



**CIVIL AND  
ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING**

**BUDOWNICTWO  
I INŻYNIERIA  
ŚRODOWISKA**





POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

CIVIL AND  
ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

BIAŁYSTOK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

BUDOWNICTWO  
I INŻYNIERIA  
ŚRODOWISKA

Czasopismo jest kontynuacją Zeszytów Naukowych Politechniki Białostockiej  
serii Budownictwo, wydawanych w latach 1983-2009.

redaktor naczelny editor-in chief KATARZYNA ZABIELSKA-ADAMSKA	z-ca redaktora naczelnego editor RAFAŁ MIŁASZEWSKI
sekretarz / secretary MARIA J. SULEWSKA	

rada naukowa  
editorial board

Grzegorz BAŁ (Poland), Stanisław BIEDUGNIS (Poland), Eugeniusz DEMBICKI (Poland), Lech J. DZIENIS (Poland), Maciej GRYZMAŃSKI (Poland), Jozef HULLA (Slovakia), Anatoli HURYNOVICH (Bielorus), Jerzy W. JASIEŃKO (Poland), Oleg KAPLIŃSKI (Poland), Czesław MIEDZIAŁOWSKI (Poland), Alexei PERVOV (Russia), Janusz R. RAK (Poland), Žymantas RUDŽIONIS (Lithuania), Sally A. SHOOP (USA), Sławomir A. SORKO (Poland), Leonas USTINOVIČIUS (Lithuania), Dariusz WANATOWSKI (The United Kingdom-China), Józefa WIATER (Poland), Olena S. VOLOSHKINA (Ukraine)

REDAKCJA BUDOWNICTWO I INŻYNIERIA ŚRODOWISKA	EDITORIAL OFFICE CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechnika Białostocka ul. Wiejska 45A 15-351 Białystok	Faculty of Civil and Environmental Engineering Białystok University of Technology Wiejska 45A Street 15-351 Białystok

e-mail: [biswbis@pb.edu.pl](mailto:biswbis@pb.edu.pl)  
[www.biswbis.pb.edu.pl](http://www.biswbis.pb.edu.pl)

© copyright by  
Politechnika Białostocka Białystok University of Technology

Białystok 2018

Nakład 150 egzemplarzy	Circulation 150 copies
---------------------------	---------------------------

Skład i łamanie: Andrzej Leonczuk

Czasopismo publikuje artykuły  
i komunikaty techniczne  
z następującej tematyki:  
budownictwo, inżynieria środowiska,  
kształtowanie środowiska

Publikowane są także:  
Raporty z konferencji, recenzje książek,  
Materiały reklamowe

The journal accepts for publication papers  
and technical notes that describe  
original works or ideas on:  
Civil engineering, Environmental engineering,  
Environmental management.

Besides, it publishes:  
reports of conferences and workshops,  
book reviews, advertising materials.

Wytyczne dla autorów, streszczenia i artykuły  
są dostępne na stronie [www.biswbis.pb.edu.pl](http://www.biswbis.pb.edu.pl)

Instructions to authors, abstracts and full papers  
can be obtained from [www.biswbis.pb.edu.pl](http://www.biswbis.pb.edu.pl)

## Podziękowania Recenzentom

Redakcja *Budownictwa i Inżynierii Środowiska* serdecznie dziękuje poniżej wymienionym profesorom za ich czas i wysiłki włożone w recenzowanie artykułów publikowanych w naszym czasopiśmie w roku 2017. Wzrost jakości Czasopisma nie byłby możliwy bez starań Recenzentów.

## Reviewer Acknowledgment

Editors of *Civil and Environmental Engineering* gratefully acknowledges the following professors for their time and efforts with the reviewing of papers in 2017. The journal's quality and impact have continued to improve, which would not have been possible without the efforts of the Reviewers.

Aleksander ASANOWICZ – Politechnika Białostocka  
Piotr BANASZUK – Politechnika Białostocka  
Tomasz BŁASZCZYŃSKI – Politechnika Poznańska  
Ewa BŁAZIK-BOROWA – Politechnika Lubelska  
Anna BOGDAN – Politechnika Warszawska  
Tadeusz CHYŻY – Politechnika Białostocka  
Marek J. CIAK – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
Romuald CZERPAK – Wyższa Szkoła Medyczna w Białymstoku  
Marcin DĘBOWSKI – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
Wojciech DORNOWSKI – Wojskowa Akademia Techniczna Warszawa  
Andrzej DYLLA – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy  
Urszula FILIPKOWSKA – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
Wiesława GŁODKOWSKA – Politechnika Koszalińska  
Elżbieta HORSZCZARUK – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny  
Irena ICKIEWICZ – Politechnika Białostocka  
Andrzej KAZBERUK – Politechnika Białostocka  
Edwin KOŹNIEWSKI – Politechnika Białostocka  
Józef JASICZAK – Politechnika Poznańska  
Barbara M. LIPSKA – Politechnika Śląska  
Bożena ŁOZOWICKA – Instytut Ochrony Roślin Białystok  
Ryszard OLESZCZUK – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie  
Zygmunt ORŁOWSKI † – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Jacek PIECZYRAK – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej  
Jacek PIEKARSKI – Politechnika Krakowska  
Jerzy SĘKOWSKI – Politechnika Śląska  
Alicja SIUTA-OLCHA – Politechnika Lubelska  
Wojciech SKOWROŃSKI – Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu  
Zbigniew SZCZEŚNIAK – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie  
Zenon SZYPCIO – Politechnika Białostocka  
Viktar V. TUR – Brest State Technical University, Bielarus  
Adam TYLICKI – Uniwersytet w Białymstoku  
Piotr WOJCIECHOWSKI – Politechnika Łódzka  
Wasył M. ŻEŁYCH – Lviv Polytechnic National University, Ukraine  
Monika ŻUBROWSKA-SUDOŁ – Politechnika Warszawska



## Spis treści

<b>Recenzenci 2017 – Podziękowania Recenzentom</b> <i>Reviewers 2017 – Editorial Acknowledgment</i> .....	5
<b>Mariusz ADAMSKI, Agata MYSZKOWSKA</b> Rozliczanie kosztów ogrzewania na przykładzie wybranego mieszkania <i>Heating cost calculations on the example of the selected apartment</i> .....	7
<b>Iwona CHMIELEWSKA</b> Współczynnik filtracji torfów <i>Coefficient of permeability of peat</i> .....	15
<b>Maciej CHOLEWIŃSKI</b> <i>Mild pyrolysis of coals and its impact on possible mercury releases from pulverised coal-fired power plants</i> .....	23
<b>Błażej SMOLIŃSKI</b> Analiza zastosowania paneli GRP do modernizacji wielkośrednicowych kolektorów ściekowych <i>Analysis of the application of GRP panel technologies for modernisation of large-diameter sewage collectors</i> .....	33
<b>Dariusz TOMASZEWICZ</b> <i>Steel frame as the basis for checking the pull-out capacity of bonded diagonal anchor bolts</i> .....	39
<b>Marta WIŚNIEWSKA</b> Eksploatacja, zamknięcie i rekultywacja składowisk niezorganizowanych na przykładzie składowiska „Łysa Góra” <i>Operation, closure and reclamation of the unorganized landfills on example of the landfill called "Łysa Góra"</i> .....	45
<b>Maciej ZAŁUSKA, Janina PIEKUTIN, Lech MAGREL</b> Efektywność ekonomiczna i energetyczna funkcjonowania biogazowni w zależności od zastosowanego substratu <i>Economic and energetic efficiency of biogas plant depending on the substrate applicable</i> .....	51

## Abstracts Vol. 9 No. 1

**Mariusz ADAMSKI, Agata MYSZKOWSKA**

*Heating cost calculations on the example of the selected apartment*

The aim of the research is to present the method of calculations of individual heating costs of flats and business premises regarding the energy law, in which the heating fee corresponds to the consumption of heat and takes into account the indications of electronic cost allocators. Generally, in new buildings or buildings after thermal modernisation, external walls are not a significant component of heat losses. Therefore, the amount of heat lost per 1 m<sup>2</sup> in individual apartments is similar, and the receivables for central heating 1 m<sup>2</sup> of usable space of such flats should be similar. The answer to the question of how large divergences may be in heating for 1 m<sup>2</sup> in individual apartments is provided by EU regulations. The presented author's method combines the advantages of using heating cost allocators with the feeling of proper heating cost accounting, which residents have when settling without dividers based on the PLN/m<sup>2</sup> rate. In this method, the price per unit of heat is due to the invoice of the heat supplier. Based on the numerical results obtained in the presented method, it is possible to determine which part of the fees is settled on the surface of flats, and how much on dividers.

**Iwona CHMIELEWSKA**

*Coefficient of permeability of peat*

The paper presents the results of oedometer tests of peat samples. The aim of the research was to determine coefficient of permeability of peat. The oedometer tests were carried out on samples taken from the subsoil of Bargłów Kościelny bypass road. Samples were taken in the vertical and horizontal directions. The oedometer tests were conducted using a set of five oedometers with the possibility of automatic registration of displacement sensor readings. On the basis of test results the oedometric modulus of primary compression, consolidation coefficient and the coefficient of permeability were determined. It was shown that the values of parameters determined for samples taken in the vertical and horizontal directions were significantly different. The values of the determined parameters were compared with the values given in the literature.

**Maciej CHOLEWIŃSKI**

*Mild pyrolysis of coals and its impact on possible mercury releases from pulverised coal-fired power plants*

The paper concerns the impact of mild pyrolysis of coals on the possible mercury releases from the combustion process. It was proven that while mild pyrolysis may lead to the decrease of mercury content in solid fuel (from 0 do even 80% of dry mass), the resulting increased SO<sub>2</sub>/HCl ratio in flue gasses may be disadvantageous in the case of the mercury oxidation as well. However, when optimised, for analysed lignites, this type of thermal pre-combustion technique could satisfy up to 4-26% of mercury decrease requirements while for analysed hard coal it seems to be pointless to adopt it within power plant. Therefore, the environmental benefits of mild pyrolysis will be strongly depend on the type of fuel (i.e. mercury compounds in dry matter) and the conditions (time, temperature) of the process.

**Błażej SMOLIŃSKI**

*Analysis of the application of GRP panel technologies for modernisation of large-diameter sewage collectors*

One of the basic tasks of local authorities is to provide the needs of the inhabitants, including the provision of communal services. Due to dynamic development of urban centers, it is urgent to carry out an effective modernization of the sewerage systems to ensure their adequate capacity and effective operation. In the context of the modernization of sewage collectors, the relining method using GRP panels made of fiberglass composite and polyester or vinyl ester resins is desirable. In the paper the effectiveness of using GRP panels technology for modernisation of large-diameter sewage collectors has been verified, taking into consideration the process of selection of required wall thickness of GRP panels. In the analyses the numerical modelling was used and co-operation of the structure with the soil has been taken into account.



**Dariusz TOMASZEWICZ**

*Steel frame as the basis for checking the pull-out capacity of bonded diagonal anchor bolts*

The paper concerns a device for testing diagonal anchorages, designed by the author. This device constitutes the basis for the testing equipment used for the performed test. No such research has been conducted so far. The article describes the way the rack was designed and what components it is made of. The possibilities and practical examples of the device are also indicated.

**Marta WIŚNIEWSKA**

*Operation, closure and reclamation of the unorganized landfills on example of the landfill called "Łysa Góra"*

The aim of the study was to analyse the operation and way of remediation of landfill which had not authorisation required by law but it was used for depositing municipal and hazardous wastes. The landfill called "Łysa Góra" is the example of unorganized landfill. It is located in the village named Bodzanów, belonging to the province of Masovia. This landfill was working since year 1985 without permits required by law. The process of remediation of landfill was analysed and the results of the study of groundwater were shown in the paper.

**Maciej ZAŁUSKA, Janina PIEKUTIN, Lech MAGREL**

*Economic and energetic efficiency of biogas plant depending on the substrate applicable*

In order to obtain the results most accurately describing the real state of economic and energetic efficiency, the data from the various biogas plants was analysed over the next three years, i.e. 2014-2016. After the analysis, it should be noticed that the substrate and its price have a significant impact on the profitability of the biogas plant operation. A biogas plant Rusing substrate of agricultural origin bears large costs related to the purchase of the load. However, the installation Rusing sewage sludge from the sewage treatment plant does not bear any costs related to the substrates, but shows significant profits.

# ROZLICZANIE KOSZTÓW OGRZEWANIA NA PRZYKŁADZIE WYBRANEGO MIESZKANIA

Mariusz ADAMSKI\*, Agata MYSZKOWSKA\*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** W opracowaniu zawarto przegląd metod wyznaczania indywidualnych kosztów ogrzewania stosowanych w Niemczech, w Austrii, w Polsce oraz ustalenia unijne w kwestii rozliczeń indywidualnych kosztów ogrzewania. Zaprezentowano również oryginalną metodę autorską, która w sposób istotny eliminuje nadmierne nierówności w indywidualnych opłatach za centralne ogrzewanie – tak zwane kominy w rozliczeniach poszczególnych mieszkań za ogrzewanie. Przedstawiony sposób łączy ze sobą zalety stosowania podzielników kosztów ogrzewania z odczuciem właściwego rozliczania kosztów ogrzewania, jakie mają mieszkańcy przy rozliczeniach bez podzielników w oparciu o stawkę zł/m<sup>2</sup>. Udział kosztów rozliczanych na powierzchnię mieszkań w kolejnych sezonach grzewczych jest wynikiem dodanym, to znaczy dodatkowym wnioskiem i nie musi być obliczany, aby w prezentowanej metodzie autorskiej wykonać rozliczenia kosztów centralnego ogrzewania. W artykule na przykładach liczbowych przedstawiono dwa sposoby wyznaczenia średniej ceny energii cieplnej w kolejnych sezonach grzewczych. Przedstawiono również przykład obliczeniowy wyznaczania należności za centralne ogrzewanie w oparciu o elektroniczne podzielniki kosztów w budynku wielorodzinnym według metody autorskiej. Jako wskaźnik udziału wskazań podzielników kosztów mieszkania w nieruchomości, odniesiony do udziału powierzchni rozpatrywanego mieszkania w nieruchomości, zastosowano współczynnik  $K_v$ .

*Słowa kluczowe:* indywidualne koszty ogrzewania, elektroniczne podzielniki kosztów, metoda wyznaczania należności za centralne ogrzewanie.

## 1. Wprowadzenie

Celem artykułu jest zaprezentowanie różnych stosowanych sposobów rozliczeń i przedstawienie autorskiego sposobu rozliczeń indywidualnych kosztów ogrzewania mieszkań i lokali użytkowych w budownictwie, zgodnego z prawem energetycznym, w którym opłata za ogrzewanie odpowiada zużyciu ciepła i uwzględnia wskazania elektronicznych podzielników kosztów. Opisana metoda może być stosowana do budynków wyposażonych w elektroniczne podzielniki kosztów. Autorska metoda rozliczeń kosztów ogrzewania oparta jest na cenie ciepła zł/kWh wynikającej z faktur dostawcy ciepła, stąd wyznaczone opłaty za ciepło odzwierciedlają wartość zużytego ciepła. Metoda ta nie wymaga zakładania przed wykonaniem naliczeń kosztów ogrzewania, jaka część kosztów ogrzewania rozliczana jest w oparciu o powierzchnię mieszkań, a jaka w oparciu o podzielniki kosztów.

## 2. Przegląd metod wyznaczania indywidualnych kosztów ogrzewania

### 2.1. Metoda wyznaczania indywidualnych kosztów ogrzewania stosowana w Niemczech

Przyjmuje się, że 50% ogólnych kosztów ogrzewania rozlicza się na powierzchnię mieszkań, pozostałe 50% poprzez wskazania podzielników kosztów.

Nie stosuje się współczynników wyrównawczych uwzględniających usytuowanie poszczególnych mieszkań w bryle budynku. Co więcej, stosowanie tych współczynników jest zabronione prawem. Stosuje się natomiast rachunek wyrównawczy sumy wskazań podzielników kosztów do wskazań ciepłomierza centralnego ogrzewania (Adamski i Rynkowski, 2015; Michnikowski i Grzywacz, 2015; Michnikowski i Skiba, 2014). Rachunek ten jest oparty na właściwościach elektronicznych podzielników kosztów, tzn. 1 jednostka odczytana z podzielnika kosztów odpowiada zwykle wartości od 0,9 do 1,1 kWh. Materiały w języku niemieckim firm rozliczających, na przykład Ista lub Metrona podają, że przy braku dokładnych danych

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: mariusz.adamski@pb.edu.pl

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: myszkowskaagata0213@gmail.com



technicznych do rozliczeń przyjmuje się z wystarczającą dokładnością, że:

$$1 \text{ WZ} = 1 \text{ kWh} \quad (1)$$

co oznacza, że 1 jednostka odczytana z podzielnika kosztów ogrzewania odpowiada 1 kWh.

Szczegóły rachunku wyrównawczego sumy wskazań podzielników kosztów do wskazań ciepłomierza centralnego ogrzewania oraz kryteria celowości stosowania rachunku wyrównawczego zawarte są w niemieckiej normie VDI2077. Zakłada się, że dla ogółu budynków grzejniki z podzielnikami kosztów dostarczają od 2/3, to jest 66% do 85% energii cieplnej dostarczanej przez instalację centralnego ogrzewania.

Wprowadza się ułamek, oznaczany przez  $r$ , który jest ilorazem sumy wartości odczytanych z podzielników kosztów odniesioną do ciepła zarejestrowanego przez ciepłomierz:

$$r = \frac{\text{suma wskazań podzielników kosztów}}{\text{wskazania ciepłomierza}} \quad (2)$$

Ponieważ w ocenie cieplnej grzejników stosuje się parametr UF, który jest tak dobrany, że dla grzejnika o mocy cieplnej 2 kW przyjmuje 1, stąd wartość tego ułamka dla ogółu instalacji centralnego ogrzewania wynosi od 0,34 do 0,43.

Różnicę pomiędzy teoretyczną maksymalną sumą wskazań podzielników a faktyczną rozdziela się proporcjonalnie do powierzchni poszczególnych mieszkań. Różnicę tę wyznacza się z równania:

$$z = (0,43 - r) \cdot Q \quad (3)$$

gdzie  $Q$  jest wskazaniami ciepłomierza (ciepło zarejestrowane przez ciepłomierz).

Z porównania opłat (Adamski i Rynkowski, 2015) za ogrzewanie poszczególnych mieszkań wyznaczonych według zasad stosowanych w Polsce (Dz. U. 2018 poz. 755) oraz w Niemczech przy założeniu w obu przypadkach, że 50% kosztów rozliczanych jest na powierzchnię mieszkań wynika, że zastosowanie rachunku wyrównawczego sumy wskazań podzielników kosztów do wskazań ciepłomierza centralnego ogrzewania powoduje, że opłaty za ogrzewanie 1 m<sup>2</sup> poszczególnych mieszkań są bardziej wyrównane. W obliczeniach tych uwzględniono współczynniki zależne od położenia mieszkania w bryle budynku.

Pomijanie współczynników  $R_m$  uwzględniających usytuowanie poszczególnych mieszkań w bryle budynku prowadzi do zawyżenia opłat za ogrzewanie mieszkań narożnych lub ze ścianą szczytową – zwłaszcza położonych na najwyższej lub najniższej kondygnacji mieszkalnej. Fakt ten znajduje swoje odzwierciedlenie na rynku mieszkaniowym w Niemczech – takie mieszkania są tańsze.

## 2.2. Metoda wyznaczania indywidualnych kosztów ogrzewania stosowana w Austrii

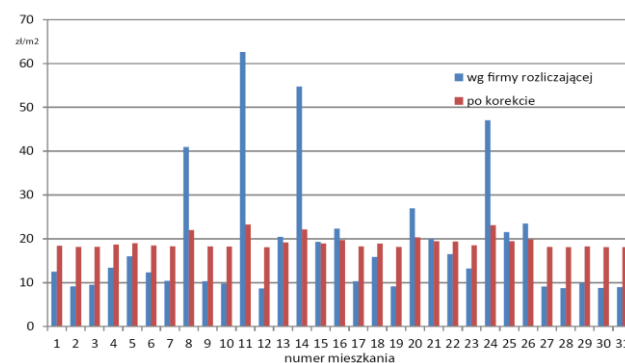
Uwzględnia się tu współczynniki związane z położeniem mieszkania w bryle budynku, a także wyznaczone

ciepło tracone w pionach wyznaczane na drodze obliczeń i sumuje ze wskazaniami podzielników kosztów. Aby takie sumowanie było możliwe, należy wskazania podzielników ciepła przeliczyć na jednostki ciepła, na przykład kilowatogodziny (kWh). Przyjmuje się zwykle:

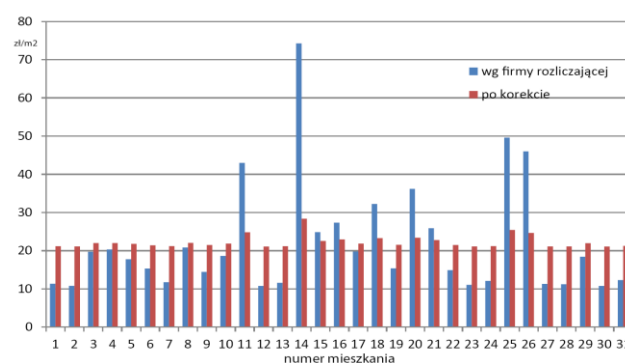
$$1 \text{ WZ} = 1 \text{ kWh} \quad (4)$$

dla ogółu spotykanych podzielników kosztów i grzejników. Zakłada się stałe udziały kosztów rozliczanych na powierzchnię mieszkań i na podzielniki, najczęściej 50/50%.

Ponieważ metoda ta uwzględnia ciepło oddane przez piony i przewody rozprowadzające, a nie uwzględnia ciepła niezarejestrowanego przez podzielniki kosztów (Adamski, 2017), ze względu na fakt, że grzejniki w warunkach rzeczywistych nie zawsze pracują w stanie podstawowym określonym w normach PN-EN 834:1999 *Podzielniki kosztów ogrzewania do rejestrowania zużycia ciepła przez grzejniki. Przystosowane do zasilania energią elektryczną* oraz PN-EN 834:2013-12 *Podzielniki kosztów ogrzewania do rejestrowania zużycia ciepła przez grzejniki. Przystosowane do zasilania energią elektryczną*, metoda austriacka jest mniej skuteczna niż metoda niemiecka. Wskaźniki zł/m<sup>2</sup> dla poszczególnych mieszkań będą przyjmować wartości pośrednie dla danego sezonu między wyznaczonymi na rysunkach 1 oraz 2.



Rys. 1. Porównanie wskaźników kosztów zł/m<sup>2</sup> poszczególnych mieszkań za centralne ogrzewanie wyznaczone przez firmę rozliczającą w Polsce i po korektach według VDI 2077 w sezonie 2008-2009 (Adamski i Rynkowski, 2015)



Rys. 2. Porównanie wskaźników kosztów zł/m<sup>2</sup> poszczególnych mieszkań za centralne ogrzewanie wyznaczone przez firmę rozliczającą w Polsce i po korektach według VDI 2077 w sezonie 2009-2010 (Adamski i Rynkowski, 2015)

### 2.3. Metoda wyznaczania indywidualnych kosztów ogrzewania stosowana w Polsce

Zależność  $1 \text{ WZ} = 1 \text{ kWh}$  nie znajduje dotychczas odzwierciedlenia w procedurach rozliczania kosztów ogrzewania, zatem aby koszty ogrzewania odpowiadały zużyciu ciepła, spółdzielnie mieszkaniowe na przestrzeni lat zwiększają udział części rozliczanej na powierzchnię mieszkań. O ile początkowo stosowano 50/50%, a zdarzały się spółdzielnie mieszkaniowe, gdzie stosowano 30/70%, to obecnie stosuje się coraz częściej 60/40%, 70/30%, gdzie pierwsza liczba mówi o części rozliczanej na  $\text{m}^2$ , druga poprzez podzielniki kosztów. Dotychczas brak jest jednolitego systemu, a każda spółdzielnia mieszkaniowa wypracowuje swoje rozwiązanie. W niektórych spółdzielniach stosuje się oszacowanie ciepła oddanego przez nieopomiarowane grzejniki oraz piony i uwzględnienie w rozliczeniach, co zbliża metodykę obliczeń do stosowanej w Austrii. Szczególnie ważne są zdaniem autorów takie metody obliczeniowe, w których nie wymaga się stosowania dodatkowych podzielników kosztów montowanych na dotychczas nieopomiarowanych grzejnikach lub nawet pionach centralnego ogrzewania.

### 3. Ustalenia unijne w kwestii rozliczeń indywidualnych kosztów ogrzewania

„Nie można indywidualnego oszacowania stosować, gdy wynikająca z niego opłata przewyższałaby opłatę, jaka byłaby przy rozliczaniu według powierzchni podłogi powyżej 25%” (Dyrektywa unijna 93/76/EEC; Pieńkowski, 2010). Zapis taki pojawił się w Wytycznych Europejskiego Stowarzyszenia E.V.V.E z 1996 roku, które uściślają podstawowe wymagania Dyrektywy 93/76/EEC z 13 września 1993 roku o ograniczeniu emisji dwutlenku węgla przez podniesienie efektywności wykorzystania energii. Tabela 1 prezentuje porównanie metod rozliczania kosztów ogrzewania w Niemczech, Austrii i w Polsce.

Z powyższych analiz oraz z przeglądu metod rozliczeń kosztów ogrzewania (Pieńkowski, 2006 i 2010) wynika, że poszczególne kraje rozwiązują te kwestie odrębnie, a metody stosowane w poszczególnych krajach europejskich są różne. Wyniki rozliczeń często nie spełniają ustaleń unijnych.

Tab. 1. Porównanie metod rozliczania kosztów ogrzewania w Niemczech, Austrii i Polsce

Lp.	kraj	Współczynnik położenia lokalu w bryle budynku $R_m$	1 WZ = 1 kWh	Podział kosztów na metrażowe i podzielnikowe
1	Niemcy	1, nie stosuje się	stosuje się	stała wartość
2	Austria	stosuje się	stosuje się	stała wartość
3	Polska	stosuje się	nie stosuje się	stała wartość
4	Metoda autorska	stosuje się, nie są istotne	stosuje się	wartość zmienna, wynikowa

### 4. Ceny energii cieplnej. Średnia cena energii cieplnej w sezonie grzewczym

W proponowanej metodzie rozliczeń indywidualnych kosztów ogrzewania istotna jest cena energii cieplnej. Ceny energii cieplnej według faktur MPEC w Białymstoku dla odbiorców B3 zestawiono w tabeli 2. Ponieważ ceny zmieniają się w ciągu sezonu grzewczego, w proponowanej metodzie rozliczeń indywidualnych kosztów ogrzewania należy wyznaczyć średnią cenę energii cieplnej w sezonie grzewczym. Obliczenia takie można wykonać w oparciu o udziały stopniodni w poszczególnych miesiącach wyznaczone na podstawie średniej temperatury dla danego miesiąca (tab. 3). Ponieważ cena energii cieplnej może się zmienić nawet w ciągu miesiąca, w ostatniej kolumnie podano udziały przypadające na 1 dzień w %/dzień.

W ostatniej kolumnie tabeli 4 podano średnie ceny energii cieplnej wyznaczone tą metodą w sezonach grzewczych od 1.12.2008 do 30.11.2015. Zaletą tej metody jest, że nie wymaga danych o zużyciu ciepła w poszczególnych miesiącach sezonu grzewczego.

Bardziej precyzyjną metodą wyznaczania średniej ceny ciepła w poszczególnych sezonach grzewczych są obliczenia, które można wykonać w oparciu o faktury dostawcy ciepła, gdzie jest podane zużycie ciepła oraz wartość tego ciepła. Wynika stąd średnia cena za ciepło, a wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 5.

Na rysunku 3 przedstawiono ceny średnie  $c$  energii cieplnej w poszczególnych sezonach grzewczych obliczonych powyżej przedstawionymi metodami i wyrażone w zł/kWh.

Na rysunku 4 przedstawiono wartości względne  $\delta c$  różnic cen wyrażone w procentach. Różnice  $\delta c$  względne dla wybranego sezonu grzewczego obliczono z równania:

$$\delta c = \frac{\text{cena wyznaczona w oparciu o stopniodni} - \text{cena w oparciu o faktyczne zużycie wg faktur}}{\text{cena w oparciu o faktyczne zużycie wg faktur}} \times 100 \quad (5)$$

Dla rozpatrywanych danych liczbowych różnice te nie mają praktycznego znaczenia i są znacznie mniejsze niż dokładność pomiaru podzielnika kosztów, która w najbardziej korzystnych warunkach wynosi 3% (PN-EN 834:1999; PN-EN 834:2013-12).



