

STRUCTURE AND ENVIRONMENT

ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND ENERGY

No. 4/2016 vol. 8 PL ISSN 2081-1500 www.sae.tu.kielce.pl KIELCE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Contents

structure

PRZEMYSŁAW BUCZYŃSKI

FATIGUE LIFE COMPARISON OF RECYCLED COLD MIXES WITH DIFFERENT TYPE OF BITUMEN BINDER	217
---	------------

WIKTOR WCIŚLIK, PAWEŁ KOSSAKOWSKI

CARRYING CAPACITY ASSESSMENT AND STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OPERATING IN CHEMICALLY AGGRESSIVE ENVIRONMENT	224
--	------------

URSZULA PAWLAK, MICHAŁ SZCZECINA

THE EIGENVALUE PROBLEM IN THE DYNAMICS OF THE STEEL INDUSTRIAL HALL WITH INTERNAL HANDLING SYSTEM	229
--	------------

GRZEGORZ MAZUREK

IMPLEMENTATION OF THE GENERALIZED VISCOELASTIC HUET-SAYEGH AND BURGERS MODEL TO DETERMINE THE STIFFNESS MODULUS OF ASPHALT CONCRETE	237
--	------------

JOANNA GIL-MASTALERCZYK

GREEN ARCHITECTURE AND NATURAL-CULTURAL TEAMS – IN THE TEACHING PROCESS	243
--	------------

environment

JOLANTA LATOSIŃSKA, MACIEJ LECH, ANNA PALUCH, ŁUKASZ GALARCZYK

EFFECT OF THE ADDITION OF ASH FROM THE INCINERATION OF SEWAGE SLUDGE ON THE PROPERTIES OF CEMENT SLURRIES	253
--	------------

MARIA ŻYGADŁO, MARLENA DĘBICKA

THE ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF MECHANICAL-BIOLOGICAL WASTE TREATMENT BY LCA METHOD	260
--	------------

PAWEŁ PURGAŁ, JOANNA PASTERNAK

MIXED BIOMASS AS AN ALTERNATIVE ENERGY FUEL	266
--	------------

MAREK TELEJKO, EWA ZENDER-ŚWIERCZ

MICROCLIMATE IN ROOMS HEATED BY TILED FIREPLACE WITH THE FUNCTION OF ACCUMULATION OF HEAT	273
--	------------

ANATOLIY M. PAVLENKO, HANNA V. KOSHLAK, JERZY ZB. PIOTROWSKI

DETERMINATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN THE PHASE-CHANGE HEAT STORAGE DEVICE	278
---	------------

HOW TO PREPARE THE MANUSCRIPT	283
--	------------

THE REVIEW PROCESS	284
---------------------------------	------------

EDITORIAL BOARD

Main Editor Jerzy Z. Piotrowski
Editor Radosław Zaborek
Secretary of the Editorial Board Łukasz J. Orman
Sectional Editor STRUCTURE Marek Iwański
Sectional Editor ENVIRONMENT Lidia Dąbek

SCIENTIFIC BOARD

STRUCTURE

Chairmanship Jerzy Wawrzeńczyk

Tomasz Arciszewski (USA), Lesław Brunarski, Go Iwahana (Japan), Zbigniew Kowal, Jozef Melcer (Slovakia), Michail V. Nemchinov (Russia), Zdzisława Owsiak, Victor Proskuriakow, Zbigniew Rusin, Waław Seruga, Małgorzata Wilczkiewicz (USA)

ENVIRONMENT

Chairmanship Tomasz Kozłowski

Satoshi Akagawa (Japan), Elżbieta Bezak-Mazur, Mark Bomberg (Canada), Dorota Chwieduk, Graham Herbertson (Scotland), Andrej Kapjor (Slovakia), Andrzej Kaplon, Andrzej Kulickowski, Janusz Łomotowski, Paweł Purgał, Leszek Radziszewski, Jacek Szewczyk, Maria Żygadło

Photos on the cover Trump Tower NYC — author Jerzy Z. Piotrowski

www.sae.tu.kielce.pl

sae@tu.kielce.pl

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

The Journal published by the Kielce University of Technology

PL ISSN 2081-1500

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2016

25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
tel. 41 34 24 581
www.wydawnictwo.tu.kielce.pl



Kielce University of Technology
2016



structure
structure

PRZEMYSŁAW BUCZYŃSKI
Kielce University of Technology
e-mail: p.buczynski@tu.kielce.pl

FATIGUE LIFE COMPARISON OF RECYCLED COLD MIXES WITH DIFERENT TYPE OF BITUMEN BINDER

Abstract

Knowledge of the fatigue life is required to properly predict pavement structure reliability with respect to the number of loading cycles. The possibility of using foamed bitumen and bitumen emulsion as binders in the composition of road bases makes it necessary to identify the influence of the binder type on the service life of these layers through dynamic tests. Obtaining proper physical and mechanical parameters does not necessarily ensure the correct evaluation of the recycled base quality. Satisfaction of the quality-related requirements does not guarantee the provision of the required fatigue life parameters. Cold recycled bases with cement should work within the viscoelastic range due to hydraulic bonding in the structure. If this range is exceeded, a considerable rise in strains occurs as a result of brittle fracture, leading to the loss of fatigue life.

The paper presents the results from the fatigue tests of recycled bases. The amount of bitumen used in both cases was 3% and 5%. For the production of the bitumen emulsion and foamed bitumen, 70/100 pen bitumen was used. Portland cement I 32,5R was applied as a binder. The binder comprised 3% of the mineral composition of the recycled base layer. Fatigue tests were performed in compliance with the requirements of enclosure E of PN-EN 12697-24 at a constant normal stress of 250 kPa, 375 kPa and 500 kPa. The results were used to compare the effects of the binder type applied to the recycled base and determine the service life in terms of the stress applied.

Keywords: recycled cold mix, fatigue life, bitumen emulsion, foamed bitumen, cement, hydrate lime

1. Introduction

Deep cold recycling technology is now a solution applied worldwide to the rehabilitation of distressed pavement layers [1-3]. Limiting values for cold recycled bases (RCM – Recycled Cold Mix) are established nationally [4-8]. Investigations into the influence of individual components and interaction between them on the quality and service life of RCM bases in terms of, for example, frost durability [9], effect of the binding agent type [10, 11], possibility of using recycled aggregates, bitumen types, etc., have been reported in numerous publications. The design in which RCM base quality assessment is based only on conventional parameters, i.e., elastic modulus, indirect tensile strength or resistance to the action of water, does not provide required information about the fatigue life of road pavement structure with the recycled base layer. Many researchers in the highway engineering area [12-14] evaluate the quality of the recycled layers using fatigue life testing under cyclic

loads (controlled stress or strain). Dynamic loads are more destructive in cement-based structural layers than in fully flexible layers. Exceeding the limiting values of indirect tensile strength leads to cracking due to inadequate support of the layer relative to the load applied or, in extreme cases, to the overload. Cyclic loads reduce structural capacity of the pavement, which results from the drop in elastic modulus and increase in strain [15, 16]. The location of the recycled base layer [17] within the structural system is also important, as is the design number of axles 100 kN per design lane. Preliminary analyses [18] show that obtaining the required physical and mechanical parameters of the emulsion-based RCM base during the designing phase does not ensure providing the pavement structure with the required fatigue life. Stress values from the computational model transferred to the laboratory simulation showed that the fatigue life criterion laid down in enclosure E of PN-EN 12697-24 was not met. With the above in

mind, determining the fatigue life of a given recycled base layer with respect to type of the binder may facilitate decision-making process concerning the selection of binders for RCM bases.

2. Research plan

2.1. Object of study

To study the influence of the bitumen binder on the service life of the RCM base, the designed mineral-cement mix had to meet the requirements for limit curves of base layers with foamed bitumen [7] and with bitumen emulsion [8] intended for the road under 0.50 – 2.5 million axles 100 kN [19]. The combination of components allowed a simulation of the use of waste material derived from a road pavement. To evaluate the fatigue life of the recycled base layer, samples were obtained and tested in a laboratory using the indirect tensile test (ITT) in compliance with PN-EN 12697-24 Appendix E. To assess the impact of loading on the recycled base layer, the test was performed at constant stress levels. The normal stress levels used in the tests were selected based on the literature data [18, 19] and preliminary calculations of computational models for typical layer systems in the road pavement structure laid on elastic subgrade. Three levels were selected to vary the load effect: 250 kPa, 375 kPa and 500 kPa. The end of the test was tantamount to the failure of the specimen or to the completion of 30 000 strain cycles at the constant stress value. These assumptions comply with the regulations as given in enclosure E to the PN-EN 12697-24 reference standard.

2.2. Mix design

The mineral-cement mix design was prepared based on the technical guidelines and limit curves specified therein for the mix with foamed bitumen [7] and with bitumen emulsion [8].

The following components were used to produce the mineral-cement mix intended for the recycled base layer with foamed bitumen (FB-RCM) and bitumen emulsion [20] (BE-RCM): recycled asphalt pavement (RAP), crushed-stone aggregate from the existing base layer and continuously graded aggregate 0/4 mm. The design of the grading curve had to meet the criterion of good grading both for FB-RCM [7] and for BE-RCM [8, 21]. To provide the required aggregate grain size relative to the size of the Marshall mould, aggregates of sizes greater than 31.5 mm were separated. Figure 1 shows the designed grading curve.

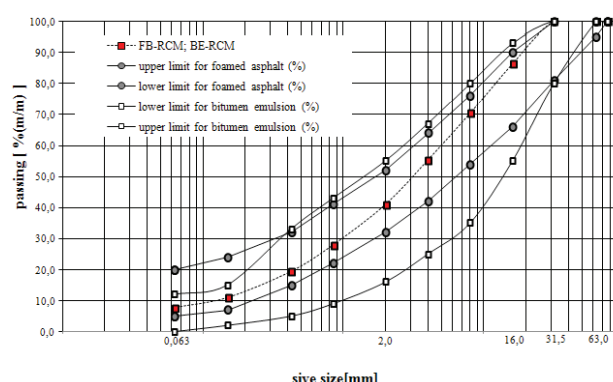


Fig. 1. Design grading curve of the recycled base layer

The same bitumen grade, 70/100, was used to produce foamed bitumen and emulsion. The bitumen binder in the cold base mix comprised 3% (m/m) and 5% (m/m). Type of the bitumen emulsion [20, 22] (C60B10ZM/R) was chosen according to the requirements laid down in PN-EN 13808:2013-10.

The design amount and the applied amount of the foamed bitumen were equal, whereas the amount of the bitumen emulsion had to be adjusted by adding water in order to obtain the same amounts of bitumen in the base mix composition. Thus the emulsion contents in the recycled base amounted to 5.0% (m/m) and 8.3% (m/m). Portland cement class 32.5 with high early strength, without additional constituents (CEM I 32,5R), was used as a binder at 3% (m/m).

Foaming characteristics of the bitumen were determined based on changes in water injection rate from 1.0% to 4.5% added at 0.5% increments, as well as on the expansion ratio ER_m (maximum Expansion Ratio) and half life of the bitumen H-I (Half life) [7]. The test results indicated that the optimum content of water needed to foam the bitumen in question was 3.0% at ER_m = 8.0 and H-I = 6.0 s.

The next stage of the recycled base mix design included determination of the optimum water content needed to obtain the maximum density of the mineral skeleton using the Proctor method defined by PN-EN 13286-2. The amount of water for the optimum moisture content was found to be 5.5% (m/m).

3. Durability assessment of the recycled base layer

The fatigue test of the RCM with respect to the bitumen binder was performed in compliance with enclosure E of PN-EN 12697-24 (Fatigue life test, IT-FT - Indirect Tensile-Fatigue Test). The specimens were subjected to compressive semi-sinusoidal repeated loading. A vertical diameter plane applied the load until the failure of the specimen.

To determine changes in the RCM, the fatigue test was performed at controlled stress. Normal stress values in the centre of the specimen were 250 kPa, 375 kPa and 500 kPa. Owing to varied specimen sizes and stress values, it was necessary to calculate the force, which induces stresses of equal value. The stress was calculated according to equation (1) with conversion to the value of the force sought.

$$\sigma_o = \frac{2P}{\pi \cdot t \cdot D} \quad (1)$$

where: σ_o – tensile stress; P – maximum load, t – thickness of sample, D – diameter of sample.

Fatigue evaluation was represented as a change in strain level in the recycled base with respect to the binder used (foamed bitumen and bitumen emulsion). Prior to the test, the specimens were conditioned for 4 hours at 20°C.

The classical approach was used for fatigue life estimation of the RCM in terms of the binder amount and type [23, 24]. In the conventional method the fatigue failure is determined either when the strain reaches the double of initial value or when the elastic modulus drops to 50% of initial value [23, 25].

4. Results

4.1. Fatigue curves

Figure 2 shows fatigue characteristics. The fatigue plots are presented as a relationship between the number of loading cycles (log) and strain increase.

Different fatigue progress was observed at the stress of 375 kPa for the RCM with emulsion, and identical at 250 kPa for the base with foamed bitumen. The stress of $\sigma_o = 375$ kPa applied to the RCM with bitumen emulsion (3% and 5%) showed an increase in strain and the specimen failure before required 30 000 stress/strain cycles were completed. At failure, the specimens made with bitumen emulsion showed a strain of 830 μm . Fatigue resistance loss in the RCM with bitumen emulsion occurred after 12 401 cycles for 3% emulsion content and after 3021 cycles for 5% emulsion content. Also, the recycled base layer with foamed bitumen at 375 kPa did not show any changes in fatigue life within 30 000 cycles. An increase in initial strain of 20 μm was observed for FB-RCM at the stress increase of 125 kPa relative to 250 kPa. Analysis of fatigue curves of recycled bases made with foamed bitumen and bitumen emulsion at 500 kPa indicated a decline in fatigue resistance before the completion of 30 000 loading cycles. Similarly to the results obtained at 250 kPa and 375 kPa, the RCM

with bitumen emulsion at 500 kPa had the higher initial value and lower fatigue life with respect to the number of stress/strain loading cycles that the RCM base made with foamed bitumen.

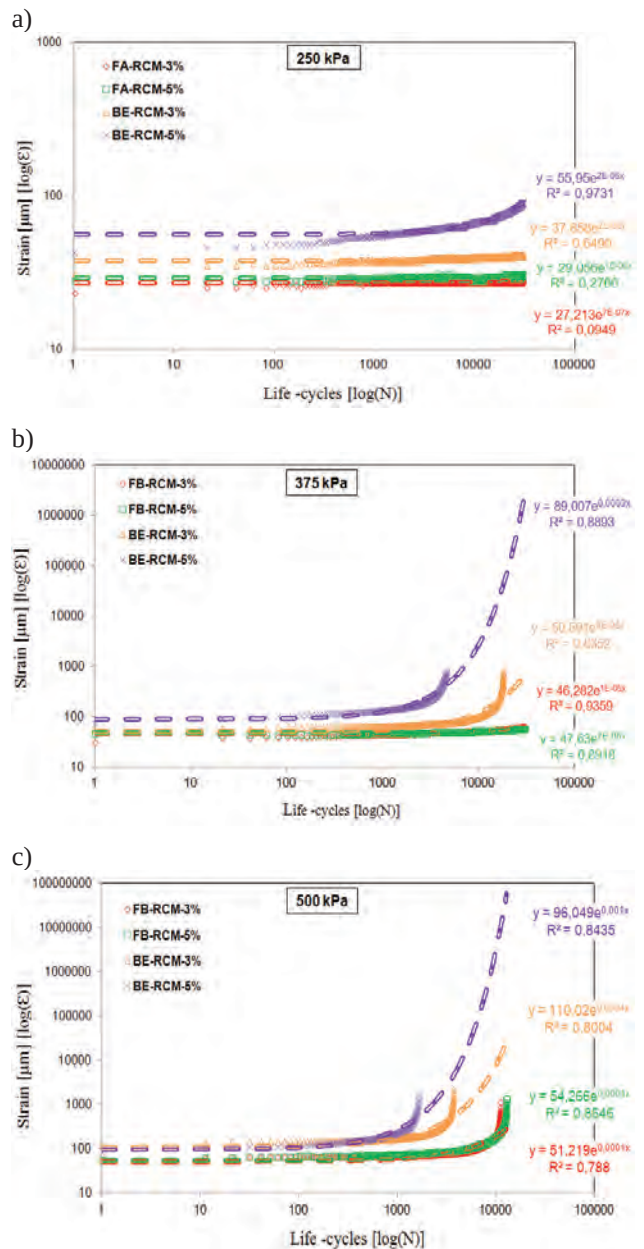


Fig. 2. Fatigue curves of the recycled base layer with respect to the binder type and normal stress: a) 250 kPa; b) 375 kPa; c) 500 kPa

4.2. Fatigue life evaluation

Fatigue life estimation was performed with respect to assumptions of the conventional method, which determines fatigue failure after reaching the double of initial strain. Regression curves describe the fatigue failure at the set level of stress, and the results are summarised in Figure 3.

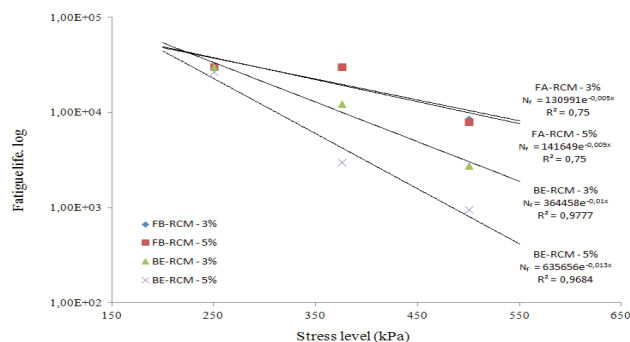


Fig. 3. Regression curve of fatigue life according to conventional method ($\log N_f$ – stress σ)

Normal stress equal to 250 kPa does not cause any changes in the recycled base structure, irrespective of the type or amount of bitumen binder used. All bases are characterised by the maximum, test-determined number of stress/strain loading cycles (σ - ϵ). The fatigue correlation curves of the recycled bases with foamed bitumen, regardless of the bitumen content, lie close to one another. This confirms that the foamed bitumen content does not affect the fatigue life of the RCM base. The evaluation of the exponent of the function describing the fatigue life indicates that the RCM base with 3% content of bitumen emulsion shows two times faster decline in fatigue life compared with the RCM base made with 3% foamed bitumen. When 5% emulsion is used, the rate of fatigue life decline is three times faster. Therefore, it can be stated that recycled base layers with foamed bitumen will work over a wider viscoelastic range with respect to the stress levels that occur in the base layer.

5. Conclusion

Based on the analyses of fatigue life and fatigue characteristics of the recycled bases with foamed bitumen and bitumen emulsion, the following conclusions can be made:

- The type of the bitumen binder used does not affect the void space content in the recycled base layer. Recycled base layers with foamed bitumen and bitumen emulsion have the same void space contents, which allows a comparison of the results from the tests of their physical and mechanical properties as well as fatigue resistance.
- The recycled cold base with foamed bitumen shows the higher indirect tensile strength at 25°C compared with the strength of the base with bitumen emulsion. This is probably due to the technology of lowering bitumen viscosity by bitumen dispersion in water and the need to add emulsifiers and stabilizers to the binder to stabilise the mix.

- Recycled base layers with foamed bitumen and bitumen emulsion at a low stress of 250 kPa show similar changes of fatigue curves and do not show fatigue failure associated with the double increase in the initial strain value.
- Higher resistance to fatigue in the mode of controlled stress is observed in the base layer made with foamed bitumen as a binder. Generation of high stresses equal to 500 kPa changes the fatigue life of the base layer with foamed bitumen and leads to exceeding acceptable strain levels.

References

- [1] Tabaković A., McNally C., Fallon E.: *Specification development for cold in-situ recycling of asphalt*. Construction and Building Materials, 102 (2016), pp. 318-328.
- [2] Stimilli A., Ferrotti G., Graziani A., Canestrari F.: *Performance evaluation of a cold-recycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt*, Road Materials and Pavement Design. 14 (2013), pp. 149-161.
- [3] Hashemian L., Kavussi A., Aboalmaali H.H.: *Application of foam bitumen in cold recycling and hydrated lime in airport pavement strengthening*, Case Studies in Construction Materials. 1 (2014), pp. 164-171.
- [4] Engineering manual, *Design and construction guidelines for full depth reclamation of asphalt pavement*, State of New York Department OF Transportation Geotechnical Engineering Bureau. August 2015.
- [5] Asphalt Academy, TG-2: *Bitumen Stabilized Materials, A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilized Materials*, Asphalt Academy, Pretoria, South Africa, May 2009.
- [6] Batista F., Valentin J., Čížková Z.: *Recycling: Road construction in a post-fossil fuel society CoRePaSol Characterization of Advanced Cold-Recycled Bitumen Stabilized Pavement Solutions Report on available test and mix design procedures for cold-recycled bitumen stabilised materials*, CEDR Call 2012.
- [7] Wirtgen GmbH, *Cold Recycling Technology*. Manual, 2nd edition, Germany 2012.
- [8] Dołżycki B.: *Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych*, GDDKiA, Gdańsk 2014 (in Polish).
- [9] Iwański M., Chomicz-Kowalska A.: *The effects of using foamed bitumen and bitumen emulsion in the cold recycling technology*, 8th Inter. Conference. Environmental Engineering, Vilnius, Lithuania. (2011) pp. 1089-1096.
- [10] Buczyński P., Lech M.: *The Impact of One-, Two- and Three-component Hydraulic Road Binder on the Properties of the Hydraulically Bound Mixture*. Procedia Engineering 108, (2015), pp 116-123. doi:10.1016/j.proeng. 2015.06.126.

