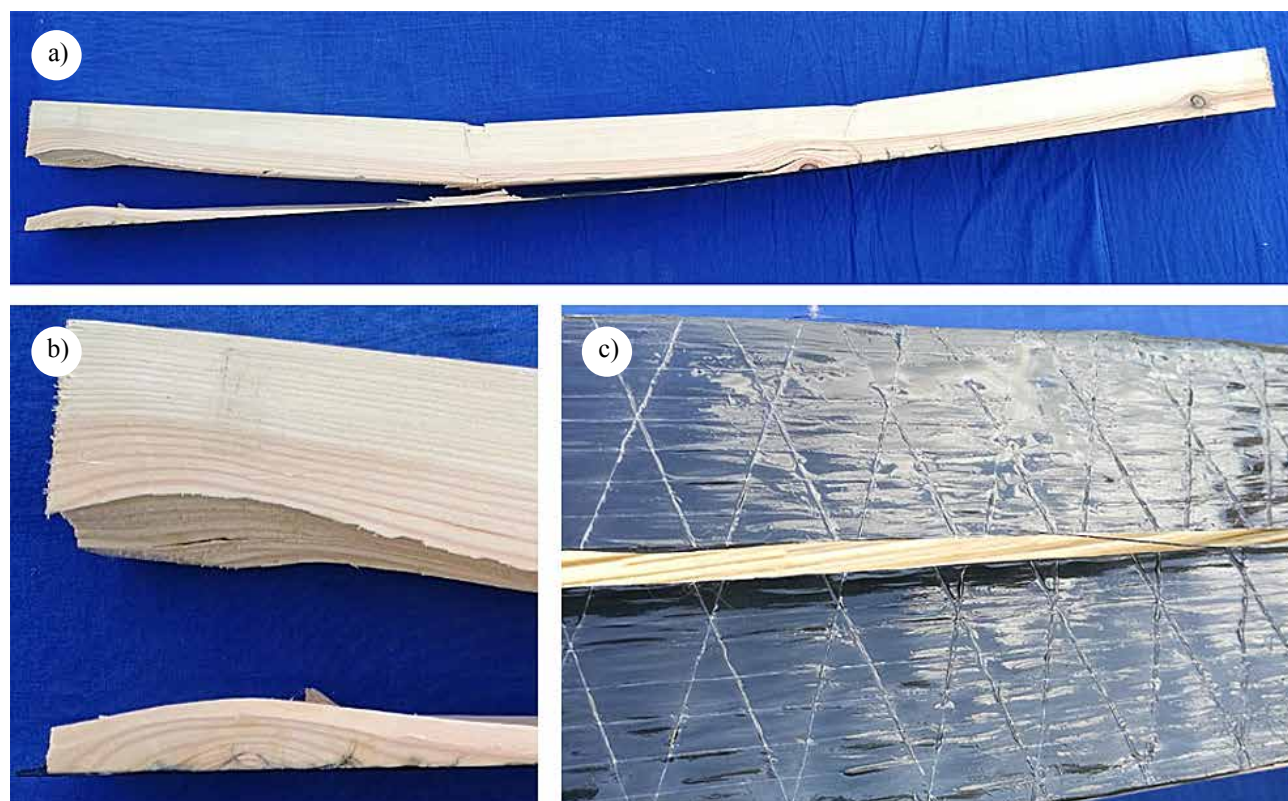


Fig. 4. Failure mode of element strengthened with CFRP sheet: a) general view, b) shear failure, c) rupture along composite material

Rys. 4. Zniszczenie belek wzmocnionych włóknem węglowym: a) widok ogólny, b) zniszczenie wywołane ścinaniem, c) pęknięcie wzdłuż kompozytu

In the case of beams strengthened with glass fiber reinforced sheets, the analogy in the failure mode to the beams strengthened with CFRP sheets is visible. However, due to the lower value of the loading force, the failure had a gentler character. Propagation of the crack in the axis of concentrated force was accompanied by slow rupture of glass fibers (Fig. 5).

W przypadku belek wzmocnionych matami szklanymi można dostrzec analogię w zniszczeniu belek wzmocnionych matami węglowymi. Jednak z uwagi na mniejszą wartość siły obciążającej miało ono łagodniejszy przebieg. Propagacji pęknięcia w osi napór obciążających towarzyszyło powolne przerywanie włókien szklanych (rys. 5).

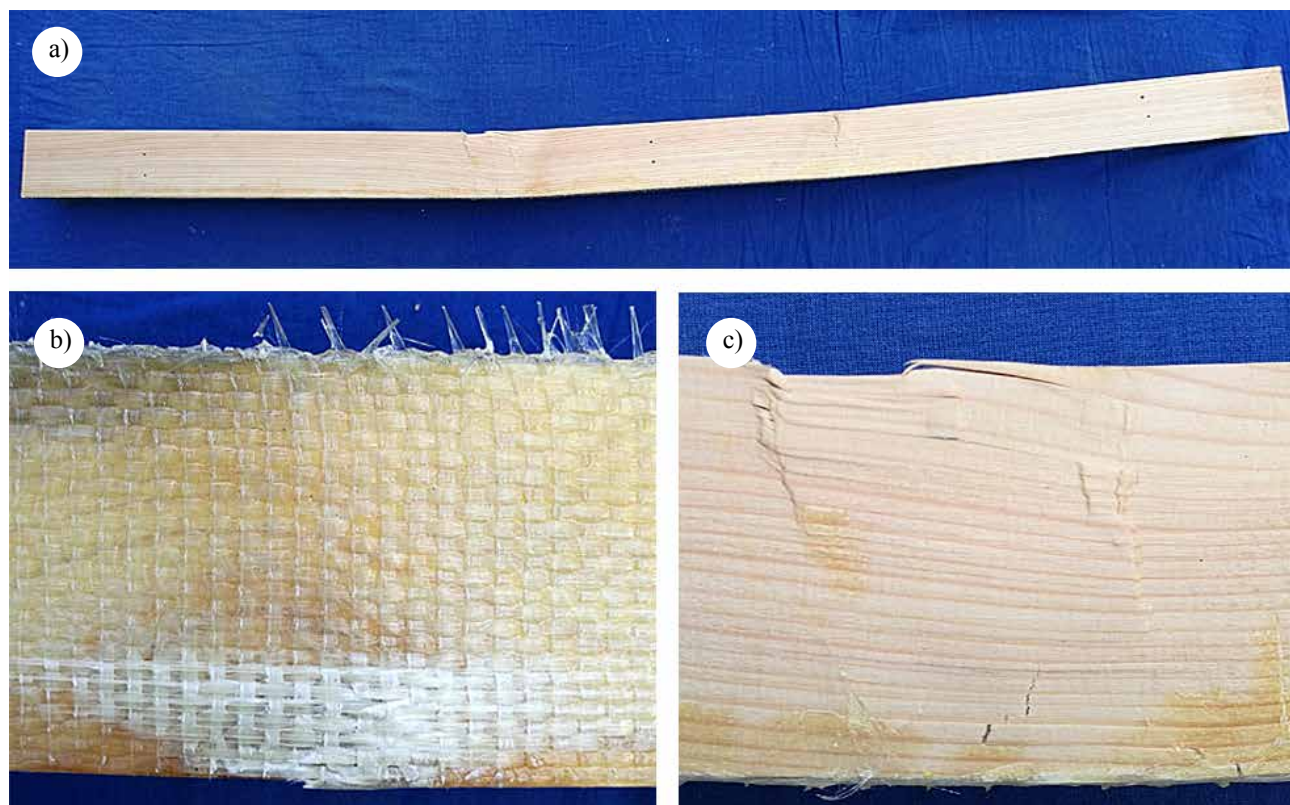


Fig. 5. Failure mode of element strengthened with GFRP sheet: a) general view, b) rupture of GFRP sheet, c) crack propagation in the concentrated force axis

Rys. 5. Zniszczenie belek wzmocnionych włóknem szklanym: a) widok ogólny, b) przerwanie maty, c) propagacja pęknięcia w osi napór obciążających

The results of the four-point bending tests are shown in Table 2. Table provides the values of the failure load, the maximum bending moment, bending strength, test time and deflection.

The average increase of bending strength for beams strengthened with glass and carbon sheets was 15% and 48%, respectively. Significant increase in ductile behavior of strengthened beams was noted for both types of fibers. The growth in deflection at the maximum force was over 200% in comparison to the reference beams.

The moisture content of elements was 12-16%.

Zestawienie wyników badań uwzględniające wartości siły niszczącej, maksymalny moment zginający, wytrzymałość na zginanie, czas badania oraz ugięcie elementów przedstawione zostało w tabeli 2.

Wzrost wytrzymałości na zginanie w przypadku belek wzmocnionych matami szklanymi wyniósł 15%, a przy zastosowaniu mat węglowych wyniósł on 48%. Dla obu rodzajów włókien istotny wzrost ciągliwości elementów został odnotowany. Przyrost ugięcia przy maksymalnej sile wyniósł ponad 200% w stosunku do belek referencyjnych.

Wilgotność próbek wynosiła 12-16%.

Table 2. Test results

Tabela 2. Wyniki badań

Parameter	Reference beams	Beams strengthened with GFRP sheets	Beams strengthened with CFRP sheets
Maximum concentrated force [kN]	14.61	16.85	21.66
Maximum bending moment [kNm]	3.51	4.04	5.20
Bending strength [MPa]	41.10	47.38 (+15%)	60.93 (+48%)
Deflection corresponding to the maximum concentrated force [mm]	29.72	68.84 (+232%)	75.25 (+252%)
Time to failure [s]	254	590	645
The table presents arithmetic means of measured parameters.			

4. SUMMARY

The subject of the tests was analysis of the static work of pine beams with small cross section height strengthened with composite sheets. Glass and carbon fiber reinforced polymer sheets were used as reinforcement.

The results of the preliminary tests carried out showed that strengthening the tensile zone with composite fabrics contributed primarily to the increase of the load-bearing capacity of the beams. The increase in the case of a group of beams reinforced with glass sheets was 15% and 48% in the case of using carbon sheets. In addition, a significant increase in deflection and duration test should be noted for both types of fibers. Therefore, it can be concluded that composite sheets are a beneficial solution for strengthening beams and other bent elements.

4. PODSUMOWANIE

Przedmiotem badań była analiza pracy statycznej sosnowych belek o niskim przekroju wzmocnionych matami kompozytowymi. Jako wzmocnienie zastosowano maty zbrojone włóknem szklanym i węglowym.

Wyniki przeprowadzonych badań wstępnych wskazują, że wzmocnienie strefy rozciąganej za pomocą tkanin kompozytowych wpłynęło przede wszystkim na wzrost nośności belek. Wzrost nośności dla belek wzmocnionych matami szklanymi wyniósł 15% oraz 48% w przypadku zastosowania mat węglowych, dla których jednocześnie odnotowano istotny przyrost modułu sprężystości przy zginaniu. Oprócz tego dla obu typów włókien stwierdzono istotny przyrost ugięcia oraz czasu trwania do zniszczenia. Można zatem stwierdzić, że maty kompozytowe stanowią korzystne rozwiązanie w przypadku wzmacniania belek oraz innych elementów zginanych.

REFERENCES

- [1] Biblis E.J.: *Analysis of wood-fibreglass composite beams within and beyond the elastic region*. Forest Products Journal 15 (2), 1965, pp. 81-88.
- [2] De Jesus A.M.P., Pinto J.M.T., Morais, J.J.L.: *Analysis of solid wood beams strengthened with CFRP laminates of distinct lengths*. Construction and Building Materials 35, 2012, pp. 817-828.
- [3] Gezer H., Aydemir B.: *The effect of the wrapped carbon fibre reinforced polymer material on fire and pine woods*. Materials and Design 31, 2010, pp. 3564-3567.
- [4] <http://www.sp-reinforcement.pl/pl-PL>
- [5] Li Y-F., Tsai M-J., Wei T-F., Wang W-C.: *A study on wood beams strengthened by FRP composite materials*. Construction and Building Materials 62, 2014, pp. 118-125.
- [6] Nowak T.: *Wzmacnianie drewnianych konstrukcji zabytkowych przy użyciu taśm węglowych*. Wiadomości Konserwatorskie 14, 2003, pp. 21-27.
- [7] Kossakowski P.: *Load-bearing capacity of wooden beams reinforced with composite sheets (Nośność belek drewnianych wzmocnionych matami kompozytowymi)*. Structure & Environment, 3 (4), 2011, pp. 14-22.
- [8] PN-EN 338:2016-06 Structural timber. Strength classes.
- [9] PN-EN 408+A1:2012 Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties.
- [10] Raftery G.M., Kelly F.: *Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber*. Composites: Part B 70, 2015, pp. 9-19.
- [11] Theakston F.H.: *A feasibility study for strengthening timber beams with fibre glass*. Canadian Agricultural Engineering, January, 1965, pp. 17-19.

- [12] Wangaard F.F.: *Elastic deflection of wood-fiberglass composite beams*. Forest Products Journal 14(6), 1964, pp. 256-260.
- [13] Yang Y-L., Liu J-W., Xiong G-J.: *Flexural behavior of wood beams strengthened with HFRP*. Construction and Building Materials 43, 2013, pp. 118-124.
- [14] Yahyaiei-Moayyed M., Taheri F.: *Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams*. Composite Structures 93 (2), 2011, pp. 616-628.

Acknowledgments:

This work was supported by Kielce University of Technology, statutory work No. 02.0.06.00/2.01.01.02.0000, MNSC. BKWB.18.002. The authors wish to thank S&P Polska Sp. z o.o. company for provided research materials.

Podziękowania:

Praca powstała dzięki wsparciu finansowemu Politechniki Świętokrzyskiej w ramach pracy statutowej nr 02.0.06.00/2.01.01.02.0000, MNSC.BKWB.18.002. Autorzy pragną również podziękować firmie S&P Polska Sp. z o.o. za przekazane materiały do badań.



JERZY HOŁA
Politechnika Wrocławska
e-mail: jerzy.hola@pwr.edu.pl

LEONARD RUNKIEWICZ
Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie
e-mail: l.runkiewicz@itb.pl

Manuscript submitted 2018.08.02 - revised 2018.09.17
initially accepted for publication 2018.10.10, published in December 2018

METHODS AND DIAGNOSTIC TECHNIQUES USED TO ANALYSE THE TECHNICAL STATE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

METODY I TECHNIKI DIAGNOSTYCZNE STOSOWANE W OCENIE STANU TECHNICZNEGO KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH

DOI: 10.30540/sae-2018-030

Abstract

The paper presents the problems concerning the principles of developing expertise and performing tests on reinforced concrete structures. The situations that justify the need to provide expertise, the subject of which are constructions made of reinforced concrete, are described. A layout of the content of expertise that is usually adopted in practice has been included and commented on. The basic principles that should be followed when diagnosing the structures in question are provided. The available diagnostic methods and techniques, including non-destructive and semi non-destructive ones, are reviewed. This review is enriched with classifications that facilitate the selection of specific methods for individual diagnostic needs. In addition, useful literature with regards to the discussed topic has been indicated.

Keywords: expertise, reinforced concrete structures, diagnostics, diagnostic methods.

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę dotyczącą zasad wykonywania ekspertyz i badań konstrukcji żelbetowych. Przybliżono sytuacje uzasadniające potrzebę sporządzania ekspertyz, których przedmiotem są konstrukcje wykonane z betonu zbrojonego. Zamieszczono i skomentowano, przyjmowany zazwyczaj w praktyce układ treści ekspertyzy. Podano podstawowe zasady, których należy przestrzegać podczas diagnozowania przedmiotowych konstrukcji. Dokonano przeglądu dostępnych metod i technik diagnostycznych, w tym nieniszczących i seminieniszczących. Przegląd ten wzbogacono klasyfikacjami ułatwiającymi doboru odpowiednich metod do konkretnych potrzeb diagnostycznych. Ponadto wskazano przydatną w rozpatrywanym temacie literaturę.

Słowa kluczowe: ekspertyza, konstrukcje żelbetowe, diagnostyka, metody diagnostyczne.

1. INTRODUCTION

With regards to the title of the paper, the authors assume that it will be most useful to those who have not yet prepared expert opinions on reinforced concrete structures, or those who have relatively little experience of this subject. Bearing the above in mind, it seems reasonable to introduce some situations that justify the need to prepare expertise reports of such constructions.

Despite the common belief about the durability of reinforced concrete structures, they are subjected to progressive degradation during exploitation.

1. WPROWADZENIE

W nawiązaniu do tytułu referatu autorzy przyjęli założenie, że praca powinna być przydatna przede wszystkim tym, którzy jeszcze nie sporządzali ekspertyz konstrukcji żelbetowych lub posiadają w tym temacie stosunkowo niewielkie doświadczenie. Mając powyższe na uwadze, wydaje się być zasadnym przybliżenie sytuacji uzasadniających potrzeby sporządzania opracowań o charakterze ekspertyzowym, których przedmiotem są takie konstrukcje.

Pomimo powszechnego przeświadczenia o trwałości konstrukcji żelbetowych ulegają one podczas eksplo-

Degradation mechanisms that are specific to constructions made of concrete and reinforcing steel include those related to physical phenomena, mechanisms related to chemical phenomena and also biological strength mechanisms caused by the influence of the above mentioned factors. In practice, there is usually a combination of various mechanisms in the form of complex degradation processes that cause damage to the structure, which in turn determines their safety, reliability and durability.

The activity and practical significance of the above-mentioned degradation mechanisms varies depending on the material from which the construction is made, which is shown in Table 1 for reinforced concrete and steel structures.

atacji postępującej w czasie degradacji. Spośród mechanizmów degradacji specyficznych dla konstrukcji wykonanych z betonu i stali zbrojeniowej należy wymienić te związane ze zjawiskami fizycznymi, mechanizmy związane ze zjawiskami chemicznymi oraz mechanizmy wytrzymałościowe biologiczne powodowane oddziaływaniem ww. czynników. W praktyce zazwyczaj występuje kombinacja złożona z różnych mechanizmów w postaci złożonych procesów degradacyjnych powodujących uszkodzenia konstrukcji, decydujących w efekcie o jej bezpieczeństwie, niezawodności i trwałości.

Aktywność i praktyczne znaczenie wymienionych mechanizmów degradacji są zróżnicowane w zależności od materiału, z którego konstrukcja jest wykonana, co przykładowo dla konstrukcji żelbetowej i stalowej ilustruje tabela 1.

Table 1. Activity of degradation mechanisms depending on the material of the structure, which is based on [2]

Tabela 1. Aktywność mechanizmów degradacji w zależności od materiału konstrukcji, na podstawie [2]

Mechanisms of degradation	Construction type	
	Reinforced concrete	Steel
PHYSICAL		
Accumulation of inorganic contamination	●	●
Cyclical freezing / defrosting	●	○
Erosion	●	○
Crystallization	●	
The impact of extreme temperatures	○	●
Creeping	○	
Relaxation	●	○
Shrinkage	●	
Overloads	●	●
Washout	●	
Fatigue	○	●
Changes in geotechnical conditions	●	●
CHEMICAL		
Carbonation of concrete	●	
Corrosion	●	●
Impacts of aggressive substances	●	●
Reactions between material components	●	
BIOLOGICAL		
Accumulation of organic contamination	●	●
Impact of micro-organisms	●	●
Impact of plants	●	○
Designation: ● – basic mechanism; ○ – additional mechanism		

It is worth noting that the intensity of degradation processes may vary in various operational situations. It can be slowed down when a structure is properly protected against adverse environmental impacts,

Warto zauważyć, że w różnych sytuacjach eksploatacyjnych intensywność procesów degradacyjnych może być różna. Może ona być spowolniona gdy konstrukcja jest należycie zabezpieczona przed nie-

but it can also be accelerated, e.g. due to sudden mechanical factors (overloads, strikes, explosions), the occurrence of extraordinary weather events or other random events (extreme precipitation, fire), improper usage, the lack of care of a structure during its operation, and also construction or design errors, etc.

The consequence of degradation processes, when the initial durability of the structure becomes insufficient, is the appearance of defects that are more or less severe and which require repair or reinforcement [1, 3, 4]. However, it can also be the cause of more serious damage, including a construction catastrophe or failure.

Bearing in mind durability, including the safety and reliability of reinforced concrete structures, such structures are subjected to periodic technical inspections in accordance with the requirements of Construction Law [5].

The determination, as a result of the periodical assessment, of significant irregularities and major defects or damage to particular elements or to the entire structure usually results in the need to conduct a much more detailed and advanced procedure, which is referred to as emergency diagnostics [4]. Its results are important, but not the only component of expertise. The need to conduct this type of diagnostics may also be signalled, depending on the situation, by a user, technical supervisor or state construction supervisor.

Performing detailed diagnostics of reinforced concrete structures for the purpose of an expert report may also be required in order to assess the possibilities and conditions for implementing planned structural modernizations, superstructures, extensions, or technological changes in facilities that can result in changes in the nature or value of existing loads. In this case, such diagnostics are called target ones and can be of a two-stage character [4]. As with emergency diagnostics, they require a whole range of proceedings, among which are technical (diagnostic) tests and analysis that require the skilful use of modern research and analytical methods. The necessity of using such methods is needed in order to make a sufficiently accurate assessment of the technical characteristics of a structure, including the identification of defects. This in turn creates the basis for the correct interpretation and assessment of the occurring phenomena, as well as for the designation of practical remedial actions.

korzystnymi oddziaływaniami środowiskowymi, ale może też ulec przyspieszeniu, na przykład w wyniku nagłego zadziałania czynników mechanicznych (przeciążenie, uderzenie, wybuch), wystąpienia nadzwyczajnych czynników pogodowych czy też innych zdarzeń o charakterze losowym (ekstremalne opady, pożar), nieprawidłowej eksploatacji, braku dbałości o konstrukcję w czasie jej użytkowania, błędów wykonawczych lub projektowych itd.

Konsekwencją procesów degradacyjnych, w sytuacji gdy trwałość pierwotna konstrukcji staje się niewystarczająca, jest pojawienie się w niej mniej lub bardziej poważnych uszkodzeń wymagających naprawy lub wzmocnienia [1, 3, 4]. Ale może to być też przyczyną wystąpienia poważniejszych zniszczeń, w tym awarii lub katastrofy konstrukcji.

Mając na uwadze trwałość, w tym bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji żelbetowych, poddaje się je okresowym przeglądom technicznym, zgodnie z wymaganiami ustawy *Prawo budowlane* [5].

Stwierdzenie w wyniku dokonanej oceny okresowej istotnych nieprawidłowości, poważniejszych usterek lub uszkodzeń poszczególnych elementów lub całej konstrukcji skutkuje zwykle potrzebą przeprowadzenia znacznie bardziej szczegółowego i zaawansowanego w stosunku do okresowego przeglądu postępowania, nazywanego fachowo diagnostyką doraźną [4]. Jej rezultaty stanowią istotny, ale nie jedyny składnik opracowania zwanego ekspertyzą. Potrzebę przeprowadzenia tego rodzaju diagnostyki może też sygnalizować, w zależności od zaistniałej sytuacji, użytkownik, nadzór techniczny albo państwowy nadzór budowlany.

Przeprowadzanie szczegółowych diagnostyk konstrukcji żelbetowych na użytek opracowania ekspertyzowego może też wynikać z potrzeby oceny możliwości i warunków przeprowadzania planowanych modernizacji konstrukcyjno-budowlanych, nadbudów, rozbudów albo zmian technologicznych w obiektach skutkujących zmianami charakteru czy wartości dotychczasowych obciążeń. W tym wypadku diagnostyki takie nazywane są docelowymi, i mogą mieć charakter dwuetapowy [4]. Podobnie jak diagnostyki doraźne wymagają one przeprowadzania całego szeregu postępowania, wśród których integralne są badania techniczne (diagnostyczne) i analizy, wymagające z kolei umiejętnego stosowania nowoczesnych metod badawczych i analitycznych. Konieczność stosowania takich metod jest niezbędna w celu dokonania dostatecznie dokładnej oceny właściwości technicznych konstrukcji, w tym m.in. identyfikacji wad, co stwarza podstawy zarówno do prawidłowej

The subject of expertise may not only include reinforced concrete structures in use, but also structures that are rebuilt, modernized, excluded from operation, are after failure, or those that have suffered from a catastrophe. It can also involve dismantled structures, and in this case it is not only existing conditions, but also demolition designs and erected constructions that are subjected to analyses. In such a situation, existing and design states should be analysed. In special cases, expert opinions may also apply to designed reinforced concrete structures. This is possible at the stage of design, in which such structures are documented using drawings, calculations and descriptions [6].

As was already mentioned, the results of diagnostic and analytical procedures (diagnosis) constitute a very important and fundamental part of expert reports. However, expertise would not be complete and useful for the purpose it is intended for if, due to the results of these proceedings, there were no formulations of genesis, rationally justified hypotheses, forecasts and formulated directives [6].

The intention of the authors of this work is to present the issues covered in the title, including the providing of the layout of the content of an expertise report usually adopted in practice along with its comments; drawing attention to the leading role of diagnostic procedures in expertise reports; providing their general principles; reviewing available diagnostic methods and techniques; proposing various classifications and signalling descriptions of selected methods in order to facilitate the selection of a specific method for an individual diagnostic need; providing methods of analysis; and an indication of a bibliography of this topic that can be useful primarily to those who have not yet developed expertise of reinforced concrete structures.

2. LAYOUT OF THE CONTENT OF EXPERTISE REPORTS

Figure 1 presents the usually adopted layout of the content of an expertise report, the object of which is a reinforced concrete structure. This clear layout can consist of a total of eight chapters (points), which are marked using Arabic numerals in brackets for the purpose of the article. When commenting on it, largely following work [6], the following problems should be briefly mentioned.

interpretacji i oceny występujących zjawisk, jak też formułowania praktycznych działań zaradczych.

Przedmiotem opracowań ekspertyzowych mogą być nie tylko konstrukcje żelbetowe użytkowane, ale również rozbudowywane, modernizowane, wyłączone z użytkowania, po awarii lub te które uległy katastrofie. Mogą nimi być też konstrukcje rozbierane, i w tym przypadku analizom poddawane są nie tylko stany zastane, ale i projekty rozbiórek, konstrukcje wznoszone, i wtedy należy analizować zarówno stany istniejące jak i stany projektowe. W szczególnych przypadkach ekspertyzom mogą zostać poddane konstrukcje żelbetowe projektowane, i jest to możliwe w takim stadium projektowania, w którym zostały one udokumentowane rysunkami, obliczeniami i opisami [6].

Jak to już zasygnalizowano rezultaty postępowań diagnostycznych i analitycznych (diagnoza) stanowią bardzo ważną i podstawową część opracowań ekspertyzowych. Jednak ekspertyzy nie byłyby kompletne i przydatne do celu, któremu powinny służyć, gdyby w następstwie rezultatów tych postępowań zabrakło w nich sformułowań genezy, racjonalnie uzasadnionych hipotez, określenia prognoz i sformułowanych dyrektyw [6].

Zamierzeniem autorów niniejszej pracy jest przybliżenie problematyki ujętej w tytule, w tym m.in. podanie przyjmowanego zazwyczaj w praktyce układu treści ekspertyz wraz z ich skomentowaniem, zwrócenie uwagi na wiodącą rolę postępowania diagnostycznego w ekspertyzach i podanie ich ogólnych zasad, dokonanie przeglądu dostępnych metod i technik diagnostycznych, w tym zaproponowanie różnorodnych ich klasyfikacji i sygnałnych opisów wybranych metod w celu ułatwienia doboru konkretnej metody do konkretnej potrzeby diagnostycznej, sposobów analiz i ponadto wskazanie, z myślą przede wszystkim o tych, którzy jeszcze nie wykonywali do tej pory ekspertyz konstrukcji żelbetowych, przydatnej w tym temacie bibliografii.

2. UKŁAD TREŚCI EKSPERTYZY

Zazwyczaj przyjmuje się następujący, zilustrowany rysunkiem 1, układ treści ekspertyzy, której przedmiotem jest konstrukcja żelbetowa. Ten przejrzysty układ może tworzyć w sumie osiem rozdziałów (punktów), oznaczonych na użytek niniejszej pracy cyframi arabskimi w nawiasie. Komentując go, w dużej mierze za pracą [6], należy w skrócie wspomnieć o następujących problemach.

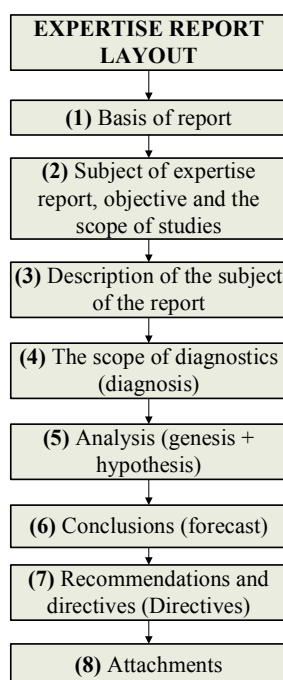


Fig. 1. The common layout of an expertise report of reinforced concrete structures in the form of a block diagram

Rys. 1. Zwyczajowy układ ekspertyzy konstrukcji żelbetowych w postaci schematu blokowego

The basis of the report (1) should included the following: a formal basis consisting of the data regarding the order and the concluded contract; dates of local inspections and visual inspections; the materials used to develop the expertise, emphasizing data received from clients and that obtained from other sources; and also used literature, standards, regulations and recommendations.

The subject of the expertise report, objectives and the scope of studies (2) should be specified unambiguously and precisely, because shortcomings in this area can be used in the case of civil law disputes.

The description of the subject of the report (3) should be concise, and if necessary supplemented with figures, sketches or photographs. It should contain the necessary dimensions of the structure, the type of foundation, the soil and water conditions, and also the possible environmental impacts, e.g. corrosive, paraseismic or dynamic influences.

The scope of diagnostics (diagnostic tests) (4) should be selected with regards to the purpose and scope of expertise. In the case of reinforced concrete structures, they may be broad and include, among others: an analysis of technical documentation, an assessment of the physical conditions of entire structures or their fragments, various tests of structures or their fragments, geotechnical investigations of soil substrate, surveying and inventory tests of structures, specialist tests of concrete and reinforcing steel, environmental tests, and also the identification of defects and damage.

W odniesieniu do podstawy opracowania (1) należy dokładnie podawać: formalną podstawę w rozumieniu danych o zleceniu i zawartej umowie, daty przeprowadzanych wizji lokalnych i badań wizualnych, materiały wykorzystane do opracowania ekspertyz, z wyszczególnieniem danych otrzymanych od zleceńodawców i uzyskanych z innego źródła, wykorzystaną literaturę, normy, przepisy i zalecenia.

Przedmioty ekspertyz, cele i zakresy opracowań (2) powinny być określone jednoznacznie i precyzyjnie, bo uchybienia w tym względzie mogą zostać wykorzystane w wypadku sporów natury cywilnoprawnej.

Opis przedmiotu opracowania (3) powinien być w zasadzie zwięzły, w miarę potrzeb uzupełniony o rysunki lub szkice i fotografie, zawierający niezbędne wymiary konstrukcji, podający sposób posadowienia i warunki gruntowo-wodne oraz ewentualne oddziaływania środowiska, np. korozyjnego, wpływów parasejsmicznych czy dynamicznych.

Zakresy diagnostyk (badań diagnostycznych) (4) należy dobierać do celu i zakresu ekspertyz. W przypadku konstrukcji żelbetowych mogą być one szerokie i obejmować m.in.: analizy dokumentacji technicznych, oceny stanów technicznych całych konstrukcji lub ich fragmentów, różnorodne badania konstrukcji lub ich fragmentów, badania geotechniczne podłoża gruntowego, badania geodezyjne i inwentaryzacyjne konstrukcji, badania specjalistyczne betonu i stali zbrojeniowej, badania środowiskowe, identyfikację wad i uszkodzeń. Ponadto mogą one

In addition, they may include laboratory tests and trial loads. Bearing in mind the numerous cases that show that a structure does not work as it was designed, but as it was made, it is justified to identify static schemes and loads of structures [6]. For the purpose of diagnostics, modern non-destructive and semi-destructive testing methods should be used, as well as destructive methods if possible. These non-collated sets of aforementioned diagnostic activities consist of a process of explaining the causes of occurred situations or phenomena, the result of which are diagnoses that are helpful when ordering the observed phenomena. Moreover, they facilitate the generalization of experience that was gained during the evaluation of cases [6].

Analyses of the occurring phenomena, e.g. in the form of any existing damage and defects, and the determination of the causes of their occurrence should be included in the next chapter (5). This chapter is based on the results of measurements and diagnostic tests of the evaluated structures, which are helpful in static, dynamic and other calculations, as well as in variant analyses and assessments of the safety and reliability of a structure, including stability and the maintenance of ultimate limit states and serviceability limit states. If the volume of the calculations, including numerical ones, is significant, moving them to attachment (8) should be considered. However, this chapter should still include results in the form of, e.g. tabular summaries.

As a result of the calculations and analyses, the difference between the existing and the desired state is determined, and the conditions of the occurrence of phenomena (genesis) and their significance are specified. On their basis, the hypotheses that explain the occurred phenomena are formulated. If there are several hypotheses, and they are verified in order to determine the most probable, then the results of these verifications that were performed either empirically or on the basis of additional tests should be included in this chapter.

Subsequent chapters (6) and (7) of expertise reports involve conclusions (forecasts) formulated on the basis of the results of diagnostic actions, calculations and analyses obtained in (4) and (5), as well as recommendations and directives. Further proceedings with structures, concerning, among others: the improvement of the existing physical condition, meeting the basic requirements resulting from Construction Law, the concept of repairs and reinforcements, guidelines regarding repair

obejmować badania laboratoryjne oraz obciążenia próbne. Mając na uwadze liczne przypadki pokazujące, że konstrukcja pracuje nie tak jak została zaprojektowana, ale tak jak została wykonana, zasadne są identyfikacje na obiektach schematów statycznych i obciążeń konstrukcji [6]. Na użytek diagnostyk należy wykorzystywać nowoczesne metody badawcze nieniszczące i seminieniszczące, a także, w miarę możliwości, metody niszczące. Te niebędące zbiorami zamkniętymi wymienione działania diagnostyczne są procesem wyjaśniania przyczyn zaistniałych sytuacji czy zjawisk, wynikiem których są diagnozy pomocne w porządkowaniu zaobserwowanych zjawisk i ułatwiające uogólnienie zdobytych podczas rozpatrywanych przypadków doświadczeń [6].

Analizy występujących zjawisk, na przykład w postaci zaistniałych uszkodzeń i wad, oraz określenie przyczyn ich powstania zawarte powinna być w kolejnym rozdziale (5). Ich podstawy stanowią rezultaty pomiarów i badań diagnostycznych przedmiotowych konstrukcji pomocne w przeprowadzanych obliczeniach statycznych, dynamicznych i innych, w wariantowych analizach i ocenach bezpieczeństwa oraz niezawodności konstrukcji, w tym stateczności, zachowania stanów granicznych nośności i stanów granicznych użytkowalności. Jeżeli obszerność obliczeń, w tym numerycznych, jest znaczna należy rozważyć przeniesienie ich do załącznika (8), z pozostawieniem jednak w tym rozdziale rezultatów w postaci na przykład tabelarycznych zestawień. W wyniku obliczeń i analiz zostaje określona różnica między stanem istniejącym a pożądanym, warunki powstania i znaczenie zaistniałych zjawisk (geneza), na której to podstawie formułowane są następnie hipotezy wyjaśniające zaistniałe zjawiska. Jeżeli hipotez jest kilka i poddawane są one sprawdzeniu w celu ustalenia najbardziej prawdopodobnej, to rezultaty tych sprawdzeń, wykonywanych czy to na drodze empirycznej, czy na podstawie dodatkowo przeprowadzonych badań, powinno się umieścić w tym rozdziale.

Kolejnymi rozdziałami (6) i (7) tak ułożonych treści ekspertyz są w kolejności wnioski (prognozy) sformułowane na podstawie uzyskanych w (4) i (5) rezultatów działań diagnostycznych, obliczeń i analiz, a także zalecenia i polecenia (dyrektywy). W tych miejscach ekspertyz formułuje się zazwyczaj toki dalszego postępowania z konstrukcjami, dotyczący m.in.: poprawy istniejącego stanu technicznego, spełnienia wymagań podstawowych wynikających z Prawa budowlanego, koncepcji napraw i wzmocnień, wytycznych napraw i wzmocnień, rozbiórki, itp.

and reinforcements or demolition, etc., are usually formulated in these places of expertise reports.

In attachments (8), it is worth including, among others: photographic documentation; figures with an inventory of defects, damage and the marking of places of excavations; extensive calculations, etc. Placing these “materials” according to the presented scheme (Fig. 1) has a positive impact on the legibility of expertise reports. Documents in the form of certificates that confirm the membership of experts to the Chamber of Civil Engineers, photocopies of their construction qualifications, or specialized qualifications should also be placed in (8).

3. DIAGNOSTIC PROCEDURES AND THEIR LEADING ROLE IN EXPERTISE REPORTS

3.1. General principles of proceedings

As previously stated in the introduction, the results of diagnostic procedures constitute the basis for duly prepared expertise reports that are useful for the purposes they are intended for. General rules, which should be taken into account in such proceedings, are given below and follow those of the authors of papers [4, 7].

Existing reinforced concrete structures should be assessed in accordance with current standards. Previous standards, which were in force at the time of designing these constructions, can only constitute the so-called information background. The levels of safety and reliability of a structure should not be lower than the levels required when designing new structures.

Depending on requirements, entire reinforced concrete structures, or only their selected elements, e.g. damaged or in need of structural changes, repairs or modernization, may be subjected to diagnostic procedures. In such cases, the diagnostic procedures should also cover the other elements of the structure for which there is a suspicion that the required levels of reliability and safety of use could be reduced.

In the examinations of reinforced concrete structures, or elements of these structures, the actual state and conditions of their work should be taken into account.

The choice of methods and diagnostic techniques should be adapted to the physical condition of the examined structures. Non-destructive and semi-destructive methods are especially recommended. In exceptional cases, trial loads can also be used. The used methods should ensure the obtaining of results of both a required accuracy and of a numerous enough

W załącznikach (8) warto umieścić m.in. dokumentacje fotograficzne, dokumentacje rysunkowe z inwentaryzacjami wad i uszkodzeń oraz zaznaczeniem miejsc wykonanych odkrywek, obszerne obliczenia itp. Umieszczenie „materiałów”, zgodnie z przedstawionym schematem (rys. 1), wpływa korzystnie na czytelność opracowań ekspertyzowych. W załączniku (8) powinny również zostać umieszczone dokumenty w postaci zaświadczeń o członkostwie autorów ekspertyz w Izbie Inżynierów Budownictwa, kserokopie posiadanych przez nich uprawnień budowlanych, uprawnień specjalistycznych itp.

3. POSTĘPOWANIA DIAGNOSTYCZNE I ICH WIODĄCA ROLA W EKSPERTYZACH

3.1. Ogólne zasady postępowania

Jak stwierdzono we wprowadzeniu do opracowania rezultaty postępowań diagnostycznych stanowią podstawy należyte sporządzonych opracowań ekspertyzowych przydatnych do celów, którym mają służyć. Poniżej, za autorami prac [4, 7], podano zasady ogólne, które warto wziąć pod uwagę w tych postępowaniach.

Istniejące konstrukcje żelbetowe należy oceniać zgodnie z aktualnymi normami. Wcześniejsze normy, obowiązujące w okresie projektowania tych konstrukcji, mogą stanowić tylko tzw. „tło” informacyjne. Poziomy bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji nie powinny być niższe od poziomów wymaganych przy projektowaniu nowych konstrukcji.

Postępowaniom diagnostycznym mogą być poddane, w zależności od potrzeb, całe konstrukcje żelbetowe albo tylko wybrane ich elementy, na przykład uszkodzone albo przewidziane do zmian konstrukcyjnych lub napraw albo do modernizacji. W takich przypadkach postępowaniami diagnostycznymi należy objąć też inne elementy konstrukcji, w stosunku do których istnieje podejrzenie, że mogło ulec dla nich obniżenie wymaganych poziomów niezawodności i bezpieczeństwa użytkowania.

W badaniach konstrukcji żelbetowych lub elementów składowych tych konstrukcji należy uwzględniać rzeczywisty stan i rzeczywiste warunki ich pracy.

Wybór metod i technik diagnostycznych należy dostosować do warunków i stanu technicznego diagnozowanych konstrukcji. Szczególnie polecane są metody nieniszczące i seminieniszczące. W wyjątkowych sytuacjach można zastosować obciążenia próbne. Stosowane metody powinny zapewnić uzyskanie wyników o wymaganej dokładności i na tyle

amount so that statistical evaluation required by the standard provisions is possible.

Local inspections and visual examinations of reinforced concrete structures that are in use or excluded from use should be preceded by an analysis of the available technical documentation and other documents, which include, among others: building permit designs; detailed execution designs; other available projects, which were developed in the past and concern renovations, modernizations or adaptation; construction logs; logbooks; and also opinions, judgments and expert reports about the construction. The source of information may also be interviews conducted with contractors of constructions, users, managers, state construction supervisors, etc.

During local inspections and tests, attention should not be paid to factors that currently directly affect the ultimate or serviceability limit states of the assessed reinforced concrete structures, but should be paid to those that indirectly in the long-term can significantly affect safety and reliability. Such factors may include, e.g.: an aggressive environment, a lack of anti-moisture protections, vibrations transmitted from the neighbourhood.

For the safety and reliability of reinforced concrete structures, it is very important to make assessments based on current real data including, among others: dimensions of elements; properties and characteristics of concretes, including their strength and homogeneity; properties and characteristics of reinforcing steels, including their placement; concrete covers; corroding; parameters of prefabricated elements; loads and their character; models (schemes) of work; deformations; location of damage and defects; and also parameters of the soil medium.

3.2. Diagnosis methods and techniques

According to [4, 7], the types of used diagnostic methods and techniques depend, to a large extent, on the physical condition of diagnosed reinforced concrete structures. As mentioned above, methods that enable results with a required accuracy to be obtained in order for tested structures to be statistically evaluated with the accuracy required by relevant regulations, and also current states of the assessed structures to be characterized, should be used.

Very diverse methods and techniques are used in the diagnostics of reinforced concrete structures. The basic groups were classified by the author of paper [2], and are illustrated in Figure 2. The group

liczných, aby možliwa była ocena statistyczna wymagana przez przepisy normowe.

Wizje lokalne i badania wizualne konstrukcji żelbetowych, zarówno eksploatowanych, jak i wyłączonych z użytkowania, powinno się poprzedzić analizą dostępnej dokumentacji technicznej oraz innych dokumentów, do których należy zaliczyć między innymi: projekty budowlane, projekty wykonawcze, inne dostępne projekty przeprowadzonych w przeszłości remontów albo modernizacji lub adaptacji, dziennik budowy, książkę obiektu, opinie, orzeczenia i ekspertyzy dotyczące konstrukcji. Źródłem informacji mogą być też wywiady przeprowadzone z wykonawcami konstrukcji, z jej użytkownikami i zarządcami, państwowym nadzorem budowlanym itp.