Tab. 2. Ceny energii cieplnej według faktur MPEC, odbiorca B3

Okres dostaw	Cena netto [zł/GJ]	vat [%]	Cena brutto [zł/GJ]		Razem brutto [zł/GJ]	zł/kWh
od 1 stycznia 2015	30,69	23	37,75	dostarczenie	53,13	0,191268
	12,50	23	15,38	przesył		
od 1 listopada 2013	29,34	23	36,09	dostarczenie	51,17	0,184212
	12,26	23	15,08	przesył		
od 19 sierpnia 2013	29,16	23	35,87	dostarczenie	50,63	0,182268
	12,00	23	14,76	przesył		
od 7 czerwca 2013	27,67	23	34,03	dostarczenie	48,79	0,175644
	12,00	23	14,76	przesył		
od 4 października 2012	27,41	23	33,71	dostarczenie	48,47	0,174492
	12,00	23	14,76	przesył		
od 19 sierpnia 2012	27,43	23	33,74	dostarczenie	47,45	0,170820
	11,15	23	13,71	przesył		
od 1 września 2011	26,44	23	32,52	dostarczenie	46,23	0,166428
	11,15	23	13,71	przesył		
od 1 stycznia 2011	24,68	23	30,36	dostarczenie	44,05	0,158580
	11,13	23	13,69	przesył		
od 1 sierpnia 2010	24,68	22	30,11	dostarczenie	43,69	0,157284
	11,13	22	13,58	przesył		
od 1 kwietnia 2009	24,49	22	29,88	dostarczenie	42,46	0,152856
	10,31	22	12,58	przesył		
od 1 marca 2008	20,58	22	25,11	dostarczenie	36,86	0,132696
	9,63	22	11,75	przesył		
od 1 lutego 2008	18,85	22	23,00	dostarczenie	34,75	0,125100
	9,63	22	11,75	przesył		
od 1 lutego 2007	18,59	22	22,68	dostarczenie	33,75	0,121500
	9,07	22	11,07	przesył		

Tab. 3. Średnie miesięczne wartości temperatury zewnętrznej  $t_z$  dla Białegostoku, liczba dni w miesiącu, stopniodni oraz udziały stopniodni w poszczególnych miesiącach. Temperatura w pomieszczeniach  $t_i = 20^\circ\text{C}$ 

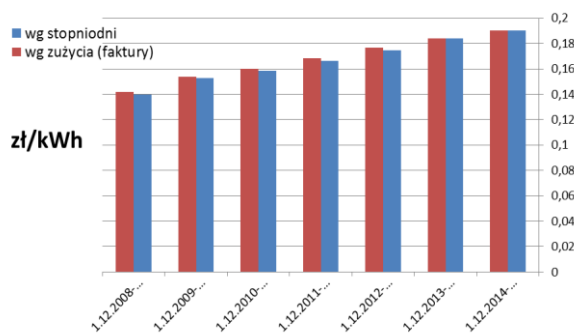
Miesiąc	$t_z$ [°C]	liczba dni w miesiącu	$t_i - t_e$	stopniodni	%	% / dzień
Styczeń	-4,9	31	24,9	772	20,0	0,6438
Luty	-2,0	28	22	616	15,9	0,5688
Marzec	1,7	31	18,3	567	14,7	0,4731
Kwiecień	7,3	30	12,7	381	9,9	0,3284
Maj	13,2					
Czerwiec	15,9					
Lipiec	17,3					
Sierpień	14,5					
Wrzesień	12,1					
Październik	7,1	31	12,9	400	10,3	0,3335
Listopad	1,6	30	18,4	552	14,3	0,4757
Grudzień	1,3	31	18,7	580	15,0	0,4835
			suma	3868	100,0	

Tab. 4. Średnia cena ciepła w sezonach grzewczych zł/kWh w oparciu o stopniodni

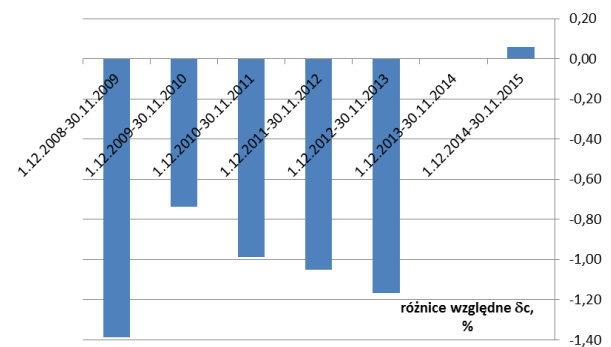
Okres	Cena ciepła w danym miesiącu i w kolejnych miesiącach								Średnia cena
	miesiąc	12	1	2	3	4	10	11	
	%	0,150	0,200	0,159	0,147	0,099	0,103	0,143	
1.12.2014-30.11.2015		0,184212	0,191268						0,190210
1.12.2013-30.11.2014		0,184212							0,184212
1.12.2012-30.11.2013		0,174492							0,174492
1.12.2011-30.11.2012		0,166428							0,166428
1.12.2010-30.11.2011		0,157284	0,158580						0,158386
1.12.2009-30.11.2010		0,152856							0,152856
1.12.2008-30.11.2009		0,132696				0,152856			0,139643

Tab. 5. Średnia cena za ciepło w sezonach grzewczych zł/kWh w oparciu o faktyczne zużycie ciepła według faktur MPEC

Okres	Koszt ciepła [zł]	Zużycie ciepła [GJ]	Średnia cena [zł/GJ]	Średnia cena [zł/kWh]
1.12.2014-30.11.2015	198516,51	3759,43	52,8049	0,1900978
1.12.2013-30.11.2014	219233,38	4284,58	51,1680	0,1842048
1.12.2012-30.11.2013	238313,92	4859,38	49,0420	0,1765514
1.12.2011-30.11.2012	215143,03	4604,83	46,7212	0,1681962
1.12.2010-30.11.2011	223814,42	5036,96	44,4344	0,1599639
1.12.2009-30.11.2010	217297,34	5079,92	42,7757	0,1539927
1.12.2008-30.11.2009	194078,45	4934,00	39,3349	0,1416057



Rys. 3. Porównanie średnich cen zł/kWh w kolejnych sezonach grzewczych wyznaczonych w oparciu o stopniodni ze średnimi cenami wyznaczonymi w oparciu o faktyczne zużycie ciepła według faktur dostawcy ciepła w poszczególnych miesiącach



Rys. 4. Różnice względne średnich cen w kolejnych sezonach grzewczych wyznaczonych w oparciu o stopniodni oraz w oparciu o faktyczne zużycie ciepła według faktur dostawcy ciepła w poszczególnych miesiącach

### 5. Przykład obliczeniowy wyznaczania należności za centralne ogrzewanie w oparciu o elektroniczne podzielniki kosztów w budynku wielorodzinnym według proponowanej metody autorskiej

W przykładzie podano obliczenia dla sezonu 2008/2009 w oparciu o następujące dane:

- Roczne koszty ogrzewania wraz z opłatami za moc zamówioną, kwota do rozliczenia,  
przyjęto  $K = 176846,84$  zł,
- Łączna powierzchnia ogrzewanych mieszkań,  
przyjęto  $F = 7048,37$  m<sup>2</sup>,

- Powierzchnia mieszkania,  
przyjęto  $f = 48,3$  m<sup>2</sup>,
- Cena za jednostkę ciepła, czyli cena 1 kWh ciepła.  
Do obliczeń przyjęto  $c = 0,1416057$  zł/kWh, jest to średnia cena za ciepło w sezonie grzewczym 2008/2009 (tab. 5) wyznaczona w oparciu o faktyczne zużycie ciepła według faktur MPEC.

Łączna liczba jednostek w nieruchomości odczytana z podzielników w sezonie 2008/2009 z uwzględnieniem współczynników położenia mieszkań w bryle budynku:

$$\sum z_i = 129450,30WZ \quad (5)$$

Suma jednostek dla mieszkania odczytana z podzielników w sezonie 2008/2009 z uwzględnieniem współczynnika położenia mieszkania w bryle budynku:

$$z_i = 1842,12WZ \quad (6)$$

gdzie WZ oznacza wartość zużycia, przy czym 1 WZ = 1 kWh (Michnikowski i Grzywacz, 2015), stąd dwie ostatnie dane można zapisać jako:

$$\begin{aligned} \sum z_i &= 129450,30WZ = 12950,30kWh \\ z_i &= 182,12WZ = 1842,12kWh \end{aligned} \quad (7)$$

1. Wartość ciepła zarejestrowana przez podzielniki kosztów w mieszkaniu:

$$K_{podz\_i} = cz_i = 0,1416057 \frac{zł}{kWh} \cdot 1842,12kWh = 260,86zł \quad (8)$$

2. Wartość ciepła zarejestrowana przez podzielniki kosztów w nieruchomości wielorodzinnej:

$$K_{podz} = c \sum z_i = 0,1416057 \frac{zł}{kWh} \cdot 129450,3kWh = 18330,90zł \quad (9)$$

Jest to kwota do rozliczenia ogrzewania budynku w oparciu o podzielniki kosztów.

3. Kwota do rozliczenia w oparciu o powierzchnię poszczególnych mieszkań:

$$K_{m2} = K - K_{podz} = 176846,84 - 18330,90 = 158515,94zł \quad (10)$$

Powyższa kwota powinna być rozdzielona proporcjonalnie do powierzchni poszczególnych mieszkań.

4. Wskaźnik  $K_{m2}/F$  oraz kwota przypadająca na rozpatrywane mieszkanie  $K_{m2\_i}$ :

$$\frac{K_{m2}}{F} = \frac{158515,94zł}{7048,37m^2} = 22,49 \frac{zł}{m^2} \quad (11)$$

$$K_{m2\_i} = f \frac{K_{m2}}{F} = 48,3 \cdot 22,49 = 1086,25zł \quad (12)$$

5. Koszt ogrzewania mieszkania  $K_i$ :

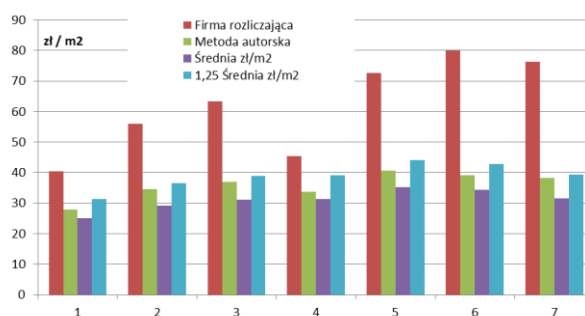
$$K_i = K_{m2\_i} + K_{podz\_i} = 1086,25 + 260,86 = 1347,11zł \quad (13)$$

W ten sposób można obliczyć należności za ogrzewanie dla pozostałych mieszkań oraz dla kolejnych sezonów grzewczych.

## 6. Porównanie rozliczeń kosztów ogrzewania dla wybranego mieszkania w kolejnych sezonach grzewczych

Wyniki obliczeń należności za ogrzewanie 1 m<sup>2</sup> rozpatrywanego mieszkania w kolejnych sezonach grzewczych przedstawiono w formie graficznej.

Na rysunku 5 zaznaczono także należności rozpatrywanego mieszkania wyznaczone przez firmę rozliczającą odniesione do 1 m<sup>2</sup>. Zaznaczono także średnią wartość ogrzewania zł/m<sup>2</sup> oraz wartość tą zwiększoną o 25%.



Rys. 5. Warianty obliczeń należności za ogrzewanie 1 m<sup>2</sup> rozpatrywanego mieszkania w kolejnych sezonach grzewczych

Średnia wartość ogrzewania zł/m<sup>2</sup> jest stosowana w przypadku rozliczeń bez podzielników kosztów. Wartość mnożnika 1,25 wynika z ustaleń unijnych (Dyrektywa unijna 93/76/EEC; Pieńkowski, 2010).

## Współczynnik $K_v$

Udział powierzchni rozpatrywanego mieszkania w rozliczanej nieruchomości wynosi:

$$\partial_A = \frac{48,3}{7048,37} \cdot 100\% = 0,69\% \quad (14)$$

Natomiast udział wskazań podzielników w sezonie 2008/2009

$$\partial_V = \frac{1842,12}{129450,30} \cdot 100\% = 1,42\% \quad (15)$$

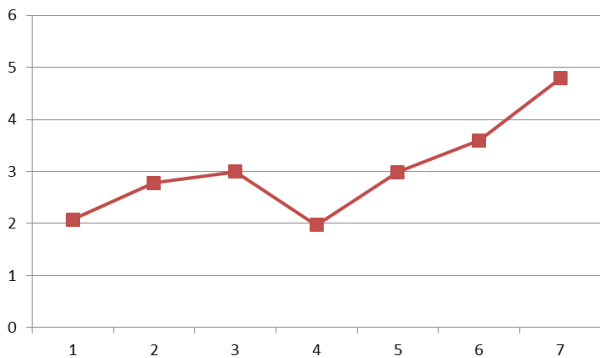
Stąd iloraz  $K_v$  (Michnikowski i Grzywacz, 2015) dla rozpatrywanego mieszkania wynosi

$$K_v = \frac{\partial_V}{\partial_A} = \frac{1,42}{0,69} = 2,08 \quad (16)$$

Współczynnik  $K_v$  określa relację między udziałem powierzchni (lub kubatury) danego mieszkania w rozliczanej nieruchomości a udziałem wskazań podzielników rozpatrywanego mieszkania w rozliczanej nieruchomości. Wartość  $K_v = 1$  oznacza, że podzielniki w danym mieszkaniu zarejestrowały tak, jak to wynika z udziału powierzchni mieszkania w rozliczanej nieruchomości. Wartość  $K_v > 1$  wskazuje, że podzielniki w danym mieszkaniu zarejestrowały więcej, niż to wynika z udziału powierzchni mieszkania w rozliczanej nieruchomości.

Mieszkania, dla których  $K_v$  jest większe niż 1, mają opłaty wyższe niż to wynika ze średniego zużycia ciepła na ogrzewanie dla bloku. Sytuację taką dla rozpatrywanego mieszkania przedstawiono na rysunku 6.

Dotychczas stosowane metody rozliczeń kosztów ogrzewania w Polsce prowadzą do stosowania zawyżonej ceny zł/kWh w rozliczeniach indywidualnych kosztów ogrzewania. Cena ta w kartach rozliczeń indywidualnych oznaczana jest często jako zł/jpko i wynosi 0,50 lub 1, a czasami nawet więcej.



Rys. 6. Wartości współczynnika  $K_V$  rozpatrywanego mieszkania w sezonie 2008/2009 oraz w kolejnych sezonach grzewczych

Zawyżenie ceny zł/kWh w rozliczeniach indywidualnych kosztów ogrzewania powoduje, że mieszkania, dla których  $K_V$  jest większe niż 1 mają opłaty znacznie wyższe niż to wynika z wartości zużytego ciepła. Są to też opłaty, które są znacznie większe niż wartości wyznaczone w oparciu o wskaźnik zł/m<sup>2</sup> średniego zużycia ciepła na ogrzewanie nieruchomości.

## 7. Podsumowanie i wnioski

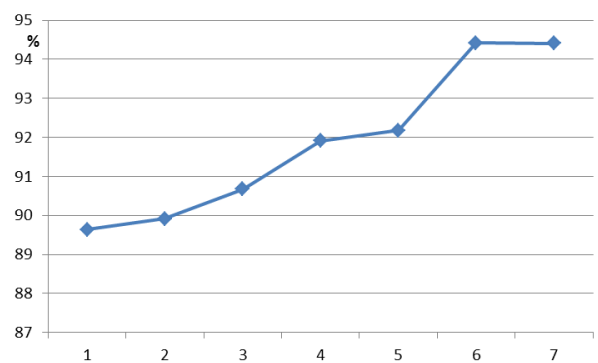
Zaprezentowana metoda autorska w sposób istotny eliminuje tak zwane kominy w rozliczeniach poszczególnych mieszkań za ogrzewanie. Mieszkania w blokach charakteryzują się podobnym standardem technicznym, ściany zewnętrzne są izolowane cieplnie, zaś izolacji cieplnych między poszczególnymi mieszkaniami w Polsce się nie stosuje. Generalnie w budynkach po termomodernizacji lub nowych ściany zewnętrzne nie są istotnym składnikiem strat ciepła. Stąd ilość ciepła traconego na 1 m<sup>2</sup> w poszczególnych mieszkaniach jest podobna, a należności za centralne ogrzewanie 1m<sup>2</sup> powierzchni użytkowej takich mieszkań powinny być zbliżone. Ale oczywiście – nie muszą być identyczne. Odpowiedź na pytanie, jak duże mogą być rozbieżności za ogrzewanie 1 m<sup>2</sup> w poszczególnych mieszkaniach dają zapisy unijne (Dyrektywa unijna 93/76/EEC; Pieńkowski, 2010). Niestety nie są one stosowane przez firmy rozliczające, co prowadzi do nieporozumień między mieszkańcami a spółdzielniami mieszkaniowymi.

Ze względu na niewłaściwe rozliczenia w Polsce, które są najczęściej wykonywane przez międzynarodowe firmy, niektóre spółdzielnie pod presją mieszkańców rezygnują z podzielników kosztów.

Przedstawiona metoda autorska łączy ze sobą zalety stosowania podzielników kosztów ogrzewania, z odczuciem właściwego rozliczenia kosztów ogrzewania, jakie mają mieszkańcy przy rozliczeniach bez

podzielników w oparciu o stawkę zł/m<sup>2</sup>. W metodzie autorskiej cena za jednostkę ciepła wynika z faktur dostawcy ciepła i jest oparta na faktycznej cenie za energię cieplną wyrażoną w zł/kWh. Ponieważ w rozliczeniach są uwzględniane wskazania podzielników kosztów metoda ta stymuluje energooszczędne zachowania mieszkańców.

W oparciu o wyniki liczbowe uzyskane w prezentowanej metodzie autorskiej można wyznaczyć jaka część opłat rozliczana jest na powierzchnię mieszkań, a jaka na podzielniki. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 7. Dotychczasowe dyskusje o metodzie rozliczeń kosztów ogrzewania stosowanej w Polsce grzęzną w kwestii udziału kosztów rozliczanych na powierzchnię mieszkań w kolejnych sezonach grzewczych. Wobec nie uwzględniania aktualnie w Polsce przez firmy rozliczające zależności (1) nie ma tu racjonalnej odpowiedzi.



Rys. 7. Udział kosztów rozliczanych na powierzchnię mieszkań w kolejnych sezonach grzewczych jest wnioskiem wynikającym z autorskiej metody rozliczania kosztów centralnego ogrzewania

Z uzyskanych wyników obliczeń stwierdzić można, że udział kosztów rozliczanych na powierzchnię mieszkań w kolejnych sezonach grzewczych przyjmuje różne wartości w zakresie od około 89,5% do około 94,5% dla rozpatrywanych danych.

Wynika to z faktu, że grzejniki w warunkach rzeczywistych rzadko pracują w stanie podstawowym określonym normami (PN-EN 834:1999; PN-EN 834:2013-12). Podzielniki najczęściej rejestrują znacznie mniej niż to wynika z ilości ciepła oddanego przez grzejnik (Adamski, 2017). Możliwe są również przypadki, że podzielniki rejestrują więcej niż to wynika z ilości ciepła oddanego przez grzejnik (Adamski, 2017).

Udział kosztów rozliczanych na powierzchnię mieszkań w kolejnych sezonach grzewczych jest wnioskiem wynikającym z autorskiej metody rozliczania kosztów centralnego ogrzewania. Nie musi być obliczany, aby w proponowanej metodzie autorskiej wykonać rozliczenia kosztów centralnego ogrzewania.

Natomiast wniosek ten można przenieść do rozliczeń wykonywanych z uwzględnieniem cieczowych podzielników kosztów; udział kosztów rozliczanych na powierzchnię mieszkań lub lokali użytkowych zależnie od sezonu grzewczego dla budynków docieplonych z wielkiej płyty wynosi od około 90 do 95%.



## Literatura

- Adamski M., Rynkowski P. (2015). Należność za ogrzewanie mieszkania odpowiadająca zużyciu ciepła. *Administrator*, 11/2015, 26-29.
- Adamski M. (2017). Pole temperatury powierzchni grzejnika a wskazania podzielnika kosztów. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 10/2017, 418-422.
- Dyrektywa unijna 93/76/EEC ("Europejskie Stowarzyszenie Rozliczania Energii" E.V.V.E), [http://www.evve.com/files/leitfadenevve\\_pdf.pdf](http://www.evve.com/files/leitfadenevve_pdf.pdf), strona 46 pkt 16.1e.
- Michnikowski P., Grzywacz M. (2015). Kryteria sprawdzenia poprawności rozliczania kosztów ogrzewania na podstawie wskazań podzielników. *Rynek Instalacyjny*, 1-2/2015, 71-74.
- Michnikowski P., Skiba J. (2014). Test poprawności rozliczania indywidualnych kosztów ogrzewania na podstawie wskazań nagrzewnikowych podzielników elektronicznych. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 9/2014, 347-351.
- Pieńkowski C. (2006). Indywidualne rozliczanie kosztów ogrzewania mieszkań w budynkach wielorodzinnych. *Wydawnictwo Politechniki Białostockiej*, Białystok.
- Pieńkowski C. (2010). Regulacja kosztów ogrzewania w budynkach wielorodzinnych. *PAN, KILiW, IPPT, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej*, Warszawa – Białystok.
- Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne. *Dz. U. 2018 poz. 755* – tekst jednolity.

## HEATING COST CALCULATIONS ON THE EXAMPLE OF THE SELECTED APARTMENT

**Abstract:** The aim of the research is to present the method of calculations of individual heating costs of flats and business premises regarding the energy law, in which the heating fee corresponds to the consumption of heat and takes into account the indications of electronic cost allocators. Generally, in new buildings or buildings after thermal modernisation, external walls are not a significant component of heat losses. Therefore, the amount of heat lost per 1 m<sup>2</sup> in individual apartments is similar, and the receivables for central heating 1 m<sup>2</sup> of usable space of such flats should be similar. The answer to the question of how large divergences may be in heating for 1m<sup>2</sup> in individual apartments is provided by EU regulations. The presented author's method combines the advantages of using heating cost allocators with the feeling of proper heating cost accounting, which residents have when settling without dividers based on the PLN/m<sup>2</sup> rate. In this method, the price per unit of heat is due to the invoice of the heat supplier. Based on the numerical results obtained in the presented method, it is possible to determine which part of the fees is settled on the surface of flats, and how much on dividers.

Praca została zrealizowana w ramach pracy numer S/WBiŚ/4/2014 i sfinansowana ze środków na naukę MNiSW.

# WSPÓLCZYNNIK FILTRACJI TORFÓW

Iwona CHMIELEWSKA\*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań edometrycznych, których celem było wyznaczenie współczynnika filtracji torfów. Badania edometryczne zostały przeprowadzone na próbkach pobranych z podłoża obwodnicy Bargłowa Kościelnego. Próbki pobrano w kierunku pionowym i poziomym. Badania ścisłości przeprowadzono z użyciem zestawu pięciu edometrów z możliwością automatycznej rejestracji odczytów czujników przemieszczeń. Na podstawie badań wyznaczono: edometryczne moduły ścisłości pierwotnej, współczynniki konsolidacji oraz współczynnik filtracji. Wykazano, że wartości parametrów określonych dla próbek pobranych w kierunku pionowym i poziomym są znacząco różne, co wskazuje na anizotropię torfów. Wartości wyznaczonych parametrów porównano z wartościami podanymi w literaturze.

*Słowa kluczowe:* torfy, współczynnik filtracji, badania edometryczne.

## 1. Wprowadzenie

W związku z rozwojem budownictwa, w szczególności budownictwa drogowego, coraz częstszym problemem jest konieczność wykorzystania pod budowę terenów o trudnych warunkach geotechnicznych, charakteryzujących się występowaniem gruntów organicznych. Przykładem może być budowa obwodnicy Bargłowa Kościelnego, miejscowości leżącej w ciągu drogi krajowej numer 61 w województwie podlaskim.

Na obwodnicy o łącznej długości około 12 km znajdują się dwa odcinki, w których podłożu występują grunty organiczne: jeden o długości 285 m, charakteryzujący się występowaniem torfów i namulów o miąższości do 8 m, a drugi o długości 260 m, na którym w podłożu zalegają grunty organiczne o miąższości do 6 m. Na odcinku drugim dokonano pełnej wymiany słabego gruntu, zaś na odcinku pierwszym wzmocniono podłoże kolumnami piaskowymi w otocze geosyntetycznej GEC (*Geosynthetic Encased Columns*). Przy projektowaniu kolumn GEC konieczna jest znajomość parametrów fizycznych i mechanicznych gruntów słabych, a w szczególności: modułów odkształcenia, współczynnika konsolidacji oraz współczynnika filtracji.

W pracy przedstawiono wyniki badań edometrycznych torfów pobranych z ośmiu różnych miejsc zlokalizowanych na odcinku pierwszym obwodnicy Bargłowa Kościelnego. Dodatkowo z wykopu badawczego pobrano próbki torfów w kierunku poziomym.

Celem pracy jest przedstawienie metodyki

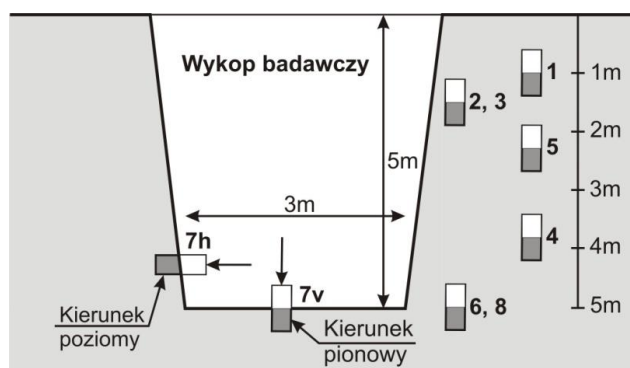
wyznaczania współczynnika filtracji torfów na podstawie badań edometrycznych. Zgodnie ze wzorem podanym między innymi przez: Terzaghię (1943), Heada (1994), Smitha i Smitha (1998) oraz Kowalczyka i in. (2013), współczynnik filtracji może być wyznaczony na podstawie badań ścisłości w oparciu o wartość współczynnika konsolidacji oraz modułu ścisłości. W pracy przedstawiono sposób wyznaczenia tych dwóch parametrów.

Problematykę związaną z wyznaczeniem współczynnika filtracji na podstawie badań ścisłości torfów opisali między innymi Gabryś i Szymański (2010).

## 2. Ogólny opis badań

Próbki torfów do badań pobierano za pomocą cienkościennych cylindrów o średnicy wewnętrznej równej 70 mm. Cylindry wciskano w podłoże w kierunku pionowym i poziomym. W kierunku pionowym pobrano łącznie osiem próbek. Próbkę nr 1 pobrano z głębokości 1,0 m p.p.t., próbki nr 2 i 3 z głębokości około 1,5 m p.p.t., próbkę nr 4 z głębokości około 3,8 m p.p.t., próbkę nr 5 z głębokości 2,3 m p.p.t., natomiast próbki nr 6 i 8 z głębokości około 5,0 m p.p.t. Próbki 7v i 7h pobrano z wykopu badawczego o głębokości 5 m, odpowiednio w kierunku pionowym i poziomym. Próbki pobierano w różnych odległościach od siebie, z terenu obejmującego pierwszy odcinek obwodnicy. Schemat sposobu pobierania próbek przedstawiono na rysunku 1.

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: i.chmielewska@pb.edu.pl



Rys. 1. Schemat pobierania próbek

Górze i dół cylindrów zabezpieczono przed zmianą objętości wywołaną odprężeniem oraz utratą wilgotności na skutek transportu i przechowywania. Oznaczenie podstawowych parametrów fizycznych torfów wykonano w przeciągu tygodnia od momentu pobrania próbek. Natomiast badania edometryczne rozpoczęto po tygodniu od dnia pobrania próbek. Badania ścisłości przeprowadzono za pomocą zestawu pięciu edometrów z możliwością automatycznej rejestracji odczytów czujników przemieszczeń. W edometrach zbadano po pięć próbek pobranych z każdego z dziewięciu cylindrów. Ze względu na niewielkie różnice pomiędzy wynikami badań poszczególnych próbek, prezentowane w pracy wyniki są uśrednionymi wynikami badań dla każdej grupy złożonej z pięciu próbek.

### 3. Parametry fizyczne torfów

Przed przystąpieniem do badań edometrycznych określono wartości następujących parametrów fizycznych torfów: wilgotność  $w$ , ciężar objętościowy  $\gamma$ , gęstość właściwa szkieletu gruntowego  $\rho_s$ , zawartość części organicznych  $I_{om}$  oraz stopień rozkładu.

Wilgotność  $w$  oznacza stosunek masy wody zawartej w porach gruntu do suchej masy stałych cząstek, wyrażony w procentach (PKN-CEN ISO/TS 17892-1 *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 1: Oznaczenie wilgotności*).

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} \cdot 100 = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \quad (1)$$

gdzie:  $m_1$  jest masą pojemnika i próbki w stanie wilgotnym,  $m_2$  jest masą pojemnika i próbki w stanie suchym,  $m_c$  jest masą pojemnika,  $m_w$  jest masą wody, natomiast  $m_d$  jest masą próbki w stanie suchym.

Za suchy grunt uważa się taki grunt, z którego nie da się usunąć więcej wody w temperaturze  $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  (PKN-CEN ISO/TS 17892-1).

Ciężar objętościowy  $\gamma$  badanych torfów wyznaczono zgodnie ze wzorem (PKN-CEN ISO/TS 17892-2 *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 2: Oznaczenie gęstości gruntów drobnoziarnistych*):

$$\gamma = \rho g = \frac{m}{V} g \quad (2)$$

gdzie:  $\rho$  jest gęstością objętościową gruntu,  $m$  jest masą gruntu,  $V$  jest objętością gruntu,  $g$  jest wartością przyspieszenia ziemskiego równą  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Gęstość właściwa szkieletu gruntowego  $\rho_s$  wyraża stosunek suchej masy próbki  $m_d$  do objętości tej masy  $V_d$  (PKN-CEN ISO/TS 17892-3 *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 3: Oznaczenie gęstości właściwej - metoda piknometru*).