- [11] Mahamedi A., Khemissa M.: *Stabilization of an expansive over consolidated clay using hydraulic binders*, Housing and Building National Research Center HBRC Journal HBRC Journal 11 (2015), pp. 82-90.
- [12] Yan J., Ni F., Yang M., Li J.: *An experimental study on fatigue properties of emulsion and foam cold recycled mixes*, Construction and Building Materials 24 (2010), pp. 2151-2156.
- [13] Underwood B.S.: *A continuum damage model for asphalt cement and asphalt mastic fatigue*, International J. of Fatigue 82 (2016), pp. 387-401.
- [14] Leandri P., Losa M., Di Natale A.: *Field validation of recycled cold mixes viscoelastic properties*, Construction and Building Materials 75 (2015), pp. 275-282.
- [15] Ameri M., Nowbakht S., Molayem M., Mirabimoghaddam M.H.: *A study on fatigue modeling of hot mix asphalt mixtures based on the viscoelastic continuum damage properties of asphalt binder*, Construction and Building Materials 106 (2016), pp. 243-252.
- [16] Mannan U.A., Islam M.R., Tarefder R.A.: *Effects of recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies*, International Journal of Fatigue 78 (2015), pp. 72-80.
- [17] Iwański M., Chomicz-Kowska A.: *Evaluation of the pavement performance*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, 63 (2015) 97-105. doi.org/10.1515/bpasts-2015-0011.
- [18] Iwański M., Buczyński P., Mazurek G.: *Characteristics of the fatigue life (IT-FT) of the recycled base course at the controlled stresses state*, Budownictwo i Architektura 13/4 (2014), pp. 109-116 (in Polish).
- [19] Judycki J.: *Analysis and design of flexible and semi-rigid pavement structures*, WKŁ. Warszawa 2014 (in Polish).
- [20] Szczepaniak Z.: *Vademekum kationowych emulsji asfaltowych*, IBDiM. Warszawa 2013 (in Polish).
- [21] IBDiM 1999 Warunki techniczne wykonywania warstw z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE), Zeszyt 61, IBDiM [Road and Bridge Research Institute], Warszawa, p. 44 (in Polish).
- [22] Becher P.: *Emulsion: Theory and Practice*, third ed., Oxford University Press, 2001.
- [23] Bańkowski W., *Analiza trwałości zmęczeniowej kompozytów mineralno-asfaltowych metodą konwencjonalną oraz metody energii rozproszonej*, IBDiM. Warszawa 2008 (in Polish).
- [24] Pronk A.C.: *Fatigue lives of asphalt beams in 2 and 4 point dynamic bendings testes based on a "new" fatigue life definition using the dissipated energy concept*. Controlled displacement mode. DWW, 1997.
- [25] Rowe G.M., Boulding M.G.: *Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphalt mixture*. Eurobitume, 2000.

Przemysław Buczyński

Porównanie trwałości zmęczeniowej recyklowanej mieszanki na zimno z różnym rodzajem lepiszcza asfaltowego

1. Wprowadzenie

Technologia recyklingu głębokiego na zimno stosowana jest na szeroką skalę w świecie do przebudowy zniszczonych warstw konstrukcji nawierzchni drogowych [1-3]. Dynamiczne obciążenia występujące w warstwach konstrukcyjnych, zawierających w swoim składzie cement, są bardziej destrukcyjne niż dla warstw w pełni podatnych. Przekroczenie granicznej wartości wytrzymałości na rozciąganie pośrednie wpływa na powstawanie spękań związanych z niewystarczającą nośnością warstwy w stosunku do obciążenia lub w skrajnych przypadkach przeciążenia w dopuszczalnych obciążeniach. Cykliczne obciążenie

powodują zmniejszenie nośności, wynikające ze spadku modułu sztywności oraz przyrostu odkształcenia, obciążanych warstw konstrukcyjnych [15, 16]. Dlatego też określenie trwałości zmęczeniowej recyklowanej podbudowy, w aspekcie rodzaju lepiszcza, umożliwi prawidłowe podejmowanie decyzji przy wyborze lepiszcza do warstw recyklowanych przeznaczonych na podbudowy drogowe.

2. Plan badań

2.1. Obiekt badań

Do oceny wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego na trwałość recyklowanej podbudowy (RCM) zaprojekt-

towno mieszkankę mineralno-cementową spełniającą wymagania krzywych granicznych dla podbudowy z asfaltem spienionym [7] oraz emulsją asfaltową [8] przeznaczoną na drogę obciążoną 0,50-2,5 mln osi 100 kN [19]. W celu oceny trwałości zmęczeniowej recyklowanej podbudowy przygotowano próbki w laboratorium i poddano obciążeniu dynamicznemu w teście pośredniego rozciągania (ITT), zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 12697-24, załącznik E. Wybrano trzy wartości naprężeń, umożliwiające zróżnicowanie oddziaływania obciążenia, tj. 250 kPa, 375 kPa oraz 500 kPa.

2.2. Projekt mieszanki mineralnej

W mieszance mineralno-cementowej przeznaczonej do wykonania recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym (FA-RCM) [7] oraz emulsją asfaltową (BE-RCM) [8, 20] zastosowano następujące składniki: destrukta asfaltowy (RAP), kruszywo łamane z istniejącej podbudowy oraz kruszywo o ciągłym uziarnieniu 0/4 mm. Do wytworzenia emulsji asfaltowej i piany asfaltowej wykorzystano ten sam rodzaj asfaltu o penetracji 70/100. Lepiszczka asfaltowe wykorzystane do przygotowania recyklowanej podbudowy na zimno stanowiło odpowiednio 3% (m/m) oraz 5% (m/m). Rodzaj emulsji asfaltowej [20, 22] (C60B10ZM/R) wynikał z wymagań normy zharmonizowanej PN-EN 13808:2013-10.

3. Ocena trwałości recyklowanej podbudowy

Badanie zmęczenia recyklowanej podbudowy, w aspekcie rodzaju lepiszcza asfaltowego, przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12697-24, załącznik E. Próbkę wykorzystaną do oceny poddano cyklicznemu obciążeniu ściskającemu z sygnałem pół-sinusoidalnym. Obciążenie zostało przykładane do próbki poprzez średnicową płaszczyznę pionową, co w efekcie powoduje zniszczenie próbki poprzez rozłupanie wzdłuż pionowej średnicy. W celu określenia zmian w recyklowanej podbudowie ocenę trwałości przeprowadzono przy kontrolowanym naprężeniu. Wartości naprężenia normalnego zastosowana do oceny jakości recyklowanej podbudowy w środku próbki była równa 200 kPa, 375 kPa oraz 500 kPa.

4. Wyniki badań

4.1. Krzywe zmęczeniowe

Badanie zmęczenia przy naprężeniu równym 250 kPa nie wykazało znaczącej zmiany przyrostu odkształceń (ϵ), która mogłaby świadczyć o zniszczeniu struktury próbki. Należy jedynie zaznaczyć, że

recyklowane podbudowy z asfaltem spienionym charakteryzują się niższym poziomem odkształcenia początkowego w porównaniu do podbudowy z emulsją asfaltową. Odmienny przebieg zmęczenia recyklowanej podbudowy stwierdzono dla naprężenia równego 375 kPa – w przypadku recyklowanej podbudowy z emulsją asfaltową, a jednakowy jak dla naprężenia 200 kPa – dla podbudowy z asfaltem spienionym. Przyłożone naprężenie $\sigma_0 = 375$ kPa do recyklowanej podbudowy na zimno z emulsją asfaltową (3% oraz 5%) wykazuje przyrost odkształcenia oraz zniszczenie próbki przed wymaganą ilością 30 000 cykli naprężenie-odkształcenie. Przy zniszczeniu próbki recyklowanej podbudowy z emulsją asfaltową charakteryzowały się odkształceniem na poziomie 830 μm . Utrata trwałości recyklowanej podbudowy z emulsją asfaltową wystąpiła po przekroczeniu odpowiednio 12 401 cykli dla 3% ilości emulsji oraz 3021 dla 5% ilości emulsji w składzie podbudowy. Należy również zaznaczyć, że recyklowana podbudowa z asfaltem spienionym dla naprężenia 375 kPa nie wykazuje zmian trwałości w zakresie ilości cykli określonych w badaniu 30 000. Jedynie zaobserwowano wzrost początkowego odkształcenia dla FB-RCM na poziomie 20 μm przy wzroście naprężenia o 125 kPa w stosunku do wartości 250 kPa. Dokonując analizy charakterystyk krzywych zmęczeniowych recyklowanych podbudów z asfaltem spienionym oraz emulsją asfaltową przy naprężeniu równym 500 kPa należy stwierdzić, że recyklowane podbudowy wykazały spadek trwałości przed wymaganą ilością 30 000 cykli. Tak jak w przypadku analizy trwałości przy naprężeniu równym 250 kPa oraz 375 kPa recyklowana podbudowa z emulsją asfaltową dla naprężenia równego 500 kPa charakteryzuje się znacznie wyższą wartością odkształcenia początkowego oraz niższą trwałością w odniesieniu do ilości cykli obciążeniowych naprężenie-odkształcenie niż podbudowa z asfaltem spienionym.

4.2. Ocena trwałości zmęczeniowej

Przyłożone naprężenie normalne równe 250 kPa, niezależnie od rodzaju oraz ilości lepiszcza asfaltowego, nie wywołuje zmian w strukturze recyklowanych podbudów. Wszystkie charakteryzują się maksymalną, określoną w badaniu, ilością cykli obciążeniowych naprężenie-odkształcenie ($\sigma-\epsilon$). Należy zauważyć, że krzywe korelacji trwałości w przypadku recyklowanych podbudów zawierających w swoim składzie asfalt spieniony, niezależnie od ilości asfaltu, są ułożone blisko siebie. Świadczy to o braku wpły-

wu ilości asfaltu spienionego na trwałość recyklowanej podbudowy. Dokonując oceny wykładnika funkcji opisującej trwałość zmęczeniową, można stwierdzić że, recyklowana podbudowa z emulsją asfaltową w ilości 3%, w odniesieniu do podbudowy z asfaltem spienionym w ilości 3%, charakteryzuje się dwukrotnie szybszym spadkiem trwałości. Zastosowanie emulsji w ilości 5% powoduje ponad trzykrotnie szybsze tempo spadku trwałości. Dlatego też możliwe jest stwierdzenie, że recyklowane podbudowy z asfaltem spienionym będą pracowały w szerszym zakresie lepko -sprężystym w odniesieniu do poziomu naprężeń występujących w podbudowie.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz trwałości zmęczeniowej oraz charakterystyk zmęczenia recyklowanych podbudów z asfaltem spienionym oraz emulsją asfaltową, możliwe jest sformułowanie następujących wniosków:

- Rodzaj zastosowanego lepiszcza asfaltowego nie powoduje zróżnicowania ilości wolnych przestrzeni w recyklowanej podbudowie. Recyklowana podbudowa z asfaltem spienionym oraz emulsją asfaltową charakteryzuje się taką samą zawartością wolnej przestrzeni, co umożliwia na

dokonywanie porównań uzyskanych wyników badań właściwości fizycznych, mechanicznych oraz odporności na zmęczenie.

- Recyklowana podbudowa z asfaltem spienionym charakteryzuje się wyższą wytrzymałością na pośrednie rozciąganie w temperaturze 25°C w porównaniu z wytrzymałością podbudowy z emulsją asfaltową. Związane jest to prawdopodobnie z technologią obniżenia lepkości asfaltu poprzez dyspersję asfaltu w wodzie oraz koniecznością wprowadzenia do składu lepiszcza emulgatorów i stabilizatorów umożliwiających wytworzenie stabilnej mieszaniny.
- Recyklowane podbudowy z asfaltem spienionym oraz emulsją asfaltową przy niskim poziomie naprężenia równym 250 kPa charakteryzują się podobną zmianą krzywych zmęczeniowych. Nie wykazują utraty trwałości związanej z dwukrotnym wzrostem początkowego odkształcenia.
- Wyższą odpornością na zmęczenie w trybie kontrolowanego naprężenia charakteryzuje się podbudowa, w której składzie zastosowano jako lepiszcze asfalt spieniony. Wygenerowanie wysokich naprężeń równych 500 kPa wywołuje zmiany w trwałości podbudowy z asfaltem spienionym i przekroczenie dopuszczalnych odkształceń.

CARRYING CAPACITY ASSESSMENT AND STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OPERATING IN CHEMICALLY AGGRESSIVE ENVIRONMENT

Abstract

The paper presents a case of an industrial building in the chemical works, in which intensive production processes caused corrosion and weakened structural members. The results of investigations and static strength analysis are provided. They were necessary to assess the reliability of the structure operating under chemical corrosion conditions corresponding to the XA exposure class. The repair plan, already implemented, together with selected components of the building structural upgrade design are presented.

Keywords: reinforced concrete structures, chemical corrosion, diagnostics, carrying capacity assessment, structural strengthening.

1. Introduction

Civil structures in operation are adversely affected by a number of factors, which in many cases can significantly reduce usability and even pose a risk to structural integrity. Standard [1] imposes a requirement for the durability of the structure. Throughout its lifetime, the structure must meet the requirements on carrying capacity, stability and serviceability. Environmental actions on concrete structures and products are taken into account in standards [2, 3], which specify the exposure classes presented in Table 1.

Table 1. Exposure classes acc. [2, 3]

Class symbol	Risk description	Exposure class
X0	No risk of environmental attack or corrosion	X0
XC	Corrosion induced by carbonation	XC1, XC2, XC3, XC4
XD	Corrosion induced by chlorides other than those from sea water	XD1, XD2, XD3
XS	Corrosion induced by chlorides from sea water	XS1, XS2, XS3
	Environmental action on concrete	
XF	Freeze / thaw attack with or without de-icing agents	XF1, XF2, XF3, XF4
XA	Chemical attack	XA1, XA2, XA3
XM	Attack induced by abrasion	XM1, XM2, XM3

Chemical action is induced by a number of factors that can substantially reduce the durability of concrete structures. Chemical corrosion is an action often found in real-life situations. However, because of the complexity of this phenomenon, it is not precisely specified in current standards. Apart from the fact that XA exposure classes are specified, a number of parameters and requirements are not accurately stated, which is discussed below.

To achieve the required durability of concrete structures and products, it is necessary to ensure that composition and quality of concrete are appropriate for the conditions of use, which correspond to individual exposure classes. Minimum concrete parameters are specified in standard [2] for the assumed 50-year lifespan of the structure. Table 2 shows the required parameters of concrete for XA exposure classes under chemical attack situation.

Another relevant parameter that affects the durability of concrete structures exposed to environmental corrosion is the presence of cracks. For reinforced concrete structures that are non-prestressed, cracks are permitted, provided that cracks do not affect the structure operation, as stated in standard [4]. For prestressed structures, requirements on permissible

Table 2. Recommendations on concrete composition and properties for XA exposure classes acc. [2]

Class symbol	Description of the environment	Minimum strength class	Maximum w/c ratio	Minimum cement content (kg/m ³)	Other requirements
XA1	Slightly aggressive chemical environment	C30/37	0.55	300	–
XA2	Moderately aggressive chemical environment	C30/37	0.50	320	Cement with resistance to sulphates
XA3	Highly aggressive chemical environment	C30/37	0.45	360	Cement with resistance to sulphates

crack widths are given for X0, XC, XD and XS exposure classes, whereas XA and XM classes are not accounted for.

To sum up, requirements on concrete composition, quality and strength are specified when the action of chemically aggressive environment is found for XA exposure class. However, precise guidelines concerning the minimum cover and permissible crack width are not available. Thus, when a chemical attack occurs, engineers have to make an assessment of the condition of a given structure, and when any risk is involved, take precautionary steps based on existing recommendations, professional knowledge and expertise.

This paper presents the case of an industrial building in the chemical works. Intensive manufacturing processes taking place in the building led to pre-failure condition resulting from the action of the aggressive chemical environment.

2. Description of the building structure

The building discussed in this paper is a part of the chemical works. It is a three-storey building with a basement. The reinforced concrete and steel structure consists of two parts separated by an expansion joint. In the building plan, overall dimensions are 30.8 × 14.0 m. The basic load carrying structure consists of seven two-bay reinforced concrete frames spaced 6.0 m on centre (Fig. 1). The frames are braced with a system of steel ribs of I300 profiles (part A of the building) and reinforced concrete ribs 30×40 cm in cross section (part B). Those are connected to the monolithic reinforced concrete flooring system of one-way slabs. Due to the presence of tanks and production machines, openings up to 1.7 m in diameter were designed and made in the flooring slabs.

Because of numerous damages that occurred when the building was in use, a decision was taken to obtain expert opinion on the building condition. The scope of the report and the results are presented further on in the paper.

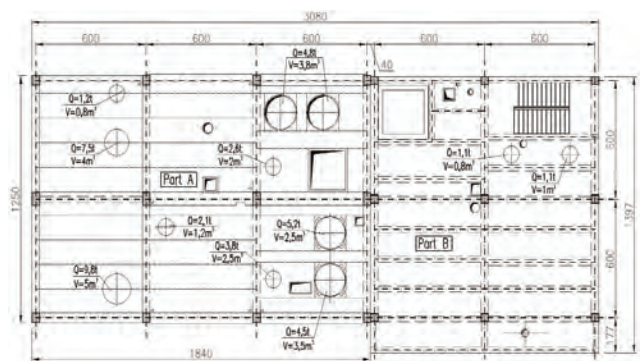


Fig. 1. Plan of the flooring system structure at the level of +4.20 (first floor slab)

3. Investigations into the structure condition

The expert opinion for the structure of concern included the condition survey and survey of damages, concrete rebound hammer tests and measurements of crack widths. Static strength analysis was also performed to determine the actual carrying capacity of the building structure.

3.1. Results of visual inspection and measurements

The visual inspection revealed the presence of many damages to the structural members. The examples that are presented refer to the floor in part B of the building at the level of +4.20.

Floor slabs showed considerable degradation manifested as concrete hairline cracks and cracks, and also chipping and scaling at the sites of member repairs. Some ribs and spandrel beams had been previously strengthened by installing steel elements (Fig. 2). The repair works proved ineffective, which was indicated by multiple cracks and crumbling of the mortar used for levelling and reinforcement protection against corrosion. Chemical corrosion of concrete and reinforcing steel was also observed. At many sites, rusty stains were found, which indicate advanced reinforcement corrosion in the reinforced concrete members.



Fig. 2. View of corrosion of the floor and floor beams at the level of +4.20 in part B

Additionally, white efflorescence was found, which results from calcium compounds being washed out of concrete. All those damages are related to the kind of production processes in the plant, where structural members are exposed to aggressive chemical environment, mainly chlorides.

Crack widths in structural members were monitored during the period of 4 years. DEMEC gauge, dial version, by Mayes & Son, with a resolution of 0.002 mm was used. The results of measurements showed the presence of multiple hairline cracks more than 0.3 mm in width. However, no significant increase in crack widths was observed in the time indicated above.

3.2. Rebound hammer tests of concrete

To determine the strength and a degree of degradation of concrete in the structural members, rebound hammer tests were run. Prior to the tests, external corroded layers were hacked. Proceq's type N original Schmidt test hammer was used. The results indicated that the characteristic strength of concrete ranged from 6.18 to 42.32 MPa. That meant the material in many members was not compliant with any strength classes specified by the code. The reason was the degradation of concrete structure caused by the material insufficient tightness and corrosion-prone environment.

3.3. Verification of the building structure carrying capacity

To verify the carrying capacity of the structure, static numerical analysis was performed. The bar and shell elements of the structural system were modelled.

Actual strength parameters of the materials, determined in the tests on individual members, and actual cross-section dimensions were accounted for. The losses resulting from the degradation of the materials structure caused by the chemical attack were also taken into consideration.

The verification of the carrying capacity of the structure indicated that for many members, the limit values and permissible level of deformations were exceeded. Consequently, it was necessary to make repairs and strengthen the structure.

4. Conclusions, assessment of condition and scope of repair works

The results of the investigations showed that building condition posed a serious risk to the safety of the users and the repair works conducted so far proved ineffective. Static strength computations indicated that the resistance values of spandrel beams, ribs and floor slabs might be exceeded. Cracking of reinforced concrete members, large above the permissible level given in the code, together with the corrosion environment action resulted in severe degradation of the material and further loss of structural resistance.

Because of damages and insufficient resistance of many members that posed a considerable safety risk to the building users, a decision was taken to instantly unload the floor structure and to strengthen it. The floor structure (beams and slabs on the bottom side) were renovated using the Deitermann's PCC concrete repair system.

Beam strengthening was designed to include additional load carrying components, namely two L180x18 equal angles installed underside.

Lankwitzer corrosion protection paint was applied to the steel structure. The epoxy and polyurethane material is suitable for corrosion environment (C4) and expected long lifetime of the structure (H).

Figure 3 shows the strengthening of the floor beams in part B of the building at the level of +4.20.

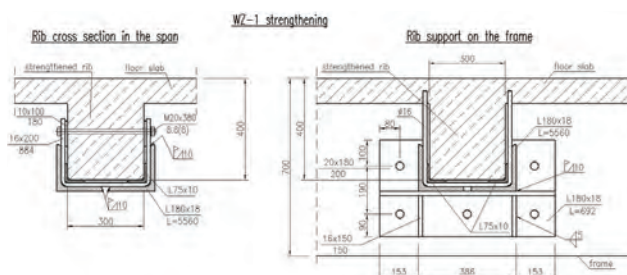


Fig. 3. Strengthening WZ-1 of the floor beams of part B at the level of +4.20

5. Summary

A very high rate of materials degradation process in the building of concern should be noted. That is an effect of chemically aggressive environment. As a result, the strength of the materials and the structure carrying

capacity were considerably reduced. Consequently, a pre-failure condition occurred that could pose a usability hazard. The building condition was so bad that it was necessary to instantly unload it and to strengthen its structure.

References

- [1] PN-EN 1990:2004 Eurocode – Basis of structural design.
- [2] PN-EN 206-1:2003 Concrete – Part 1: Requirements, properties, production and conformity.

- [3] PN-B-06265:2004 National supplements PN-EN 206-1:2003 Concrete – Part 1: Requirements, properties, production and conformity.
- [4] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.

Wiktor Wciślik

Paweł Kossakowski

Ocena nośności i wzmacnianie konstrukcji żelbetowych pracujących w środowisku agresywnym chemicznie

1. Wprowadzenie

Obiekty budowlane w trakcie eksploatacji narażone są na szereg niekorzystnych oddziaływań, które w wielu sytuacjach mogą w znaczący sposób obniżać ich przydatność do użytkowania, a nawet stwarzać zagrożenie bezpieczeństwa. Norma [1] narzuca wymóg zapewnienia trwałości konstrukcji, która powinna przez cały okres użytkowania spełniać określone wymagania w zakresie nośności i stateczności oraz użytkowości. Oddziaływania środowiskowe na konstrukcje i wyroby z betonu uwzględnione zostały w normach [2, 3], które wyróżniły tzw. klasy ekspozycji, przedstawione w tabeli 1.

Wymagana trwałość wyrobów i konstrukcji betonowych jest związana z zapewnieniem odpowiedniego składu i struktury betonu, które są dostosowane do warunków użytkowania odpowiadających określonej klasie ekspozycji. Minimalne parametry betonu określa norma [2], zakładając zapewnienie trwałości na poziomie 50 lat. W tabeli 2 podano wymagane parametry betonu dla klas ekspozycji XA w sytuacji występowania agresji chemicznej.