Podczas wizji lokalnych oraz badań należy zwracać uwagę na czynniki, które aktualnie nie wpływają bezpośrednio na stany graniczne nośności lub użytkowalności ocenianych konstrukcji żelbetowych, ale pośrednio, w dłuższym okresie, mogą istotnie wpłynąć na ich bezpieczeństwo i niezawodność. Przykładami takich czynników mogą być: agresywne środowisko, brak zabezpieczeń przeciwwilgociowych, drgania przenoszące się z sąsiedztwa.

Dla bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych jest bardzo istotne, aby oceny dokonywać w oparciu o aktualne rzeczywiste dane obejmujące m.in.: wymiary elementów, właściwości i cechy betonów, w tym ich wytrzymałości i jednorodności, właściwości i cechy stali zbrojeniowych, w tym ich rozmieszczenie, otulenia betonem, skorodowanie, parametry elementów prefabrykowanych, obciążenia i ich charakter, modele (schematy) pracy, odkształcenia, lokalizację uszkodzeń i wad, parametry podłoża gruntowego.

3.2. Metody i techniki diagnozowania

Według prac [4, 7] rodzaje stosowanych metod i technik diagnozowania zależą w dużym stopniu od warunków i stanów technicznych diagnozowanych konstrukcji żelbetowych. O czym już wcześniej powiedziano powinno się stosować metody pozwalające na uzyskanie rezultatów o wymaganych dokładnościach, umożliwiające statystyczne oceny badanych konstrukcji z dokładnością wymaganą przez stosowane przepisy, pozwalających na scharakteryzowanie aktualnych stanów ocenianych konstrukcji.

W diagnostyce konstrukcji żelbetowych wykorzystuje się bardzo zróżnicowane metody i techniki. Podstawowe wśród nich grupy sklasyfikowane zosta-

of methods classified as physical uses physical phenomena; chemical methods use chemical processes; and biological methods are related to biological processes.

ły przez autora pracy [2], czego ilustracją jest rysunek 2. Grupa metod zaliczanych do fizycznych wykorzystuje zjawiska fizyczne, metody chemiczne posługują się procesami chemicznymi, a biologiczne związane są z procesami biologicznymi.

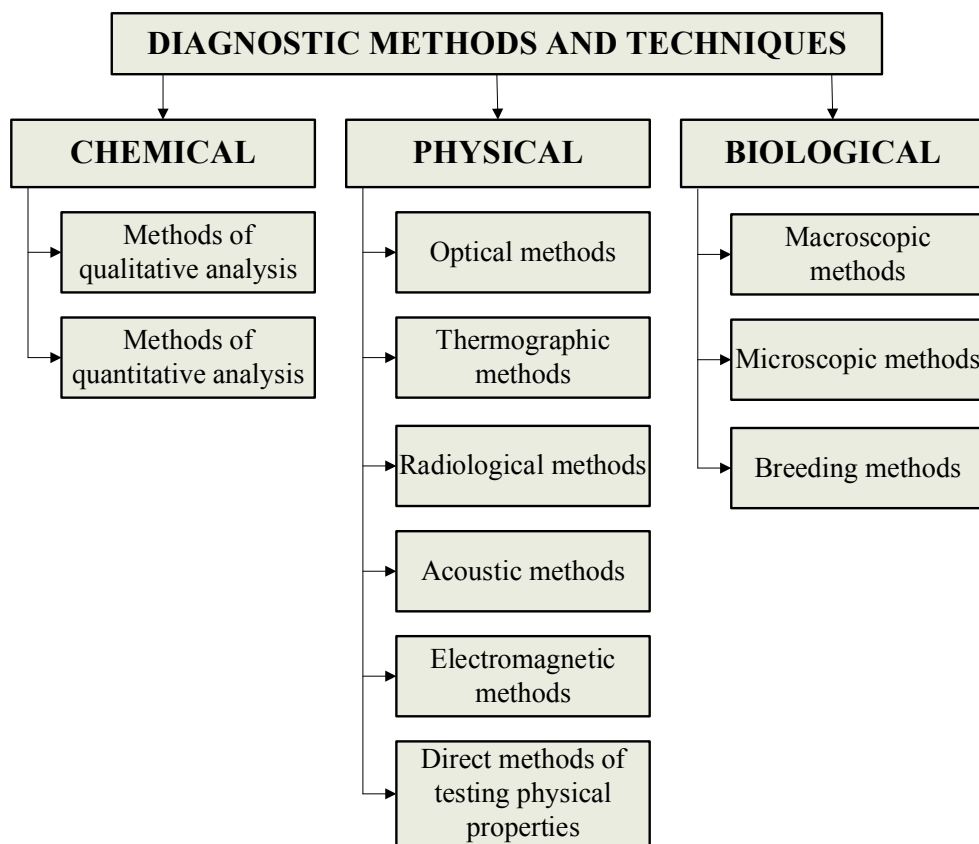


Fig. 2. Basic diagnostic methods and techniques of reinforced concrete structures, on the basis of [2]
 Rys. 2. Podstawowe metody i techniki diagnostyczne konstrukcji żelbetowych, na podstawie [2]

The groups listed in Figure 2 have a relatively large number of diagnostic methods and measurement techniques assigned to them. They are summarized in Table 2, which is also based on paper [2]. Areas of suitability regarding geometry studies, tests of the properties of construction materials, and also detecting and identifying damage, including gaining information on whether the methods are basic in the sense of universal applicability or complementary, were determined for these methods.

Wyszczególnionym na rysunku 2 grupom przyporządkowano stosunkowo dużą liczbę metod diagnostycznych i technik pomiarowych, zestawiając je w tabeli 2. W tym wypadku też bazowano na pracy [2]. Określono dla tych metod obszary przydatności w badaniach geometrii, w badaniach właściwości materiałów konstrukcji, w wykrywaniu oraz identyfikacji uszkodzeń, wraz z podaniem informacji, czy dane metody są podstawowe w rozumieniu powszechności stosowania, czy uzupełniające.

Table 2. Measuring methods and techniques that are useful in diagnosing reinforced concrete structures [2]
Tabela 2. Metody i techniki pomiarowe przydatne w diagnozowaniu konstrukcji żelbetowych [2]

Diagnostic methods and techniques	Geometry			Material properties							Damage					
	Spatial shape	Dimensions of elements	Identification of reinforcement	Type of material	Strength/homogeneity	Deformation modulus	Porosity/absorbability	Frost resistance	Humidity	Chemical composition	Deformations	Material destruction	Material losses	Discontinuity of the material	Pollution	Position changes
PHYSICAL																
Direct visual tests	●	○		●					○		●	○	●	●	●	●
Indirect visual tests	●	○		●					○		●	○	●	●	●	●
Surveying methods	●	●									●		○			●
Laser methods	●	●									●					●
Thermographic methods			○						○			○	○	○		
Radiographic methods			●									○	●	●		
Radioscopic methods			○									○	●	●		
Computed tomography			●									○	●	●		
Impulse methods		●					●	●				○	●	●		
Ultrasonic methods		●					●	●				○	●	●		
Ultrasonic tomography			○									○	●	●		
Acoustic emission														●		
Magnetic methods			●													
Radar methods	○	○	●									○	●	●		
Electromagnetic induction methods			●													
Measurements of electrical potential									○			●	●			
Measurements of electrical resistance									○			●	●			
Direct geometric measurements	●	●	○								●	○	●	●	●	●
Penetrant methods					●							○				
Sclerometric methods					●	○						○				
Pressure methods							●					●				
Field methods for testing physical properties					●	●						●				
Laboratory methods for testing physical properties				●	●	●	●	●	●			●				
CHEMICAL																
Methods of qualitative chemical analysis				○						○		○			○	
Methods of quantitative chemical analysis				●						●		●			●	
BIOLOGICAL																
Macroscopic methods												●			●	
Microscopic methods												●			●	
Breeding methods												○			○	
Designation: ● – Basic mechanism; ○ – Additional mechanism																

3.2.1. Non-destructive methods and techniques

Among the available methods and diagnostic techniques, non-invasive and non-destructive methods, the use of which does not disturb the constructions of tested structures, are of great usefulness with respect to reinforced concrete constructions. Figure 3 shows the general division of the non-destructive methods that are useful in the diagnostics of the durability, safety and reliability of reinforced concrete structures [9].

In turn, Figure 4 contains a detailed summary of non-destructive methods that are useful in the assessment of strength and homogeneity of concrete, whereas Figure 5 shows a list of non-destructive and semi-destructive methods that are useful when assessing features other than strength [11]. Short descriptions of some of the methods listed in Figures 3-5, including those currently considered as modern, are listed below. Detailed descriptions of most of the methods mentioned in Figures 3-5 can be found, among others, in papers [2, 7, 8, 10].

3.2.1. Metody i techniki nieniszczące

Spośród dostępnych metod i technik diagnostycznych dużą przydatnością w odniesieniu do konstrukcji żelbetowych cechują się metody nieinwazyjne, nieniszczące, których stosowanie nie powoduje naruszenia struktur badanych konstrukcji. Rysunek 3 przedstawia ogólny podział nieniszczących metod przydatnych w diagnostykach prowadzonych na użytek trwałości, bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych [9]. Z kolei rysunek 4 zawiera szczegółowe zestawienie metod nieniszczących przydatnych do oceny wytrzymałości i jednorodności betonu, a rysunek 5 zestawienie metod nieniszczących i seminieniszczących przydatnych do oceny innych cech niż wytrzymałość [11]. Krótkie sygnałne opisy niektórych z wyszczególnionych na rysunkach 3-5 metod, w tym tych uznawanych obecnie za nowoczesne, zamieszczono poniżej. Szczegółowe opisy większości wymienionych na rysunkach 3-5 metod można znaleźć między innymi w pracach [2, 7, 8, 10].

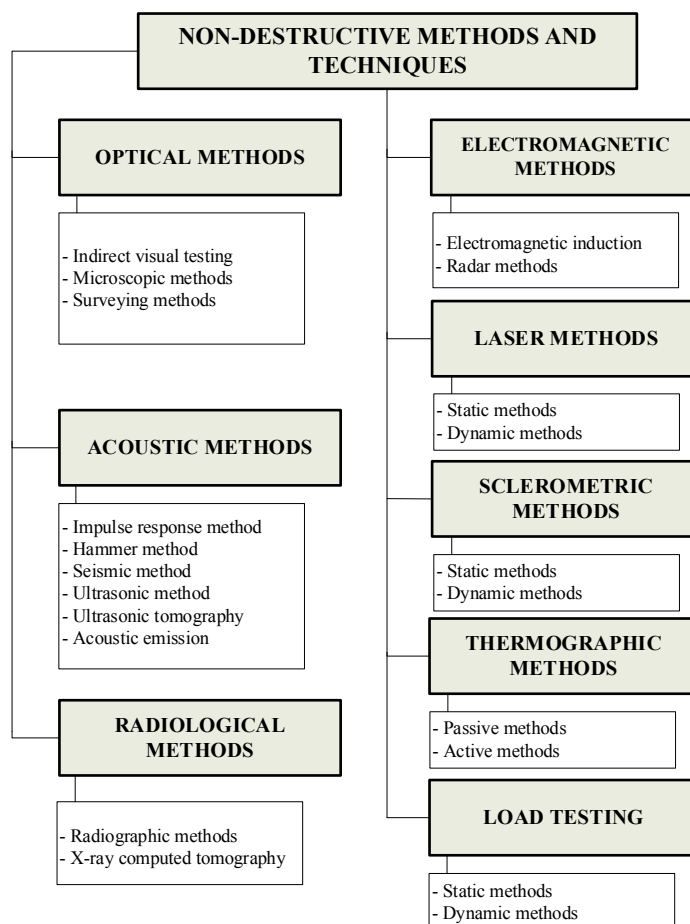


Fig. 3. General classification of non-destructive methods and techniques that are useful in the diagnosis of reinforced concrete structures according to [9]

Rys. 3. Ogólna klasyfikacja nieniszczących metod i technik przydatnych w diagnostykach konstrukcji żelbetowych, wg [9]

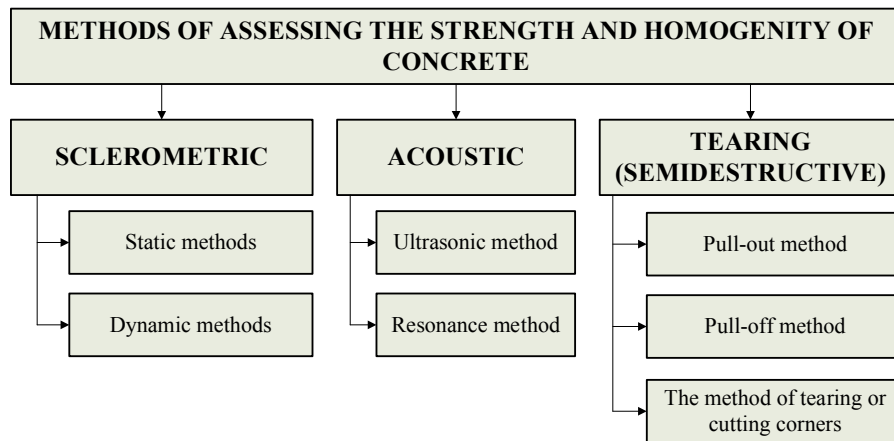


Fig. 4. Non-destructive and semi-destructive methods that are used to assess the strength and homogeneity of concrete in reinforced concrete constructions according to [11]

Rys. 4. Metody nieniszczące i seminieniszczące stosowane do oceny wytrzymałości i jednorodności betonu w konstrukcjach żelbetowych, wg [11]

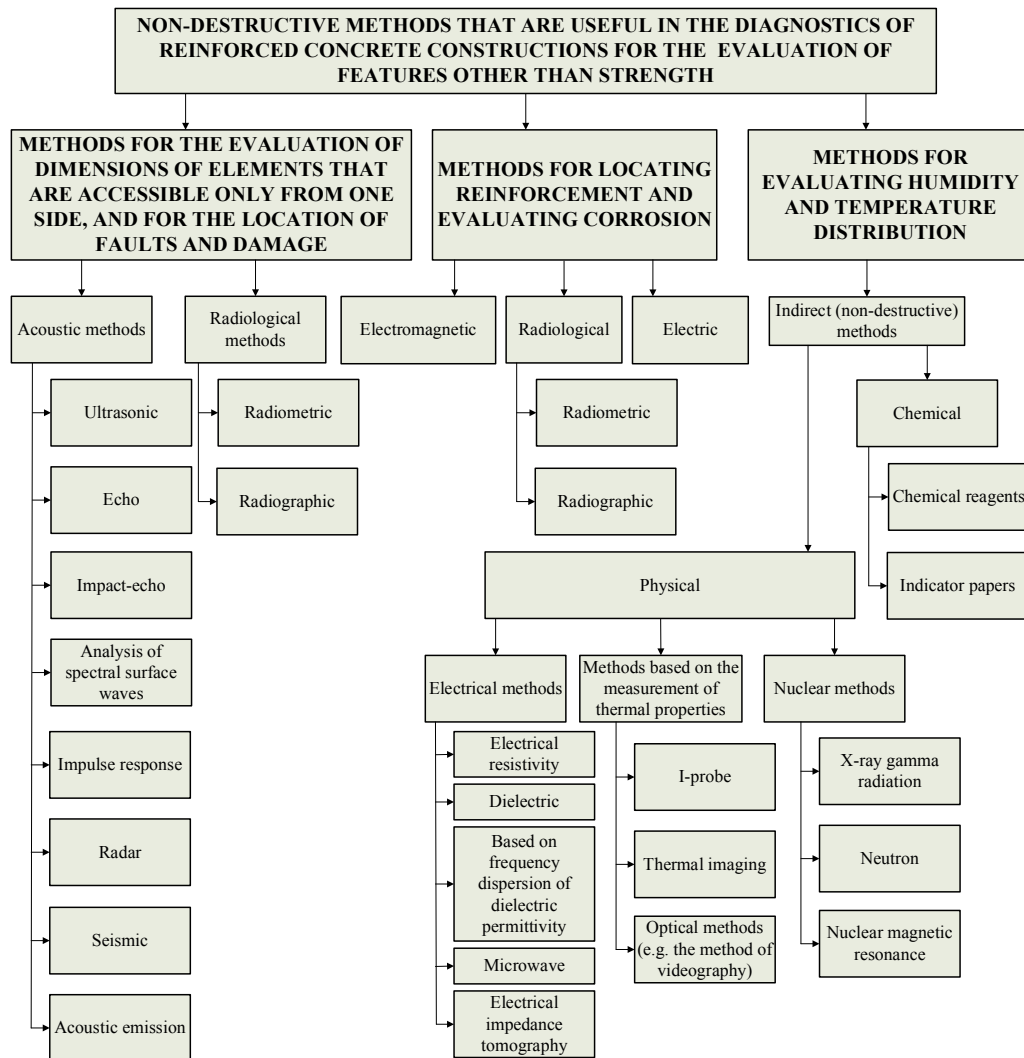


Fig. 5. Non-destructive methods that are used in the diagnostics of reinforced concrete structures in order to assess features other than strength [11]

Rys. 5. Metody nieniszczące stosowane w diagnostyce konstrukcji żelbetowych do oceny innych cech niż wytrzymałość [11]

Optical methods. As can be seen in the classification presented in Figure 3, the optical methods that are useful in the diagnosis of reinforced concrete structures include many measurement techniques that use research equipment in the form of, among others, endoscopes, borescopes, or videoscopes. They enable surfaces and places that are inaccessible to the eye to be tested in the same way as microscopes that are useful in laboratory conditions. In addition, these groups of methods should also include laser scanning.

This modern method of performing geodetic survey measurements enables the location of a set of points in three-dimensional space to be remotely determined, which gives an opportunity to reconstruct a three-dimensional image (shape) of whole building objects or their fragments, including a structure that is visible for a laser [2]. This method can be used, e.g. for remote measurement of progressive deflections of either selected structural elements or an entire reinforced concrete structure. Research can be repeated over time, and their results can be compared to each other and analysed within a framework of the assessed safety and reliability of a structure. The exemplary diagnostic apparatus that is used in optical methods is shown in Figure 6.

Metody optyczne. Jak wynika z klasyfikacji przedstawionej na rysunku 3 do metod optycznych, przydatnych w diagnostykach konstrukcji żelbetowych zaliczyć można wiele technik pomiarowych wykorzystujących aparaturę badawczą w postaci m.in. endoskopów, boroskopów, wideoskopów umożliwiających badanie powierzchni i miejsc niedostępnych dla oka, a także mikroskopy użyteczne w warunkach laboratoryjnych. Ponadto do tej grupy metod zaliczyć należy skanowanie laserowe. Ta nowoczesna metoda pomiarów geodezyjnych umożliwia zdalne wyznaczenie położenia zbioru punktów w przestrzeni trójwymiarowej, co daje możliwość rekonstrukcji trójwymiarowego obrazu (ukształtowania) całych obiektów budowlanych lub ich fragmentów, w tym widocznej dla lasera konstrukcji [2]. Metoda ta może zostać wykorzystana na przykład do zdalnego pomiaru postępujących ugięć wybranych elementów konstrukcyjnych lub całych konstrukcji żelbetowych. Badania mogą być powtarzane w czasie, a ich rezultaty porównywane względem siebie i analizowane w ramach ocenianego bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji. Przykładowe aparaty diagnostyczne stosowane w metodach optycznych pokazane zostały na rysunku 6.



Fig. 6. Exemplary apparatus used in optical methods (materials from the website: www.olympus-ims.com)

Rys. 6. Przykładowe aparaty stosowane w metodach optycznych (materiały ze strony internetowej: www.olympus-ims.com)

Acoustic methods. The following acoustic non-destructive test methods, which are useful in assessing the durability, safety and reliability of reinforced concrete structures (Figs. 3 and 5), were characterized: ultrasonic, impulse response, hammer, ultrasonic tomography, acoustic emission.

Ultrasonic methods have been known for a long time and used indirectly in reliable assessments of the strength and homogeneity of concrete in a construction [12-15]. They can also be used to detect structural

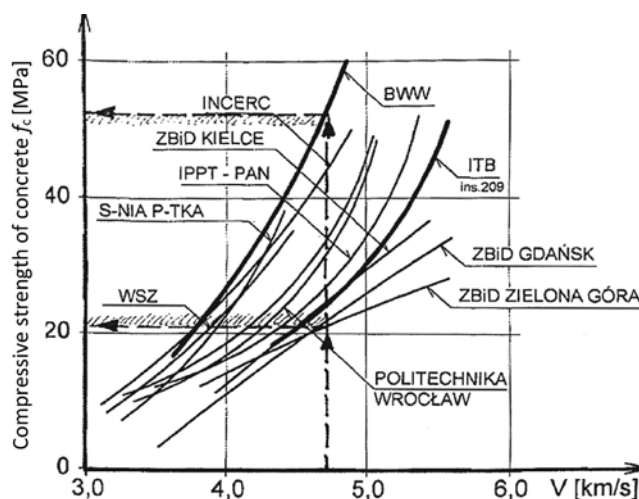
Metody akustyczne. Z wymienionych na rysunkach 3 i 5 akustycznych nieniszczących metod badawczych przydatnych do oceny trwałości, bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych scharakteryzowano metody: ultradźwiękową, odpowiedzi na impuls, młoteczkową, sejsmiczną, tomografię ultradźwiękową, emisji akustycznej.

Metody ultradźwiękowe – są znane od dawna i stosowane do wiarygodnych ocen, w sposób pośredni, wytrzymałości i jednorodności betonu w konstrukcji [12-15]. Mogą być także wykorzystywane do wykry-

discontinuities in reinforced concrete elements in the form of cracks, and also to locate air voids [16]. Apparatus consisting of an ultrasonic pulse analyzer and ultrasonic heads is commonly available.

The determination of the velocity of longitudinal ultrasonic waves v_c that propagate in the tested concrete, followed by correlating them with the compressive strength f_c that was obtained on the basis of strength tests of specimens taken from a structure, is required in order to assess the strength of concrete. The results of concrete strength measurements should be validated using the calibration of the method, which involves the selection of an appropriate correlation or hypothetical dependency of v_c-f_c . The correct application of these methods requires strict adherence to the principles of conducting research, which were included in paper [12], and also paper [13], in which a detailed procedure of in situ concrete ultrasonic testing is given. In addition, standards [14, 15] should also be adhered to.

Exemplary research relationships, according to ultrasonic methods, which are used to assess concrete strength, are given in Figure 7. They justify the need for the approximate scaling of the method.



Impulse response methods are useful, among others, for the detection of air voids under reinforced concrete slabs that are laid on the ground, the detection of delamination at the interface of layers, and also the detection of places and areas of high heterogeneity of a concrete structure in massive concrete elements (so-called honeycombing [9]). The research sets that are shown in Figure 8 and that are used in these methods include: special hammers, geo-receivers, and also amplifiers with portable computers that have appropriate software.

wania nieciągłości strukturalnej w elementach żelbetowych w postaci pęknięć oraz do lokalizowania pustek powietrznych [16]. Aparatura składająca się z betonoskopu i głowic ultradźwiękowych jest powszechnie dostępna. Do oceny wytrzymałości betonu wymagane jest określenie prędkości podłużnych fal ultradźwiękowych v_c rozprzestrzeniających się w badanych betonach i skorelowanie ich z wytrzymałością na ściskanie f_c uzyskaną na podstawie badań wytrzymałościowych próbek pobranych z konstrukcji. Wyniki pomiarów wytrzymałości betonu w konstrukcji należy uwiarygodnić poprzez wzorcowanie metody, polegające na doborze odpowiedniej zależności korekcyjnej lub hipotetycznej v_c-f_c . Prawidłowe stosowanie tych metod wymaga bezwzględnego przestrzegania zasad prowadzenia badań zebranych w pracy [12], a także w pracy [13], w której podana jest szczegółowa procedura badań ultradźwiękowych betonu *in situ*. Ponadto obowiązują normy [14, 15].

Przykładowe zależności badawcze według metod ultradźwiękowych do oceny wytrzymałości betonu podano na rysunku 7. Uzasadniają one potrzebę przybliżonego skalowania metody.

Fig. 7. Examples of characteristic dependencies of $f_c - V$ for the ultrasonic method (for different concretes and different places)

Rys. 7. Przykłady charakterystycznych zależności $f_c - V$ dla metody ultradźwiękowej (dla różnych betonów i różnych ośrodków)

Metody odpowiedzi na impuls (impulse response) są przydatne m.in. do wykrywania pustek powietrznych pod płytami żelbetowymi ułożonymi na gruncie, delaminacji na stykach warstw, miejsc wadliwych i obszarów o dużej niejednorodności struktury betonu w masywnych elementach betonowych (tzw. honeycombing [9]). W skład zestawów badawczych pokazanych na rysunku 8 wykorzystywanych w tych metodach wchodzi: specjalne młotki, geosłuchawki i wzmacniacze z przenośnymi odpowiednio oprogramowanymi komputerami.

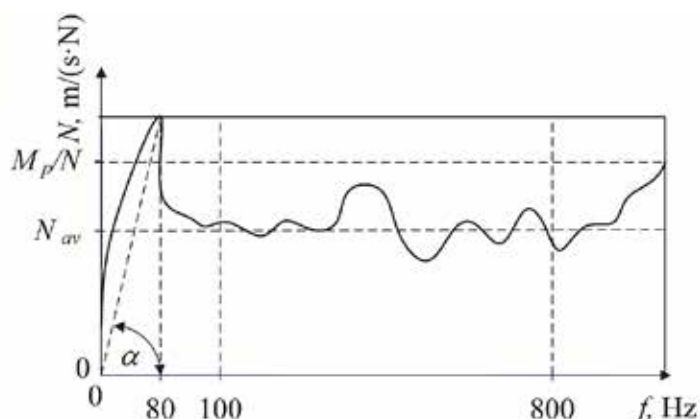
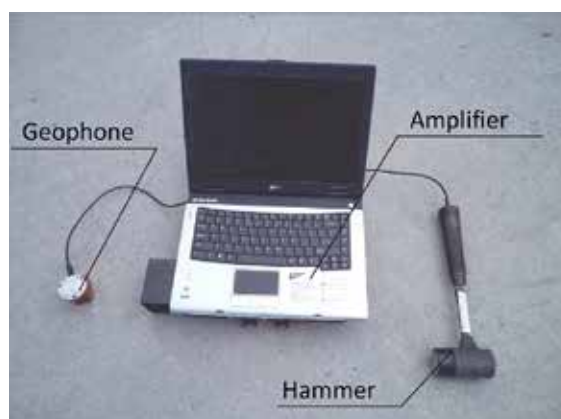


Fig. 8. Impulse response method: a) measurement set, b) exemplary graph of the variability of the N_{av} parameter in a frequency function

Rys. 8. Metoda odpowiedzi na impuls (impulse response): a) zestaw pomiarowy, b) przykładowy wykres zmienności parametru N_{av} w funkcji częstotliwości

In these methods, elastic waves are excited in the tested elements by the impact of a calibrated hammer with a built-in rubber tip. The registration of the elastic wave signal that is propagating in the element with a frequency of up to 1000 Hz takes place with the reinforcement of the signal by an amplifier and with the use of geo-receivers that do not require the use of an acoustic coupler with the surface of the tested element.

The processing of signals, which were registered during tests, takes place using specialized software. The final result of the tests are the so-called “maps” of the distributions of the characteristic surface parameters of the tested elements, namely: average mobility N_{av} , dynamic stiffness K_d , mobility slope M_p , average mobility multiplied by mobility slope $N_{av} \times M_p$ and voids index v - all obtained for the tested surfaces. Defective regions can be located on the basis of the analysis of these maps.

Impact-echo methods are useful, among others, for determining the thickness of concrete and reinforced concrete elements that are accessible from one side, and also for detecting defects in them [17].

The methods are based on the excitation of elastic waves in the assessed elements by hitting their surfaces in measuring points spaced approximately every 100 mm using inductors in the form of steel balls. The frequencies of generated vibrations depend on the diameters of the used balls, and they range from approximately 10 kHz to 150 kHz. Specialized software enables images of the elastic waves propagating in the examined elements to be recorded in the amplitude-time system, and then the transforming of these images into an amplitude-

W metodach tych dokonuje się wzbudzenia fal sprężystych w badanych elementach poprzez uderzenie skalibrowanym młotkiem z wbudowaną gumową końcówką. Rejestracja sygnału fali sprężystej rozprzestrzeniającej się w elemencie o częstotliwości do 1000 Hz następuje z użyciem geosłuchawki, niewymagającej użycia środka sprzęgającego akustycznie z powierzchnią badanego elementu, z równoczesnym jego wzmocnieniem za pomocą wzmacniacza. Przetwarzanie zarejestrowanych podczas badań sygnałów następuje za pomocą specjalistycznego oprogramowania. Ostatecznym wynikiem badań są tzw. „mapy” rozkładów wartości charakterystycznych parametrów powierzchni badanych elementów, mianowicie: średnich zmienności N_{av} (average mobility), sztywności dynamicznych K_d (stiffness), skoków zmienności M_p (mobility slope), średnich zmienności pomnożonych przez skoki zmienności $N_{av} \times M_p$ (mobility times mobility slope) oraz współczynników wad v (voids index), otrzymane dla badanych powierzchni. Na podstawie analizy tych map można lokalizować rejonu wadliwe.

Metody młoteczkowe (impact-echo) przydatne są między innymi do określania grubości elementów betonowych i żelbetowych dostępnych jednostronnie oraz wykrywania w nich defektów [17].

Metody bazują na wzbudzeniu w badanych elementach fal sprężystych, poprzez uderzenia w ich powierzchnię wzbudnikami w postaci kulek stalowych, w punktach pomiarowych rozmieszczonych co około 100 mm. Częstotliwości wygenerowanych drgań zależą od średnic użytych w badaniach kulek i wynoszą od około 10 kHz do 150 kHz. Specjalistyczne oprogramowania umożliwiają zapisy graficzne obrazów fal sprężystych rozprzestrzeniających się w badanych elementach,

frequency spectrum using the fast Fourier transform. These spectra are subjected to further analysis. The advantages of these methods include the high accuracy in locating defects, which results from the small distance between measuring points. However, a disadvantage involves the inability to assess the size of water-filled defects. A measuring set, which consists of measuring heads with inductors (steel balls with different diameters) and a portable computer, is shown in Figure 9.

w układzie amplituda – czas, a następnie przekształcenie tego obrazu w widmo amplitudowo-częstotliwościowe za pomocą szybkiej transformaty Fouriera. Widma te podlegają dalszym analizom. Zaletą tych metod są duże dokładności w zlokalizowaniu wad wynikające z małej odległości między punktami pomiarowymi, natomiast niedogodnością jest brak możliwości oceny rozmiarów wad wypełnionych wodą. Zestaw pomiarowy, w skład którego wchodzi głowice pomiarowe ze wzbudnikami (kulki stalowe o różnych średnicach) i komputer przenośny, przedstawiono na rysunku 9.

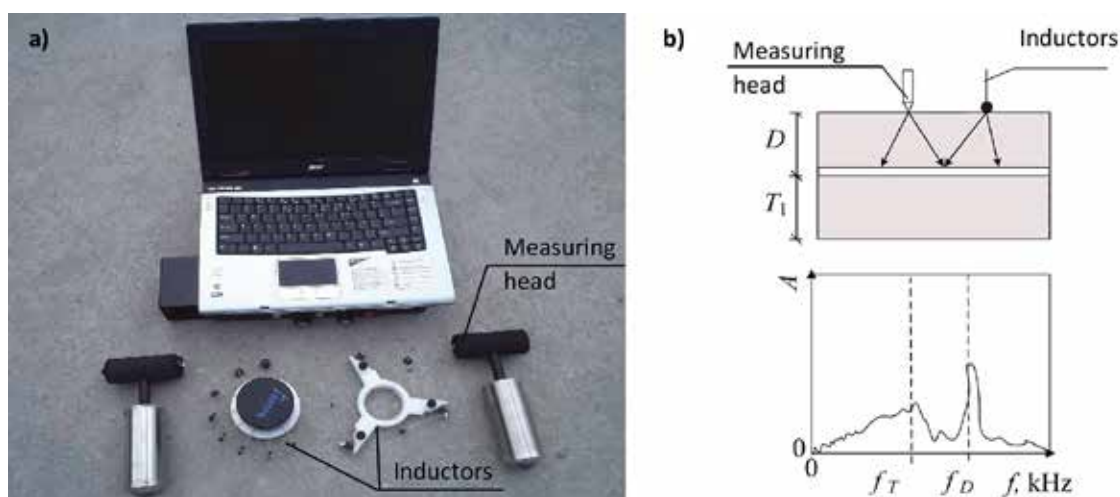


Fig. 9. The impact-echo method: a) measurement set, b) exemplary amplitude and frequency spectrum obtained in the case of the occurrence of a defect in the tested element

Rys. 9. Metoda młoteczkowa (impact-echo): a) zestaw pomiarowy, b) przykładowe widmo amplitudowo-częstotliwościowe otrzymane w przypadku istnienia w badanym elemencie wady

Parallel seismic methods are useful when testing concrete and reinforced concrete foundation piles, both prefabricated and those made at the installation site, regarding verification of their length and continuity of their cross-section along their length [18]. In these methods, a hole deeper than the predicted length of elements is required to be drilled in the ground along the tested element. A hydrophone, which works in the frequency range close to 40 kHz, is then placed in these holes. Afterwards, a pile head or pile cap is hit with a calibrated hammer.

By using a hydrophone that is moving in the hole along the pile, the time of transition of the acoustic wave from the test pile to the hydrophone is recorded after each hit. Analysis of the time of passing of this wave with the use of specialized software allows the length and continuity of the cross-section of the tested pile to be determined. Figure 10 shows, according to paper [18], the measurement set that is used in the parallel seismic method, and also an exemplary scheme of testing a pile.

Metody sejsmiczne (parallel seismic) – są przydatne do badania betonowych i żelbetowych pali fundamentowych, zarówno prefabrykowanych, jak i wykonanych w miejscu wbudowania, w zakresie kontroli ich długości i ciągłości przekroju na długości [18]. W metodach tych wymagane jest wykonanie w gruncie, wzdłuż badanego elementu, otworu na głębokość większą niż przewidywane długości elementów. W otworach tych umieszcza się hydrofon pracujący w paśmie częstotliwości zbliżonym do 40 kHz i z użyciem skalibrowanego młotka dokonuje się uderzeń w głowicę pala lub w oczep zespołu pali. Wykorzystując hydrofon przemieszczający się w otworze wzdłuż pala, rejestruje się, po każdym uderzeniu, czas przejścia fali akustycznej z badanego pala do hydrofonu. Analizy czasu przejścia tej fali, za pomocą specjalistycznego oprogramowania, umożliwiają określenie długości i ciągłości przekroju badanego pala. Na rysunku 10 pokazano za [18] zestaw pomiarowy stosowany w metodzie parallel seismic i przykładowy schemat badania pala.

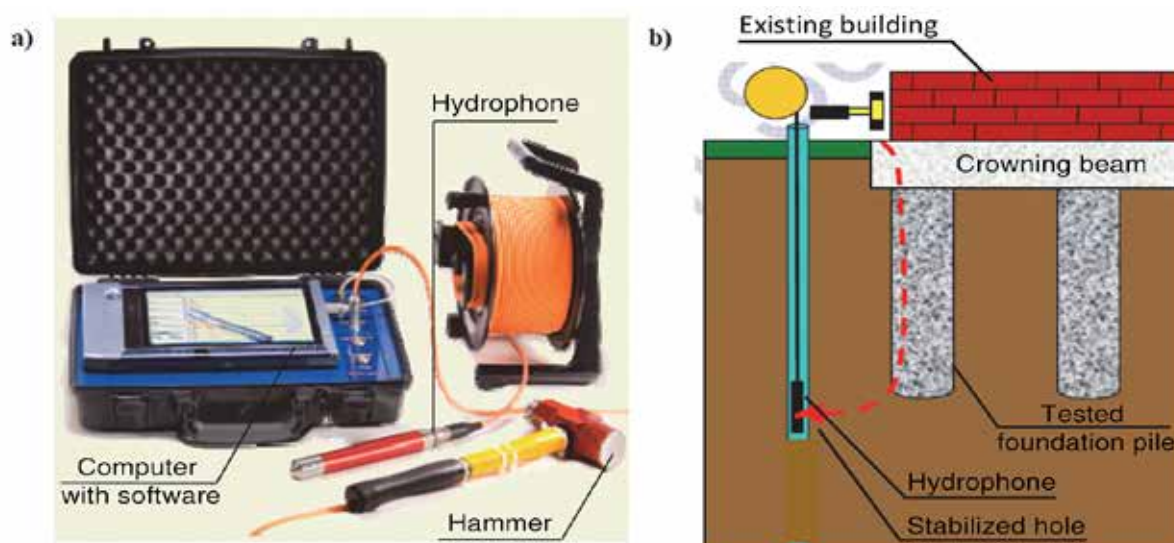


Fig. 10. The parallel seismic method according to [18]: a) measurement set, b) exemplary test scheme

Rys. 10. Metoda sejsmiczna (parallel seismic): a) zestaw pomiarowy, b) przykładowy schemat badania, za [18]

Ultrasonic tomography methods are the newest of the acoustic methods [2, 9, 18, 19]. They are useful when examining concrete and reinforced concrete elements that are only accessible from one side and have a thickness of up to 2,500 mm. Ultrasonic tomography enables the thickness of such elements to be determined; reinforcement distribution consisting of several layers of meshes to be detected; and invisible cracks, inclusions, air voids, and areas filled with liquid or other material that differs in terms of physical properties from the surrounding concrete [9, 10] to be investigated.

The methods are based on the excitation and analysis of elastic waves in the examined elements. The inductors are multi-head antennas, which have several dozen independent spring-mounted ultrasonic heads installed, and which also are used to receive and process ultrasonic signals. The heads generate ultrasonic impulses of 50 kHz. Figure 11 shows an ultrasonic tomograph, which consists of a special multi-head ultrasonic antenna and computer with specialized software that enables a graphic image to be recorded [9].

With the use of a tomograph it is possible to obtain views in any cross-section in three mutually perpendicular cross-sections and also a spatial image of the examined element. However, interpretation of the obtained results is very difficult in many situations. In these methods, the use of apparatus that “couples” the surface of the tested element with ultrasonic heads is not required, which is a very important advantage. Dry point contacts are used in this case.

Metody tomografii ultradźwiękowej są najnowszymi spośród metod akustycznych [2, 9, 18, 19]. Są przydatne do badania dostępnych jednostronnie elementów betonowych i żelbetowych o grubości do 2500 mm, w celu określenia ich grubości, wykrycia rozmieszczenia zbrojenia składającego się na przykład z kilku warstw siatek, wykrycia niewidocznych na powierzchni pęknięć, obcych wtrąceń pustek powietrznych albo obszarów wypełnionych cieczą lub materiałem różniącym się właściwościami fizycznymi od otaczającego go betonu [9, 10].

Metody bazują na wzbudzeniu i analizie fal sprężystych w badanych elementach. Wzbudnikami są wielogłowicowe anteny, mające wbudowanych kilkadziesiąt niezależnych głowic ultradźwiękowych zamocowanych sprężynowo, które służą również do odbierania i przetwarzania sygnałów ultradźwiękowych. Głowice generują impulsy ultradźwiękowe o częstotliwości 50 kHz. Na rysunku 11 przedstawiono tomograf ultradźwiękowy, w skład którego wchodzi specjalna wielogłowicowa antena ultradźwiękowa i komputer wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem umożliwiającym zapis graficznego obrazu [9].

Z pomocą tomografu możliwe jest uzyskanie zobrażeń w dowolnym przekroju w trzech wzajemnie prostopadłych przekrojach oraz przestrzennego obrazu badanego elementu, ale interpretacja uzyskanych rezultatów w wielu sytuacjach jest mocno utrudniona. W metodach tych nie jest wymagane stosowanie środka „sprzęgającego” powierzchnię badanego elementu z głowicami ultradźwiękowymi, co jest bardzo istotną zaletą. Stosowane są tu suche styki *dry point contact*.

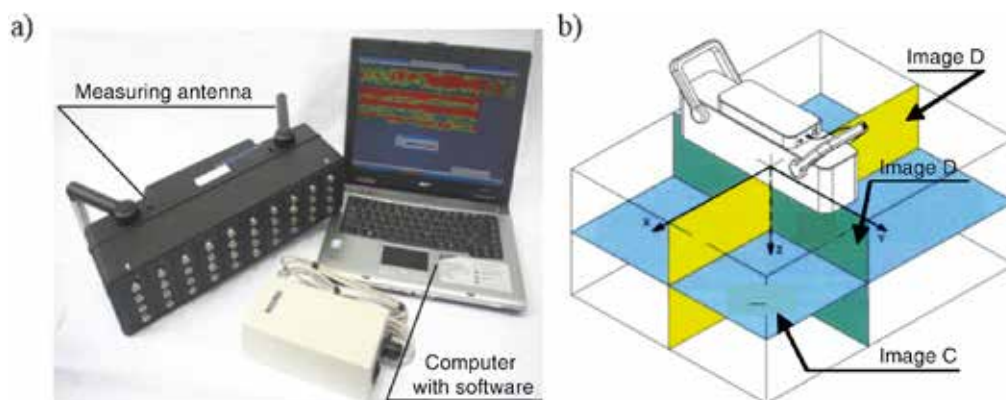


Fig. 11. View of the ultrasonic tomograph according to [9]: a) measurement set, b) measuring antenna in the coordinate system and images that are possible to be obtained

Rys. 11. Widok tomografu ultradźwiękowego: a) zestaw pomiarowy, b) antena pomiarowa w układzie współrzędnych i możliwe do uzyskania zobrazenia, za [9]

Methods of acoustic emission include measurement methods that use the phenomenon of the formation and propagation of high-frequency elastic waves in the structure of a material, which are caused by loads. These can be statically increasing loads, multi-variable, or dynamic loads, but also non-mechanical loads [20]. These methods are suitable for diagnostics and the monitoring of reinforced concrete elements and constructions in use, as well as structural elements subjected to trial loads. They are useful in assessing the safety and reliability of reinforced concrete structures, because they enable, among others, the location and identification of damage arising in the tested elements. Significant for these methods is that they signal the development of destructive processes that can cause, e.g. destruction, much earlier than other methods, and thus provide the time needed to relieve the structure. An interpretation of the research results obtained using these methods requires a lot of experience, which in Polish conditions have, among others, the authors of papers [21-23].

Electromagnetic methods. The non-destructive electromagnetic methods listed in Figure 3 include the Ground Penetrating Radar (GPR) that is described below. This method is used to determine or detect in concrete and reinforced concrete elements that are accessible from only one side, especially slab structures, the following: thickness, delamination, extensive defects, and the location of reinforcing bars [24]. The testing heads – transmitting and receiving heads (antennas) – depending on the purpose of the radar, generate electromagnetic waves with frequencies from 0.1 to 2.5 GHz.