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_d} \quad (3)$$

Gęstość właściwą szkieletu gruntowego oznaczono laboratoryjnie metodą piknometru zgodnie z normą PKN-CEN ISO/TS 17892-3.

Zawartość części organicznych  $I_{om}$  w badanych torfach wyznaczono metodą prażenia. Oznaczenie zawartości części organicznych z użyciem metody prażenia polega na wysuszeniu próbki i jej zważeniu ( $m_d$ ). Następnie próbkę poddaje się wypalaniu w wysokiej temperaturze. Po ostygnięciu próbka jest ważona ponownie ( $m_z$ ), a zawartość części organicznych obliczana jest ze wzoru (Lechowicz i Szymański, 2002):

$$I_{om} = \frac{m_d - m_z}{m_d} \cdot 100\% \quad (4)$$

Stopień rozkładu torfów określono z użyciem 10-cio stopniowej skali von Posta. Metoda oceny stopnia rozkładu według tej skali polega na obserwacji torfu ściskanego w dłoni. Podczas ściskania należy zwrócić uwagę na kolor wyciskanej wody, ilość przecięniętej przez palce masy oraz wygląd nierozłożonych części roślinnych (Myślińska, 1999). Zgodnie ze skalą von Posta stopień rozłożenia torfu oznacza się symbolami od  $H_1$  do  $H_{10}$ . Im wyższa wartość indeksu, tym większy jest stopień rozłożenia torfu.

Otrzymane w wyniku przeprowadzonych badań i obliczeń wartości podstawowych parametrów fizycznych torfów przedstawiono w tabeli 1.

### 4. Moduły ścisłości pierwotnej

Próbki torfów badano w edometrach przy różnych wartościach naprężeń pionowych o wartościach: 15, 32, 64, 96, 128 oraz 256 kPa. Ze względu na możliwości techniczne edometrów, próbki o największej ścisłości (4, 7v i 7h) badano przy maksymalnych naprężeniach pionowych równych 64 kPa. Próbki miały średnicę 63,5 mm i wysokość 20 mm.

Zgodnie z normą PKN-CEN ISO/TS 17892-5 *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 5: Badanie edometryczne gruntów* moduły ścisłości pierwotnej  $M_0$  obliczane są dla poszczególnych poziomów naprężeń ze wzoru:

$$M_0 = \frac{\Delta\sigma_{0i}'}{\varepsilon_0} = \frac{\Delta\sigma_{0i}' h_{0i}}{\Delta h_{0i}} \quad (5)$$

gdzie:  $\Delta\sigma_{0i}'$  jest przyrostem naprężeń efektywnych dla

obciążenia pierwotnego,  $\varepsilon_0$  jest odkształceniem względnym dla obciążenia pierwotnego,  $h_{0i}$  jest początkową wysokością próbki dla obciążenia pierwotnego, natomiast  $\Delta h_{0i}$  jest różnicą wysokości próbki wywołaną zmianą obciążenia, dla obciążenia pierwotnego.

Przy znanej wysokości próbki  $h_i$  możliwe jest wyznaczenie wskaźnika porowatości  $e_i$  ze wzoru (Wiłun, 2013):

$$e_i = e_0 - \frac{\Delta h_i}{h_0} (1 + e_0) \quad (6)$$

gdzie:  $\Delta h_i$  jest zmianą wysokości próbki spowodowaną zmianą obciążenia,  $h_0$  jest początkową wysokością próbki,  $e_0$  jest początkowym wskaźnikiem porowatości gruntu wyznaczanym ze wzoru (Wiłun, 2013):

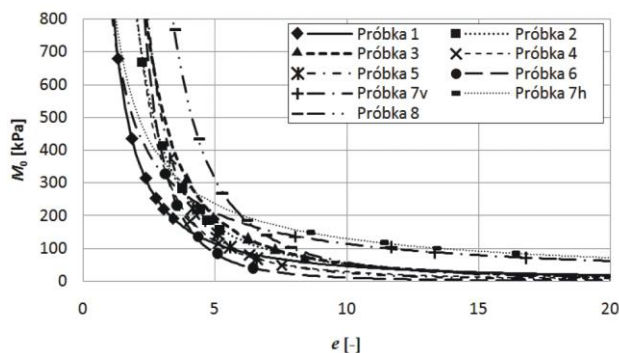
$$e_0 = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \quad (7)$$

gdzie  $\rho_d$  jest gęstością objętościową szkieletu gruntowego wyznaczaną z zależności (PKN-CEN ISO/TS 17892-2):

$$\rho_d = \frac{100\rho}{100 + w} \quad (8)$$

Wartości wskaźnika porowatości odpowiadające poszczególnym poziomom naprężeń przedstawiono w tabeli 2.

Wartości modułów ścisłości zależą przede wszystkim od wielkości naprężeń pionowych. Wraz ze wzrostem naprężeń pionowych zmniejsza się wskaźnik porowatości gruntów  $e$  i rośnie wartość edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej  $M_0$  (rys. 2). Otrzymane z badań uśrednione wartości modułów ścisłości  $M_0$  dla poszczególnych próbek torfów przedstawiono w tabeli 3.



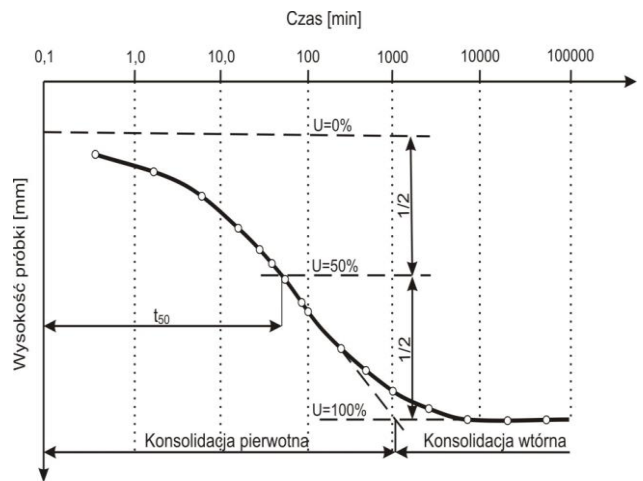
Rys. 2. Zależność edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej  $M_0$  od wskaźnika porowatości  $e$

Najniższe wartości edometrycznych modułów ścisłości pierwotnej określonych w kierunku pionowym otrzymano dla próbek torfów 4, 6 oraz 7v, a najwyższe dla próbek 1 i 2. Jak wynika z rysunku 2 oraz z tabeli 3 wartości modułów ścisłości  $M_0$  dla próbek pobranych w kierunku pionowym są o około 15% mniejsze od wartości tych samych modułów wyznaczonych dla torfów pobranych w kierunku poziomym.

## 5. Współczynnik konsolidacji

Na podstawie badań ściśliwości współczynnik konsolidacji  $c_v$  może być wyznaczony dwiema metodami: Casagrande'a i Taylora (Head, 1994).

W normie PKN-CEN ISO/TS 17892-5 metoda Casagrande'a nazywana jest dopasowaniem krzywej logarytmu czasu. Najważniejszą czynnością, jaką należy wykonać podczas stosowania metody Casagrande'a jest wyznaczenie czasu  $t_{50}$ , czyli czasu 50% konsolidacji (rys. 3). W tym celu należy poprowadzić proste będące przedłużeniem krzywej konsolidacji pierwotnej i wtórnej. Punkt, w którym przetną się proste jest punktem wyznaczającym 100% konsolidacji. Następnie należy poprowadzić dwie proste poziome. Pierwsza z nich ma przechodzić przez początek krzywej konsolidacji, zaś druga przez punkt wyznaczający 100% konsolidacji. Połowa różnicy rzędnych prostych poziomych wyznacza punkt 50% konsolidacji.



Rys. 3. Metoda Casagrande'a wyznaczania współczynnika konsolidacji  $c_v$  (Head, 1994)

W metodzie Casagrande'a współczynnik konsolidacji wyznaczany jest z zależności (PKN-CEN ISO/TS 17892-5):

$$c_v = \frac{0,197L^2}{t_{50}} \quad (9)$$

gdzie: 0,197 jest wartością współczynnika czasu dla stopnia konsolidacji  $U = 0,5$ , zaś  $L$  jest długością drogi odpływu wody (dla próbek z odpływem górą i dołem),  $t_{50}$  jest czasem 50% konsolidacji.

W metodzie Taylora analizuje się zmiany wysokości próbki w zależności od pierwiastka czasu wyrażonego w minutach (rys. 4). Początkowy prostoliniowy odcinek wykresu należy przedłużyć tak, aby przeciął się osią rzędnych. Z powstałego punktu należy poprowadzić prostą, która we wszystkich punktach ma odcięte 1,15 razy większe od tych wyznaczonych przez prostoliniowy odcinek wykresu. Na przecięciu z krzywą konsolidacji powstaje punkt odpowiadający czasowi 90% procent konsolidacji.



Tab. 1. Parametry fizyczne torfów

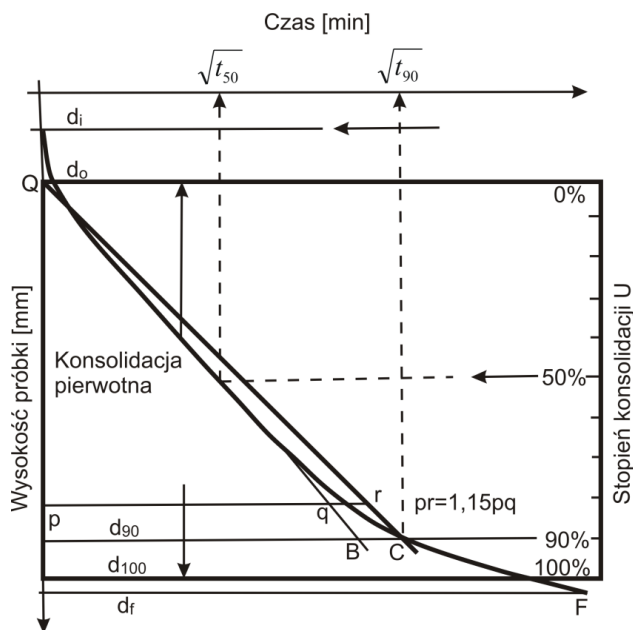
Numer próbki	Wilgotność $w$	Ciężar objętościowy $\gamma$	Gęstość właściwa $\rho_s$	Zawartość części organicznych $I_{om}$	Stopień rozkładu
	[%]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[%]
1	236,5	11,3	1,47	90,6	40 - 50
2	320,2	10,2	1,49	88,2	60 - 70
3	465,4	8,9	1,47	90,7	40 - 50
4	449,0	9,4	1,46	92,4	60 - 70
5	315,8	9,4	1,70	64,2	70 - 80
6	315,8	9,4	1,70	64,2	70 - 80
7v	941,0	8,3	1,42	97,9	20 - 30
7h	965,1	8,8	1,43	97,4	20 - 30
8	451,4	9,3	1,49	88,6	70 - 80

Tab. 2. Wskaźniki porowatości badanych torfów

Napięcie pionowe [kPa]	Wskaźnik porowatości $e$ [-]								
	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Próbka 4	Próbka 5	Próbka 6	Próbka 7v	Próbka 7h	Próbka 8
0	3,399	5,164	8,390	7,532	6,565	6,447	16,810	16,308	7,874
15	3,048	4,696	7,270	6,308	5,559	5,092	13,337	13,293	6,929
32	2,743	4,442	6,251	5,139	5,103	4,355	11,690	11,313	6,192
64	2,376	3,754	4,925	4,053	4,144	3,554	8,047	8,503	5,269
96	-	-	-	-	-	3,113	-	-	-
128	1,829	2,998	3,920	-	3,289	-	-	-	4,366
256	1,309	2,229	-	-	-	-	-	-	3,455

Tab. 3. Wartości edometrycznych modułów ścisłości pierwotnej

Napięcie pionowe [kPa]	Edometryczne moduły ścisłości pierwotnej $M_0$ [kPa]								
	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Próbka 4	Próbka 5	Próbka 6	Próbka 7v	Próbka 7h	Próbka 8
0	191,4	154,6	71,1	47,3	66,9	38,5	71,0	85,0	101,0
15	219,9	184,6	99,6	78,8	102,9	83,5	86,0	99,6	140,0
32	252,2	218,6	131,9	114,5	143,7	134,5	103,0	116,6	184,2
64	313,0	282,6	192,7	181,7	220,5	230,5	135,0	148,6	267,4
96	-	-	-	-	-	326,5	-	-	-
128	434,6	410,6	314,3	-	374,1	-	-	-	433,8
256	677,8	666,6	-	-	-	-	-	-	766,6



Rys. 4. Metoda Taylora wyznaczania współczynnika konsolidacji  $c_v$  (Head, 1994)

W metodzie Taylora współczynnik konsolidacji  $c_v$  wyznaczany jest ze wzoru (PKN-CEN ISO/TS 17892-5):

$$c_v = \frac{0,848L^2}{t_{90}} \quad (10)$$

gdzie: 0,848 jest wartością współczynnika czasu dla stopnia konsolidacji  $U = 0,9$ , zaś  $t_{90}$  jest czasem 90% konsolidacji.

Jeżeli temperatura w laboratorium w trakcie prowadzenia badań znacząco różni się od 20°C, należy zastosować poprawkę  $f_T$ , której wartość podaje norma PKN-CEN ISO/TS 17892-5.

W przypadku, gdy znany jest aktualny czas odpowiadający danemu stopniowi konsolidacji, współczynnik  $c_v$  może być wyznaczony z zależności (Head, 1994):

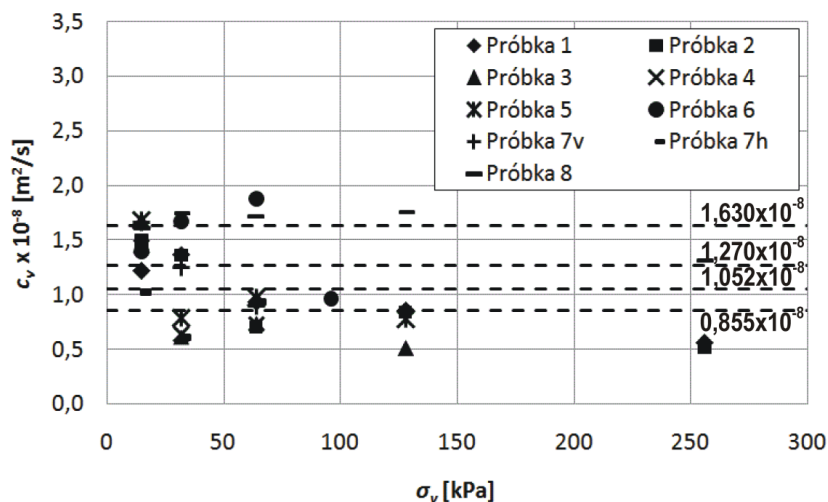
$$c_v = T_v \frac{L^2}{t} \quad (11)$$

gdzie:  $T_v$  jest współczynnikiem czasu odczytanym z tablicy w zależności od stopnia konsolidacji  $U$ ,  $t$  jest czasem odpowiadającym danemu stopniowi konsolidacji.

Obliczone dla badanych torfów współczynniki konsolidacji  $c_v$  wyznaczone na podstawie wzoru (11) przedstawiono w tabeli 4 i na rysunku 5.

Tab. 4. Wartości współczynników konsolidacji  $c_v$

Napężenie pionowe [kPa]	Współczynniki konsolidacji $c_v \times 10^{-8}$ [m <sup>2</sup> /s]								
	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Próbka 4	Próbka 5	Próbka 6	Próbka 7v	Próbka 7h	Próbka 8
15	1,222	1,491	1,681	1,438	1,682	1,392	1,660	1,023	1,606
32	1,371	1,357	0,611	0,635	0,784	1,667	1,252	0,607	1,749
64	0,930	0,697	0,741	0,731	0,974	1,879	0,897	0,934	1,719
96	-	-	-	-	-	0,959	-	-	-
128	0,857	0,837	0,510	-	0,777	-	-	-	1,759
256	0,558	0,511	-	-	-	-	-	-	1,316



Rys. 5. Zależność współczynnika konsolidacji  $c_v$  od napężenia pionowego

Według Smitha i Smitha (1998) wartość współczynnika konsolidacji jest stała i nie zależy od wielkości naprężeń pionowych. Zatem do dalszych obliczeń przyjęto stałą wartość współczynnika konsolidacji będącą średnią wartością otrzymaną z badań próbek. Dla próbek torfów o numerach od 1 do 6 średnia wartość współczynnika konsolidacji wyniosła  $c_v = 1,052 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  (rys. 5). Wartość współczynnika konsolidacji dla próbek 7v jest równa  $c_{v,v} = 1,270 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , natomiast dla próbek 7h,  $c_{v,h} = 0,855 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  (rys. 5). Dla próbki 8 wartość współczynnika konsolidacji wynosi  $c_v = 1,630 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  (rys. 5). Otrzymane z badań wartości współczynników konsolidacji torfów są porównywalne z wartościami przedstawionymi przez Gabryś i Szymańskiego (2010) oraz przez Malinowską i in. (2013).

Współczynniki konsolidacji próbek torfów 7v, pobranych w kierunku pionowym, są o około 50% większe od tych samych współczynników wyznaczonych dla próbek 7h, które pobrano w kierunku poziomym.

## 6. Współczynnik filtracji

Współczynnik filtracji torfów mieści się w szerokim

przedziale od około  $10^{-10}$  do  $10^{-3} \text{ m/s}$  (Borys, 1993). Na wartość współczynnika filtracji torfów mają wpływ: rodzaj torfu oraz stopień rozkładu. Wraz ze wzrostem stopnia rozkładu maleje współczynnik filtracji (Borys, 1993). Wartość współczynnika filtracji zależy również od wskaźnika porowatości  $e$ . Im wyższa jest wartość wskaźnika porowatości, tym większą wartość przyjmuje współczynnik filtracji. Powszechnie przyjmuje się, że wartość współczynnika filtracji jest proporcjonalna do  $e^3/(1+e)$  (Shahabi i in., 1984; Carrier, 2003; Chapuis, 2012).

W oparciu o badania ściśliwości gruntów, współczynnik filtracji może być wyznaczony ze wzoru (Terzaghi, 1943; Head, 1994; Smith i Smith, 1998; Kowalczyk i in., 2013):

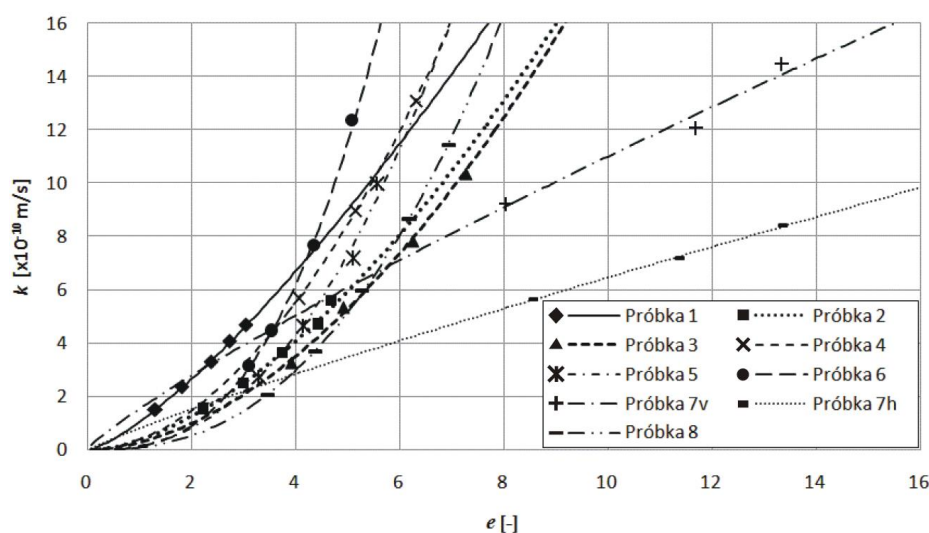
$$k = \frac{c_v \gamma_w}{M_0} \quad (12)$$

gdzie  $\gamma_w$  jest ciężarem objętościowym wody.

Wartości współczynnika filtracji wyznaczone na podstawie wzoru (12) przedstawiono w tabeli 5. Natomiast zależność współczynnika filtracji  $k$  od wskaźnika porowatości  $e$  przedstawiono na rysunku 6.

Tab. 5. Wartości współczynników filtracji  $k$  wyznaczone na podstawie wzoru (12)

Naprężenie pionowe [kPa]	Współczynniki konsolidacji $k \times 10^{-10} \text{ [m/s]}$								
	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Próbka 4	Próbka 5	Próbka 6	Próbka 7v	Próbka 7h	Próbka 8
15	4,693	5,591	10,362	13,097	10,029	12,359	14,487	8,421	11,422
32	4,092	4,721	7,824	9,013	7,182	7,673	12,096	7,193	8,681
64	3,297	3,652	5,356	5,680	4,680	4,477	9,229	5,644	5,980
96	-	-	-	-	-	3,161	-	-	-
128	2,375	2,513	3,284	-	2,759	-	-	-	3,686
256	1,523	1,548	-	-	-	-	-	-	2,086



Rys. 6. Zależność współczynnika filtracji  $k$  od wskaźnika porowatości  $e$

Najwyższe wartości współczynnika filtracji określonego w kierunku pionowym uzyskano dla próbek torfów o numerach: 4, 6, 7v. Najniższe wartości współczynnika filtracji otrzymano dla próbek 1 oraz 2. Wyznaczone wartości współczynnika filtracji torfów są zbliżone do przedstawionych przez Gabryś i Szymańskiego (2010).

Współczynnik filtracji próbki 7v, pobranej w kierunku pionowym, jest o około 70% wyższy od współczynnika filtracji próbki 7h, pobranej w kierunku poziomym.

## 7. Podsumowanie

Badania wykazały dużą zmienność współczynnika filtracji w zależności od wskaźnika porowatości torfów. Zależność ta jest najbardziej widoczna dla próbki torfu numer 8, dla której nastąpiło ponad pięciokrotne zmniejszenie współczynnika filtracji po badaniu ściśliwości.

W przypadku próbek torfów o numerach od 1 do 6 oraz próbki numer 8 widoczna jest nieliniowa zależność pomiędzy współczynnikiem filtracji i wskaźnikiem porowatości. Dla próbek torfów 7v i 7h zależność współczynnika filtracji od wskaźnika porowatości jest zbliżona do liniowej.

Dla badanych torfów nie można powiązać wielkości współczynnika filtracji ze stopniem ich rozkładu, gdyż największą wartość współczynnika filtracji w kierunku pionowym otrzymano zarówno dla torfów o największym (próbka numer 6), jak i najmniejszym stopniu rozkładu (próbki 7v).

Przeprowadzone badania wykazały dużą ściśliwość badanych torfów. Największą ściśliwością określoną w kierunku pionowym charakteryzują się próbki 7v, o najmniejszym stopniu rozkładu. W trakcie badania nastąpiło ponad dwukrotne zmniejszenie wskaźnika porowatości określonego dla tych próbek.

Badania ściśliwości próbek torfów 7v i 7h wykazały, że badane torfy są anizotropowe. Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej próbek pobranych w kierunku pionowym jest o około 15% mniejszy od tego samego parametru określonego dla próbek pobranych w kierunku poziomym. Współczynnik konsolidacji określony dla próbek 7v jest o około 50% większy od współczynnika konsolidacji wyznaczonego dla próbek 7h. Natomiast wartość współczynnika filtracji dla próbek pobranych w kierunku pionowym jest o około 70% wyższa od wartości współczynnika filtracji określonej dla próbek pobranych w kierunku poziomym.

Badania przeprowadzone na dziewięciu próbkach torfów wykazały duże różnice w wartościach tych samych parametrów określonych dla poszczególnych próbek. Największe różnice są widoczne w wartościach wilgotności naturalnej, wskaźnika porowatości, edometrycznego modułu ściśliwości pierwotnej oraz współczynnika filtracji.

## Literatura

- Borys M. (1993). Niskie nasypy z miejscowych gruntów organicznych dla potrzeb budownictwa wodno-melioracyjnego. *Wydawnictwo IMUZ*, Falenty.
- Carrier W. D. (2003). Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 11, 1054-1056.
- Chapuis R. P. (2012). Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 71, No. 3, 401-434.
- Gabryś K., Szymański A. (2010). The analysis of consolidation in organic soils. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW*, Vol. 42, No. 2, 261-270.
- Head K. H. (1994). Manual of soil laboratory testing. Vol. 2. *John Wiley & Sons*, New York - Toronto.
- Kowalczyk S., Szczepański T., Dobak P. (2013). Charakterystyka rozkładu ciśnienia porowego w badaniach konsolidacji past gruntowych z północnopolskich glin zwałowych. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Vol. 4, Nr 2, 127-134.
- Lechowicz Z., Szymański A. (2002). Odształcenia i Stateczność Nasypów na Gruntach Organicznych. Cz. I: Metodyka badań. *Wydawnictwo SGGW*, Warszawa.
- Malinowska E., Bursa B., Chmielnicki P., Dziuba W. (2013). Wyznaczanie współczynnika konsolidacji pionowej i poziomej w słabonośnych gruntach organicznych. *Acta Scientiarum Polonorum: Architectura*, Vol. 12, No. 1, 63-74.
- Myślińska E. (1999). Parametry fizyczne torfów i ocena metod ich oznaczania. *Przegląd Geologiczny*, Vol. 47, Nr 7, 676-682.
- Shahabi A. A., Das B. M., Tarquin A. J. (1984). Empirical relation for coefficient of permeability of sand. *Proc. 4th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, Vol. 84, No. 2, 54-57.
- Smith G. N., Smith I. G. N. (1998). Elements of Soil Mechanics. 7<sup>th</sup> Ed., *Blackwell Science*, Oxford.
- Terzaghi K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. *John Wiley & Sons, Inc.*, New York - London.
- Wiłun Z. (2013). Zarys Geotechniki. *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ*, Warszawa.

## COEFFICIENT OF PERMEABILITY OF PEAT

**Abstract:** The paper presents the results of oedometer tests of peat samples. The aim of the research was to determine coefficient of permeability of peat. The oedometer tests were carried out on samples taken from the subsoil of Bargłów Kościelny bypass road. Samples were taken in the vertical and horizontal directions. The oedometer tests were conducted using a set of five oedometers with the possibility of automatic registration of displacement sensor readings. On the basis of test results the oedometric modulus of primary compression, consolidation coefficient and the coefficient of permeability were determined. It was shown that the values of parameters determined for samples taken in the vertical and horizontal directions were significantly different. The values of the determined parameters were compared with the values given in the literature.

Badania zostały zrealizowane w Politechnice Białostockiej w ramach pracy nr MB/WBiŚ/1/2015 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.



# MILD PYROLYSIS OF COALS AND ITS IMPACT ON POSSIBLE MERCURY RELEASES FROM PULVERISED COAL-FIRED POWER PLANTS

Maciej CHOLEWIŃSKI\*

The Faculty of Mechanical and Power Engineering, Wrocław University of Science and Technology,  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland

**Abstract:** The paper concerns the impact of mild pyrolysis of coals on the possible mercury releases from the combustion process. It was proven that while mild pyrolysis may lead to the decrease of mercury content in solid fuel (from 0 do even 80% of dry mass), the resulting increased SO<sub>2</sub>/HCl ratio in flue gasses may be disadvantageous in the case of the mercury oxidation as well. However, when optimised, for analysed lignites, this type of thermal pre-combustion technique could satisfy up to 4-26% of mercury decrease requirements while for analysed hard coal it seems to be pointless to adopt it within power plant. Therefore, the environmental benefits of mild pyrolysis will be strongly depend on the type of fuel (i.e. mercury compounds in dry matter) and the conditions (time, temperature) of the process.

*Key words:* mercury, coal combustion, fuel pre-treatment, limiting the emissions.

## 1. Introduction

The current transformation of Polish fuel and power sectors, basically focused on the reorganisation of emission-intensive plants (promoting environmental friendly technical layouts) and their progressive substitution by Renewable Energy Sources (RES) and nuclear units, is accompanied by the introduction of several strict new environmental standards (Wierzbowski et al., 2017; Commission Implementing Decision (EU) 2017/1442). Due to the high generation of electricity (81% of total production in Poland in 2015) and heat (approx. 75% of heat generation located in professional heat units) in coal-fired boilers, particular attention – in the case of environmental protection – has been already paid on the evaluation of cost-efficient pollutant control techniques dedicated to both bituminous coal and lignite fuelled power stations (Central Statistical Office, 2016; Hławiczka, 2008). Including current quantities of national emissions and forecasted thresholds, it can be assumed, that in order to adopt future electricity, heat

and cooling supply market to the strict international regulations (i.e. Emissions Trading System (ETS), annual national emission levels, multiple emission standards), several new investments in Polish power sector need to be introduced in the near future – particularly in the case of the heavy metals releases Large Combustion Plants (LCP) (The National Centre For Emissions Management, 2017). Within the next 3-4 years, all professional coal boilers (units with a total rated thermal input of 50 MW and more) will be obligated to meet, among others, strict mercury Best Available Techniques - Associated Emission Levels (BAT-AELs), established 31 July 2017 by the Commission Implementing Decision (EU) 2017/1442 (Table 1). Comparing them to the recorded concentrations of mercury in flue gases in full scale power units (Wang et al., 2010; Burmistrz et al., 2016; Cholewiński, 2017), it can be stated that several of the existing power stations will be forced in the near future to take decisive actions towards the reduction of mercury releases to the atmosphere.