W niniejszym artykule przedstawiono przypadek budynku wchodzącego w skład zakładów chemicznych, w którym w wyniku intensywnej produkcji przemysłowej doszło do stanu przedawaryjnego na skutek oddziaływania środowiska agresywnego chemicznie.

2. Opis konstrukcji budynku

Budynek będący przedmiotem artykułu wchodzi w skład kompleksu zakładów chemicznych. Budynek trzykondygnacyjny, podpiwniczony, składający się z dwóch oddzielnych części o konstrukcji żelbetowo-stalowej. Całkowite wymiary w rzucie poziomym budynku to $30,8 \times 14,0$ m. Podstawowy układ nośny stanowi 7 dwunawowych ram żelbetowych w rozstawie osiowym 6,0 m (rys. 1). Ramy spięte są układem żeber stalowych z profili dwuteowych I300 (w części A) oraz żelbetowych o przekroju poprzecznym 30×40 cm (w części B) zespolonych z monolitycznym stropem żelbetowym.

W związku z licznymi uszkodzeniami obserwowanymi w trakcie eksploatacji, podjęto decyzję o wykonaniu ekspertyzy dotyczącej stanu technicznego konstrukcji budynku. Zakres i wyniki badań przedstawiono w dalszej części artykułu.

3. Badania stanu technicznego

Wykonana ekspertyza obejmowała inwentaryzację konstrukcji i uszkodzeń, badania sklerometryczne betonu, pomiar rozwartości rys oraz analizę statyczno-wytrzymałościową w celu określenia aktualnej nośności konstrukcji budynku.

3.1. Wyniki oględzin i pomiarów

Na podstawie przeprowadzonych oględzin stwierdzono obecność licznych uszkodzeń elementów konstrukcyjnych budynku, których przykład przedstawiono w odniesieniu do stropu części B w poziomie +4,20.

Konstrukcja płyt stropowych, na których zaobserwowano zarysowania i spękania betonu, a także odpryski i odspojenia w obrębie miejsc napraw elementów charakteryzowała się znaczną degradacją. Część żeber i rygli ram została poprzednio wzmocniona poprzez zamontowanie elementów stalowych (rys. 2). Wykonane naprawy okazały się nieskuteczne, o czym świadczą liczne spękania oraz wykruszenia zaprawy wyrównującej i zabezpieczającej zbrojenie przed korozją. Zaobserwowano również korozję chemiczną betonu i stalowych elementów wzmacniających. W wielu miejscach wystąpiły rdzawe nacieki świadczące o zaawansowanej korozji zbrojenia elementów żelbetowych.

Na podstawie wyników pomiarów stwierdzono obecność licznych zarysowań o szerokości ponad 0,3 mm, jednakże w rozpatrywanym okresie nie zaobserwowano istotnego przyrostu rozwarcia.

3.2. Badania sklerometryczne betonu

W celu określenia wytrzymałości betonu zastosowano młotek Schmidta typu N firmy Proceq. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, iż wytrzymałość charakterystyczna betonu wahała się w granicach od 6,18 MPa do 42,32 MPa, co oznacza, że w wielu elementach nie spełniała wymogów żadnej klasy normowej. Jako przyczynę tego stanu rzeczy należy wskazać przede wszystkim degradację struktury betonu wywołaną jego niedostateczną szczelnością i działaniem środowiska korozyjnego.

3.3. Weryfikacja nośności konstrukcji budynku

W celu weryfikacji nośności konstrukcji budynku wykonano analizę numeryczną w zakresie statycznym, modelując przestrzenny, prętowo-powłokowy układ konstrukcyjny. Uwzględniono rzeczywiste parametry wytrzymałościowe materiałów określone w trakcie badań dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych oraz rzeczywiste wymiary ich przekrojów poprzecznych z uwzględnieniem ubytków związanych z degradacją struktury materiałowej na skutek agresji chemicznej.

W wyniku przeprowadzonej weryfikacji nośności stwierdzono, że w przypadku wielu elementów konstrukcyjnych przekroczone są ich nośności oraz

dopuszczalne deformacje, a zatem wymagają one naprawy i wzmocnienia.

4. Wnioski, ocena stanu technicznego i zakres prac naprawczych

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, iż stan techniczny budynku stanowi poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa użytkowników, a wykonane doraźnie naprawy nie spełniają swojej funkcji. Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe wykazały możliwość przekroczenia nośności rygli ram, żeber i płyt stropowych. Znaczne, ponadnormatywne zarysowanie elementów żelbetowych wraz z oddziaływaniem środowiska korozyjnego stały się przyczyną daleko idącej degradacji materiału i dalszego spadku nośności konstrukcji.

Konstrukcję stropu (belki i płyty od strony spodniej) poddano renowacji w systemie naprawy żelbetu PCC firmy Deitermann. Wzmocnienie belek zaprojektowano poprzez zamontowanie od spodu dodatkowych elementów nośnych w postaci dwóch kątowników L180 x 18.

Zabezpieczenie antykorozyjne konstrukcji stalowej wykonano w systemie Lankwitzer, stosując materiał epoksydowo-poliuretanowy dobrany dla środowiska korozyjnego C4 i przewidywanego długiego zakresu trwałości H.

Na rysunku 3 pokazano wzmocnienie belek stropu w części B na poziomie +4,20.

5. Podsumowanie

Podsumowując, należy zwrócić uwagę na bardzo wysoką intensywność procesów degradacji materiału stwierdzoną w odniesieniu do analizowanego budynku na skutek oddziaływania środowiska agresywnego chemicznie. Pociągnęło to za sobą znaczną redukcję wytrzymałości materiału i nośności konstrukcji, prowadząc do stanu przedawaryjnego, mogącego stwarzać zagrożenie bezpieczeństwa użytkownika. Stan techniczny budynku był na tyle zły, że w trybie natychmiastowym należało go odciążyć oraz wykonać wzmocnienie jego konstrukcji.

URSZULA PAWLAK¹
MICHAŁ SZCZECINA²

Kielce University of Technology

¹ e-mail: u.pawlak@tu.kielce.pl

² e-mail: michalsz@tu.kielce.pl

THE EIGENVALUE PROBLEM IN THE DYNAMICS OF THE STEEL INDUSTRIAL HALL WITH INTERNAL HANDLING SYSTEM

Abstract

The paper presents the eigenvalue problem in the dynamics of the steel industrial hall with an internal handling system. The aim of the calculations was to determine the eigenfrequencies and eigenvectors for the structure of the hall adapted to a gantry operation. The analysis was performed by using FEM software, namely Robot. Among over a dozen calculated eigenvectors, four ones were chosen as the most representative for a lateral structural arrangement of the hall and its roof.

Keywords: steel halls, an internal handling system, eigenvalue problem, dynamics, eigenvalues

1. Introduction

For several years, the buildings erected using the technology of steel structures have played a major role in industrial construction in Poland. The construction technology of steel halls (warehouses, manufacturing floors, logistic, sports and breeding halls) has become successful owing to its low price relative to the quality, execution time, capability of expanding the area of the halls promptly and their usability.

The steel structure of the halls ensures their stability, durability and resistance to weather conditions. In orthographic projections, the halls are usually rectangular in view and have a repeatable structure made up of flat cross-braced load-bearing members.

Steel industrial halls are usually equipped with gantries. Based on the types of gantry used, they are classified as [1]:

- halls with overhead crane handling systems – with the gantry runway beams supported on posts (Fig. 1),
- halls with suspended gantry crane handling systems – with the crane ways suspended from the roof structure (Fig. 2).



Fig 1. A steel industrial hall with overhead crane handling systems [2]



Fig 2. A steel industrial hall with suspended gantry crane handling systems [3]

Due to their structure and use, steel industrial halls are exposed to a variety of risks [4]. The threats have a negative impact on the stability of the structure and can stem from:

- high fire load density caused by the stored goods,
- loads caused by the extensive roof area (snow, wind),
- loads resulting from the installation of various devices on the structure,
- vibrations and collisions brought about by the internal movement vehicles (IMV).

The proper design of steel halls is performed in stages. Due to occupational safety (utilisation and operation) and the durability of the halls, it is preceded by thorough analyses of the load-bearing members in terms of structural statics, stability and dynamics.

In the research project, an analysis of the dynamic eigenvalue problem was conducted due to the dynamic loads transferred by the major load-bearing systems of steel halls with internal handling systems.

2. A few words on the dynamics of engineering structures

Structural dynamics is a science of movement (vibrations) of engineering structures or their components such as beams (including gantry runway beams), plates and slabs, coatings, foundations of machinery, high buildings, bridges, industrial chimneys, telecommunications towers, cooling towers, drilling platforms and others. All these are geometrically rigid structures in the state of conservative equilibrium [4]. This type of motion usually oscillates around the position of static load, which serves as a reference point in dynamic analysis.

The objective of structural dynamics is to determine the reaction (structural response), i.e. the displacements and stresses for the given type of engineering structure subjected to any dynamic load.

3. The eigenvalue problem in structural dynamics

One of the basic issues of structural dynamics is the determination of conditions in which a structure could perform movement around the position of equilibrium without the participation of the external modal forces. The equation of such motion (2) results from the energy balance equation

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + (K - K_G)q = Q(t) \quad (1)$$

where: M – inertia matrix of the structure, C – external damping matrix, K – linear stiffness matrix of the structure, K_G – geometric stiffness matrix of the structure, $Q(t)$ – modal force (time function), q , $\dot{q}$,

$\ddot{q}$ – structural displacement, velocity and acceleration vectors, with $Q(t) = 0$ and the omission of damping $C = 0$ as well as the lack of static loads $K_G = 0$.

$$M\ddot{q} + Kq = 0 \quad (2)$$

Vector

$$q = a e^{i\omega t} \quad (3)$$

is the solution of equation (2), where:

$$a = a \{a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n\} \quad (4)$$

Formula (3) shows a set of harmonic functions $q_j(t)$ at a common angular frequency ω and amplitudes a_j ($j = 1, 2, \dots, n$). The motion presented in equation (3) is called structural eigenvibration. This is not a physical phenomenon, but a property of a structure exposed to dynamic loads.

The introduction of function (3) to equation (2) gives homogeneous matrix equation (5), which has to be met at any time t .

$$(K - \omega^2 M)a = 0 \quad (5)$$

We are also interested in the result where $a \neq 0$, therefore equation (6), from which we obtain n values ω_j , i.e. structural eigenvibration angular frequencies [5], is the condition of existence of non-zero solutions.

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (6)$$

Roots ω_j are positive real numbers. Multiple roots can also be obtained. For every eigenvalue ω_j ($i = 1, 2, \dots, n$) there is a corresponding non-zero vector a_j , called an eigenvector of vibration of order i . It determines the arrangement of displacements q vibrating at angular frequency ω_j . The eigenvectors are determined up to the nearest constant factor. The set of eigenvectors gives eigen matrix W .

4. An analysis of the dynamic eigenvalue problem of a steel industrial hall with internal handling systems

An analysis of the dynamic eigenvalue problem was performed for a steel industrial hall, the cross section and the axonometric projection of which are shown in Figure 3 and Figure 4, respectively.

The hall at issue was made of steel. It rests on reinforced concrete pad foundations. The hall is located in Kielce, in the wind load zone I and the snow load zone III. Sandy clays with the liquidity index of $IL = 0.2$ form the soil stratum at the foundation level. The depth of the foundations was set 1m below the ground level.

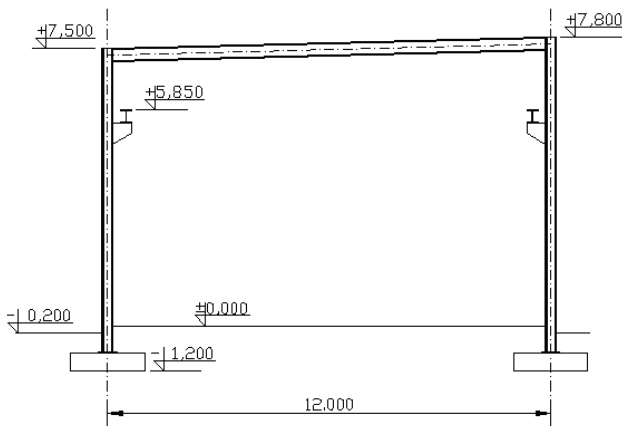


Fig. 3. Cross-section of the industrial hall with internal handling systems [6]

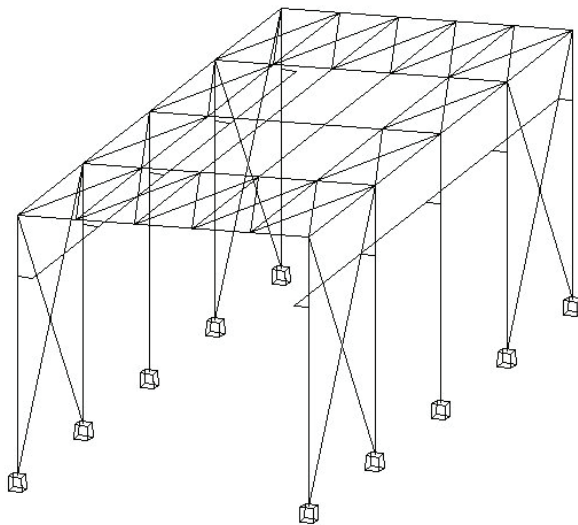


Fig. 4. Axonometric drawing of the hall structure [6]

A steel, flat, single-bay, single-storey frame with a pent roof and short brackets on which the gantry runway beams are supported constitutes the principal structural component of the hall. The column-foundation connection was formed by full restraint, whereas the roof grits and the columns were pin-jointed. The axial span of the structural component is 12 m, and the roof apex is at 7.8 m. The frame beam is a solid IPE 400 I-section, and the column is a solid HEB 320 section. The gantry runway beams are supported on short steel brackets connected to the steel column shank by rigid joint. The steel bracket is a plate girder element of variable height.

The short bracket-column shank joint was formed using fillet welds. The node was additionally strengthened with ribs. The roof grits were bolted to the columns.

The spatial arrangement of the hall is made up of the aforementioned 5 flat systems spaced 6 m apart.

The roof covering structure of the hall was made of troughed sheet supported on steel purlins formed of IPE 200 I-beams spaced 2.4 m apart. At the end-panels of the roof plane, the roof braces were made up of 20 mm-diameter steel bars. All of the roof structural member joints were bolted, and the troughed sheet was attached by means of self-drilling screws.

The side and the end walls of the hall were made up of wall sandwich panels fastened to steel rails. At the end-panels, the wall braces were formed of 80 x 80 x 6 equilateral steel angles.

The gantry runway beam was formed of a solid HEA300 section. The gantry craneways were secured with buffer stops. The ZXJ overhead single-girder crane mounted in the hall, with a total lifting capacity of 50 kN, travels at a speed of 40 m/min. The speed of the truck is 30 m/min and the hoisting speed is 12.5 m/min.

The entire steel structure was made of S235JR steel, whereas C30/37 class concrete, reinforced with RB500W steel, was used for the pad foundations.

4.1. The eigenvalue problem in the statics of a steel industrial hall with internal handling systems – analysis

The analysis was conducted by means of Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014 based on MES. The static diagram shown in Figure 5 was adopted. The nodes 35–38 are the supports for the purlins resting on the girders of the main structure.

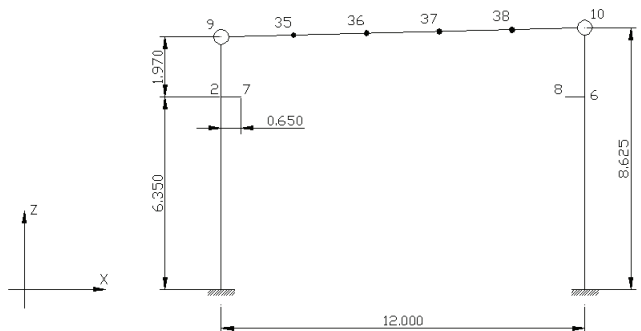


Fig. 5. Static diagram of the hall model

The eigenvibration angular frequencies and the eigenvectors were determined based on a modal analysis. A distributed mass matrix was adopted. The columns were divided in variants into 1, 3, and 5 finite elements in order to investigate the variability of the calculated eigenvibration angular frequencies from the degree of discretization of the elements. However, the results of the calculations showed that the degree of discretization had not affected the

obtained eigenvalues. The results presented below concern the division into 5 elements.

Table 1 summarizes the results of the obtained eigenvalues. In addition to the eigenvibrations angular frequencies, values such as eigenvibration frequency and period used in the design practice, were also given. Among several various forms of vibration, the most representative ones for the lateral structure of the hall and the roof were selected. The forms are demonstrated in Figures 6-9.

Table 1. Eigen vibration angular frequencies of the hall

Form number	Vibration angular frequency [rad/s]	Vibration frequency [Hz]	Vibration period [s]
1	16.08	2.56	0.39
2	27.93	4.45	0.22
5	43.69	6.95	0.14
6	46.07	7.33	0.14

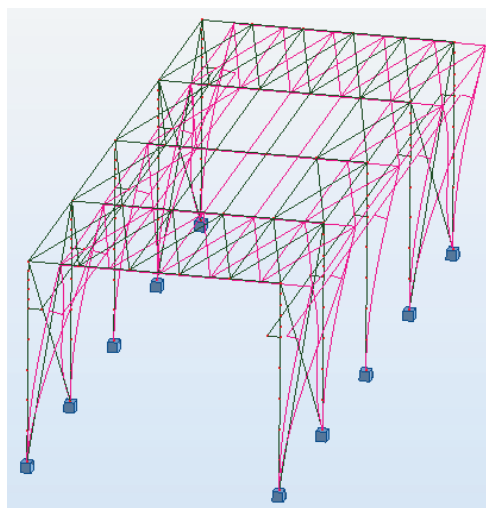


Fig. 6. Vibration form for the 1st eigenvibration angular frequency

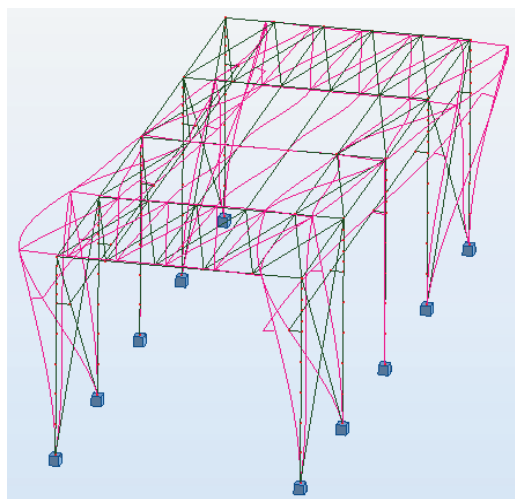


Fig. 7. Vibration form for the 2nd eigenvibration angular frequency

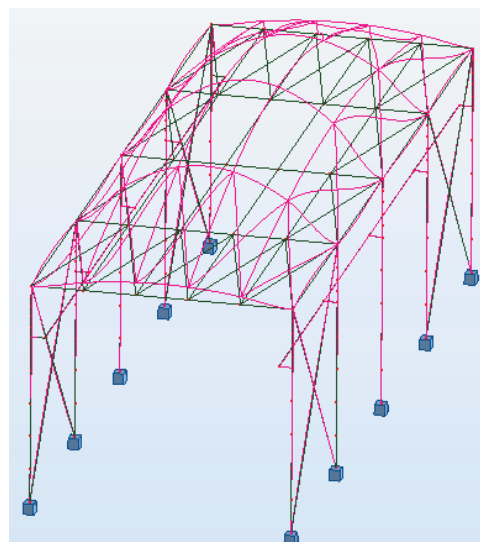


Fig. 8. Vibration form for the 5th eigenvibration angular frequency

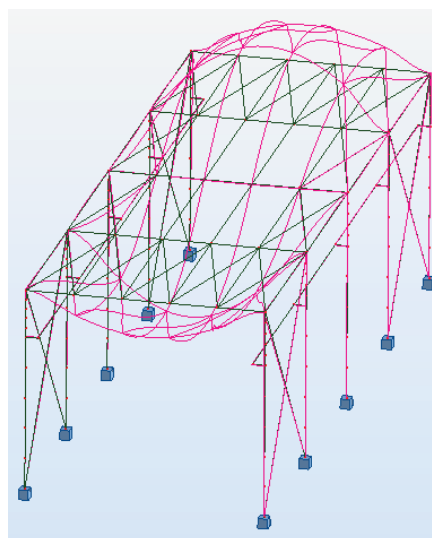


Fig. 9. Vibration form for the 6th eigenvibration angular frequency

Of the demonstrated forms of vibration, the first one is characterised by tilting and is the most typical for the lateral load-bearing structures of steel halls. The second form is distinctly spatial, although there still are dominant dislocations for the lateral load-bearing structure. The remaining two forms concern the situations when the vibrations of roof girders and other members creating the roof plane are of utmost significance.

It needs to be stated firmly that in a hall of that type the equalising of the gantry crane vibration angular frequencies with the vibration angular frequencies of the structure must not be allowed. The vibrations on the gantry crane most often result from the improper use of the device, the swinging of the load suspended from the gantry crane hook or a sudden snapping of

the material handling cables. For those reasons, the gantry crane should not be overloaded, either.

4.2. The eigenvectors

Tables 2-5 show the values of node displacements constituting the eigenvector for the demonstrated vibration forms. Linear displacements UX and UZ are given in centimetres, and the node rotation angle RY is given in radians. The numbers of the nodes and the axial arrangement are shown in Figure 5. The displacements of the vibrating roof girders can be presented owing to the inclusion of nodes 35-38 in the model.