The apparatus can move on the surface of the tested element. It is connected to a data recorder by a

Metody emisji akustycznej – pod tą nazwą należy rozumieć metody pomiarowe wykorzystujące zjawisko powstawania i rozprzestrzeniania się fal sprężystych wysokiej częstotliwości w strukturze materiału, powodowanych obciążeniem. Mogą to być obciążenia narastające statycznie, wielokrotnie zmienne, dynamiczne, ale też i obciążenia niemechaniczne [20]. Metody nadają się do diagnostyki i monitoringu zarówno eksploatowanych elementów i konstrukcji żelbetowych, jak i elementów konstrukcji poddawanych obciążeniom próbnym. Są one użyteczne w ocenie bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych, bo umożliwiają m.in. lokalizację i identyfikację uszkodzeń powstających w badanych elementach. Znamienne dla tych metod jest to, że znacznie wcześniej niż inne metody sygnalizują rozwój procesów destrukcyjnych mogących spowodować na przykład zniszczenie, dając w ten sposób czas potrzebny do odciążenia konstrukcji. Interpretacja wyników badań uzyskiwanych tymi metodami wymaga dużego doświadczenia, które w warunkach polskich posiadają m.in. autorzy prac [21-23].

Metody elektromagnetyczne. Z nieniszczących metod elektromagnetycznych wymienionych na rysunku 3 przybliżono radarową GPR (Ground Penetrating Radar). Metoda ta wykorzystywana jest do określenia lub wykrywania w dostępnych jednostronnie betonowych i żelbetowych elementach, zwłaszcza płytowych: grubości, rozwarstwień, rozległych wad, usytuowania prętów zbrojeniowych [24]. Głowice badawcze, nadawczo-odbiorcze (anteny), w zależności od przeznaczenia radaru, generują fale elektromagnetyczne o częstotliwości od 0,1 GHz do 2,5 GHz.

Aparatura może przemieszczać się po powierzchni badanego elementu. Z rejestratorem danych połączona jest kablem transmisyjnym lub połączeniem ra-

transmission cable or a radio connection. The advantage of this method is the ability to quickly examine elements with large surfaces, especially with regards to the location of reinforcements, while the disadvantage is the small accuracy of determining the diameter and thickness of the reinforcement cover. Figure 12 shows an example of a radar set according to [9].

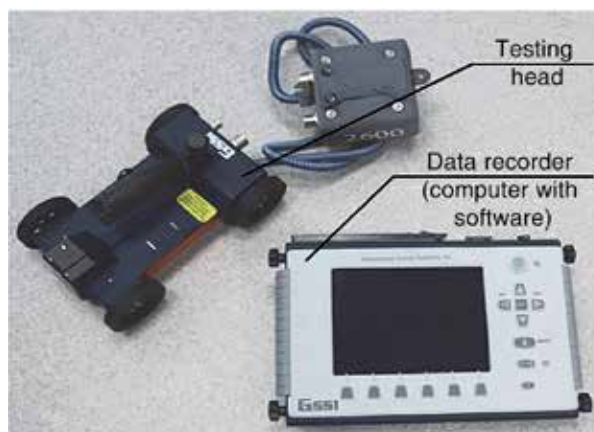


Fig. 12. Radar set and exemplary display showing the distribution of the reinforcement in a model reinforced concrete element according to [9]

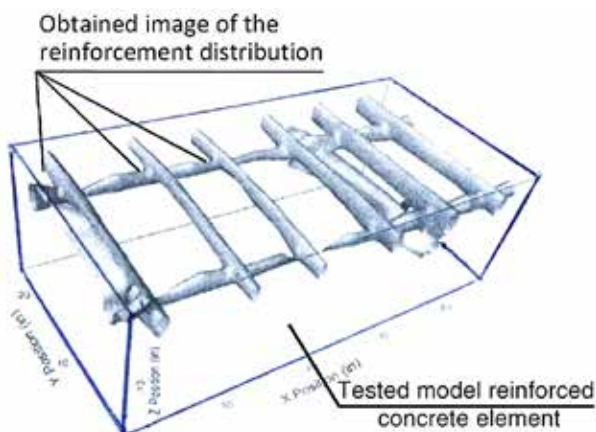
Rys. 12. Zestaw radarowy i przykładowe zobrazowanie pokazujące rozmieszczenie zbrojenia w modelowym elemencie żelbetowym, za [9]

Sclerometric methods. As was the case with ultrasonic methods, these methods have also been known for a long time and have been used to reliably indirectly evaluate the strength and homogeneity of concrete in a structure. In dynamic practice, the dynamic method dominates, in which the Schmidt sclerometer is a commonly used measuring device. In this method, a parameter in the form of the so-called number of R rebounds is required to be specified and then correlated with the compressive strength f_c by selecting the appropriate correlation or hypothetical dependence of f_c-R .

Compressive strengths are determined on the basis of tests of specimens that are taken from a structure. The correct application of this method, which ensures the obtaining of reliable results, requires the strict application of the principles of conducting research. These principles are collected in very clearly written papers [7, 13, 25], in which paper [13] includes a detailed procedure of *in situ* tests of concrete. In addition, there are standards in force [15, 26] that refer to these methods.

Exemplary research dependencies for sclerometric methods, which are used to assess concrete strength, are given in Figure 13. They justify the need for simplified method scaling.

diowym. Zaletą tej metody jest możliwość szybkiego badania elementów o dużych powierzchniach, szczególnie w zakresie lokalizowania zbrojenia, natomiast wadą – mała dokładność określenia średnicy i grubości otuliny zbrojenia. Na rysunku 12 pokazano przykładowy zestaw radarowy [9].



Metody sklerometryczne. Podobnie jak metody ultradźwiękowe znane są od dawna i stosowane do wiarygodnej oceny, w sposób pośredni, wytrzymałości i jednorodności betonu w konstrukcji. W praktyce diagnostycznej dominuje metoda dynamiczna, gdzie powszechnie stosowanym urządzeniem pomiarowym jest sklerometr Schmidta. W metodzie tej wymagane jest określenie parametru w postaci tzw. liczby odbicia R i skorelowanie jej z wytrzymałością na ściskanie f_c poprzez dobór odpowiedniej zależności korelacyjnej lub hipotetycznej f_c-R .

Wytrzymałości na ściskanie określone są na podstawie badań próbek pobranych z konstrukcji. Prawidłowe stosowanie tej metody, zapewniające uzyskanie wiarygodnych rezultatów, wymaga bezwzględne-go stosowania zasad prowadzenia badań zebranych w bardzo przystępnie napisanych pracach [7, 13, 25], z tym że w pracy [13] podana została szczegółowa procedura badań betonu *in situ*. Ponadto obowiązują normy [15, 26].

Przykładowe zależności badawcze dla metod sklerometrycznych do oceny wytrzymałości betonu podano na rysunku 13. Uzasadniają one potrzebę uproszczonego skalowania metody.

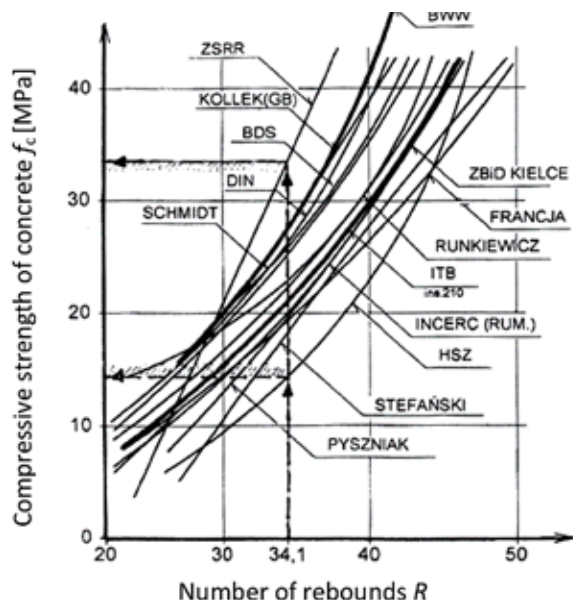


Fig. 13. Exemplary empirical dependencies of $f_c - R$ for Schmidt type N sclerometers (for different concretes and different places)

Rys. 13. Przykładowe zależności empiryczne $f_c - R$ dla sklerometrów Schmidta typu N (dla różnych betonów i różnych ośrodków)

Radiological methods. Radiological methods include the radiographic method [10], which is used, among others, to assess the distribution of reinforcement in reinforced concrete structures. An example of the evaluation of reinforcement in a reinforced concrete beam is shown in Figure 14.

Metody radiologiczne. Wśród metod radiologicznych można wyróżnić metodę radiograficzną [10] służącą m.in. do oceny rozkładu zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Przykład oceny zbrojenia w belce żelbetowej pokazano na rysunku 14.

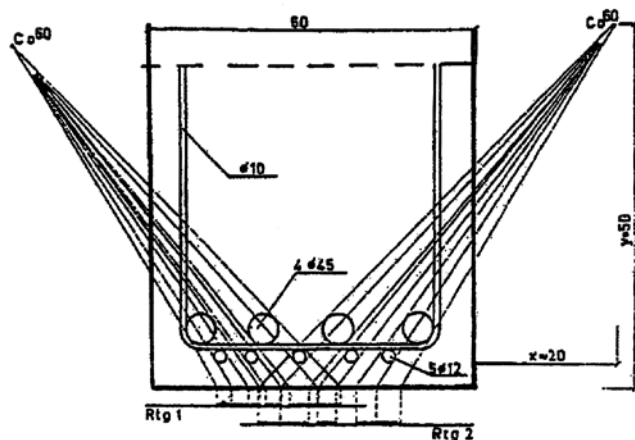


Fig. 14. Evaluation of the bottom reinforcement in a beam (in the middle of the span) using the radiographic method
Rys. 14. Ocena zbrojenia dolnego w belce (w środku przęsła) za pomocą metody radiograficznej

These methods are standardized and described in many publications.

Metody te są opisane w wielu publikacjach i są znormalizowane.

3.2.2. Semi-destructive methods and techniques

As with non-destructive methods, semi-destructive methods are also very useful in assessing the durability, safety and reliability of reinforced concrete structures. Their use does not significantly interfere with the structure of the examined construction. Figure 15 shows a general classification of basic semi-destructive methods and techniques that are useful

3.2.2. Metody i techniki seminieniszczące

Podobnie jak metody nieniszczące, również metody seminieniszczące cechują się dużą przydatnością w ocenie trwałości, bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych. Ich stosowanie nie powoduje istotnego naruszenia struktury badanej konstrukcji. Rysunek 15 jest propozycją ogólnej klasyfikacji podstawowych metod i technik seminieniszczących

in the diagnosis of reinforced concrete structures according to [9, 11]. There are physical, chemical and biological methods distinguished and divided into those that are useful in field research and those useful in laboratory tests of specimens, including e.g. core specimens taken from a structure.

Table 3 lists the important factors that affect the durability, safety and reliability of using reinforced concrete structures. These factors can be identified using semi-destructive methods. A synthetic description of some of the methods and techniques listed in Figure 15 is provided below, while their detailed descriptions are available, among others, in papers [2, 7, 8].

przydatnych w diagnostyce konstrukcji żelbetowych, wg [9, 11]. Wyróżniono metody fizyczne, chemiczne i biologiczne, z podziałem na przydatne w badaniach polowych (terenowych) oraz stosowane w laboratoryjnych badaniach próbek, w tym na przykład rdzeniowych pobranych z konstrukcji. W tabeli 3 podano natomiast ważniejsze czynniki mające wpływ na trwałość, bezpieczeństwo i niezawodność użytkowania konstrukcji żelbetowych, możliwe do zidentyfikowania za pomocą rozpatrywanych metod seminieniszczących. Syntetycznego omówienia niektórych z wymienionych na rysunku 15 metod i technik zamieszczono poniżej, natomiast szczegółowe ich opisy dostępne są m.in. w pracach [2, 7, 8].

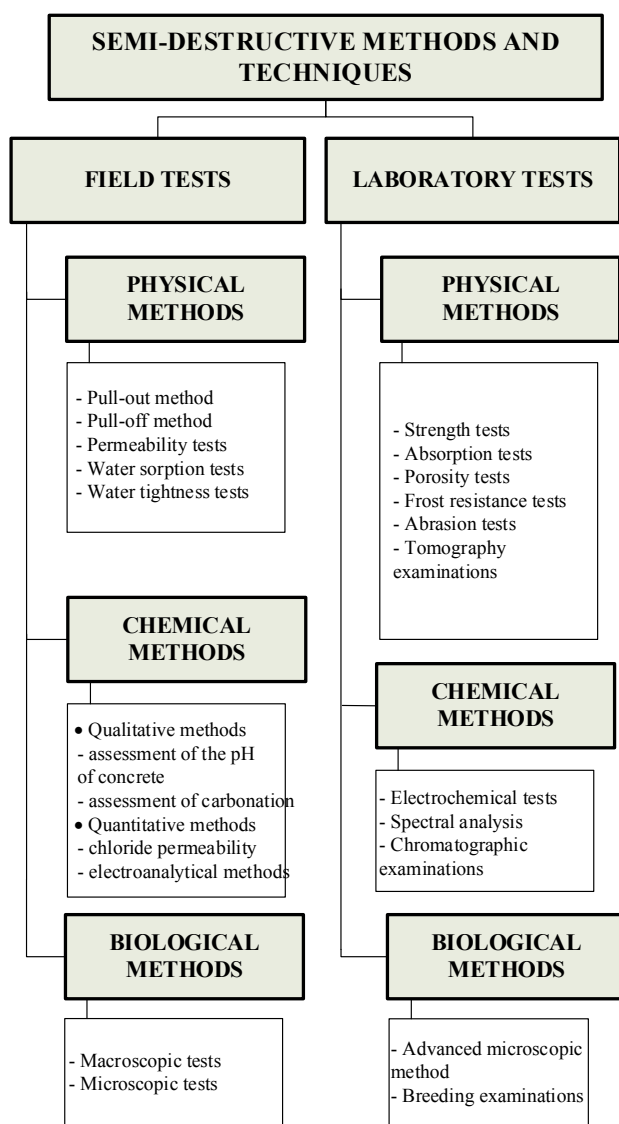


Fig. 15. General classification of semi-destructive methods and techniques that are useful in the diagnosis of reinforced concrete structures according to [9, 11]

Rys. 15. Ogólna klasyfikacja metod i technik seminieniszczących przydatnych w diagnozowaniu konstrukcji żelbetowych, wg [9, 11]

Table 3. Factors that affect the durability, safety and reliability of reinforced concrete structures identified using semi-destructive methods, according to [9]

Tabela 3. Czynniki mające wpływ na trwałość, bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji żelbetonowych, identyfikowane za pomocą metod seminieniszczących, na podstawie [9]

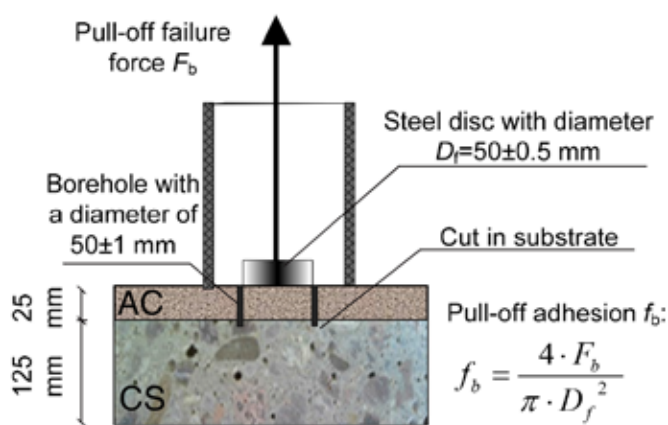
Semi-destructive methods	Factor				
	1 – structure of the material	2 – mechanical parameters of the material	3 – material discontinuity	4 – water and gas resistance	5 – chemical composition
	1	2	3	4	5
FIELD TESTS					
Pull-out method	-	●	-	-	-
Pull-off method	-	●	-	-	-
Torque test	-	●	-	-	-
Penetration methods	-	●	-	-	-
Water tightness tests	○	-	-	●	-
Polarizing methods	-	-	-	-	●
pH test	-	-	-	-	●
Measuring the depth of carbonation	-	-	-	-	●
Alkaline test	-	-	-	-	●
Chloride test	-	-	-	-	●
Electroanalytical test	-	-	-	-	●
Biological macroscopic tests	○	-	○	-	-
Biological microscopic tests	○	-	○	-	-
LABORATORY TESTS					
Determination of compressive strength	-	●	-	-	-
Determination of elastic properties	-	●	-	-	-
Absorption tests	○	-	-	●	-
Porosity tests	●	-	-	●	-
Frost resistance tests	-	●	-	-	-
Abrasion tests	○	●	-	-	-
Computer microtomography	●	○	○	-	-
Electroanalytical methods	-	-	-	-	●
Spectral analysis	-	-	-	-	●
Chromatographic examinations	-	-	-	-	●
BREEDING METHODS					
Microbiological analysis	○	-	○	-	-
● - Basic method, ○ - Additional method, - Not applicable					

Methods useful in field research. These methods include those for assessing the strength parameters of concrete and, above all, compressive strength based on measurements of forces pulling anchors that were previously concreted or put in drilled holes in concrete (*pull – out methods and torque tests*), and also pull-off adhesion (*the pull - off method*) based on the measurement of forces detaching metal discs from

Metody przydatne w badaniach polowych. Do metod tych zaliczyć można te umożliwiające ocenę parametrów wytrzymałościowych betonu, a przede wszystkim wytrzymałości na ściskanie na podstawie pomiarów sił wyrywających zabetonowanych uprzednio lub w nawierconych w betonie otworach kotew (*metody pull – out i torque tests*) oraz przyczepności na odrywanie (metoda *pull – off*) polega-

concrete substrates. These methods are described in [27, 28] and standardized in [27, 29]. The view of the newest set for performing tests using the pull-off method, according to [30], is shown in Figure 16.

jącej na pomiarze sił odrywających metalowe krążki od podłoża betonowych. Metody te są opisane w [27, 28] i znormalizowane [27, 29]. Widok najnowszego zestawu do wykonywania badania metodą *pull-off* przedstawiono na rysunku 16, za [30].



Automated pull-off tester DY-216 by Proceq



Fig. 16. View of the newest set to perform pull-off tests [30]

Rys. 16. Widok najnowszego zestawu do wykonywania badań metodą *pull-off* [30]

Methods that are used in field tests also include those that allow concrete's resistance to chloride salt penetration and its water tightness to be assessed. *Penetration tests* and *water resistance tests* are used for this purpose. The penetration methods that are widely described in [31] and standardized in [32, 33] deserve special attention.

Methods listed in Figure 15 include those that are useful for assessing reinforcement corrosion in reinforced concrete structures (potentiometric, resistive and linear polarization). Linear polarization methods give reliable results by measuring the intensity of the corrosive current [34], however, direct contact with reinforcing steel is required. Methods of measuring the potential and resistance of concrete covers, including the modified method of four Wenner points [35], do not have this drawback.

In turn, methods that allow the composition and chemical parameters of concrete to be determined in field conditions based on the analysis of material specimens taken during on site tests include pH tests, rainbow tests and chloride tests.

Most kits for measuring the pH of concrete are based on the visual comparison of colours on litmus paper. However, modern pH evaluation kits include a measuring electrode, as shown, according to [36], in Figure 17.

Do metod wykorzystywanych w badaniach polowych zaliczają się również te które pozwalają ocenić odporność betonu na penetrację soli chlorkowych i jego wodoszczelność. Służą do tego *penetration tests* i *water resistance tests*. Wśród metod penetracyjnych na uwagę zasługują metody opisane szeroko w [31] i znormalizowane w [32, 33].

Spośród wymienionych na rysunku 15 metod niektóre są przydatne do oceny skorodowania zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych (potencjometryczna, rezystancyjna, polaryzacji liniowej). Metody polaryzacji liniowej dają wiarygodne wyniki poprzez pomiary natężenia prądu korozyjnego [34], ale wymagane jest w ich przypadku bezpośredni kontakt ze stałą zbrojeniową. Mankament ten niwelują metody pomiaru potencjału i rezystancji betonowej otuliny, w tym zmodyfikowana metoda czterech punktów Wennera [35].

Z kolei do metod pozwalających określać w warunkach polowych skład i parametry chemiczne betonu na podstawie analizy próbek materiału pobranych podczas badań na obiekcie zalicza się: *pH tests*, *rainbow tests* i *chloride tests*.

Większość zestawów do pomiaru pH betonu bazuje na wizualnym porównywaniu koloru na papierze lakmusowym. Są jednak dostępne nowoczesne zestawy do oceny pH z wykorzystaniem elektrody pomiarowej, jak przedstawiono to na rysunku 17, za [36].



Fig. 17. View of the newest set to assess the pH of concrete [36]

Rys. 17. Widok najnowszego zestawu do oceny pH betonu [36]

A simple method of assessing the degree of carbonation of concrete reinforcements in field conditions involves taking concrete and measuring the pH value with a pH meter.

In turn, the Rainbow test is used to assess the extent of the carbonation process of subsurface concrete layers. The measurements of the depth of carbonation of the thickness of the tested element is used e.g. in determining the remaining service life in a situation where the degree of corrosion is a critical factor, and also in monitoring the effectiveness of the process of realkalization of a concrete cover [9]. Figure 18 shows, according to [37], the view of the core bore taken from a concrete structure with the depth of carbonation of concrete marked using the *rainbow test*.

Prostym sposobem oceny stopnia skarbonatyzowania betonowych otulin prętów zbrojeniowych w warunkach polowych jest pobranie betonu i oznaczenie wielkości pH pehametrem.

Rainbow test z kolei służy do oceny zasięgu procesu karbonatyzacji przypowierzchniowych warstw betonu. Pomiary głębokości karbonatyzacji grubości badanego elementu ma zastosowanie na przykład w określeniu pozostałego czasu eksploatacji, w sytuacji gdy stopień korozji jest czynnikiem krytycznym, monitorowaniu efektywności procesu realkalizacji otuliny betonowej [9]. Na rysunku 18 przedstawiono za [37] widok odwiertu rdzeniowego pobranego z konstrukcji betonowej z zaznaczoną głębokością karbonatyzacji betonu ocenioną za pomocą *rainbow test*.



Fig. 18. A view of the core bore with marked carbonated concrete that was evaluated using the rainbow test, according to [37]

Rys. 18. Widok odwiertu rdzeniowego z zaznaczonym betonem skarbonatyzowanym ocenianym za pomocą rainbow test, za [37]

In turn, the *chloride test* method allows, in a simple way directly on an object, the content of chlorides, the depth of penetration and the profile of their distribution in the cross-section of a concrete element to be determined. The test method is described in [36].

In the summary of this section of the paper it is worth recommending literature [8], which comprehensively includes research on the corrosion of reinforcements and protective properties of concrete for the purpose of reinforced concrete construction diagnostics.

Z kolei metoda *chloride test* umożliwia w prosty sposób bezpośrednio na obiekcie określenie zawartości chlorków, głębokości penetracji oraz profil ich rozkładu w przekroju elementu betonowego. Sposób badania opisany został w [36].

W podsumowaniu tej części artykułu warto ponadto polecić pozycję literaturową [8], kompleksowo ujmując badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu na użytek diagnostyki konstrukcji żelbetowych.

Methods used in a laboratory. These methods include the methods of *direct evaluation of concrete strength in a structure*. They are used in strength tests of concrete specimens that are taken from a structure. In this case, a strength machine is the testing device. These tests play a very important role in an *in situ* reliable assessment of the safety and reliability of structures.

It should be mentioned that the *in situ* assessment of concrete strength is included in standard [15]. Concrete compressive strength tests can be carried out directly on core specimens taken from a structure, or indirectly using non-destructive ultrasonic or sclerometric methods, as mentioned above. Detailed procedures for *in situ* testing of the compressive strength of concrete on core specimens, as well as the assessment of this strength in a structure based on the results of testing core specimens, are given in paper [13]. The procedure for testing the strength of concrete on core specimens includes [13]: taking concrete cores from a structure and preparing them for testing, determining the compressive strength of core specimens, analysis of the results of strength tests of these specimens, and also the development of a test report. In turn, the procedure of assessing the strength of concrete in a construction based on core specimens includes [13]: calculation of the mean value and standard deviation of the compressive strength of concrete in a structure, estimation of the uncertainty of the calculated mean value, and also the assessment of the characteristic compressive strength of concrete in a structure. Considering the fact of enriching these procedures with both the appropriate computational examples, as well as numerous explanatory comments, it is worth following papers [13 and 25] when diagnosing *in situ* concrete strength.

The direct assessment of reinforcing steel parameters usually involves the determination of yield strength, tensile strength, and also elongation. For this purpose, sections of structural bars from a reinforcement of a specific direction are taken from reinforced concrete structures from the least-stressed places. They are then tested, as is the case with concrete specimens, in a strength machine in a laboratory.

The most modern method that is used in a laboratory is *X-ray computer microtomography*, which enables a three-dimensional image of a concrete specimen taken from an examined structure to be reconstructed based on two-dimensional projections obtained during X-ray scanning. This method allows

Metody stosowane w laboratorium. Spośród tych metod powszechnie stosowane są metody *bezpośredniej oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji*. Są one stosowane w badaniach wytrzymałości próbek betonu pobieranych z konstrukcji. Urządzeniem badawczym w tym przypadku jest maszyna wytrzymałościowa. Badania te pełnią bardzo istotną rolę w wiarygodnej ocenie bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji *in situ*.

Należy dodać, że ocena wytrzymałości betonu *in situ* jest przedmiotem normy [15]. Badania wytrzymałości betonu na ściskanie mogą być realizowane bezpośrednio na próbkach rdzeniowych pobranych z konstrukcji albo pośrednio z wykorzystaniem metod nieniszczących ultradźwiękowej lub sklerometrycznej o czym już wcześniej wspomniano. Szczegółowe procedury badania wytrzymałości betonu na ściskanie *in situ* na próbkach rdzeniowych oraz oceny tej wytrzymałości w konstrukcji na podstawie wyniku badania próbek rdzeniowych zostały podane w pracy [13]. Procedura badania wytrzymałości betonu na próbkach rdzeniowych obejmuje [13]: pobieranie rdzeni betonowych z konstrukcji i ich przygotowanie do badań, oznaczenie wytrzymałości na ściskanie próbek rdzeniowych, opracowanie zestawienia wyników badań wytrzymałości tych próbek wraz z opracowaniem raportu z badań. Z kolei procedura oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji na próbkach rdzeniowych obejmuje m.in. [13]: obliczanie wartości średniej i odchylenia standardowego wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji, oszacowanie niepewności obliczonej wartości średniej, ocenę charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie betonu w konstrukcji. Biorąc pod uwagę zarówno fakt wzbogacenia tych procedur stosownymi przykładami obliczeniowymi, jak również liczne objaśniające ją komentarze, warto na użytek diagnostyki wytrzymałości betonu w konstrukcji *in situ* wzorować się na pracach [13 i 25].

Jeżeli chodzi zaś o bezpośrednią ocenę parametrów stali zbrojeniowej, to obejmują one zazwyczaj określenie granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużalności, i w tym celu pobierane są z konstrukcji żelbetowych z miejsc najmniej wyciężonych odcinki prętów konstrukcyjnych danego kierunku zbrojenia, które podobnie jak pobierane z konstrukcji próbki betonowe badane są następnie w laboratorium w maszynie wytrzymałościowej.

Spośród metod stosowanych w laboratorium najnowocześniejsza jest *rentgenowska mikrotomografia komputerowa*, pozwalająca na rekonstrukcję trójwymiarowego obrazu próbki betonu pobranej z badanej konstrukcji, na podstawie dwuwymiarowych projekcji

many parameters that characterize the structure of concrete, including its porosity, the distribution of pores with regards to their size, the distribution of aggregate grains, the distribution of microdamage, the distribution of scattered reinforcement, the level of carbonatisation of concrete and elastic modulus values, to be determined [38]. The results obtained using this method can be very useful, e.g. for the interpretation of the causes of structural damage. Figure 19 illustrates the apparatus that is used in this research method [9]

uzyskanych w trakcie jej skanowania wiązką promieni rentgenowskich. Metoda ta daje możliwość określenia wielu parametrów charakteryzujących strukturę betonu, m.in. porowatości, rozkładu porów pod względem wielkości, rozmieszczenia ziaren kruszywa, rozmieszczenia mikrouszkodzeń, rozmieszczenia zbrojenia rozproszonego, stropnia skarbonatyzowania betonu, i również określenia wartości modułu sprężystości [38]. Rezultaty badań uzyskane tą metodą mogą być bardzo przydatne na przykład w interpretacji przyczyn powstania uszkodzeń konstrukcji. Rysunek 19 ilustruje aparaturę stosowaną w tej metodzie badawczej [9]

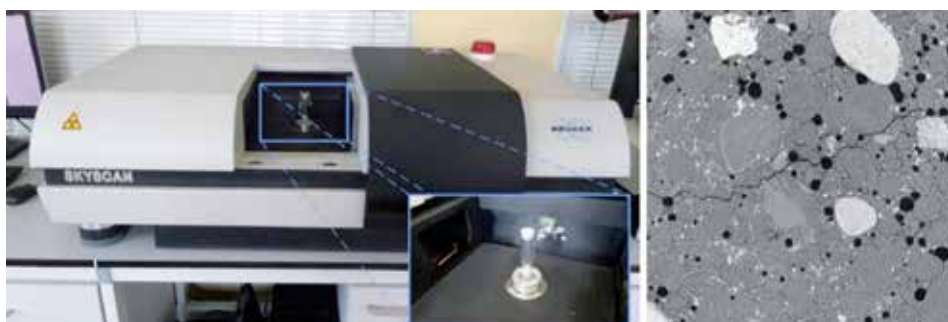


Fig. 19. A stand for an x-ray examination with computer microtomography and an example of a concrete cross-section, according to [42]

Rys. 19. Stanowisko do badań rentgenowską mikrotomografią komputerową oraz przykładowy przekrój betonu, za [42]

3.3. Test loads of a structure

One of the methods that leads to a reliable assessment of the safety and reliability of reinforced concrete structure elements are test loads that are used in justified cases. When signalling this problem, it should be noted that they are performed, e.g. when there is a need to ascertain the current limit state of the load-bearing capacity or the limit state of the serviceability of a structural element, which cannot be reliably carried out when conducting research or calculations. The reason for this may be, e.g. a fire that had an impact on an object in the past. Test loads are usually non-destructive and can be carried out in field conditions or in a laboratory.

According to [7, 39], due to the objectives and methods of conducting research, test loads have to, among others, show whether elements or constructions were made correctly and behave in accordance with the design assumptions, assess the possibility of transferring loads by the tested structural element or other structural elements cooperating with it, evaluate the behaviour of the entire structure, and also check the behaviour of a structure under design loads. However, load-bearing capacities are determined on the basis of deformation measurements.

3.3. Obciążenia próbne konstrukcji

Jedną z dróg lub inaczej mówiąc metod albo sposobów prowadzących do wiarygodnej oceny bezpieczeństwa i niezawodności elementów konstrukcji żelbetowych są stosowane w przypadkach uzasadnionych obciążenia próbne. Sygnalizując ten problem należy zauważyć, że wykonuje się je na przykład w sytuacji, gdy zachodzi potrzeba upewnienia się co do aktualnego stanu granicznego nośności albo stanu granicznego użyteczności elementu konstrukcyjnego, a nie można tego z różnych przyczyn dokonać wiarygodnie na drodze badawczej i obliczeniowej. Przyczyną tego może być na przykład pożar, któremu obiekt uległ w przeszłości. Zazwyczaj obciążenia próbne mają charakter nieniszczący i mogą być realizowane w warunkach polowych lub w laboratorium.

Według [7, 39], ze względu na cele i sposoby prowadzenia badań, obciążenia próbne mają m.in. za zadanie wykazać, czy elementy lub konstrukcje wykonane zostały prawidłowo i zachowują się zgodnie z założeniami projektów, sprawdzenia zachowania się konstrukcji pod obciążeniami projektowymi z tym, że nośności określone są na podstawie pomiaru odkształceń, oceny możliwości przenoszenia obciążeń przez testowany element konstrukcyjny lub

During the conducted test loads, the object of measurements may be the deflection of the tested reinforced concrete element, crack width, or the development of destructive processes in concrete and at the interface of concrete and reinforcing bars caused by a growing test load. Depending on the object of measurements, an appropriate research method (apparatus) should be chosen in order to ensure such measurements. For example, the acoustic emission method is used to “track” the development of the above-mentioned destructive processes [20-23].

In conclusion, it should be said that when planning the test loads of a reinforced concrete element, one should rely largely on their own engineering knowledge, because there are no detailed guidelines for determining the value of these loads. Some practical tips on this issue can be found in papers [4, 7, 39, 40, 41]. The rule, however, is that the loads should be preceded by a detailed diagnosis of an element or structure, among others, regarding: the determination of material characteristics of concrete, reinforcing steel and a concrete cover; the specification of real geometrical dimensions; the identification of supporting conditions, connections, etc.

4. SUMMARY

The subject matter presented in the paper that concerns the principles of performing expertise and testing reinforced concrete constructions is, in the opinion of the authors, seen as crucial regarding the efforts to ensure an appropriate safety, reliability and durability of these constructions. The continuation of this idea is this paper, which has been prepared especially for those who have not yet prepared expert opinions on reinforced concrete structures, or have relatively little experience in this topic.

Therefore, in the introductory part, the situations that justify the need to prepare expert opinions were approximated and highlighted. Afterwards, the usual layout and content of expert opinions was given and commented on. Much attention was devoted in the paper to diagnostic procedures, which are very important, necessary and required in order to correctly prepare an expert report. The general rules to be followed in this matter were specified, the available diagnostic methods and techniques were reviewed, and the suggestion of various classifications of these methods were also provided in order to facilitate the selection of a specific method for certain diagnostic

też przez inne współpracujące z nimi elementy konstrukcyjne, oceny zachowania się całej konstrukcji.

W trakcie realizowanych obciążeń próbnych przedmiotem pomiarów może być ugięcie badanego elementu żelbetowego, szerokość rozwarcia rys lub też rozwój procesów destrukcyjnych w betonie i na styku betonu z prętami zbrojeniowymi powodowany narastającym obciążeniem próbnym. W zależności od przedmiotu pomiaru należy dobrać odpowiednią metodę badawczą (aparaturę), zapewniającą taki pomiar. Przykładowo do „śledzenia” rozwoju ww. procesów destrukcyjnych przydatna jest metoda emisji akustycznej [20-23].

W podsumowaniu należy stwierdzić, że planując obciążenia próbne elementu konstrukcyjnego żelbetowego, należy w dużej mierze polegać na własnej wiedzy inżynierskiej, gdyż brak jest szczegółowych wytycznych dotyczących ustalania wartości tych obciążeń. Pewne praktyczne wskazówki w tej kwestii można znaleźć w pracach [4, 7, 39, 40, 41]. Zasadą jest jednak to, że obciążenia powinny być poprzedzone szczegółową diagnostyką elementu lub konstrukcji, m. in. w zakresie określenia charakterystyk materiałowych betonu i stali zbrojeniowej, otulenia zbrojenia betonem, ustalenia rzeczywistych wymiarów geometrycznych, rozpoznania warunków podparcia, połączenia itd.

4. PODSUMOWANIE

Prezentowana w referacie tematyka, dotycząca zasad wykonywania ekspertyz i badań konstrukcji żelbetowych, kwalifikuje się zdaniem autorów do kluczowych w rozumieniu starań o zapewnienie należytego bezpieczeństwa, niezawodności i trwałości tych konstrukcji. Kontynuacją tej myśli jest niniejszy referat przygotowany przede wszystkim z myślą o tych, którzy do tej pory jeszcze nie sporządzali ekspertyz konstrukcji żelbetowych lub posiadają w tym temacie stosunkowo niewielkie doświadczenie. Dlatego w części wstępnej przybliżono i naświetlono sytuacje uzasadniające potrzebę sporządzania opracowań o charakterze ekspertyzowym. Następnie podano i skomentowano zwyczajowo przyjmowany układ i treści ekspertyz. Dużo uwagi poświęcono w referacie postępowaniu diagnostycznemu, które jest bardzo ważne, niezbędne i konieczne do należytego sporządzenia opracowania ekspertyzowego, przydatnego do celu, któremu ma służyć. Sprecyzowano w tej kwestii ogólne zasady, których należy przestrzegać, dokonano przeglądu dostępnych metod i technik diagnostycznych wraz z zaproponowaniem różnorodnych ich klasyfikacji w celu ułatwienia doboru konkretnych metod do konkretnych

needs. In addition, the most important literature was presented, including book publications [1-4, 6-8, 12, 13, 25] that are extremely useful in the discussed topic and which therefore deserve special attention.

potrzeb diagnostycznych. Ponadto przedstawiono najważniejszą literaturę, wśród której zwracają uwagę opracowania książkowe [1-4, 6-8, 12, 13, 25], niezwykle przydatne w rozpatrywanym temacie.

REFERENCES

- [1] Czarnecki L., Łukowski P., Garbacz A.: *Repair and protection of concrete structures. Commentary to PN-EN 1504*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warsaw 2017.
- [2] Bień J.: *Damage and diagnostics of bridge structures*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warsaw 2010.
- [3] Czarnecki L., Emmons P.H.: *Repair and protection of concrete structures*. Polish Cement, Cracow 2002.
- [4] Runkiewicz L.: *Strengthening of reinforced concrete structures*. Guide. Building Research Institute, Warsaw 2016.
- [5] Act from July 7, 1994. Construction law (Journal of Laws No. 89 from 1994, as amended).
- [6] Czapliński K.: *The method and form of preparing construction expertise reports*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2012.
- [7] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: *Diagnostics of reinforced concrete structures*. Volume 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warsaw 2010.
- [8] Zybur A., Jaśniok M., Jaśniok T.: *Diagnostics of reinforced concrete structures*. Volume 2. Tests of reinforcement corrosion and the protective properties of concrete. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warsaw 2017.
- [9] Hoła J., Bień J., Sadowski Ł., Schabowicz K.: *Non – destruktywne i pół – destruktywne diagnostyki betonowych konstrukcji pod kątem trwałości*. Bulletin of the Polish Academy of Science. Technical Sciences, 2015 vol. 63, 1, 87-96.
- [10] Runkiewicz L.: *Tests of reinforced concrete structures*. Gamma Office, Warsaw 2002.
- [11] Hoła J., Schabowicz K.: *Diagnostics of building objects*. Building Materials, 2015, 5, pp. 3-7.
- [12] Brunarski L., Runkiewicz L.: ITB instruction No. 209. *Instructions of using the ultrasonic method for non-destructive quality control of concrete in constructions*. Building Research Institute, Warsaw 1997.
- [13] Brunarski L., Dohojda M.: *Diagnostics of concrete strength in constructions*. Building Research Institute, Warsaw 2015.
- [14] PN-EN 12504-4:2005. Concrete testing. Part 4. Determination of ultrasonic wave velocity.
- [15] PN-EN 13791:2008. The assessment of compressive concrete strength in constructions and prefabricated concrete products.
- [16] Hoła J., Stawiski B.: *Research on the suitability of the ultrasonic method for quick assessment of the quality of concrete structures*. Non-destructive Test Notebooks. 32 National Non-Destructive Test Conference. Międzyzdroje 2003, pp. 111-114.
- [17] Sansalone M., Streett W.: *Impact – echo. Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonary*. Bullbrier Press, Ithaca 1997.
- [18] Hoła J., Schabowicz K.: *State – of – the – art. Nondestructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2010, Vol. 10, 3, 5-18.
- [19] Schabowicz K., Suvorov V.: *Nondestructive testing and constructing profiles of back walls by means of ultrasonic tomography*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 50 (2) 2014, Vol. 50, 2, 109-119.
- [20] Hoła J.: *Acoustic emission, sources, methods, applications*. Warsaw. Polish Academy of Sciences, Institute of Fundamental Problems of Technology, Pascal Office, 1994.
- [21] Świt G.: *The acoustic emission method in the analysis of damage of prestressed concrete structures*. Monograph. Kielce University of Technology, Kielce 2008.
- [22] Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W., Krampikowska A.: *Experimental validation of concrete crack identification and location with acoustic emission method*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2012, 12, 23-28.
- [23] Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W., et al.: *The application of the acoustic emission method to analyze the scratch process of reinforced concrete beams*. Scientific Papers of Rzeszów University of Technology: Building and Environmental Engineering, Notebook 59, 2012, pp. 76-84.
- [24] Conyers L., Goodman D.: *Ground – penetrating radar*. AltraMira Press, 1997.
- [25] Runkiewicz L., Sieczkowski J.: *The assessment of concrete strength in constructions based on sclerometer tests*. Guide. Building Research Institute, Warsaw 2018.
- [26] PN-EN 12504-2:2013-03. Concrete tests in structures. Part 2. Non-destructive testing. Determination of the number of reflections.
- [27] PN-EN 12504-3:2006. Concrete tests in structures. Part 3. Determination of the tearing force.
- [28] Malhotra V.M., Carino N.J.: *Handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC Press, 2004.

- [29] ASTM C 900-82: Standard Method for Pullout Strength of Hardened Concrete, ASTM Committee on Standards, 1916 Race Street, Philadelphia, Pa. 19103, USA.
- [30] Sadowski Ł., Zak A., Hoła J.: *Multi-sensor evaluation of the concrete within the interlayer bond with regard to pull-off adhesion*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18(2), 573-582.
- [31] Verbeck G.J.: *Field and laboratory studies of the sulphate resistance of concrete*. Portland Cement Association. Research and Development Laboratories, 1967.
- [32] ASTM C1202. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2010.
- [33] ASTM C 803 „Penetration resistance of Hardened Concrete”.
- [34] Monteiro J.M., Morrison F., Frangos W.: *Nondestructive measurement of corrosion state reinforcing steel in concrete*. ACI materials Journal, Vol. 99, 6.
- [35] Sadowski Ł.: *Methodology for assessing the probability of corrosion in concrete structures on the basis of half-cell potential and concrete resistivity measurements*. The Scientific World Journal, 2013.
- [36] Materials from www.agriculturesolutions.com.
- [37] Jasieńko J., Moczko M., Moczko A., Dżugaj R.: *Examination of the mechanical and physical characteristics of concrete in the lower perimeter ring of the dome of the Centennial Hall in Wrocław*. Conservation News, 2010, 21-34.
- [38] Czarnecki L., Woyciechowski P.: *Prediction of the reinforced concrete structure durability under the risk of carbonation and chloride aggression*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2013, 61, 1, 173-181.
- [39] Lewicki B.: *Test loads of the constructions of existing buildings*. Scientific Works of the Building Research Institute, Warsaw 1997.
- [40] Lewicki B.: *An assessment based on the test loads of an existing structure for the intended use*. Materials of the 21 National Conference “Workshop of the Designer”, volume 2. Szczyrk 2006, 203-2015.
- [41] Masłowska E., Spiżewska D.: *Strengthening of construction structures*. Arkady, Warsaw 2000.
- [42] Stefaniuk D., Sadowski Ł.: *The use of X-ray computer microtomography to assess selected features of the microstructure of concrete*, National Conference on Radiographic Research - “POPÓW 2016”.

Acknowledgments:

The work was financed by Wrocław University of Technology.

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Wrocławską.