Table 1. BAT-associated emission levels for mercury emissions to air from the combustion of coal and lignite (Commission Implementing Decision 2017/1442 of 31 July 2017).

Total rated thermal input of power plant, MW	BAT-AELs – yearly average or average of samples obtained during one year, µg/m <sup>3</sup> <sub>ref</sub>			
	New plant		Existing plant	
	Bituminous	Lignite	Bituminous	Lignite
< 300	< 1 – 3	< 1 – 5	< 1 – 9	< 1 – 10
≥ 300	< 1 – 2	< 1 – 4	< 1 – 4	< 1 – 7

Explanations: BAT-AELs refer to concentrations, expressed as mass of emitted substance per volume of flue-gas under the following conditions: dry gas, temperature of 273,15 K, pressure of 101,3 kPa, reference O<sub>2</sub> concentration (6% for combustion of solid fuels).

\* Corresponding author, e-mail: maciej.cholewinski@pwr.edu.pl

The mercury control techniques dedicated to solid fuel fired units (Figure 1) covers both pre- and post-combustion technologies. Importantly, the adaptation of each of them need to be preceded by an examination of the working conditions of power system. One of the most vital aspects for the proper introduction of mercury reduction technology is a deep knowledge of the properties of solid fuel used in power unit. When favourable – from mercury emission point of view – coal or biomass is used, it may be possible to meet strict emission standards in a cost-effective way or – in extreme cases – even without additional cost. On the other hand, when the physicochemical properties of solid fuel lead to the disadvantageous composition of flue gases, significantly more expensive and sophisticated technologies will be required to adopt the real-time mercury releases to the thresholds specified in emission standards (Hławiczka, 2008; Cholewiński, 2015). According to many papers, in order to guarantee profitable conditions to mercury capture within power plant, solid fuel should be characterised – much simplified– by low mercury and sulphur content, high chlorine content and high calorific value (Cholewiński, 2017). For instance, to decrease the mercury concentration in flue gas, energy carriers with low mercury content (naturally or after pre-combustion treatment) should be used. However, to guarantee the mercury uptake from the flue gases with reduced mercury quantity, sufficiently low concentration of SO<sub>2</sub> and relatively high of chloride or bromide compounds – in combination with highly efficient precipitators and wet scrubbers (absorbers) – should be provided as well (Rhee, 2016). Only when abovementioned optimisation – using appropriate solid fuel and co-beneficial Hg capture in Electrostatic Precipitator (ESP) or Flue Gas Desulphurisation (FGD)

units – is insufficient to fulfil emission standards, several specific techniques need to be introduced, i.e. sorbent or halogenated additives injection, additional catalysers and absorbers/adsorbers, the reorganisation of combustion process (Hławiczka, 2008; Pan et al., 2013;). This fact has been already confirmed by several independent research – it has been proved that biomass and bituminous coals seem to be more suitable fuels in the case of mercury uptake than lignites (Hławiczka, 2008; Wang et al., 2010; Burmistrz et al., 2016).

As abovementioned, when the composition of raw (natural) solid fuel does not promote the adaptation of co-beneficial mercury uptake methods as a sufficient combination to meet emission standards, it may be beneficial to introduce one of the pre-combustion treatment technologies (when economically and environmentally justified). Apart from washing and mechanical preparation, an interesting technique, that may lead to the reduction of mercury content in raw fuel and to the transformation of dry matter towards more advantageous physicochemical properties, are thermal methods, i.e. mild pyrolysis. Basically, mild pyrolysis consists on thermal (<500-600°C) treatment of solid fuel in the absence of oxygen or in oxidising atmosphere (only when the temperature of the process is kept below ignition temperatures of the fuel). These conditions – if selected precisely (among others temperature, time of resistance, atmosphere, speed of heating medium) to the specification of a solid fuel (including its form and the type of mercury compounds) – should promote the significant mercury releases from solid material to pyrolytic gas and low degradation of final energy product (Liu et al., 2010). However, to cover an integrated protection of atmosphere, all mercury released during the mild pyrolysis should be captured as it should take place in power plant.

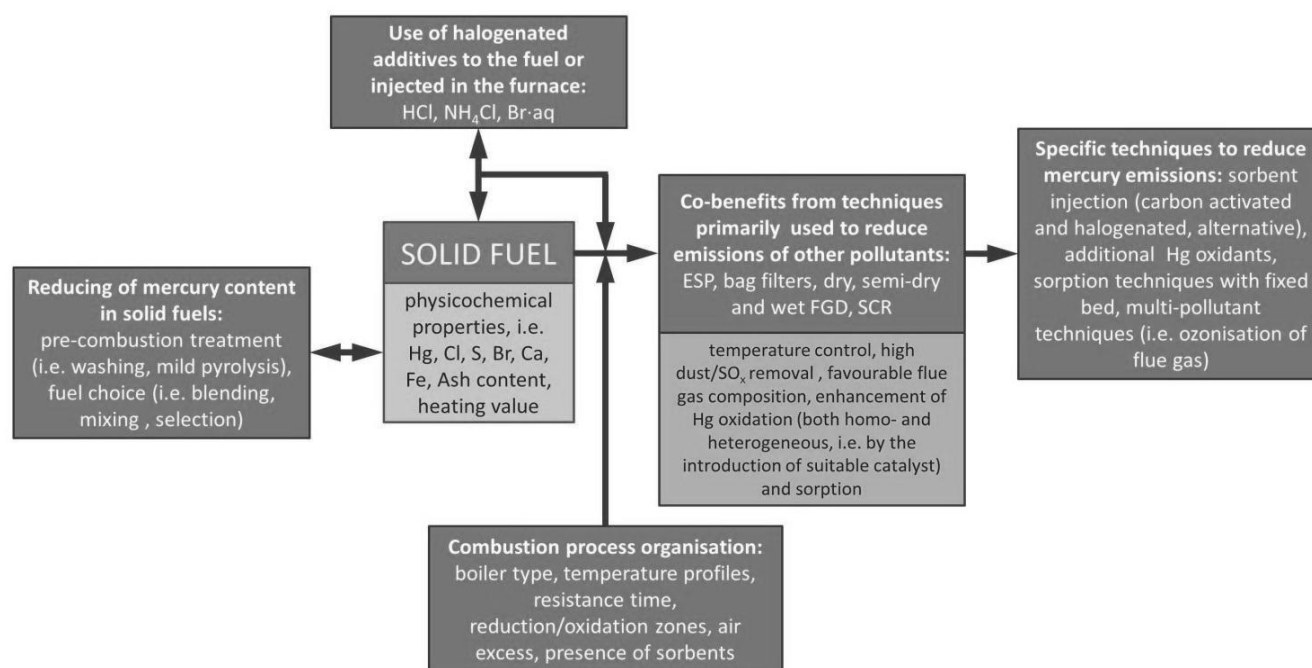


Figure 1. The overview of mercury control techniques and the places of application in power unit in solid fuel fired power plant.

Fortunately, due to the higher concentration of mercury in pyrolytic gases – in comparison to flue gas released from power boiler, its uptake using i.e. adsorption techniques (with fixed bed or impregnated plates) may be performed at lower total costs. As a result, when mild pyrolysis process is cost-optimised (regarding thermal insulation of a reactor, source of heat, own consumption), controlling mercury emissions by its introduction within power plant may lower the investment and running costs in comparison to post-combustion mercury control devices (sorbents or halogenated additives injection).

Importantly, according to Liu et al. (2010) suggested, that during mild pyrolysis, a main form of mercury in pyrolytic gases is elemental one ( $Hg^0$ ). Therefore, to increase the economy of its uptake from pyrolytic gases, some oxidising techniques seem to be necessary to be implemented.

Depending on the types of mercury components in raw materials, the influence of mild pyrolysis in selected temperature should vary from 0 to nearly 80-90% – according to Luo et al. (2013), mercury accumulated in coals can be released below 150°C (elemental form), between 150-250°C ( $HgCl_2$ , organic-bound compounds), between 250-400°C ( $HgS$ , silicate-bounded forms) or only when the temperature is raised to 400-600°C (pyrite-bounded mercury compounds). Therefore, the higher concentration of mercury compounds with low release temperatures, the lower mild pyrolysis temperature is required to get accepted mercury reduction rate or the higher possible reduction of total mercury concentration in final energy product can be obtained for given temperature of the process.

To examine all these aspects, lab-scale tests concerning thermal processing of different coals were conducted. In this article the impact of low temperature (<300°C) mild pyrolysis in air atmosphere in muffle furnace on the mercury content for 4 Polish coals (2 lignites and 2 hard coals) was analysed. Lab tests represented the atmospheric reactor combined with a conveyor belt as a feeding system dedicated to the

pulverised materials.

Two values of the times of pyrolysis process (30 min and 90 min) and 5 temperatures (100, 150, 200, 250, 300°C) were taken into account in order to detect the influence of mild pyrolysis parameters on possible mercury removal. Moreover, for 2 selected coals (1 lignite and 1 hard coal), additional assessments were conducted to predict the impact of mild pyrolysis on the mercury concentration in solid products (chars) and to assess the composition of flue gases released from the combustion process. To determine the changes within flue gas composition, stoichiometric mathematical model of combustion process was harnessed.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Proximate and ultimate analysis

To characterise the coals, proximate and ultimate analysis were conducted (according to PN/EN standards). All gravimetric tests – total moisture content in solid fuel ( $W$ ), free moisture content in solid fuel ( $W_{ex}$ ), ash content in solid fuel ( $A$ ), volatile matter content in solid fuel ( $V$ ) – were implemented using CARBOLITE CWF 1300 muffle furnace and laboratory scales sensitive to 0,1 mg. To determine C, H, N, S, Hg in solid fuels, dedicated atomic absorption spectrometers (AAS; LECO TruSpec CHN and S, LECO AMA 254) were harnessed. The higher heating value of solid fuel (HHV) were examined using IKA C-2000 Basic calorimeter. To identify the Cl in solid material, ion chromatography unit THERMO Dionex ICS-1100 was combined with the calorimeter bomb (deionised water with absorbed ions was investigated). Finally, fixed carbon content in solid fuel (FC), lower heating value of solid fuel (LHV) and oxygen content in solid fuel were calculated from the mass balance. Test stands used in analyses were presented in Figure 2.



Figure 2. The lab equipment used in presented researches (from the left: muffle furnace; atomic absorption spectrometer – AAS - dedicated to the determination of carbon, hydrogen, nitrogen and sulphur content in solid materials; calorimeter bomb; AAS dedicated to the determination of mercury content in solid materials; ion chromatograph).

In order to analyse the physicochemical composition of the chars (quoted as HC 1 and L 1), selected properties (C, H, N) were evaluated using aforementioned equipment. To calculate the HHV, simplified formulae based on the proximate and ultimate analysis were introduced – according to Ferens (2014), Neavel et al. (1986) formula seems to be the most accurate equation to determine the calorific value of bituminous coals, while Yin (2011) one – to lignites. Due to the negligible releases of selected components of solid fuels during the mild pyrolysis at the temperatures below 300°C, sulphur and ash contents in the chars were calculated using its initial values (in raw material) and observed mass decrease of samples after the thermal process. Finally, it was assumed that chlorine content in chars was the same as in the raw material (there was no significant releases of Cl during the pyrolysis).

All proximate and ultimate analysis of solid fuels were conducted in the Chair of Energy Technologies, Turbines and Modelling of Thermal and Fluid Flow Processes, at Wrocław University of Science and Technology. Some of the properties of raw materials investigated in this paper (HC 1, HC 2, L 2) have been already published i.e. by Moroń (2014) or Czajka et al. (2016).

A more detailed description of the conducted laboratory tests can be found in the papers released by Cholewiński (2015), Czajka et al. (2016) and Moroń et al. (2016).

## 2.2. Mild pyrolysis

Mild pyrolysis was conducted in the atmosphere of air in a controllable muffle furnace CARBOLITE CWF 1300. 1 g samples of examined coals (in dry state) were placed in a flat ceramic trays (dedicated to the ash content determination according to PN-ISO 1171:2002). Solid fuels at room temperature were inserted into the furnace and maintained at given process temperature (in a closed chamber) for a specified time (30 or 90 min). After the process, the mass reduction rate of each sample was determined. The air and pyrolytic gas circulation were hold by natural draught and small exhaust fan (mainly in order to remove the pyrolytic gases from the furnace).

## 2.3. Mathematical model of combustion chamber

To simulate the composition of the flue gases released from the combustion chamber, simplified stoichiometric mathematical model (1) dedicated to pulverised boilers and solid fuels was used (Cholewiński 2017):

$$\begin{aligned} & 8.33 \cdot 10^{-2} a C + 0.5 b H_2 + 3.57 \cdot 10^{-2} c N_2 + 3.13 \cdot 10^{-2} d S \\ & + 3.13 \cdot 10^{-2} e O_2 + 5.56 \cdot 10^{-2} f H_2O + 4.98 \cdot 10^{-3} g Hg \\ & + 3.13 \cdot 10^{-2} h Cl + \lambda M_s (O_2 + 3.76 N_2) = \quad (1) \\ & = n_1 CO_2 + n_2 H_2O + n_3 O_2 + n_4 N_2 \\ & + n_5 SO_2 + n_6 HCl + n_7 Hg + n_8 C \end{aligned}$$

where: *a-h* – different constituents contents (weigh fraction) in fuel (*a* – carbon, *b* – hydrogen, *c* – nitrogen,

*d* – sulphur, *e* – oxygen, *f* – moisture, *g* – mercury, *h* – chlorine), *n<sub>i</sub>* – calculated number of moles of selected component accumulated in flue gas from combustion process of 1 g of fuel (1 – carbon dioxide, 2 – water vapour, 3 – oxygen, 4 – nitrogen, 5 – sulphur dioxide, 6 – hydrogen chloride, 7 – elemental mercury, 8 – average carbon in fly ash and in slag – fixed at 3.5%), and *M<sub>s</sub>* is number of moles of oxygen per 1 mole of fuel in stoichiometric conditions. In all calculations, air-fuel equivalence ratio  $\lambda$  was equal to 1.2.

To simulate one of the existing power plants, 200 MW class power unit with pulverised fuel boiler, total average net efficiency of 40% and 300 working days (annual capacity ratio 82% – 7,200 hr) per year were adopted. To calculate the dust concentration in raw flue gas  $S_{dust}$  (in reference gas conditions), empirical equation (2) were implemented (Cholewiński 2017):

$$S_{dust} = \left( 100 A^f L_{dry} a_u + \frac{C_{fa}}{L_{dry} B} \right) \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} \quad (1)$$

where:  $S_{dust}$  is fly ash concentration in g/m<sup>3</sup>ref,  $L_{dry}$  is the quantity of dry flue gas per 1 kg of fuel,  $a_u$  is the ratio of the quantity of mineral matter accumulated in fly ash to total mineral matter in received fuel,  $C_{fa}$  is the stream of carbon accumulated in fly ash, in kg/s,  $B$  is fuel consumption in kg/s,  $O_2$  is oxygen concentration in raw flue gas, and  $O_2^{ref}$  is reference oxygen concentration in flue gas.

To simulate pulverised fuel combustion chamber, the value of  $a_u$  was fixed at 0.9,  $C_{fa}$  – at 4%,  $O_2^{ref}$  – at 6%. Furthermore, in all further calculations concerning combustion of chars, moisture content of 1% was established. For the coals the values for received (upper index "r") state were used.

## 3. Results

The results reported in Tables 2-6 and Figures 3-5 represent the average values of selected properties of the solid materials. Due to high homogenisation of air-dried samples, the diversity of results obtained during the laboratory tests was relatively low (Standard Deviation < 4-5%). As a result, the uncertainty analysis was not included in this paper.

### 3.1. Properties of the coals

In Table 2 and Table 3, the results of proximate and ultimate analysis were presented. It was shown, that from mercury emission point of view, hard coals and lignites may differ significantly. For instance, lower concentrations of Hg (almost 10-times) and significantly higher of chlorine (10-15 times) in two selected hard coals will promote both lower Hg concentrations in flue gas and higher oxidation rate of gaseous Hg (represents i.e. by SO<sub>2</sub>/HCl or HCl/Hg<sub>(tot)</sub> ratios in flue gas) in comparison to two selected lignites. Moreover, the values of Hg, S and Cl may differ even within the same



group of solid fuels as well.

The increased moisture and ash contents may be treated as significant disadvantage – high moisture content leads to the decrease of LHV of the fuel, uncontrollable saturation of water from flue gas and increased quantity of flue gas (resulting in increased energy consumption of fans), while ash content – to higher stream of solid wastes (that need to be finally utilized or stored) and increased efficiency of precipitators. However, for gaseous mercury, in some specified conditions – i.e. higher  $Hg^{2+}$  presence, fly ash can be a valuable natural

sorbent, therefore its presence must be conducted in two areas (including among others the composition of fly ash).

In Figure 3 the graphical comparison of 4 analysed fuels was highlighted. More aspects concerning the impact of each of the property of solid fuel on combustion process and emission issues have been sufficiently presented by Kordylewski (2008) and Rybak (2006). To compare the obtained values with another coals, publications of Hławiczka (2008), Cholewiński (2015) or Burmistrz et al. (2016) can be taken into account.

Table 2. Ultimate analysis of selected fuels (air-dried samples).

Fuel	C	H	N	S	O	Hg	Cl
	wt%					ppb	wt%
hard coal 1	75.7	4.3	1.2	1.2	5.6	66	0.31
hard coal 2	62.5	4.0	1.1	0.9	5.1	166	0.20
lignite 1	51.9	3.7	0.5	1.1	18.3	513	0.02
lignite 2	59.0	4.8	0.5	1.3	14.9	306	0.02

Table 3. Proximate analysis and calorific values of selected fuels (air-dried samples).

Fuel	W	W <sub>ex</sub>	A	V	FC	HHV	LHV
	wt%					MJ/kg	
hard coal 1	3.1	3.7	8.6	32.7	55.6	25.7	24.7
hard coal 2	0.8	12.1	25.4	25.7	48.1	25.2	24.3
lignite 1	8.1	44.6	16.4	41.8	33.7	19.9	18.9
lignite 2	2.0	36.3	17.5	46.6	33.9	22.8	21.7

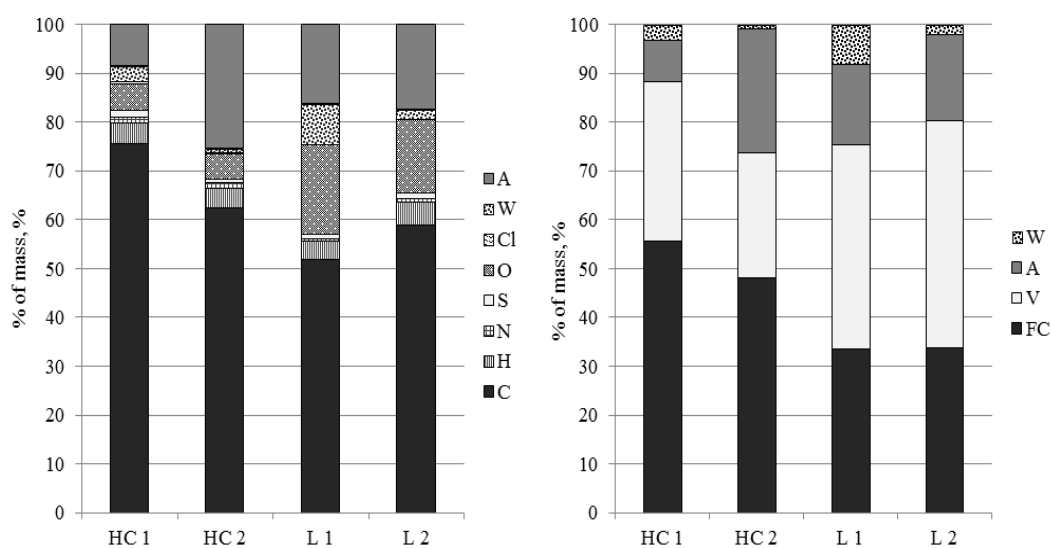


Figure 3. Proximate and ultimate analysis of analysed coals.

### 3.2. Properties of the chars

In Table 4 mercury contents in chars generated in different temperatures and times were presented. Importantly, the impact of both temperature and time of pyrolysis on Hg presence in final solid product seems to vary significantly depending on the processed fuel (Figure 4.). The changes of mercury content in the cases of L 2 and HC 2 appear to be less sensitive to time (there is no need to increase the time from 30 min to 90 min, that may be beneficial in increasing of the capacity of the whole reactor) and more sensitive to temperature (higher temperature means higher mercury releases). Significant decrease of mercury content for each of the fuels during the 90 min pyrolysis was noticed for the temperatures above 200°C, that may be explained by the high contents of HgS, silicate- and pyrite-bounded mercury compounds in analysed fuels.

Differences between mercury contents between different temperatures and the same times might be an indicator of the further mercury removal potential (some

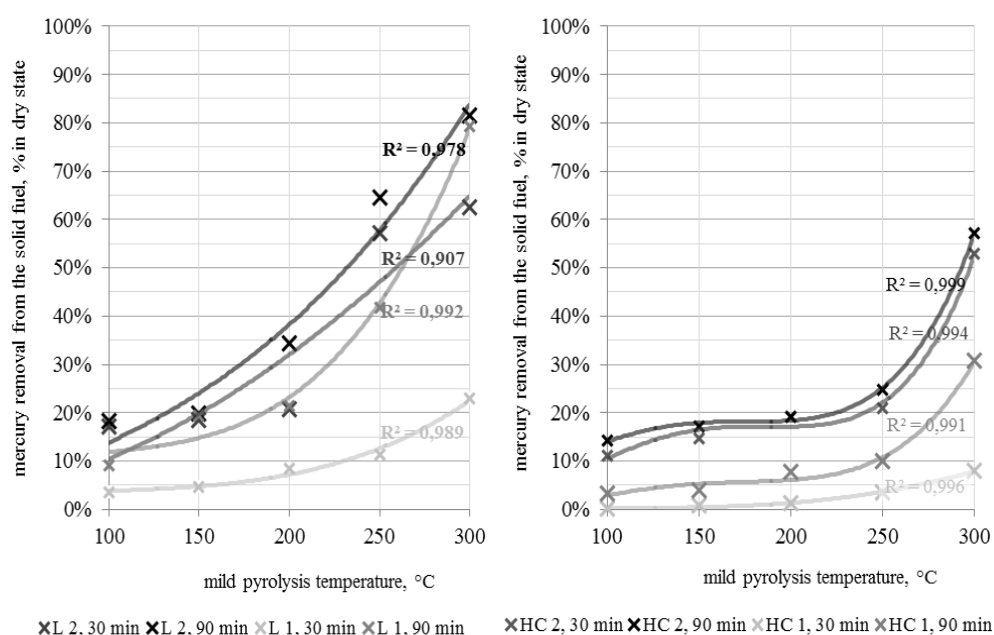
parts of the coal would have not been heated and only a part of the whole sample was processed) at the expense of reduction of production capacity per-unit.

In Figure 5 the loss of dry mass of coals during mild pyrolysis was presented. Significantly higher values were obtained for lignite, that may be identified as a mass of pyrolytic gases released during the whole process and the decrease of solid material before final combustion. As mentioned before, to satisfy easy mercury uptake, high concentrations of Hg and small quantities of pyrolytic gases should be met. However, as indicated, highest mercury releases are take place during increased fuel decomposition (lignite), that may be disadvantageous aspect during the process gas cleaning. Similarly for hard coals, low degradation of dry solid matter is not accompanied by notable mercury releases.

Again, the behaviour of thermal decomposition of solid fuels during mild pyrolysis seems to be specific aspects of the fuel, therefore it should be analysed individually.

Table 4. Mercury content in chars obtained from mild pyrolysis of analysed coals (dry samples – upper index "d").

Fuel	Time of pyrolysis	Temperature, °C				
		100	150	200	250	300
HC 1 Hg <sup>d</sup> = 74 ppb	30 min	74	73	73	71	68
	90 min	71	71	68	66	51
HC 2 Hg <sup>d</sup> = 166 ppb	30 min	147	142	134	131	78
	90 min	142	138	134	125	71
L 1 Hg <sup>d</sup> = 553 ppb	30 min	534	527	506	490	426
	90 min	503	446	434	322	114
L 2 Hg <sup>d</sup> = 336 ppb	30 min	279	274	267	144	126
	90 min	275	269	221	120	62



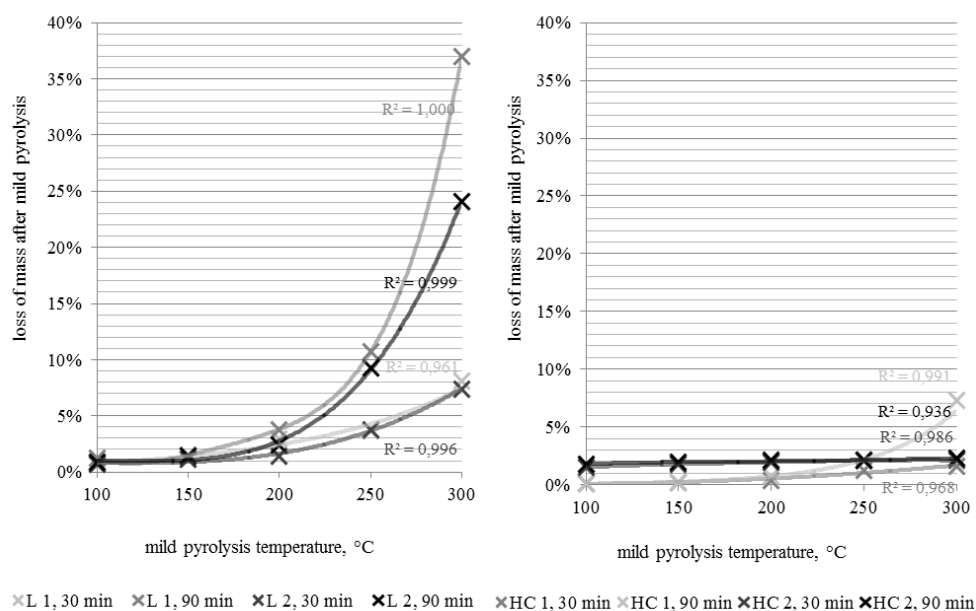


Figure 5. Loss of dry mass of the sample of lignite (left) and hard coals (right) after the mild pyrolysis.

In Table 5 selected proximate analysis and ultimate analysis of the chars from the pyrolysis of hard coal 1 were presented, while in Table 6 – of L 1 chars. In both cases, small changes within fuel composition (C, H, N) was noticed – during low temperature mild pyrolysis, ash and sulphur content slightly rises while carbon, hydrogen and mercury – goes down. HHV seems to stay at the same value, however, if the char is utilised locally, the LHV of char may be higher than LHV of “raw” fuel due to the co-beneficial removal of moisture (first stage of mild pyrolysis covers drying of the sample). Therefore, mild pyrolysis in this case might be considered as a drying process with increased temperature combined with mercury removal.

For higher temperatures (300°C) and pyrolysis times (90 min), all fuels seem to be decomposed more significantly, that results i.e. in lower HHV (drop by 10-20%) and significantly higher ash and sulphur content (by 10-35%, highly dependent on the mass loss during the pyrolysis).

A graphical representation of the changes in mercury contents and mass decrease of the analysed solid materials during the mild pyrolysis were estimated in Figures 4-5 using least-squares function approximation. To identify the accuracy of suggested shapes, coefficients of determination  $R^2$  were highlighted. This calculations may be used in order to predict the transformation rates of the solid materials i.e. in other temperatures of the process.

Table 5. Selected proximate analysis and calorific values of HC 1 chars (dry samples – upper index "d").

Temperature, °C	A*	C	H	N	S*	Hg	Cl**	HHV*
	wt%						ppb	wt%
30 min								
100	9.01	69.9	4.1	1.1	1.30	74		27.27
150	9.02	68.6	4.2	1.0	1.30	73		26.83
200	9.03	68.3	4.1	1.0	1.30	73	0.32	26.57
250	9.11	68.8	3.9	1.0	1.32	71		26.55
300	9.15	68.5	3.7	1.0	1.32	68		26.03
90 min								
100	9.01	69.2	4.2	1.1	1.30	71		27.08
150	9.02	68.5	4.2	1.0	1.30	70		26.76
200	9.06	67.9	3.9	0.9	1.31	68	0.32	26.08
250	9.19	66.8	3.2	1.0	1.33	66		24.62
300	9.71	64.6	2.6	1.0	1.40	51		22.72

\* calculated, \*\* anticipated.

Table 6. Selected proximate analysis and calorific values of L 1 chars (dry samples – upper index "d").

Temperature, °C	A*	C	H	N	S*	Hg	Cl**	HHV*
	wt%					ppb	wt%	MJ/kg
30 min								
100	18.68	54.1	4.2	0.5	1.16	534		19.39
150	18.71	54.2	4.1	0.5	1.16	527		19.37
200	19.07	54.1	4.1	0.5	1.18	506	0.022	19.34
250	19.21	55.6	3.9	0.5	1.19	490		19.64
300	20.14	55.9	3.6	0.5	1.25	426		19.48
90 min								
100	18.72	53.9	4.1	0.5	1.16	503		19.31
150	18.79	52.1	4.3	0.4	1.17	446		18.90
200	19.23	55.4	3.9	0.5	1.20	434	0.022	19.52
250	20.71	53.7	3.2	0.5	1.29	322		18.49
300	29.37	46.8	2.2	0.7	1.82	114		15.59

\* calculated, \*\* anticipated.