Table 2. Displacement values – the eigenvector for the 1st vibration angular frequency

Node	Case	Form	Eigenvector UX	Eigenvector UZ	Eigenvector RY
2	2	1	0.006066929	-0.000000200	0.001499235
6	2	1	0.005739246	0.000000253	0.001428321
7	2	1	0.006067158	-0.000750098	0.001500329
8	2	1	0.005739463	0.000714679	0.001429358
9	2	1	0.009144722	-0.000000241	0.001554512
10	2	1	0.009133836	0.000000319	0.001495164
35	2	1	0.008838775	-0.000027494	0.000008005
36	2	1	0.008839067	-0.000038863	0.000001983
37	2	1	0.008838188	-0.000036551	-0.000003108
38	2	1	0.008836607	-0.000024959	-0.000005472

Table 3. Displacement values – the eigenvector for the 2nd vibration angular frequency

Node	Case	Form	Eigenvector UX	Eigenvector UZ	Eigenvector RY
2	2	2	-0.007798638	0.000026115	-0.001825296
6	2	2	-0.007427522	-0.000026967	-0.001738265
7	2	2	-0.007799826	0.000940245	-0.001831047
8	2	2	-0.007428649	-0.000897510	-0.001743726
9	2	2	-0.011483904	0.000034010	-0.001852403
10	2	2	-0.011465534	-0.000036344	-0.001765198
35	2	2	-0.011121668	0.000199628	-0.000043850
36	2	2	-0.011100352	0.000219414	0.000031878
37	2	2	-0.011092496	0.000112875	0.000058605
38	2	2	-0.011103377	0.000011459	0.000026472

Table 4. Displacement values – the eigenvector for the 5th vibration angular frequency

Node	Case	Form	Eigenvector UX	Eigenvector UZ	Eigenvector RY
2	2	5	0.000135032	0.000004976	0.000022203
6	2	5	0.000115516	0.000005188	0.000027939
7	2	5	0.000135076	-0.000006174	0.000022404
8	2	5	0.000115549	0.000019204	0.000028108
9	2	5	0.000170158	0.000006497	0.000013141
10	2	5	0.000184814	0.000007006	0.000033350
35	2	5	-0.000079371	0.002556658	-0.000923882
36	2	5	-0.000003491	0.004149352	-0.000355899
37	2	5	0.000141701	0.004153080	0.000355688
38	2	5	0.000297161	0.002566307	0.000923725

Table 5. Displacement values – the eigenvector for the 6th vibration angular frequency

Node	Case	Form	Eigenvector UX	Eigenvector UZ	Eigenvector RY
2	2	6	-0.000210109	-0.000019834	-0.000036422
6	2	6	-0.000184918	-0.000021591	-0.000040270
7	2	6	-0.000210163	-0.000001562	-0.000036670
8	2	6	-0.000184993	-0.000041825	-0.000040642
9	2	6	-0.000270984	-0.000025922	-0.000024801
10	2	6	-0.000278991	-0.000029196	-0.000043390
35	2	6	0.000545547	-0.008387816	0.003022254
36	2	6	0.000302570	-0.013591888	0.001158371
37	2	6	-0.000160149	-0.013605532	-0.001156621
38	2	6	-0.000663218	-0.008422175	-0.003022251

5. Conclusions

The conducted analysis resulted in the selection of four most representative forms of vibration for the specific structural layout of the hall with internal handling systems. The obtained values of the eigenvibration angular frequency give a designer a basis for developing further design stages of hall structures as well as for formulating recommendations concerning the proper utilisation and operation of the hall. While using the gantry crane, unnecessary overloading of the device structure and inciting vibrations of the handled goods should be avoided.

References

- [1] <http://www.airstar.pl/biznes/nawoczesne-hale-stalowe>
- [2] otodom.pl
- [3] www.eci.com.pl
- [4] Chmielewski T., Zembaty Z.: *Podstawy dynamiki budowl*, Arkady 1998.
- [5] Gomuliński A., Witkowski M.: *Mechanika budowli, Kurs dla zaawansowanych*, OWPW, Warszawa 1993.
- [6] Projekt hali z transportem wewnętrznym w Kielcach, projektant konstrukcji: Michał Szczecina.

Urszula Pawlak
Michał Szczecina

Zagadnienie własne w dynamice stalowej hali przemysłowej z transportem wewnętrznym

1. Wprowadzenie

Od kilkunastu lat w budownictwie przemysłowym w Polsce dominującą rolę odgrywają obiekty wznoszone w technologii konstrukcji stalowych. Technologia budowy hal stalowych (magazynowych, produkcyjnych, logistycznych, sportowych, hodowlanych) odnosi sukcesy dzięki niskiej cenie w stosunku do jakości, czasu realizacji, możliwości szybkiego powiększenia ich powierzchni oraz właściwości użytkowych obiektów.

Konstrukcja stalowa hal sprawia, że są one stabilne, wytrzymałe i odporne na warunki atmosferyczne. Najczęściej mają rzut prostokątny i powtarzalną konstrukcję, złożoną z płaskich ustrojów nośnych stężonych poprzecznie.

Przemysłowe hale stalowe to najczęściej hale z suwnicami. Ze względu na rodzaj suwnic wyróżniamy hale [1]:

- z transportem podpartym – belki podsuwnicowe opierają się na słupach (rys. 1),
- z transportem podwieszonym – belki jezdne są podwieszone na konstrukcji dachu (rys. 2)

Stalowe hale przemysłowe z racji swojej budowy oraz przeznaczenia narażone są na liczne niebezpieczeństwa [4]. Zagrożenia te mają negatywny wpływ na stabilność konstrukcji i mogą wynikać z:

- dużej gęstości obciążenia ogniowego, która spowodowana jest przez magazynowane produkty,
- obciążeń spowodowanych dużą powierzchnią dachu (śnieg, wiatr),
- obciążeń pochodzących od różnego rodzaju urządzeń zamocowanych na konstrukcji, np. suwnice,
- wibracji i kolizji powodowanych przez pojazdy transportu wewnętrznego.

Prawidłowe projektowanie hal stalowych odbywa się etapowo. Z uwagi na bezpieczeństwo pracy (eksploatację) i ich trwałość, poprzedzone jest wnikliwymi analizami układów nośnych w aspekcie statyki, stateczności oraz dynamiki konstrukcji.

W pracy przeprowadzona została analiza dynamicznego zagadnienia własnego z uwagi na obciążenia dynamiczne, jakie przenoszą główne układy nośne stalowych hal z transportem wewnętrznym.

2. Słów kilka o dynamice konstrukcji budowlanych

Dynamika budowli jest nauką o ruchu (drganiach) konstrukcji budowlanych lub ich elementów składowych, takich jak belki (w tym belki podsuwnicowe), płyty, powłoki, fundamenty pod maszyny, wysokie budynki, mosty, kominy przemysłowe, wieże R-TV, chłodnie kominowe, platformy wiertnicze i inne konstrukcje inżynierskie. Są to układy geometrycznie niezmiennie o zachowawczej postaci równowagi [4]. Ruch tego rodzaju ma zwykle charakter oscylacyjny wokół położenia równowagi statycznej, którą traktujemy w analizie dynamicznej jako układ odniesienia.

Celem dynamiki budowli jest określenie reakcji (odpowiedzi konstrukcji), tj. przemieszczeń i naprężeń, dla danego typu ustroju budowlanego poddanej działaniu dowolnego obciążenia dynamicznego.

3. Zagadnienie własne w dynamice budowli

Jednym z podstawowych zagadnień dynamiki konstrukcji jest określenie warunków, w których ustrój mógłby wykonywać ruch wokół położenia równowagi bez działania zewnętrznych sił wymuszających. Równanie takiego ruchu (2) wynika z równania bilansu energetycznego (1), przy założeniu $Q(t) = 0$ oraz pominięciu tłumienia $C = 0$ oraz braku obciążeń statycznych $K_g = 0$. Rozwiązaniem równania (2) jest wektor.

Formuła (3) przedstawia zbiór funkcji harmoniczných $q_j(t)$ o wspólnej częstości ω i amplitudach a_j ($j = 1, 2, \dots, n$). Ruch określony wzorem (3) nosi nazwę drgań własnych ustroju. Nie jest to zjawisko fizyczne, ale właściwość konstrukcji narażonej na wpływy dynamiczne. Podstawiając funkcję (3) do równania (2), otrzymujemy jednorodne równanie macierzowe (5), które musi być spełnione w każdej

chwili t . Interesuje nas rozwiązanie, gdzie $a \neq 0$, dlatego też warunkiem istnienia niezerowych rozwiązań jest równanie (6), z którego otrzymujemy n wartości ω_j , tj. częstości drgań własnych ustroju [5].

Pierwiastki ω_j są rzeczywistymi liczbami dodatnimi, mogą występować pierwiastki wielokrotne. Każdej wartości własnej ω_j ($i = 1, 2 \dots n$) odpowiada niezerowy wektor a_i , nazywany wektorem własnym i -tej formy drgań. Określa on rozkład przemieszczeń q podczas drgań z częstością ω_j . Wektory własne określone są z dokładnością do stałego czynnika. Zbiór wektorów własnych tworzy macierz własną W .

4. Analiza dynamicznego zagadnienia własnego stalowej hali przemysłowej z transportem wewnętrznym

Analizie dynamicznego zagadnienia własnego poddano stalową halę przemysłową przedstawioną w przekroju na rysunku 3. oraz w aksonometrii na rysunku 4.

Rozważana hala wykonana została w konstrukcji stalowej oraz posadowiona na żelbetowych stopach fundamentowych. Hala zlokalizowana jest w Kielcach, w 1-szej strefie obciążenia wiatrem oraz 3-ciej strefie obciążenia śniegiem. Grunt w poziomie posadowienia stanowiły gliny piaszczyste o stopniu plastyczności $IL = 0,2$. Poziom posadowienia przyjęto 1 m poniżej poziomu terenu.

Główny układ konstrukcyjny hali, to stalowa rama płaska, jednonawowa, jednopiętrowa z dachem jednospadowym oraz z krótkimi wspornikami, na których wsparte zostały belki podsuwnicowe. Połączenie słupów z fundamentami zrealizowano jako pełne utwierdzenie, natomiast połączenie rygla dachowego ze słupem jako przegubowe. Rozpiętość osiowa układu wynosi 12 m, a wysokość konstrukcji najwyższego punktu dachu wynosi 7,8 m. Rygiel ramy to pełnościenny kształtownik IPE 400, zaś słup – pełnościenny HEB 320. Belki podsuwnicowe oparte zostały na krótkim wsporniku stalowym, połączonym sztywno z trzonem słupa stalowego. Wspornik stalowy wykonano jako element blachownicowy o zmiennej wysokości.

Połączenie krótkiego wspornika z trzonem słupa zrealizowano jako spawane za pomocą spoin pachwinowych i dodatkowo wzmocniono węzeł żebrami. Połączenie rygla dachowego ze słupem wykonano jako śrubowe.

Układ przestrzenny hali stanowią wspomniane wyżej układy płaskie w ilości 5 sztuk, w rozstawie 6 m. Konstrukcję przekrycia hali wykonano z blachy trapezowej, ułożonej na stalowych płatwiach z kształtow-

nika IPE 200 w rozstawie co 2,4 m. W płaszczyźnie dachu w skrajnych polach wykonano stężenia dachowe z prętów stalowych średnicy 20 mm. Wszystkie połączenia elementów konstrukcji dachu zrealizowano jako śrubowe, zaś blachę trapezową zamocowano na wkręty samowierzące.

Ściany boczne i szczytowe hali wykonano z płyt warstwowych, mocowanych do stalowej ryglówki. W skrajnych polach wykonano stężenia ściennne z kątownika równoramienne 80 x 80 x 6.

Belkę podsuwnicową zrealizowano jako pełnościenną z profilu HEA300. Tory jezdne suwnicy zabezpieczono kozłami odbojowymi. Zamontowana w hali suwnica natorowa ZXJ o całkowitym udźwigu 50 kN, porusza się z prędkością 40 m/min. Prędkość jazdy wózka wynosi 30 m/min, a prędkość podnoszenia 12,5 m/min.

Całość konstrukcji stalowej wykonano ze stali klasy S235JR, a stopy fundamentowe z betonu klasy C30/37 zbrojonego stalą RB500W.

4.1. Zagadnienie własne w stateczności stalowej hali przemysłowej z transportem wewnętrznym – analiza

Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem programu Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014, opartego na MES. Schemat statyczny przyjęto jak na rysunku 5. Węzły od 35 do 38 są miejscami oparcia płatwi o dźwigary układu głównego.

Częstości drgań własnych oraz wektory własne wyznaczono w oparciu o analizę modalną. Przyjęto rozłożoną macierz mas. Słupy zostały podzielone wariantowo na 1, 3 i 5 elementów skończonych, aby prześledzić zmienność obliczonych częstości drgań własnych od stopnia dyskretyzacji elementów. Jak jednak pokazały wyniki obliczeń, stopień dyskretyzacji nie miał wpływu na uzyskiwane wartości własne. Zaprezentowane poniżej wyniki dotyczą podziału na 5 elementów.

W tabeli 1. zestawiono wyniki uzyskanych wartości własnych. Oprócz częstości drgań własnych podano również wykorzystywane w praktyce projektowej wielkości, takie jak: częstotliwość i okres drgań własnych. Spośród kilkunastu różnych postaci drgań wybrano te, które są najbardziej charakterystyczne dla układu poprzecznego hali oraz dachu. Postacie te zaprezentowano na rysunku od 6 do 9.

Spośród zaprezentowanych postaci drgań pierwsza z nich ma charakter przechyłowy i jest najbardziej typowa dla poprzecznych układów nośnych hal stalowych. Postać druga ma już wyraźnie przestrzenny charakter, chociaż ciągle dominujące przemiesz-

czenia są dla poprzecznego układu nośnego. Dwie ostatnie zaprezentowane postacie dotyczą sytuacji, gdy największe znaczenie mają drgania dźwigarów dachowych, a wraz z nimi pozostałych elementów tworzących płaszczyznę dachu.

Należy stanowczo stwierdzić, że w tego typu hali, nie wolno dopuścić do zrównania częstości drgań suwnicy z częstością drgań własnych konstrukcji. Drgania pochodzące od suwnicy mogą pojawić się najczęściej na skutek niewłaściwego użytkowania urządzenia, np. gwałtownego uderzenia o kozły odbojowe, rozhuśtania ładunku podwieszonego do haka suwnicy lub nagłego zerwania lin transportowych. Z tych względów nie należy również przeciążać suwnicy.

4.2. Wektory własne

Dla zaprezentowanych postaci drgań przedstawiono w tabelach 2-5 wartości przemieszczeń węzłowych stanowiących wektor własny. Przemieszczenia liniowe UX i UZ wyrażone są w centymetrach, a kąt RY obrotu węzła podano w radianach. Numery węzłów i układ osi pokazano na rysunku 5. Dzięki zamodelowaniu węzłów o numerach od 35 do 38 można było podać przemieszczenia drgających dźwigarów dachowych.

5. Wnioski

W wyniku przeprowadzonej analizy wyodrębniono cztery najbardziej reprezentatywne postacie drgań dla specyficznego układu konstrukcyjnego hali z transportem wewnętrznym. Uzyskane wartości częstości drgań własnych stanowią dla projektanta podstawę dla dalszych etapów projektowania konstrukcji hali oraz do sformułowania zaleceń dotyczących prawidłowej eksploatacji hali. Podczas użytkowania suwnicy należy unikać niepotrzebnego przeciążania ustroju urządzenia oraz wprawiania transportowanego towaru w drgania.

GRZEGORZ MAZUREK
Kielce University of Technology
e-mail: gmazurek@tu.kielce.pl

IMPLEMENTATION OF THE GENERALIZED VISCOELASTIC HUET-SAYEGH AND BURGERS MODEL TO DETERMINE THE STIFFNESS MODULUS OF ASPHALT CONCRETE

Abstract

The aim of this paper is to compare the possibility of application of two physical models, namely generalized Huet-Sayegh and Burgers model to describe the changes in stiffness modulus of asphalt concrete. Both models make sense only in range of the linear viscoelasticity. The modern design of the pavement structure increasingly forced to use more sophisticated techniques for modeling the properties of the bituminous mixtures. The study was found that the application of popular Burgers model is not capable to properly predict the properties of the asphalt concrete at high frequency load/low temperature and at high temperature/low frequency in comparison with the generalized Huet-Sayegh model.

Keywords: linear visco-elasticity, modelling, Quasi-Newton algorithm, dynamic test

1. Introduction

The design of flexible roadway structures requires increasingly sophisticated rheological models for bituminous materials. The scale of explanation of real asphalt mixtures behavior (MMA) influences on the durability of the pavement design. Currently, the most widely used model for the design of the pavement structure is the elastic model. This model assumes a linear stress-strain relationship [1]. Unfortunately, there is no possibility to take into account the time causing a lack of capability to predict a relaxation phenomenon that takes place in the design of the flexible road surface [2]. Therefore its use is limited only to cases where the pavement structure is loaded for a time equals to 0.02 s or at low temperature below +13°C [3]. Currently, in the world the main attention is paid on the introduction of linear visco-elasticity models for the design of roadway structures characterized by a stress relaxation [4, 5]. These models are discussed in Burgers and Huet-Sayegh (2S2P1D) that allow the estimation of the stiffness modulus expressed in frequency and temperature domain. Accordingly, it is required to make a decomposition of the complex modulus (E^*) into its

elastic part (E') and viscous part (E'') described by additional parameter denoted as phase angle (δ) [6].

2. Materials and methods

2.1. Asphalt concrete AC 16W

Reference bituminous mixture type AC16W had to meet Polish requirements of WT-2/2010 [7]. Pavement layer AC16W has been designated for traffic category KR3-6 ($ESAL_{100kN} < 2.5 \cdot 10^6 \div 7.3 \cdot 10^6$ axles). The composition of the bituminous mixture AC16W was designed using gradation limits imposed by the requirements of WT-2/2010. The mix of mineral aggregate AC16W with gradation such as 8/16 and 2/8 consisted of limestone while gradation 0/4 was the dolomite. The optimum amount of bitumen was set at 4.6%.

2.2. Stiffness modulus according to DTC-CY

The Direct Tension-Compression Test on Cylindrical Samples (DTC-CY) was performed on the specimens of asphalt concrete AC16W to determine complex stiffness modulus according to PN-EN 12697-26 Annex D [8]. The specimen was subjected to a sinusoidal strain with an amplitude of $\epsilon_0 < 25 \mu\epsilon$. The complex modulus was calculated at temperatures

of 20°C and frequencies: 0.1 Hz, 0.3 Hz, 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz and 20 Hz. In result the complex modulus (E^*) and the phase shift angle (δ) were determined.

3. Models estimation parameters alghoritm

In engineering applications the most popular model is Burgers model [9]. Despite the good compromise between the number of parameters and the capacity to explain the behavior of the material this model it is not able to accurately predict a stiffness modulus for many modern composite materials. In addition, the rheological parameters described by this model are strongly temperature dependent preventing the formation of master curve. Thus, the wider use of Burgers model in the pavement structures design is limited. Therefore, recently it is used a more appropriate model which is a generalization of Huet-Sayegh model based on parabolic dashpots (2S2P1D) [10]. This model can precisely describe the phenomenon of relaxation in bituminous mixtures but requires the determination of seven parameters. Graphical representation of these models is shown in Figure 1.

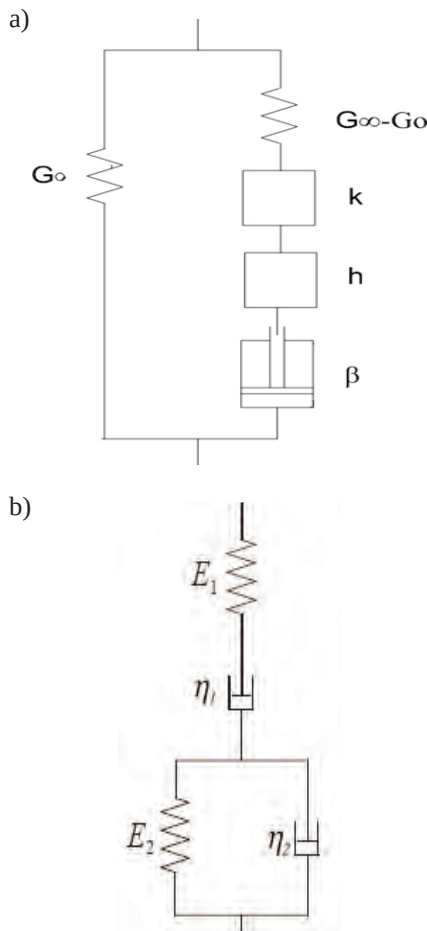


Fig. 1. Scheme of rheological models: a) generalized Huet-Sayegh (2S2P1D); b) Burgers

Either 2S2P1D and Burgers models can be transformed from the time domain to the frequency domain using Fourier transformation function [4], [11]. Therefore, after necessary function transformations the relaxation function of Burgers model has the form (1):

$$E^*(\omega) = \frac{i(\eta_1) \cdot \omega - \left(\frac{\eta_1 \cdot \eta_2}{E_2} \right) \cdot \omega^2}{1 + i \left(\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1}{E_2} + \frac{\eta_2}{E_2} \right) \cdot \omega - \left(\frac{\eta_1 \cdot \eta_2}{E_1 \cdot E_2} \right) \cdot \omega^2} \quad (1)$$

where: η_1 , E_1 – viscosity and linear spring of Maxwell model, η_2 , E_2 – viscosity and linear spring of Kelvin model, ω – loading time (frequency).

In contrast the relaxation function of 2S2P1D (S_H) model is formulated by (2):

$$E^*(\omega) = E_0 + \frac{E_g - E_0}{1 + \alpha(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (2)$$

where: $E^*(\omega)$ – shear stiffness modulus expressed in frequency, k and h – exponents (parabolic dashpot) $0 < k < h < 1$, α – constant, τ – characteristic time, E_0 – long-term modulus and E_g – instantaneous modulus, β – constants expressed zero shear viscosity η_0 .

Parameters determination of analyzed models requires the use of optimization techniques aimed at minimizing the differences between the measured and modeled values of stiffness modulus. Therefore, the script written in MathCad [12] using the solver Quasi-Newton was elaborated. As a measure of goodness of fit the root mean square error (RMSE) and the value of the standard error of estimation (S_e) were utilized. The results of matching parameters were shown in Table 1.

Table 1. Matching parameters of Burgers and 2S2P1D model in relation to stiffness modulus of elasticity E^*

Parameters of generalized Huet-Sayegh model (2S2P1D)								
E_0 [MPa]	E_g [MPa]	h [-]	k [-]	α [-]	β [-]	τ [s]	S_e [MPa]	RMSE [%]
438	66050	0,42	0,10	2,9	3312	0,1	786	3,99

Parameters of Burgers model					
η_1 [MPa·s]	E_1 [MPa]	η_2 [MPa·s]	E_2 [MPa]	S_e [MPa]	RMSE [%]
46239	14496	10590	29744	3622	10,02

It should be noted that the fit of the model 2S2P1D is high from the point of view of RMSE parameter amounted to 3.99% while the Burgers model is characterized by an almost threefold greater RMSE standing at 10.02%. Also, the estimation

standard error of complex modulus (E^*) of Burgers model is 3622 MPa, and it is more greater than the estimation standard error observed in 2S2P1D model representing the value of 786 MPa. Therefore, it can be concluded that the quality of the explanation of the relaxation phenomenon is better in case of application of 2S2P1D model.