PAWEŁ MIECZKOWSKI
West Pomeranian University of Technology, Szczecin
e-mail: pawel.mieczkowski@zut.edu.pl

Manuscript submitted 2018.10.11 – revised 2018.11.05
initially accepted for publication 2018.10.09, published in December 2018

THE EFFECT OF AN ORGANOMETALLIC CATALYST ON THE PROPERTIES OF PEN GRADE BITUMENS

WPŁYW KATALIZATORA METALOORGANICZNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI ASFALTÓW DROGOWYCH

DOI: 10.30540/sae-2018-031

Abstract

The research objective of the experiments and analyses described in this paper was evaluation of the effect of a specific organometallic catalyst on the properties of 50/70 and 70/100 pen (paving) grade bitumens. The catalyst under analysis is anhydrous iron (III) chloride. It was added to the bitumens at the percentages of 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2%. The research included determination of penetration at 25°C, ring and ball softening point test and Fraass breaking point test. The tests were carried out at three states of the tested binder: non-aged, after short-term ageing (RTFOT procedure) and after long-term ageing (PAV procedure). Additionally, viscosity was determined before and after RTFOT ageing. The experimental data were used to determine the penetration index (PI) value and the plasticity range of bitumens. An increase of the bitumen hardness was observed due to organometallic catalyst addition, particularly noticeable after long-term ageing. The catalyst was found to reduce the viscosity of bitumens in the production temperature range

Keywords: bitumen, organometallic catalyst, iron (III) chloride, short-term ageing, long-term ageing, RTFOT, PAV.

Streszczenie

Przedmiotem badań i analiz omówionych w artykule jest ocena wpływu katalizatora metaloorganicznego na właściwości asfaltu drogowego 50/70 i 70/100. Funkcję katalizatora metaloorganicznego pełnił bezwodny chlorek żelaza (III). Dostawiano go w ilości 0,5%, 1,0%, 1,5% oraz 2%. Zakres badań obejmował: penetrację w 25°C, temperaturę mięknięcia wg metody „pierścień i kula” oraz temperaturę łamliwości wg Fraassa. Badania wykonano dla trzech stanów lepiszcza: przed starzeniem, po starzeniu krótkoterminowym wg RTFOT oraz po starzeniu długoterminowym wg PAV. Dodatkowo wykonano oznaczenie lepkości przed starzeniem i po starzeniu wg RTFOT. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono wartość indeksu penetracji I_p oraz temperaturowy zakres plastyczności TZP. Katalizator metaloorganiczny wpłynął na zwiększenie twardości lepiszcza, szczególnie po starzeniu długotrwałym. Zaobserwowano spadek lepkości asfaltu z udziałem katalizatora w zakresie temperatur technologicznych.

Słowa kluczowe: asfalt, katalizator metaloorganiczny, chlorek żelaza (III), starzenie krótkoterminowe, starzenie długoterminowe, RTFOT, PAV.

1. INTRODUCTION

The on-going increase in the loading of pavements by vehicle traffic with an increasing proportion of HGV's calls for engineering efforts to enable obtaining the required performance parameters of the designed pavements. With climate-specific weather effects coming to play attention to the behaviour of bitumen-aggregate mixtures (asphalt mixtures) both at low (below freezing) and high service temperatures.

The scope of improvement in the properties of bitumen-aggregate mixtures through careful

1. WPROWADZENIE

Ciągły wzrost obciążeń pojazdami samochodowymi (a przede wszystkim zwiększanie udziału pojazdów ciężarowych) zmusza do poszukiwania rozwiązań, gwarantujących uzyskanie właściwych cech funkcjonalnych nawierzchni. Przy uwzględnieniu dodatkowych czynników, tj. oddziaływań klimatyczno-pogodowych, kierunki podejmowanych działań muszą uwzględniać zachowanie się mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA) zarówno w niskich (ujemnych), jak i wysokich temperaturach eksploatacyjnych.

selection or processing of aggregate (grading, rock type, cubical shape of grains, etc.) is quite limited. Much better results can be obtained by using a better bituminous binder with improved performance parameters. This is of particular importance when we consider the cumulative effect of external factors, i.e. traffic loading and weather. The binder properties can be improved, for example, by adding various modifiers which, besides improving the properties of the binders themselves, also improve the high temperature strength parameters of the bitumen-aggregate mixtures (resistance to permanent deformations) and their low temperature performance (resistance to low-temperature cracking). The most widely used bitumen modifiers are thermoplastic polymers (SBS, SIS, EVA, APP, etc.), crumb rubber from used tyres (natural and synthetic), synthetic resins, etc. [6, 8, 12, 14, 15].

Organometallic catalysts are another group of bitumen modifiers. Their primary effect is stiffening of bitumen by oxidative coupling polymerisation [4, 5, 6, 7, 16, 17, 18]. The result of such modification depends on the type of the organometallic salt and the course of the oxidation process [1, 2, 4, 9, 13, 17]. An additional benefit from using such additives can include reduced mixture production and placement temperatures resulting in reduced environmental emission of toxic and greenhouse gasses [3, 10, 17].

The paper presents the results of laboratory testing of 50/70 and 70/100 paving grade bitumens: virgin and modified with anhydrous iron chloride (III). The properties of bituminous binders were determined at three points: before ageing, after short-term RTFOT ageing and after long-term PAV ageing.

2. THE BITUMEN MODIFICATION MECHANISM OF ORGANOMETALLIC CATALYSTS

All construction materials are built of elementary particles. Important from the composition of matter point of view are those particles which are permanently bound by the atom (proton, neutron, electron) and do not undergo any changes during the life cycle of the material (comprising production, operation and retirement stages). Atoms (when spaced closely enough) are bonded by different forces including:

- interatomic forces (caused by migration and possible transfer of electrons between adjacent atoms, including ionic attraction, covalent bonding, polar bonds, etc.),

Możliwości poprawy właściwości MMA poprzez odpowiedni dobór kruszyw czy ich uszlachetnianie (uziarnienie, rodzaj skały, kubeczność ziaren itp.) są dość ograniczone. Lepsze rezultaty można uzyskać poprzez zastosowanie odpowiedniego lepiszcza asfaltowego o podwyższonych parametrach funkcjonalnych. Jest to szczególnie ważne w aspekcie kumulacji oddziaływań zewnętrznych, tj. od ruchu samochodowego i czynników atmosferycznych. Jednym ze sposobów poprawy cech lepiszczy jest stosowanie różnego rodzaju modyfikatorów, które oprócz zmian właściwości asfaltu wpływają na podwyższenie parametrów wytrzymałościowych mieszanek w wysokich temperaturach (podatność na deformacje trwałe) oraz zwiększają ich odporność na niskie temperatury (spękania niskotemperaturowe). Do najbardziej popularnych modyfikatorów asfaltów należą polimery termoplastyczne (SBS, SIS, EVA, APP itp.), guma ze zużytych opon samochodowych (kautczuk naturalny i sztuczny), żywice syntetyczne itp. [6, 8, 12, 14, 15]

Innego rodzaju modyfikatorem lepiszczy asfaltowych mogą być katalizatory metaloorganiczne. Ich działanie polega w głównej mierze na usztywnieniu asfaltu w wyniku polimeryzacji utleniającej [4, 5, 6, 7, 16, 17, 18]. Uzyskiwane efekty zależą od rodzaju wykorzystanej soli metaloorganicznej oraz przebiegu reakcji utleniania [1, 2, 4, 9, 13, 17]. Dodatkową korzyścią ze stosowania tego rodzaju dodatków może być obniżenie temperatury wytwarzania i wbudowywania MMA, a tym samym zmniejszenie wydatkowania gazów toksycznych i cieplarnianych do atmosfery [3, 10, 17].

W artykule zostały przedstawione wyniki badań laboratoryjnych asfaltów drogowych 50/70 i 70/100 „bazowych” oraz modyfikowanych bezwodnym chlorkiem żelaza (III). Właściwości lepiszczy asfaltowych były wyznaczane w trzech etapach: przed starzeniem, po starzeniu krótkotrwałym wg RTFOT oraz po starzeniu długotrwałym wg PAV.

2. MECHANIZM ODDZIAŁYWANIA KATALIZATORÓW METALOORGANICZNYCH NA ASFALTY

Wyroby budowlane są zbudowane z cząstek elementarnych. Istotne znaczenie (z punktu widzenia budowy materii) mają cząstki, które trwale wchodzi w skład atomu (proton, neutron, elektron) i nie podlegają zmianom w okresie „życia” materiału (etap wytwarzania, eksploatacji czy destrukcji). Atomy (zbliżone do siebie na określoną odległość) są połączone siłami, wśród których można m.in. wyróżnić:

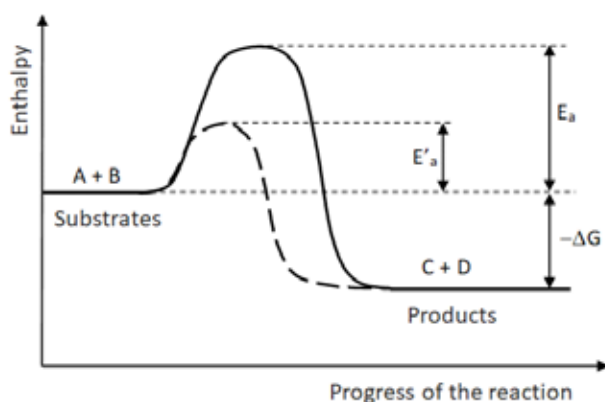
- międzyatomowe (będące wynikiem wędrówki elektronów i ewentualnej ich wymiany między są-

- intermolecular forces (they are not associated with the transfer of electrons and include van der Waal's force, hydrogen bonds, etc.)

The energy of the above-mentioned bonds is varied, falling in the ranges of 250-1000 kJ/mole for interatomic (1st order) forces and 2-40 kJ/mole for intermolecular (2nd order) forces.

Organometallic catalysts are chemical compounds in which the carbon atoms of organic groups are bonded to metal atoms. A characteristic feature are coordinate bonds, i.e. covalent bonds in which both shared electrons derive from a single atom. These bonds result from the Lewis acid-base reaction [1, 2, 17]. The metal atoms in such adducts are located centrally with the oxygen atoms, in most cases, occupying peripheral locations. Groups of this kind (binding to the central atom) classify as ligands, ligand being a molecule, group or ion bonded to a metal atom or ion. They are treated as Lewis bases (electron pair donors) and the central metal atoms are treated as Lewis acids (electron pair acceptors) [1, 2, 17].

The catalysts shorten the time the reaction needs to reach the chemical equilibrium, reduce the amount of energy needed to initiate the reaction and speed up the reaction itself (Fig. 1). The catalyst does not initiate a reaction that otherwise could not happen. Its effect is limited exclusively to changing the speed of reaction with no influence on the chemical composition when it ends [2].



Based on the enthalpy changes (Fig. 1) we can conclude that valence electrons regroup during collisions of molecules. This is accompanied with an increase of energy of the system. In the first step a transient activated complex is formed whose energy is greater than the energy of substrates by activation

siedniami atomami, np. jonowe, kowalencyjne, spolaryzowane itp.),

- międzycząsteczkowe (ich występowanie nie jest związane z wymianą elektronów, np. siły van der Waalsa, wiązania wodorowe itp.).

Energia wymienionych wiązań jest zróżnicowana w przypadku wiązań międzyatomowych (I rzędu) wynosi 250-1000 kJ/mol, dla międzycząsteczkowych (II rzędu) mieści się w granicach 2-40 kJ/mol.

Katalizatory metaloorganiczne są to związki, w których atomy węgla grup organicznych są powiązane z atomami metalu. Cechą charakterystyczną jest występowanie wiązań koordynacyjnych, czyli takich wiązań kowalencyjnych, w których obydwie wiążące elektrony pochodzą z tego samego atomu. Wiazania tego rodzaju powstają w przypadku przyłączenia zasady Lewisa do kwasu Lewisa [1, 2, 17]. Atom metalu w takim związku jest zlokalizowany w środku struktury, a atomy tlenu najczęściej są usytuowane peryferyjnie. Tego rodzaju grupy (związane z atomem centralnym) noszą nazwę ligandów (ligand – cząsteczka, grupa lub jon związany z atomem lub jonem metalu). Ligandy traktuje się jako zasady Lewisa (donory pary elektronowej), natomiast atomy metalu jak kwasy Lewisa (akceptory pary elektronowej) [1, 2, 17].

Katalizatory wpływają na szybsze osiągnięcie przez reakcję stanu równowagi chemicznej, zmniejszają zapotrzebowanie na energię potrzebną do inicjacji reakcji oraz przyspieszają jej przebieg (rys. 1). Katalizator nie wywołuje reakcji, która teoretycznie nie może zajść. Jego wpływ ogranicza się wyłącznie do zmiany szybkości reakcji bez zmiany składu chemicznego po jej zakończeniu [2].

Fig. 1. The course of free enthalpy for the reactions without (continuous line) and with the catalyst (dashed line)

Rys. 1. Przebieg entalpii swobodnej dla reakcji bez (linia ciągła) i z udziałem katalizatora (linia przerywana)

Na podstawie zachodzących zmian w entalpii (rys. 1) można stwierdzić, że w czasie zderzania się cząstek następuje przegrupowanie ich elektronów walencyjnych. Jest to połączone ze wzrostem energii układu. W pierwszym etapie tworzy się nietrwały kompleks aktywny, którego energia jest większa od

energy E . It is immediately decomposed, forming more permanent products. The catalysts lower the energy barrier, i.e. activation energy from E_a to E'_a thus increasing the number of molecules capable of taking part in the reaction. The difference between the energy of substrates and products ($-\Delta G$) is the energy evolved by the system in connection with the reaction.

Organometallic catalysts can be used for modifying paving grade bitumens. When combined with bitumens they cause oxidative coupling polymerisation of the latter. Hardening of the binder is the result of this process. Two stages can be distinguished in the reaction between organometallic salts and bitumens. In the first stage hydroxides are formed (at a high temperature and in the presence of oxygen) followed by formation of di-ketones (at the most sensitive bonds of aromatic and aliphatic compounds of bitumens). Then complexes of metals and ketones are formed resulting in cross-linking of bitumen. This increases the viscosity and cohesion of bitumen-aggregate mixtures.

The catalyst enhances bonding of metal ions and bitumen molecules. The process of polymerisation proceeds quite rapidly after mixing the binder with aggregate in the presence of active oxygen. This is attributed to:

- thin films of bitumen deposited on the grains of mineral aggregate (the catalyst is deposited on aggregate, filler in particular),
- intensification of bitumen oxidation during mixing with hot aggregate (at 160-210°C temperature range).

The oxidation and polymerisation rates decrease when the binder has been mixed with aggregate (in particular during placement) which is attributed primarily to limited access of oxygen and lower temperature. However, oxidative coupling reactions can be assumed to take place in the material also after placement (involving then atmospheric oxygen).

Another effect of organometallic salt is a decrease in the viscosity of bitumen (within the range of the process temperatures) caused by the inert hydrocarbon content. This enables lowering the temperature during production and placement of bitumen-aggregate mixture by as much as 30°C (as compared to conventional process) and, as a consequence, reduce atmospheric emissions of both toxic (SO_2 , NO_2 , NO etc.) and greenhouse gasses (CO_2 , CO).

energii substratów o energię aktywacji E . Ulega on natychmiastowemu rozpadowi, tworząc trwalsze produkty reakcji. Przy udziale katalizatora bariera energetyczna, czyli energia aktywacji E_a , obniża się do E'_a , a tym samym większa liczba cząsteczek jest zdolna do reakcji. Różnica pomiędzy energią substratów i produktów ($-\Delta G$) jest to energia, jaka jest wydzielana przez układ w wyniku zaistniałej reakcji.

Katalizatory metaloorganiczne mogą być modyfikatorami asfaltów drogowych. Dodane do asfaltu wchodzi z nim w reakcję polimeryzacji utleniającej. Efektem tego jest utwardzenie lepiszcza. Reakcje pomiędzy solą metaloorganiczną a asfaltem można podzielić na dwa etapy. W pierwszym etapie powstają najpierw wodorotlenki (w wysokiej temperaturze w obecności tlenu), a następnie dwuketony (w miejscach najbardziej wrażliwych połączeń aromatyczno-alifatycznych asfaltu). W drugim etapie tworzą się kompleksy metali z ketonami, wywołujące usieciwienie asfaltu. Wynikiem tego jest wzrost lepkości asfaltu i kohezji mieszanek mineralno-asfaltowych.

Katalizator ułatwia tworzenie wiązań między jonami metalu a cząstkami asfaltu. Proces polimeryzacji przebiega stosunkowo szybko po wymieszaniu lepiszcza z kruszywem w obecności aktywnego tlenu. Jest to wynikiem:

- cienkich błonek asfaltu na ziarnach agregatu mineralnego (katalizator jest ułożony na kruszywie, a zwłaszcza na wypełniaczu),
- nasilenia reakcji utleniania asfaltu w trakcie procesu mieszania z gorącym kruszywem (w temperaturze rzędu 160-210°C).

Szybkość utleniania i polimeryzacji zmniejsza się po wymieszaniu lepiszcza z kruszywem (szczególnie w trakcie wbudowywania), przede wszystkim ze względu na ograniczony dostęp tlenu oraz spadek temperatury. Można jednak założyć, że reakcje polimeryzacji utleniającej mogą zachodzić również po zakończeniu procesu wbudowywania (przy udziale tlenu z powietrza).

Sól metaloorganiczna wpływa również na obniżenie lepkości asfaltu (w zakresie temperatur technologicznych), co jest wynikiem zawartej w niej obojętnej części węglowodorowej. Efektem tego może być obniżenie temperatury wytwarzania i wbudowywania MMA nawet o 30°C (w stosunku do standardowej technologii), a tym samym i zmniejszenie emisji gazów toksycznych (SO_2 , NO_2 , NO itd.) i cieplarnianych (CO_2 , CO) do atmosfery.

3. TEST MATERIALS

Organometallic catalysts can be used to modify bitumen binders used for production of binder course and base course bitumen-aggregate mixtures. They are, however, not suitable for wearing course mixtures as the layers could become excessively stiff and thus more sensitive to cracking. The two materials selected for testing were 50/70 and 70/100 paving grade (straight-run) bitumens from the same manufacturer. These bitumens are relatively soft. The rationale for choosing them included the need to obtain the desired strength parameters of the binders (after modification becoming close to that of hard bitumens) and low viscosity during production and placement of bitumen-aggregate mixtures for which they were used. Anhydrous iron chloride (III) – FeCl_3 was chosen as an example of organometallic catalyst. Attention is drawn to its high moisture absorbency requiring special precautions during application. This was one of the reasons to use the compound in the form of a 5:1 mixture of iron chloride and naphthenic acids. Naphthenic acids are a complex mixture of different hydrocarbon compounds, such as oxyacids, alcohols, esters and other compounds (having a structure similar to the constituents of bitumen).

4. METHODOLOGY OF TESTING

The 50/70 and 70/100 bitumens were modified by adding 0.5-2.0% of iron chloride (III) (at 0.5% intervals). In each case the specimens were prepared by heating of 1 kg of bitumen in a ca. 2 litre vessel (protected from the ingress of air) to the temperature of 160°C. This process was performed in an oil bath to ensure uniform warming of the vessel and the bitumen placed inside it. After the specified temperature was attained, modifier was added to the binder at the pre-determined proportion i.e. from 0.5 to 2.5% at 0.5% intervals. As soon as it has been dispersed in the bitumen the mix was stirred for 10 minutes at a constant speed of 240 r.p.m. (Fig. 2). Then heating was turned off and mixing was continued for another 10 minutes at a slower speed of 120 r.p.m. At this point the material was ready for testing. The same procedure, i.e. heating up to 160°C and mixing for 20 minutes was used to prepare the reference specimens.

3. MATERIAŁY DO BADAŃ

Katalizatory metaloorganiczne można wykorzystywać do modyfikacji lepiszczy asfaltowych przeznaczonych do warstw wiążących i podbudów. Stosowanie ich do warstw ścieralnych wiązałoby się z możliwością przesztywnienia mieszanek i zwiększenia ich podatności na spękania. Do badań wytypowano dwa rodzaje asfaltów drogowych (destylowanych) od jednego producenta: 50/70 i 70/100. Są to asfalty stosunkowo miękkie. Ich wybór wynikał z jednej strony z konieczności uzyskania odpowiednich parametrów wytrzymałościowych lepiszczy (po modyfikacji parametry zbliżone do asfaltów twardych), z drugiej niskiej lepkości na etapie wytwarzania i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych z ich udziałem. W charakterze katalizatora metaloorganicznego zastosowano bezwodny chlorek żelaza (III) – FeCl_3 . Należy zaznaczyć, że związek ten charakteryzuje się wysoką higroskopijnością, co zmusza do zachowania szczególnych środków ostrożności przy jego stosowaniu. Z tego m.in. względu do badań preparowano mieszaninę związku metaloorganicznego z kwasami naftenowymi w stosunku 5:1 (chlorek żelaza:kwasy naftenowe). Kwasy naftenowe stanowiły konglomerat różnych substancji węglowodorowych, m.in. oksykwasów, alkoholi, estrów i innych (o budowie zbliżonej do składników zawartych w asfalcie).

4. METODYKA BADAŃ

Asfalty drogowe 50/70 i 70/100 modyfikowano chlorkiem żelaza (III) w ilości od 0,5% do 2,0% (co 0,5%). Przygotowanie próbek badawczych polegało każdorazowo na podgrzewaniu asfaltu (o masie 1 kg) w pojemniku o objętości ok. 2 dm³ (zabezpieczonym przed dopływem powietrza) do temperatury 160°C. Proces ten prowadzono w łaźni olejowej, gwarantującej równomierne ogrzewanie pojemnika i znajdującego się w nim asfaltu. Po uzyskaniu wymaganej temperatury do lepiszcza dodawano w odpowiedniej ilości modyfikator (od 0,5% do 2,0%, co 0,5%). Po jego rozproszaniu w lepiszczu całość mieszano przez 10 minut przy użyciu mieszadła ze stałą prędkością 240 obr./min. (rys. 2). Po zakończeniu tego etapu wyłączano ogrzewanie i przez kolejne 10 minut prowadzono proces mieszania z prędkością 120 obr./min. Tak przygotowane próbki stanowiły materiał badawczy. W identyczny sposób preparowano referencyjny asfalt (bez modyfikatora), tj. ogrzano go do temperatury 160°C i mieszano przez 20 minut.

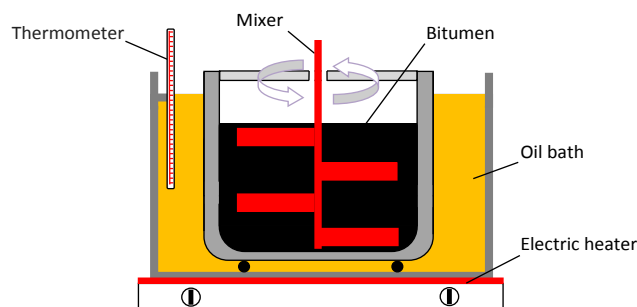


Fig. 2. Scheme of the bitumen modification device

Rys. 2. Schemat urządzenia do modyfikacji

The following tests were performed to determine the effect of modifier on the properties of bitumen binders (before and after short- and long-term ageing):

- penetration at 25°C according to EN 1426,
- softening point with ring and ball method according to EN 1427,
- Fraas breaking point test according to EN 12593.

Additionally for reference asphalts and with the participation of 1% and 2% FeCl_3 not subjected to aging and after technological aging (short-term), dynamic viscosity determination was carried out in the temperature range from 100°C to 170°C using a rotational viscometer (Fig. 3) in accordance with PN-EN 13302



Wpływ modyfikatora na właściwości lepiszczy asfaltowych (przed i po procesach starzenia technologicznego i eksploatacyjnego) określano na podstawie badań:

- penetracji oznaczonej w temperaturze 25°C zgodnie z PN-EN 1426,
- temperatury mięknięcia wg PiK oznaczonej zgodnie z PN-EN 1427,
- temperatury łamliwości wg Fraassa oznaczonej zgodnie z PN-EN 12593.

Dodatkowo dla asfaltów referencyjnych oraz z udziałem 1% i 2% FeCl_3 nie poddanych starzeniu oraz po starzeniu technologicznym (krótkotrwałym) wykonano oznaczenie lepkości dynamicznej w zakresie temperatur od 100°C do 170°C przy użyciu lepkościomierza obrotowego (rys. 3) zgodnie z PN-EN 13302.

Fig. 3. Brookfield rotary viscometer according to PN-EN 13302

Rys. 3. Lepkościomierz obrotowy Brookfielda wg PN-EN 13302

Short-term ageing was simulated with the RTFOT method. The test was carried out according to EN 12607-1. Long-term ageing, in turn, was simulated with the Pressure Ageing Vessel (PAV) method according to EN-14769.

Proces starzenia technologicznego (krótkoterminowego) w warunkach laboratoryjnych symulowano w oparciu o metodę RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test). Badanie zostało wykonane według PN-EN 12607-1. W przypadku starzenia eksploatacyjnego zastosowano metodę PAV (Pressure Aging Vessel) zgodnie z normą PN-EN 14769.

5. PRESENTATION AND ANALYSIS OF THE TEST RESULTS

The consistency of bitumens is determined with the needle penetration test. The test temperature was 25°C in accordance with the procedure prescribed in EN 1426. The specimens were prepared by filling the test containers with the bitumen to at least 10 mm in excess of the expected penetration depth. Next the specimen was cooled at room temperature (15-30°C) for 60-90 minutes and placed in a thermostatic water bath at the specified test temperature. After immersion in the constant temperature bath for the specified period the specimen was placed at the test stand and measurement was carried out according to the test procedure prescribed in the standard, i.e. with 100 g load applied on the needle for 5 sec. The test result before and after RTFOT and PAV ageing are displayed in Figures 4-5. Each result was calculated as an average of four determinations.

5. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA

Penetracja igłą pozwala określić konsystencję asfaltów. Badanie przeprowadzono w temperaturze 25°C, zgodnie z PN-EN 1426. Przygotowanie próbek polegało na napełnieniu naczynka penetracyjnego lepiskiem asfaltowym do wysokości co najmniej 10 mm większej od przewidywanego zagłębienia igły. Następnie próbkę schładzano w temperaturze otoczenia (15-30°C) w czasie 60-90 minut, po czym umieszczano w łaźni wodnej o ustalonej temperaturze badania. Po okresie termostatowania próbkę umieszczano na stanowisku badawczym i wykonywano pomiar zgodnie z wymaganiami normy, tj. przy obciążeniu igły 100 g, w czasie 5 s. Wyniki badań przed starzeniem oraz po starzeniu wg RTFOT i PAV przedstawiono na rysunkach 4-5. Wynik badania wyznaczono jako średnią z czterech oznaczeń.

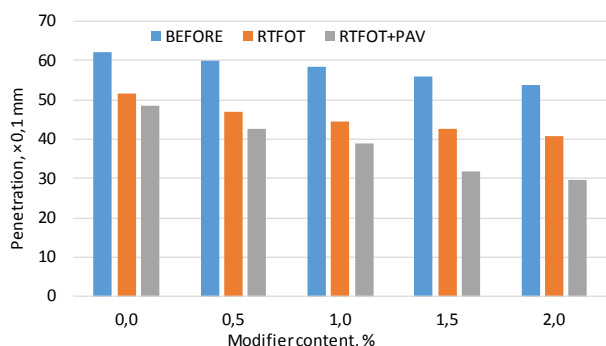


Fig. 4. Penetration at 25°C of anhydrous iron (III) chloride-modified bitumen 50/70

Rys. 4. Penetracja w temperaturze 25°C asfaltu 50/70 modyfikowanego bezwodnym chlorkiem żelaza (III)

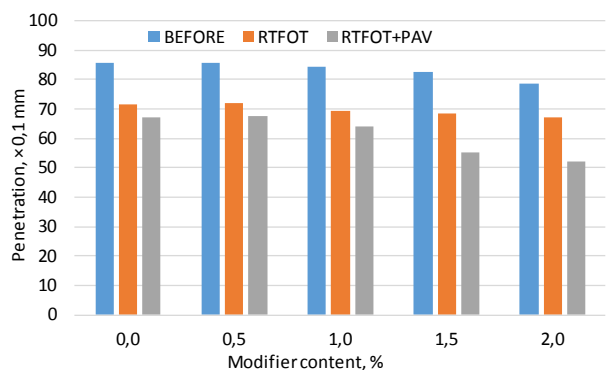


Fig. 5. Penetration at 25°C of anhydrous iron (III) chloride-modified bitumen 70/100

Rys. 5. Penetracja w temperaturze 25°C asfaltu 70/100 modyfikowanego bezwodnym chlorkiem żelaza (III)

Based on the penetration values at 25°C we can conclude that as the amount of modifier increases, the penetration value decreases, i.e. the bitumen becomes stiffer. The magnitude of these changes is similar for both bitumens. Addition of 2% of modifier decreased the penetration value obtained before ageing by 8.5-11×0.1 mm. After RTFOT ageing the decrease was in the range of ca. 10-15×0.1 mm. The subsequent decrease of penetration after PAV ageing

Z przeprowadzonych oznaczeń penetracji w temperaturze 25°C wynika, że wzrost zawartości modyfikatora wpływa na spadek penetracji (uszywnienie asfaltu). W obu lepiskach te zmiany są na zbliżonym poziomie. Przed starzeniem przy 2% dodatku modyfikatora wartość penetracji zmniejszyła się o 8,5-11×0,1 mm. Po starzeniu RTFOT spadek wyniósł ok. 10-15×0,1 mm. Po starzeniu PAV kolejny spadek penetracji był stosunkowo niewielki (ok. 3-6×0,1 mm)

was relatively small (ca. $3-6 \times 0.1$ mm) in the case of virgin and slightly modified bitumens (with up to 1% modifier content). A much greater decrease (ca. $11-15 \times 0.1$ mm) was noted for modifiers containing 1.5-2.0% of modifier.

The penetration data were analysed by multi-factor ANOVA. The purpose was to assess the effect of three factors: modifier content, ageing (RTFOT and PAV) and the interaction between the two. The values of the statistical parameters defining the magnitude of the effect of these factors on the penetration characteristic of the tested binders are given in Table 1.

przy asfaltach bazowych i niewielkiej ilości modyfikatora (do 1%). Przy zawartości modyfikatora 1,5-2,0% spadek penetracji był znacznie większy (ok. $11-15 \times 0,1$ mm).

Uzyskane wartości z badań penetracji poddano wieloczynnikowej analizie wariancji. Oceniano wpływ trzech czynników, tj. zawartości modyfikatora, starzenia (RTFOT i PAV) oraz interakcji pomiędzy zawartością modyfikatora i starzeniem. Wartości statystyczne określające poziom wpływu tych czynników na cechę penetracja badanych lepiszczy przedstawiono w tabeli 1.

Table 1. One-dimensional multivariate analysis of variance for penetration, bitumen 50/70 and 70/100

Tabela 1. Jednowymiarowa analiza wariancji wieloczynnikowej cechy penetracja dla asfaltu 50/70 i 70/100

Factor	Penetration [$\times 0.1$ mm]							
	50/70				70/100			
	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
Modifier content	1300.04	325.01	939.0	$<1 \times 10^{-6}$	769.64	192.41	768.12	$<1 \times 10^{-6}$
Ageing	4112.32	2056.16	5940.6	$<1 \times 10^{-6}$	4946.72	2473.36	9878.28	$<1 \times 10^{-6}$
Modifier content $\times$ ageing	202.80	25.35	73.2	$<1 \times 10^{-6}$	259.68	32.46	130.21	$<1 \times 10^{-6}$
Error	16.29	0.28			11.32	0.31		

The values obtained from the multi-factor ANOVA indicate a considerable influence of the respective factors on the variance of the penetration characteristic. This applies to both the analysed bitumens alike. At the pre-defined significance level of 0.05 the results confirm a significant effect of both factors, i.e. the modifier content ($p < 1 \times 10^{-6}$) and the ageing processes ($p < 1 \times 10^{-6}$) and of the their interaction as well ($p < 1 \times 10^{-6}$). Ageing was found to be the primary factor to account for the mean square (MS) variation for both the tested bitumens with the obtained MS values of 2056.16 and 2473.36 for the 50/70 and 70/100 bitumens respectively.

The ring and ball softening point was determined in the automatic test apparatus in accordance with EN 1427. The test material was heated up to ca. $140-150^\circ\text{C}$ and then poured to rings placed on a plate with applied bond breaker. When the bitumen has set any excess was cut off with a knife. The specimens prepared in this way, together with steel balls and ball guides were immersed in a beaker with water. After 15 minutes of immersion in a constant temperature water bath the liquid was heated up at a rate of 5°C per minute. The result was the average temperature of three determinations at which the specimen loaded with a steel ball moved 25.0 ± 0.4

Wartości uzyskane z jednowymiarowej analizy wariancji wieloczynnikowej wskazują na istotny wpływ poszczególnych czynników na poziom zmienności cechy penetracja. Dotyczy to obu analizowanych asfaltów. Wyniki, przy założonym poziomie istotności równym 0,05, potwierdzają istotny wpływ zarówno zawartości modyfikatora ($p < 1 \times 10^{-6}$), procesów starzenia ($p < 1 \times 10^{-6}$), jak również interakcji pomiędzy tymi czynnikami ($p < 1 \times 10^{-6}$). Największy wpływ w wyjaśnieniu zmienności względem średniego błędu kwadratowego (MS), w przypadku obu asfaltów, miało starzenie (asfalt 50/70: MS = 2056,16, asfalt 70/100: MS = 2473,36).

Temperaturę mięknięcia według metody „pierścien i kula” (PiK) określono w automatycznym urządzeniu zgodnie z normą PN-EN 1427. Przygotowanie próbek polegało na ich podgrzaniu do temperatur ok. $140-150^\circ\text{C}$, a następnie wypełnieniu lepiszczem asfaltowym pierścieni, ułożonych na płytce posmarowanej środkiem antyadhezyjnym. Po ostygnięciu nadmiar masy ścięto nożem. Tak przygotowane próbki wraz z kulkami stalowymi i prowadnicami umieszczono w zlewce z wodą. Po 15 minutach termostowania (w temperaturze 5°C) rozpoczęto podgrzewanie cieczy z zachowaniem przyrostu temperatury

mm. The test data before and after RTFOT and PAV ageing are displayed in Figures 6-7.

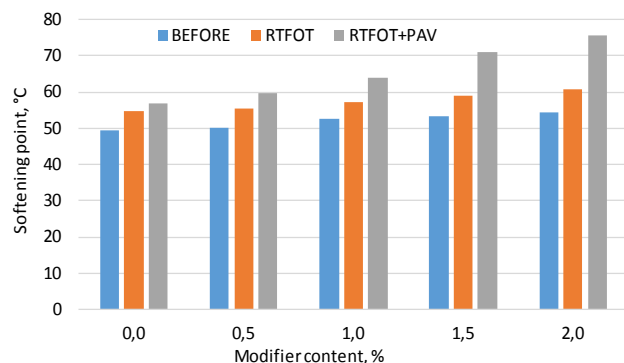


Fig. 6. Softening point of anhydrous iron (III) chloride-modified bitumen 50/70

Rys. 6. Temperatura mięknięcia asfaltu 50/70 modyfikowanego bezwodnym chlorkiem żelaza (III)

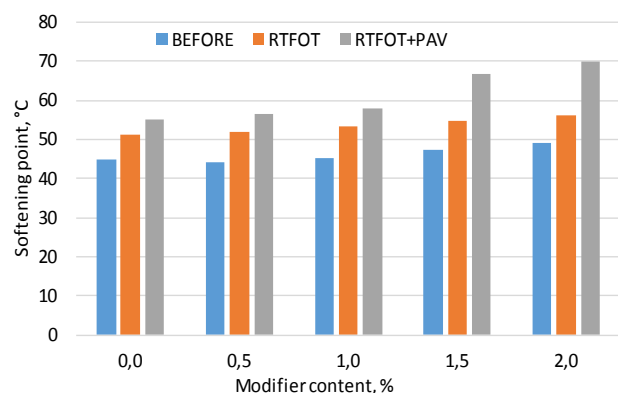


Fig. 7. Softening point of anhydrous iron (III) chloride-modified bitumen 70/100

Rys. 7. Temperatura mięknięcia asfaltu 70/100 modyfikowanego bezwodnym chlorkiem żelaza (III)

An increase in the amount of modifier increases the softening point accordingly. Similarly to penetration, the changes occurring in both binders are similar in magnitude. For non-aged bitumens 2% addition of modifier increased the softening point by ca. 4.4-5.1°C. After RTFOT ageing an increase by 4.5-6°C was recorded for all the specimens. The decrease of softening point after PAV ageing was relatively small (ca. 2.5-7°C) in the case of virgin and slightly modified bitumens (with up to 1% modifier content). A much greater increase, in the range of 11-15°C, was noted in the case of bitumens containing 1.5-2.0% of modifier.

The experimental data from the softening point test were subjected to multi-factor ANOVA. The purpose was to assess the effect of three factors: modifier content, ageing (RTFOT and PAV) and the interaction between the two. The values of the statistical parameters defining the magnitude of the effect of these factors on the analysed characteristic of the tested binders are given in Table 2.

Wzrost zawartości modyfikatora wpływa na podwyższenie temperatury mięknięcia. Zmiany zachodzące w obu lepiszczach (podobnie jak w przypadku penetracji) są na zbliżonym poziomie. Przed starzeniem, przy 2% dodatku modyfikatora temperatura mięknięcia, wzrosła o ok. 4,4-5,1°C. Po starzeniu RTFOT we wszystkich próbkach zanotowano wzrost rzędu 4,5-6°C. Po starzeniu PAV wzrost temperatury mięknięcia był stosunkowo niewielki (ok. 2,5-7°C), przy asfaltach referencyjnych i niewielkiej ilości modyfikatora (do 1%). Przy zawartości modyfikatora 1,5-2,0% temperatura mięknięcia wzrosła w znacznie większym stopniu (ok. 11-15°C).

Uzyskane wartości z badań temperatury mięknięcia poddano wieloczynnikowej analizie wariancji. Ocenił (podobnie jak w przypadku penetracji) wpływ trzech czynników, tj. zawartości modyfikatora, starzenia (RTFOT i PAV) oraz interakcji pomiędzy zawartością modyfikatora i starzeniem. Wartości statystyczne określające poziom wpływu tych czynników na analizowaną cechę badanych lepiszczy przedstawiono w tabeli 2.

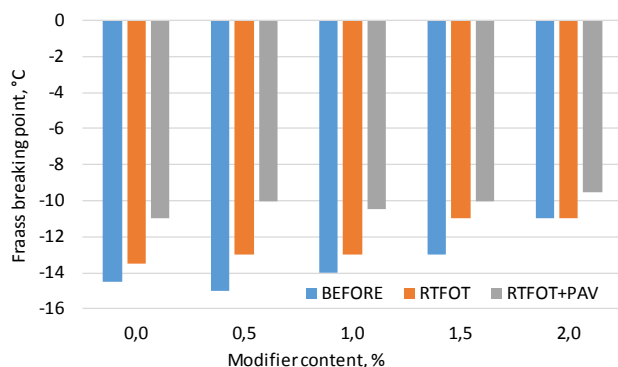
Table 2. One-dimensional multivariate analysis of variance for softening point, bitumen 50/70 and 70/100

Tabela 2. Jednowymiarowa analiza wariancji wieloczynnikowej cechy temperatura mięknięcia wg PiK dla asfaltu 50/70 i 70/100

Factor	Softening point „R&B” [°C]							
	50/70				70/100			
	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
Modifier content	617.01	154.25	372.6	$< 1 \times 10^{-6}$	452.12	113.03	616.51	$< 1 \times 10^{-6}$
Aging	1387.82	693.91	1676.1	$< 1 \times 10^{-6}$	1707.62	853.81	4657.04	$< 1 \times 10^{-6}$
Modifier content $\times$ aging	248.01	31.00	74.9	$< 1 \times 10^{-6}$	180.03	22.50	122.72	$< 1 \times 10^{-6}$
Error	12.42	0.39			5.53	0.21		

The multi-factor ANOVA results indicate a considerable influence of the respective factors on the magnitude of variance of the ring and ball softening point values. This applies to both the analysed bitumens alike. At the pre-defined significance level of 0.05 the results confirm a significant effect of both factors, i.e. the modifier content ($p < 1 \times 10^{-6}$) and the ageing processes ($p < 1 \times 10^{-6}$) and of the their interaction as well ($p < 1 \times 10^{-6}$). Ageing was found to be the primary factor to account for the mean square (MS) variation for both the tested bitumens with MS values of 693.91 and 853.81 for 50/70 and 70/100 respectively.

The Fraass breaking point T_{Fraass} was determined according to EN 12593. It is the highest temperature during cooling at a constant gradient of $1^\circ\text{C}/\text{min.}$ at which a 0.5 mm thick film of bitumen applied on a thin steel plate cracks or fractures upon bending the plate. During the test the plate is bent at 1°C starting from the temperature higher by $10 \pm 2^\circ\text{C}$ than the expected brittle point. Each result was calculated as an average of three determinations. The test data before and after RTFOT and PAV ageing are displayed in Figures 8-9.



Wartości uzyskane z jednowymiarowej analizy wariancji wieloczynnikowej wskazują na istotny wpływ poszczególnych czynników na poziom zmienności cechy temperatura mięknięcia wg PiK. Dotyczy to obu analizowanych asfaltów. Wyniki, przy założonym poziomie istotności równym 0,05, potwierdzają istotny wpływ zarówno zawartości modyfikatora ($p < 1 \times 10^{-6}$), procesów starzenia ($p < 1 \times 10^{-6}$), jak również interakcji pomiędzy tymi czynnikami ($p < 1 \times 10^{-6}$). Największy wpływ w wyjaśnieniu zmienności względem średniego błędu kwadratowego (MS), w przypadku obu asfaltów (podobnie jak w przypadku penetracji) miało starzenie (asfalt 50/70: MS = 693,91, asfalt 70/100: MS = 853,81).

Oznaczenie temperatury łamliwości T_{Fraass} wykonano zgodnie z PN-EN 12593. Jest to najwyższa temperatura, w której warstwa asfaltu o grubości 0,5 mm nałożona na cienką stalową płytkę, podczas oziębiania z zachowaniem stałego gradientu temperatury ($1^\circ\text{C}/\text{min.}$), zarysowuje się lub pęka po jej zgięciu. Wyginanie płytki wykonuje się co 1°C od temperatury o $10 \pm 2^\circ\text{C}$ wyższej od przewidywanej temperatury łamliwości. Za wynik badania przyjęto średnią z trzech oznaczeń. Wartości uzyskane z badań przed starzeniem oraz po starzeniu wg RTFOT i PAV przedstawiono na rysunkach 8-9.

Fig. 8. Fraass breaking point of anhydrous iron (III) chloride-modified bitumen 50/70

Rys. 8. Temperatura łamliwości wg Fraassa asfaltu 50/70 modyfikowanego bezwodnym chlorkiem żelaza (III)

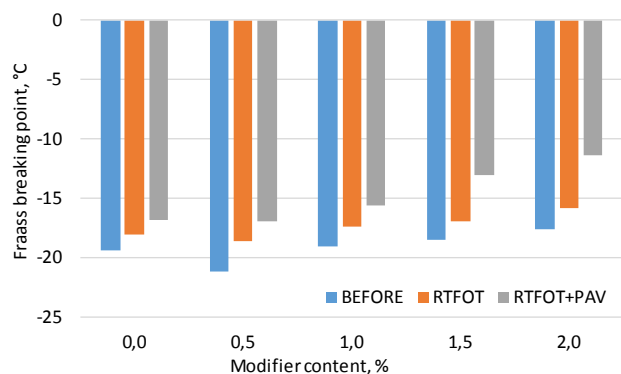


Fig. 9. Fraass breaking point of anhydrous iron (III) chloride-modified bitumen 70/100

Rys. 9. Temperatura łamliwości wg Fraassa asfaltu 70/100 modyfikowanego bezwodnym chlorkiem żelaza (III)

An increase in the amount of modifier increases the Fraass breaking point accordingly. The only exception to that was 0.5% content of FeCl_3 where a small decrease of 0.5-1.5°C was noted. The magnitude of these changes is similar for both bitumens. For non-aged bitumens 2% addition of modifier increased the brittle point by ca. 4.4-5.1°C. The change of this parameter by ca. 0-2°C after RTFOT ageing is considered small. The changes were greater after PAV ageing with the increase of brittle point by ca. 1.0-4.4°C.