Table 7. Simulation of flue gas composition of coals and selected chars.

Fuel	B	S <sub>Hg(tot)</sub>	S <sub>SO2</sub>	S <sub>HCl</sub>	S <sub>dust</sub>	η <sub>Hg</sub> (new/exist.)	E <sub>Hg</sub> (new/exist.)	HCl/SO <sub>2</sub>	HCl/Hg <sub>(tot)</sub>
	thous. tonnes	μg/m <sup>3</sup> <sub>ref</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>ref</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>ref</sub>	g/m <sup>3</sup> <sub>ref</sub>	%	kg/yr	mg/g	μg/mg
HC 1 raw state	547	7.3	2,283	303	7.4	36/68-84	5.5-11.1/22.2	132.72	41.67
HC 1 char - 30 min, 200°C	510	8.0	2,853	360	8.9	50/75-88	4.6-9.2/18.5	126.18	45.45
HC 1 char - 90 min, 200°C	519	7.5	2,904	365	9.0	47/73-87	4.6-9.3/18.5	125.69	47.62
HC 1 char - 30 min, 300°C	519	7.5	2,926	364	9.1	47/73-87	4.6-9.3/18.6	124.40	47.62
HC 1 char - 90 min, 300°C	591	6.3	3,476	408	10.8	37/68-84	4.7-9.4/18.9	117.38	66.67
HC 2 raw state	615	19.1	2,070	236	26.3	79/90-95	4.7-9.4/18.8	114.01	12.35
L 1 raw state	1,382	74.9	3,212	30	21.6	91/95-99	5.2-21.0/36.7	9.34	0.40
L 1 char - 30 min, 200°C	711	71.0	3,319	32	24.1	90/94-99	5.0-20.1/35.1	9.64	0.45
L 1 char - 90 min, 200°C	702	59.7	3,290	31	23.8	88/93-98	5.0-20.2/35.3	9.42	0.52
L 1 char - 30 min, 300°C	701	58.3	3,427	31	24.8	88/93-98	5.1-20.3/35.5	9.05	0.53
L 1 char - 90 min, 300°C	867	20.0	6,398	40	46.3	65/80-95	4.9-19.6/34.3	6.25	2.00
L 2 raw state	1,002	54.5	3,176	25	19.2	87/93-98	5.2-20.9/36.6	7.87	0.46

Explanations: S<sub>Hg(tot)</sub> is total mercury concentration in raw flue gas (defined as the gaseous mercury concentration in raw flue gases at the temperature >700°C), S<sub>SO2</sub> is sulfur(IV) oxide concentration in flue gas, S<sub>HCl</sub> is hydrogen chloride concentration in flue gas, η<sub>Hg</sub> is mercury uptake efficiency, E<sub>Hg</sub> is mercury emission.

### 3.3. Predicted mercury concentration in flue gases

To predict the composition of flue gases released from combustion chamber, simplified mathematical model (1) concerning combustion of pulverised solid fuel was used. As mentioned before, calculations were made using 200 MW net power plant. Mercury releases were compared to the BAT-AELs – as a result, necessary mercury uptake efficiencies were assessed as well as annual quantities of heavy metal introduced to the atmosphere. The results were collected in Table 7.

Firstly, significant differences in the concentrations of Hg, SO<sub>2</sub> and HCl for selected raw fuels were obtained. For hard coals, it was, respectively, 7.3 µg/m<sup>3</sup><sub>ref</sub>, 2,283 mg/m<sup>3</sup><sub>ref</sub>, 303 mg/m<sup>3</sup><sub>ref</sub> for HC 1 and 19.1 µg/m<sup>3</sup><sub>ref</sub>, 2,070 mg/m<sup>3</sup><sub>ref</sub>, 236 mg/m<sup>3</sup><sub>ref</sub> for HC 2, while for lignites – 74.9 µg/m<sup>3</sup><sub>ref</sub>, 3,212 mg/m<sup>3</sup><sub>ref</sub>, 30 mg/m<sup>3</sup><sub>ref</sub> (L 1) and 54.5 µg/m<sup>3</sup><sub>ref</sub>, 3,176 mg/m<sup>3</sup><sub>ref</sub>, 25 mg/m<sup>3</sup><sub>ref</sub> (L 2). It was highlighted that hard coals can obtain much more favourable flue gas composition (less mercury and more HCl) – SO<sub>2</sub>/HCl and HCl/Hg ratios were 15-150 times higher than lignites. As a result, by the adaptation of mercury uptake within precipitators and wet scrubbers it might be possible to obtain critical 80-95% of total mercury emission control within power unit (annual emission of Hg to the atmosphere between 5-22 kg). On the other hand, in the case of lignites, the situation may be vastly different – high concentration of Hg and SO<sub>2</sub> and marginal HCl presence will lead to low oxidation rate of gaseous mercury and extensive atmospheric releases. Therefore, to adopt existing lignite-fired power plants to the future BAT-AELs (the uptake of mercury 87-99% will be required), several mercury-focused techniques (i.e. halogenated sorbent injection) will be necessary to introduce.

The calculations of the combustion of the chars generated in the mild pyrolysis of HC 1 and L 1 showed the marginally improvements within the composition of flue gases. When chlorine components in the fuel are not released during pyrolysis, after the combustion of chars better HCl/Hg ratio should increase (the possibility to oxidise the Hg<sup>0</sup> by Cl), however, HCl/SO<sub>2</sub> decreases and promotes SO<sub>2</sub> inhibition effect. Therefore, while the mercury content in solid material and Hg concentration in flue gas after pyrolysis might decrease up to 80%, the increased SO<sub>2</sub> concentration may result in decreased oxidation rate of gaseous mercury and lowered mercury uptake in ESP and wet FGD.

The increased values of SO<sub>2</sub> or dust may be a result of decreased concentration of moisture in energy carrier (first stage of the process is covered by material drying) as well as the transformation of the dry matter during the mild pyrolysis (leading to increased concentration of sulphur and mineral matter). The implementation of chars from mild pyrolysis of selected coals must be combined with the increase of the efficiency of dust collectors as well.

## 4. Conclusions

In this article the impact of mild pyrolysis of 4 Polish coals on the mercury content and possible Hg, SO<sub>2</sub>, HCl and dust concentration was examined. It was proven that the transformation of energy carriers during low-temperature thermal decomposition should be analysed individually – due to the different mercury compounds shares in solid matter, degree of coalification or moisture content. For analysed coals, significant mercury releases (up to 60-80%) were obtained mainly for the temperatures of 300°C and time 90 min. In other investigated cases, the main positive impact of thermal processes is enhanced drying of the material.

After mild pyrolysis, the combustion of char – in comparison to the raw material – should result in both decrease concentration of total mercury in flue gas and the increase of SO<sub>2</sub> concentration. For instance, the application of char L 1 generated in temperature 300°C for 90 min may lead to significant decrease of mercury concentration (by almost 75% in comparison to the raw material), however, due to the increased concentration of SO<sub>2</sub> (almost two times higher) and still relatively low concentration of HCl, the oxidation level of elemental mercury in flue gas may be lowered (more Hg<sup>0</sup> in flue gas means lower uptake of total Hg in conventional ESP and FGD). As a result, to identify the impact of mild pyrolysis on mercury emission from coal-fired power units, several real-time tests are needed to introduce before final decision concerning the desirability of the implementation of thermal pre-combustion treatment of solid fuel.

In the case of hard coals, low temperature (<300°C) mild pyrolysis seems to be an ineffective way to reduce mercury emissions from combustion process (the most likely due to high content of mercury compounds with high release temperatures, i.e. pyrite-bounded or silicate-bounded). For instance, relatively low decrease of mercury content and increased sulphur concentrations may result in reduced oxidation rate of mercury in flue gases. However, in comparison to lignite, low quantities of Hg<sub>(tot)</sub> and high of HCl in flue gases should result in satisfactory mercury uptake at the level of 70-90%, therefore implementation of this type of thermal pre-combustion mercury reduction technique seem to be pointless. To obtain profitable HCl/SO<sub>2</sub> and HCl/Hg ratios in flue gases after mild pyrolysis of selected coals, it might be valid to combine thermal process with the additional pre-combustion desulphurisation. From the mercury emission point of view it is crucial to increase Cl and bromine content in solid fuels and to decrease S and Hg – while mild pyrolysis might be useful to reduce mercury content, it is still important to couple it with sulphur removal.

Finally, the application of mild pyrolysis in coal fired power units must be combined with efficient mercury capture technology from pyrolytic gases. While the decrease of mercury content in solid fuel, that is used i.e. in power boiler, might reduce the quantity of mercury introduced to the atmosphere from a power plant, the Integrated Pollution Prevention and Control strategy



(mentioned in EU Directive No. 96/61/WE) will be covered only when mild pyrolysis in full scale unit is integrated with one of a highly efficient atmosphere protection method.

### Literature

- Burmistrz, P., Kogut, K., Marczak, M., Zwoździak, J. (2016). Lignites and subbituminous coals combustion in Polish power plants as a source of anthropogenic mercury emission. *Fuel Processing Technology*, Vol. 152, 250-258.
- Central Statistical Office (2016). Production Department, Energy statistics in 2014 and 2015. Statistical Information and Elaboration. *Central Statistical Office*, Warsaw.
- Cholewiński M. (2017). Szacowanie unosu rtęci z procesów spalania paliw stałych. *Zeszyty Energetyczne*, Vol. 4, 73-87. (in Polish)
- Cholewiński M. (2015). Badanie paliw stałych pod kątem ograniczenia emisji rtęci z bloków węglowych. *Zeszyty Energetyczne*, Vol. 2, 65-81. (in Polish)
- Commission Implementing Decision (EU) 2017/1442 of 31 July 2017 establishing best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council, for large combustion plants.
- Czajka K., Kisiela A., Moroń W., Ferens W., Rybak W. (2016). Pyrolysis of solid fuels: Thermochemical behaviour, kinetics and compensation effect. *Fuel Processing Technology*, Vol. 142, 42-53.
- Ferens W. (2014). Kaloryczność paliw stałych. *Zeszyty Energetyczne*, Vol. 1, 149-158. (in Polish).
- Hławiczka S. (2008). Rtęć w środowisku atmosferycznym. *Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk*, Zabrze. (in Polish)
- Kordylewski W. (2008). Spalanie i paliwa. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław. (in Polish).
- Liu L., Duan Y-F., Wang Y-J., Wang H., Yin J-J. (2010). Experimental study of mercury release behavior and speciation during pyrolysis of two different coals. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, Vol. 38, No. 2, 134-139.
- Luo G., Ma J., Han J., Yao H., Xu M., Zhang Ch., Chen G., Gupta R., Xu Z. (2013). Hg occurrence in coal and its removal before coal utilization. *Fuel*, Vol. 104, 70-76.
- Moroń W. (2014). Wpływ atmosfery O<sub>2</sub>/RFG na zapłon i formowanie się płomienia. *Zeszyty Energetyczne*, Vol. 1, 113-124. (in Polish)
- Moroń W., Ferens W., Czajka K.M. (2016). Explosion of different ranks coal dust in oxy-fuel atmosphere. *Fuel Processing Technology*, Vol. 148, 388-394.
- The National Centre For Emissions Management (2017). Krajowy bilans emisji SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 2014-2015 w układzie klasyfikacji SNAP. Raport syntetyczny, Warsaw. (in Polish).
- Neavel R.C., Smith S.E., Hippo E.J., Miller R.J. (1986). Interrelationships between coal compositional parameters. *Fuel*, Vol. 65, No. 3, 312-320.
- Pan WP., Cao Y., Zhang K. (2013) Mercury Emission, Control and Measurement from Coal Combustion. In: Qi H., Zhao B. (eds) *Cleaner Combustion and Sustainable World*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Rhee S-W. (2016). Control of mercury emissions: policies, technologies, and future trends. *Energy and Emission Control Technologies*, Vol. 4, 1-15.
- Rybak W. (2006). Spalanie i współspalanie biopaliw stałych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław. (in Polish)
- Wang S.X., Zhang L., Li G.H., Wu Y., Hao J.M., Pirrone N., Sprovieri F., Ancora M.P. (2010). Mercury emission and speciation of coal-fired power plants in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 10, 1183-1192.
- Wierzbowski M., Filipiak I., Łyżwa W. (2017). Polish energy policy 2050 – An instrument to develop a diversified and sustainable electricity generation mix in coal-based energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 74, 51-70.
- Yin C-Y. (2011). Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Fuel*, Vol. 90, 1128-1132.

### Acknowledgments

The author would like to express his sincere appreciation to Dr Wiesław Ferens and Prof. Wiesław Rybak for their valuable comments and suggestions throughout this research. This research was a part of the project No. K0903/0402/0231/16 “Badania procesów cieplno-przepływowych w urządzeniach i systemach energetycznych – zaawansowane czyste techniki kotłowe i użytkowanie paliw” and was financed under the „Dotacja statutowa na prowadzenie badań naukowych dla młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich” programme by the Ministry of Science and Higher Education Republic of Poland.

# ANALIZA ZASTOSOWANIA PANELI GRP DO MODERNIZACJI WIELKOŚREDNICOWYCH KOLEKTORÓW ŚCIEKOWYCH

Błażej SMOLIŃSKI\*

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska,  
Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

**Streszczenie:** Jednym z podstawowych zadań władz samorządowych jest zaspokajanie podstawowych potrzeb mieszkańców, w tym świadczenie usług komunalnych. W związku z trwającym wciąż dynamicznym rozwojem ośrodków miejskich, pilnym zagadnieniem jest przeprowadzenie efektywnej modernizacji sieci kanalizacyjnych w celu zapewnienia odpowiedniej przepustowości i bezproblemowej eksploatacji. W kontekście modernizacji kolektorów ściekowych na uwagę zasługuje metoda reliningu z wykorzystaniem paneli GRP, wykonywanych z kompozytu włókna szklanego i żywic poliestrowych lub winyloestrowych. W artykule analizowano metodą modelowania numerycznego efektywność zastosowania technologii paneli GRP do modernizacji wielkośrednicowych kolektorów ściekowych, z uwzględnieniem procesu doboru wymaganej grubości ścianki paneli GRP.

*Słowa kluczowe:* sieci kanalizacyjne, kolektory ściekowe, GRP, modelowanie numeryczne.

## 1. Wprowadzenie

W ostatnich latach nastąpił w Polsce dynamiczny rozwój ośrodków miejskich. Uwarunkowania społeczno-ekonomiczne powodują nieustanny wzrost liczby mieszkańców metropolii, co nie jest obojętne dla obecnie istniejącej i eksploatowanej sanitarnej infrastruktury podziemnej (Bolt i in., 2012). Niestety rozwijając intensywnie budownictwo mieszkaniowe i komunikacyjne „zapomniano” o wyprzedzającej modernizacji sieci kanalizacyjnych, których dobry stan techniczny jest niezbędnym elementem prawidłowego funkcjonowania każdego ośrodka miejskiego (Madryas i in., 2002). Praktyka inżynierska oraz wzrastająca liczba postępowań przetargowych pokazują, że większość obecnie wykorzystywanych wielkośrednicowych kolektorów ściekowych to obiekty stare, znajdujące się w niezadowolającym lub awaryjnym stanie technicznym, wymagające pilnej modernizacji (Popielski i in., 2017). Inwestorzy oczekują od projektantów metod modernizacji gwarantujących skuteczną i szybką realizację inwestycji, przy jednoczesnej optymalizacji poniesionych kosztów. Należy także podkreślić, że budowa nowych kolektorów jest najczęściej niemożliwa z braku odpowiednich środków finansowych. Istotnym argumentem są również koszty społeczne ewentualnych prac budowlanych wynikające z lokalizacji większości obiektów wzdłuż głównych ciągów komunikacyjnych. Powyższe uwarunkowania zmuszają osoby zaangażowane w proces projektowy do poszukiwania coraz bardziej efektywnych

rozwiązań, z czego wynika obserwowany w ostatnich latach rozwój metod bezwykopowych. W kontekście modernizacji kolektorów ściekowych na uwagę zasługuje metoda reliningu z wykorzystaniem paneli GRP. Panele GRP (ang. *Glass Reinforced Plastic*), zwane też modułami, wykonywane są z kompozytu włókna szklanego i żywic poliestrowych lub winyloestrowych. Uzyskany w ten sposób materiał charakteryzuje się niską wagą, wysokimi właściwościami wytrzymałościowymi oraz odpornością na ścieranie mechaniczne i korozję chemiczną. W zależności od uwarunkowań i wymagań technicznych, panele GRP mogą być formowane w dowolne kształty odpowiednie dla kanałów o określonych przekrojach (rys. 1).



Rys. 1. Panele GRP (www.blejkan.pl)

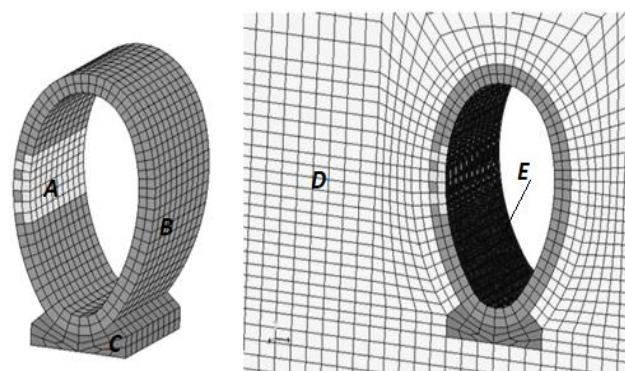
\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: blazej.smolinski@is.pw.edu.pl

Moduły GRP wprowadza się do modernizowanego kanału najczęściej za pośrednictwem wykopów punktowych. Następnie są one ze sobą łączone w sposób zapewniający szczelność połączeń. W celu zapewnienia sztywności całego układu, przestrzeń pomiędzy panelami GRP a istniejącą ścianą kolektora wypełnia się wysoko wytrzymałościowymi masami iniekcijnymi. W rezultacie wewnątrz starego kolektora uzyskuje się nowy kanał o niskim współczynniku szorstkości hydraulicznej i dużej przepustowości, zabezpieczony przed infiltracją wód gruntowych. Istotnym zagadnieniem projektowym dotyczącym praktycznego wykorzystania modułów GRP jest określenie wymaganej grubości ścianki panelu w kontekście spełnienia założonych dla danego kompozytu warunków wytrzymałościowych. W artykule zweryfikowano efektywność zastosowania technologii paneli GRP do modernizacji wielkośrednicowych kolektorów ściekowych, z uwzględnieniem procesu doboru wymaganej grubości ścianki paneli GRP. Zaprezentowano wygenerowane numeryczne modele obciążeniowe przykładowego obiektu oraz wybrane wyniki przeprowadzonych analiz, na podstawie których sformułowano zalecenia i wnioski końcowe.

## 2. Obliczenia numeryczne

Efektywność zastosowania paneli GRP przeanalizowano na przykładzie modelu hipotetycznego kolektora murowanego o przekroju jajowym podwyższonym o wymiarach 1400×800 mm (rys. 2). Analizie poddano wyłącznie kryterium odkształceniowo-przemieszczeniowe. Obliczenia wymaganej grubości ścianki panelu GRP przeprowadzono wykorzystując pakiet ZSoil (ZSOIL.PC, 2014), bazujący na Metodzie Elementów Skończonych (MES). Analizę przeprowadzono na trójwymiarowych modelach numerycznych, zdyskretyzowanych strukturalną siatką elementów skończonych. W analizie uwzględniono przemieszczeniowe warunki brzegowe zgodne z przewidywanym charakterem pracy konstrukcji. W celu odzwierciedlenia rzeczywistych stanów naprężenia i odkształcenia, a przez to rzeczywistych warunków pracy konstrukcji, w obliczeniach uwzględniono współpracę konstrukcji z ośrodkiem gruntowym (Truty i Obrzud, 2013). Zastosowano model sprężysto plastyczny z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra dla elementów *continuum* przyporządkowanych do ośrodka gruntowego oraz elementy powłokowe 3D *Shell* (panel GRP). Elementy konstrukcyjne obudowy kolektora zostały

zamodelowane przy pomocy dedykowanych elementów typu *continuum for structures*.



Rys. 2. Geometria modelu numerycznego analizowanego kolektora ściekowego. A – osłabione cegły, B – murowana obudowa kolektora, C – betonowa kineta, D – ośrodek gruntowy, E – panel GRP we wnętrzu kolektora

Uwzględnione w analizach parametry geotechniczne zostały wyznaczone na podstawie danych zawartych w PN-B-03020:1981 *Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie*, które zmodyfikowano ze względu na możliwość występowania zjawisk sufozycznych (Wiłun, 2000). Przyjęte w odniesieniu do obudowy kolektora wartości współczynników filtracji odzwierciedlają możliwość infiltracji wód gruntowych do wnętrza kanału wskutek wypłukania zaprawy murarskiej. Przyjęto charakterystyczną wytrzymałość obudowy kolektora  $f_k = 1,5$  MPa, co odpowiada murowanemu ustrojowi konstrukcyjnemu o słabej wytrzymałości (Zarenkow, 2000). Długookresowy moduł sprężystości murowanej obudowy kolektora wyznaczono na podstawie zależności (Jarmontowicz i Sieczkowski, 2015):

$$E_{Longterm} = \frac{E}{1 + \phi} \quad (1)$$

gdzie: E jest doraźnym modułem sprężystości określanym z zależności  $E = 600f_k$ ,  $\phi$  jest końcowym współczynnikiem pełzania przyjętym jako 1,5.

Lokalne ubytki cegieł zamodelowano wprowadzając elementy *continuum* o obniżonej wartości modułu sprężystości. Zestawienie wszystkich parametrów materiałowych uwzględnionych w analizach numerycznych i w poszczególnych wariantach zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie parametrów materiałowych (opracowanie własne)

Nr	Materiał	E [kPa]	$\nu$ [-]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	k [m/d]	$\phi$ [°]	c [kPa]
1	Beton	20000000	0,20	25,00	-	-	-
2	Murowana obudowa	360000	0,20	19,00	10	-	-
3	Grunt (piasek luźny)	70000	0,30	18,00	100	30	0
4	GRP	8000000	0,30	-	-	-	-
5	Oslabione cegły	1500	0,30	19,00	100	-	-

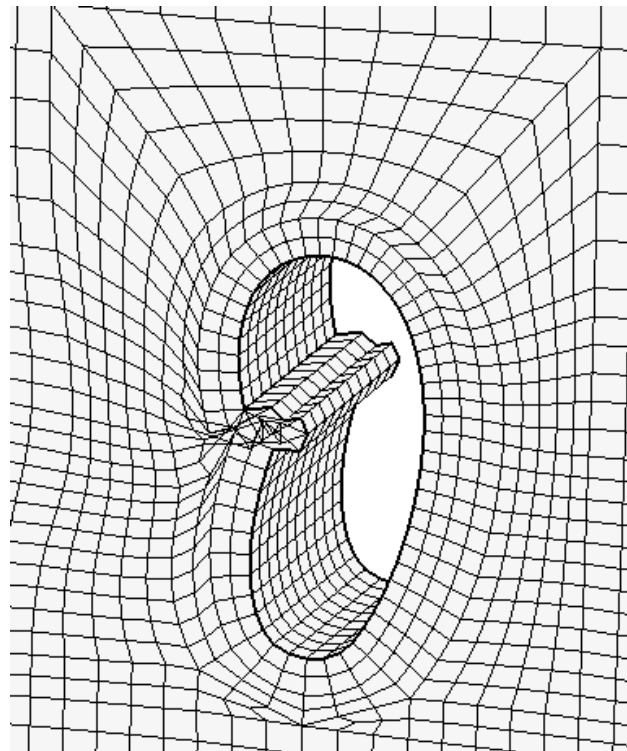
W pierwszym etapie przeanalizowano stan techniczny rozpatrywanego kolektora po długotrwałym okresie eksploatacji. Uwzględniono osłabienie parametrów materiałowych ceglanej obudowy, w tym ubytek cegieł oraz rozluźnienie gruntu w rejonie kolektora wynikające z występowania zjawisk sufozycznych. W kolejnych etapach zasymulowano modernizację rozpatrywanego kolektora ściekowego w oparciu o technologie paneli GRP. Rozpatrzono dwie grubości ścianek paneli, to jest 5 i 10 mm. Obliczenia przeprowadzono dla analogicznych warunków gruntowych oraz parametrów materiałowych jak w pierwszym etapie. Jediną różnicą było umieszczenie we wnętrzu kolektora dodatkowych elementów powłokowych o zadanej sztywności odpowiadającej panelom GRP.

### 3. Omówienie wyników

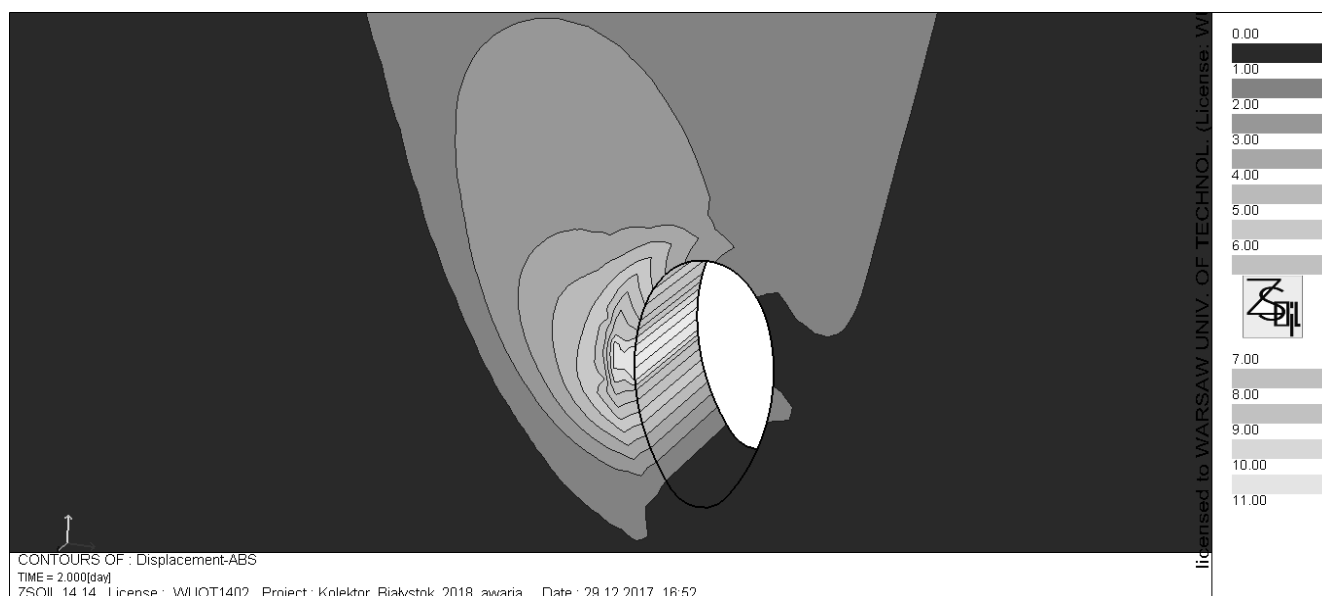
Analizując stan techniczny kolektora po długotrwałym okresie eksploatacji, na podstawie wykonanych obliczeń, zaobserwowano lokalne przemieszczenia w miejscu występowania uszkodzenia obudowy kolektora obrazowane deformacją siatki elementów skończonych (rys. 3). Wartości przemieszczeń całkowitych w rejonie symulowanej awarii wynoszą około 10 mm (rys. 4). Można przypuszczać, że wraz ze zwiększaniem zasięgu uszkodzeń (dalsza eksploatacja), wartości przemieszczeń będą również wzrastać. Sytuacja taka może prowadzić do utraty nośności konstrukcji i jej zniszczenia, z uszkodzeniem infrastruktury naziemnej włącznie (zapadlisko). W przypadku zastosowania paneli GRP o grubości ścianki 5 mm, maksymalne wartości przemieszczeń całkowitych są znacząco mniejsze w porównaniu do pierwotnego wariantu obliczeń i wynoszą w miejscu awarii około 1,5 mm (rys. 5).