4. Results and comparisons

On the basis of conducted approximation of Burgers and 2S2P1D models parameters the extrapolation of stiffness modulus results (E^*) out of tested frequency range was studied. The aim of this was to observe how they will proceed modeled relaxation function of the asphalt concrete AC11W in a wide frequency spectrum. Figure 2 shows changes in stiffness modulus in the range from 0.01 Hz to 20 Hz.

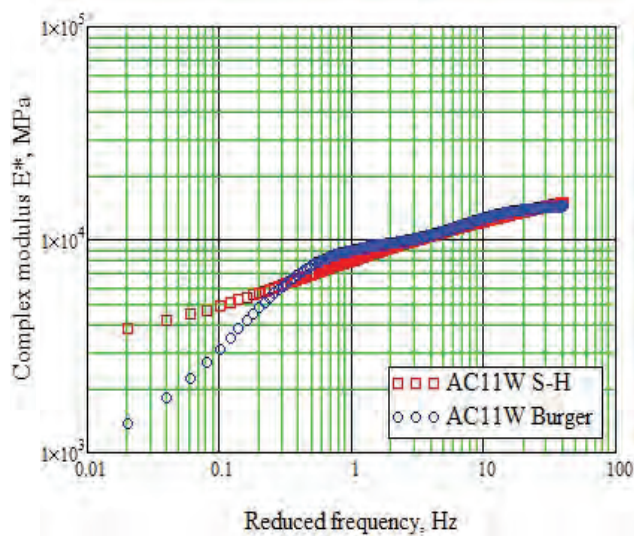


Fig. 2. The comparison between analytical solutions of Burgers and 2S2P1D (S-H) models

Comparing these two models it should be noted that Burgers model is not able to properly explain the behavior of the asphalt concrete at frequencies below 0.2 Hz. The first non-convergence appears at frequency approximately of 2 Hz (Figure 2 and Figure 3a). As a result, model Burgers in relation to 2S2P1D model underestimates the stiffness of the asphalt concrete for a long loading time. It is associated with the dominance of Maxwell dashpot element (η_2) that makes the modulus tending to zero. This points to the existence of creep and consequently the dissipation of elastic energy. It is known that in the linear viscoelasticity there is no dissipation energy.

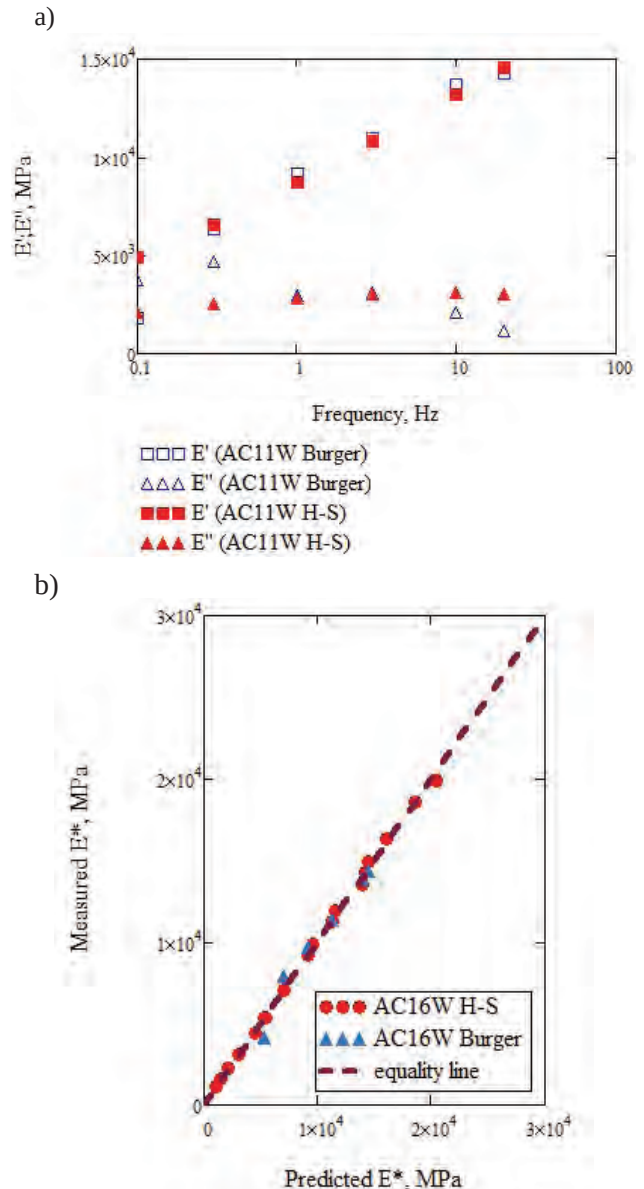


Fig. 3. Relation between E' and E'' (a); Models matching quality (b)

In Figure 3a after decomposition of the complex modulus into its elastic part (E') and viscous part (E'') it can be concluded that for Burgers model above 10 Hz is observed a rapid reduction in the viscous part suggesting that the material reached a elastic state. The level of the elastic modulus described by Burgers model is 4.6 times less (E_g/E_1) than in 2S2P1D model. Unfortunately, from the point of view of the real structure behavior this stiffness modules level for high-frequency loading time (in the model Burgers) is not acceptable. Analyzing the fit results in Figure 3b it should be noted that, despite some differences with the 2S2P1D model the considered Burgers model can be used in certain engineering

applications. However, the biggest differences between Burgers and 2S2P1D models appears for a long loading time/high temperature. In addition at the low temperatures Burgers model achieves very fast the level of the asymptote of elastic modulus (where stiffness modulus is independent of loading time) and it is lower than results of experimental data. In this connection, the Burgers model should not be used to estimate the modulus MMA in a wide range of loading time and temperature.

5. Conclusions

Based on conducted analyses the following conclusions can be draw:

- The generalized Huet-Sayegh (2S2P1D) model more better explains the relaxation phenomenon for asphalt concrete than Burgers model.
- The matching quality of 2S2P1D model regarding RMSE equals approximately 4% whereat for Burgers model it stands at 10%.
- Burgers model it doesn't explain precisely behavior of the material according to the linear viscoelasticity theory.
- In spite of its simplification, Burgers model can be used to predict bituminous mixtures.
- Burgers model should not be used in a wide range of the loading time especially for the frequency range below 0.1 Hz and above 20 Hz.

References

- [1] Obara P., Iwański M.: *Strict and approximate dynamic analysis of rod structures taking into account the impact of axial forces*, Procedia Engineering, XXIV R-S-P seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (24RSP) (TFoCE 2015) 111, 324-330, 2015. doi:10.1016/j.proeng.2015.07.096.
- [2] Stefańczyk B., Mieczkowski P.: *Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wykonawstwo i badania*, WKŁ, Warszawa 2008.
- [3] Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych [Flexible and Semi-Rigid Pavement Maintenance and Rehabilitation Catalogue], GDDKiA, 2012.
- [4] Kim Y.R.: *Modeling of Asphalt Concrete*, McGraw-Hill Construction, 2009.
- [5] Monismith C.L., Alexander R.L., Secor, K.E.: *Rheological behaviour of asphalt concrete*, Association of Asphalt Paving Technologies (AAPT), (1966), 556, 401-449.
- [6] Marques S.P., Creus G.J.: *Computational Viscoelasticity*, Springer Briefs in Computational Mechanics, 2012.
- [7] WT-2/2010 – Technical requirements – Bituminous mixtures - Annex 2, order nr 102, GDDKiA 2010.
- [8] EN 12697-26 Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt- Part 26: Stiffness, Annex D.
- [9] Kisiel I.: *Reologia w budownictwie*, Arkady, 206, 1967.
- [10] Benedetto H.D.: *Modelling the rheological properties of bituminous binders using the 2S2P1D Model*, Construction and Building Materials, 38, (2013), pp. 395-406.
- [11] Nagórski R.: *Mechanika nawierzchni drogowych w zarysie [Road structures mechanics in general principle]*, PWN, Warsaw 2014.
- [12] Benker H.: *Practical Use of Mathcad – Solving Mathematical Problems with a Computer Algebra System*, Springer 1999.

Grzegorz Mazurek

Implementacja lepkosprężystego uogólnionego modelu Hueta-Sayegh oraz Burgersa do określenia modułu sztywności betonu asfaltowego

1. Wstęp

Projektowanie konstrukcji podatnych wymaga stosowania coraz to bardziej zaawansowanych modeli reologicznych dla materiałów bitumicznych. Skala wyjaśnienia przez nie rzeczywistego zachowania

mieszanek mineralno-asfaltowych (mma) decyduje o trwałości konstrukcji nawierzchni drogowej. Obecnie najczęściej stosowanym modelem do projektowania konstrukcji nawierzchni jest model sprężysty. Jest, to model który zachowuje liniową relację naprę-

zenie-odkształcenie [1]. Niestety brak możliwości uwzględnienia czasu powoduje, że nie odwzoruje on zjawiska relaksacji, które ma miejsce w zachowaniu konstrukcji podatnych nawierzchni drogowej [2]. W związku z tym jego stosowanie jest ograniczone do przypadków, w którym konstrukcja nawierzchni jest krótko obciążona – około 0,02 s lub niskiej temperatury poniżej $+13^{\circ}\text{C}$ [3]. Obecnie główny nacisk na świecie [4, 5] jest stawiany na wprowadzenie modeli liniowej lepko-sprężystości do projektowania konstrukcji charakteryzujących relaksację naprężeń w mma. Wśród nich są omawiane modele Burgersa oraz Huet-Sayegh (2S2P1D), które umożliwiają estymację modułu sztywności w dziedzinie częstotliwości oraz temperatury. W związku z tym jest wymagana dekompozycja modułu zespolonego (E^*) na jego część sprężystą (E') oraz lepką (E'') przy pomocy dodatkowego parametru postaci kąta przesunięcia fazowego (δ) [6].

2. Metody i materiały

2.1. Beton asfaltowy AC 16W

Referencyjna mieszanka mineralno-asfaltowa typu AC16W musiała spełniać polskie wymagania WT-2/2010 [7]. Warstwa AC16W została przeznaczona na projektowany ruch pojazdów kategorii KR3-6 ($\text{ESAL}100 \text{ kN} < 2,5 \cdot 10^6 \div 7,3 \cdot 10^6$ axles). Skład mieszanki mineralnej warstwy AC16W zaprojektowano metodą krzywych granicznych, których wartości krytyczne są podyktowane wymaganiami WT-2/2010. W mieszance mineralnej AC16W jako frakcje kruszywa 8/16 oraz 2/8 zastosowano skały wapienne natomiast frakcję 0/4 stanowił dolomit. Optymalna ilość asfaltu wynosiła 4,6%.

2.2. Pomiar modułu zespolonego DTC-CY

Moduł zespolony betonu asfaltowego (AC16W) próbek został oznaczony metodą DTC-CY (Direct Tension-Compression Test on Cylindrical Samples) według normy PN-EN 12697-26 Annex D [8]. Próbkę poddano sinusoidalnemu stałemu odkształceniu o amplitudzie $\varepsilon_0 < 25 \mu\epsilon$. Moduł zespolony został określony w temperaturze 20°C . Częstotliwość obciążenia wynosiła 0,1 Hz, 0,3 Hz, 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz oraz 20 Hz. Wynikiem badania był moduł zespolony (E^*) oraz kąt przesunięcia fazowego (δ).

3. Algorytm estymacji parametrów modelu

Najbardziej popularnym modelem reologicznym w zastosowaniach inżynierskich jest model Burgersa [9]. Mimo dobrego kompromisu między ilością parametrów a zdolnością do wyjaśnienia zachowania

materiału model Burgersa nie jest w stanie precyzyjnie prognozować modułu sztywności wielu nowoczesnych materiałów kompozytowych. Ponadto parametry reologiczne w nim zawarte zależą od temperatury, co uniemożliwia kształtowanie krzywych wiodących za pomocą modelu Burgersa. Tym samym ogranicza to jego szersze stosowanie do projektowania konstrukcji nawierzchni metodami mechanistycznymi. W związku z tym od niedawna stosowany jest znacznie bardziej adekwatny model, będący uogólnieniem modelu Huet-Sayegh, wykorzystujący tłumiki paraboliczne (2S2P1D) [10]. Jest to model, który bardzo precyzyjnie opisuje zjawisko relaksacji mma, jednak wymaga określenia siedmiu parametrów. Graficzny schemat omawianych modeli przedstawiono na rysunku 1. Zarówno model Burgersa i 2S2P1D można transformować z domeny czasu do domeny częstotliwości, korzystając z transformat Furiera [4], [11]. W związku z tym po niezbędnych przekształceniach funkcja relaksacji modelu Burgersa ma postać (1). Natomiast funkcja relaksacji modelu 2S2P1D ma postać (2).

Określenie parametrów analizowanych modeli wymaga zastosowania technik optymalizacyjnych mających na celu minimalizację różnic pomiędzy zmierzonymi wartościami modułu zespolonego sztywności a ich wartościami modelowymi. W związku z tym opracowano makroskrypt w programie MathCad [12] wykorzystując solver Quasi-Newtona. Jako miary jakości dopasowania wykorzystano błąd średniokwadratowy (RMSE) oraz wartość błędu standardowego estymacji (S_e). Rezultaty dopasowania parametrów przedstawiono w tabeli 1.

4. Rezultaty badań

Na podstawie przeprowadzonej aproksymacji parametrów modelu Burgersa oraz 2S2P1D dokonano ekstrapolacji wyników modułu zespolonego E^* poza zakres badanych częstotliwości. Celem tego działania jest obserwacja w jaki sposób będzie przebiegać modelowana funkcja relaksacji betonu asfaltowego AC11W w szerokim spektrum częstotliwości. Na rysunku 2 przedstawiono prognozę modułu sztywności w zakresie od 0,01 Hz do 20 Hz.

Porównując obydwa modele należy zwrócić uwagę, że model Burgersa nie jest w stanie poprawnie scharakteryzować zachowania betonu asfaltowego w zakresie częstotliwości poniżej 0,2 Hz przy czym pierwsze niezbieżności pojawiają się już przy częstotliwości około 2 Hz (rys. 2 oraz rys. 3a). W związku z tym model Burgersa w stosunku do modelu 2S2P1D niedoszacowuje sztywności betonu asfaltowego

w zakresie długiego czasu obciążenia. Jest to związane z dominacją tłumika elementu Maxwella (η_1), który sprawia, że wartości modułu sztywności dążą do zera. Taki stan rzeczy sugeruje istnienie pełzania i w konsekwencji dyssypację energii sprężystej. Należy pamiętać, że praca materiału w zakresie liniowej lepko-sprężystości nie zakłada dyssypacji energii.

Na podstawie rysunku 3a, po wykonaniu dekompozycji modułu zespolonego na jego część sprężystą (E') i lepką (E'') można stwierdzić, że w modelu Burgersa powyżej 10 Hz następuje gwałtowny spadek części lepkiej sugerując, że materiał osiągnął stan sprężysty. Poziom modułu sprężystości, określony przez model Burgersa, jest 4,6 (E_g/E_1) razy mniejszy niż w przypadku modelu 2S2P1D. Niestety należy dodać, że punktu widzenia rzeczywistej pracy nawierzchni taki poziom modułu dla wysokiej częstotliwości obciążenia (w modelu Burgersa) nie jest uzasadniony. Analizując rezultaty dopasowania na rysunku 3b należy zwrócić uwagę, że pomimo pewnych rozbieżności z modelem 2S2P1D model Burgersa może być wykorzystany w pewnych zastosowaniach inżynierskich. Jednak największe rozbieżności modułu sztywności według modelu Burgersa z modelem 2S2P1D oraz rezultatami eksperymentu pojawia się w niskich wartościach pomiaru częstotliwości, czyli dla długich czasów obciążenia/wysoka temperatura. Ponadto dla

niskich temperatur model Burgersa osiąga w szybkim tempie poziom asymptoty modułu sztywności (moduł sztywności niezależny od czasu obciążenia) i jest on niższy niż wskazują na to dane eksperymentalne. W związku z tym model Burgersa nie powinien być stosowany do estymacji modułu sztywności mma w szerokim zakresie czasu i temperatury.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano następujące wnioski:

- Uogólniony model Huet-Sayegh (2S2P1D) znacznie lepiej odwzorowuje zjawisko relaksacji w betonie asfaltowym niż model Burgersa.
- Jakość dopasowania modelu 2S2P1D w ocenie błędu RMSE wynosi ok. 4% natomiast dla modelu Burgersa około 10%.
- Model Burgersa nie odzwierciedla precyzyjnie zachowania materiału w zakresie liniowej lepko-sprężystości.
- Model Burgersa pomimo swojej symplifikacji może być stosowany do prognozowania mieszanek mineralno-asfaltowych.
- Model Burgersa nie powinien być wykorzystywany w dla szerokiego zakresu czasu obciążenia szczególnie dla zakresu częstotliwości powyżej 20 Hz i poniżej 0,1 Hz.

JOANNA GIL-MASTALERCZYK
Kielce University of Technology
e-mail: jmastalerczyk@tu.kielce.pl

GREEN ARCHITECTURE AND NATURAL-CULTURAL TEAMS – IN THE TEACHING PROCESS

Abstract

Green architecture and natural and cultural groups are a unique kind of space with various functions – contemporary and cultural (including sacred). Most often they are characterized by high aesthetic and functional advantages. The innovative green architecture combines the technique of building with nature fulfilling excellent recreational, teaching, as well as integration functions for the local communities. As numerous studies show green improves the quality of life, and therefore becoming increasingly important to increase green areas – especially in large cities. Additional areas and green elements carry a positive social aspects, positive impact on the revitalization, improving the quality of life, environmental education and ensure environmental protection. An integral part of contemporary educational issues are also teams of natural and cultural heritage. They are characterized by constant variation. An important historical resource and perform functions of many of today's tasks (use of attractive surroundings of the temple, the purpose of great human assemblies). That is why the issue of green architecture and nature-culture is an important topic in the teaching process. Specialized and multithreaded issues associated with green architecture and the natural landscape were included in graduation engineering projects (of studies of the first degree). They became the subject of research techniques and scientific visits of students of the University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture in Kielce (Malopolska, Poland).

Keywords: linear visco-elasticity, modelling, Quasi-Newton algorithm, dynamic test

1. Introduction

As a result of strong concentration of housing and services in the city and to the growing areas occupied by the expanding construction projects, green space – is a very important element. In frames of this space, diverse functions are interpenetrating, so as: recreational, aesthetic and functional.

For modern man green – provides coexistence with nature, it is a place where you can escape from everyday life and find inner harmony. Green community provides aesthetic and practical. Due to the interests, expectations and lifestyle of people.

Towards many needs of investors and the community green is finding its reflection in allocating designed spaces – by students – of objects. s a result of many reflections, functional arranging areas and elements of green is leaning on perceiving the area as the specific enclave, constituting the integral whole along with the object. It is also the result of the

orientation assumptions with respect to the directions of the world – shading and solar aspect selection of surface hardened in the context of other elements and consistency of plant material. These are also competent using plants and including them in the composition whole.

At the Kielce University of Technology a few years chosen by the students of urban and extra-urban are the space where are designed distinct buildings and architectural structures – using the natural values of the environment and the diversity of floristic.

Such solutions can be found in the work of diploma engineering – the fourth year students of the Faculty of Engineering and Architecture (full-time studies of the first degree).

Discussed below examples are presenting the exchange of the not-used or under-grounded space for functional green integrated with the designed function and the object.

2. Green Architecture – an important element in the teaching process

An object of the Museum of the Ponidzia Nature is a subject of the first thesis and an example using the flora largely. The entire design solution is regarding the land development by the lake in Morawicy, located approx. 15 km from the city of Kielce (Świętokrzyskie, Poland).

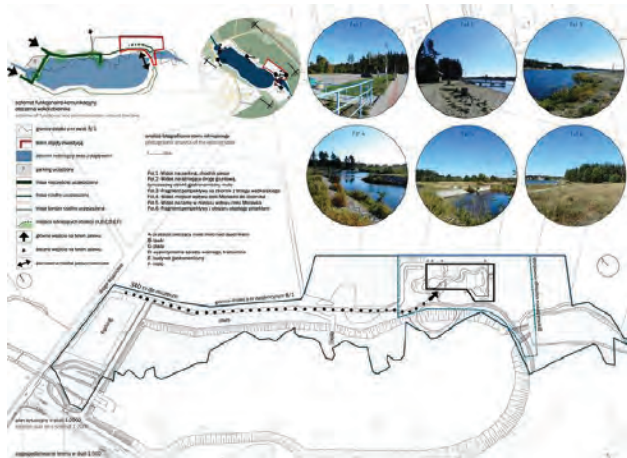


Fig. 1. The Nidarium. Nature Museum of Ponidzie (Świętokrzyskie, Poland), analysis, author – student K. Kruk [1]

Object Museum of Natural History, was named by the graduate student as "Nidarium" – from the name of the Nida river. She became "a prelude to explore Ponidzie". The complex was located on a valuable natural area of the Nida Basin and near the protected area Natura 2000 Valley of the Black Nida. The entire urban concept has been adapted to the natural landscape and enriches the values of the analyzed environment. The spatial arrangement of the object, fits perfectly in the context of the place and the landscape Ponidzie.

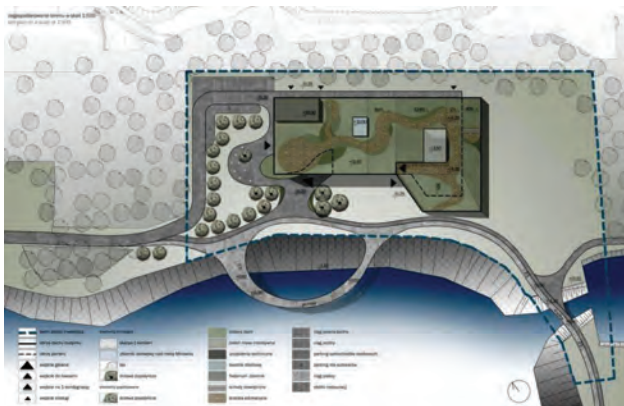


Fig. 2. The Nidarium. Nature Museum of Ponidzie (Świętokrzyskie, Poland), project management, author – student K. Kruk [1]

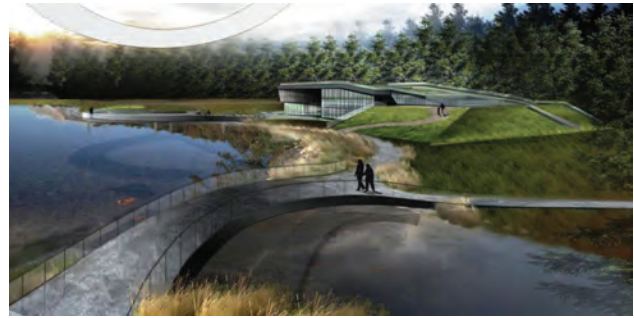


Fig. 3. The Nidarium. Nature Museum of Ponidzie (Świętokrzyskie, Poland), view of the whole complex, author – student K. Kruk [1]

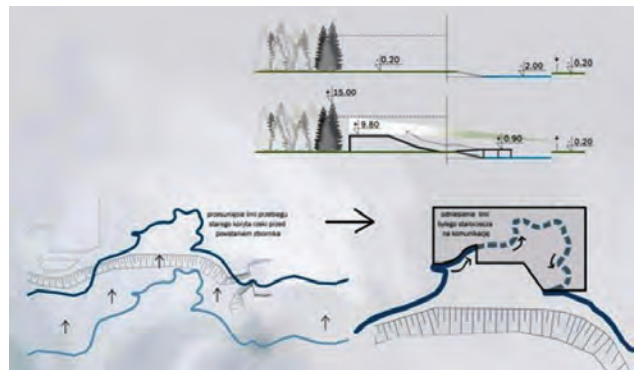


Fig. 4. The Nidarium. Nature Museum of Ponidzie (Świętokrzyskie, Poland), scheme the formation solid, author – student K. Kruk [1]

The architectural form of the building was connected with the development of the surrounding area and opens up to the Nida river. The consciously used building material and the attractive decor of the elevation, in the appropriate way are referring to the tradition of this place.