The Fraass breaking point values were subjected to multi-factor ANOVA. The purpose was to assess the effect of three factors: modifier content, ageing (RTFOT and PAV procedures) and the interaction between the two. The values of the statistical parameters defining the magnitude of the effect of these factors on the analysed characteristic of the tested binders are given in Table 3.

Wzrost zawartości modyfikatora wpływa na wzrost temperatury łamliwości wg Fraassa. Nie zaobserwowano tego wyłącznie przy zawartości 0,5% FeCl_3 (niewielki spadek rzędu 0,5-1,5°C). Zmiany zachodzące w obu lepiszczach są na zbliżonym poziomie. Przed starzeniem, przy 2% dodatku modyfikatora temperatura łamliwości, wzrosła o ok. 1,8-3,5°C. Wpływ starzenia RTFOT nie spowodował znaczącego zwiększenia się wartości tego parametru (zmiana o ok. 0-2°C). Po starzeniu PAV wzrosty temperatury łamliwości były większe i wyniosły ok. 1,0-4,4°C.

Uzyskane wartości z badań temperatury łamliwości poddano wieloczynnikowej analizie wariancji. Oceniano wpływ trzech czynników, tj. zawartości modyfikatora, starzenia (RTFOT i PAV) oraz interakcji pomiędzy zawartością modyfikatora i starzeniem. Wartości statystyczne określające poziom wpływu tych czynników na analizowaną cechę badanych lepiszczy przedstawiono w tabeli 3.

Table 3. One-dimensional multivariate analysis of variance for Fraass breaking point, bitumen 50/70 and 70/100

Tabela 3. Jednowymiarowa analiza wariancji wieloczynnikowej cechy temperatura łamliwości wg Fraassa dla asfaltu 50/70 i 70/100

Factor	Fraass breaking point [°C]							
	50/70				70/100			
	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
Modifier content	39.52	9.88	14.51	$< 1 \times 10^{-6}$	87.89	21.97	29.03	$< 1 \times 10^{-6}$
Aging	83.74	41.87	61.23	$< 1 \times 10^{-6}$	144.69	72.34	95.58	$< 1 \times 10^{-6}$
Modifier content $\times$ aging	11.76	1.47	2.19	0.06077	17.59	2.20	2.90	0.01596
Error	20.52	0.69			22.71	0.76		

The results of the multi-factor ANOVA indicate a considerable influence of the respective factors on the magnitude of variance of the Fraass breaking point values. This applies to both the analysed bitumens alike. At the pre-defined significance level of 0.05 the results confirm a significant effect of both factors,

Wartości uzyskane z jednowymiarowej analizy wariancji wieloczynnikowej wskazują na istotny wpływ czynników na poziom zmienności cechy temperatura łamliwości wg Fraassa. Dotyczy to obu analizowanych asfaltów. Wyniki, przy założonym poziomie istotności równym 0,05, potwierdzają istotny wpływ

i.e. the modifier content ($p < 1 \times 10^{-6}$) and the ageing processes ($p < 1 \times 10^{-6}$). Interaction between the modifier content and aging was found significant only in the case of 70/100 bitumen ($p = 0.01596$). Conversely, for 50/70 bitumen this effect is not statistically significant ($p = 0.06077$) due to the confidence level above 0.05. The modifier content and ageing account for the mean square variation to a comparable degree for both bitumens.

w przypadku zawartości modyfikatora ($p < 1 \times 10^{-6}$) i procesów starzenia ($p < 1 \times 10^{-6}$). Efekt interakcji pomiędzy zawartością modyfikatora i starzeniem ma istotny wpływ jedynie w przypadku asfaltu 70/100 ($p = 0,01596$). Efekt ten dla asfaltu 50/70 ze względu na poziom ufności powyżej 0,05 nie jest istotny statystycznie ($p = 0,06077$). Udział w wyjaśnieniu zmienności względem średniego błędu kwadratowego (MS) był porównywalny (w przypadku obu asfaltów) dla zawartości modyfikatora i starzenia.

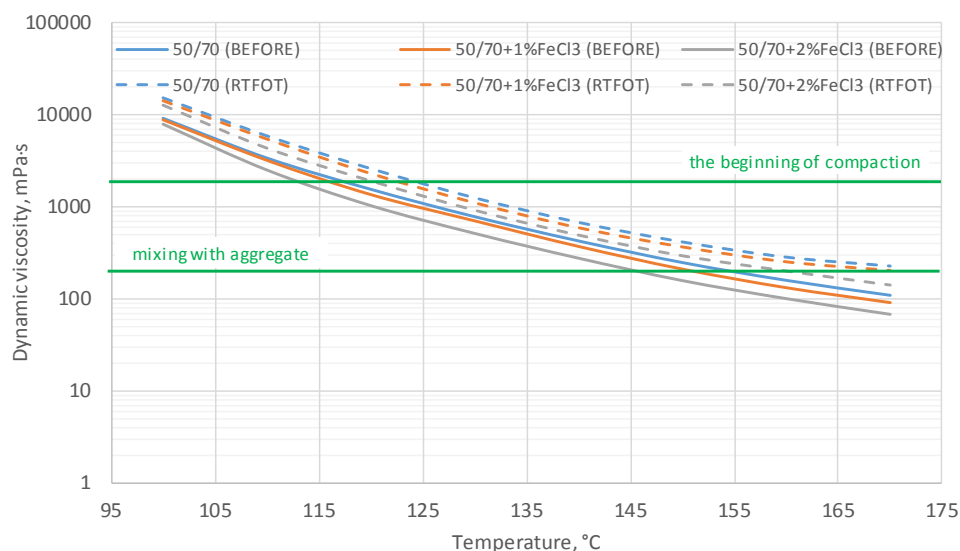


Fig. 10. Dynamic viscosity of reference bitumen 50/70 and modified anhydrous iron (III) chloride bitumen before and after aging according to RTFOT

Rys. 10. Lepkość dynamiczna asfaltu 50/70 referencyjnego i modyfikowanego bezwodnym chlorkiem żelaza (III) przed i po starzeniu wg RTFOT

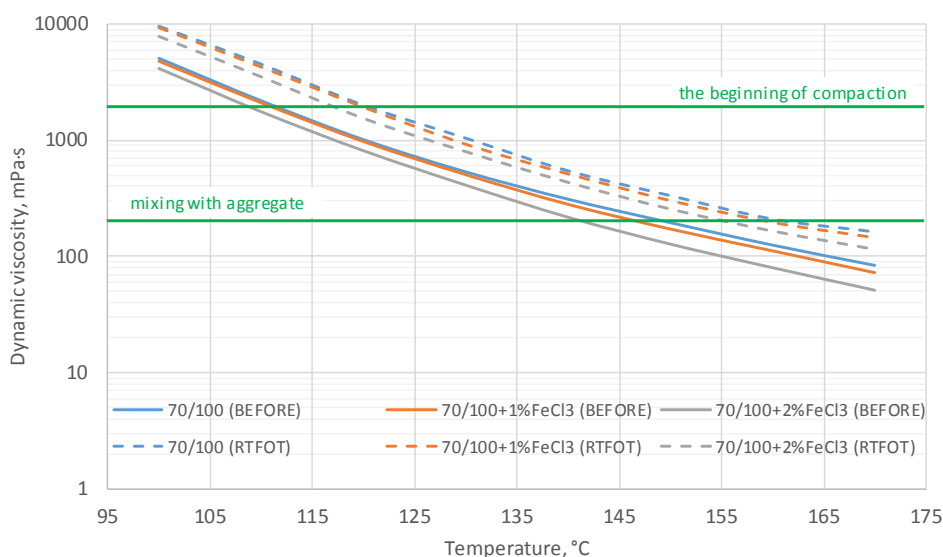


Fig. 11. Dynamic viscosity of reference bitumen 70/100 and modified anhydrous iron (III) chloride bitumen before and after aging according to RTFOT

Rys. 11. Lepkość dynamiczna asfaltu 70/100 referencyjnego i modyfikowanego bezwodnym chlorkiem żelaza (III) przed i po starzeniu wg RTFOT

The dynamic viscosity in the 100-170°C range was determined with a rotational viscometer according to EN 13302. The parameter measured during the test is the relative resistance to be overcome in order to rotate the spindle immersed in bitumen sample placed in a container. The experimental data obtained for the virgin and modified bitumens (the latter containing 1% and 2% FeCl₃) before and after RTFOT ageing are displayed in Figures 10-11.

The dynamic viscosity values indicate that modification has lowered the viscosity of bitumens in the range of process temperatures for both bitumens. This is caused by a mixture of naphthenic acids and anhydrous iron (III) chloride present in the modifier. At first causing liquefaction of the bitumen, after some time the naphthenic acids should react with the catalyst and form larger macromolecules, thus increasing the bitumen viscosity. Lowering of viscosity enables coating of aggregates at a temperature lower by 10°C than the temperature required for the reference bitumen.

The value of penetration index I_p before and after RTFOT and PAV ageing was used to determine the rheological type of bitumen and the changes caused by addition of the organometallic catalyst. The I_p values were determined by fitting the values of penetration at 25°C and ring and ball softening point in equation (1). The calculation results are displayed in Figures 12-13.

$$I_p = \frac{20 \cdot T_{PiK} + 500 \cdot \log P - 1952}{T_{PiK} - 50 \cdot \log P + 120} \quad (1)$$

where:

T_{PiK} – softening point with ring and ball, °C;

P – penetration at 25°C, × 0.1 mm.

Lepkość dynamiczną w zakresie temperatur 100-170°C oznaczono metodą lepkościomierza obrotowego, zgodnie z PN-EN 13302. Procedura badania polega na pomiarze względnego oporu (momentu obrotowego) na obrót trzpienia, zanurzonego w pojemniku wypełnionym próbką asfaltu. Wyniki badań asfaltów referencyjnych oraz modyfikowanych (przy udziale 1% i 2% FeCl₃) przed i po starzeniu wg RTFOT przedstawiono na rysunkach 10-11.

Wyniki badań lepkości dynamicznej wskazują, że w przypadku obu lepiszczy proces modyfikacji wpłynął na obniżenie lepkości w zakresie temperatur technologicznych. Jest to spowodowane użyciem do modyfikacji mieszaniny kwasów naftenowych oraz bezwodnego chlorku żelaza (III). Kwasy naftenowe upłynęły lepiszcze asfaltowe, przy czym w dłuższym czasie powinny one przereagować z katalizatorem, tworząc większe makromolekuły, co spowoduje wzrost lepkości. Obniżenie lepkości daje możliwość otaczania kruszyw w temperaturze niższej o ok. 10°C w stosunku do asfaltu bazowego.

W celu określania typu reologicznego asfaltu i zmian zachodzących na skutek dodania katalizatora metaloorganicznego wyznaczono indeks penetracji I_p przed i po starzeniu, wg RTFOT i PAV. Wartości I_p wyznaczono w oparciu o wartości penetracji w temperaturze 25°C i temperatury mięknięcia wg PiK ze wzoru (1). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 12-13.

$$I_p = \frac{20 \cdot T_{PiK} + 500 \cdot \log P - 1952}{T_{PiK} - 50 \cdot \log P + 120} \quad (1)$$

gdzie:

T_{PiK} – temperatura mięknięcia, °C;

P – penetracja w 25°C, × 0,1 mm.

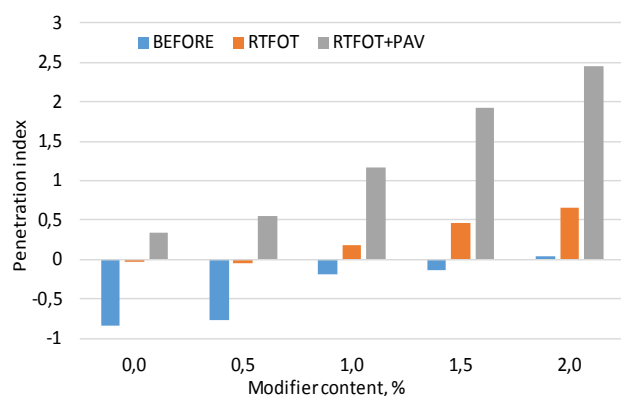


Fig. 12. Penetration index of anhydrous iron (III) chloride-modified bitumen 50/70

Rys. 12. Indeks penetracji asfaltu 50/70 modyfikowanego bezwodnym chlorkiem żelaza (III)

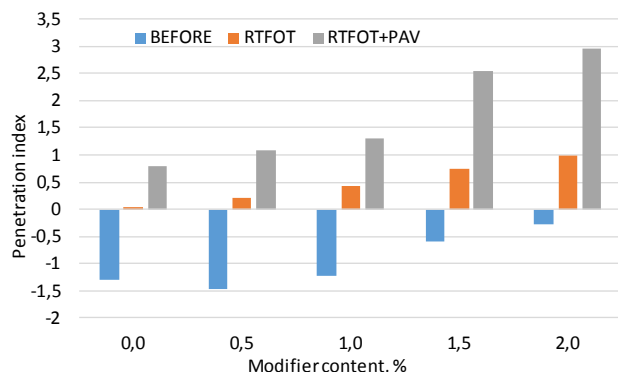


Fig. 13. Penetration index of anhydrous iron (III) chloride-modified bitumen 70/100

Rys. 13. Indeks penetracji asfaltu 70/100 modyfikowanego bezwodnym chlorkiem żelaza (III)

Addition of iron (III) chloride as a modifier increased the penetration index value of both bitumens. This can be an indication of a reduced temperature sensitivity of modified binders. The effect of PAV long-term aging on this parameter was the most evident. The penetration index determination method used in this research is dedicated for virgin bitumens. As such, the experimental data obtained for the tested binders can be to some degree inaccurate. Therefore, it is advisable to use penetration values at two different temperatures (for example 5°C and 25°C) to calculate I_p .

As the final step, the plasticity range of the tested bitumens was determined. It is calculated as the difference between the ring and ball softening point and the Fraas temperature. The values obtained in this way are presented in Figures 14-15.

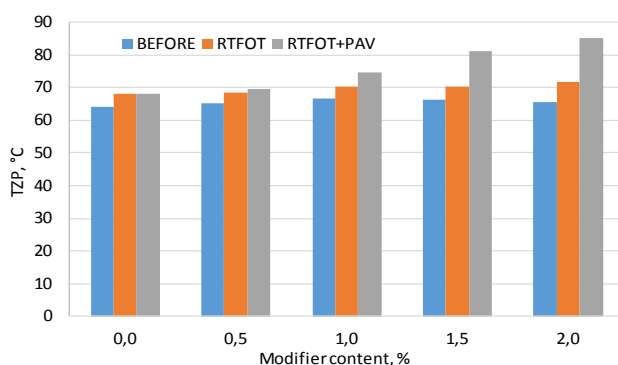


Fig. 14. Temperature plasticity range of anhydrous iron (III) chloride-modified bitumen 50/70

Rys. 14. Temperaturowy zakres plastyczności asfaltu 50/70 modyfikowanego bezwodnym chlorkiem żelaza (III)

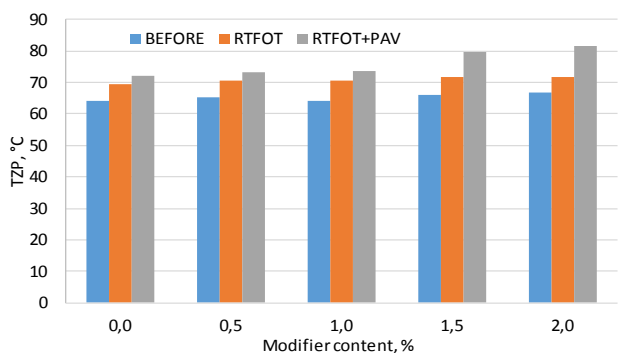


Fig. 15. Temperature plasticity range of anhydrous iron (III) chloride-modified bitumen 70/100

Rys. 15. Temperaturowy zakres plastyczności asfaltu 70/100 modyfikowanego bezwodnym chlorkiem żelaza (III)

From these results one can see that the organometallic catalyst has, by itself, only a small effect on the plasticity range. However, this effect increases after ageing, long-term ageing in particular.

6. FINAL CONCLUSIONS

The following conclusions can be drawn based on the conducted tests and analyses:

- metalorganic catalyst (mixture of anhydrous iron (III) chloride and naphitic acids in the analysed case) changed the properties of the two paving grade bitumens under analysis, including increase of stiffness at service temperatures, lower penetration value, higher softening and Fraas breaking points at whatever percentage it was added;
- RTFOT and PAV ageing intensifies rheological changes in bitumens modified by anhydrous iron (III) oxide, increasing the binder stiffness and, at the same time, affecting its low-temperature resistance. A higher stiffness of bitumens modified with such modifiers can improve the resistance to permanent deformations of bitumen-aggregate mixtures yet attention is drawn to the need of protection against possible premature ageing during operation (such as measures to keep off oxygen);
- the ageing processes play a major role in changing the properties of bitumen which was particularly evident in PAV test results;
- in bitumens modified with organometallic catalysts the ageing processes induce significant rheological changes towards gel-like behaviour, thus decreasing their thermal sensitivity. Finally, these catalysts extend the plasticity range of the bitumens modified by them.

REFERENCES

- [1] Bielecka-Florjańczyk E., Włostowska J.: *Chemia organiczna*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [2] Cotton A., Wilkinson G., Gaus P.: *Chemia nieorganiczna*. Podstawy. PWN, Warszawa 1998.
- [3] Frederick G., Tario J.D.: *Quantify the Energy and Environmental Effects of Using Recycled Asphalt and Recycled Concrete for Pavement Construction*. Phase I Final Report, New York State Energy Research and Development Authority, New York 2009.
- [4] Galarraga C.E., Pereira-Almao P.: *Hydrocracking of Athabasca Bitumen Using Submicronic Multimetallic Catalysts at Near In-Reservoir Conditions*. *Energy & Fuels*, 2010, v. 24, pp. 2383-2389.
- [5] Galarraga C.E., Scott C., Loria H., Pereira-Almao P.: *Kinetic Models for Upgrading Athabasca Bitumen Using Unsupported NiWMo Catalysts at Low Severity Conditions*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, v. 51, pp. 140-146.
- [6] Gawel I., Piłat J., Radziszewski P., Kowalski K.J., Król J.B.: *Rubber modified bitumen*. *Polymer Modified Bitumen*, 2011, pp. 72-97.

Analizując wyniki przedstawione na rysunkach 14-15 można wywnioskować, że sam katalizator metaloorganiczny ma niewielki wpływ na TZP. Jego znaczenie wzrasta po procesie starzenia, przede wszystkim długotrwałego.

6. WNIOSKI

Przeprowadzone badania i analizy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- dodatek katalizatora metaloorganicznego (w postaci mieszaniny bezwodnego chlorku żelaza (III) i kwasów naftenowych) do asfaltów drogowych skutkuje (w przypadku obu lepiszczy) wzrostem sztywności w zakresie temperatur użytkowych, charakteryzującym się spadkiem penetracji, wzrostem temperatury mięknięcia i temperatury łamliwości niezależnie od ilości modyfikatora;
- starzenie wg RTFOT i PAV intensyfikuje zmiany reologiczne w asfaltach modyfikowanych bezwodnym chlorkiem żelaza (III), co prowadzi do zwiększenia twardości lepiszcza przy jednoczesnym spadku odporności na niskie temperatury. Efektem może być wzrost odporności na trwałe deformacje mieszanek mineralno-asfaltowych z tego typu modyfikatorem, przy czym należy takie warstwy nawierzchni zabezpieczyć przed ewentualnymi procesami starzenia eksploatacyjnego (m.in. przed dostępem tlenu);
- procesy starzeniowe odgrywają znaczącą rolę w zmianach właściwości lepiszczy, przy czym większy wpływ ma starzenie długoterminowe PAV;
- procesy starzeniowe w asfaltach modyfikowanych katalizatorem metaloorganicznym wpływają w sposób znaczący na zmianę typu reologicznego w kierunku „żelu”, zmniejszając tym samym ich wrażliwość termiczną. Wpływają one również na rozszerzenie temperaturowego zakresu plastyczności lepiszczy.

- [7] Hanson R.A.: *Catalytic airblown asphalt*. Patent No. US3258419A.
- [8] Jew P., Shimizu J.A., Svazic M., Woodhams R.T.: *Polyethylene modified bitumen for paving applications*. Journal of Applied Polymer, 1986, v. 31, pp. 2685-2704.
- [9] Kazakowa Ł.P., Krein S.E.: *Fizyko-chimiczeskije osnovy proizvodstva naftjanyh masel*. Moskwa, Iz-stvo "Chimija" 1978.
- [10] Mallick R., Bergendahl J.: *Reducing Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Materials*. Project Number: MQP-RBM-0601, Worcester Polytechnic Institute, 2007.
- [11] Moszew J.: *Chemia organiczna*. PWN, Warszawa 1958.
- [12] Nejad F.M., Aghajani P., Modarres A., Firoozifar H.: *Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using classic and SHRP testing methods*. Construction and Building Materials, 2012, v. 26, pp. 481-489.
- [13] Patrick G.: *Chemia organiczna*. PWN, Warszawa 2005.
- [14] Pérez-Lepe A., Martinez-Boza F.J., Gallegos C., Gonzáles O., Muñoz M.E., Santamaria A.: *Influence of the processing conditions on the rheological behavior of polymer-modified bitumen*. Fuel, 2003, v. 82, pp. 1339-1348.
- [15] Segnoz B., Isikyakar G.: *Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen*. Construction and Building Materials, 2008, v. 22, pp. 1897-1905.
- [16] Speight J.G.: *Asphalt materials science and technology*. Elsevier, 2016.
- [17] Stefańczyk B., Mieczkowski P.: *Dodatki, katalizatory i emulgatory w mieszankach mineralno-asfaltowych*. WKiŁ, Warszawa 2010.
- [18] Stefańczyk B., Mieczkowski P.: *Mechanizmy oddziaływania katalizatorów metaloorganicznych na asfalty stosowane w technologii drogowej*. Magazyn Autostrady, 2016, v. 5, pp. 23-29.

Acknowledgments:

The work was financed by West Pomeranian University of Technology, Szczecin.

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.



environment
environment



PAWEŁ JĘDRZEJOWSKI
JOLANTA LATOSIŃSKA
PAULINA MASTERNAK
PIOTR MICHNO

Kielce University of Technology
e-mail: pmichno5@gmail.com

Manuscript submitted 2018.01.31 - revised 2018.03.15
initially accepted for publication 2018.04.24, published in December 2018

COMPARISON OF ENERGY EFFICIENCY OF THE MUNICIPAL WASTE TREATMENT PLANT IN KRAKOW AND BIALYSTOK

PORÓWNANIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ INSTALACJI TERMICZNEGO PRZETWARZANIA ODPADÓW KOMUNALNYCH W KRAKOWIE I BIAŁYMSTOKU

DOI: 10.30540/sae-2018-032

Abstract

Thermal treatment of municipal waste is a method that has been rediscovered in Poland in recent years. National installations for thermal treatment of municipal waste launched in recent years draw on the experience of plants around the world and they use repeatedly proven technologies. Poland, within the framework of EU commitments, must reduce the amount of biodegradable waste going to landfills to 35% by weight of the total municipal waste by July 16, 2020. Other biodegradable waste that can not be recycled should be subjected to biological or thermal decomposition. The purpose of this publication is to determine the efficiency of Polish installations for the thermal treatment of municipal waste, by comparing the energy efficiency ratio of installations in Kraków and Białystok. These are two of the six installations of thermal waste treatment, which were created in 2015-2016. The Krakow incineration plant is the largest, and the Białystok one of the smallest.

Keywords: combustion, energy recovery, municipal waste, energy efficiency coefficient

Streszczenie

Termiczne przekształcanie odpadów komunalnych to metoda w Polsce na nowo odkryta w ostatnich latach. Krajowe instalacje termicznego przetwarzania odpadów komunalnych uruchamiane w ostatnich latach czerpią z doświadczeń zakładów na całym świecie i stosują wielokrotnie sprawdzone technologie. Polska, w ramach zobowiązań unijnych do 16 lipca 2020 roku musi ograniczyć ilość odpadów biodegradowalnych trafiających na składowiska do 35% wagowo całkowitej masy odpadów komunalnych. Pozostałe odpady biodegradowalne, których nie można poddać recyklingowi powinny być poddane rozkładowi biologicznemu lub termicznemu. Celem niniejszej publikacji jest określenie efektywności polskich instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych, poprzez porównanie współczynnika efektywności energetycznej instalacji w Krakowie oraz Białymstoku. Są to dwie z sześciu instalacji termicznego przekształcania odpadów, które powstały w latach 2015-2016. Krakowska spalarnia jest największą, a białostocka jedną z najmniejszych..

Słowa kluczowe: spalanie, odzysk energii, odpady komunalne, współczynnik efektywności energetycznej

1. INTRODUCTION

In modern waste management, recovery has priority over disposal. Recovery means any process whose main objective is useful to employ waste by substituting other materials that would otherwise be used to fulfill a particular function, or waste being prepared to fulfill that function in the plant or in the economy. Waste neutralization is a non-recovery

1. WPROWADZENIE

We współczesnej gospodarce odpadami odzysk ma pierwszeństwo przed unieszkodliwianiem. Odzysk oznacza jakikolwiek proces, którego głównym celem jest użyteczne zastosowanie odpadów przez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym przypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji, lub w wyniku którego odpady są przygotowywane do speł-

process, even if the secondary effect of such a process is the recovery of a substance or energy [1]. In accordance with the Waste Directive 2008/98 / EC, the necessary condition for the inclusion of solid municipal waste in the recovery of R1, and not for the disposal of D10, is that the installation achieves the required value of the energy efficiency index [2].

The R1 recovery includes activities involving the use of waste mainly as a fuel or other means of generating energy, and the D10 process is thermal transformation on land [1]. For currently commissioned installations, the value of the energy efficiency coefficient can not be less than 0.65 [3]. According to literature data, new waste incineration plants obtain an energy efficiency ratio at the level of 0.75-1.2, and modernized at 0.82, such as, for example, the incineration plant in Brno.

A similar result should be expected from municipal waste incineration plants operated in Poland. Combustion of municipal waste can be carried out in fluidized bed boilers, stoker fired boilers or rotary kilns. Fluidised incineration plants, due to the necessity of shredding municipal waste causing significant consumption of electricity, have a lower energy efficiency coefficient of about 0.1 compared to burning in grate furnaces [4]. The literature shows that pyrolytic technology, gasification or plasma is not able to provide the required value of the energy efficiency index. It is assumed that in most cases it will be lower than 0.6. In the extreme case of Thermoselect technology, the energy efficiency ratio is approx. 0.3 [4].

The basic parameter determining the usefulness of matter for its use in the energy sector is the calorific value, which determines the fuel class. When producing formed fuels, whose heating value should be as high as possible, non-combustible ballast is removed, e.g. glass, ferrous and non-ferrous metals, ceramics. On the other hand, waste incinerated in installations for thermal treatment of municipal waste does not have to have specific calorific value, therefore ballast separation is not applied [5, 6].

The nominal calorific value accepted for incinerators in Poland ranges from 7.5 to 10.5 MJ/kg. The nominal heating value of waste in Polish installations for thermal treatment of municipal waste is presented in Table 1.

nienia takiej funkcji w danym zakładzie lub ogólnie w gospodarce. Unieszkodliwianie odpadów to proces niebędący odzyskiem, nawet jeżeli wtórnym skutkiem takiego procesu jest odzysk substancji lub energii [1]. Zgodnie z Dyrektywą w sprawie odpadów 2008/98/EC warunkiem koniecznym zaliczenia spalania stałych odpadów komunalnych do procesów odzysku R1, a nie do unieszkodliwiania D10, jest osiągnięcie przez instalację wymaganej wartości wskaźnika efektywności energetycznej [2]. Odzysk R1 obejmuje działania polegające na wykorzystaniu odpadów głównie jako paliwa lub innego środka wytwarzania energii, a proces D10 to termiczne przekształcanie na lądzie [1]. Dla współcześnie oddawanych do eksploatacji instalacji wartość współczynnika efektywności energetycznej nie może być mniejsza niż 0,65 [3]. Zgodnie z danymi literaturowymi nowe spalarnie odpadów uzyskują wskaźnik efektywności energetycznej na poziomie 0,75-1,2, a modernizowane na poziomie 0,82, tak jak na przykład spalarnia w Brnie. Podobnego wyniku należy oczekiwać od spalarni odpadów komunalnych eksploatowanych w Polsce. Spalanie odpadów komunalnych może być realizowane w kotłach ze złożem fluidalnym, kotłach rusztowych lub piecach obrotowych. Spalarnie fluidalne, z uwagi na konieczność rozdrabniania odpadów komunalnych powodujące znaczne zużycie energii elektrycznej, mają współczynnik efektywności energetycznej niższy o ok. 0,1, w porównaniu do spalania w piecach rusztowych [4]. Literatura przedmiotu wykazuje, że technologia pirolityczna, zgazowania czy też plazmowa nie jest w stanie zapewnić wymaganej wartości wskaźnika efektywności energetycznej. Przyjmuje się, że w większości przypadków będzie on niższy od 0,6. W skrajnym przypadku jakim jest technologia Thermoselect, współczynnik efektywności energetycznej wynosi ok. 0,3 [4].

Podstawowym parametrem określającym przydatność materii do jej wykorzystania w energetyce jest wartość opałowa, która decyduje o klasie paliwa. Podczas wytwarzania paliw formowanych, których wartość opałowa powinna być jak najwyższa, usuwa się niepalny balast, np. szkło, metale żelazne i nieżelazne, ceramika. Natomiast odpady spalane w instalacjach termicznego przetwarzania odpadów komunalnych nie muszą posiadać określonej kaloryczności, dlatego nie stosuje się oddzielenia balastu [5, 6].

Nominalna wartość opałowa przyjęta dla spalarni w Polsce waha się w granicach od 7,5 MJ/kg do 10,5 MJ/kg. Nominalną wartością opałową odpadów w polskich instalacjach termicznego przetwarzania odpadów komunalnych przedstawiono w tabeli 1.

Installations of thermal treatment of municipal waste	Nominal heating value of waste [MJ/kg]
Municipal Waste Disposal Plant in Białystok	7.5
Municipal Waste Thermal Treatment Plant in Bydgoszcz	8.5
Municipal Waste Thermal Treatment Plant in Konin	8.5
Thermal Waste Transformation Plant in Krakow	8.8
Installation of Thermal Transformation of Municipal Waste in Poznań	8.4
Thermal Waste Disposal Plant in Szczecin	10.5

An important parameter is the chlorine content in incinerated municipal waste. It determines the technological parameters of the combustion process. If the content of halogenated organic compounds is above 1%, the process temperature must exceed 1100°C. This may affect the need for additional fuel in the case of low calorific value of waste. Chlorine can corrode the plant by forming acidic compounds. Fluorine and sulfur compounds have similar properties [8, 9].

Other parameters that determine the technological processes in the thermal treatment plant are the ash composition. Alkali compounds contained in the ash, among others Sodium, potassium, magnesium and calcium may cause molten slag to stick to the metal elements of boiler heating installations, as well as sludge [8].

The waste incineration process, which does not require additional fuel to be introduced into the combustion chamber (so-called autothermal combustion), is possible when the percentage of moisture, flammable and non-flammable substances in the waste meets the criteria [9]:

- moisture content < 50%,
- content of flammable parts > 25%,
- non-combustible content < 60%.

The purpose of this publication is to determine the energy efficiency of Polish installations for the thermal treatment of municipal waste by comparing the energy efficiency ratio of installations in Kraków and Białystok. These are two of the six installations of thermal waste treatment, which were created in 2015-2016. The Krakow incineration plant is the largest, and the Białystok one of the smallest.

Table 1. Nominal heating values of municipal waste in Polish installations for thermal treatment of municipal waste (based on [7])

Tabela 1. Nominalne wartości opałowe odpadów komunalnych w polskich instalacjach termicznego przetwarzania odpadów komunalnych (na podstawie [7])

Istotnym parametrem jest zawartość chloru w spalanych odpadach komunalnych. Decyduje on o parametrach technologicznych procesu spalania. W przypadku zawartości związków chlorowcoorganicznych powyżej 1% temperatura procesu musi przekraczać 1100°C. Może to wpłynąć na konieczność stosowania dodatkowego paliwa w przypadku niskiej kaloryczności odpadów. Chlor może powodować korozję instalacji przez tworzenie kwaśnych związków. Podobne właściwości wykazują też związki fluoru i siarki [8, 9].

Innymi parametrami warunkującymi procesy technologiczne w zakładzie termicznej przeróbki odpadów jest skład popiołu. Zawarte w popiele związki alkaliczne, m.in. sodu, potasu, magnezu i wapnia, mogą powodować przyklejanie stopionego żużla do metalowych elementów instalacji grzewczych kotła, a także przyrastanie osadów [8].

Proces spalania odpadów, którego prowadzenie nie wymaga wprowadzenia do komory spalania dodatkowego paliwa wspomagającego (tzw. spalanie autotermiczne), możliwy jest, gdy procentowy udział wilgoci, substancji palnych i niepalnych w odpadach odpowiadają kryteriom [9]:

- zawartość wilgoci < 50%,
- zawartość części palnych > 25%,
- zawartość substancji niepalnych < 60%.

Celem niniejszej publikacji jest określenie efektywności energetycznej polskich instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych, poprzez porównanie współczynnika efektywności energetycznej instalacji w Krakowie oraz Białymstoku. Są to dwie z sześciu instalacji termicznego przekształcania odpadów, które powstały w latach 2015-2016. Krakowska spalarnia jest największą, a białostocka jedną z najmniejszych.

2. THERMAL TREATMENT PLANTS FOR MUNICIPAL WASTE IN KRAKÓW AND BIAŁYSTOK – A COMPARISON

The Waste Thermal Treatment Plant in Krakow (ZTPO) and the Municipal Waste Utilization Plant in Białystok (ZUOK) were established at the same time, that is at the beginning of the second decade of the 21st century, and in the same legal, economic and social conditions. Therefore, the differences between the plants are small and concern only detailed solutions of their functioning depending on the efficiency of the installation (Table 2).

Table 2. Characteristics of the installation of thermal treatment of municipal waste in Kraków and Białystok [5, 10]

Tabela 2. Charakterystyka instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych w Krakowie i Białymstoku, opracowanie na podstawie [5, 10]

Parameter	Unit	ZTPO Kraków	ZUOK Białystok
Number of served inhabitants	Mk	762 400	399 080
Nominal efficiency of one thermal transformation line	Mg/h	14.1	15.5
The number of thermal transformation lines	pcs.	2	1
Nominal plant performance	Mg/h	28.2	15.5
Annual plant performance	Mg/a	220 000	120 000
The nominal calorific value of waste	MJ/kg	8.8	7.5
Efficiency of the slag valuation installation	Mg/a	66 000	36 500
Efficiency of solidification and chemical stabilization installations for dust and solid residues from flue gas cleaning	Mg/a	11 300	8 600
Ratio of the mass of post-process waste to the mass of recycled municipal waste	%	35.14	37.58
Combustion temperature in the after-burning chamber	°C	850	860
Thermal energy produced	MW _{th}	280 000	100 000
Produced electricity	MW _{el}	65 000	38 000
Energy production in cogeneration mode:			
- thermal energy	MW _{th}	35	17,5
- electricity	MW _{el}	8.7	6.08
Electricity production in condensation mode	MW _{el}	16.8	8.68
Temperature of superheated steam supplied to the municipal heating network during the heating season	°C	135	120
The temperature of water supplied to the municipal heating network outside the heating season	°C	75	70

Both plants accept mixed municipal waste and flammable waste from the sorting plant. In practice, the installations are adapted to transform the same types of waste. The process of accepting the waste looks very similar. The only difference is due to the size of the plants, which is primarily determined by the number of residents served. WTTP in Krakow serves an area inhabited by 762.400 people, and ZUOK in Białystok by 399.080 people (table 2).

Due to the difference in plant capacity, the waste reception hall in Krakow is larger. There are six unloading stations on it, while in Białystok four such positions are sufficient. However, the bunker in which the waste is mixed before the combustion process is bigger in Białystok. It provides waste for seven days.

2. ZAKŁADY TERMICZNEGO PRZEKSZTAŁCANIA ODPADÓW KOMUNALNYCH W KRAKOWIE I BIAŁYMSTOKU – PORÓWNANIE

Zakład Termicznego Przekształcania Odpadów w Krakowie (ZTPO) oraz Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Komunalnych w Białymstoku (ZUOK) powstawały w tym samym czasie, to jest na początku drugiej dekady XXI wieku, a także w tych samych warunkach prawnych, gospodarczych i społecznych. Dlatego różnice między zakładami są niewielkie i dotyczą tylko szczegółowych rozwiązań ich funkcjonowania w zależności m.in. od wydajności instalacji (tab. 2).

Oba zakłady przyjmują zmieszane odpady komunalne oraz odpady palne z sortowni. W praktyce instalacje są dostosowane do przekształcania tych samych rodzajów odpadów. Proces przyjęcia odpadów wygląda bardzo podobnie. Jedyną różnicą jest spowodowana wielkością zakładów, którą warunkuje przede wszystkim liczba obsługiwanych mieszkańców. ZTPO w Krakowie obsługuje obszar zamieszany przez 762 400 osób, a ZUOK w Białymstoku przez 399 080 osób (tab. 2).

Z powodu różnicy przepustowości zakładów hala przyjęcia odpadów w Krakowie jest większa. Znajduje się na niej sześć stanowisk wyladowczych, podczas gdy w Białymstoku wystarczają cztery takie stanowiska. Natomiast bunkier, w którym mieszane są odpady

The Krakow bunker provides waste for five days of the incinerator's work.

Systems preventing the uncontrolled emission of dust and odors in the discussed cases are identical. The air from the unloading hall and from the bunker is sucked in and directed to the combustion chamber as the primary air. Fire-fighting activities in both installations consist in continuous mixing of waste in the bunker and constant monitoring of the bunker's interior with a thermal imaging camera.

The supply of waste to the grate takes place in the described installations in the same way. The waste is fed into the hopper, from where they move into the depth of the loading shaft. Its lower part is protected against overheating by a water jacket. Installations differ in the distribution of waste on the grate and the design of the grate itself. In ZUOK in Białystok, a stepped grate, inclined, cooled with air was used. The distribution of waste on the grate provides a hydraulic waste ejector that pushes a specific volume of waste to the grate. From the grate, the waste rolls down the steps creating an even layer of waste on the whole surface of the grate. ZTPO in Krakow is equipped with a grate with hydraulic drive, divided into three sections. The first two are a reciprocating grate with a slope of 10° , the third is a horizontal sliding grate. Waste on the grate goes with a piston feeder, responsible for the appropriate distribution of waste on the grate. Next, the waste is moved by rows of movable grates, alternating with solid grates [5, 10, 11].

Waste transformed in installations is assumed to have a content of halogenated organic compounds converted into chlorine below 1%, therefore the minimum combustion temperature is 850°C . In order to obtain and maintain this temperature while the waste is in the combustion chamber, start-up burners have been installed, the heating medium is fuel oil. The booster burners work only when starting and shutting down the plant, as well as during rare cases of reduced calorific value of the waste. Slag and furnace ash produced in the discussed installations are directed from the grate to the wet slag trap. In the slag relief tank, they are cooled before transport to the place where they will be prepared for further development.

Both plants have recovery boilers integrated with the grate, in which the passage of heat from fumes into the water flowing through the boiler's ducts. The water vapor in the pipelines of the Krakow installation reaches a temperature of 415°C and

przed procesem spalania, jest większy w Białymstoku. Zapewnia on zapas odpadów na okres siedmiu dni. Krakowski bunker zapewnia zapas odpadów na pięć dni pracy spalarni.

Systemy zapobiegania niekontrolowanej emisji pyłów i odorów w omawianych przypadkach są identyczne. Powietrze z hali rozładunkowej oraz znad bunkra jest zasysane i kierowane do komory spalania jako powietrze pierwotne. Działania przeciwpożarowe w obu instalacjach polegają na ciągłym mieszaniu odpadów w bunkrze oraz stałym monitorowaniu wnętrza bunkra za pomocą kamery termowizyjnej.

Podaż odpadów na ruszt przebiega w opisywanych instalacjach tak samo. Odpady podawane są do lejki zasypowego, skąd przemieszczają się w głąb szybu załadowniczego. Jego dolna część jest chroniona przed przegrzaniem płaszczem wodnym. Instalacje różnią się rozmieszczeniem odpadów na ruszcie oraz konstrukcją samego rusztu. W ZUOK w Białymstoku zastosowano ruszt schodkowy, pochylony, chłodzony powietrzem. Rozłożenie odpadów na ruszcie zapewnia hydrauliczny wypychacz odpadów, wypychający określoną objętość odpadów na ruszt. Z rusztu odpady staczają się po schodkach, tworząc równą warstwę odpadów na całej powierzchni rusztu. ZTPO w Krakowie wyposażony jest w ruszt z napędem hydraulicznym, podzielonym na trzy sekcje. Pierwsze dwie to ruszt posuwisto-zwrotny o nachyleniu 10° , trzecia to ruszt posuwisty poziomy. Odpady na ruszt trafiają przy pomocy podajnika tłokowego, odpowiadającego za odpowiednie rozmieszczenie odpadów na ruszcie. Dalej odpady przemieszczane są przez rzędy ruchomych rusztowin, rozmieszczonych naprzemiennie z rusztowinami stałymi [5, 10, 11].

Odpady przekształcane w instalacjach z założenia mają zawartość związków chlorowcoorganicznych przeliczonych na chlor poniżej 1%, dlatego minimalna temperatura spalania wynosi 850°C . W celu uzyskania i utrzymania tej temperatury w czasie przebywania odpadów w komorze spalania zainstalowano palniki rozruchowo-wspomagające, medium wspomagającym spalanie jest olej opałowy. Palniki rozruchowo-wspomagające pracują tylko podczas rozruchu i wyłączania instalacji, a także podczas rzadkich przypadków obniżonej kaloryczności odpadów. Żużel oraz popiół paleniskowy powstające w omawianych instalacjach, kierowane są z rusztu do mokrego odżuźlacza. W odżuźlaczu następuje ich schłodzenie przed transportem do miejsca, w którym będą przygotowane do dalszego zagospodarowania.