Dla ścianki paneli GRP o grubości 10 mm zaobserwowano poprawę stanu technicznego kolektora

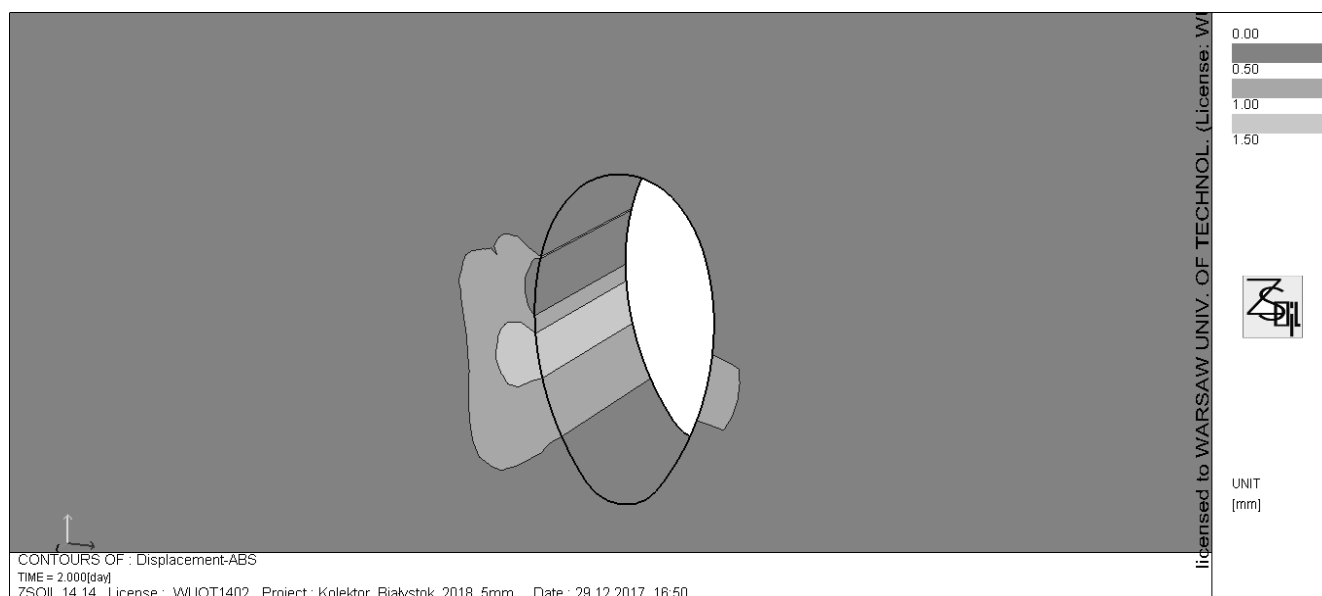
obrazowaną dalszym spadkiem wartości przemieszczeń całkowitych w miejscu uszkodzenia obudowy do poziomu około 0,9 mm. Na podstawie rozkładu izolinii przemieszczeń oraz oszacowania ich wartości (poniżej 1 mm) (rys. 6), można przypuszczać, że zastosowanie do modernizacji rozpatrywanego kolektora paneli GRP o grubości ścianki 10 mm powinno być wystarczające.



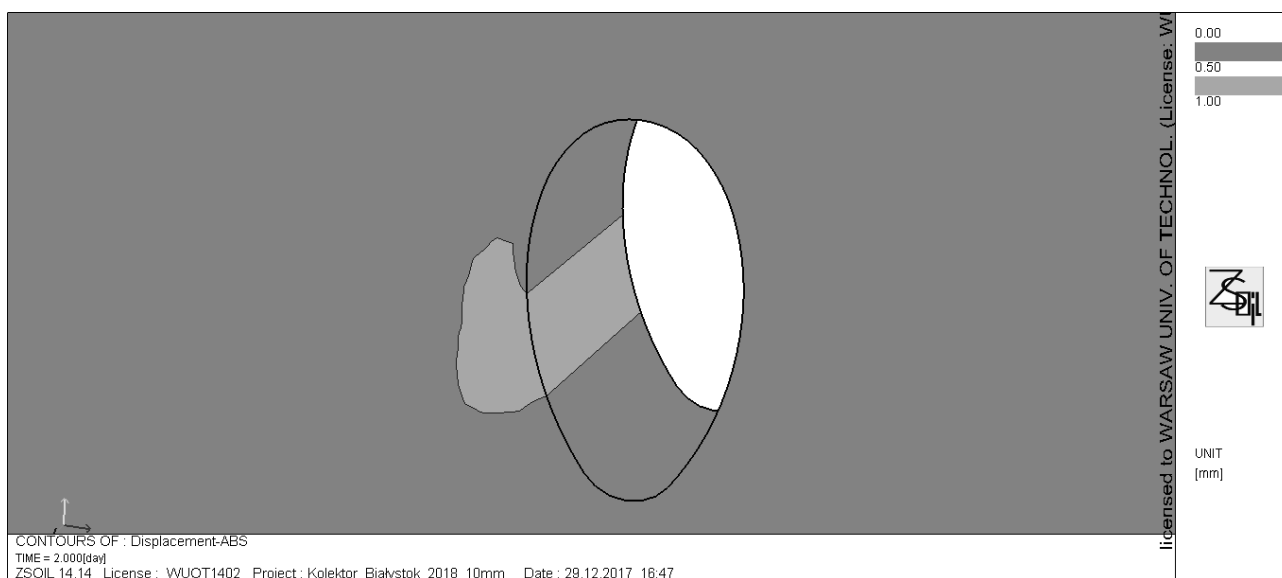
Rys. 3. Wyniki obliczeń numerycznych kolektora w stanie awaryjnym. Deformacja siatki elementów skończonych. Skażona skala rysunku



Rys. 4. Wyniki obliczeń numerycznych kolektora w stanie awaryjnym. Izolinie przemieszczeń całkowitych w mm



Rys. 5. Wyniki obliczeń numerycznych dla panelu GRP o grubości ścianki 5 mm. Izolinie przemieszczeń całkowitych w mm



Rys. 6. Wyniki obliczeń numerycznych dla panelu GRP o grubości ścianki 10 mm. Izolinie przemieszczeń całkowitych w mm

Dla analizowanego charakteru uszkodzeń murowanej obudowy kolektora, dominujące w wyznaczonych wartościach przemieszczeń całkowitych są przemieszczenia poziome. Wynikające z wartości przemieszczeń poziomych zwężenie przekroju w najbardziej niekorzystnym przypadku (stan awaryjny po długotrwałej eksploatacji) wynosi około 1,3%, co daje współczynnik bezpieczeństwa według ATV-DVWK-A127P na poziomie  $\gamma = 4,7$ . Spełnione są zatem wymagania określone w wytycznych ATV-DVWK-A127P, to jest  $\gamma \geq 2,0$ . Systematyczne powiększanie się strefy uszkodzeń w obudowie kolektora w związku z jego dalszą eksploatacją skutkowałoby jednak wzrostem wartości przemieszczeń i dalszym zwężeniem przekroju oraz spadkiem wartości współczynnika bezpieczeństwa. Stanowi to jasną przesłankę do przeprowadzenia

modernizacji kanału. Warto w tym miejscu zauważyć duży stopień skomplikowania toku obliczeniowego zawartego we wspomnianych wytycznych ATV-DVWK związany z mnogością specyficznych parametrów pośrednich oraz uproszczonym zestawem współczynników opisujących warunki gruntowo-wodne. W opinii autora zastosowanie modelowania numerycznego umożliwia znacznie wierniejsze odzwierciedlenie rzeczywistych warunków pracy analizowanej konstrukcji.

W odniesieniu do wykonanych obliczeń numerycznych trzeba podkreślić, że nie zostały w nich wzięte pod uwagę obciążenia transportowo-montażowe. Ich uwzględnienie w postaci dodatkowych współczynników bezpieczeństwa mogłoby dodatkowo wpłynąć na zwiększenie końcowej wartości grubości ścianki panelu GRP.



#### 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz i obliczeń numerycznych sformułowano następujące wnioski:

- Zastosowanie paneli GRP umożliwia skuteczną modernizację wielkośrednicowych kolektorów ściekowych poprzez poprawę nośności konstrukcji skutkującą redukcją przemieszczeń w miejscu występowania awarii. W analizowanym przypadku uzyskano redukcję przemieszczeń odpowiednio o 85% (panel o grubości 5 mm) i 91% (panel o grubości 10 mm) w stosunku do stanu odniesienia, to jest stanu awaryjnego po długotrwałej eksploatacji.
- Wpływ na dodatkowe zmniejszenie wymaganej grubości ścianki panelu GRP mógłby mieć nieuwzględniony w obliczeniach numerycznych iniekt wypełniający przestrzeń pomiędzy panelem GRP, a ścianą kolektora.
- Rzeczywista wymagana grubość ścianki panelu GRP powinna być wyznaczana przy uwzględnieniu czynników transportowo-wykonawczych, które mogą spowodować zwiększenie wymaganej grubości ścianki panelu GRP.
- Zastosowanie modelowania numerycznego w kontekście projektowania i oceny skuteczności metod modernizacji kolektorów ściekowych stanowi alternatywę dla obliczeń statyczno-wytrzymałościowych wykonywanych w oparciu o wytyczne ATV-DVWK.
- Dokładność wyników uzyskanych na podstawie obliczeń numerycznych uzależniona jest od przyjętych parametrów materiałowych. W przypadku obiektów rzeczywistych konieczne byłoby wykonanie badań wytrzymałościowych próbek pobranych z konstrukcji kolektora oraz wyznaczenie parametrów geotechnicznych gruntów na podstawie badań polowych i laboratoryjnych.
- W trakcie realizacji inwestycji zalecane jest przeprowadzenie monitoringu rzeczywistych wartości przemieszczeń panelu w trakcie jego instalacji, jak również późniejszej eksploatacji. Przeprowadzona na ich podstawie weryfikacja obliczeń numerycznych pozwoli na optymalizację przyjętych rozwiązań technicznych w przyszłości.

#### Literatura

- Bolt A., Burszta-Adamiak E., Gudelis-Taraszkiewicz K., Suligowski Z., Tuszyńska A. (2012). *Kanalizacja. Projektowanie, wykonanie, eksploatacja*. Wydawnictwo *Seidel-Przywecki*.
- Madryas C., Kolonko A., Wysocki L. (2002). *Konstrukcje przewodów kanalizacyjnych*. Oficyna wydawnicza *Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław.
- Jarmontowicz R., Sieczkowski J. (2015). Odształcalność muru pod wpływem obciążeń. *Przegląd budowlany*, 7-8, 45-48.
- Popielski P., Kodura A., Smoliński B. (2017). Analysis of the technical condition of the sewage collector with the use of numerical simulation. *Technical Transactions*, Vol. 3, 139-151.
- Truty A., Obrzud R. (2013). Komputerowa analiza współdziałania konstrukcji budowlanych z Podłożem przy zastosowaniu modeli konstytutywnych gruntów kalibrowanych na podstawie wyników badań laboratoryjnych i polowych. W: *materiały XXVIII Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji*, Wiśła.
- Wiłun Z. (2000). *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa *Komunikacji i Łączności*, Warszawa.
- Zarenkow W.A. (2000). *Sowriemiennyje metody technicheskoy diagnostyki stroitelnykh konstrukcji, zdaniy i sooruzeniy*, Sankt Petersburg.
- ZSOIL.PC. (2013). *Getting started*. *Elmepress International, Zace services Ltd*.
- ATV-DVWK\_A127P: *Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe kanałów i przewodów kanalizacyjnych*.

#### ANALYSIS OF THE APPLICATION OF GRP PANEL TECHNOLOGIES FOR MODERNISATION OF LARGE-DIAMETER SEWAGE COLLECTORS

**Abstract:** One of the basic tasks of local authorities is to provide the needs of the inhabitants, including the provision of communal services. Due to dynamic development of urban centers, it is urgent to carry out an effective modernisation of the sewerage systems to ensure their adequate capacity and effective operation. In the context of the modernisation of sewage collectors, the relining method using GRP panels made of fiberglass composite and polyester or vinyl ester resins is desirable. In the paper the effectiveness of using GRP panels technology for modernisation of large-diameter sewage collectors has been verified, taking into consideration the process of selection of required wall thickness of GRP panels. In the analyses the numerical modelling was used and co-operation of the structure with the soil has been taken into account.

Praca powstała pod opieką naukową dr hab. inż. Pawła Popielskiego, prof. PW.

# STEEL FRAME AS THE BASIS FOR CHECKING THE PULL-OUT CAPACITY OF BONDED DIAGONAL ANCHOR BOLTS

Dariusz TOMASZEWICZ\*

Faculty of Technics, Higher School of Agribusiness, Studencka 19, 18-402 Łomża, Poland

**Abstract:** The paper concerns a device for testing diagonal anchorages, designed by the author. This device constitutes the basis for the testing equipment used for the performed test. No such research has been conducted so far. The article describes the way the rack was designed and what components it is made of. The possibilities and practical examples of the device are also indicated.

*Key words:* steel frame, capacity, pull-out, diagonal anchor bolts, hydraulic cylinder, bonded anchors.

## 1. Introduction

The idea to design and create the device was evolving in the course of author's research when it turned out necessary to check the pull-out capacity of diagonal anchor bolts in a three-layer wall of a field facility. There was no possibility to test this type of anchor bolts earlier, as there was a risk of damage to the research apparatus. A device that has not been used so far, has the ability to evaluate the anchor bolts load capacity and provides the basis for verifying the role of the diagonal anchor bolt in the system with a horizontal anchor bolt. On the other hand, many authors have already tested the

load capacity of horizontal and point anchor bolts (perpendicular to the surface of a concrete element), whether by computer simulations based on the Finite Element Method and allowing for nonlinear fracture mechanics (Červenka et al., 1991) or by laboratory and field testing (Saleem and Tsubaki, 2010; Karmazínová and Melcher, 2012; Nakano et al., 2012).

During the pull-out test the device used for diagonal anchor bolts is fixed to the wall surface by means of mounting pins. However, for destructive tests (greater destructive power), the frame performs better as a fixing element (Fig. 1).

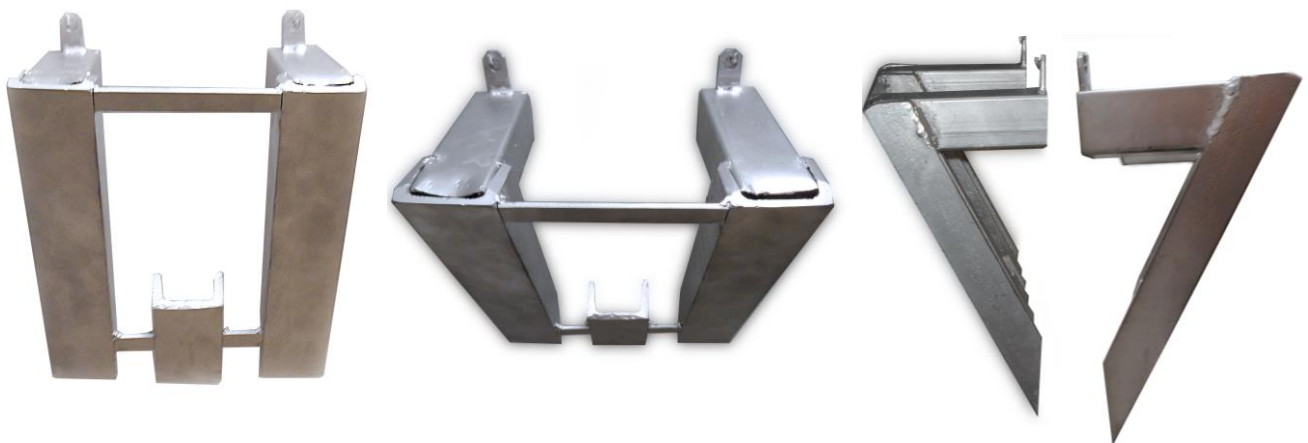


Fig. 1. View of the steel frame reported in the Polish Patent Office.

\* Corresponding author, e-mail: [dariusz-tomaszewicz@wp.pl](mailto:dariusz-tomaszewicz@wp.pl)

## 2. Description of the device and its scope of application

The frame is designed from steel sections. The arms under the feet of the device are made of structural channels, and the backrests for the arms are made of square thin-walled profiles with flat bars with  $\varnothing 8$  mm holes for mounting the frame to the wall surface. Each diagonal anchor bolt test is carried out according to a specific procedure. First there is the so-called "fitting" for a specific anchor bolt

to indicate the  $\varnothing 8$  mm mounting holes under the frame and adjust the angle of the arms of the frame surface relative to the single anchor bolt (Fig. 2).

This is a basic and essential operation, as it is necessary to maintain the orthogonality of the frame surface with respect to the mounted anchor. The scope of use is virtually unlimited. Due to pivotally adjustable arms the bonded anchors can be tested in the ranges of  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $60^\circ$  (Figs. 3 and 4).

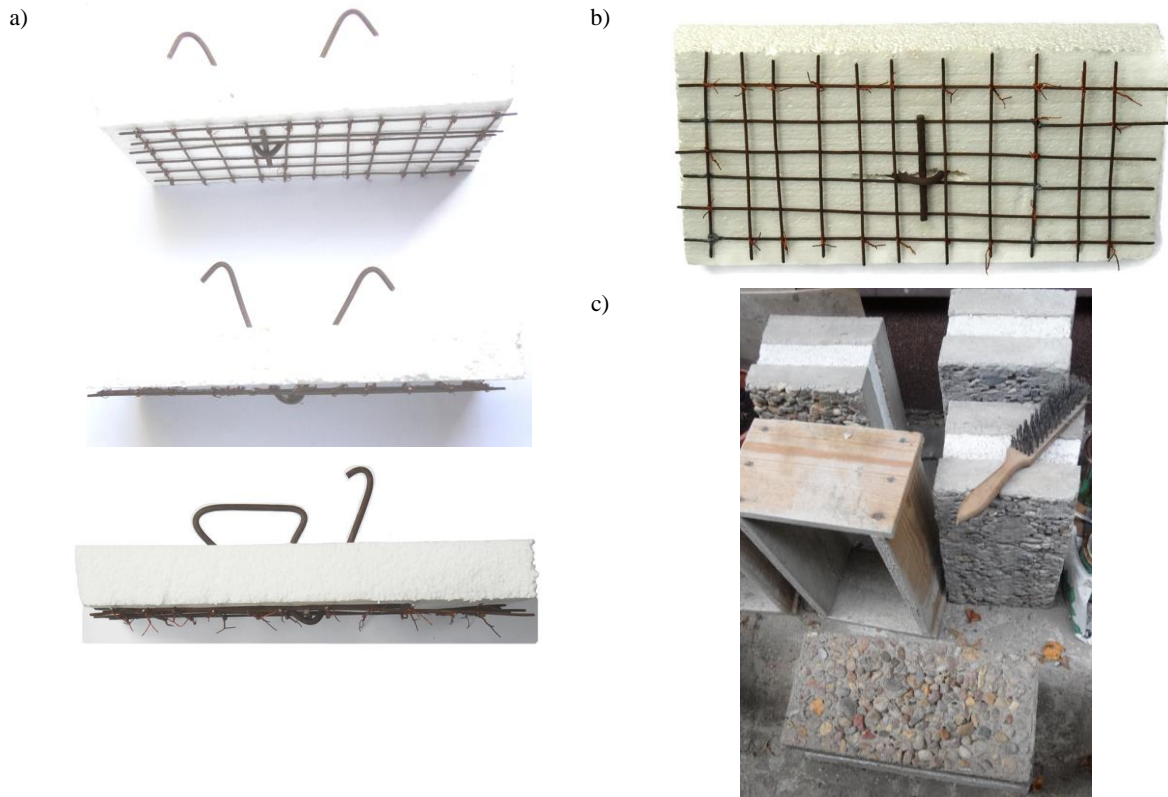
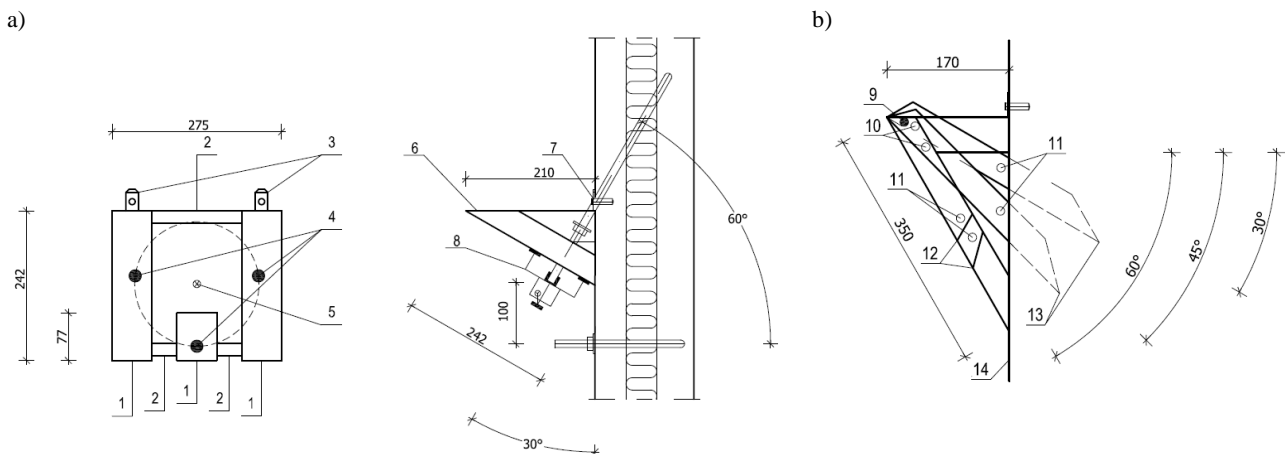


Fig. 2. Design and construction of the samples: a) and b) view of the reinforcement, c) prepared samples.



1 - Arms made of structural channels [65×42×5 mm, extreme length 202 mm and length 77 mm in diameter; 2 - flat bar connecting the arms; 3 - mounting brackets for quick fixing pins; 4 - feet for pull-out anchor bolts; 5 - anchor bolt being removed; 6 - sketch of the frame; wall-mounted, thin-walled profiles (stationary parts) measuring 50×50×170 mm welded to the extremities; 7 - fixing the frame for the test; 8 - angularly adjustable arms of the frame, 9 - cotter for adjusting the desired angle; 10 - holes stabilizing the given angle; 11 - holes for arm length stabilization; 12 - arm profiles with the edge adjacent to the wall surface; 13 - Sliding parts of the arms to adjust a given angle; 14 - outer surface of the wall.

Fig. 3. Diagram of steel frame: a) front view and side view, b) side view of device maneuvering angles.



Fig. 4. View of steel frame with anchors.

### 3. Examples and applications

There are many ways to use the device. It is possible to check the load capacity of anchor bolts at varying mounting angles in the maneuver range from  $30^\circ$  to  $60^\circ$  with  $15^\circ$  spacing. The frame is necessary to carry out the load testing of diagonal anchor bolts due to the possibility of adjusting the angle towards the anchor bolt to provide the right angle between the frame arms and the axle of the anchor bolt mounted in the wall. It is also possible to check the diagonal anchor bolt in the layered wall with the bevel down, when the frame is rotated  $180^\circ$  from the diagonal anchor bolt mounted with the bevel up.

Furthermore, it is possible to check the load capacity of the anchor bolts mounted parallel to the length of the plate in case of reinforcement of the joints. Then, for the time of this test, the frame must be fastened by first turning it clockwise by  $45^\circ$  and then by  $45^\circ$ , however in the opposite direction towards the mounted frame in Figure 5.



Fig. 5. Example of application frame with hydraulic cylinder.

Figure 6 shows an example of two- and three-way anchors, where the device can be used to check their load capacity. An example of damage to the anchor fixing is shown in Figure 7. It was conducted in stages. Destruction of the fixing at the depth of 6 cm was probably due to inaccurate cleaning of the hole at the depth of attachment to the wall construction layer. Next, a cone (concrete failure) with a top surface of  $4 \times 4.5$  cm was formed towards the outside of the wall on a 9.5 cm section. A 6.5 cm anchor bolt was not anchored in concrete.



Fig. 6. Anchoring COPY-ECO system and three anchor system.



Fig. 7. A view of destruction fixing anchor with concrete substrate.

Another example, which occurred during the field research (Fig. 8), is the destruction of adhesion by pulling-out the anchor bolt. This happened due to the lack of the hole cleaning after drilling. There was no adhesion between the resin and the concrete surface. The theoretical approach to model destruction shown in Figure 7 has been



presented by German (2011). Table 1 shows the results of the load capacity tests of the anchor bolts fixed into the three-layer walls of a multi-plate building. Figure 9 shows the dependant stress-deformation of anchor with Figure 7.



Fig. 8. Destruction caused by pulling-out the anchor of concrete surface.

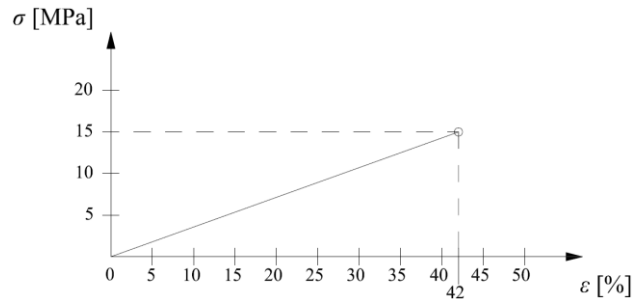


Fig. 9. The dependant of the stress on the deformation of the anchor of Figure 7.

Tab. 1. The results of the pull-out capacity of bonded anchors.

Sample number	Breakout force anchor [kN]		Notes
	Anchor point	diagonal anchors	
two-anchor system COPY-ECO (AT-15-6916-2009, 2011)			
1	27,0	6,0	cone wrench
2	47,1	13,2	
3	13,3	14,7	

The theoretical capacity value of the destructive force is calculated according to the formula:

$$P_n = A_p \cdot f_{yd} \text{ [kN]} \quad (1)$$

$$P_n = 113,1 \text{ mm}^2 \cdot 350 \text{ N/mm}^2 = 39585 \text{ N} = 39,59 \text{ kN}$$

where:  $P_n$  is capacity value of the destructive force,  $A_p$  is a cross section area for the anchor  $\varnothing 12$  mm,  $f_{yd}$  is design value of the steel strength.

Please note that any attempt of the pull-out capacity is used to determine the greatest stress of the adhesion  $\tau_{psr}$

$$\tau_{psr} = \frac{P}{U \cdot l_z} \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (2)$$

where:  $\tau_{psr}$  is a ultimate adhesion shear stress,  $P$  is the breakout strength of anchors in concrete,  $U$  is a circuit which would form the hole after pulling away from the anchor, and  $l_z$  is anchorage length of anchor.

Figure 10 shows a cracked concrete sample during the test. Tensile strength values of the point anchor bolt (equivalent to the horizontal anchor bolt on the building) has reached the same value of 9 kN which is less than the standard value of 10 kN, and Figure 11 shows drawn anchors after pull-out tests. There are few reasons for this.

The main one is that the concrete was prepared with a relatively low strength (below the C 12/15 class). The results of the anchor pull-out capacity test in laboratory are shown in Table 2.



Fig. 10. View of a single sample of concrete cracks during the attempt capacity anchor for pull-out.

Tab. 2. The results of the anchor pull-out capacity in terms of laboratory.

Sample number	Breakout force anchor [kN]		Notes
	anchor point	diagonal anchors	
two-anchor system COPY-ECO (AT-15-6916-2009, 2011)			
1	9,0	during the test	rupture of the sample
2	9,0	during the test	rupture of the sample
3	9,0	during the test	rupture of the sample



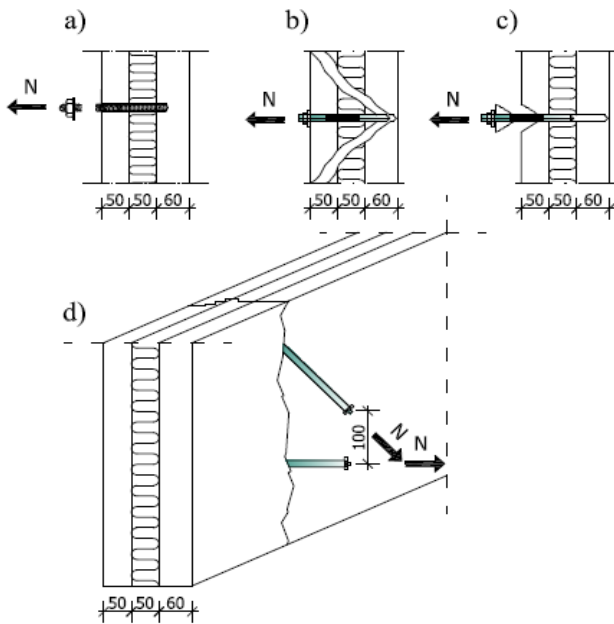
Fig. 11. Drawn anchors after the pull-out test.

### 3.1. Effects that may occur during testing the capacity pull-out of bonded anchors

When attempting to remove the anchor bolt, four types of damage may occur (Fig. 12). The models of anchor damage during pulling tests for longitudinal force are shown below. Figure 12a is the damage of the fixing due to the broken anchor bolt; Figure 12b damage caused by pulling the anchor bolt out of the concrete surface; Figure 12c is an example of damage by tearing the concrete cone, and Figure 12d is the damage caused by splitting the concrete surface. In the research the author



intends to examine the interaction effect of the tensile and shear forces on the fixed anchor bolts.



Explanations: N – pull-out force in kN

Fig. 12. Schemes of pull-out force of destroy anchors (ETAG No. 001).

Models of damage that may occur as a result of transverse forces on the anchor bolt and the nature of the shearing force of the anchor bolts are shown in Figure 13. The first type of the model, Figure 13a, is the damage caused by cutting the anchor bolt, the second type of the model, Figure 13b, is the damage by breaking the edge of the concrete surface and the third type of the model, Figure 13c, is the damage caused by prying the anchor bolt. Many authors have undertaken the topic of three-layer external walls. The authors have already addressed the issue of evaluation capacity, which combines old anchor bolts in three-layer walls (Pająk et al., 1986) and new anchor solutions (Starosolski and Zybura, 1992).