The building was divided into several parts, the use of structure-based outdoor green terrace. It is designed as an independent place, with careful selection of the theme of his creations, referring to the elements of nature (such as vegetation usable, water, stone). The proposed structure of the functional and impressive program (function museum associated with the collection and permanent protection of the wealth of natural and cultural heritage to promote nature Ponidzie; hall with aquariums fauna and flora of the region Nida, lecture halls and exhibition, etc.), complemented by a food court and recreation combined with green panoramic terrace, and the formed steeply green roof. They are a reply to contemporary needs of residents and tourists.

Elements supplementing surrounding the lake also became a crucial element of the entire assumption – as concrete walking-bicycle sequences. They are

referring to the primitive, characteristic winding flow of the river of the Nida river. Outline of the river has also been exposed in the way of shaping the building.

The variety used in the project invoices, forms and colors is intended to foster an atmosphere of users and provide a friendly place in the field. Individual original architectural form and green space provide a friendly social contact with nature. Green architecture of the building, has a positive effect on the quality of architectural space.

The overall conclusion is that the guiding principle of the project, became the creation of an attractive place for both communities staying in the building and outside. The author in the interesting way wrote down the whole of establishing into the existing landscape, emphasizing aesthetic advantages of the place and making surrounding for new original ideas rich. Seeking new devices is characteristic of architecture plastic and aesthetic – in accordance with the nature and the spirit of the place.

3. Landscape of the sacrum – important component of educational issues

The advantage of the proposed concept of architectural and urban – associated with the "sacred", is to respect the existing structure of greenery and natural landscape. The conceptual design includes a small utility object of sacral function. The chapel was situated on the special place – former epidemic graveyard in Daleszyce – Kielce (Świętokrzyskie province, Poland). Currently, the entire area is covered with coniferous forest, the middle of which there are three steel crosses – commemorating the passage by the city of the plague of cholera. In this place, minimalist designed to block the temple, highlighted in the front elevation of three crosses – emphasizing the function of the building. It should be emphasized that the reference to local conditions, natural and traditions and Christian symbols became an important element of the whole project.

The overall objective of the concept of the thesis was to create an ascetic and readable in the landscape blocks – not only as a form, but also as a symbol of devotion memory of suffering people. In the intention of the initiator of the scheme, the object is supposed to constitute the dialogue between the tradition and the modernity.

The compact shape of the building, consisting of two different forms of material and creates a harmonious and original spatial arrangement and fits into the natural surroundings. The front elevation

and rear and used them material – in the form of glass panes, generate close communication with the interior environment. Lightweight design provides close to nature and wide views of the surrounding nature. Glass reflects green and corresponds with nature, emphasizing the natural values of this place.

Uniform in the expression of plastic elevations side of the temple, thanks to applied divisions on the walls and in the roof, provide a flow of natural light, generating effects of light and shadow and highlighting the ascetic interior of the temple. Undivided interior is characterized by simplicity and a minimalist look, which the faithful can devote themselves entirely to prayer and contemplation of the place. In plunged in the dark aisle, you can find only the simplest and the necessary equipment. The adopted spatial structure of the object allows you to carry out an additional application program located in the lower church (memorial hall, modest gallery exhibitions, archives and toilets).

Generally, one should state that the initiator of the scheme in the interesting way is writing down the whole of establishing into the existing landscape. Underlined are aesthetic space and its surroundings – enriched with new original ideas. In front of the chapel a big square was designed, intended for faithful – for the contemplation and the rest. The outside space was formed stepwise, according to advantages of the natural slope of the area. Here functional elements were implemented so as benches, the low illumination and other forms of the street furniture – enriching environment of the temple. The forecourt is supposed to create the specific maze for staying here faithful, because history of this place (in the intention of the student), is supposed to reflect the entire neighbourhood. Around the building an area was designed with the flora becoming part of a surrounding landscape and emphasizing his character. Land development was rewarded with the symbolism of plants connected with the Christian religion and the garden – symbolizing joy, eternal life, closeness of God, and with maze of the human existence. The interpretation of semantic and lexical draft of green shows the outline of a small Christian culture and shows how many plants he finds reflected in the spiritual realm.

The planned sacred establishment in the interesting way was written down into the natural environment and has a historical maximum value. He is also performing a lot of contemporary tasks – constituting the cultural and natural important resource. Also directing high green and composed forms keeping the existing tree stand and

making it rich against new elements is an advantage of the work of low green. Designed was a place that has become a reflection of the memory of the victims of the plague, as well as a place of peace, harmony and another dimension – by the passing of time.

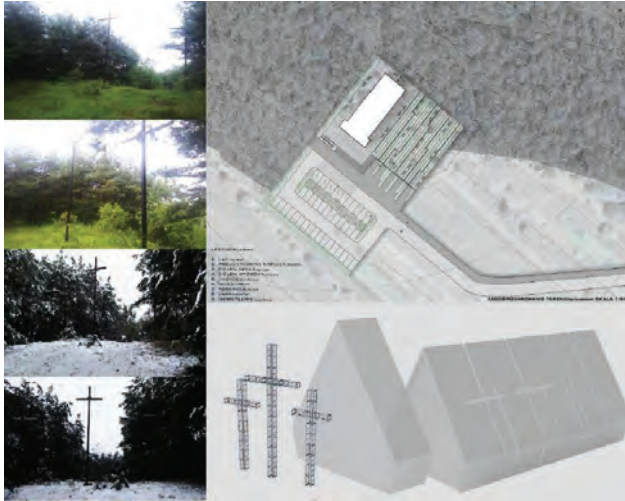


Fig. 5. Design of the Chapel at the epidemic cemetery in Daleszyce (Świętokrzyskie, Poland), project management, analysis, author P. Borek [2]

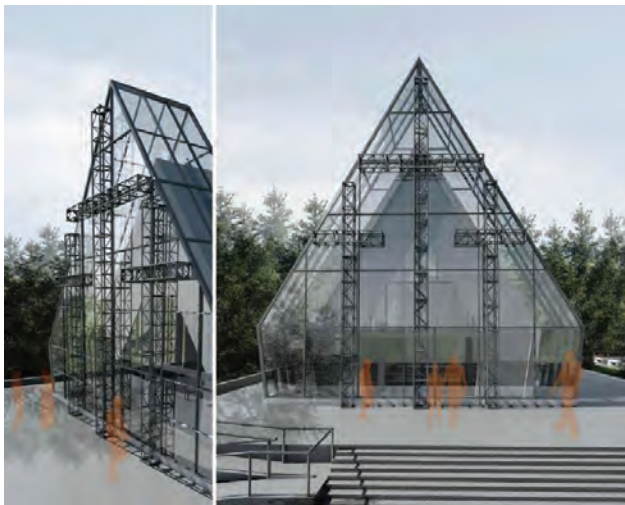


Fig. 6. Design of the Chapel at the epidemic cemetery in Daleszyce (Świętokrzyskie, Poland), author – student P. Borek [2]

To sum up, one should state that natural-cultural teams about the sacred function have important and numerous aspects – sacred and secular. They have a spiritual considerable value as well as are performing the rich functional function (hostels for pilgrims, museum functions, rooms of meetings of parish community, residents and young people, posts of the lease of rooms and holding occasional events, of picnics). Here residents and pilgrims are

arriving at the prayer. Here different celebrations are held. On the area of landscape objects they often run routes of the way of the cross as well as chapels are being arranged. In surrounding most often tall trees, constituting the protection against sunlight and raising aesthetic advantages of the place grow.

4. Conclusions

An increasing number of people of our world live in cities. Very important is, therefore to increase the availability of green areas. As shown by the examples of student projects, contemporary solutions offer increasing green space, improve the quality of life.

Green is performing the excellent recreational, aesthetic, teaching and integration function for the local communities. For her the way of coming into existence, functioning, developing and holding can constitute the inspiration of creating the community and other space – friendly to the man. Green is absorbing pollutants, a need to air the city is satisfying, is protecting from noise, rain and dusts [2]. Beneficial effect of introducing green in the architecture of objects e.g.: on elevations of buildings – results in the improvement in thermal conditions (with summer – cooling buildings and parrying water, in the winter – creating "air bags") [1]. The implemented flora vertically doesn't require enlarging horizontal surfaces – especially in tight centres of the metropolis and major cities [3]. Green elevations have high aesthetic advantages and it is possible to compose them with using the locally appearing flora.

Also using unused spaces of roofs is becoming an opportunity. Obtained additional green areas bring positive social aspects and positive impact on the regeneration activities. They can also be used in organic food crops, herbs or other plants (vegetables grown high on the roof are free from contamination [4]). Construction of green roofs has a positive impact on improving the quality of life, environmental education and ensure environmental protection.

Natural-cultural teams are an integral part of contemporary educational issues. Many places about such character and the emotional charge behaved until today. However their values very often are undervalued, forgotten, or also distorted and destroyed.

Particularly high natural value are elements of nature-cultural sacral. These elements mutually are complementing each other, creating uniform, harmonious whole. Natural aspects, advantages with a view and the location are becoming an additional asset of these places. By virtue of the top stair of the

biodiversity the appearing here flora is being ranked to exceptionally important.

These elements mutually are complementing each other, creating uniform, harmonious whole. Natural aspects, advantages with a view and the location are becoming an additional asset of these places. By virtue of the top stair of the biodiversity the appearing here flora is being ranked to exceptionally important. Multi-layered issues included in engineering graduation works are confirming it. A fact that students willingly are taking is valuable and thoroughly are analysing these issues. They will identify natural conditioning and the legal situation of the area, are analysing local land management plans and applicable regulations (building and other natures in the protection). They are taking wide location analyses, historical studies field stocktaking – referring to the natural as well as cultural source. Results of analyses and of own observation, are becoming a base of drawing graduation projects up. Students are studying in this way making important design decisions and taking the consequences from entertaining them.

References

- [1] Kruk K.: *Nidarium-Muzeum Przyrody Ponidzia / The Nidarium-Nature Museum of Ponidzie*, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Budownictwa i Architektury / Kielce University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Praca dyplomowa inżynierska / Thesis engineering, Kierownik pracy / supervisor: dr inż. arch. Joanna Gil-Mastalerczyk, Kielce 2016.
- [2] Borek P.: *Projekt kaplicy na terenie cmentarza epidemicznego w Daleszycach / Design of the Chapel at the Epidemic Cemetery in Daleszyce*, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Budownictwa i Architektury / Kielce University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture / Kielce University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Praca dyplomowa inżynierska / Thesis engineering, Kierownik pracy / supervisor: dr inż. arch. Joanna Gil-Mastalerczyk, Kielce 2016.
- [3] Łakomy K., Bobek W.: *Nowoczesne systemy konstrukcji pod pnącza – technologie, rozwiązania i problemy projektowe, dobór roślinności*, Czasopismo Techniczne 2-A/2/2011, pp. 135-143.
- [4] Sych M., Hodor K.: *Komponowanie krajobrazu przestrzeni osiedlowej ogrodami pionowymi / Composing landscape of housing estate with vertical gardens*, Czasopismo Techniczne Architektura / Technical Transactions Architecture 8-A/2012, Z.30 rok 109 / Issue 30 Year 109, Wyd. Politechnika Krakowska/ Cracow University of Technology Press, Krakow 2012, pp. 279-286.
- [5] Asanowicz K.: *Renesans miejskich ogrodów użytkowych / Renaissance of the utilitarian gardens*, Czasopismo Techniczne Architektura / Technical Transactions Architecture 8-A/2012, Z.30 rok 109 / Issue 30 Year 109, Wyd. Politechnika Krakowska / Cracow University of Technology Press, Krakow 2012, pp. 224-230.

Joanna Gil-Mastalerczyk

Zielona architektura i zespoły przyrodniczo-kulturowe – ważne elementy w procesie dydaktycznym

1. Wprowadzenie

W wyniku silnej koncentracji zabudowy mieszkaniowej i usługowej w mieście oraz wobec coraz większych obszarów zajmowanych przez rozrastające się realizacje budowlane, przestrzeń zielona – stanowi bardzo ważny element. W ramach tej przestrzeni przenikają się różnorodne funkcje, takie jak: rekreacyjna, estetyczna oraz użytkowa.

Dla współczesnego człowieka zieleń zapewnia współistnienie z przyrodą, jest miejscem, w którym można oderwać się od codzienności i odnaleźć wewnętrzną harmonię. Zieleń zapewnia społeczności względy estetyczne i praktyczne. Wynika z zainteresowań, oczekiwań i trybu życia ludzi.

Wobec wielu potrzeb inwestorów i społeczności zieleń znajduje swoje odbicie w przeznaczeniu prze-

strzeni projektowanych – przez studentów – obiektów. W wyniku wielu przemyśleń, funkcjonalne rozmieszczenie terenów i elementów zieleni oparte jest na postrzeganiu terenu jako swoistej enklawy, stanowiącej wraz z obiektem integralną całość. To także wynik usytuowania założenia względem kierunków świata – zacieniania i nasłonecznienia, aspekt doboru nawierzchni utwardzonych w kontekście innych elementów i spójności z materiałem roślinnym. To również umiejętne operowanie roślinami oraz włączenie ich do całości kompozycyjnej.

Na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach od kilku lat wybierane przez studentów tereny miejskie oraz pozamiejskie stanowią przestrzeń, gdzie projektowane są odważne budynki i budowle architektoniczne, wykorzystujące walory naturalne środowiska oraz różnorodność florystyczną.

Rozwiązania takie odnaleźć można w pracach dyplomowych inżynierskich studentów IV roku Wydziału Budownictwa i Architektury (studiów stacjonarnych pierwszego stopnia).

Omawiane poniżej przykłady przedstawiają zamiar przestrzeni nieużytkowanej lub niedoinwestowanej na zieleni użytkową zintegrowaną z projektowaną funkcją i obiektem.

2. Green Architecture – ważny element w procesie dydaktycznym

Tematem pierwszej pracy dyplomowej oraz przykładem wykorzystującym w dużej mierze roślinność jest obiekt Muzeum Przyrody Ponidzia. Rozwiązanie projektowe dotyczy zagospodarowania terenu przy jeziorze w Morawicy, oddalonej ok. 15 km od miasta Kielce (województwo świętokrzyskie, Polska).

Obiekt Muzeum Przyrody, nazwany został przez dyplomantkę jako "Nidarium" – od nazwy rzeki Nidy. Stał się „wstępem do zwiedzania Ponidzia”. Kompleks zlokalizowany został na cennym obszarze przyrodniczym Niecki Nidziańskiej oraz w pobliżu chronionego Obszaru Natura 2000 Doliny Czarnej Nidy. Cała koncepcja urbanistyczna dostosowana została do naturalnego ukształtowania terenu i wzbogaca walory analizowanego środowiska. Układ przestrzenny obiektu doskonale wpisuje się w kontekst miejsca i krajobraz Ponidzia.

Forma architektoniczna budynku powiązana została z zagospodarowaniem otaczającego terenu i otwiera się na rzekę Nidę. Świadomie zastosowany materiał budowlany oraz atrakcyjny wystrój elewacji, w sposób właściwy nawiązują do tradycji tego miejsca.

Budynek został podzielony na kilka części, przez zastosowanie struktury opartej o zewnętrzny zielony taras. Zaprojektowano go jako niezależne miejsce, dobierając starannie motyw przewodni jego kreacji, nawiązujący do elementów natury (takich jak roślinność użytkowa, woda, kamień). Zaproponowaną strukturę funkcjonalną i bogatą ofertę programową (funkcja muzealna związana z gromadzeniem i trwałą ochroną dóbr naturalnego i kulturalnego dziedzictwa promującego przyrodę Ponidzia; sala z akwariami fauny i flory regionu Nidy; sale wykładowe i ekspozycyjne, itd.), dopełniają część gastronomiczną i rekreacyjną połączoną z zielonym tarasem widokowym oraz ukształtowanym spadziście zielonym dachem. Są one odpowiedzią na współczesne potrzeby mieszkańców i turystów.

Istotnym elementem całego założenia stały się również elementy uzupełniające otoczenie zalewu, jak betonowe ciągi pieszo-rowerowe. Nawiązują one do pierwotnego, charakterystycznego krętego przepływu rzeki Nidy. Zarys rzeki został również wyeksponowany w sposobie ukształtowania bryły budynku.

Różnorodność wykorzystanych w projekcie faktur, form i barw ma sprzyjać atmosferze użytkowników i stanowić przyjazne miejsce w terenie. Oryginalna indywidualna forma architektoniczna oraz zielona przestrzeń społeczna zapewniają przyjazny kontakt z naturą. Zielona architektura obiektu wpływa pozytywnie na jakość przestrzeni architektonicznej.

Podsumowując, należy stwierdzić, że naczelną zasadą projektu, stała się kreacja atrakcyjnego miejsca, zarówno dla społeczności przebywającej w budynku jak i poza nim. Autorka w interesujący sposób wpisała całość założenia w istniejący krajobraz, podkreślając walory estetyczne miejsca i wzbogacając otoczenie o nowe oryginalne pomysły. Architekturę charakteryzuje poszukiwanie nowych środków wyrazu plastycznego i estetycznego – w zgodzie z naturą i duchem miejsca.

3. Krajobraz sakralny – ważny element problematyki edukacyjnej

Walorem proponowanej koncepcji architektoniczno-urbanistycznej związanej z „sacrum”, jest uszanowanie istniejącej struktury zieleni i krajobrazu przyrodniczego. Projekt koncepcyjny obejmuje mały obiekt użyteczności publicznej o funkcji sakralnej. Kaplica usytuowana została na szczególnym miejscu – byłym cmentarzu epidemicznym w Daleszycach koło Kielc (województwo świętokrzyskie, Poland). Obecnie cały obszar porośnięty jest iglastym lasem,

pośrodku którego stoją trzy stalowe krzyże, upamiętniające przejście przez miasto zarazy cholery. W miejscu tym zaprojektowano minimalistyczną bryłę świątyni, podkreśloną w elewacji frontowej trzema krzyżami – akcentującymi funkcję budynku. Należy podkreślić, że odwołanie się do uwarunkowań lokalnych, przyrodniczych oraz tradycji i symboliki chrześcijańskiej stało się ważnym elementem całego założenia.

Ogólnym celem koncepcji pracy dyplomowej stało się stworzenie ascetycznej oraz czytelnej w krajobrazie bryły – nie tylko jako formy, ale także jako symbolu oddania pamięci cierpiącym ludziom. W zamiarze Autora projektu, obiekt ma stanowić dialog pomiędzy tradycją a nowoczesnością.

Zwarta bryła budynku, składająca się z dwóch zróżnicowanych materiałowo form, tworzy harmonijny i oryginalny układ przestrzenny oraz wpisuje się w przyrodnicze otoczenie. Elewacja frontowa i tylna oraz zastosowany na nich materiał w postaci tafli szkła, generują ścisłą komunikację wnętrza z otoczeniem. Lekka konstrukcja zapewnia bliskość natury oraz szerokie widoki na otaczającą przyrodę. Szkło odbija zieleni i koresponduje z przyrodą, podkreślając walory naturalne tego miejsca.

Jednolite w wyrazie plastycznym elewacje boczne świątyni, dzięki zastosowanym podziałom na ścianach i w dachu, zapewniają dopływ naturalnego światła, generującego efekty światłocieniowe i podkreślającego ascetyczne wnętrze świątyni. Jednoprzestrzenne wnętrze charakteryzuje prostota i minimalistyczny wygląd, przez co wierni mogą całkowicie oddać się modlitwie i zadumie tego miejsca. W pogrążonej w półmroku nawie można odnaleźć jedynie najprostsze i niezbędne elementy wyposażenia. Przyjęta struktura przestrzenna obiektu pozwala na realizowanie dodatkowego programu użytkowego, zlokalizowanego w kościele dolnym (sala pamięci, skromna galeria wystaw, archiwum i sanitariaty).

Ogólnie należy stwierdzić, że Autor projektu w interesujący sposób wpisuje całość założenia w istniejący krajobraz. Podkreślone zostają walory estetyczne miejsca, a jego otoczenie wzbogacone o nowe oryginalne pomysły. Przed kaplicą zaprojektowany został duży plac, przeznaczony dla wiernych do kontemplacji i odpoczynku. Przestrzeń zewnętrzną ukształtowano schodkowo, zgodnie z walorami naturalnego spadku terenu. Wprowadzono tu elementy użytkowe, takie jak ławki, niskie oświetlenie i inne formy małej architektury – wzbogacające otoczenie świątyni. Plac przed kościołem ma tworzyć swoisty labirynt

dla przebywających tu wiernych, gdyż historię tego miejsca (w zamiarze studentki) ma odzwierciedlać całe otoczenie. Wokół budynku zaprojektowano teren z roślinnością wpisującą się w otaczający krajobraz i podkreślającą jego charakter. Zagospodarowanie terenu wyróżnione zostało symboliką roślin powiązanych z religią chrześcijańską i ogrodem symbolizującym radość, życie wieczne, bliskość Boga, oraz labiryntem ludzkiej egzystencji. Dokonana interpretacja semetyczno-leksykalna projektowanej zieleni ukazuje niewielki zarys kultury chrześcijańskiej oraz pokazuje jak wiele roślin odnajduje odzwierciedlenie w sferze duchowej.