Oba zakłady posiadają kotły odzysknicowe zintegrowane z rusztem, w których zachodzi przejście

a pressure of 40 bar, in Białystok the temperature is 400°C and the pressure is 40 bar. Overheated steam goes to a condensing-bleeder turbine, which in turn drives a generator transforming mechanical energy into electricity. The plant in Białystok normally works in cogeneration mode. During this time, it produces 6.08 MWe electricity and 17.50 MWt heat energy (Table 2). The plant in Kraków in the cogeneration mode produces electricity with the capacity of 8.7 MWe and heat energy with a capacity of 35 MWt. In the condensation mode (generation of only electric energy), 8.68 MWe electricity is produced in Białystok. In Kraków, 16.8 MWe of energy is produced in this mode (Table 2).

3. CALCULATION OF THE ENERGY EFFICIENCY COEFFICIENT FOR INSTALLATIONS IN KRAKÓW AND BIALYSTOK

The energy efficiency ratio of a waste thermal treatment installation that has been authorized since December 31, 2008 must be at least 0.65 [1]. The energy efficiency coefficient is described by the formula [1]:

$$E = \frac{E_p - E_f - E_i}{0.97 \cdot (E_w + E_f)} [-] \quad (1)$$

where:

- E_p – the amount of energy produced annually as thermal or electric energy (MWh),
- E_f – annual energy input to the system from the combustion of fuels involved in the production of steam (MWh),
- E_w – annual amount of energy supplied with fuel, calculated as the product of the lower calorific value of waste and the annual mass of waste processed (MWh),
- E_i – annual energy input from outside excluding E_w and E_f (MWh),
- 0.97 – coefficient taking into account energy losses by bottom ash and radiation.

The value of energy produced nominally (E_p) calculated on the basis of the formula [1]:

$$E_p = 1.1 \cdot E_t + 2.6 \cdot E_{el} [\text{MWh}] \quad (2)$$

where:

- E_t – annually produced amount of thermal energy in the plant [MWht],

ciepła ze spalin do wody przepływającej przez przewody kotła. Para wodna w przewodach krakowskiej instalacji osiąga temperaturę 415°C i ciśnienie 40 bar, w Białymstoku temperaturę 400°C i ciśnienie 40 bar. Przegrzana para trafia do turbiny kondensacyjno-upustowej, która z kolei napędza generator przekształcający energię mechaniczną w elektryczną. Zakład w Białymstoku pracuje w trybie kogeneracji. W tym czasie wytwarza energię elektryczną o mocy 6,08 MWe i energię cieplną o mocy 17,50 MWt (tab. 2) Zakład w Krakowie w trybie kogeneracji produkuje energię o mocy 8,7 MWe i energię cieplną o mocy 35 MWt. W trybie kondensacji (wytwarzanie samej energii elektrycznej) w Białymstoku produkowana jest energia elektryczna o mocy 8,68 MWe. W Krakowie w tym trybie produkowana jest energia o mocy 16,8 MWe (tab. 2).

3. OBLICZENIE WSPÓŁCZYNNIKA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ DLA INSTALACJI W KRAKOWIE I BIAŁYMSTOKU

Współczynnik efektywności energetycznej instalacji termicznego przekształcania odpadów, które otrzymały zezwolenie po 31 grudnia 2008 roku musi wynosić co najmniej 0,65 [1]. Współczynnik efektywności energetycznej opisany jest wzorem [1]:

$$E = \frac{E_p - E_f - E_i}{0.97 \cdot (E_w + E_f)} [-] \quad (1)$$

gdzie:

- E_p – ilość energii produkowanej rocznie jako energia cieplna lub elektryczna (MWh),
- E_f – ilość energii wprowadzanej rocznie do systemu, pochodząca ze spalania paliw biorących udział w wytwarzaniu pary (MWh),
- E_w – roczna ilość energii dostarczanej z paliwem, obliczana jako iloczyn dolnej wartości opałowej odpadów oraz rocznej masy przetwarzanych odpadów (MWh),
- E_i – roczna ilość energii wprowadzana z zewnątrz z wyłączeniem E_w i E_f (MWh),
- 0,97 – współczynnik uwzględniający straty energii przez popiół denny i promieniowanie.

Wartość energii produkowanej nominalnie (E_p) obliczana na podstawie wzoru [1]:

$$E_p = 1.1 \cdot E_t + 2.6 \cdot E_{el} [\text{MWh}] \quad (2)$$

gdzie:

- E_t – rocznie produkowana ilość energii cieplnej w zakładzie [MWht],

E_{el} – annually produced amount of electricity in the plant [MWh],

1.1 – coefficient increasing for thermal energy produced, amortizing loss in processing [–],

2.6 – increasing coefficient for the electricity produced, amortizing loss in the processing [–].

The amount of energy (E_w) introduced into the installation, and contained in the processed waste, is calculated by the formula [1]:

$$E_w = \frac{V_w \cdot Q_w}{3} 3,6 \text{ [MWh]} \quad (3)$$

where:

V_m – nominal annual mass of waste processed [Mg],

Q_w – nominal calorific value of waste [GJ/Mg],

3.6 – conversion factor GJ per MWh [GJ/MWh].

Unit values of coefficients E_f and E_i in this paper adopted on the basis of the document Results of Specific Data for Energy, Efficiency Rates and Coefficients, Plant Efficiency factors and NCV of 97 European W-t-E Plants and Determination of the Main Energy Results elaborated by D.O. Reimanna for the needs of the organization Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP). According to the document, the average unit value E_{ff} is 0.023 MWh/Mg, while the average unit value E_{ij} is 0.055 MWh/Mg [11].

The amount of energy introduced into the system, coming from the combustion of fuels taking part in steam generation (E_p) is calculated on the basis of formula [1]:

$$E_f = E_{ff} \cdot V_m \text{ [MWh]} \quad (4)$$

where:

E_{ff} – unit energy factor introduced into the system, derived from the combustion of fuels involved in steam generation, assumed value of 0.023 MWh/Mg,

V_m – nominal annual mass of waste processed [Mg].

The annual amount of energy introduced from outside (E_i) is calculated on the basis of formula [1]:

$$E_i = E_{ij} \cdot V_m \text{ [MWh]} \quad (5)$$

E_{el} – rocznie produkowana ilość energii elektrycznej w zakładzie [MWh],

1,1 – wzrost współczynnika dla wytworzonej energii cieplnej, amortyzacja strat w przetwarzaniu [–]

2,6 – zwiększenie współczynnika produkowanej energii elektrycznej, amortyzacja strat w przetwarzaniu [–].

Ilość energii (E_w) wprowadzanej do instalacji, a zawartej w przetwarzanych odpadach, obliczana jest wzorem [1]:

$$E_w = \frac{V_w \cdot Q_w}{3} 3,6 \text{ [MWh]} \quad (3)$$

gdzie:

V_m – nominalna roczna masa przetwarzanych odpadów [Mg],

Q_w – nominalna wartość opałowa odpadów [GJ/Mg],

3,6 – współczynnik przeliczeniowy GJ na MWh.

Wartości jednostkowych współczynników E_f oraz E_i przyjęto na podstawie dokumentu Results of Specific Data for Energy, Efficiency Rates and Coefficients, Plant Efficiency factors and NCV of 97 European W-t-E Plants and Determination of the Main Energy Results opracowanego przez D.O. Reimanna na potrzeby organizacji Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP). Według dokumentu średnia wartość jednostkowa E_{ff} wynosi 0,023 MWh/Mg, natomiast średnia wartość jednostkowa E_{ij} to 0,055 MWh/Mg [11].

Ilość energii wprowadzanej do systemu, pochodząca ze spalania paliw biorących udział w wytwarzaniu pary (E_p), obliczana jest na podstawie wzoru [1]:

$$E_f = E_{ff} \cdot V_m \text{ [MWh]} \quad (4)$$

gdzie:

E_{ff} – jednostkowy współczynnik energii wprowadzanej do systemu, pochodzącej ze spalania paliw biorących udział w wytwarzaniu pary, przyjmowana wartość 0,023 MWh/Mg,

V_m – nominalna roczna masa przetwarzanych odpadów [Mg].

Roczna ilość energii z wyłączeniem E_w i E_f wprowadzana z zewnątrz (E_i) obliczana jest na podstawie wzoru [1]:

$$E_i = E_{ij} \cdot V_m \text{ [MWh]} \quad (5)$$

where:

E_i – unit energy factor introduced from outside excluding E_w i E_f , assumed value 0.055 [MWh/Mg],

V_m – nominal annual mass of waste processed [Mg].

The condensation mode is assumed only if there is no possibility of returning heat energy to the district heating network, for example during a transmission network failure. In the course of continuous operation in the condensation mode, during the year, electricity production would reach the level represented by the formula [1]:

$$E_{el} = P \cdot t_{nom} [\text{MWh}] \quad (6)$$

where:

P – electric power produced by the plant in condensation mode,

t_{nom} – nominal operating time of the installation during the year (for both installations, the nominal working time during the year equals 7.800 h).

Calculations of the energy efficiency coefficient are presented in Table 3. The calculations were made using theoretical assumptions, which were adopted on the basis of data from environmental reports [6, 12].

Parameter	ZTPO Kraków	ZTPO Białystok
Co-generation mode		
E_p	477000 MWh	208800 MWh
E_w	537778 MWh	250000 MWh
E_f	5060 MWh	2760 MWh
E_i	12100 MWh	6600 MWh
E	0.873	0.813]
Condensation mode		
E_{el}	131040 MWh	67704 MWh
E_p	340704 MWh	176030 MWh
E_k	0.614	0.680

ZUOK Białystok meets the requirements of the Waste Act regardless of the operating mode. Higher efficiency was obtained in the variant of work in cogeneration mode (Table 3). ZTPO in Krakow, when operating in the condensation mode, does not meet the value of the combustion efficiency factor of 0.65

gdzie:

E_i – jednostkowy współczynnik energii wprowadzanej z zewnątrz z wyłączeniem E_w i E_f , przyjmowana wartość 0,055 [MWh/Mg],

V_m – nominalna roczna masa przetwarzanych odpadów [Mg].

Tryb kondensacji z założenia jest stosowany tylko w przypadku braku możliwości oddawania energii cieplnej do miejskiej sieci ciepłowniczej, na przykład podczas awarii sieci przesyłowej. Przy ciągłej pracy w trybie kondensacji, w ciągu roku produkcja energii elektrycznej osiągnęłaby poziom przedstawiony wzorem [1]:

$$E_{el} = P \cdot t_{nom} [\text{MWh}] \quad (6)$$

gdzie:

P – moc elektryczna produkowana przez zakład w trybie kondensacji,

t_{nom} – nominalny czas pracy instalacji w ciągu roku (dla obu instalacji nominalny czas pracy w ciągu roku równa się 7 800 h).

Obliczenia współczynnika efektywności energetycznej przedstawiono w tabeli 3. Obliczenia wykonano wykorzystując założenia teoretyczne, które przyjęto na podstawie danych pochodzących z raportów środowiskowych [6, 12].

Table 3. Energy efficiency coefficient for municipal waste thermal treatment installations in Krakow and Białystok
Tabela 3. Współczynnik efektywności energetycznej instalacji termicznego przetwarzania odpadów komunalnych w Krakowie i Białymstoku

ZUOK Białystok spełnia wymagania Ustawy o odpadach niezależnie od trybu pracy. Wyższą efektywność otrzymano w wariantcie pracy w trybie kogeneracji (tab. 3). ZTPO w Krakowie, podczas pracy w trybie kondensacji nie spełnia wymaganej w Ustawie o odpadach wartości współczynnika efektywności spalarni

as required by the Waste Act. However, operation in condensation mode for both incineration plants is only envisaged if the heat can not be transferred to the district heating network, eg in the case of technical inspections of the network or failure. Most of the time, both installations work in cogeneration mode.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Due to EU obligations, according to which Poland must reduce the amount of biodegradable waste going to landfills by 16 July 2020, solutions such as thermal waste treatment installations are justified and will be constantly developed. The contemporary approach to waste management, if possible, puts the first priority in recovery, and only then in the second place disposal. The installations for thermal waste treatment compared in the article do not differ significantly in work parameters. They are adapted to transform the same types of waste. The differences concern the efficiency of plants and the amount of energy produced. Differences are caused by the different number of residents served and, consequently, by the number of thermal transformation lines. The article presents a computational course for determining the energy efficiency coefficient. The energy efficiency coefficient takes into account the amount of thermal and electrical energy produced by the plant during the year, the mass and calorific value of the waste, as well as the operating mode of the plant. In the case of both installations of thermal treatment of municipal waste, the energy efficiency coefficient values obtained meet the requirements of the above-mentioned Act. Despite differences in installation efficiency, both plants achieve similar values of the energy efficiency ratio

wynoszącego 0,65. Jednak praca w trybie kondensacji w przypadku obu spalarni jest przewidywana tylko w razie braku możliwości oddawania energii cieplnej do miejskiej sieci ciepłowniczej, np. w przypadku przeglądów technicznych sieci czy awarii. Przez zdecydowaną większość czasu obie instalacje pracują w trybie kogeneracji.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Ze względu na unijne zobowiązania, według których Polska musi do 16 lipca 2020 roku ograniczyć ilość odpadów biodegradowalnych trafiających na składowiska, rozwiązania takie jak instalacje termicznego przetwarzania odpadów są uzasadnione i będą stale rozwijane. Współczesne podejście do gospodarki odpadami, jeśli jest to możliwe, na pierwszym miejscu stawia odzysk, natomiast dopiero w dalszej kolejności unieszkodliwianie. Porównywane w artykule instalacje termicznego przetwarzania odpadów nie różnią się znacząco parametrami pracy. Są dostosowane do przekształcania tych samych rodzajów odpadów. Różnice dotyczą wydajności zakładów oraz ilości produkowanej energii. Różnice spowodowane są różną liczbą obsługiwanych mieszkańców, a w konsekwencji liczbą linii termicznego przekształcania. W artykule przedstawiono tok obliczeniowy wyznaczania współczynnika efektywności energetycznej. Współczynnik efektywności energetycznej uwzględnia ilość energii cieplnej i elektrycznej produkowanej przez zakład w ciągu roku, masę oraz wartość opałową odpadów, jak również tryb pracy zakładu. W przypadkach obydwu instalacji termicznego przetwarzania odpadów komunalnych otrzymane wartości współczynnika efektywności energetycznej spełniają wymagania wyżej wymienionej ustawy. Pomimo różnic wydajności instalacji obydwie zakłady osiągają zbliżone wartości współczynnika efektywności energetycznej.

REFERENCES

- [1] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 roku o odpadach (Dz.U. 2013, poz. 21), z późniejszymi zmianami.
- [2] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE w sprawie odpadów oraz uchylającej niektóre dyrektywy, Dz.U. L 312 z 22.11.2008.
- [3] Małyńska P.: *Analiza ilościowa strumieni odpadów komunalnych wytwarzanych w Polsce oraz prawne i rynkowe możliwości ich utylizacji w spalarniach – perspektywa 2020*, Rynek Energii, 2016, Nr 3 (124), s. 81-88.
- [4] Wielgoński G.: *Wybór technologii termicznego przekształcania odpadów komunalnych*, Nowa Energia – nr 1/2012, s. 1-17.
- [5] Materiały niepublikowane, ZUOK Białystok 2017.
- [6] Raport o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko dla przedsięwzięcia pt: „Budowa Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Komunalnych w Białymstoku”, 2009.
- [7] Kinitz N.: *Budujemy pełną parą*. Raport. Spalarnie w Polsce, Przegląd komunalny, nr 9/2014, s. 10-14.
- [8] Wandrasz J.W., Wandrasz A.J.: *Paliwa formowane. Biopaliwa i paliwa z odpadów w procesach termicznych*. Wyd. Seidel.Przywecki. 2006.

- [9] Żygadło M.: *Strategia gospodarki odpadami komunalnymi*. Wyd. PZiTS. Poznań 2001.
- [10] Materiały niepublikowane, ZTPO Kraków 2017.
- [11] Reimann D.O., *Results of Specific Data for Energy, Efficiency Rates and Coefficients*, Plant Efficiency factors and NCV of 97 European W-t-E Plants and Determination of the Main Energy Results, Bamberg 2006.
- [12] Raport o oddziaływaniu na środowisko dla przedsięwzięcia: „Budowa Zakładu Termicznego Przekształcania Odpadów przy ul. Giedroycia w Krakowie” jako element projektu „Program gospodarki odpadami komunalnymi w Krakowie”, Warszawa 2009.

Acknowledgments:

*The work was financed by Kielce University of Technology part of the statutory work No.
05.0.09.00/2.01.01.01.0003 MNSP.IKGO.17.003*

Podziękowania:

*Praca była finansowana przez Politechnikę Świętokrzyską w ramach pracy statutowej nr:
05.0.09.00/2.01.01.01.0003 MNSP.IKGO.17.003*



ALEKSANDER SZKAROWSKI
Koszalin University of Technology, Poland
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia
e-mail: szkarowski@wp.pl
SYLWIA JANTA-LIPIŃSKA
Koszalin University of Technology, Poland
e-mail: sylwia.janta-lipinska@tu.koszalin.pl

Manuscript submitted 2018.02.06 – revised 2018.05.23
initially accepted for publication 2018.08.08, published in December 2018

IMPROVING OF BOILER EFFICIENCY BY CONTROLLING THE HARMFUL SUBSTANCES CONCENTRATION IN THE COMBUSTION PRODUCTS

POPRAWA SPRAWNOŚCI KOTŁA POPRZECZ STEROWANIEM SZKODLIWYCH SUBSTANCJI W PRODUKTACH SPALANIA

DOI: 10.30540/sae-2018-033

Abstract

Chemical carbon level control is considered to be one of the simplest, cheapest and the most effective methods of optimizing fuel combustion. Standardized balance boiler's tests show that maximum efficiency can be mentioned with highly noticeable chemical underburn responding to concentration of carbon monoxide 0.02-0.03% vol. (200-300 ppm). In addition, nitrogen oxide, which originates in maximum temperature (with lack of underburn), is 35 times more toxic than carbon monoxide. It can be supposed that defining the permissible level of chemical underburn is a typical optimizing issue due to minimize the destination function. To simplify and unify the issue, ecological and economical fuel combustion criteria were proposed as well as general energy–ecology criterion, which is simultaneously the searched destination function. Results of such research on boilers have shown that optimum combustion operation takes place within carbon monoxide concentration of 234-379 mg/m³, oxygen 4.11-4.24% vol. and air pressure 80-81 daPa.

Keywords: optimisation, energy-ecology criterion, carbon monoxide, boiler, flue gases

Streszczenie

Sterowanie poziomem niedopału chemicznego uważa się za jedną z najprostszych, najtańszych i wysokoefektywnych metod optymalizacji spalania paliwa. Standardowe bilansowe próby kotła pokazują, że maksymalną jego sprawność notuje się przy wielce zauważalnym niedopale chemicznym odpowiadającym stężeniu CO na poziomie 0,02-0,03% obj. (200-300 ppm). Ponadto tlenki azotu, które powstają w maksymalnej temperaturze, czyli przy braku niedopału, są substancjami około 35 razy bardziej toksycznymi niż tlenek węgla. Z tego wynika, że wyznaczenie dopuszczalnego poziomu niedopału chemicznego stanowi typowe zagadnienie optymalizacyjne, mające na celu zminimalizowanie pewnej funkcji docelowej. Dla ujednolicenia tego problemu zostało zaproponowane ekologiczne i ekonomiczne kryterium spalania paliwa, jak również uogólnione kryterium energetyczno-ekologiczne będące poszukiwaną funkcją docelową. Jak pokazały wyniki takich badań na kotłach, optymalny tryb spalania znajduje się w zakresie stężenia tlenu węgla w granicach 234-379 mg/m³, tlenu 4,11–4,24% obj. i ciśnienia powietrza 80–81 daPa.

Słowa kluczowe: optymalizacja, kryterium energo-ekologiczne, tlenki azotu, kocioł, paliwo gazowe

1. INTRODUCTION

Working for many years on theory and practice of effective and environment friendly fuel combustion, authors constantly promote the principle of energy – ecological optimisation [1]. Such approach means that optimum result of fuel combustion is qualified not only by direct efficiency of fuel consumption but

1. WPROWADZENIE

Zajmujący się od wielu lat zagadnieniami teorii i praktyki efektywnego i przyjaznego środowisku zużycia paliwa zespół autorski konsekwentnie promuje zasadę energetyczno-ekologicznej optymalizacji [1]. Takie podejście oznacza, iż optymalny wynik spalania paliwa wyznacza się nie tylko bezpośrednią sprawno-

also by minimal damage made to people and natural environment [2, 14].

One of the simplest, cheapest and at the same time highly effective ways of such optimisation is the burning of fuel in a zone of controllable, remnant chemical underburn (RCU) [3, 9, 10]. This may sound paradoxically for many specialists. Most boiler operation specialists are used to obey the unquestionable rule: products of non complete fuel combustion, especially when burning gas fuel, shall not be present in flue gases. This publication is intended to evaluate this question from the energy-ecological optimisation point of view, that is optimisation regarding fuel savings as well as environment protection.

2. IDEA OF CONTROLLABLE CHEMICAL UNDERBURN

Usually concentration of incomplete combustion products in flue gases (CO , H_2 and CH_4) is considered as quantitative measure of chemical underburn. This factor determines a heat loss due to underburn (value q_3 in a heat balance of boiler unit). Traditional (for saving fuel) requirement of the total lack of chemical underburn products in flue gases is explained by eagerness for reducing q_3 .

According to many years of boiler set up practice, in flue gases only traces of incomplete combustion products are permissible, which corresponds with CO concentration of $30\div 50 \text{ mg/m}^3$. In the branch publications it is recommended to arrange combustion with the air excess factor (α) higher about $0.03\div 0.04$ than "critical" value (with some allowance for potential variation of factors that affect completeness of combustion). Just the appearance of underburn products [4] in flue gases is considered to be the critical value.

Results of extensive research made by authors' team evidence good reasoned possibility, both for economical and ecological reason, of increasing maximum permissible level of carbon monoxide concentration while burning natural gas in boilers equipped with blow-in turbulent burners.

Let's first consider incorrectness of the statement, which seems to be obviously true, that minimal underburn corresponds with maximum efficiency of fuel consumption in boilers [15]. Both, radiation and convection ways of heat receiving by waterwalls surrounding boilers furnace in a complicated way depends on many factors: shape, dimensions and luminosity of the flame, location of maximum

ścią jego zużycia, lecz również minimalną szkodą wyrządzoną ludziom i środowisku naturalnemu [2, 14].

Jednym z najprostszych, najtańszych i jednocześnie wysokoefektywnych sposobów takiej optymalizacji jest spalanie paliwa w strefie regulowanego resztkowego niedopału chemicznego (RRNC) [3, 9, 10]. Dla wielu specjalistów od eksploatacji kotłów to może brzmieć paradoksalnie, przyzwyczajeni są przestrzegać niekwestionowaną regułę: w spalinach nie powinny występować produkty niezupełnego spalania paliwa, zwłaszcza przy spalaniu paliwa gazowego. Zadaniem tej publikacji jest spojrzenie na tę kwestię pod kątem pełnej energetyczno-ekologicznej optymalizacji, czyli optymalizacji zarówno pod względem oszczędzania paliwa, jak i ochrony środowiska.

2. KONCEPCJA REGULOWANEGO NIEDOPAŁU CHEMICZNEGO

Za ilościową miarę niedopału chemicznego zazwyczaj przyjmuje się sumaryczne stężenie produktów niezupełnego spalania w spalinach (CO , H_2 i CH_4). Ten wskaźnik wyznacza straty ciepła od niedopału (wartość q_3 w bilansie cieplnym agregatu kotłowego). Dążeniem do zmniejszenia q_3 wyjaśnia się tradycyjne (z racji oszczędzania paliwa) wymaganie całkowitego braku produktów niedopału chemicznego w spalinach.

Zgodnie z wieloletnią praktyką nastawiania kotłów, w spalinach dopuszczalne są wyłącznie „ślady” produktów niezupełnego spalania, co odpowiada stężeniu CO na poziomie $30\div 50 \text{ mg/m}^3$. W literaturze branżowej zaleca się zorganizowanie spalania ze współczynnikiem nadmiaru powietrza (α) o około $0,03\div 0,04$ większym od wartości „krytycznej” (z pewnym zapasem na ewentualne wahania czynników wywierających wpływ na zupełność spalania). Przy czym za wartość „krytyczną” uważa się już sam fakt pojawienia się śladów produktów „niedopału” w spalinach [4].

Wyniki wykonanych przez zespół autorski obszernych badań świadczą o możliwości całkiem uzasadnionego, pod względem zarówno ekonomicznym, jak i ekologicznym, zwiększenia maksymalnie dopuszczalnego poziomu stężenia tlenu węgla przy spalaniu gazu ziemnego w kotłach wyposażonych w wirowe palniki nadmuchowe.

Zwróćmy najpierw uwagę na nieprawidłowość oczywistego, wydawałoby się, zdania, że minimalny niedopał odpowiada maksymalnej sprawności zużycia paliwa w kotłach [15]. Zarówno promieniowe, jak i konwekcyjne odbieranie ciepła przez powierzchnie ekranowe otaczające palenisko kotła w bardzo skomplikowany sposób zależy od wielu czynników: formy,

temperature zones and the overall aerodynamics of the furnace space. Considerable influence of electricity consumption for driving fans and exhaust of flue gases on general energetic efficiency of a boiler shall also be kept in mind. Standard balance trials of a boiler show, that its maximum efficiency is noted at highly perceptible chemical underburn, corresponding with CO concentration in flue gases reaching $0.02 \div 0.03\%$ vol. ($200 \div 300$ ppm, or $250 \div 375$ mg/m³).

Even more logical is “moving” the burning mode to the zone of chemical underburn due to minimal ecological detriment. It is enough to remind that nitrogen oxides (NO_x) the most intensively generated in maximal temperature, that is at the lack of underburn, are substances about 35 times more toxic than carbon monoxide, because such is a relation of maximum permissible concentration of both these substances in inhaled air (respectively 0.085 and 3.0 mg/m³).

The above circumstances show clearly that determination of permissible level of chemical underburn is a typical optimisation issue that aims to minimize some target function. Complicated character if this issue consists in necessity of its individual solving in each case of set up the boiler, considering characteristics and details of all accompanying appliances of the complete furnace – boiler unit [12].

3. CRITERION FORM OF FUEL COMBUSTION OPTIMISATION ISSUE

Different approaches to determination of the mentioned goal function are possible. Aiming to define the simplest optimum criterion of a furnace process following were applied:

- as the characteristic of combustion environment friendliness – coefficient of flue gases toxicity G_{sp} (converted into NO_x, according to I. Sigal [5]);
- as the ration of the fuel consumption efficiency – balance efficiency of the boiler unit (gross) η_{br} [16].

At the same time toxicity coefficient was determined on the basis of CO, NO_x and 3,4-benzopyrene concentration in flue gases, while efficiency – according to standard method of boiler balance tests [4, 13].

Aiming to unify these coefficients following equations of ecological (A_1) and economical (A_2) criteria representing relative change of above selected characteristic parameters:

rozmiarów i świecenia się płomienia, położenia strefy maksymalnych temperatur oraz całokształtu aerodynamiki przestrzeni paleniska. Nie można zapomnieć też o istotnym wpływie zużycia energii elektrycznej na napęd wentylatorów i wyciągów spalin na ogólną sprawność energetyczną kotła. Standardowe bilansowe próby kotła pokazują, że maksymalną jego sprawność notuje się przy wielce zauważalnym niedopale chemicznym, odpowiadającym stężeniu CO w spalinach na poziomie $0,02 \div 0,03\%$ obj. ($200 \div 300$ ppm, lub $250 \div 375$ mg/m³).

Jeszcze bardziej logiczne jest „przesunięcie” trybu spalania ku strefie niedopału chemicznego ze względu na minimalny uszczerbek ekologiczny. Wystarczy przypomnieć, że tlenki azotu (NO_x) najbardziej intensywnie powstające w maksymalnej temperaturze, czyli przy braku niedopału, są to substancje około 35 razy bardziej toksyczne, niż tlenek węgla, taką, bowiem wartość stanowi stosunek maksymalnie dopuszczalnych koncentracji tych substancji we wdychanym powietrzu (odpowiednio 0,085 i 3,0 mg/m³).

Z powyższych przesłanek wyraźnie wynika, iż wyznaczanie dopuszczalnego poziomu niedopału chemicznego stanowi typowe zagadnienie optymalizacyjne, mające na celu zminimalizowanie pewnej funkcji docelowej. Skomplikowany charakter tego zagadnienia polega na konieczności jego indywidualnego rozwiązania w każdym konkretnym przypadku nastawiania kotła, z uwzględnieniem charakterystyk i szczegółów wszystkich składowych urządzeń całego zespołu kotłowo-paleniskowego [12].

3. KRYTERIALNA FORMA ZAGADNIENIA OPTIMALIZACJI SPALANIA PALIWA

Możliwe są rozmaite podejścia do określenia wspomnianej funkcji docelowej. W celu zdefiniowania najprostszego kryterium optymalności procesu paleniskowego przyjęto:

- jako charakterystykę ekologiczności spalania – wskaźnik toksyczności spalin G_{sp} (w przeliczeniu na NO_x, według I. Sigala [5]);
- jako wskaźnik sprawności zużycia paliwa – bilansową sprawność agregatu kotłowego (brutto) η_{br} [16].

Przy czym wskaźnik toksyczności określano na podstawie stężenia CO, NO_x i 3,4-benzpirena w spalinach, a sprawność – zgodnie ze standardową metodą prób bilansowych kotła [4, 13].

Aby ujednolicić wskaźniki zaproponowano następujące wzory kryteriów ekologiczności (A_1) i ekonomiczności (A_2), odzwierciedlających względną zmianę wybranych wyżej charakterystycznych parametrów:

$$A_1 = \frac{G_{sp} - G_{sp}^{\min}}{G_{sp}^{\max} - G_{sp}^{\min}}; A_2 = \frac{\eta_{br}^{\max} - \eta_{br}}{\eta_{br}^{\max} - \eta_{br}^{\min}} \quad (1)$$

where:

G_{sp}, η_{br} – current values of parameters, according to which, ecologicalness and efficiency of combustion process are evaluated;

$G_{sp}^{\min}, G_{sp}^{\max}, \eta_{br}^{\min}, \eta_{br}^{\max}$ – minimal and maximum of possible (registered during all trials) values of respective factors in considered variation range of coefficient values.

It was logical to apply the sum of above both criteria as generalised energy – ecological criterion (A), which is the target function, looked for:

$$A = A_1 + A_2 \quad (2)$$

Equation (1) shows, that values of criteria A_1 and A_2 are within the range from 0.0 (the best possible combustion mode) up to 1.0 (the worst recorded mode). Value of criterion A , according to equation (2) may vary from 0.0 (when energetic and ecologic optimum are in line) up to 2.0 (the most unfavourable case when the worst modes of boiler operation, both regarding energy saving as well as environment protection, are in line).

4. TEST CONDITIONS AND THE STUDY METHODOLOGY

With use of the above defined idea of general energy – ecologic criterion a range of research works has been done, allowing to submit a proposition on reasoned increase of permissible level of chemical underburn when burning gas fuel in boilers. The main part of the test was carried out in real operation conditions on vertical pipe steam boilers with turbulent burners of different types, providing different rate of gas and air streams mixing in the furnace space. Measurements were taken according to standard method described in details in [4]. Determination of CO, O_2, NO_2 concentration and temperature of flue gases was done by mean of flue gases analyzer Optima-7. Determination of 3,4-benzopyrone ($C_{20}H_{12}$) in flue gases was done with simplified method [6, 7].

To look for the above mentioned optimum, first maximum and minimum values of G_{sp} and η_{br} were determined at successively changed values of non controllable factors. Then their current values were determined at given rate of controllable parameter (that was a volume of air stream blown to burners) and respective values of A_1, A_2 and A criteria were calculated.

$$A_1 = \frac{G_{sp} - G_{sp}^{\min}}{G_{sp}^{\max} - G_{sp}^{\min}}; A_2 = \frac{\eta_{br}^{\max} - \eta_{br}}{\eta_{br}^{\max} - \eta_{br}^{\min}} \quad (1)$$

gdzie:

G_{sp}, η_{br} – bieżące wartości parametrów, według których ocenia się ekologiczność i sprawność procesu spalania;

$G_{sp}^{\min}, G_{sp}^{\max}, \eta_{br}^{\min}, \eta_{br}^{\max}$ – minimalne i maksymalne z możliwych (odnotowanych podczas wszystkich prób) wartości odpowiednich parametrów w rozpatrywanym przedziale zmiany przestrzeni czynnikowej.

Jako uogólnione kryterium energetyczno-ekologiczne (A), będące poszukiwaną funkcją docelową, logicznie było przyjąć sumę dwóch powyższych kryteriów:

$$A = A_1 + A_2 \quad (2)$$

Ze wzorów (1) wynika, że wartości kryteriów A_1 i A_2 znajdują się w przedziale od 0,0 (najlepszy z możliwych tryb spalania) do 1,0 (najgorszy odnotowany wariant). Kryterium A , zgodnie ze wzorem (2), może przyjmować wartości od 0,0 (gdy optima energetyczne i ekologiczne pokrywają się) do 2,0 (skrajnie niekorzystny przypadek, gdy pokrywają się najgorsze tryby pracy kotła pod względem zarówno oszczędzania energii, jak i ochrony środowiska).

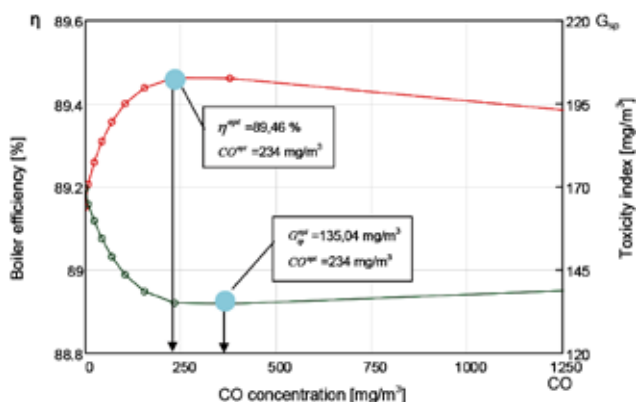
4. WARUNKI EKSPERYMENTU I METODYKA BADAŃ

Z wykorzystaniem wyprowadzanego wyżej pojęcia uogólnionego kryterium energetyczno-ekologicznego wykonano szereg prac doświadczalnych, które pozwoliły zdefiniować tezę o uzasadnionym podwyższeniu dopuszczalnego poziomu niedopału chemicznego przy spalaniu paliwa gazowego w kotłach. Główna część eksperymentów odbyła się w rzeczywistych warunkach eksploatacji na kotłach parowych pionowo-rurowych z palnikami wirowymi różnych typów, zapewniającymi różną intensywność zmieszania strumieni gazu i powietrza w przestrzeni paleniska. Pomiary wykonywano według standardowych metod opisanych dokładnie w [4]. Określenie stężenia CO, O_2, NO_2 i temperatury spalin wykonywano za pomocą analizatora spalin Optima-7. Określenie koncentracji 3,4-benzpirena ($C_{20}H_{12}$) w spalinach wykonywano przez uproszczoną metodę [6, 7].

W celu poszukiwania wyżej wymienionego optimum najpierw ustalano maksymalne i minimalne wartości G_{sp} i η_{br} przy kolejno zmieniających się wartościach nieregulowanych czynników. Potem określano ich bieżące wartości przy danym znaczeniu regulowanego parametru (jakim był strumień objętości powietrza doprowadzanego do palników) i obliczano odpowiednie wartości kryteriów A_1, A_2 i A .

5. ANALYSIS OF RESULTS

Figures 1÷3 presents data typical for research carried out, representing relation of selected efficiency and ecologicalness coefficients of the boiler operation and CO, O₂ concentration in flue gases and air pressure [11]. Data was obtained on steam boiler with rated output 20 t/h with two double-flow turbulent burners GMG-m with rated output 8.1 MW each, located in front of the boiler in one vertical axis.



5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na rysunkach 1÷3 przedstawiono typowe dla wykonanych badań dane ilustrujące zależność wybranych wskaźników efektywności i ekologiczności pracy kotła od koncentracji CO, O₂ w spalinach [11]. Dane otrzymano na kotłach parowych o nominalnej wydajności 20 t/h z dwoma dwuprzepływowymi wiroowymi palnikami o nominalnej mocy 8,1 MW każdy, usytuowanymi z frontu kotła na jednej osi pionowej.

Fig. 1. Boiler efficiency (red line) and combustion products toxicity index (green line) depending on the flue gas CO concentration for industrial burner GMG-m and gas pressure 250 daPa

Rys. 1. Sprawność kotła (linia czerwona) i toksyczność spalin (linia zielona) w zależności od stężenia tlenku węgla w spalinach dla palnika typu GMG-m przy ciśnieniu gazu 250 daPa

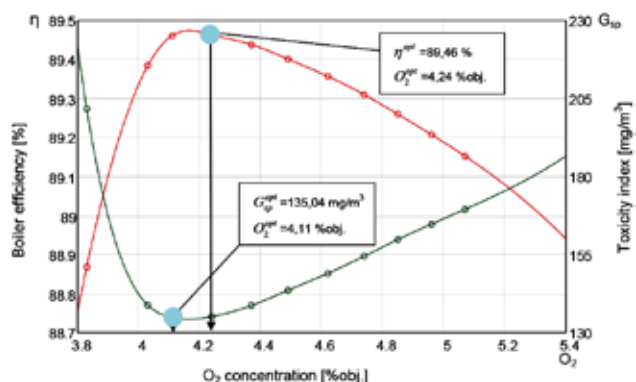


Fig. 2. Boiler efficiency (red line) and combustion products toxicity index (green line) depending on the flue gas O₂ concentration for industrial burner GMG-m and gas pressure 250 daPa

Rys. 2. Sprawność kotła (linia czerwona) i toksyczność spalin (linia zielona) w zależności od stężenia tlenu w spalinach dla palnika typu GMG-m przy ciśnieniu gazu 250 daPa

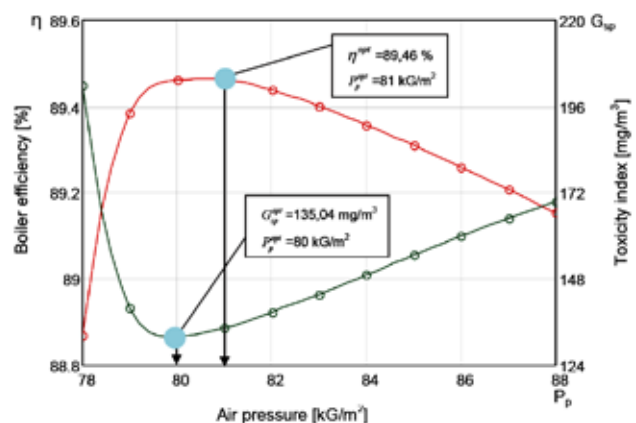


Fig. 3. Boiler efficiency (red line) and combustion products toxicity index (green line) depending on the air pressure for industrial burner GMG-m and gas pressure 250 daPa

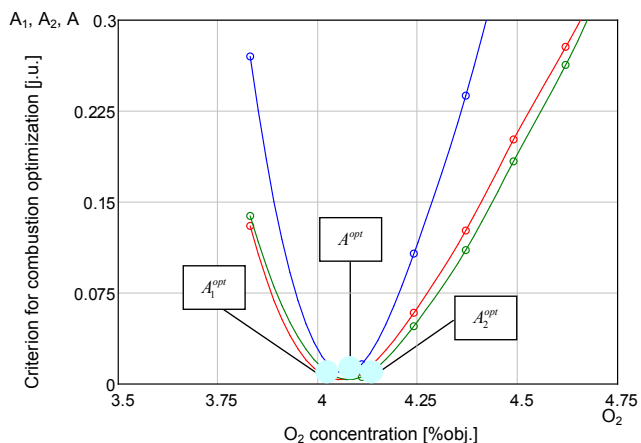
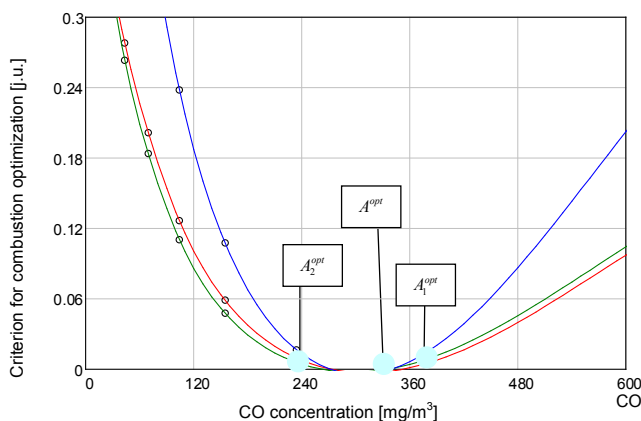
Rys. 3. Sprawność kotła (linia czerwona) i toksyczność spalin (linia zielona) w zależności od ciśnienia powietrza w spalinach dla palnika typu GMG-m przy ciśnieniu gazu 250 daPa

Maximum value η_{br} of the boiler unit corresponds with minimal sum of its energetic loss depending on the volume of air flow:

- stack loss,
- loss due to chemical underburn,
- electrical energy requirement for driving fan and flue gases exhaust.

It appears from the presented diagrams that optimum combustion modes are within the carbon dioxide concentration range of 200÷400 mg/m³, oxygen concentration 4÷4.3% vol. and air pressure 80÷81 daPa. While approaching the zone of complete combustion results with noticeable lowering of the boiler efficiency and considerable worsening of ecologic combustion coefficients.

Figures 4÷6 illustrates results of the same data processing according to above presented method of energy saving and ecologicalness of fuel consumption. As it appears from diagrams, optimum of respective criteria A_1 and A_2 , as well as minimum value of generalised criterion A are within quite narrow range of CO concentration variation, that is 230÷380 mg/m³, oxygen 4.11÷4.24% vol., air pressure 80÷81 daPa, what in turn corresponds with range of air excess coefficient variation of about 0.01.



Maksymalna wartość η_{br} agregatu kotłowego odpowiada minimum sumy jego strat energetycznych zależnych od strumienia objętości powietrza:

- strat ciepła spalinowych,
- strat od niedopału chemicznego,
- zapotrzebowania energii elektrycznej do napędzania wentylatora i wyciągu spalin.

Z przedstawionych wykresów wynika, że optymalne tryby spalania znajdują się w zakresie stężenia tlenku węgla 200÷400 mg/m³, tlenu 4÷4,3% obj. i ciśnienia powietrza 80÷81 daPa. Zaś zbliżenie się ku strefie z pełnym spalaniem skutkuje zauważalnym obniżeniem sprawności kotła i istotnym pogorszeniem ekologicznych wskaźników spalania.

Rysunki 4÷6 ilustruje wyniki obróbki tych samych danych według przedstawionej wyżej metody kryteriów energooszczędności i ekologiczności zużycia paliwa. Jak widać z wykresów, optima poszczególnych kryteriów A_1 i A_2 oraz minimalna wartość uogólnionego kryterium A znajdują się w dość wąskim przedziale zmiany koncentracji CO, mianowicie 230÷380 mg/m³, tlenu 4,11÷4,24% obj., ciśnienia powietrza 80÷81 daPa, co z kolei odpowiada przedziałowi zmiany współczynnika nadmiaru powietrza ok. 0,01.