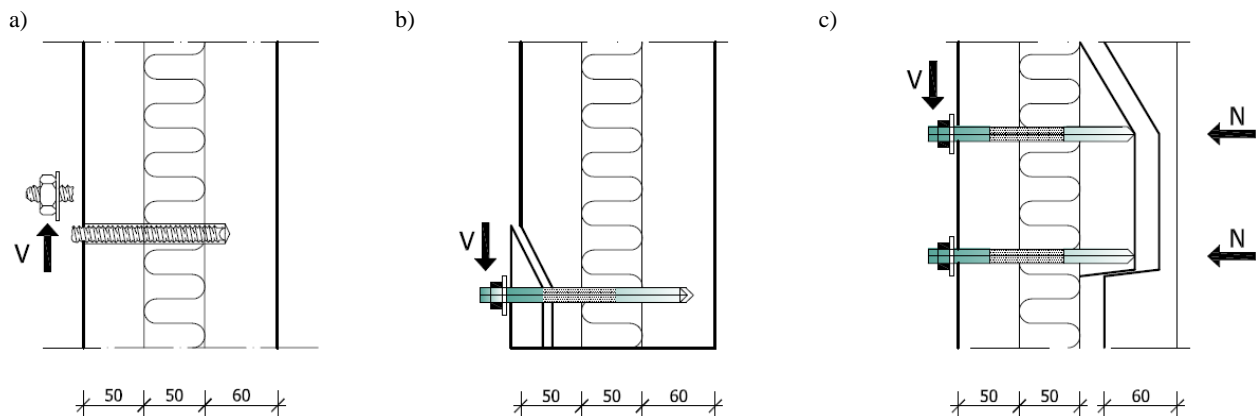
Currently, three-layer walls are being described by (Pahn and Hanz, 2012), as well as texture layers,

concrete surface repair and adhesion testing (Garbacz et al., 2013). The architecture of the large panel system was also discussed (Gronostajska, 2010; Wójtowicz, 2011; Dębowski, 2012). The problem of numerical analysis was demonstrated by Ozbolt and Eligehausen (1990), while the composite layer during the finite element bending test was showed by Mazurkiewicz et al. (2013). A calculation model based on regression analysis was developed by Yildirim and Kantar (2014). When developing the research, the authors of the article based on the standards contained in the literature to investigate the problem of pull-out anchor bolts from concrete.

The new anchor computational models proposed by the author focus on two- and three-way anchor systems and evaluation of their role in the construction of a three-layer wall, burdened with the own weight of the textured layer, the influence of wind and temperature.

#### 4. Conclusions

The innovative method of checking the load capacity of bolted anchors is to obtain the perpendicularity between the frame arms and the center of the anchor bolt mounted in the three-layer wall so that the axes of the hydraulic cylinder (or other tester) and the frame arms form a straight angle. Thanks to this device we obtain an imitation of the "inclination" of the wall surface with respect to the mounted anchor bolt to achieve the same effect as when pull-out the horizontal anchor bolt. In this way, due to the ability to maneuver and position the device at a given angle, the effect of the ability to remove the anchor bolt is similar to that of a horizontal anchorage. The angular maneuverability and tilt angles of the anchor bolts determine the thickness of the curtain walls in OWT-67/N system (the gable wall – 25 cm, the curtain wall – 17 cm), where the research was conducted. The author believes that there is a real risk of separating the textured layer in large panel buildings, because "the hangers" in the panels carry heavy load of the structure and this affects their stability, especially in the humps, where the anchor rods are located.



Explanations: N – pull-out force in kN; V – shear force in kN

Fig. 13. Schemes of shearing force of destroy anchors (ETAG No. 001)

Among the widely available bonded anchors, the author was most interested in the COPY-ECO system (AT-15-6916-2009, 2011). It is a system of two anchors – horizontal and diagonal, which reproduces the shape and work of the so-called "hangers". The author is currently carrying out research tasks, in which he determines the bonded anchors capacity for pull-out. The research is conducted in the object and in the laboratory. In addition, the study included a three-way anchor system (with two diagonal and one horizontal anchor bolts). Analysing both anchor systems, the following conclusions were made:

- It is more advantageous to reinforce the layered walls with diagonal anchor bolts, as they can be better adapted to the transfer of loads (bending, stretching).
- It is more effective to use two- or three-way anchor bolts because of the increased load capacity and durability of fixing of the textured layer with the rest of the walls.
- Diagonal anchor bolts better counteract the effects of wind suction, which adversely affects the durability of the anchoring of the wall texture layers.

### Literature

- Červenka V., Pukl R., R. Eligehausen (1991). Fracture analysis of concrete plane-stress pull-out tests. Institut für Werkstoffe im Bauwesen. RILEM. *E. & F. N. Spon*, London, 899-908.
- Dębowski J. (2012). Typical damages in buildings of panel. *Przegląd Budowlany*, 10/2012, 25-32. (in Polish)
- German J. (2011). Fracture mechanics base. *Cracow University of Technology*, Cracow. (in Polish)
- Garbacz A., Courard L., Bissonnette B. (2013). A surface engineering approach applicable to concrete repair engineering. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, Vol. 61, No. 1, 73-84.
- Gronostajska B. (2010). Slabs housing estates in 21st Century – problems and prospects. *Architecturae et Artibus*, Vol. 2, No. 2, 19-26.
- Karmazínová M., Melcher J. (2012). Verification of Steel-to-Concrete Anchorage System Reliability Based on Failure Probability Evaluation Using Test Results. In *Advances in Mathematical and Computational Methods – Proceedings of the 14th WSEAS International Conference „MACMESE '12“*. Sliema: WSEAS Press. 247-252.
- Mazurkiewicz Ł., Małachowski J., Damaziak K., Baranowski P., Gotowicki P. (2013). Identification of layers distribution in the composite coupon using Finite Element Method and three point bending test. *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 7, No.3, 160-165.
- Nakano K., Matsuzaki Y., Sugiyama T. (2012). Outline of Japanese Guideline for influence of the embedment length and the edges on tensile resistance of post-installed bonded anchors. In “Understanding Adhesive Anchors: SP-283-7”, *American Concrete Institute*, Farmington Hills MI, États-Unis, 1-5. Lisboa, Japan.
- Ožbolt J., Eligehausen R. (1990). Numerical analysis of headed studs embedded in large plain concrete blocks. *Institut für Werkstoffe im Bauwesen*, Universität Stuttgart, 645-656.
- Pahn M., Hanz F. (2012). Influence of the production process on the load-deflection behaviour of three-layered sandwich panels with GFRP-connections. *Architecture Civil Engineering Environment. The Silesian University of Technology*, No. 1, 37-46.
- Pająk Z., Starosolski W., Zybura A. (1986). The rating of connection the capacity three layers walls of with additional warming. *Przegląd Budowlany*, 3/1986, 408-411. (in Polish)
- Saleem M., Tsubaki T. (2010). Multi-layer model for pull-out behavior of post-installed anchor. In: *Proceedings of FRAMCOS-7, Fracture Mechanics of Concrete Structures*, AEDIFICATIO Publishers, Germany, Vol. II, Yokohama National University, Yokohama, Japan, 823-830.
- Starosolski W., Zybura A. (1992). The new anchor to connect the layers in prefabricated external walls. *Przegląd Budowlany*, 12/1992, 521-523. (in Polish)
- Wójtowicz M. (2011). Fault hazard of façade sandwich panels in the buildings constructed by means of large panel technology – real problem or media hit. *Proceedings of XXV Scientific – Technical Conference 24 – 27 May Międzyzdroje, Building failures*, 533-542. (in Polish)
- Yildirim V., Kantar K. M. (2014). A Comprehensive Evaluation of M-estimators for Linear Regression Model. *International Journal of Mathematics and Statistics*, Vol. 15, No. 1, 104-138.
- AT-15-6916-2009 (2011). Łączniki wklejane COPY-ECO do wzmacniania betonowych ścian warstwowych. *Instytut Techniki Budowlanej*, Warszawa.
- ETAG No. 001 Annex C. Methods for the design of anchorages.

## EKSPLOATACJA, ZAMKNIĘCIE I REKULTYWACJA SKŁADOWISK NIEZORGANIZOWANYCH NA PRZYKŁADZIE SKŁADOWISKA „ŁYSA GÓRA”

Marta WIŚNIEWSKA\*

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

**Streszczenie:** W pracy dokonano analizy eksploatacji oraz sposobu rekultywacji składowisk nieposiadających wymaganych prawem zezwoleń na przykładzie składowiska „Łysa Góra”, które znajduje się w miejscowości Bodzanów, należącej do województwa mazowieckiego. Składowisko to funkcjonowało od 1985 roku bez wymaganych prawem zezwoleń. Deponowane były na nim zarówno typowe odpady komunalne, jak również odpady należące do grupy odpadów niebezpiecznych.

*Słowa kluczowe:* monitoring składowisk, rekultywacja, składowanie odpadów.

### 1. Wprowadzenie

Problem składowisk niezorganizowanych obecnie jest znacznie mniej nasilony, niż miało to miejsce jeszcze kilkanaście lat temu. Niemniej jednak tego rodzaju składowiska nadal funkcjonują. Często nie posiadają one wymaganych prawem pozwoleń i eksploatowane są w niewłaściwy sposób. Zintensyfikowane działania mające na celu zamykanie oraz rekultywację składowisk, które nie zostały dostosowane pod względem prawnym, swój początek miały od momentu przystąpienia Polski do Unii Europejskiej i przyjęcia dyrektywy 1999/31/WE (Dz. U. UE. L. 182 z 16.07.1999, s1 z późn. zm.). Dyrektywa ta nałożyła na Państwa Członkowskie obowiązek między innymi podjęcia działań mających na celu zatrzymanie działań eksploatacyjnych tych składowisk, które nie zostaną dostosowane do wymogów określonych w dyrektywie (Departament Środowiska, 2014).

W myśl ustawy o odpadach (Dz. U. 2017 poz. 1566) składowiskiem odpadów nazywamy obiekt budowlany służący do składowania odpadów. Ze względu na rodzaj deponowanych odpadów rozróżniamy trzy typy składowisk: odpadów niebezpiecznych, odpadów obojętnych oraz odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne. Czas funkcjonowania składowiska możemy podzielić na trzy fazy (Dz. U. 2017 poz. 1566; Dz. U. 2013 poz. 523):

– przedeksploatacyjną – okres przed wydaniem ostatecznej decyzji dotyczącej wytycznych prowadzenia składowiska odpadów;

- eksploatacyjną – okres od momentu uzyskania ostatecznej decyzji dotyczącej wytycznych prowadzenia składowiska odpadów do momentu zakończenia procesu jego rekultywacji;
- poeksploatacyjną – okres 30 lat od dnia zakończenia procesu rekultywacji składowiska. Po tym okresie składowisko uznaje się a zamknięte.

Można również dokonać innego podziału składowisk: na zorganizowane (spełniające wymagania prawa) oraz niezorganizowane (niespełniające wymagań prawa). Składowisko zorganizowane to takie, które zostało wykonane zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa, posiadające wymagane uszczelnienia, system odprowadzania odcieków czy ujmowania gazów składowiskowych. Przeciwnieństwem tego typu składowiska jest składowisko niezorganizowane wykonane niezgodnie z przepisami. Składowiskami niezorganizowanymi jest znacząca większość składowisk, które powstały kilkadziesiąt lat temu. W tym czasie składowiska nie posiadające między innymi sztucznych uszczelnień oraz systemów odprowadzania odcieków czy ujmowania biogazu uzyskiwały wymaganą decyzję zezwalającą na jego funkcjonowanie. W tym okresie odpady poddawane były składowaniu najczęściej bez uprzedniego przetworzenia. Dziś składowanie zaliczane jest do jednej z form unieszkodliwiania odpadów i znajduje się najniżej w hierarchii postępowania z odpadami (Dz. U. 2017 poz. 1566). Zanim strumień odpadów trafi na składowisko powinien zostać poddany uprzedniemu przetworzeniu, to jest wyodrębnieniu wszystkich frakcji użytecznych przeznaczonych do recyklingu bądź ponownego wykorzystania oraz

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: marta.wisniewska.89@wp.pl

ustabilizowaniu (dotyczy tak zwanej frakcji podsitowej, zawierającej głównie odpady ulegające biodegradacji) czy kompostowaniu (w przypadku odpadów zielonych i odpadów ulegających biodegradacji zebranych selektywnie) (Dz. U. 2017 poz. 1566).

W pracy przedstawione zostało przykładowe składowisko niezorganizowane, które powstało w latach osiemdziesiątych. Opisane zostały wszystkie fazy jego funkcjonowania, a także poddano analizie proces jego rekultywacji.

## 2. Rekultywacja składowisk odpadów

Proces rekultywacji polega na przywróceniu danego obszaru do stanu właściwego, to jest nadaniu mu właściwości użytkowych. W praktyce proces ten sprowadza się do stworzenia odpowiednich warunków siedliskowych dla wzrostu roślin. Doprowadzenie terenów, które uległy zdegradowaniu do ponownego zachodzenia na nich procesów glebotwórczych, jest bardzo czasochłonne. Czasami potrzeba nawet wielu lat, pomimo zastosowania zabiegów rekultywacyjnych. Na proces rekultywacji składa się szereg działań polegających na (Skalmowski, 2000):

- zabiegach o charakterze technicznym, które związane są z odpowiednim ukształtowaniem terenu, a także warunkami wodnymi. Celem tych zabiegów jest stworzenie jak najkorzystniejszych warunków dla przewidzianych upraw roślin, jak również umożliwienie wykorzystania danego terenu w przyszłości;
- zabiegach, których celem jest zapoczątkowanie procesów glebotwórczych poprzez usunięcie toksyn z gruntu, a także wytworzenie okrywy glebotwórczej;
- zabiegach o charakterze biotechnicznym, które związane są z nasadzeniem roślinności, biorąc pod uwagę następstwo gatunków.

## 3. Składowisko odpadów Łysa Góra

### 3.1. Położenie składowiska

Składowisko odpadów „Łysa Góra” znajduje się w miejscowości Bodzanów należącej do gminy Bodzanów (powiat plocki, województwo mazowieckie). Początek jego istnienia sięga 1985 roku. Gmina Bodzanów jest gminą wiejską, a tereny znajdujące się w pobliżu składowiska to w przeważającej części obszary uprawne należące do rolników indywidualnych. Na działkach bezpośrednio sąsiadujących ze składowiskiem zlokalizowane są wyrobiska będące pozostałością po eksploatacji kruszyw mineralnych. Najbliższe tereny zamieszkałe oddalone są od składowiska o 300 m, a najbliższe wody powierzchniowe, to jest bezimienny ciek wodny wpływający do rzeki Mołtawy, znajdują się w odległości 1,2 km. Składowisko nie jest umieszczone na obszarze chronionym, a w jego pobliżu nie ma również obiektów stanowiących dobra kultury oraz użyteczności publicznej. Wody podziemne znajdujące się poniżej

rzędnej składowiska zgodnie z wynikami badań, które zostały przeprowadzone przez firmę zewnętrzną w 2001 roku, zawierały wyższe niż dopuszczalne wartości stężeń takich pierwiastków, jak: kadm oraz ołów. W tym samym czasie oznaczone zostały również wskaźniki ekstraktu eterowego suchej pozostałości, a także węgla organicznego. Wartości wskaźników były podwyższone i pokazywały jednoznaczne oddziaływanie składowiska na jakość wody na pobliskich obszarach. Analizowane składowisko nie posiada ani naturalnej, ani sztucznej izolacji, co skutkuje migracją zanieczyszczeń przez przypowierzchniowy poziom wodonośny.

### 3.2. Stan prawny składowiska

Składowisko „Łysa Góra” z założenia miało być składowiskiem tymczasowym, jednakże na początku 1990 roku uzyskano pozytywną decyzję eksploatacyjną z terminem ważności do końca 2010 roku. Decyzja ta została wydana po wcześniejszym uzyskaniu pozytywnej opinii Wydziału Ochrony Środowiska Gospodarki Wodnej i Geologii Urzędu Wojewódzkiego w Płocku i nadaniu składowisku statusu gminnego składowiska odpadów komunalnych.

W 2001 roku właściciel składowiska został zobowiązany przez Starostę Płockiego do wykonania jego przeglądu ekologicznego. Po jego sporządzeniu ówczesny Wójt Gminy Bodzanów otrzymał obowiązek zrehabilitowania składowiska. Decyzja ta motywowana była negatywnym wpływem składowiska na wody podziemne poziomu przypowierzchniowego oraz na jakość wód podziemnych. W decyzji Starosta zaproponował, aby składowisko w pierwszej kolejności przykryte zostało izolującym materiałem mineralnym bądź matami bentonitowymi, a następnie nasadzona została na nim roślinność charakteryzująca się szybkim wzrostem.

Warto zaznaczyć, iż składowisko „Łysa Góra” przez cały okres eksploatacji funkcjonowało bez decyzji o warunkach zabudowy oraz zagospodarowania terenu, pozwolenia na budowę czy pozwolenia na użytkowanie. Ponadto nie została nigdy przyjęta instrukcja eksploatacji składowiska.

W styczniu 2004 roku wykonano projekt rekultywacji składowiska (projektant zewnętrzny). W projekcie zaproponowano ukształtowanie nadpoziomowej przymy. Wierzchowina, a skarpy powinny zostać uszczelnione hydroizolacyjnymi matami bentonitowymi. Według projektu wody opadowe znad uszczelnienia powinny spływać do wykonanych rowów opaskowych, oraz zbiornika odparowującego. Zaprojektowane zostały także trzy piezometry przeznaczone do biernego odgazowania składowiska. Jako formę rekultywacji biologicznej zaprojektowano zasianie mieszanki traw na podłożu z humusu oraz nasadzenie wierzby wiciowej na części terenu. W styczniu 2006 roku sporządzona została aktualizacja projektu rekultywacji (projektant zewnętrzny), zgodnie z którą przewidziano również wykonanie brodzika dezynfekcyjnego, a także odwodnienie powierzchniowe, jak również bierne

odgazowanie (Osęka i Chrząszcz, 2007).

W 2012 roku zakończony został proces rekultywacji składowiska. Proces ten nie został przeprowadzony bezpośrednio po jego zamknięciu, ze względu na brak środków na ten cel w budżecie gminy. Od tego momentu prowadzony jest monitoring składowiska zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska w sprawie składowisk odpadów (Dz. U. 2013 poz. 523). Monitoring będzie prowadzony przez okres 30 lat. Po upływie tego czasu składowisko zostanie uznane za zamknięte (Dz. U. 2013 poz. 523).

Właściwy monitoring, szczególnie w przypadku składowisk niespełniających wymagań prawa, umożliwia wykrycie potencjalnych zagrożeń już na wczesnym etapie, jak również podjęcie działań mających na celu maksymalne zmniejszenie skutków tych zagrożeń oraz niedopuszczenie do degradacji środowiska (Departament Środowiska, 2014).

### 3.3. Charakterystyka oraz ilość deponowanych odpadów

Właściciel składowiska „Łysa Góra” nie prowadził ewidencji dostarczanych na teren składowiska odpadów. Z danych podanych przez Urząd Gminy Bodzanów wynika, iż orientacyjna ilość odpadów zdeponowanych na analizowanym składowisku wynosi 5 950 Mg. Jest to jednak tylko ilość szacunkowa i można przypuszczać, że na gminnym składowisku znajduje się znacznie więcej odpadów. Tylko w 2003 roku na składowisko wywieziono 1 043,33 Mg odpadów.

Na terenie gminy nie były nigdy przeprowadzone badania morfologiczne odpadów. Z wizji terenowych oraz wywiadu z mieszkańcami wynika, iż na składowisku deponowane były odpady komunalne zawierające niewielki procent odpadów organicznych. Głównie dostarczane były opakowania papierowe oraz tekturowe, tworzywa sztuczne, szkło, popiół, gruz budowlany. Z otrzymanych informacji wiadomo, iż na składowisko przywożone były także odpady pochodzące z małych zakładów przemysłowych oraz rzemieślniczych, jak również odpady niebezpieczne (na przykład eternit zawierający szkodliwy azbest).

Niecka, w której znajduje się składowisko charakteryzuje się głębokością równą 2,5 m oraz powierzchnią równą 0,8 ha. Dostarczane przez mieszkańców odpady poddawane były ważeniu w miejscowości Garwacz. Następnie plantowane były na terenie składowiska, zagęszczane oraz przykrywane

piaskiem. Warstwa odpadów o wysokości równej 0,6 m przysypywana była warstwą piasku o wysokości 0,4 m. Przypuszczalna objętość zdeponowanych odpadów wynosi 35 000 m<sup>3</sup> (Osęka i Chrząszcz, 2007).

### 3.4. Interakcja składowiska na środowisko

Na podstawie przeprowadzonego w 2002 roku przeglądu ekologicznego składowiska można stwierdzić, iż zanieczyszcza ono wody podziemne poziomu przypowierzchniowego, jak również stwarza realne zagrożenie dla jakości istniejących wód podziemnych. Z wykonanych w ramach przeglądu badań wynika, że zawartość metali znacznie przekraczała wartości dopuszczalne:

- ołów (Pb): 0,258 mg/dm<sup>3</sup> (wartość dopuszczalna: 0,200 mg/dm<sup>3</sup>);
- kadm (Cd): 0,039 mg/dm<sup>3</sup> (wartość dopuszczalna: 0,020 mg/dm<sup>3</sup>).

W przypadku oznaczania innych wskaźników otrzymano następujące wartości:

- ekstrakt eterowy: 9,0 mg/dm<sup>3</sup>;
- sucha pozostałość: 1 140 mg/dm<sup>3</sup>;
- węgiel organiczny: 72 mg/dm<sup>3</sup>.

Wartości trzech ostatnich wskaźników są podwyższone i również wskazują na negatywne oddziaływanie składowiska na środowisko.

Po zaakceptowaniu prac geologicznych na zrealizowanie sieci monitoringowej składowiska w miejscowości Bodzanów w 2005 roku, wydana została decyzja dotycząca wykonania piezometrów dla wód podziemnych. Od tego momentu przeprowadzane są lokalne badania monitoringowe. Jeden piezometr oznaczony usytuowany został na dopływie wód podziemnych (na głębokości 4,0 m p.p.t.), a dwa inne zlokalizowane zostały na odpływie tychże wód. W trakcie prac służących wykonaniu otworu na głębokości 4,0 m p.p.t. nie stwierdzono występowania wody gruntowej. Można zatem przypuszczać, iż na skutek budowy hydrogeologicznej tego obszaru, a także dużych spadków terenu oraz znacznej deniwelacji powierzchni woda nie ulega gromadzeniu w gruncie, a jedynie sływa w kierunku północnym.

W 2005 roku zostały sporządzone badania wód podziemnych przez laboratorium zewnętrzne. W celu sprawdzenia ich jakości, pobrano próbki wody z dwóch otworów obserwacyjno-pomiarowych. Otrzymane wyniki badań przedstawione zostały w tabeli nr 1.

Tab. 1. Wyniki analizy wód podziemnych z 2005 roku. Opracowanie własne na podstawie (Osęka i Chrząszcz, 2007)

Lp.	Wskaźnik wody	Jednostka	Otwór 1	Otwór 2	Wartość średnia
1	Odczyn	pH	6,90	6,80	6,85
2	Przewodność elektrolityczna właściwa	µs/cm	1 650,0	777,0	1 213,5
3	OWO (ogólny węgiel organiczny)	mg C/dm <sup>3</sup>	6,11	4,56	5,34
4	Chrom (VI)	mg Cr <sup>+6</sup> /dm <sup>3</sup>	0,020	0,030	0,025
5	Cynk	mg Zn/dm <sup>3</sup>	0,324	0,293	0,309
6	Kadm	mg Cd/dm <sup>3</sup>	0,0020	0,0010	0,0015
7	Miedź	mg Cu/dm <sup>3</sup>	0,012	0,010	0,011
8	Ołów	mg Pb/dm <sup>3</sup>	<0,01	0,010	-
9	Rtęć	mg Hg/dm <sup>3</sup>	<0,001	<0,001	-
10	ΣWWA	mg/dm <sup>3</sup>	<0,01	<0,01	-
Odległość otworu obserwacyjno-pomiarowego od zwierciadła wody		m	4,90	3,04	-



Zaprezentowane wyniki nie wskazują negatywnego oddziaływania składowiska na wody podziemne, jednakże badania te były jednorazowe i powinny znaleźć potwierdzenie podczas monitoringu, który prowadzony jest na składowisku (Osęka i Chrzęszcz, 2007).

### 3.5. Rekultywacja techniczna składowiska

W celu wykonania rekultywacji technicznej analizowanego składowiska niezbędne było między innymi wyrównanie powierzchni skarp znajdujących się na składowisku, aby umożliwić wykonanie spadków koniecznych do ułożenia warstw rekultywacyjnych. Ponadto wykonany został nasyp obwałowania technologicznego oraz ukształtowana została pryzma na powierzchni składowiska. Pryzma ta według wykonanego projektu składa się z wyrównawczej warstwy piasku (grubość warstwy minimum 0,3 m), warstwy uszczelniającej wykonanej z mat bentonitowych o charakterze hydroizolacyjnym, warstwy drenażowej (grubość warstwy 0,2 m) oraz warstwy humusu (grubość warstwy 0,2 m). Oprócz tego w ramach rekultywacji technicznej wykonane zostały również rowy opaskowe, ale także zbiornik odparowujący, którego zadaniem jest odbiór spływu powierzchniowego z rowów opaskowych i warstwy drenażowej oraz trzy studnie gazowe.

Celem utworzenia warstwy uszczelniającej było zapobieżenie procesom infiltracji wód opadowych w głąb złoża odpadów. Poza tym, dzięki tej warstwie wody opadowe są odprowadzane poza obszar składowiska, a gazy będące produktem fermentacji odpadów nie przedostają się do atmosfery. Kolejnym zadaniem uszczelnienia jest zapobieganie pyleniu oraz przenoszeniu wraz z wiatrem lekkich części deponowanych odpadów.

### 3.6. Rekultywacja biologiczna składowiska

Rekultywacja biologiczna w przypadku składowiska w Bodzanowie stanowiła fazę końcową procesu rekultywacji. Jej celem było nasadzenie i utrzymanie szaty roślinnej dostosowanej do warunków siedliskowych oraz pasującej do otaczającego krajobrazu. Część biologiczna jest odizolowana od podłoża uszczelniającą matą bentonitową. Z kolei warstwy drenażowa i humusowa stwarzające możliwość wegetacji, odseparowane są od podsiąkania kapilarnego.

U stóp pryzmy nasadzona została inna roślinność niż na pryzmie. Różnica ta wynika z celowości występowania poszczególnych gatunków roślin. U stóp pryzmy nasadzona została wierzba wiciowa, której zadaniem jest odprowadzanie nadmiaru wody oraz zapobieganie migracji odcieków, a także akumulacja zanieczyszczeń, które spływają wraz z wodami. Wierzbę wiciową cechuje znaczny stopień redukcji związków biogenych, to jest: azotu i fosforu, a także zawiesiny oraz BZT5. Ponadto ten rodzaj wierzby charakteryzuje się zdolnościami redukcyjnymi takich pierwiastków jak: arsen, ołów, chrom, rtęć, miedź i cynk. Wierzba wiciowa posiada właściwości buforowe, ma bardzo rozwinięte ukorzenienie oraz cechuje się szybkim wzrostem, co było

szczególnie istotne w przypadku rekultywacji składowiska (Osęka i Chrzęszcz, 2007).

## 4. Podsumowanie i wnioski

Składowisko odpadów „Łysa Góra” przez wiele lat funkcjonowało bez wymaganych prawem pozwoleń. Nie posiadało zarówno naturalnego, jak i sztucznego uszczelnienia. Nie prowadzono na nim ewidencji odpadów, a dane podane przez Urząd Gminy w Bodzanowie mają jedynie charakter szacunkowy. Z danych z ostatniego roku eksploatacji składowiska można wnioskować, iż na składowisku została zdeponowana znacznie większa ilość odpadów niż podaje Urząd. Ponadto oficjalne dane wskazują, iż na składowisko wywożone były jedynie odpady komunalne w znacznej części pozbawione substancji organicznych. Z wywiadu z mieszkańcami (osobami korzystającymi ze składowiska) wynika, iż na składowisko wywożone były odpady każdego rodzaju, w tym odpady niebezpieczne.

Proces rekultywacji nie został przeprowadzony bezpośrednio po zakończeniu jego eksploatacji, lecz dopiero po kilku latach (2012) ze względów finansowych gminy. Istnieje wątpliwość co do zgodności zastosowanych materiałów w kolejnych warstwach okrywy rekultywacyjnej z dokumentacją projektową. W celu sprawdzenia prawidłowości należałoby wykonać badania geologiczne okrywy.

Należy pamiętać, że długotrwała eksploatacja tego typu składowiska będzie skutkowała przez wiele lat. Ocieki ze składowiska między innymi zanieczyściły wodę w studniach okolicznych mieszkańców, co było powodem zaprzestania z ich korzystania. Odpady przez wiele lat deponowane były na składowisku, degradując tym samym środowisko. O ile łatwo było doprowadzić analizowany obszar do stanu degradacji, o tyle proces naprawy skutków tych działań będzie trwał wiele lat.