Projektowane założenie sakralne w interesujący sposób zostało wpisane w naturalne otoczenie i posiada wysoką wartość historyczną. Pełni również wiele zadań współczesnych, stanowiąc ważny zasób kulturowy i przyrodniczy. Zaletą pracy jest także ukierunkowanie na zachowanie istniejącego drzewostanu i wzbogacenie go o nowe elementy zieleni wysokiej oraz komponowanych form zieleni niskiej. Zaprojektowane zostało miejsce, które stało się odzwierciedleniem pamięci ofiar zarazy, jak i miejscem spokoju, harmonii i innego wymiaru – poprzez upływający czas.

Podsumowując, należy stwierdzić, że zespoły przyrodniczo-kulturowe o funkcji sakralnej posiadają ważne i liczne aspekty – sakralne i świeckie. Mają dużą wartość duchową oraz pełnią bogatą funkcję użytkową (schroniska dla pielgrzymów, funkcje muzealne, pomieszczenia spotkań wspólnot parafialnych, mieszkańców i młodzieży, funkcje wynajmu pomieszczeń i organizowania imprez okolicznościowych, pikników). Przybývają tu na modlitwę mieszkańcy oraz pielgrzymi. Odbywają się tu różne uroczystości. Na terenie obiektów krajobrazowych często przebiegają trasy Drogi Krzyżowej oraz rozmieszczane są kapliczki. W otoczeniu najczęściej rosną wysokie drzewa, stanowiące ochronę przed słońcem i podnoszące walory estetyczne miejsca.

4. Podsumowanie

Coraz większa liczba osób naszego globu zamieszkuje miasta. Bardzo ważne staje się zatem zwiększenie dostępności do terenów zielonych. Jak wykazują przedstawione przykłady projektów studenckich, współczesne rozwiązania oferują zwiększanie powierzchni zielonych podnoszących jakość życia.

Zieleni pełni doskonałą funkcję rekreacyjną, estetyczną, dydaktyczną oraz integracyjną dla lokalnych społeczności. Jej sposób powstawania, funkcjonowa-

nia, zagospodarowania i utrzymania może stanowić inspirację kreowania przestrzeni osiedlowej i innej przyjaznej człowiekowi. Zieleń absorbuje zanieczyszczenia, zaspokaja konieczność przewietrzania miasta, chroni przed hałasem, deszczem i pyłami [2]. Korzystny wpływ wprowadzania zieleni w architekturze obiektów, np.: na elewacjach budynków, skutkuje poprawą warunków termicznych (latem – schładzanie budynków i odparowywanie wody, zimą – tworzenie „poduszek powietrznych”) [1]. Roślinność wprowadzana wertykalnie nie wymaga powiększania powierzchni poziomych – zwłaszcza w ciasnych centrach metropolii i dużych miast [3]. Zielone elewacje posiadają wysokie walory estetyczne i można je komponować z wykorzystaniem lokalnie występującej roślinności.

Szansą staje się również wykorzystanie nieużytych przestrzeni dachów. Uzyskane dodatkowe obszary zieleni niosą pozytywne aspekty społeczne oraz wpływają na pozytywne działania rewitalizacyjne. Mogą także służyć pod ekologiczne uprawy żywności, ziół bądź innych roślin (warzywa uprawiane wysoko na dachu są wolne od zanieczyszczeń [4]). Urządzanie zielonych dachów ma pozytywny wpływ na poprawę jakości życia, edukację ekologiczną i zapewnienie ochrony środowiska.

Integralną częścią współczesnej problematyki edukacyjnej są zespoły przyrodniczo-kulturowe. Wiele miejsc o takim charakterze i ładunku emocjonalnym zachowało się do dziś. Jednak ich wartości bardzo często są niedoceniane, zapomniane czy też zniszczone.

Szczególnie wysoką wartość przyrodniczą posiadają elementy zespołów przyrodniczo-kulturowych o charakterze sakralnym. Elementy te wzajemnie się uzupełniają, tworząc jednolitą, harmonijną całość. Aspekty przyrodnicze, walory widokowe oraz lokalizacja stają się dodatkowym atutem tych miejsc. Z racji wysokiego stopnia bioróżnorodności występującą tu roślinność zalicza się do wyjątkowo ważnej.

Konkludując, należy jeszcze raz podkreślić, że podjęta w artykule problematyka staje się bardzo ważna w procesie dydaktycznym przyszłych pokoleń projektantów, urbanistów i planistów. Potwierdzeniem tego są wielowątkowe zagadnienia ujęte w pracach dyplomowych inżynierskich. Cenny jest fakt, że studenci chętnie podejmują i wnikliwie analizują tę problematykę. Rozpoznają uwarunkowania przyrodnicze i sytuację prawną terenu, analizują miejscowe plany zagospodarowania przestrzennego oraz obowiązujące przepisy (w zakresie ochrony przyrody,

budowlane i inne). Podejmują szerokie analizy lokalizacyjne, studia historyczne inwentaryzacje terenowe – odnoszące się do zasobu przyrodniczego i kulturowego. Wyniki analiz i własnych obserwacji stają się podstawą opracowania projektów dyplomowych. Studenci uczą się w ten sposób podejmowania ważnych decyzji projektowych i ponoszenia konsekwencji z ich podejmowania.



environment
environment

JOLANTA LATOSIŃSKA¹

MACIEJ LECH²

ANNA PALUCH³

ŁUKASZ GALARCZYK⁴

Kielce University of Technology

¹ e-mail: jlatosin@tu.kielce.pl

² e-mail: maciej@tu.kielce.pl

³ e-mail: annapaluch91@gmail.com

⁴ e-mail: lukaszgalarczyk@o2.pl

EFFECT OF THE ADDITION OF ASH FROM THE INCINERATION OF SEWAGE SLUDGE ON THE PROPERTIES OF CEMENT SLURRIES

Abstract

The increase of quantity of ash from the combustion of sewage sludge will need to look for new methods of disposal. One method is to use sewage sludge ash as a partial substitute for cement. The oxide composition of the sewage sludge ash is dependent on the composition of the wastewater treatment technology and the nature of its sewage, however, always one of the main components of the ash from combustion sludge is P_2O_5 . Phosphate ions hinder the cement hydration process, extending the beginning of time constraints. The delay binding time will decrease the temperature of hydration of the cement, which results in a slower increase of compressive strength. The paper presents the results of the effect of the addition of sewage sludge ash to cement binding time of cement slurries and their mechanical properties.

Keywords: sewage sludge ash, cement slurry, compressive strength, binding time

1. Introduction

The reason for the search for new methods to utilize ash from the incineration of sewage sludge is the development dynamics of sewage sludge incineration plants in Poland [1]. According to forecasts, the estimated amount of waste generated in the post-process stations, thermal treatment of sewage sludge in 2016 will range from 24 000 Mg to 32 000 Mg and 2020 from 55 000 Mg to 65 000 Mg [2, 3].

The literature provides examples of works, whose study object is the use of ashes from incineration of sewage sludge as a cement additive [3-7]. The most important parameter that qualifies the sewage sludge ash as a cement additive, having a potential impact on its properties, is the composition of the oxide. Comparison of incinerator ash components of sewage sludge in Poland and around the world clearly indicates the share of phosphorus oxide from 12.3% to 38.09% (tab. 1).

Table 1. The oxide composition of ash from combustion of sewage sludge, % weight

Oxide composition	Fluidized bed furnace			Furnace grate			Rotary furnace		
	[3]	[4]	[8]	[9]	[9]	[10]	[10]	[10]	[10]
SiO ₂	21.0	25.5	19.2	34.9	25.8	23.7	37.6	21.8	19.2
Al ₂ O ₃	13.8	–	8.9	6.3	9.5	6.3	15.5	6.4	8.9
Fe ₂ O ₃	2.0	–	10.0	10.3	5.1	22.6	2.8	16.3	5.0
P ₂ O ₅	38.1	22.0	12.3	18.2	21.6	18.9	19.6	24.3	25.0
CaO	17.8	17.1	30.6	15.4	20.7	15.2	16.3	16.3	19.4
MgO	3.9	–	2.7	2.7	4.5	1.3	1.3	2.1	2.5
BaO	0.1	–	–	–	0.1	–	–	–	–
K ₂ O	1.1	1.8	1.4	1.3	1.9	1.0	0.7	1.4	2.8
Na ₂ O	0.4	–	0.8	0.7	0.6	0.4	0.4	0.7	0.7
SO ₃	0.6	–	–	0.6	0.3	–	–	–	–
TiO ₂	–	–	1.0	0.4	0.8	–	–	–	–
MnO	–	–	–	–	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
ZnO	–	–	–	–	0.4	–	–	–	–
CuO	–	–	–	–	0.1	–	–	–	–

– no information

The share of phosphorus is the main distinguishing feature of sewage sludge ash from the coal ash commonly used as a partial substitute for portland clinker in cement mixtures. A high content of phosphorus oxide in the ash from sewage sludge combustion is associated with the presence of phosphorus in the treated wastewater, whose sources are excrement and developed in the wastewater microorganisms [9, 11, 12].

According to PN-EN 206-1 and national additions to the standard phosphorus content in the fly ash as a component of concrete mix should not exceed 0.01% [13, 14]. Under the influence of water PO_4^{3-} ions react with Ca^{2+} ions in the liquid phase of the slurry, which results in precipitation on the surface of the cement grains of fine, hard-soluble calcium phosphate $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ interfering with the rate of nucleation and crystal growth, which are the hydration products of portland clinker. In addition, the layer that is formed hinders water permeability, the presence of which significantly extends the cement hydration process [15-18]. This property is used in admixture with a view to delaying the binding time of cement, especially in the performance of massive construction, the construction of dams and foundations. Introduction of additives delaying binding time of the cement contributes to the reduction of the difference in temperature between the outer and inner built structures [19, 20]. Large differences in temperature during the binding process can cause cracking of concrete, which adversely effects the mechanical properties [20].

The objective of this study was to determine the effect of the share of sewage sludge ash on compressive strength of cement slurry and the binding time of cement slurry.

2. Material and Methods

The examination used cement CEM I 42.5 and ash from incineration of municipal sewage sludge in a fluidized bed furnace. Sewage sludge ash was collected from municipal wastewater treatment plant in Sitkówka-Nowiny. The chemical compositions of sewage sludge ash were determined by using the X-ray fluorescence spectroscopy. The loss on ignition of sewage sludge ash was made in accordance with the standard PN-EN 196-2:2006 [21] (Tab. 2).

Table 2. The composition of sewage sludge ash

Components	SiO_2	Al_2O_3	P_2O_5	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	K_2O	SO_3	MgO	Na_2O	Other	LOI*
Sewage sludge ash	24.72	7.09	26.34	17.57	1.38	16.46	2.55	1.50	0.68	0.05	1.66	1.5

*LOI – loss on ignition

The cement slurries made of cement replaced by the addition of sewage sludge ash in the amount of 10%, 20%, 30% by weight. Determination of compressive strength after 28 and 90 days and the water absorption after 28 days for cement slurry was made in accordance with the standard PN-EN 196-1:2006 [22].

To verify the effect of phosphorus oxide on cement binding time the scope of research in a range of 0-10% addition of sewage sludge ash was extended. According to [18] in this range supplement quantitative critical point occurred where the cement binding time fell sharply. The decline for cement binding time occurred for the addition of 12.5 mg P_2O_5 /kg of cement. According to calculations 12.5 mg P_2O_5 is introduced into the grout after replacing cement with 6.58% weight of sewage sludge ash.

The test binding time of cement slurries is made in compatibility with the standard PN-EN 197-1: 2012 [23]. The composition of the cement slurries, which was used for research of setting time showed Table 3.

The increase in the mass of sewage sludge ash caused an increase in demand of cement-ashes on the water. Therefore the use of the principle of constant consistency for each mixture.

Table 3. The mix of starter – setting time

Sewage sludge ash additive, %mass	Cement, g	Sewage sludge ash, g	Water, cm^3	W/C* *(cement+sewage sludge ash)
0	500	0	150	0.30
1.5	492.5	7.5	151.5	0.30
2.5	487.5	12.5	152.2	0.30
5	475	25	153.9	0.31
6.58	467.1	32.9	155.4	0.31
10	450	50	165.6	0.33
20	400	100	175.2	0.35
30	350	150	187.7	0.37

3. Results and Discussion

Table 4 and Figure 1 show the test results of the compressive strength and water absorption of cement slurry. The results are the average values obtained from three independent replicates.

Table 4. Water absorption of cement slurry

Sewage sludge ash additive, % mass	Water absorption, % mass
0	28.72
10	29.19
20	29.73
30	29.59

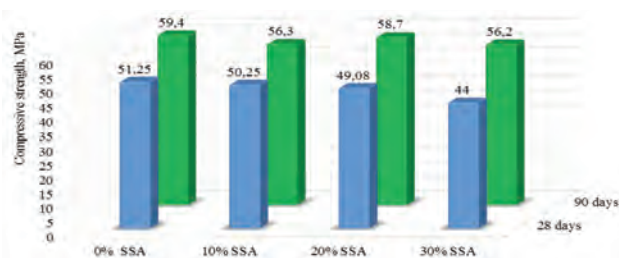


Fig. 1. Compressive strength of cement slurry; SSA-sewage sludge ash

Compressive strength of slurries after 28 days of ripening is from 44 MPa for the samples with the ash content of 30% to 51.25 MPa for the sample made without the addition of cement. After 90 days of ripening slurry compressive strength is in the range of 56.2 MPa for the samples with the ash content of 30% to 59.4 MPa made of CEM I 42.5. Replacement of cement for 10% and 20% sewage sludge ash in the mixture of starter, both after 28 and 90 days of ripening, causes no significant decrease in compressive strength compared to the sample containing no additive. The decrease of compressive strength did not exceed 3.1 MPa. The addition of 30% of sewage sludge ash after 28 days of ripening resulted in a loss of strength of 7.25 MPa with respect to a base. After 90 days of ripening sample containing 30% ash obtained the largest increase in strength against the tested slurries equaling to 12.2 MPa, thus differing only by 3.2 MPa in the compressive test of the slurry.

Comparing the results of water absorption slurries a slight effect of the addition of sewage sludge ash to increase the absorbability of the samples can be observed. For the sample made from 100% of cement the water absorption is 28.72%. The addition of 10% sewage sludge ash increases the water absorption of the slurry by 0.47%, while the addition of 30% sewage sludge ash 0.87% with respect to a base. The largest increase occurred in the slurry with 20% sewage sludge ash and amounted to 1.01%.

Table 5 shows the results of determination of the binding time of cement slurries containing ash from combustion of sewage sludge.

30% addition of sewage sludge ash has caused the most prolonged binding time of cement, increasing for 217 minutes compared to the baseline.

Comparing the composition of cement slurry analogy between the proportion of sewage sludge ash in the binder and the addition of water required to obtain the standardized consistency can be observed. The larger percentage of ash from combustion of sewage sludge necessitates addition of more water.

This demonstrates the high water demand of sewage sludge ash as a result of the irregular surface of the grains characterized ash derived from burning of sewage sludge in a fluidized bed furnace [9]. Increased share of water has an impact on the process of the cement, extending its initiation. For the samples of 1.5-6.28% the difference between the addition of water to the sample base is from 1.5 cm³ to 5.4 cm³. However, in the samples from 10-30% this difference was from 15.6-37.7 cm³, resulting in significant elongation of the beginning of the binding time.

Table 5. Binding time and harden time of cement slurries

Sewage sludge ash additive, % mass	Time					
	Begin binding		End binding		Harden	
	min	h	min	h	min	h
0	193	03:13	281	04:41	88	01:28
1.5	175	02:55	270	04:10	95	01:35
2.5	169	02:49	261	04:21	92	01:32
5	187	03:07	279	04:39	92	01:32
6.58	119	01:59	262	04:02	123	02:03
10	264	04:24	381	06:21	117	01:57
20	298	04:58	447	07:27	149	02:29
30	410	06:50	580	09:40	170	02:50

Apart from the ratio of water to binder the impact on the prolongation of binding time has a percentage of phosphorus, which in the considered sewage sludge ash is expressed as a percentage of P₂O₅ present in an amount of 26.343%. The addition of 1.5% ash from incineration of sewage sludge in cement CEM I 42.5 will shorten the binding time by 18 minutes. Increasing the amount of ash by a further 1% will reduce the time by the next 6 minutes. Slurry containing 5% sewage sludge ash binds longer than samples containing less additive sewage sludge ash, which is also less than the base sample by 6 minutes. The amount of sewage sludge ash, which can cause a sharp decline in the binding time was determined on the basis of [7].

Causative agent of sudden acceleration of binding time is the addition of P₂O₅ 12.5 mg/kg of cement. The addition of 6.28% sewage sludge ash to the slurry resulted in shortening of the test time by 74 minutes of binding, relative to a sample containing 100% cement. The addition of 10% sewage sludge ash is an amount that will increase the binding time of the slurries, which in the case of the base sample is increased by 71 min. The growth trend of the binding time is maintained over the entire range of the additive share from 10% to 30% sewage sludge ash.

The results indicate the existence of a critical range, which is from 5% to 10% of additive ash from the sludge. In this range, the value of binding time depending on the amount of phosphorus oxide added to cement may be suddenly shorten or prolonged.

4. Conclusions

The irregular shape of the grains of ash originating from the incineration in furnaces with fluidized bed increases water demand of the binder mixtures, prolonging binding time initiation.

The impact on the binding time of slurries apart from water demand has mainly phosphorus oxide content in the binder. A small change in the mineral supplement rich in phosphorus can cause a sharp decline in the initiation or elongation of hydration, creating a critical interval occurring at a dosage of 5-10% ash.

The addition of 10-30% sewage sludge ash is not included in the critical range, causing only longer binding time of cement.

The ratio of the ash from the sludge to the cement in the binder is inversely proportional to the rise of early strength and proportional to the rise in strength of the slurry after 90 days of ripening.

Partial substitute for CEM I 42.5 binder in the form of ash originating from the incineration of sewage sludge has no negative changes in the properties of cement slurry, so it can be used as a cement additive, like ash from burning coal and biomass co-firing. The optimum amount of sewage sludge ash to cement additive is 20%, since it permit to maintain the performance of slurry similar to the properties of slurries made with 100% Portland cement, as well as a disposal of significant quality of the waste from the thermal treatment of sewage sludge.

References

- [1] Latosińska J., Kowalski K.: *Mobility of heavy metals from sewage sludge and sewage sludge ash from the municipal wastewater treatment plant more than 200 000 equivalent population*, *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 3 (2013), pp. 43-50.
- [2] Aktualizacja Krajowego programu oczyszczania ścieków komunalnych, Warszawa (2010).
- [3] Kępys W., Pomykała R., Pietrzyk J.: *Właściwości popiołów lotnych z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych*, *Inżynieria Mineralna*, 1 (2013), pp. 11-18.
- [4] Fałaciński P.: *Możliwości zastosowania popiołów fluidalnych przy realizacji przesłon przeciwnieprzepuszczalnych w obiektach ochrony środowiska*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 3 (2011), pp. 33-40.
- [5] Kosior-Kozberuk M., Karwowska J.: *Wybrane problemy zagospodarowania popiołów pochodzących ze spalania osadów ściekowych w technologii materiałów cementowych*, *Inżynieria Ekologiczna*, 25 (2011), pp. 110-123.
- [6] Kosior-Kozberuk M.: *Nowe dodatki mineralne do betonu*, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2 (2011), pp. 48-55.
- [7] Pietrzak A.: *Proekologiczne technologie w budownictwie na przykładzie „Zielonego betonu”*, *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*, 1 (2014), pp. 86-93.
- [8] Perez-Carrion M., Beaza-Brotons F., Paya J., Saval J. M., Zornoza E., Borracete M.V., Graces P.: *Potencial use of sewage sludge ash as cement replacement in precast concrete blocks*, *Materiales de Construcion*, 64 (2014), pp. 15-23.
- [9] Latosińska J., Gawdzik J.: *The impact of combustion technology of sewage sludge on mobility of heavy metals in sewage sludge ash*, *Ecol. Chem. Eng. S.*, 3 (2014), pp. 465-475.
- [10] Adam C., Kley G., Simon F.-G.: *Thermal treatment of municipal sewage sludge amming at marketable P-fertilisers*, *Materials Transactions*, 12 (2007), pp. 3056-3061.
- [11] Latosińska J., Gawdzik J.: *The effect of incineration temperatures on mobility of heavy metals in sewage sludge ash*, *Environment Protection Engineering*, 38 (2012), pp. 31-44.
- [12] Ohbuchi A., Akamoto J.S., Kitano M., Nakamura T.: *X-ray fluorescence analysis of sludge ash from sewage disposal plant*, *X-Ray Spectrometry*, 37 (2008), pp. 544-550.
- [13] PN-B-06265:2004 Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [14] PN-EN PN-206-1: 2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [15] Hewlett P. C.: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Fourth Edition, Elsevier Science and Technology Books (2004).
- [16] Nakano T., Yokoyama S., Maki I.: *Badania podstawowe związane z produkcją cementu z popiołu ze spalania miejskich odpadów stałych. Część III: Wpływ P_2O_5 na powstawanie klinkieru*, *Cement Wapno Beton*, 6 (2007), pp. 290-295.
- [17] Roszczynialski W.: *Rola siarczanu (VI) wapnia w procesach kształtowania wytrzymałości spoiw drogowych zawierających żużle stalownicze i popioły lotne – rozprawa doktorska AGH. Kraków* (2014).
- [18] Tkaczewska E., Kłosek-Wawrzyn E.: *Wpływ jonów fosforanowych PO_4^{3-} na proces hydratacji cementu*, *Cement Wapno Beton*, 6 (2012), pp. 401-408.
- [19] Nocuń-Wczelik W., Trybalska B.: *Wpływ wybranych domieszek chemicznych na szybkość hydratacji*

- mikrostrukturę zaczynu cementowego*, Cement Wapno Beton, 6 (2007), pp. 284-289.
- [20] Zając M., Garrault S., Nonat A.: *Wpływ temperatury hydratacji na wytrzymałość zapraw i zaczynów z cementu portlandzkiego*, Cement Wapno Beton, 2 (2007), pp. 68-75.
- [21] PN-EN 196-2: 2006 – Metody badania cementu – Część 2: Analiza chemiczna cementu.
- [22] PN-EN 196-1:2006 Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.
- [23] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.

Jolanta Latosińska
Maciej Lech
Anna Paluch
Łukasz Galarczyk

Wpływ dodatku popiołu ze spalania osadów ściekowych na właściwości zaczynów cementowych

1. Wprowadzenie

Przyczyną poszukiwania nowych metod zagospodarowania popiołów ze spalania osadów ściekowych jest dynamika rozwoju spalarni osadów ściekowych w Polsce [1]. Według prognoz szacowana ilość odpadów poprocesowych generowanych w stacjach termicznego unieszkodliwiania osadów ściekowych w roku 2016 wyniesie od 24 000 Mg do 32 000 Mg, natomiast w roku 2020 Mg od 55 000 Mg do 65 000 Mg [2, 3].