Fig. 4. Search for the optimum CO concentration by the criterial method (condition for experiment the same as for Figure 1)

Rys. 4. Kryteria optymalności spalania w zależności od stężenia tlenku węgla w spalinach (warunki eksperymentu zgodne z rysunkiem 1)

Fig. 5. Search for the optimum O₂ concentration by the criterial method (condition for experiment the same as for Figure 2)

Rys. 5. Kryteria optymalności spalania w zależności od stężenia tlenu w spalinach (warunki eksperymentu zgodne z rysunkiem 2)

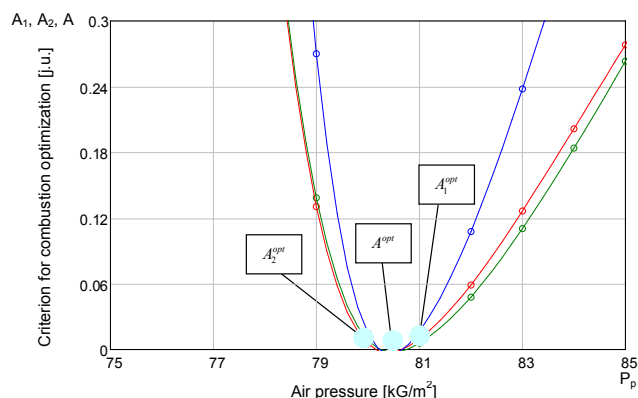


Fig. 6. Search for the optimum air pressure by the criterial method (condition for experiment the same as for Figure 3)
Rys. 6. Kryteria optymalności spalania w zależności od ciśnienia powietrza w spalinach (warunki eksperymentu zgodne z rysunkiem 3)

Similar data, slightly differing in details, was obtained for other types of boilers and different burners. It shall be noted, that with increase of CO concentration from optimum, value of A criterion, as well as value of original factors (G_{sp} i η_{br}) on the beginning change slightly. This gave possibility to consider concentration of CO in flue gases on the level of $500 \div 600 \text{ mg/m}^3$ as „critical”. In turn the “protective” margin of air excess coefficient value, recommended during set up boilers, equals $0.02 \div 0.03$ of the critical value, what guarantees continuous operation of the boiler in the mode close to energy-ecological optimum.

However the margin mentioned shall be applied only for boilers equipped with traditional automatic units, still quite often operated in Poland.

The most positive result of the controllable method of remnant chemical underburn is achieved with use of numerical systems of fuel combustion quality control [8], which operate on the basis of “current” results of the gas analysis. In this case there is no need to use idea of “critical” concentration of CO or applying “protective” margin of air excess. This type of units in a continuous way maintain mode of combustion and the whole boiler operation in the zone close to optimum, while optimum itself is corrected depending on calorific value of the fuel, technical condition of the boiler, climatic conditions and other affecting factors.

6. CONCLUSIONS

1. Complete lack of chemical underburn products in flue gases does not indicate high efficiency and ecologicalness of fuel combustion in boiler units. In most cases maximum efficiency as well as minimal toxicity of flue gases, in practice of set up boilers, is achieved at the CO concentration in flue gases within the range $200 \div 400 \text{ mg/m}^3$.

Podobne dane, nieznacznie różniące się w szczegółach, otrzymano dla innych typów kotłów i różnych palników. Należy zauważyć, że przy wzroście stężenia CO od położenia optimum wartość kryterium A , jak też samych pierwotnych wskaźników (G_{sp} i η_{br}) na początku zmienia się nieznacznie. To dało możliwość uznania za „krytyczną” koncentrację CO w spalinach na poziomie $500 \div 600 \text{ mg/m}^3$. Z kolei „asekuracyjny” zapas wartości współczynnika nadmiaru powietrza, zalecany podczas nastawiania kotłów, wynosi $0,02 \div 0,03$ wartości krytycznej, co gwarantuje stałą pracę kotła w trybie zbliżonym do optimum energetyczno-ekologicznego.

Jednak wspomniany zapas stosować należy tylko na kotłach wyposażonych w tradycyjne, jeszcze dość często spotykane w kraju, układy automatyki.

Największy efekt stosowania metody regulowanej resztkowego niedopału chemicznego osiągany jest przy wykorzystaniu mikroprocesorowych systemów sterowania jakością spalania paliwa [8], których praca opiera się o wyniki analizy gazowej na „bieżąco”. W tym przypadku nie ma potrzeby stosowania pojęcia „krytycznego” stężenia CO czy „asekuracyjnego” zapasu nadmiaru powietrza. Układy tego typu w sposób ciągły utrzymują tryb spalania i całej pracy kotła w strefie maksymalnie bliskiej optimum, przy czym same optimum korygowane jest w zależności od kaloryczności paliwa stanu technicznego kotła, warunków klimatycznych i innych czynników wpływu.

6. WNIOSKI

1. Całkowity brak produktów niedopału chemicznego w spalinach bynajmniej nie świadczy o wysokiej sprawności i ekologiczności spalania paliwa w agregatach kotłowych. Maksimum sprawności, jak również minimalną toksyczność spalin w większości przypadków w praktyce nastawiania kotłów notują się przy stężeniu CO w spalinach na poziomie $200 \div 400 \text{ mg/m}^3$.

2. The method of fuel combustion with controllable remnant chemical underburn (RCU) on such level provides continuous energy-ecological result. At the same time suggested range of RCU is very close to all traditional blow-in turbulent burners.
3. When setting boilers up, recommended concentration of CO equalling 500 mg/m³, above which signs of non stable resonant burning appear, may be considered to as "critical". In these conditions concentration of H₂, CH₄, 3,4-benzopyren, formaldehyde as well as other products of incomplete combustion may considerably increase.
4. When setting up boilers with traditional automatic system (without continuous analysis of flue gases) it is recommended that the margin of the air excess coefficient, compared to "critical" mode, equals on average 0.02÷0.03.
5. The best result of RCU method application is achieved if boiler is equipped with system of automatic control fuel - air relation on the basis of continuous analysis of flue gases content.
2. Metoda spalania paliwa z regulowanym resztkowym niedopałem chemicznym (RRNC) na takim poziomie daje stały eksploatacyjny efekt energetyczno-ekologiczny. Sugerowany przedział RRNC jest bardzo zbliżony dla wszystkich tradycyjnych wirowych palników nadmuchowych.
3. Jako „krytyczna” koncentracja CO przy wykonaniu prac nastawiania kotłów zalecana może być wartość 500 mg/m³, powyżej której obserwuje się oznaki niestalego spalania pulsacyjnego. W tych warunkach może znacznie wzrastać koncentracja H₂, CH₄, 3,4-benzpirena, formaldehydu i innych produktów niezupełnego spalania.
4. Podczas nastawiania kotłów z tradycyjnym układem automatyki (bez stałej analizy spalin) zalecana eksploatacyjna nadwyżka współczynnika nadmiaru powietrza, w porównaniu z trybem „krytycznym”, wynosi średnio 0,02÷0,03.
5. Największy efekt stosowania metody RRNC osiągnany jest przy wyposażeniu kotłów w układy automatycznej regulacji stosunku paliwo-powietrze na podstawie wyników stałej analizy składu spalin.

REFERENCES

- [1] Szkarowski A.: *Estimation of modern tendencies In Environment Pollution*. Annual Set The Environment Protection. Vol. 5, 2003, pp. 67-78.
- [2] Novikov O., Artamonov D., Shkarowski A.: *Energy and ecological optimization of fuel combustion in boiler and furnace via regulation of fuel-air ratio*. Energy Power Engineering nr 5, 2000, pp. 57-60.
- [3] Baryshev V., Beloselskiy B., Zenkevich L., Shpolivskaya L.: *Decrease of nitrogen oxides emission via adjustable residual chemical underburn*. Heating Engineering 4, 1996.
- [4] Trembovla V., Finger E., Avdeyeva A.: *Thermal Tests of Boilers*. Moscow: Energoatomizdat, 1991.
- [5] Sigal I.: *Environment Protection at Fuel Burning*. Leningrad: Nedra, 1988.
- [6] Bezrukih V.: *Choice of Optimum Parameters of a Gas-air Mix in Burners of Low Power Boilers for Fuel saving and Reduction Harmful Substances Emission. The thesis for a doctor's degree*. Leningrad: LISI, 1988.
- [7] Komina G.: *Research of Products of Hydrocarbon Gases burning and Reduction Harmful Emissions. The thesis for a doctor's degree*. Leningrad 1971.
- [8] Szkarowski A., Nowikow O., Okatjew A., Kociergin M.: *The Intellectual System of a Combustion Quality Control*. In Proceedings of IV National Polish Scientific Conference on Complex and Detailed Problems of Environmental Engineering. Koszalin-Ustronie Morskie, Poland, 2003: 117-126.
- [9] Szkarowski A., Janta-Lipińska S.: *Automatic Control of Burning Quality of Solid Fuel in Industrial Heating Boilers*. Annual Set The Environment Protection. Vol. 11, 2009, s. 241-255.
- [10] Szkarowski A., Janta-Lipińska S.: *Modeling of Optimum Burning of Fuel in Industrial Heating Boilers*. Annual Set The Environment Protection. Vol. 13, 2011, pp. 511-524.
- [11] Szkarowski A., Janta-Lipińska S.: *Examination of boiler operation energy-ecological indicators during fuel burning with controlled residual chemical underburn*. Annual Set The Environment Protection. Vol. 15, 2013, pp. 981-995.
- [12] Szkarowski A., Janta-Lipińska S.: *Experimental Research Vs. Accuracy of the Elaborated Model*. Annual Set The Environment Protection. Vol. 17, 2015, pp. 576-584.
- [13] Szkarowski A., Janta-Lipińska S., Gawin R.: *Reducing Emissions of Nitrogen Oxides from DKVR Boilers*. Annual Set The Environment Protection. Vol. 18, 2016, pp. 565-578.
- [14] Pavlenko, A., Szarowski, A., Janta-Lipińska, S.: *Research on Burning of Water Black Oil Emulsions*. Annual Set The Environment Protection. Vol. 16, 2014, pp. 376-385.

- [15] Szyszlak-Bargłowiec J., Zając G., Słowik T.: *Badanie emisji wybranych zanieczyszczeń gazowych podczas spalania peletów z agro biomasy w kotle małej mocy*. Annual Set The Environment Protection. Vol. 19, 2017, pp. 715-730.
- [16] Fijałkowska D., Styszko L.: *Ciepło spalania biomasy wierzbowej*. Annual Set The Environment Protection. Vol. 13, 2011, pp. 875-890.

Acknowledgments:

The work was financed by Koszalin University of Technology.

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Koszalińską.

MARLENA DĘBICKA
MARIA ŻYGADŁO
Kielce University of Technology
e-mail: mdebicka@tu.kielce.pl

Manuscript submitted 2018.06.06 – revised 2018.07.18
initially accepted for publication 2018.08.29, published in December 2018

ANALYSIS OF RESPIRATORY QUOTIENT RQ IN PROCESS OF BIOMASS DECOMPOSITION IN THE LAB TECHNICS

ANALIZA WSPÓŁCZYNNIKA ODDECHOWEGO RQ W PROCESIE ROZKŁADU BIOMASY TECHNIKĄ LABORATORYJNĄ

DOI: 10.30540/sae-2018-034

Abstract

Biomass biodegradation under aerobic condition was investigated. The source of the biomass was potato samples. The oxygen consumption and carbon dioxide rates were monitored over 24 hours, using a 2.5 L Oxymax ER-10 respirometric chamber. The chamber with a representative sample of biomass was continuously aerated and the changes in the gas concentrations were recorded (oxygen and carbon dioxide). The oxygen uptake is directly linked to the biological activity of the microorganisms and the organic matter biodegradation. Microorganisms consume oxygen in order to decay the easy-biodegradable substrate. The biomass degradation progress under the bio-chemical process under oxidation conditions was described mathematically by linear regression. The fitting of calculated curves were checked by determination coefficient R^2 .

Keywords: respiratory quotient, dynamics of biomass decomposition, microbial activity

Streszczenie

Przedmiotem badań była respirometryczna metoda charakteryzowania biodegradacji biomasy w warunkach tlenowych. Źródłem biomasy były próby ziemniaków. Zapotrzebowanie na tlen i produkcję dwutlenku węgla monitorowano przez 24 godziny w komorze respirometrycznej o pojemności 2,5 dm³ aparatu Oxymax ER-10. Komorę testową z reprezentatywną próbką biomasy napowietrzano w sposób ciągły i rejestrowano zmiany stężenia gazów (tlen i dwutlenek węgla). Pobór tlenu jest bezpośrednio związany z biologiczną aktywnością mikroorganizmów i biodegradacją materii organicznej. Mikroorganizmy zużywają tlen w celu rozkładu łatwo biodegradowalnego substratu. Postęp degradacji biomasy w procesie biochemicznym w warunkach tlenowych opisano matematycznie metodą regresji liniowej. Dopasowanie obliczonych krzywych sprawdzono za pomocą współczynnika determinacji R^2 .

Słowa kluczowe: współczynnik oddechowy, dynamika rozkładu biomasy, aktywność mikrobiologiczna

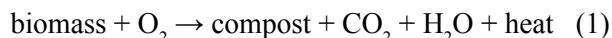
1. INTRODUCTION

Within the waste management technologies we can find the biological method of treatment that occurs when organic wastes are decayed by microorganisms under aerobic conditions and transformed into a new material like compost, which can be used as a healthy component of the soil for its valorization. Biomass degradation can be defined as aerobic when the oxygen content exceeds 5% [1].

The composting process is based on the decomposition of the organic matter by microorganisms in the presence of oxygen and moisture and may be expressed by the following equation [2]:

1. WPROWADZENIE

Jedną z metod w gospodarowaniu odpadami jest metoda biologicznego przetwarzania polegająca na rozkładzie odpadów przez mikroorganizmy w warunkach tlenowych i przekształcaniu w nowy materiał. Produktem biologicznej przeróbki odpadów jest kompost, który może być wykorzystany do wzbogacenia gleby. Degradację biomasy można określić jako tlenową, gdy zawartość tlenu przekracza 5% [1]. Proces kompostowania odpadów opiera się na rozkładzie materii organicznej przez mikroorganizmy w obecności tlenu oraz wilgoci, co opisuje następujące równanie [2]:



The microorganisms uptake the oxygen from the surroundings and break down the biomass into carbon dioxide, water vapor and compost. The biomass decomposition is based on numerous biological, thermal and physio-chemical phenomena [3]. The intense microbial activity leads to the mineralization of about 40% of the initial organic matter. Meanwhile, the residual organic matter becomes more and more resistant to microbial biodegradation [4]. The amount of CO_2 production and the O_2 uptake during the incubation of the biomass can be used to evaluate the microbiological activity and assess the degree of organic matter stability [5, 6]. The respiratory quotient (RQ) is the ratio:

$$\text{RQ} = \text{CO}_{2 \text{ eliminated}} / \text{O}_{2 \text{ consumed}} \quad (2)$$

where the term “eliminated” refers to carbon dioxide removed from the organic material.

The microbial activity expressed as oxygen consumption carried out in a short period of time (1-4 days) could be taken as representing the biodegradation of any biomass [7-10].

The degradation of organic content as a function of composting period (time) follows first order kinetics expressed as [11, 12]:

$$d(\text{BVS})/dt = -k (\text{BVS}) \quad (3)$$

where:

BVS – is the quantity of biodegradable volatile solids at any time of the composting process expressed in kilograms; Volatile solids are those solids that are lost on ignition of dry solids at 550°C ,

t – is time in days,

k – is the rate constant of reaction proceeding according to the first-order kinetics (days^{-1}).

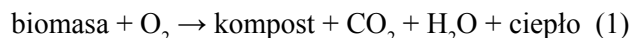
Using the Eq. (3) and by substitution $\text{BVS} = \text{BVS}_0$ at $t = 0$, the concentration of organic matter at any time in the compost matrix can be expressed as follows [12]:

$$\ln = (\text{BVS}/\text{BVS}_0) = -kt \quad (4)$$

by transforming the equation (4), we get the formula:

$$\text{BVS loss} = \text{BVS}_0 (1 - e^{-kt}) \quad (5)$$

The dynamic of organic biomass decay can be traced using respiratory quotient RQ. The use of the RQ should be restricted only under aerobic conditions in the biodegradable matrix [13]. The typical molar ratio of the O_2 consumed by microorganisms and the CO_2



Mikroorganizmy pobierają tlen z otoczenia, rozkładając biomasę na dwutlenek węgla, parę wodną i kompost. Rozkład biomasy oparty jest na wielu zjawiskach biologicznych, termicznych i fizyko-chemicznych [3]. Intensywna aktywność mikrobiologiczna prowadzi do mineralizacji około 40% pierwotnej substancji organicznej. Tymczasem pozostała materia organiczna staje się coraz bardziej odporna na biodegradację mikrobiologiczną [4]. Ilość produkowanego CO_2 i pobór O_2 podczas inkubacji biomasy można wykorzystać do oceny aktywności mikrobiologicznej i oceny stopnia stabilności materii organicznej [5, 6]. Współczynnik oddechowy RQ jest stosunkiem:

$$\text{RQ} = \text{CO}_{2 \text{ usunięty}} / \text{O}_{2 \text{ strawiony}} \quad (2)$$

gdzie termin „usunięty” odnosi się do ditlenku węgla usuniętego z substancji organicznej.

Aktywność drobnoustrojów wyrażoną jako zapotrzebowanie mikroorganizmów na tlen w krótkim czasie (1-4 dni) można zastosować jako wskaźnik bio-rozkładu w reprezentatywnej próbce dowolnej biomasy [7-10].

Rozkład substancji organicznej w trakcie kompostowania (w jednostkach czasu) można przedstawić za pomocą kinetyki reakcji pierwszego rzędu [11, 12]:

$$d(\text{BVS})/dt = -k (\text{BVS}) \quad (3)$$

gdzie:

BVS – ilość biodegradowalnych lotnych ciał stałych w dowolnej chwili procesu kompostowania wyrażona w kilogramach; lotne ciała stałe to ciała, które przechodzą w formę gazową w czasie prażenia ciał stałych w temperaturze 550°C ,

t – czas wyrażony w dobach,

k – stała szybkość reakcji postępująca zgodnie z kinetyką pierwszego rzędu (dni^{-1}).

Wykorzystując równanie (3) i podstawiając $\text{BVS} = \text{BVS}_0$ w $t = 0$, stężenie substancji organicznej w dowolnym momencie w matrycy kompostowej można wyrazić następująco [12]:

$$\ln = (\text{BVS}/\text{BVS}_0) = -kt \quad (4)$$

Przekształcając równanie (4), otrzymujemy wyrażenie:

$$\text{BVS loss} = \text{BVS}_0 (1 - e^{-kt}) \quad (5)$$

Dynamika rozkładu biomasy może być wyrażona współczynnikiem oddechowym RQ. Zastosowanie parametru RQ powinno być ograniczone tylko do warunków tlenowych w matrycy biooksydacyjnej [13]. Typowy stosunek molowy zużytego O_2 oraz wy-

produced by them during the biomass decomposition is usually close to 1:1 [14]. Moreover, this ratio is strongly dependent on the oxidation susceptibility of the organic carbon in the biomass [15-17].

The value of RQ depends on what substances are decayed, what the fuel source is being metabolized. For simple sugars (glucose) the respiratory quotient is 1, but for example for saturated fats is 0.66.

Sometimes, the oxidation of some part of the biomass is not related to the microbial respiration and should not be compared with the O_2 uptake [1, 18]. Therefore, the molar ratio CO_2/O_2 assumed as equal to 1 could be incorrect and lead to significant errors carried out in the respirometric tests of any biomass [14, 19]. For this reason, the RQ values are not suitable for indicating the waste biodegradability or the microbial activity of biomass of different origins and chemical character [13, 20]. However, for the biomass of the same type, this ratio should be stable and repetitive, in accordance with the stoichiometric factors describing the equation of organic matter decomposition. This is the case in the presented respirometric experiment, where potato is used as a reference biomass.

The objectives of this study are the following: (1) to measure the carbon dioxide production and the oxygen uptake under the aerobic conditions during the potato mass decomposition, (2) to establish the optimal mass sample in the reactor chamber, (3) to fit the mathematical model to the experimental data.

2. MATERIAL AND METHODS

The research was conducted on the biomass represented by the potato by undergoing decomposition under aerobic conditions. The experiment allows to evaluate the susceptibility of the biomass to biodegradation due to microorganism activity. The oxygen and carbon dioxide rates were monitored over 24 hours, using the 2.5 L respirometric reactor chamber of the Oxymax ER-10 apparatus.

The necessary conditions for the survival of the aerobic microorganisms require a continuous oxygen supply, which was pumped regularly into the reactor chamber by the aeration system, to ensure a stable level during the whole experiment. The testing chamber was incubated at 20°C. The electronic system of the Oxymax recorded both the oxygen uptake and the carbon dioxide emissions during the experiment when the potato biomass was undergoing decomposition. The

tworzonego CO_2 podczas rozkładu biomasy wynosi około 1:1 [14]. Jednakże stosunek molowy CO_2/O_2 zależy istotnie od podatności węgla organicznego na utlenianie w biomacie [15-17].

Wartość RQ zależy od tego, jakie substancje są źródłem energii dla mikroorganizmów. Dla cukrów prostych (glukozy) współczynnik oddechowy wynosi 1, ale na przykład dla tłuszczów nasyconych wynosi 0,66.

Niekiedy utlenianie części biomasy może nie być związane z respirometrią mikrobiologiczną, a wówczas nie należy jej przyrównywać do zapotrzebowania mikroorganizmów na tlen [1, 18]. Dlatego przyjęcie stosunku molowego CO_2/O_2 równego 1 może być nieprawidłowe i prowadzić do znaczących błędów w testach respirometrycznych dowolnej biomasy [14, 19]. Z tego powodu wskaźnik RQ nie jest odpowiedni do bezpośredniego wskazania postępu biodegradacji odpadów lub aktywności mikrobiologicznej biomasy o różnym pochodzeniu i charakterze chemicznym [13, 20]. Jednak w przypadku biomasy tego samego typu stosunek molowy CO_2/O_2 powinien być stabilny i powtarzalny, zgodnie ze współczynnikami stechiometrycznymi opisującymi równanie rozkładu materii organicznej. Tak jest w prezentowanym eksperymencie respirometrycznym, w którym ziemniak jest wykorzystywany jako biomasa referencyjna.

Celami niniejszej pracy są: (1) pomiar produkcji ditlenku węgla i pobranego tlenu podczas biologicznego rozkładu biomasy ziemniaka w warunkach tlenowych, (2) ustalenie optymalnej wielkości masy próby, (3) ocena dopasowania modeli matematycznych do danych eksperymentalnych.

2. MATERIAŁY I METODY

Przeprowadzono badania biomasy ziemniaka w warunkach tlenowych. Eksperyment pozwolił ocenić podatność biomasy na biodegradację w wyniku aktywności mikroorganizmów. Badania polegały na monitorowaniu zmian ilości tlenu i ditlenku węgla w czasie 24 h w komorze badawczej o objętości 2,5 dm³ respirometru Oxymax ER-10.

Niezbędnym warunkiem dla przetrwania mikroorganizmów tlenowych jest obecność tlenu. Podczas eksperymentu system napowietrzania zapewnił regularny przepływ powietrza przez komorę testową. Komorę testową inkubowano w temperaturze 20°C. Układ elektroniczny Oxymax rejestrował zarówno pobór tlenu, jak i produkcję ditlenku węgla w czasie biologicznego rozkładu biomasy ziemniaka. Czas eksperymentu ograniczono do 24 godzin, co jest tożsame z badaniami publikowanymi przez Gomeza

experiment was limited to 24 hours. It was comparable to the procedures presented in the literature by Gomez et al. [21] and the standard PN-EN 15590:2011 [22]. After putting the shredded potato into the testing chamber, the cumulative amount of the oxygen uptake and the carbon dioxide production were monitored in equal time intervals, every 10 minutes.

An important element of the experiment was the adjustment of the appropriate mass of potato, which could have an impact on the test results. Therefore, two independent series of tests were carried out in the course of the study using a differentiated biomass mass sample: series A – using 8 g mass samples and series B – using 80 g mass samples. The correct mass sample is important in terms of two aspects: to prevent an oxygen deficit (too much amount of biomass requires increased aeration supply) and alternatively not to dry up the sample, which can make the microorganisms inactive (too low amount of the biomass versus the aeration supply).

Seven samples of each mass series were investigated by testing the microbial activity measured by the respirometric method. The preparation of the test samples consisted of manually slicing the potato to a particle size of approximately 10 mm, then the obtained particles were sieved through a sieve of a mesh size of 10 mm. The potato moisture was tested by the drier method [23]. The initial value of the moisture content was 72%. The organic matter content was determined by sintering the samples in a muffle furnace at 550°C according to [24]. The organic matter content in the test material was equal to 98%.

3. RESULTS AND DISCUSSION

After putting the biomass into the testing chamber, the amounts of oxygen uptake and carbon dioxide production were monitored at 10 minute intervals (Fig. 1 to Fig. 4). The oxygen demand, recorded by the measuring device system, varied from 2.6 to 6.2 mg O₂/g d.m. in series A, while carbon dioxide was released in the amount from 8.8 to 11.7 mg CO₂/g d.m., as had been reported in Fig. 1 and Fig. 2. In the series B, with 10 times greater mass sample, the oxygen demand was ranged from 11.04 to 15.87 mg O₂/g d.m., while carbon dioxide was released in the amount from 19.03 to 25.8 mg CO₂/g d.m., as had been reported in Fig. 3 and Fig. 4. The cumulated amount of monitored gases were changed gradually during the process and these changes were faster in series B than in series A. The biodegradation processes in series B were more effective than in series A.

i in. [21] oraz procedurami wg normy PN-EN 15590:2011 [22]. Po umieszczeniu rozdrobnionego ziemniaka w komorze testowej, skumulowaną ilość pobranego tlenu i wyprodukowanego dwutlenku węgla monitorowano w równych odstępach czasu, co 10 minut.

Ważnym elementem eksperymentu było dobranie odpowiedniej masy próby ziemniaka, co mogło mieć wpływ na wyniki badań. Zatem przeprowadzono dwie niezależne serie badań zróżnicowane pod względem masy próby: seria A – z użyciem prób ziemniaka o masie 8 g i seria B – z użyciem prób ziemniaka o masie 80 g. Dobór masy próby jest istotny z uwagi na dwa aspekty: zapobieganie deficytowi tlenu w komorze testowej (zbyt duża ilość biomasy wymaga zwiększonego napowietrzania) i alternatywnie – zapobieganie wysuszeniu próby, co może dezaktywować mikroorganizmy (zbyt mała ilość biomasy w stosunku do wydajności napowietrzania).

Zbadano aktywność mikrobiologiczną metodą respirometryczną dla siedmiu prób w każdej serii. Przygotowanie prób biomasy polegało na ręcznym rozdrobnieniu ziemniaka na cząstki o wielkości około 10 mm, które następnie przesiano na sicie o oczkach Ø10 mm. Wilgotność ziemniaka badano metodą suszarkową [23]. Początkowa zawartość wilgoci w biomacie ziemniaka wynosiła 72%. Zawartość substancji organicznych oznaczano przez wyprażenie próbek w piecu muflowym w temperaturze 550°C, co jest zgodne z zapisami normy [24]. Zawartość substancji organicznej w badanym materiale wynosiła 98%.

3. WYNIKI I DYSKUSJA

Po umieszczeniu biomasy w komorze testowej monitorowano ilość pobranego tlenu i wyprodukowanego ditlenku węgla w 10-minutowych interwałach (rys. 1÷4). W serii A zapotrzebowanie na tlen wahało się od 2,6 do 6,2 mg O₂/g s.m., podczas gdy ilość wyprodukowanego ditlenku węgla wynosiła od 8,8 do 11,7 mg CO₂/g s.m. (rys. 1, 2). W serii B, przy 10-krotnie większej masie próbki, zapotrzebowanie na tlen mieściło się w zakresie od 11,04 do 15,87 mg O₂/g s.m., podczas gdy produkcja ditlenku węgla wynosiła od 19,03 do 25,8 mg CO₂/g s.m. (rys. 3, 4). Skumulowana ilość monitorowanych gazów zmieniała się stopniowo w trakcie procesu, zmiany te były bardziej dynamiczne w serii B niż w serii A. Biorozkład w serii B był bardziej skuteczny niż w serii A.

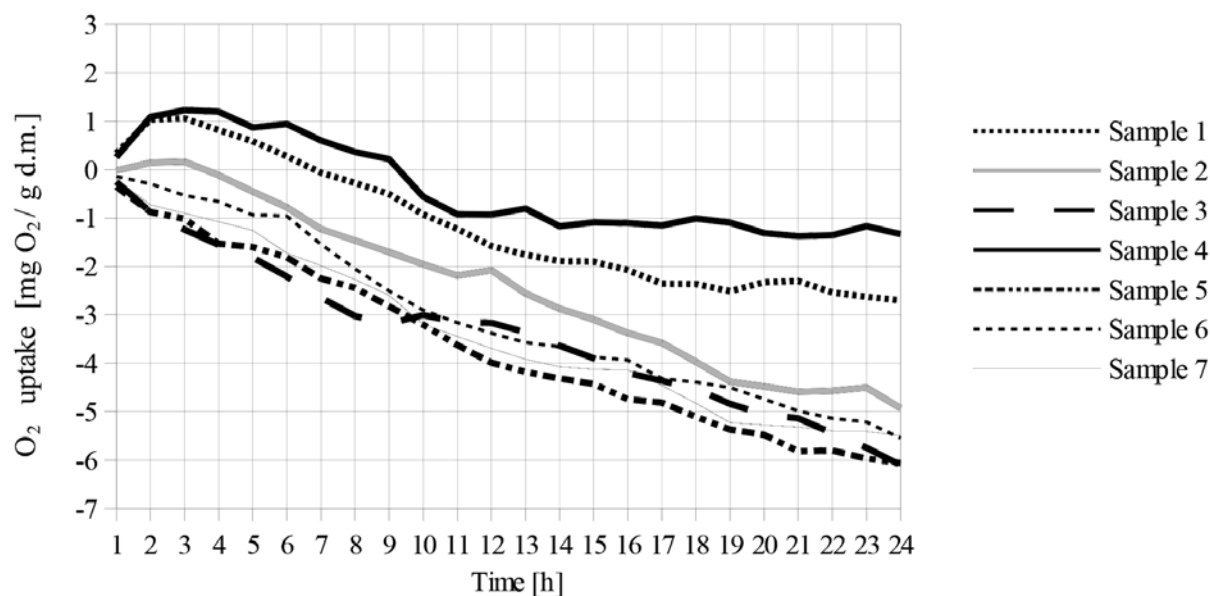


Fig. 1. Oxygen uptake during the biological biomass decomposition. The test results apply to series A
Rys. 1. Pobór tlenu podczas biologicznego rozkładu biomasy. Wyniki uzyskane w serii A

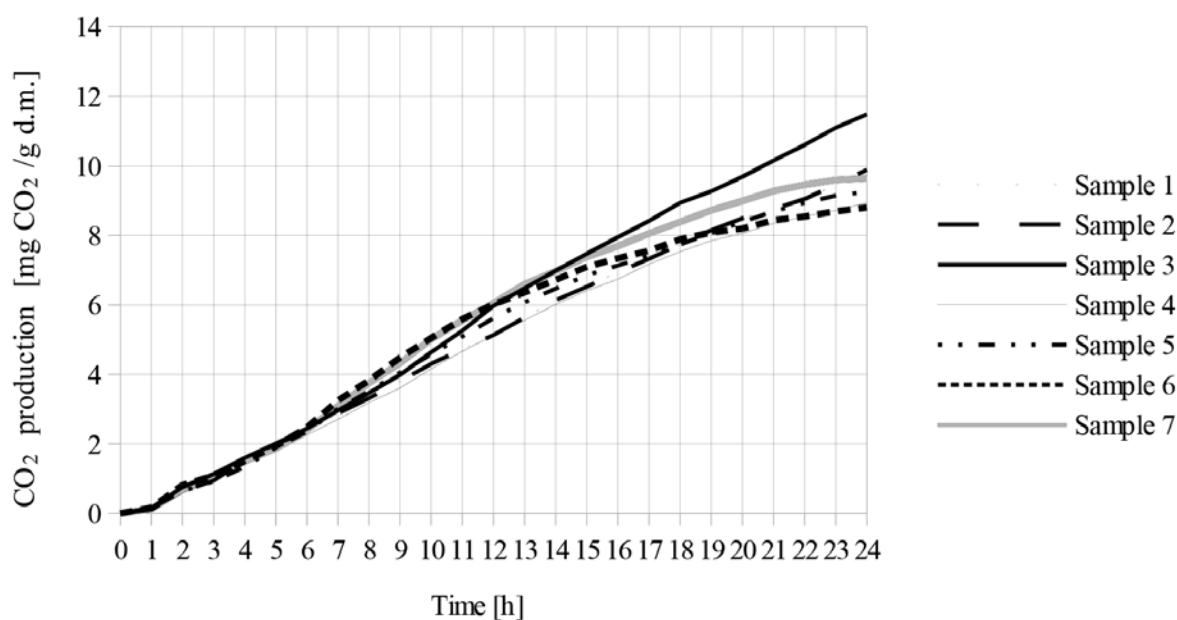


Fig. 2. Carbon dioxide production during the biological biomass decomposition. The test results apply to series A
Rys. 2. Produkcja ditlenku węgla podczas biologicznego rozkładu biomasy. Wyniki uzyskane w serii A

Table 1 presents the oxygen uptake and the carbon dioxide produced of biomass decay in series A (mass sample = 8 g) and B (mass sample = 80 g) detected at 10 minute intervals over the whole 24 h cycle of detection procedure. The average O_2 uptake were 4.625 mg O_2 /g d.m. (series A) and 12.377 mg O_2 /g d.m. (series B). The average CO_2 production were 9.621 mg CO_2 /g d.m. (series A) and 21.115 mg CO_2 /g d.m. (series B). Thus, the larger mass sample

Tabela 1 przedstawia ilości pobranego tlenu i wyprodukowanego ditlenku węgla podczas rozkładu biomasy w serii A (masa próby = 8 g) i serii B (masa próby = 80 g), zarejestrowane w 10-minutowych interwałach w 24-godzinny cykl eksperymentalny. Średni pobór O_2 wynosił 4,625 mg O_2 /g s.m (seria A) i 12,377 mg O_2 /g s.m (seria B). Średnia produkcja CO_2 wyniosła 9,621 mg CO_2 /g s.m. (seria A) i 21,115 mg CO_2 /g s.m. (seria B). Zatem większa masa próby

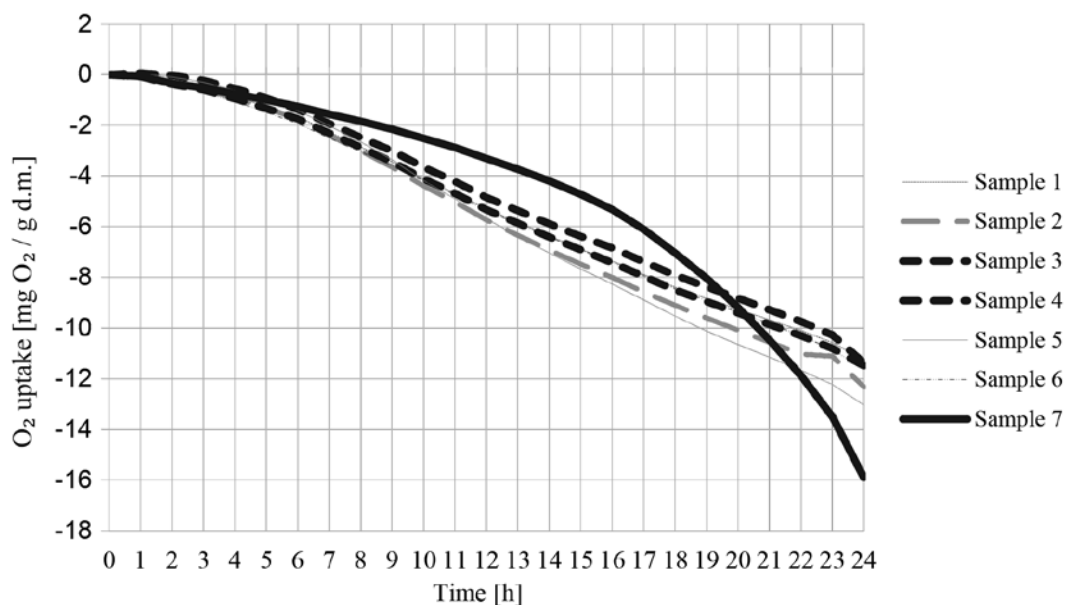


Fig. 3. Oxygen uptake during the biological biomass decomposition. The test results apply to series B
Rys. 3. Pobór tlenu podczas biologicznego rozkładu biomasy. Wyniki uzyskane w serii B

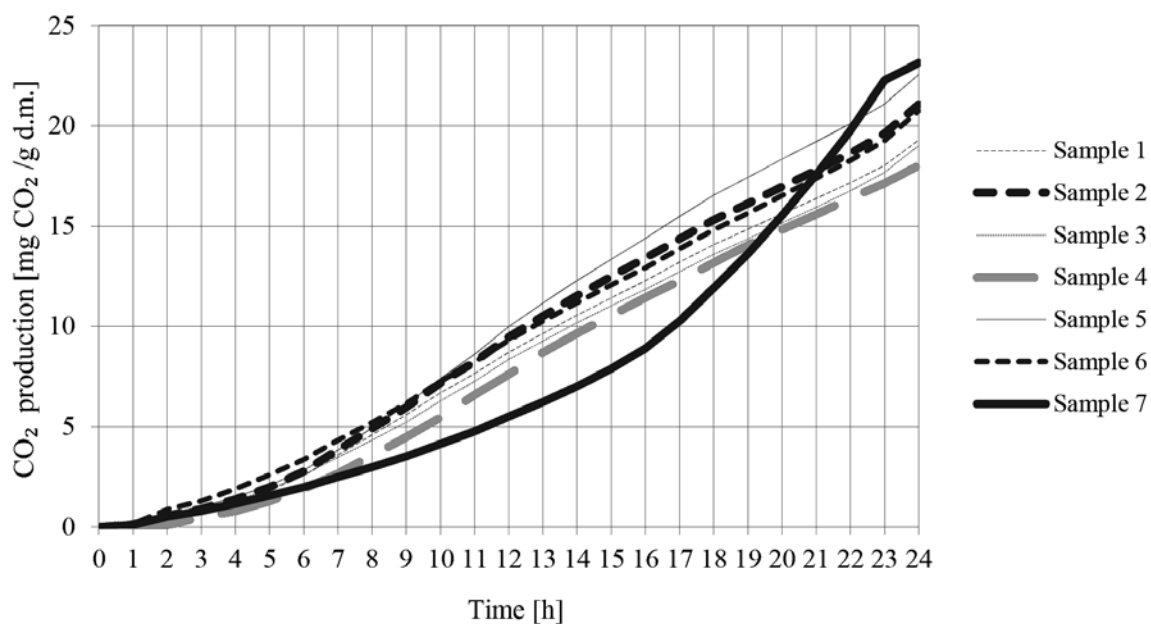


Fig. 4. Carbon dioxide production during the biological biomass decomposition. The test results apply to series B
Rys. 4. Produkcja dwutlenku węgla podczas biologicznego rozkładu biomasy. Wyniki uzyskane w serii B

resulted in increased microorganisms activity. Additional information supporting the property of mass selection of the sample was the level of moisture loss during whole time of the experiment. For B series of tests, the humidity after 24 hours was equal on average level 70%, and for the test series A of potato samples was about 65%. The results of the series A study (Table 1) are characterized by the large scattering of the values of the examined parameters, while in the

wpłynęła na zwiększenie aktywności biologicznej mikroorganizmów. Dodatkową informacją wspierającą właściwość doboru masy próby był poziom utraty wilgotności podczas eksperymentu. Średnia wilgotność ziemiaka po 24 godzinach dla prób w serii B wynosiła 70%, natomiast 65% dla prób w serii A. Wyniki badań serii A (tab. 1) charakteryzują się dużym rozproszeniem wartości badanych cech, w przeciwieństwie do serii B.

B series a much smaller dispersion of test results was observed.

Carried out tests showed that better, more reproducible and reliable results were obtained for a larger reactor filling, ie 80 g mass the sample. Similar results were obtained by the other researchers [25, 26].

Table 1 shows the calculated respiratory quotient RQ values. The RQ value in Table 1 was expressed not in mole ratio but in mass ratio. Assuming the ratio of CO₂ to O₂ in moles, that is equal to 1:1 it should be expressed in ratio of mass as 44/32, i.e. 1.37. The mean RQ value for the B series, considered to be correct was estimated at the level close to 1.7.

Based on the RQ values calculated for series A and series B, the comparison of the test series proves, that adjustment of mass in series B is a better variant. For this series, the RQ value characterizing the ratio of the carbon dioxide produced to the oxygen uptake had been more stable, which confirmed the realistic numbers resulting from the stoichiometry of the chemical reaction of the biomass decomposition.

Table 1. The cumulated amount of consumed and produced gases during the 24 h decomposition of biomass in series A and B

Tabela 1. Skumulowana ilość pobranych i wyprodukowanych gazów podczas 24 h rozkładu biomasy dla serii A i B

Parameter	Cumulated 24 h O ₂ uptake	Cumulated 24 h CO ₂ production	RQ = CO ₂ /O ₂	Cumulated 24 h O ₂ uptake	Cumulated 24 h CO ₂ production	RQ = CO ₂ /O ₂
Unit	[mg O ₂ /g d.m.]	[mg CO ₂ /g d.m.]	-	[mg O ₂ /g d.m.]	[mg CO ₂ /g d.m.]	-
Sample No	A series (mass sample = 8 g)			B series (mass sample = 80 g)		
1	2.660	8.815	3.31	11.264	19.303	1.71
2	4.975	10.011	2.01	12.324	21.067	1.70
3	6.222	11.726	1.89	11.037	19.034	1.72
4	1.464	8.926	6.10	11.490	19.324	1.68
5	6.128	9.360	1.53	13.044	22.560	1.72
6	5.411	8.847	1.63	11.615	20.752	1.78
7	5.512	9.659	1.75	15.866	25.769	1.62
A**	4.625	9.621	2.60	12.377	21.115	1.70
SD*	1.834	1.032	1.65	1.684	2.405	0.05

* - standard deviation calculated

** - average (mean) from 7 experiments

The observed differences in the results (Table 1) in series A and B due to the level of standard deviation for RQ was the basis for deciding on the further mathematical linear modeling process as was used by Scagalia et al. [27]. B series was chosen because the values RQ in this series definitely had been stabilized for subsequent trials. The standard deviation of the RQ in series B is equal to 0.05, which confirmed the

W przeprowadzonym eksperymencie wykazano, że lepsze, bardziej powtarzalne i wiarygodne wyniki uzyskano dla większej próby, tj. 80 g. Podobne wyniki uzyskano w pracach innych autorów [25, 26].