## Literatura

- Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 27 kwietnia 2007 r. w sprawie składowania odpadów (Dz. U. UE. L. 182 z 16.07.1999, s1 z późn. zm.).
- Departament Środowiska (2014). Zamykanie i rekultywacja składowisk odpadów niespełniających wymagań prawnych. Informacja o wynikach kontroli. *Departament Środowiska*.
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach. Dz. U. 2017 poz. 1566 (tekst jednolity).
- Skalmowski A. (2000) Unieszkodliwianie odpadów. W: Poradnik gospodarowania odpadami. A. Skalmowski (Red.). *Verlag Dashofer*, Warszawa.
- Osęka M., Chrzęszcz J. (2007). Aneks do projektu rekultywacji składowiska odpadów w Bodzanowie.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 czerwca 2013 r. w sprawie składowisk odpadów (Dz. U. 2013 poz. 523).

**OPERATION, CLOSURE AND RECLAMATION  
OF THE UNORGANIZED LANDFILLS ON EXAMPLE  
OF THE LANDFILL CALLED "ŁYSA GÓRA"**

**Abstract:** The aim of the study was to analyse the operation and way of remediation of landfill which had not authorisation required by law but it was used for depositing municipal and hazardous wastes. The landfill called "Łysa Góra" is the example of unorganized landfill. It is located in the village named Bodzanów, belonging to the province of Masovia. This landfill was working since year 1985 without permits required by law. The process of remediation of landfill was analysed and the results of the study of groundwater were shown in the paper.

# EFEKTYWNOŚĆ EKONOMICZNA I ENERGETYCZNA FUNKCJONOWANIA BIOGAZOWNI W ZALEŻNOŚCI OD ZASTOSOWANEGO SUBSTRATU

Maciej ZAŁUSKA\*, Janina PIEKUTIN, Lech MAGREL

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** Badania w artykule dotyczyły efektywności ekonomicznej i energetycznej biogazowni rolniczej oraz biogazowni w oczyszczalni ścieków. W celu otrzymania najlepszych wyników opisujących stan realny, przeanalizowano dane z badanych biogazowni na przestrzeni trzech kolejnych lat, to jest 2014-2016. Po dokonaniu analizy można zauważyć, jak duży wpływ na opłacalność funkcjonowania instalacji do produkcji biogazu ma substrat oraz jego cena. Zysk końcowy przypadający na 1 MWh bez dotacji dla biogazowni w oczyszczalni ścieków wynosi odpowiednio dla kolejnych lat zaczynając od 2014: 187 zł, 168 zł, 168 zł, zaś biogazownia rolnicza wykazywała straty: 4 zł, 18 zł, 28 zł.

*Słowa kluczowe:* biogaz, biogazownia, substrat, efektywność ekonomiczna, efektywność energetyczna.

## 1. Wprowadzenie

Biogaz jest łatwopalnym gazem, składającym się w przybliżeniu z 60% metanu, 30% dwutlenku węgla, 5% wody, resztę stanowią siarkowodór, azot, tlen oraz wodór. Wykorzystując wysoką wartość opałową biogazu wykorzystywany jest on do produkcji energii cieplnej oraz elektrycznej (Ruszkowski, 1999; Rusak i Kowalczyk-Juško, 2007; Dudek i Zalewska-Bartosz, 2010). Wytwarzanie energii z biogazu ogranicza emisję gazów cieplarnianych, co jest ważnym aspektem, biorąc pod uwagę podpisany Protokół z Kioto, regulujący wielkość emisji gazów cieplarnianych. Wykorzystanie odpadów rolniczych i osadów ściekowych do produkcji biogazu zmniejsza zużycie paliw nieodnawialnych.

W tabeli 1 zostały przedstawione podstawowe paliwa wykorzystane do produkcji energii oraz ich wartości opałowe i przeliczenie tych wartości w stosunku do biogazu (Ginalski, 2011). Wartość opałową biogazu można porównać do węgla kamiennego, co oznacza możliwość zastąpienia części produkcji energii z użyciem paliw stałych i zastosowanie biogazu uzyskiwanego w proekologiczny sposób. Rozwiązanie to spowoduje zmniejszenie emisji spalin, co wpłynie na dość duży problem naszego kraju w ostatnich latach – zanieczyszczenie smogiem.

Biogaz powstaje w wyniku przemiany związków organicznych poprzez mikroorganizmy beztlenowe w fermentacji metanowej. Odpowiednie warunki do poprawnego powstawania biogazu stanowi wilgotne otoczenie, stała optymalna temperatura, warunki beztlenowe oraz wystarczająca dostępność materii organicznej.

Tab. 1 Wartość opałowa biogazu oraz porównanie do innych nośników energii (Ginalski, 2011)

Rodzaj paliwa	Wartość opałowa	Przelicznik stosunku do 1m <sup>3</sup> biogazu o wartości opałowej 26 MJ/m <sup>3</sup>
Biogaz	20 - 26 MJ/m <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>
Gaz ziemny	33,5 MJ/m <sup>3</sup>	0,77 m <sup>3</sup>
Olej napędowy	41,9 MJ/dm <sup>3</sup>	0,62 dm <sup>3</sup>
Węgiel kamienny	32,4 MJ/kg	1,1 kg
Biopaliwo z zepaku	36,5 MJ/kg	0,7 kg
Etanol	29,6 MJ/kg	0,85 kg
Drewno opałowe	8-18 MJ/kg	2 kg

W środowisku naturalnym takie warunki spełniają między innymi: torfowiska, pola ryżowe, składowiska odpadów, zwłazce przeżuwaczy (Myczko i in., 2011).

W trakcie produkcji biogazu ważne jest, aby zapewnić odpowiednie parametry środowiska, które zapewniają poprawny przebieg reakcji poprzez odpowiednie warunki bytowania mikroorganizmów. Wahania wartości tych parametrów negatywnie wpływają na mikroorganizmy, co jest jednoznaczne z wyprodukowaniem mniejszej ilości biogazu. Podstawowe parametry wpływające na fermentację możemy podzielić na czynniki fizyczne oraz chemiczne (Szlachta, 1999; Jędrzak, 2007; Myczko i in., 2011).

Celem pracy jest określenie efektywności ekonomicznej i energetycznej funkcjonowania biogazowni w zależności od zastosowanego substratu.

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.zaluska@doktoranci.pb.edu.pl

## 2. Metody badawcze

Do analizy ekonomicznej wybrano dwie pracujące biogazownie: rolniczą i pracującą w oczyszczalni ścieków miejskich.

Pierwszym analizowanym obiektem jest biogazownia rolnicza. Praca biogazowni jest oparta na fermentacji metanowej kiszonki kukurydzianej razem z obornikiem (70%), dodatkowo stosuje się wycierkę ziemniaczaną, wyłok z jabłek, uboczne produkty pochodzenia zwierzęcego oraz odpady spożywcze w ilości 30%. Proces powstawania biogazu (rys. 1) zaczyna się od dostarczenia substratów do komór fermentacyjnych poprzez podajniki ślimakowe, następnie w komorach pod wpływem mikroorganizmów zostaje produkowany biogaz.

Drugim obiektem (rys. 2) jest instalacja fermentacji metanowej w oczyszczalni ścieków miejskich. Biogaz z wydzielonych komór fermentacji transportowany jest do zbiornika sferycznego, a następnie do dwóch silników kogeneracyjnych. Poferment jest suszony, a następnie transportowany na składowisko. Spełnienie odpowiednich wymagań zawartych w art. 4 ust. 2 ustawy z dnia 10 lipca 2007 r. (Dz.U. 2007 Nr 177, poz. 1033) umożliwia wykorzystywanie wysuszonego granulatu do nawożenia pól. Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony schemat instalacji biogazu na oczyszczalni ścieków.

Do obliczenia analizy efektywności substratów wykorzystano następującą zależność

$$\text{Efektywność energetyczna} = \frac{\text{Ilość biogazu zużyta na produkcję energii elektrycznej i ciepła [m}^3\text{]}}{\text{Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej z biogazu [MWh]}} \quad (1)$$

Obliczenie końcowego zysku, przypadającego na 1 MWh wyprodukowanej energii elektrycznej

określane jako efektywność ekonomiczną każdej z biogazowni policzono według wzoru (2):

$$\text{Efektywność ekonomiczna} = \frac{\text{Zysk ze sprzedanej energii} + (\text{wartość certyfikatów}) - \text{koszty substratu}}{\text{Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej z biogazu [MWh]}} \quad (2)$$

Wyrażenie „wartość certyfikatów” ujęto w nawiasie, ponieważ obliczono dwa warianty:

- zysk końcowy przypadający na 1 MWh [zł],
- zysk końcowy przypadający na 1 MWh, bez uwzględniania instrumentu pomocowego jakim są zielone oraz żółte certyfikaty [zł].

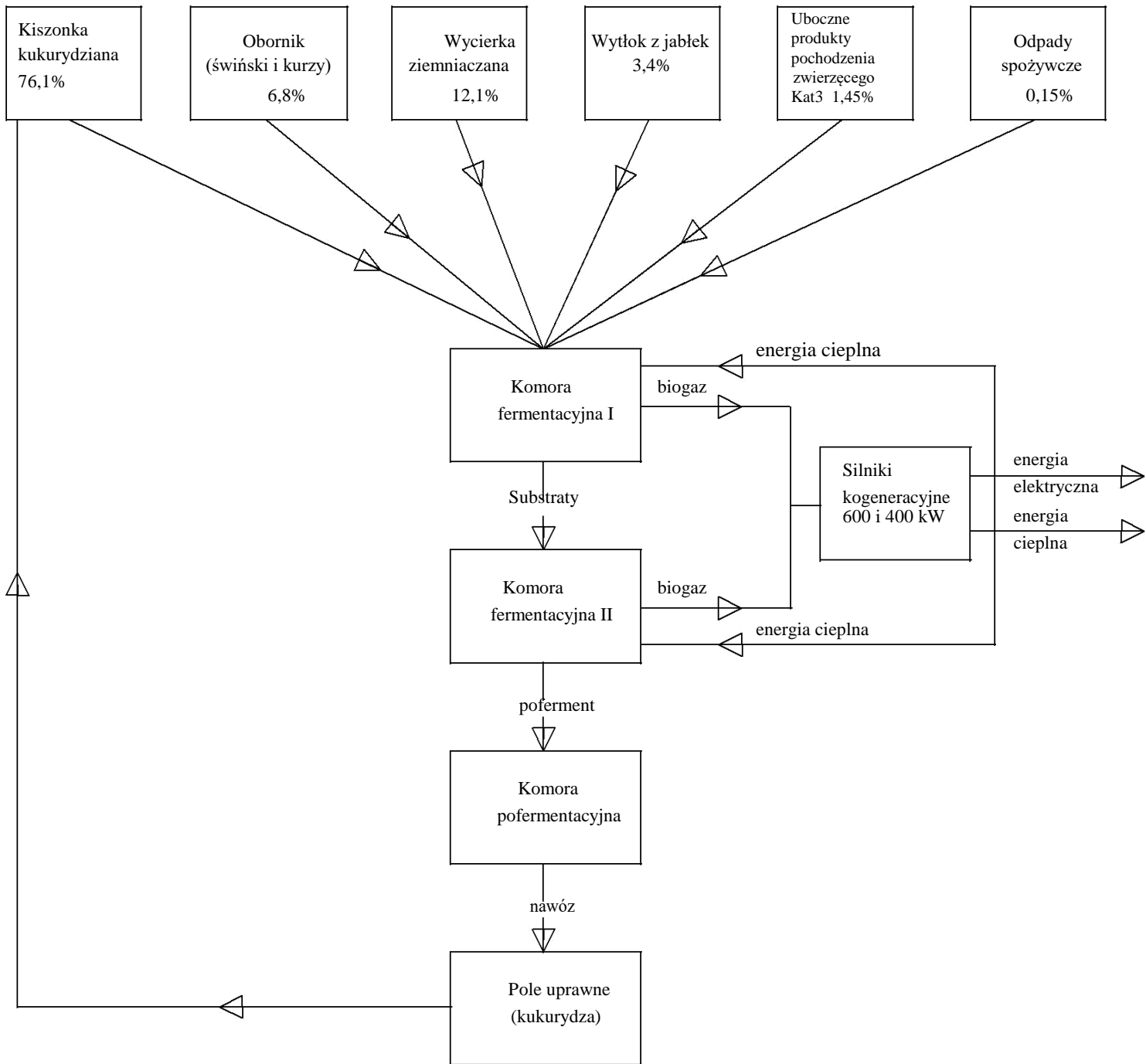
Zielone certyfikaty są to świadectwa pochodzenia energii elektrycznej wytworzonej z Odnawialnych Źródeł Energii, zaś żółte świadczą o pochodzeniu energii wytworzonej w jednostkach kogeneracyjnych o mocy mniejszej niż 1 MWe. Certyfikaty te są przydzielane producentom energii ze źródeł odnawialnych i mogą być przez nich sprzedawane na Towarowej Giełdzie Energii, co stanowi dodatkowy zysk produkcji energii.

## 3. Analiza wyników badania

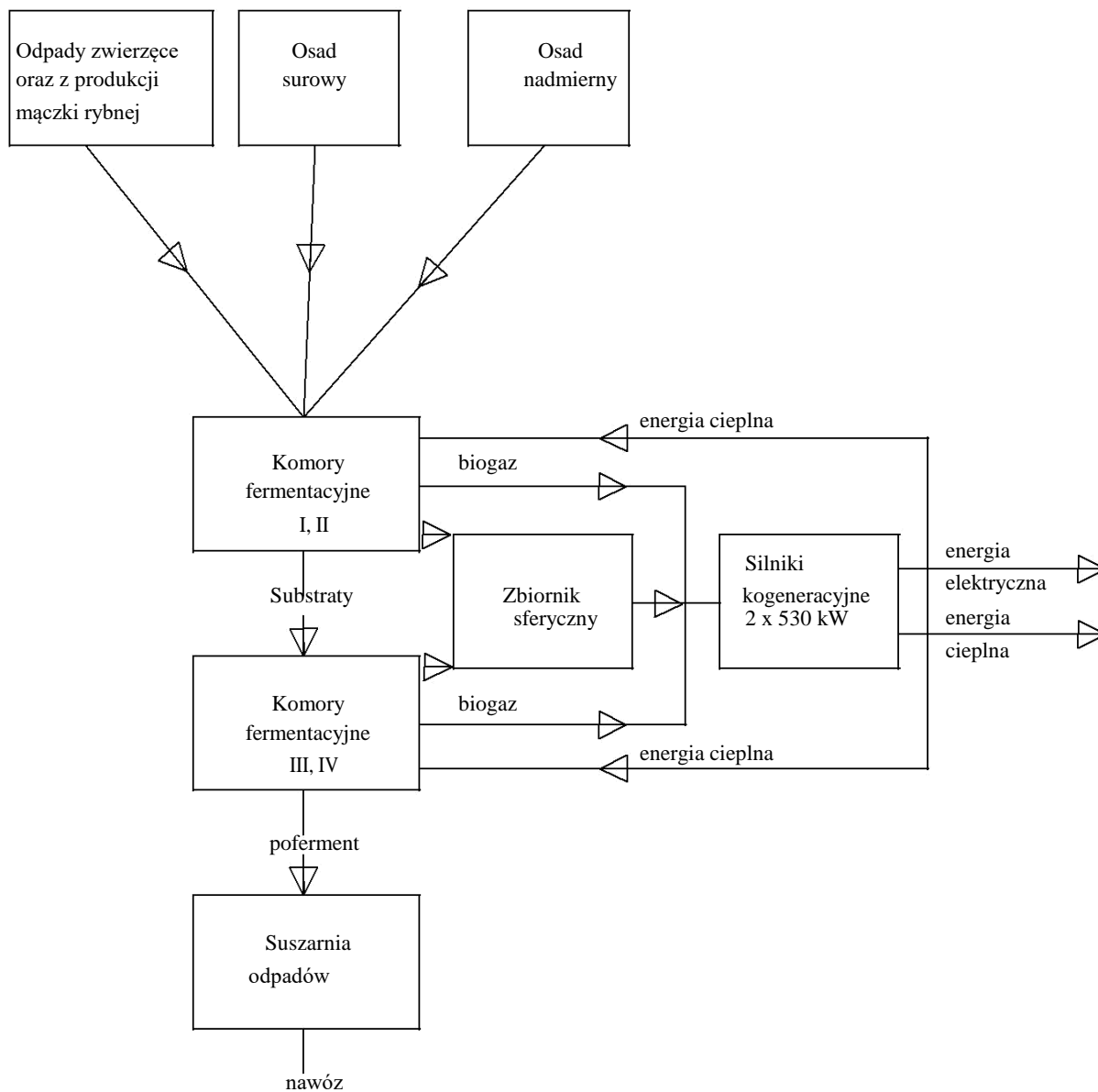
Dane dotyczące ilości biogazu wytworzonego w biogazowni rolniczej oraz w biogazowni funkcjonującej przy oczyszczalni ścieków w latach 2014-2016 pokazano w tabeli 2. Tabela 2 zawiera zarówno informacje o ilości wytworzonego biogazu i energii elektrycznej, jak i wyniki obliczeń ekonomicznych, dzięki którym można jednoznacznie stwierdzić, która biogazownia przynosi zyski lub straty i od jakich czynników jest to uzależnione.

Tab. 2. Wyniki badań oraz obliczeń dla biogazowni rolniczej (R) oraz biogazowni przy oczyszczalni ścieków (OŚ)

Typ biogazowni	2014		2015		2016	
	R	OŚ	R	OŚ	R	OŚ
Ilość biogazu zużyta na produkcję energii elektrycznej i ciepła [m <sup>3</sup> ]	3408570	4296240	3589840	4423126	3212798	4839405
Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej z biogazu [MWh]	7320	9620	7867	10141	7234	10701
Ilość biogazu zużyta na produkcję 1 MWh [m <sup>3</sup> ] – efektywność energetyczna (sprawność)	466	447	456	436	444	452
Zysk ze sprzedanej energii elektrycznej [zł]	1244293	1794052	1209201	1704474	1117332	1801847
Zysk jednostkowy ze sprzedanej energii [zł]	170	187	154	168	154	168
(+) Wartość zielonych i BIO certyfikatów	1245115	1636370	849667	1095260	1288685	1816427
(+) Wartość żółtych certyfikatów	0	0	226871	0	412834	0
(-) Koszty substratów	1273925	0	1353267	0	1320832	0
(=) Zysk końcowy = Zysk ze sprzedanej energii elektrycznej + certyfikaty - koszty wytworzenia biogazu (korzystność)	1215483	3430421	932471	2799734	1498019	3618274
Zysk końcowy przypadający na 1 MWh [zł]	166	357	119	276	207	338
Zysk końcowy przypadający na 1 MWh (bez dotacji) [zł]	-4	187	-18	168	-28	168



Rys. 1. Schemat badanej biogazowni rolniczej



Rys. 2. Schemat badanej biogazowni przy oczyszczalni ścieków

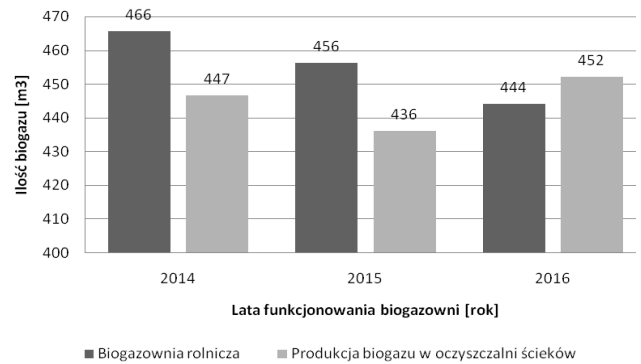


Analizując efektywność energetyczną substratów (rys. 3) można zauważyć, że efektywność energetyczna biogazu kształtuje się na podobnym poziomie. W latach 2014 oraz 2015 biogazownia rolnicza odnotowała niższą efektywność w porównaniu do biogazowni wykorzystującej osady ściekowe, ponieważ do produkcji 1 MWh energii elektrycznej potrzebowała większą ilość biogazu w m<sup>3</sup>. W roku 2016 efektywność energetyczna kształtowała się na zbliżonym poziomie w obu biogazowniach. Można wysunąć wniosek, że odpady pochodzenia rolniczego są mniej kaloryczne, co przekłada się później na większą ilość biogazu potrzebną do wytworzenia 1 MWh energii elektrycznej. Natomiast zróżnicowane poziomy efektywności energetycznej w poszczególnych latach mogą wynikać: w biogazowni rolniczej – z różnych mieszanek substratów, w biogazowni przy oczyszczalni ścieków – z jakości osadu ściekowego.

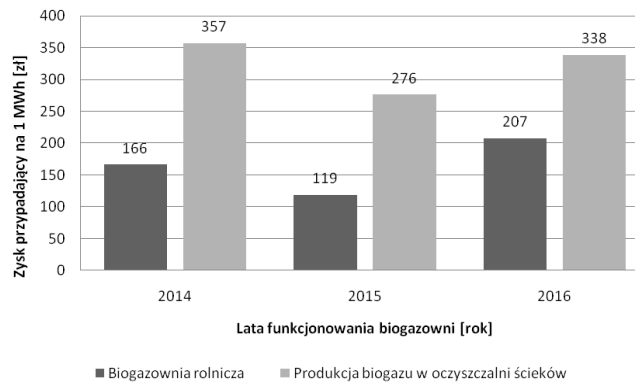
Poddając analizie wyniki obliczeń (rys. 4) zauważono, że w każdym rozpatrywanym roku biogazownia działająca przy oczyszczalni ścieków odznaczała się około 2-krotnie wyższym zyskiem końcowym przypadającym na 1 MWh wyprodukowanej energii. Przyczyną tak zróżnicowanych efektów ekonomicznych są koszty substratów – biogazownia rolnicza, aby funkcjonować, jest zmuszona do skupu odpadów pochodzenia rolniczego, które są niezbędne do produkcji biogazu. Natomiast biogazownia działająca przy oczyszczalni ścieków nie ponosi kosztu zakupu substratu, ponieważ wykorzystywany do przemian osad ściekowy jest odpadem procesowym funkcjonowania oczyszczalni ścieków.

Drugi wariant obliczenia zysku końcowego zakłada nieuwzględnianie pomocy finansowej, jaką stanowią certyfikaty. Oszacowano, jak będzie kształtował się zysk bez instrumentu pomocowego, w naturalnych warunkach rynkowych. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 5.

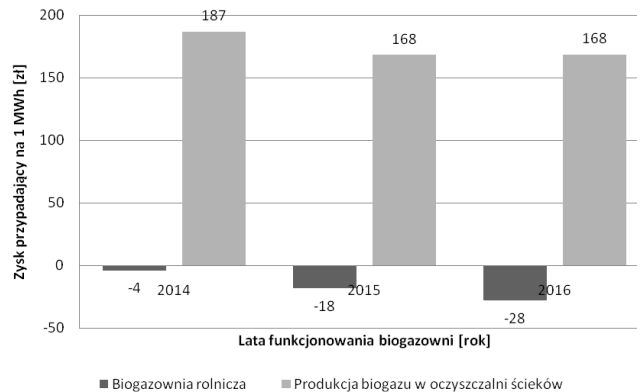
Analizując wyniki obliczeń (rys. 5) można zauważyć, że na przestrzeni analizowanego okresu lat 2014-2016, w przypadku nieuwzględniania instrumentów pomocowych jakimi są certyfikaty, zysk końcowy jest o wiele mniejszy w porównaniu do poprzedniej analizy. Ponadto, dla biogazowni wykorzystującej odpady pochodzenia rolniczego zysk przypadający na 1 MWh w każdym rozpatrywanym roku jest ujemny. Przyczyną jest brak dotacji oraz wysokie koszty zakupu substratu. Pozwala to wysunąć wniosek o braku efektywności oraz ekonomicznego uzasadnienia funkcjonowania biogazowni rolniczej w przypadku braku dofinansowania i instrumentów pomocowych ze strony państwa.



Rys. 3. Efektywność energetyczna substratów w biogazowni rolniczej oraz w biogazowni przy oczyszczalni ścieków



Rys. 4. Zysk końcowy przypadający na 1 MWh energii elektrycznej wytworzonej w biogazowni rolniczej oraz w biogazowni przy oczyszczalni ścieków



Rys. 5. Zysk końcowy przypadający na 1 MWh energii elektrycznej wytworzonej w biogazowni rolniczej oraz w biogazowni przy oczyszczalni ścieków – bez uwzględniania instrumentów pomocowych

## Podsumowanie

Współczesna gospodarka charakteryzuje się coraz mniejszą stabilnością, co przejawia się w nieustannym wzroście cen paliw. W tej sytuacji konsumenci szukają alternatywnych sposobów pozyskiwania taniej energii. Ponadto, ważną rolę odgrywają kwestie ochrony środowiska naturalnego, które kładą nacisk na stosowanie czystych, „zielonych”, a tym samym niskoemisyjnych źródeł energii. Pojawia się również zagadnienie bezpieczeństwa energetycznego państwa i stopniowe

odchodzenie od zcentralizowanych źródeł zasilania na rzecz „energetyki rozdrobnionej”. Pewnego rodzaju pomostem, łączącym kwestie ekonomiczne, środowiskowe oraz energetyczne, wydaje się być biogaz, będący alternatywnym źródłem energii.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizie uzyskanych wyników wyciągnięto następujące wnioski:

- Biogazownia rolnicza odnotowała niższą efektywność w porównaniu do biogazowni wykorzystującej osady ściekowe, ponieważ do produkcji 1 MWh energii elektrycznej potrzebowała większą ilość biogazu w m<sup>3</sup>.
- Biogazownia działająca przy oczyszczalni ścieków odznaczała się wyższym zyskiem końcowym przypadającym na 1 MWh wyprodukowanej energii.
- Wykazano, że zysk końcowy jest o wiele mniejszy w porównaniu do analizy uwzględniającej dofinansowanie.
- Biogazownia wykorzystująca osady ściekowe charakteryzuje się wyższą efektywnością energetyczną oraz ekonomiczną.

### Literatura

- Dudek J., Zaleska-Bartosz J. (2010). Pozyskiwanie i wykorzystywanie biogazu do celów energetycznych. *Problemy Ekologii*, 1/2010, 13-16.
- Ginalski Z. (2011). Substraty dla biogazowni rolniczych. *Centrum Doradztwa Rolniczego Oddział Radom*, Radom
- Jędrzak A. (2007). Biologiczne przetwarzanie odpadów, *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.

Myczko A., Myczko R., Kołodziejczyk T., Golimowska R., Lenarczyk J., Janas Z., Kliber A., Karłowski J., Dolska M. (2011). Budowa i eksploatacja biogazowni rolniczych. Poradnik dla inwestorów zainteresowanych budową biogazowni rolniczych. *Wydawnictwo ITP*, Warszawa-Poznań.

Rusak S., Kowalczyk-Juśko A. (2007). Biogazownia rolnicza – warunki eksploatacyjne. *Czysta Energia*, Nr 9/2007, 22-23.

Ruszkowski J. (1999). Odnawialne źródła energii jako alternatywne substytuty konwencjonalnych surowców energetycznych. *Wydawnictwo uczelniane Akademii Ekonomicznej im. Karola Adamieckiego w Katowicach*, Katowice.

Szlachta J. (1999). Niekonwencjonalne źródła energii. *Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu*, Wrocław.

Ustawa z dn. 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu. *Dz.U.* 2007 Nr 177, poz. 1033.

### ECONOMIC AND ENERGETIC EFFICIENCY OF BIOGAS PLANT DEPENDING ON THE SUBSTRATE APPLICABLE

**Abstract:** In order to obtain the results most accurately describing the real state of economic and energetic efficiency, the data from the various biogas plants was analysed over the next three years, i.e. 2014-2016. After the analysis, it should be noticed that the substrate and its price have a significant impact on the profitability of the biogas plant operation. A biogas plant using substrates of agricultural origin bears large costs related to the purchase of the load. However, the installation using sewage sludge from the sewage treatment plant does not bear any costs related to the substrates, but shows significant profits.

spis treści / contents:

Recenzenci 2017 – Podziękowania Recenzentom Reviewers 2017 – Editorial Acknowledgment .....	5
MARIUSZ ADAMSKI, AGATA MYSZKOWSKA Rozliczanie kosztów ogrzewania na przykładzie wybranego mieszkania Heating cost calculations on the example of the selected apartments .....	7
IWONA CHMIELEWSKA Współczynnik filtracji torfów Coefficient of permeability of peat .....	15
MACIEJ CHOLEWIŃSKI Mild pyrolysis of coals and its impact on possible mercury releases from pulverised coal-fired power plants .....	23
BŁAŻEJ SMOLIŃSKI Analiza zastosowania paneli GRP do modernizacji wielkośrednicowych kolektorów ściekowych Analysis of the application of GRP panel technologies for modernisation of large-diameter sewage collectors .....	33
DARIUSZ TOMASZEWICZ Steel frame as the basis for checking the pull-out capacity of bonded diagonal anchor bolts .....	39
MARTA WIŚNIEWSKA Eksploatacja, zamknięcie i rekultywacja składowisk niezorganizowanych na przykładzie składowiska „Łysa Góra” Operation, closure and reclamation of the unorganized landfills on example of the landfill called "Łysa Góra" .....	45
MACIEJ ZAŁUSKA, JANINA PIEKUTIN, LECH MAGREL Efektywność ekonomiczna i energetyczna funkcjonowania biogazowni w zależności od zastosowanego substratu Economic and energetic efficiency of biogas plant depending on the substrate applicable .....	51