Tabela 1 pokazuje obliczone wartości współczynnika oddychania RQ. Parametr RQ w tabeli 1 wyrażono nie w stosunkach molowych, lecz w stosunkach masy. Zakładając stosunek CO₂ do O₂ w molach równy 1:1, w stosunkach masy należy go wyrazić jako 44/32, tj. 1,37. Średnia wartość RQ dla serii B, uważana za poprawną, została oszacowana na poziomie bliskim 1,7.

Wartości RQ obliczone dla serii A i serii B pokazały, że dobór masy w serii B jest lepszym wariantem. W przypadku tej serii wartość RQ była bardziej stabilna, a jej wartość potwierdzają realistyczne liczby wynikające ze stechiometrii reakcji chemicznej rozkładu biomasy.

Zaobserwowane różnice w wynikach poziomu odchylenia standardowego dla wskaźnika RQ w serii A i B (tab. 1) stanowiły podstawę do podjęcia decyzji o dalszym matematycznym procesie modelowania liniowego, jaki zastosowano również w pracy Scagalia i in. [27]. Wybrano serię B, ponieważ wartość RQ była bardziej stabilna w kolejnych próbach. W serii B odchylenie standardowe dla wartości RQ wynosi

repeatability of the experiment carried out on a larger mass sample. Calculated RQ data by t Student test were provided to determine the significance level p value (probability). The calculated p value level was 0.1, what means that the data varies with a probability of 10%. Thus, it means that differences obtained in RQ value are expressed by 90% probability and are not accidental. The linear models calculated for the curves presented in Figures 3, 4 are summarized in Table 2. The determination coefficients were close to value 1, which led to the conclusion, that calculated regression properly describes microorganisms activity.

0,05, co potwierdziło powtarzalność eksperymentu przeprowadzonego na próbce o większej masie. Dla wartości RQ przeprowadzono test t-Studenta w celu określenia poziomu istotności p. Obliczony poziom istotności p wynosił 0,1, co oznacza, że dane zmieniają się z prawdopodobieństwem 10%. Oznacza to, że różnice uzyskane w wartości RQ są wyrażone jako 90% prawdopodobieństwa i nie są przypadkowe. W tabeli 2 zestawiono modele liniowe obliczone dla krzywych przedstawionych na rysunkach 3, 4. Współczynniki determinacji R^2 były bliskie wartości 1, co prowadzi do wniosku, że obliczona regresja prawidłowo opisuje aktywność mikrobiologiczną.

Table 2. The linear models calculated for the O_2 uptake and the CO_2 production during the 24 h experiment: series B
Tabela 2. Modele liniowe obliczone dla ubytku O_2 i produkcji CO_2 podczas 24 h eksperymentu: seria B

Sample No	Linear models			
	Oxygen uptake		Carbon dioxide production	
	Model*	R^2	Model**	R^2
1	$y = -0.0618915627x + 0.4178445502$	0.9967	$y = 0.1065108553x - 1.0245556697$	0.9971
2	$y = -0.0678939102x + 0.5301950159$	0.9966	$y = 0.1158487162x - 1.1214361209$	0.9967
3	$y = -0.061476583x + 0.7752279713$	0.9977	$y = 0.1037481289x - 1.0410479912$	0.9974
4	$y = -0.062863037x + 0.4313468893$	0.9976	$y = 0.1062599888x - 1.0113427385$	0.9970
5	$y = -0.0744015909x + 1.0695395847$	0.9952	$y = 0.125669348x - 1.3930888695$	0.9954
6	$y = -0.0621111044x + 0.3062022247$	0.9989	$y = 0.1098672758x - 0.6107144596$	0.9989
7	$y = -0.0735851212x + 2.0505889164$	0.8980	$y = 0.1227962901x - 3.4645282055$	0.9063

R^2 - determination coefficient

* - regression models calculated for the data presented in Figure 3, where: x - is time, y - is oxygen uptake

** - regression models calculated for the data presented in Figure 4, where: x - is time, y - is carbon dioxide production

4. CONCLUSIONS.

The respiration experiment in a 2.5 L reactor chamber was made to observe the microorganism activity during potato biomass degradation under aerobic conditions. The O_2 uptake by the microorganisms and the CO_2 emitted were monitored. It was shown, that an important part of the experimental procedure is the correct adjustment of the mass sample put in the reactor chamber. For this reason, two independent series of tests were carried out in the course of the study using a differentiated mass sample characterized by tenfold difference: series A – using 8 g mass samples and batch B – using 80 g mass samples. The appropriate amount of biomass was determined by calculating RQ value in the repeated respirometric measurements. It was shown that the microbial activity of the A-Series was disturbed due

4. WNIOSKI

Przeprowadzony eksperyment respirometryczny w reaktorze o objętości 2,5 dm³ miał na celu obserwację aktywności mikroorganizmów w czasie degradacji biomasy w warunkach tlenowych. Rejestrowano pobór O_2 przez mikroorganizmy oraz produkcję CO_2 . Wykazano, że ważnym elementem eksperymentu jest dobór optymalnej masy próby badawczej stanowiącej wsad do reaktora. W tym celu przeprowadzono dwie niezależne serie testów, stosując zróżnicowane masy prób, charakteryzujące się dziesięciokrotną różnicą: seria A – z użyciem prób o masie 8 g oraz seria B – z użyciem prób o masie 80 g. Ustalenie korzystniejszej ilości biomasy w eksperymencie polegało na obliczeniu stosunku ilości wyprodukowanego ditlenku węgla do ilości poboru tlenu w powtarzanych pomiarach respi-

to the excessive drying (a too low mass in the testing chamber). In this way it was established, that a better variant in carried out experiment is variant B with the testing of 80 mg mass samples.

Linear modelling was used to calculate the equations describing the changes in the gas composition in the testing chamber in the time under biomass decomposition. Fourteen linear equations were obtained basing on the experimental results in series B. The accuracy of the mathematical linear models to the experimental data were checked by the determination coefficient R^2 . The obtained results of R^2 were > 0.99 in twelve equations, indicating a very high fitting of the linear models to the experiment data for series B. Two results of R^2 were about 0.9 which also confirms the usefulness of the linear modeling in the short time experiment for the purpose the assessing microbial activity.

rometrycznych. Wykazano, że aktywność mikrobiologiczna serii A została zakłócona z powodu nadmiernego wysuszenia (zbyt mała masa próby w komorze testowej). W ten sposób ustalono, że lepszym wariantem w badaniach biologicznego rozkładu biomasy jest wariant B, gdzie masa próby wynosiła 80 g.

Do opisanía zmian składu gazu w komorze badawczej w czasie rozkładu biomasy zastosowano modelowanie liniowe. Na podstawie wyników eksperymentalnych w serii B uzyskano czternaście równań liniowych. Dopasowanie matematycznych modeli liniowych do danych eksperymentalnych sprawdzono za pomocą współczynnika determinacji R^2 . Otrzymane wyniki R^2 wynosiły $> 0,99$ w dwunastu równaniach, co wskazuje na bardzo wysokie dopasowanie modeli liniowych do danych eksperymentalnych dla serii B. Pozostałe dwa wyniki R^2 wynosiły około 0,9, co również potwierdza użyteczność modelowania liniowego w krótkookresowym eksperymencie oceny aktywności mikrobiologicznej drobnoustrojów.

REFERENCES

- [1] Haug R.T.: *Composting Process Design Criteria, Part I — Feed Conditioning*, Biocycle, 1986, 27 (7), 36-43.
- [2] Żygadło M.: *Principles of solid waste treatment and management*, Kielce University of Technology, Kielce 2013.
- [3] Tom A.P., Haridas A., Pawels R.: *Biodrying Process Efficiency:-Significance of Reactor Matrix Height*, Procedia Technology, 2016, 25, pp. 130-137.
- [4] Francou C., Linères M., Derenne S., Le Villio-Poitrenaud M., & Houot S.: *Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting*, Bioresource Technology, 2008, 99 (18), 8926-8934.
- [5] Bernal M.P., Sanchez-Monedero M.A., Paredes C., Roig A.: *Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil*, Agriculture, Ecosystems and Environment, 69, 1998, pp. 175-189.
- [6] He P.J., Lü F., Shao L.M., Lee D.J.: *Oxygen limitation in static respiration activity index test*, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2006, 81 (7), 1177-1184.
- [7] Dębicka M., Żygadło M., Latosińska J.: *The effectiveness of biodrying waste treatment in full scale reactor*, Open Chemistry, 2017, 15(1), pp. 67-74.
- [8] Binner E., Zach A.: *Biological reactivity of residual wastes and dependence on the duration of pretreatment*, Waste Management and Research, 1999, 17(6), pp. 543-555.
- [9] Scaglia B., Acutis M., Adani F.: *Precision determination for the dynamic respirometric index (DRI) method used for biological stability evaluation on municipal solid waste and derived products*, Waste management, 2011, 31(1), pp. 2-9.
- [10] Sidelko R., Siebielska I., Szymański K., Skubała, A., Kołacz N.: *Ocena stabilności kompostu w czasie rzeczywistym*, Inżynieria i Ochrona Środowiska, 2014, 17, pp. 221-230.
- [11] Kulcu R., Yaldiz O.: *Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes*, Bioresource Technology, 2004, 93(1), pp. 49-57.
- [12] Jain M.S., Jambhulkar R., Kalamdhad A.S.: *Biochar amendment for batch composting of nitrogen rich organic waste: Effect on degradation kinetics, composting physics and nutritional properties*, Bioresource Technology, 2018, 253, pp. 204-213.
- [13] Gea T., Barrena R., Artola A., Sánchez A.: *Monitoring the biological activity of the composting process: oxygen uptake rate (OUR), respirometric index (RI), and respiratory quotient (RQ)*, Biotechnology and Bioengineering, 2004, 88 (4), pp. 520-527.
- [14] Wagland S.T., Tyrrel S.F., Godley A.R., Smith R.: *Test methods to aid in the evaluation of the diversion of biodegradable municipal waste (BMW) from landfill*, Waste Management, 2009, 29(3), pp. 1218-1226.

- [15] Evangelou A., Gerassimidou S., Mavrakis N., Komilis D.: *Monitoring the performances of a real scale municipal solid waste composting and a biodrying facility using respiration activity indices*, Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(5), 302.
- [16] Barrena R., d'Imporzano G., Ponsá S., Gea T., Artola A., Vázquez F., ... Adani F.: *In search of a reliable technique for the determination of the biological stability of the organic matter in the mechanical-biological treated waste*, Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(2-3), pp. 1065-1072.
- [17] Gomez R.B., Lima F.V., Bolasell M. A.G., Gea T., Ferrer A.S.: *Respirometric assays at fixed and process temperatures to monitor composting process*, Bioresource Technology, 2005, 96 (10), pp. 1153-1159.
- [18] Adani F., Ubbiali C., Tambone F., Scaglia B., Centemero M., Genevini P.: *Static and dynamic respirometric indicates-Italian research and studies*. In: Biological Treatment of Biodegradable Waste-technical aspects. Brussels: The Environment DG and the Joint Research Centre of the European Commission, 2002.
- [19] Cossu R., Raga R.: *Test methods for assessing the biological stability of biodegradable waste*, Waste Management, 2008, 28 (2), pp. 381-388.
- [20] Genc N.: *Evaluation by Respiration Measurements (OTR, CTR and RQ) of the Biological Activity in Sludge Digestors Operated Under Microaerobic Conditions*, Chemical and biochemical engineering quarterly, 2007, 21 (2), pp. 163-168.
- [21] Gómez R.B., Lima F.V., Ferrer A.S.: *The use of respiration indices in the composting process: a review*, Waste Management & Research, 2006, 24 (1), pp. 37-47.
- [22] PN- EN 15590:2011. Solid recovered fuels, Determination of potential rate of microbial self heating using the real dynamic respiration index.
- [23] PN- EN 14774-3:2010. Solid biofuels, Determination of moisture content – Oven dry method, Part 3: Moisture in general analysis.
- [24] PN- EN 15169:2007. Characterization of waste, Determination of loss on ignition in waste, sludge and sediments.
- [25] Di Maria F., Micale C.: *What is the acceptable margin of error for the oxygen uptake method in evaluating the reactivity of organic waste?*, „Waste Management”, 2014, 34 (8), pp. 1356-1361.
- [26] Adani F., Badio D., Calcaterra E., Genevini P.: *The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste*, Bioresource Technology, 2002, 83, pp. 173-179.
- [27] Scaglia B., Erriquens F.G., Gigliotti G., Taccari M., Ciani M., Genevini P.L., Adani F.: *Precision determination for the specific oxygen uptake rate (SOUR) method used for biological stability evaluation of compost and biostabilized products*, Bioresource Technology, 2007, 98(3), pp. 706-713.

Acknowledgments:

The work was financed by Kielce University of Technology, part of the statutory work No. 05.0.09.00/2.01.01.01.0004 MNSP.IKIO.14.001

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Świętokrzyską, w ramach pracy statutowej nr: 05.0.09.00/2.01.01.01.0004 MNSP.IKIO.14.001

PETER ĎURČANSKÝ
RADOVAN NOSEK
University of Žilina, Slovakia
e-mail: radovan.nosek@fstroj.uniza.sk

Manuscript submitted 2018.10.17 – revised 2018.10.25,
initially accepted for publication 2018.10.29, published in December 2018

MODELLING AND APPLICATION OF STIRLING ENGINE WITH RENEWABLE SOURCES IN ELECTRICITY PRODUCTION

MODELOWANIE I ZASTOSOWANIE SILNIKA STIRLINGA NAPĘDZANEGO ODNAWIALNYMI ŹRÓDŁAMI ENERGII DO PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

DOI: 10.30540/sae-2018-035

Abstract

The rapid development of humanity and the backward technologies lead to an increasing need for energy. In the last few decades, studies have been published that rising energy consumption has a negative impact on the environment, resulting in an increasing trend in the use of renewable energy sources. Nowadays, there are a number of systems that use the energy of water, wind, sun, and earth heat, different solutions for increasing energy production are investigated in the world. One of the ways is utilization of renewable energy sources in cogeneration devices - combined production of electricity and heat in one device, with a high overall efficiency. The article deals with principle of hot-air engine, its basic calculation and use in combined production of heat and electricity from biomass.

Keywords: Stirling engine, internal combustion engine, biomass, boiler, concentrating solar collector

Streszczenie

Szybki rozwój ludzkości i technologii prowadzi do wzrostu zapotrzebowania na energię. Na przestrzeni ostatnich kilku dekad opublikowano prace wskazujące, że wzrost konsumpcji energii ma negatywny wpływ na środowisko, co prowadzi do wzrostu zainteresowania odnawialnymi źródłami energii. Obecnie wiele układów wykorzystuje energię wody, wiatru, słońca i ziemi, a różne rozwiązania zwiększające produkcję energii są przedmiotem badań na świecie. Jednym ze sposobów wykorzystania odnawialnych źródeł energii są układy kogeneracyjne – skojarzona produkcja ciepła i energii elektrycznej w jednym urządzeniu o zwiększonej sprawności całkowitej. Artykuł przedstawia zasadę działania silnika na ciepłe powietrze, podstawowe zasady obliczeń i wykorzystanie w skojarzonej produkcji energii cieplnej i elektrycznej z biomasy.

Słowa kluczowe: silnik Stirlinga, biomasa, kocioł, koncentryczny kolektor słoneczny

1. INTRODUCTION

There are a number of systems that use the energy of water, wind, sun, and earth heat. As the most used form is the electricity produced in the hot air engines, the forgotten Stirling engine with external combustion comes to the foreground. Despite the fact that its original form can be dated back to 1816, the greatest advances in technology and understanding of Stirling cycle-based devices have occurred in the last

40 years. Although their serial production is currently limited to special purpose machines, its prospective use in combination with renewable sources suggests potential for commercial purposes.

Electricity and heat production efficiency is influenced not only by thermal efficiency, but with a number of other factors, from which the total efficiency is directly related. One of the ways, how to produce heat and electricity, is using non-

conventional devices with the application of renewable energy sources. Using renewable energy is supported worldwide and it also deals with environmental aspects of energetics. The main effort is to research the conditions of optimal performance and production technology for applications in renewable energy, to ensure the transfer of acquired knowledge into practice.

2. MICRO-COGENERATION UNITS WITH NONCONVENTIONAL MOTORS

The current types of thermal cycles for medium and low temperature gradients are technically and economically disadvantageous. Research priority is more efficient transformation of primary energy from renewable energy sources into electrical energy. The reason of this work is to show possibilities in low utilization of renewable energy sources and the absence of effective ways of transforming heat into electricity, thus efficient heat cycles in general. Currently there is no cost-effective energy system for converting heat of medium or low potential. Thermal cycle quality significantly affects the final energy conversion efficiency, it is currently at ORC (Organic Rankin Cycle) for example about 17%, which is about 35% compared to the efficiency in the conventional Rankine cycle and a 44% efficiency in a supercritical cycle in a large facility. (Creyx, 2012).

The theoretical thermodynamic cycle of Stirling engine varies considerably from real. This is due to imperfect isothermal conditions, heat leakage to the environment and other influences. For this reason, the efficiency of the ideal cycle is higher than the real cycle. They work on the principle of external combustion, so fuel combustion does not take place in the working cylinder. This allows, in contrast to conventional internal combustion engines, control the course of the combustion process, the related quality, which is reflected in the composition of pollutants released into the atmosphere. The air is compressed in the compressor, it passes through the heat exchanger under constant pressure and takes heat. Then the air expands adiabatically in the cylinder and makes a work. Some of this work is used to drive the compressor and the other part is converted to mechanical work with the help of the generator into electrical energy. On generating of heat energy may be used a wide range of fuel, because this is the external combustion engine and for this is very common the use of renewable sources. The fuel

is combusted in a separate combustion chamber, and thermal energy is transformed with the aid of the heat exchanger to the working fluid.

In Figure 1 we can see a diagram of unconventional micro-cogeneration units on base Ericsson-Brayton hot-air engine.

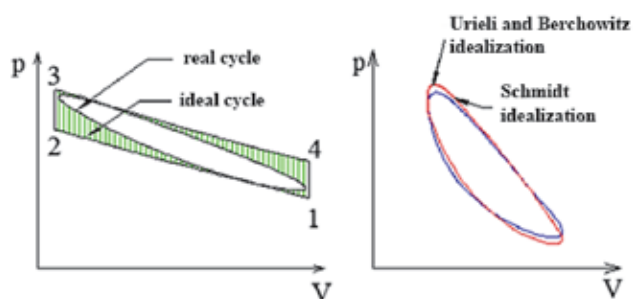


Fig. 1. Thermal cycle of unconventional Stirling engine

The thermal efficiency of the ideal Stirling cycle with the ideal regenerator is the same as the thermal efficiency of the Carnot cycle for the same inlet and outlet temperatures. For an ideal regenerator, the heat removed during points 4 to 1 is absorbed by this regenerator and transferred to the working medium within points 2 to 3. Stirling's circulation later generalized Reitlinger, which replaced the isotherms with polytropes. Significant clarification of the Stirling engine's analytical solution is the regenerative Rallis Circulation. It consists of two isotherms and two regenerative processes, which are carried out in part at constant pressure, in part at a constant volume. In the case of the expansion of gas compression in the working space of a heat engine, which are considered to be isotherms in the Stirling Circulation, they are in fact polytropes with an exponent approaching, in particular, the higher frequencies of the pistons of the motor of the exponent adiabatic engine. Rallis therefore replaced the isotherms with adiabatic changes in their final form. For the assessment of the potential electrical power of the cogeneration unit, a performance characteristic was constructed from the inlet temperature on the heater and the average working pressure of the medium in the engine. Theoretical electrical power can also be calculated for temperature differences of heater and cooler. However, in Figure 2 there are the temperatures and pressures that can be considered for real measurements. The assumed heat source temperature using a biomass boiler is least 500°C, with a power of 3360.45 W at a pressure of 90 bar.

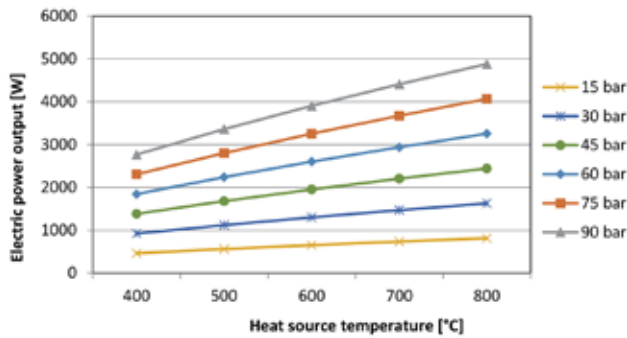


Fig. 2. Theoretical electrical power output

3. APPLICATION WITH STIRLING ENGINE

The proposed micro-cogeneration unit with Stirling engine consists of two heat sources, one serves as a cooler and the other as the heater. Both of them have different requirements for operation. One of such requirements is to ensure optimum heat transfer from the working medium. The heat transfer is characterized by a coefficient of heat transfer and it subsequently characterizes the disposition of heat exchanger. The coefficient depends on the medium, on the heat capacity, from the structural arrangement and in some cases is significantly affected by used material of exchanger. Additional requirements for the heat exchanger are the size, pressure loss and maintenance possibilities.

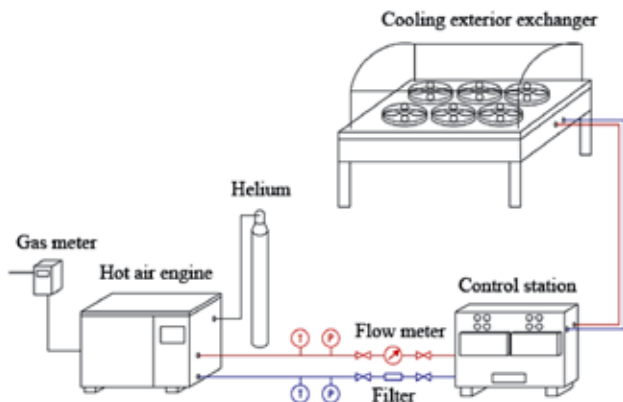


Fig. 3. Measurement setup

Measurement unit and calculation model were developed for Stirling hot air engine, which is part of the proposed cogeneration unit. Measurement setup was made according to Figure 3. Measurements were made at various settings of the engine's working pressure using natural gas as fuel. For further measurements, the engine was modified and its electrical performance was studied using biomass as a heat source.

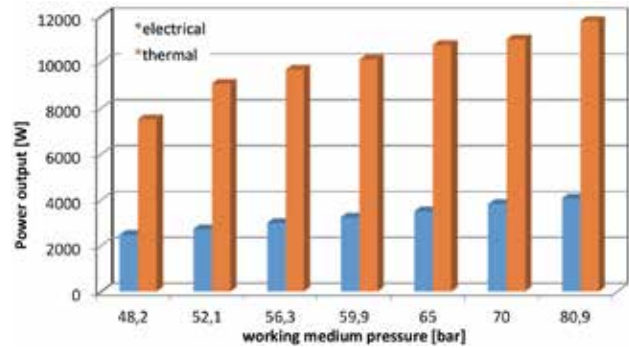


Fig. 4. Electrical and thermal power output

Measured quantities were the inlet and outlet temperatures from the heat exchanger that is part of the boiler. For their measurement, the sumps on the inlet and drainage ducts in which the sensors were placed were formed. The temperature measurement was carried out by PT100 resistors, flow through the YOKOGAWA magnetic flow meter and Ahlborn pressure gauges. Internal engine parameters such as radiator and heater temperature, combustion chamber and helium working pressure are recorded by the engine control panel. These values are recorded using the MODBUS technology on a computer. The cogeneration unit has been connected to an exchanger station which has overheated excess heat through an external 50 kW cooler. Figure 4 shows the outputs measured at the given working helium pressures. Increasing the working gas pressure in the engine, the equipment made it possible to increase the weight of the working gas at constant engine volume, thereby increasing the work done. An increase in pressure of approximately 5 bar results in an increase in electrical power by 250 W. The heat output increased steadily to a significant increase of 1550 watts, which was recorded at a pressure change from 48 to 52 bar. This increase is due to an increase in the temperature difference of the cooling water, which was not stabilized in the initial measurement.

4. NUMERICAL MODEL

Schmidt's analysis of the ideal Stirling engine model, where compression and expansion spaces maintained at the respective cooler and heater temperatures led to a paradoxical situation that neither the heater nor the cooler produced any net heat transfer during the cycle and was therefore superfluous. All the required heat transfer was performed across the isothermal workspace boundaries. This, of course, is not correct because the cylinder walls are not intended for heat transfer. In real machines, the workspaces are rather

adiabatic than isothermal, meaning that the net heat transferred during the cycle must be provided by heat exchangers. Therefore, we introduce an alternative adiabatic model for Stirling cycles. This model is based on the proposal (Urieli, 1984). According to the model, the engine is theoretically divided into five distinct control volumes: expansion chamber, heater, cooler, regenerator and compression space. The model is based on the fundamental equations of mass and energy equilibrium, with the status equation being applied to each control volume.

$$\frac{dQ}{d\varphi} + c_{pi}T_i\dot{m}_i - c_{po}T_o\dot{m}_o = \frac{dW}{d\varphi} + c_v \frac{d(mT)}{d\varphi} \quad (1)$$

$$M = \int_0^{2\pi} \frac{p}{r} \left(\frac{V_c}{T_k} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_h} \right) d\varphi \quad (2)$$

Given the non-linear nature of equations and conditioned temperatures, we come to the numerical solution of specific configurations and operating conditions. The specific arrangement and geometry of the engine defines the volumes V_c , V_k , dV_c and dV_k as analytical functions of the crank with the angle of rotation φ and the geometry of the heat exchangers defines the control volumes V_k , V_r , V_h . Parameters r , c_p , c_v and κ specify the type of working gas, in our case helium. The temperatures T_k and T_h , of which the average effective temperature T_r is determined, are determined by the operating conditions and thus depend on the heat and cold source. All of these parameters are known to the total weight of the working gas M . The procedure consists in specifying the average operating pressure and using the Schmidt analysis to evaluate M . Although the ideal adiabatic model is independent of the operating frequency to evaluate performance and other time - Effects as a heat loss through a conductor in the regenerator must be defined. The system is

designed as a quasi-static stream, i.e. mass flows m_{ck} , m_{kr} , m_r and m_{he} are constant for each integration interval. A chart was constructed to compare the measured power values with the values obtained using the calculation model (Fig. 5). We can observe that the model performance values differ slightly from those measured, while the largest recorded deviation of 425 W is at a working pressure of 80.9 bar.

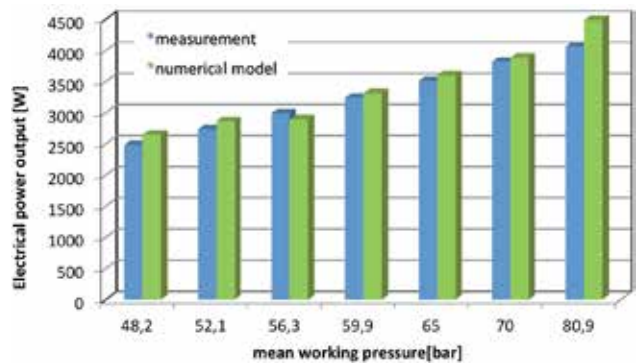


Fig. 5. Measurement setup

5. CONCLUSION

The issue of this project is consistent with the long-term aim of the Slovak Republic in the field of science and research of energetics. The necessity of development and optimization of advanced thermal cycles, particularly suitable for medium and low temperature used in renewable energy sources is very topical. Research in this area has to resolve the questions, how to decrease import of primary fuels (oil, gas) and with what equipment to produce electrical energy by using of RES. The strategic aim is by realization of the project is through transferring of the latest results to the practice from new ways of transformation of thermal energy into other forms of energy, particularly electricity and new technologies of production, respectively practical design solutions for applications of alternative energy sources.

REFERENCES

- [1] Crey M.: *Energetic optimization of the performances of a hot air engine for micro-CHP systems working with a Joule or an Ericsson cycle*, Elsevier, France, 2012.
- [2] Kalčík J., Sýkora K.: *Technická termodynamika*, Praha: Academia Praha, 1973, pp. 301-318.
- [3] Patsch M., Čierny J., Jandačka J., Malcho M.: *Mikrokogenerácia založená na technológii palivového článku*, Slovgas: odborný plynárenský časopis. 23 (2) (2014), pp. 18-22.
- [4] Urieli I., Berchowitz D.M.: *Stirling cycle engine analysis*. Bristol: Hilger, 1984.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Agency for EU Structural Funds for the financial support of the project "Research on new ways of converting heat from renewable energy sources into electrical energy by using new advanced cycles" (Výskum nových spôsobov premeny tepla z OZE na elektrickú energiu využitím nových progresívnych cyklov), ITMS 26220220117.

MICHAŁ BAKALARZ
PAWEŁ KOSSAKOWSKI

LOAD-BEARING CAPACITY OF SOLID TIMBER BEAMS WITH SMALL CROSS SECTION HEIGHT STRENGTHENED WITH COMPOSITE SHEETS

NOŚNOŚĆ NA ZGINANIE LITYCH BELEK O NISKIM PRZEKROJU POPRZECZNYM WZMOCNIONYCH MATAMI KOMPOZYTOWYMI

Structure and Environment No. 4/2018, vol. 10, p. 301

DOI: 10.30540/sae-2018-029

Abstract

The paper presents the results of experimental tests focused on strengthening a solid pine beams with lightweight plastics. Glass fiber reinforced sheets S&P G-Sheet E 90/10 B and carbon fiber reinforced sheets S&P C-Sheet 240 applied to the soffit of the element were used as a reinforcement. The four point bending strength test were carried out on the laboratory scale elements. Test results indicated a significant increase in ductile behavior as well as increase in load bearing capacity of beams.

Streszczenie

W pracy przedstawione zostały wyniki próby wzmocnienia litych belek sosnowych wykorzystując lekkie tworzywa sztuczne. Zbrojenie stanowiły maty zbrojonej włóknem szklanym S&P G-Sheet E 90/10 B oraz maty z włóknem węglowym S&P C-Sheet 240 przyklejone do podbitki elementów. Próby te przeprowadzone zostały na elementach w skali laboratoryjnej poddanych czteropunktowemu zginaniu. Wyniki badań wskazały na istotny wzrost ciągliwości elementów oraz przyrost wytrzymałości na zginanie.

JERZY HOŁA
LEONARD RUNKIEWICZ

METHODS AND DIAGNOSTIC TECHNIQUES USED TO ANALYSE THE TECHNICAL STATE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

METODY I TECHNIKI DIAGNOSTYCZNE STOSOWANE W OCENIE STANU TECHNICZNEGO KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH

Structure and Environment No. 4/2018, vol. 10, p. 309

DOI: 10.30540/sae-2018-030

Abstract

The paper presents the problems concerning the principles of developing expertise and performing tests on reinforced concrete structures. The situations that justify the need to provide expertise, the subject of which are constructions made of reinforced concrete, are described. A layout of the content of expertise that is usually adopted in practice has been included and commented on. The basic principles that should be followed when diagnosing the structures in question are provided. The available diagnostic methods and techniques, including non-destructive and semi non-destructive ones, are reviewed. This review is enriched with classifications that facilitate the selection of specific methods for individual diagnostic needs. In addition, useful literature with regards to the discussed topic has been indicated.

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę dotyczącą zasad wykonywania ekspertyz i badań konstrukcji żelbetowych. Przybliżono sytuacje uzasadniające potrzebę sporządzania ekspertyz, których przedmiotem są konstrukcje wykonane z betonu zbrojonego. Zamieszczono i skomentowano, przyjmowany zazwyczaj w praktyce układ treści ekspertyzy. Podano podstawowe zasady, których należy przestrzegać podczas diagnozowania przedmiotowych konstrukcji. Dokonano przeglądu dostępnych metod i technik diagnostycznych, w tym nieniszczących i seminieniszczących. Przegląd ten wzbogacono klasyfikacjami ułatwiającymi doboru odpowiednich metod do konkretnych potrzeb diagnostycznych. Ponadto wskazano przydatną w rozpatrywanym temacie literaturę.

**THE EFFECT OF AN ORGANOMETALLIC CATALYST
ON THE PROPERTIES OF PEN GRADE BITUMENS**

**WPŁYW KATALIZATORA METALOORGANICZNEGO
NA WŁAŚCIWOŚCI ASFALTÓW DROGOWYCH**

Structure and Environment No. 4/2018, vol. 10, p. 338

DOI: 10.30540/sae-2018-031

Abstract

The research objective of the experiments and analyses described in this paper was evaluation of the effect of a specific organometallic catalyst on the properties of 50/70 and 70/100 pen (paving) grade bitumens. The catalyst under analysis is anhydrous iron (III) chloride. It was added to the bitumens at the percentages of 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2%. The research included determination of penetration at 25°C, ring and ball softening point test and Fraass breaking point test. The tests were carried out at three states of the tested binder: non-aged, after short-term ageing (RTFOT procedure) and after long-term ageing (PAV procedure). Additionally, viscosity was determined before and after RTFOT ageing. The experimental data were used to determine the penetration index (PI) value and the plasticity range of bitumens. An increase of the bitumen hardness was observed due to organometallic catalyst addition, particularly noticeable after long-term ageing. The catalyst was found to reduce the viscosity of bitumens in the production temperature range

Streszczenie

Przedmiotem badań i analiz omówionych w artykule jest ocena wpływu katalizatora metaloorganicznego na właściwości asfaltu drogowego 50/70 i 70/100. Funkcję katalizatora metaloorganicznego pełnił bezwodny chlorek żelaza (III). Dozowano go w ilości 0,5%, 1,0%, 1,5% oraz 2%. Zakres badań obejmował: penetrację w 25°C, temperaturę mięknięcia wg metody „Pierścień i Kula” oraz temperaturę łamliwości wg Fraassa. Badania wykonano dla trzech stanów lepiszcza: przed starzeniem, po starzeniu krótkoterminowym wg RTFOT oraz po starzeniu długoterminowym wg PAV. Dodatkowo wykonano oznaczenie lepkości przed starzeniem i po starzeniu wg RTFOT. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono wartość indeksu penetracji I_p oraz temperaturowy zakres plastyczności TZP. Katalizator metaloorganiczny wpłynął na zwiększenie twardości lepiszcza, szczególnie po starzeniu długotrwałym. Zaobserwowano spadek lepkości asfaltu z udziałem katalizatora w zakresie temperatur technologicznych.

PAWEŁ JĘDRZEJOWSKI
JOLANTA LATOSIŃSKA,
PAULINA MASTERNAK
PIOTR MICHNO

COMPARISON OF ENERGY EFFICIENCY OF THE MUNICIPAL WASTE TREATMENT PLANT IN KRAKOW AND BIALYSTOK

PORÓWNANIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ INSTALACJI TERMICZNEGO PRZETWARZANIA ODPADÓW KOMUNALNYCH W KRAKOWIE I BIAŁYMSTOKU

Structure and Environment No. 4/2018, vol. 10, p. 357

DOI: 10.30540/sae-2018-032

Abstract

Thermal treatment of municipal waste is a method that has been rediscovered in Poland in recent years. National installations for thermal treatment of municipal waste launched in recent years draw on the experience of plants around the world and they use repeatedly proven technologies. Poland, within the framework of EU commitments, must reduce the amount of biodegradable waste going to landfills to 35% by weight of the total municipal waste by July 16, 2020. Other biodegradable waste that can not be recycled should be subjected to biological or thermal decomposition. The purpose of this publication is to determine the efficiency of Polish installations for the thermal treatment of municipal waste, by comparing the energy efficiency ratio of installations in Kraków and Białystok. These are two of the six installations of thermal waste treatment, which were created in 2015 – 2016. The Krakow incineration plant is the largest, and the Białystok one of the smallest.

Streszczenie

Termiczne przekształcanie odpadów komunalnych to metoda w Polsce na nowo odkryta w ostatnich latach. Krajowe instalacje termicznego przetwarzania odpadów komunalnych uruchamiane w ostatnich latach czerpią z doświadczeń zakładów na całym świecie i stosują wielokrotnie sprawdzone technologie. Polska, w ramach zobowiązań unijnych do 16 lipca 2020 roku musi ograniczyć ilość odpadów biodegradowalnych trafiających na składowiska do 35% wagowo całkowitej masy odpadów komunalnych. Pozostałe odpady biodegradowalne, których nie można poddać recyklingowi powinny być poddane rozkładowi biologicznemu lub termicznemu. Celem niniejszej publikacji jest określenie efektywności polskich instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych, poprzez porównanie współczynnika efektywności energetycznej instalacji w Krakowie oraz Białymstoku. Są to dwie z sześciu instalacji termicznego przekształcania odpadów, które powstały w latach 2015 – 2016. Krakowska spalarnia jest największą, a białostocka jedną z najmniejszych.

IMPROVING OF BOILER EFFICIENCY BY CONTROLLING THE HARMFUL SUBSTANCES CONCENTRATION IN THE COMBUSTION PRODUCTS

POPRAWA SPRAWNOŚCI KOTŁA POPRZEC STEROWANIE STĘŻENIEM SZKODLIWYCH SUBSTANCJI W PRODUKTACH SPALANIA

Structure and Environment No. 4/2018, vol. 10, p. 367

DOI: 10.30540/sae-2018-033

Abstract

Chemical carbon level control is considered to be one of the simplest, cheapest and the most effective methods of optimizing fuel combustion. Standardized balance boiler's tests show that maximum efficiency can be mentioned with highly noticeable chemical underburn responding to concentration of carbon monoxide 0.02 – 0.03% vol. (200–300ppm). In addition, nitrogen oxide, which originates in maximum temperature (with lack of underburn), is 35 times more toxic than carbon monoxide. It can be supposed that defining the permissible level of chemical underburn is a typical optimizing issue due to minimize the destination function. To simplify and unify the issue, ecological and economical fuel combustion criteria were proposed as well as general energy–ecology criterion, which is simultaneously the searched destination function. Results of such research on boilers have shown that optimum combustion operation takes place within carbon monoxide concentration of 234–379 mg/m³, oxygen 4.11–4.24% vol. and air pressure 80–81 daPa.

Streszczenie

Sterowanie poziomem niedopału chemicznego uważa się za jedną z najprostszych, najtańszych i wysokoefektywnych metod optymalizacji spalania paliwa. Standardowe bilansowe próby kotła pokazują, że maksymalną jego sprawność notuje się przy wielce zauważalnym niedopale chemicznym odpowiadającym stężeniu CO na poziomie 0,02-0,03% obj. (200-300 ppm). Ponadto tlenki azotu, które powstają w maksymalnej temperaturze, czyli przy braku niedopału są substancjami około 35 razy bardziej toksycznymi niż tlenek węgla. Z tego wynika, że wyznaczenie dopuszczalnego poziomu niedopału chemicznego stanowi typowe zagadnienie optymalizacyjne, mające na celu zminimalizowanie pewnej funkcji docelowej. Dla ujednolicenia tego problemu zostało zaproponowane ekologiczne i ekonomiczne kryterium spalania paliwa, jak również uogólnione kryterium energetyczno-ekologiczne będące poszukiwaną funkcją docelową. Jak pokazały wyniki takich badań na kotłach, optymalny tryb spalania znajduje się w zakresie stężenia tlenu węgla w granicach 234-379 mg/m³, tlenu 4,11–4,24% obj. i ciśnienia powietrza 80–81 daPa.

MARLENA DĘBICKA
MARIA ŻYGADŁO

ANALYSIS OF RESPIRATORY QUOTIENT RQ IN PROCESS OF BIOMASS DECOMPOSITION IN THE LAB TECHNIQS

ANALIZA WSPÓŁCZYNNIKA ODDECHOWEGO RQ W PROCESIE ROZKŁADU BIOMASY TECHNIKĄ LABORATORYJNĄ

Structure and Environment No. 4/2018, vol. 10, p. 376

DOI: 10.30540/sae-2018-034

Abstract

Biomass biodegradation under aerobic condition was investigated. The source of the biomass was potato samples. The oxygen consumption and carbon dioxide rates were monitored over 24 hours, using a 2.5 L Oxymax ER-10 respirometric chamber. The chamber with a representative sample of biomass was continuously aerated and the changes in the gas concentrations were recorded (oxygen and carbon dioxide). The oxygen uptake is directly linked to the biological activity of the microorganisms and the organic matter biodegradation. Microorganisms consume oxygen in order to decay the easy-biodegradable substrate. The biomass degradation progress under the bio-chemical process under oxidization conditions was described mathematically by linear regression. The fitting of calculated curves were checked by determination coefficient R^2 .

Streszczenie

Przedmiotem badań była respirometryczna metoda charakteryzowania biodegradacji biomasy w warunkach tlenowych. Źródłem biomasy były próby ziemniaków. Zapotrzebowanie na tlen i produkcję dwutlenku węgla monitorowano przez 24 godziny w komorze respirometrycznej o pojemności 2,5 dm³ aparatu Oxymax ER-10. Komorę testową z reprezentatywną próbką biomasy napowietrzano w sposób ciągły i rejestrowano zmiany stężenia gazów (tlen i dwutlenek węgla). Pobór tlenu jest bezpośrednio związany z biologiczną aktywnością mikroorganizmów i biodegradacją materii organicznej. Mikroorganizmy zużywają tlen w celu rozkładu łatwo biodegradowalnego substratu. Postęp degradacji biomasy w procesie biochemicznym w warunkach tlenowych opisano matematycznie metodą regresji liniowej. Dopasowanie obliczonych krzywych sprawdzono za pomocą współczynnika determinacji R^2 .

MODELLING AND APPLICATION OF STIRLING ENGINE WITH RENEWABLE SOURCES IN ELECTRICITY PRODUCTION

MODELOWANIE I ZASTOSOWANIE SILNIKA STIRLINGA NAPĘDZANEGO ODNAWIALNYMI ŹRÓDŁAMI ENERGII DO PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Structure and Environment No. 4/2018, vol. 10, p. 386

DOI: 10.30540/sae-2018-035

Abstract

The rapid development of humanity and the backward technologies lead to an increasing need for energy. In the last few decades, studies have been published that rising energy consumption has a negative impact on the environment, resulting in an increasing trend in the use of renewable energy sources. Nowadays, there are a number of systems that use the energy of water, wind, sun, and earth heat, different solutions for increasing energy production are investigated in the world. One of the ways is utilization of renewable energy sources in cogeneration devices – combined production of electricity and heat in one device, with a high overall efficiency. The article deals with principle of hot-air engine, its basic calculation and use in combined production of heat and electricity from biomass.

Streszczenie

Szybki rozwój ludzkości i technologii prowadzi do wzrostu zapotrzebowania na energię. Na przestrzeni ostatnich kilku dekad opublikowano prace wskazujące, że wzrost konsumpcji energii ma negatywny wpływ na środowisko, co prowadzi do wzrostu zainteresowania odnawialnymi źródłami energii. Obecnie wiele układów wykorzystuje energię wody, wiatru, słońca i ziemi, a różne rozwiązania zwiększające produkcję energii są przedmiotem badań na świecie. Jednym ze sposobów wykorzystania odnawialnych źródeł energii są układy kogeneracyjne – skojarzona produkcja ciepła i energii elektrycznej w jednym urządzeniu o zwiększonej sprawności całkowitej. Artykuł przedstawia zasadę działania silnika na ciepłe powietrze, podstawowe zasady obliczeń i wykorzystanie w skojarzonej produkcji energii cieplnej i elektrycznej z biomasy.

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