Literatura przedmiotu dostarcza przykłady prac, których przedmiotem badań jest wykorzystanie popiołów ze spalania osadów ściekowych jako dodatku do cementu [4-7]. Najważniejszym parametrem kwalifikującym popiół ze spalania osadów ściekowych jako dodatek do cementu, mającym potencjalny wpływ na jego właściwości, jest skład tlenkowy. Porównanie komponentów popiołów ze spalarni osadów ściekowych w Polsce i na świecie wskazuje wyraźny udział tlenu fosforu – od 12,3% do 38,09% (tab. 1).

Udział fosforu jest główną cechą wyróżniającą popiół z osadów ściekowych od popiołów ze spalania węgla kamiennego, powszechnie stosowanego jako częściowy substytut klinkieru portlandzkiego w mieszankach cementowych. Wysoka zawartość tlenu fosforu w popiołach ze spalania osadów ściekowych związana jest z obecnością fosforu w oczyszczanych ściekach, którego źródłem są ekskrementy oraz rozwijające się w ściekach mikroorganizmy [11, 12].

Według normy PN-EN 206-1 oraz krajowych uzupełnień do normy zawartość fosforu w popiołach lotnych będących składnikiem mieszanki betonowej nie powinna przekraczać 0,01% [13, 14]. Pod wpływem wody jony PO_4^{3-} reagują z jonami Ca^{2+} w fazie ciekłej zaczynu, czego wynikiem jest strącanie na powierzchni ziaren cementu drobnokrystalicznego, ciężko rozpuszczalnego fosforanu wapnia $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, zakłócającego szybkość zarodkowania, i wzrost kryształków będących produktami hydratacji klinkieru portlandzkiego. Ponadto tworzy się wówczas warstewka utrudniająca przepuszczalność wody, której obecność znacznie wydłuża proces hydratacji cementu [3, 1, 17, 18]. Właściwość ta wykorzystywana jest w domieszkach mających na celu opóźnianie czasu wiązania cementu, szczególnie przy wykonywaniu masywnych konstrukcji, budowie zapór czy fundamentów. Wprowadzanie domieszek opóźniających czas wiązania cementu przyczynia się do zmniejszenia różnicy pomiędzy temperaturą zewnętrzną i wewnętrzną budowanych konstrukcji [19, 20]. Duże różnice temperatur podczas procesu wiązania mogą powodować pękanie betonów, co niekorzystnie wpływa na właściwości wytrzymałościowe [20].

Celem badań było określenie wpływu udziału popiołu ze spalania osadów ściekowych na wytrzymałość na ściskanie zaczynów cementowych oraz czas wiązania zaczynów cementowych.

2. Materiał i metody

Do badań użyto cement CEM I 42,5 oraz popiół ze spalania komunalnych osadów ściekowych w piecu ze złożem fluidalnym. Popiół pobrano z oczyszczalni ścieków komunalnych w Sitkówe-Nowiny. Badanie składu chemicznego popiołu z osadów ściekowych wykonano za pomocą fluorescencyjnego spektrometru rentgenowskiego. Stratę prażenia popiołu z osadów ściekowych wykonano zgodnie z normą PN-EN 196-2:2006 [21] (tab. 2).

W wykonanych zaczynach cementowych cement zastąpiono dodatkiem popiołu z osadów ściekowych w ilości 10%, 20%, 30% masowo. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie po 28 i 90 dniach oraz nasiąkliwości po 28 dniach dla zaczynów cementowych wykonano zgodnie z normą PN-EN 196-1:2006 [22].

W celu zweryfikowania wpływu tlenu fosforu na czas wiązania cementu rozszerzono zakres badań w przedziale 0-10% dodatku popiołu z osadów ściekowych. Według [18] w tym przedziale ilościowym dodatku wystąpił punkt krytyczny, w którym czas wiązania cementu gwałtownie spadł. Spadek czasu wiązania cementu wystąpił dla dodatku 12,5 mg P_2O_5 /kg cementu. Według obliczeń 12,5 mg P_2O_5 wprowadzone do zaczynu zostanie po zastąpieniu cementu 6,58% masowych popiołu z osadów ściekowych. Badanie czasu wiązania zaczynów cementowych wykonano zgodnie z normą PN-EN 197-1:2012 [23]. Skład mieszanki zaczynowej, dla której oznaczono czas wiązania przedstawia tabela 3.

Wzrost masy popiołu z osadów ściekowych powodował wzrost zapotrzebowania mieszanki cementowo-popiołowej na wodę. Zatem zastosowano zasadę stałej konsystencji dla każdej mieszanki.

3. Wyniki i dyskusja

W tabeli 4 i na rysunku 1 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie oraz nasiąkliwości zaczynów cementowych. Wyniki są wartościami średnimi otrzymanymi z trzech niezależnych powtórzeń. Wytrzymałość na ściskanie zaczynów po 28 dniach dojrzewania wynosi od 44 MPa dla próbki z zawartością 30% popiołu do 51,25 MPa dla próbki wykonanej z cementu bez dodatku. Po 90 dniach dojrzewania wytrzymałość na ściskanie zaczynów mieści się w zakresie od 56,2 MPa dla próbki z zawartością 30% popiołu do 59,4 MPa dla wykonanej z CEM I 42,5. Zastąpienie cementu 10% i 20% popiołu z osadów ściekowych w mieszance zaczynowej zarówno po 28 i 90 dniach dojrzewania powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do

próbki niezawierającej dodatku. Spadek wytrzymałości na ściskanie nie przekroczył 3,1 MPa. Dodatek 30% popiołu z osadów ściekowych po 28 dniach dojrzewania spowodował spadek wytrzymałości o 7,25 MPa w stosunku do próbki bazowej. Po 90 dniach dojrzewania próbka zawierająca 30% popiołu z osadów ściekowych uzyskała największy przyrost wytrzymałości na tle badanych zaczynów równy 12,2 MPa, różniąc się tym samym jedynie o 3,2 MPa w próbie wytrzymałościowej od zaczynu bazowego.

Porównując wyniki badań nasiąkliwości zaczynów, zaobserwować można nieznaczny wpływ dodatku popiołu z osadów ściekowych na zwiększenie się nasiąkliwości próbek. Dla próbki wykonanej w 100% z cementu nasiąkliwość wynosi 28,72%. Dodatek 10% popiołu z osadów ściekowych powoduje zwiększenie nasiąkliwości zaczynu o 0,47%, natomiast dodatek 30% popiołu o 0,87% w stosunku do próbki bazowej. Największy przyrost nasiąkliwości nastąpił w zaczynie z dodatkiem 20% popiołu i wyniósł on 1,01%.

W tabeli 5 przedstawiono wyniki oznaczenia czasu wiązania zaczynów cementowych z dodatkiem popiołu z osadów ściekowych.

30% udział popiołu z osadów ściekowych spowodował największe wydłużenie czasu wiązania cementu, wzrastające o 217 minut w porównaniu do bazowego zaczynu.

Porównując skład zaczynów cementowych, stwierdzono analogię między udziałem popiołu z osadów ściekowych w spoiwie a dodatkiem wody niezbędnym do uzyskania konsystencji normowej. Większy udział procentowy popiołu ze spalania osadów ściekowych powoduje konieczność dodatku większych ilości wody. Świadczy to o dużej wodożądności popiołu z osadów ściekowych, która jest wynikiem nieregularnej powierzchni ziaren charakteryzującej popioły uzyskane ze spalania osadów ściekowych w piecach ze złożem fluidalnym [9]. Zwiększony udział wody ma wpływ na przebieg procesu wiązania cementu, wydłużając jego inicjację. W próbkach 1,5-6,28% różnica między dodatkiem wody do próbki bazowej wynosiła od 1,5 cm³ do 5,4 cm³. Natomiast w próbkach od 10-30% różnica ta wynosiła od 15,6 cm³–37,7 cm³, co spowodowało znaczne wydłużenie początku czasu wiązania.

Poza stosunkiem wody do spoiwa wpływ na wydłużenie czasów wiązania ma udział procentowy fosforu, który w badanym popiele z osadów ściekowych, oznaczany jako zawartość procentowa P_2O_5 , występuje w ilości 26,343%. Dodatek 1,5% popiołu

ze spalania osadów ściekowych do cementu CEM I 42,5 powoduje skrócenie czasu wiązania o 18 minut. Zwiększenie ilości popiołu z osadów ściekowych o kolejne 1% powoduje skrócenie czasu o następne 6 minut. Zaczyn zawierający 5% popiołu z osadów ściekowych wiąże już dłużej niż próbki zawierające mniej dodatku popiołu z osadów ściekowych, lecz jest to również o 6 minut czas krótszy od próby bazowej. Ilość popiołu z osadów ściekowych, która może powodować gwałtowny spadek czasu wiązania wyznaczono na podstawie [15]. Dodatek 6,28% popiołu z osadów ściekowych do badanego zaczynu spowodował skrócenie czasu wiązania o 74 minuty w stosunku do próbki zawierającej 100% cementu. Dodatek 10% popiołu z osadów ściekowych jest ilością, która powoduje przyrost czasu wiązania zaczynu, który od próbki bazowej jest większy o 71 minut. Tendencja wzrostu czasu wiązania utrzymuje się w całym przedziale udziału dodatku od 10 do 30% popiołu z osadów ściekowych.

Wyniki badań wykazują na występowanie przedziału krytycznego, który zawiera się od 5 do 10% ilości dodatku popiołu z osadów ściekowych. W przedziale tym wartość czasu wiązania w zależności od ilości wprowadzonego do cementu tlenu fosforu może gwałtownie się skrócić lub wydłużyć.

4. Wnioski

Nieregularny kształt ziaren popiołu pochodzącego ze spalania osadów ściekowych w piecach ze złożem fluidalnym zwiększa wodożądność mieszanki spoiwowej, wydłużając inicjację czasu wiązania.

Wpływ na czas wiązania zaczynów oprócz wodożądności ma głównie zawartości tlenu fosforu w spoiwie. Niewielka zmiana dodatku mineralnego bogatego w fosfor może powodować gwałtowny spadek lub wydłużenie inicjacji hydratacji, tworząc przedział krytyczny występujący przy dawkowaniu 5-10% popiołu.

Dodatek 10-30% popiołu z osadów ściekowych nie zawiera się w przedziale krytycznym, powodując jedynie wydłużenie czasu wiązania cementu.

Stosunek ilości popiołu z osadów ściekowych do cementu w spoiwie jest odwrotnie proporcjonalny do narastania wytrzymałości wczesnej oraz wprost proporcjonalny do narastania wytrzymałości zaczynów po 90 dniach dojrzewania.

Częściowy substytut spoiwa CEM I 42,5 w postaci popiołu pochodzącego ze spalania osadów ściekowych nie powoduje negatywnych zmian właściwości zaczynów cementowych, przez co może on być wykorzystywany jako dodatek do cementu, podobnie jak popiół ze spalania węgla kamiennego oraz współspalania biomasy. Optymalna ilość dodatku popiołu z osadów ściekowych do cementu wynosi 20%, ponieważ pozwala ona na utrzymanie właściwości użytkowych zaczynów zbliżonych do właściwości zaczynów wykonanych w 100% z cementu portlandzkiego, a także na utylizację znaczącej ilości odpadu z termicznego unieszkodliwiania osadów ściekowych.

MARIA ŻYGADŁO¹
MARLENA DĘBICKA²

Kielce University of Technology

¹ e-mail: zygadlo@tu.kielce.pl

² e-mail: mdebicka@tu.kielce.pl

THE ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF MECHANICAL-BIOLOGICAL WASTE TREATMENT BY LCA METHOD

Abstract

The computer program IWM-PL for the life cycle assessment (LCA) of waste was described. The environmental impact of the mechanical-biological treatment (MBT) technology was estimated. Final report shows that the analysed MBT plant does not have negative impact on the environment.

Keywords: MBT, biodrying, life cycle assessment (LCA)

1. Introduction

The European Directive 2008/98/EC [1] lays down waste management targets that should eliminate risk for the human health and the environment. Waste legislation and policy prefer technologies that minimize risk pollution to water, air, soil without causing noise or odors. The process of choosing the best waste treatment technology can be supported by the method called the life cycle assessment (LCA). The international standards ISO 14041 [2], ISO 14042 [3], ISO 14043 [4], ISO/TR 14049 [5] include detailed descriptions of the various LCA phases. LCA analysis are based on a number of assumption and averages [6, 7, 8]. Traditional LCA models can be supported by many computer programs with wide capabilities i.e. EASETECH (www.easetech.dk/EASEWASTE), SimaPro (www.pre-sustainability.com/simapro), GaBi (www.gabi-software.com), Umberto (www.umberto.de/), IWM (www.iwm-software.de/).

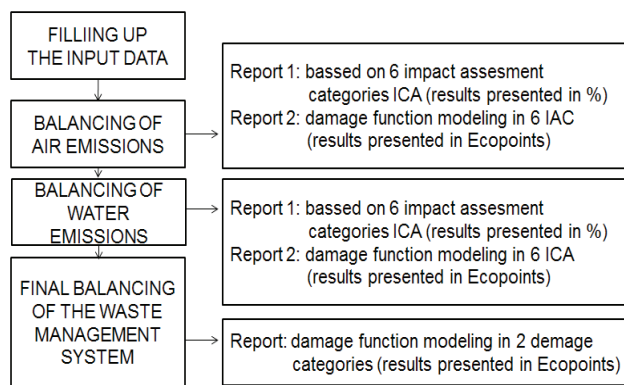
This paper focuses on the LCA applied in the IWM-PL program. The analyzed program IWM-PL is the polish version of the IWM-2 (developed by Forbes R. McDougall, Peter R. White, Marina Franke and Peter Hindle) [9]. The IWM-PL software was created by A. Kraszewski, E. Pietrzyk-Sokulska, E. den Boer, A. Generowicz, J. Kulczycka, R. Szpadt, M. Cholewa, I. Kosińska. The capabilities of the IWM-PL were discussed by Grzesik K. [10, 11, 12].

2. IWM-PL characterization [13, 14, 15]

IWM-PL users are obligated to fill up a simplified range of data concerning materials and energies balance. The program offers the use of the *default values* for instance the average parameters for the selected process. The functional unit IWM-PL is the total amount of the waste input into the system. The software includes **10 main categories**: waste collection system, sorting process, production of alternative fuel (residual derived fuels RDF), biological treatment process, thermal treatment process, RDF incineration, landfilling of non-hazardous waste, landfilling of hazardous waste, recycling and economic assessment of investment. Each category contains one or more steps. Steps make possible to fill up the input data on the basis of which the output data are calculated. Most steps are in the waste collection system category because the morphology of the waste has a very large impact on the LCA analysis. Some categories are based on the data entered in the previous stages and contain only one step: *Inputs and outputs of the process*. Usually in these steps program requires following data: consumption of the electricity and diesel oil, production of biogas and leachate.

IWM-PL program calculates the impact of emissions occurring in two areas: **air and water**. The results are given in 2 reports, separated for water and air. The first

report is based on **6 impact assessment categories: carcinogens, the effect of organic/inorganic compounds on the human respiratory system, climate changes, ecotoxicity and acidification**. The results are presented in percent. The second report is based on the damage function modeling and contains the results converted into Ecopoints. Ecopoint is the ratio of the total environmental load in Europe for the number of its population, multiplied by 1000. The final step summarizes results of water and air pollution in **2 damages categories: a human healthy and ecosystem quality**. The results are given in Ecopoints. Figure 1 shows the data processing steps in the IWM-PL software.



- **Ecopoint (Pt)**- the ratio of the total environmental load in Europe for the number of its population, multiplied by 1000.

Fig. 1. The data processing scheme in the IWM-PL software

3. The analyzed mechanical-biological treatment (MBT) plant

The technology concept treats 45 000 Mg of the unsorted solid waste. According to Fig. 2, sixty percent of waste is directed to the biological stage, while the rest goes to the RDF production. The biological stage idea works on the biodrying concept that produces 50% of waste treated by the thermal methods and 50% of stabilized (biologically inactive) waste going to landfill. The waste morphology was presented in table 1.

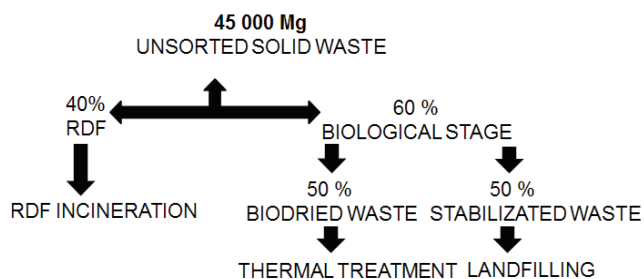


Fig. 2. The technology concept of the analyzed plant

Table 1. The morphology of waste treated in the analyzed plant

Waste morphology [%]	
Paper	7.74
Glass	10.09
Metals	1.87
Plastics	10.95
Textiles	3.22
Organic	38.05
Others	28.08
Metals [%]	
Ferrous metals	50.00
Non-ferrous metals	50.00
Plastic [%]	
Soft	50.00
Hard	50.00

4. IWM-PL results

4.1. Air emissions

Table 2 presents air emission from analyzed plant in kg. The program IWM-PL calculated zero emissions from transport and sorting processes. The software evaluates pollution from transport and sorting only during selective waste collection that does not occur in the analyzed plant. Program does not include transport emission from the place of collection waste to the analyzed plant. Those are formal restrictions of the IWM-PL. The values below zero are interpreted as avoided emissions.

Figure 3 presents air emissions in 6 impact assessment categories. The program IWM-PL assesses significant emissions occurred in the category: inorganic compounds in the human respiratory system. The results from other categories are below zero level and are interpreted as not affecting the air quality.

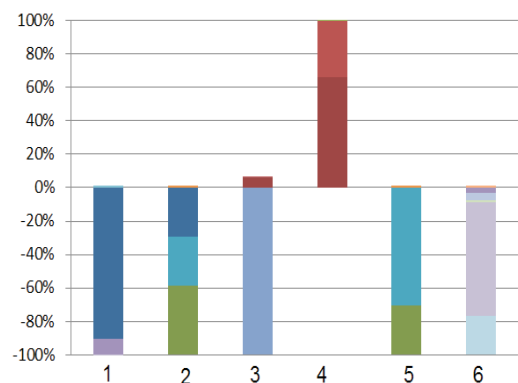


Fig. 3. The first air report: emissions occurring in 6 impact assessment categories calculated by IWM-PL software: 1 – carcinogens, 2 – organic compounds in the human respiratory system (HRS), 3 – climate changes, 4 – inorganic compounds on the HRS, 5 – acidification, 6 – ecotoxicity

Table 2. The air emissions estimated from the analyzed plant calculated by IWM-PL software.

Emission to air [kg]	RDF production	Biological treatment	Thermal treatment	Landfilling	Recycling	Sum
Dusts	4204.62	1907.56	-79015.93	300.87	-4177.43	-76780.31
CO	301.05	136.58	-5656.90	437.93	-18582.06	-23363.40
CO ₂	2649895.88	1202543.26	-49798215.59	1165253.01	-2291241.20	-47071764.64
CH ₄	6206.59	2815.81	0.00	132470.65	-7306.62	134186.43
NO _x	5404.29	2451.82	-101559.51	877.53	-4245.89	-97071.76
N ₂ O	15.63	7.09	0.00	1.07	-10.04	13.75
SO _x	12059.64	5471.23	-226631.87	875.75	-11868.08	-220093.33
HCl	672.36	305.04	-12635.50	72.08	-109.25	-11695.27
HF	64.10	29.08	0.00	8.77	-9.79	92.16
H ₂ S	0.00	0.00	0.00	67.32	-4.75	62.57
Hydrocarbons	0.00	0.00	0.00	692.22	0.00	692.22
Hydrocarb. h.	0.00	0.00	0.00	15.15	0.00	15.15
Dioxins/furans	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NH ₃	8.44	3.83	0.00	0.58	-2.62	10.23
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	0.03	0.01	-0.53	0.00	-0.10	-0.59
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	-0.02
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.13	-0.13
Pb	0.31	0.14	-5.89	0.02	-2.15	-7.57
Mg	0.19	0.09	0.00	0.01	0.00	0.29
Hg	0.10	0.05	-1.87	0.01	-0.02	-1.73
Ni	0.86	0.39	-16.14	0.06	-2.31	-17.14
Zn	0.79	0.36	-14.93	0.08	-0.46	-14.16

Figure 4 shows damage function modeling from balancing of the air stage. The results are estimated in Ecopoints (Pt). The software calculated that presented technology concept had negative impact on the climate changes category (NO_x). The results from other categories are again below zero level. The main compounds in the second category are: SO_x, NO_x, and CH₄. Carbon dioxide is the avoided substance in the third category.



Fig. 4. The second air report: damage function modeling in 6 impact assessment categories calculated by IWM-PL software: 1 – carcinogens, 2 – organic compounds in the human respiratory system (HRS), 3 – climate changes, 4 – inorganic compounds in the HRS, 5 – acidification, 6 – ecotoxicity

4.2. Water emissions

Figure 5 presents water emissions in 6 impact assessment categories. The program IWM-PL assesses that water emissions occurring only in 2 categories: carcinogens and ecotoxicity. Arsenic has the largest percentage share in the carcinogens category. It is difficult to interpret the amount of fenols that is below zero and means avoided emissions. In the ecotoxicity category the percentage of chrome, copper and nickel are similar.

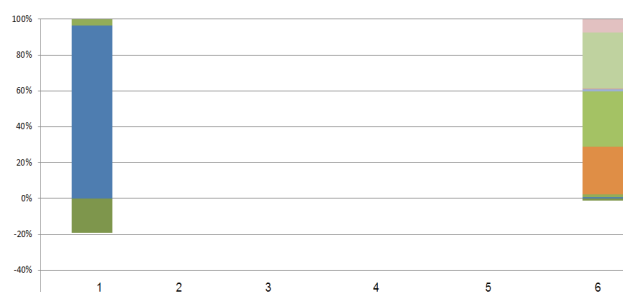


Fig. 5. The first water report: emissions occurring in 6 impact assessment categories calculated by IWM-PL software: 1 – carcinogens, 2 – organic compounds on the human respiratory system (HRS), 3 – climate changes, 4 – inorganic compounds in the HRS, 5 – acidification, 6 – ecotoxicity

Table 3 presents water emission from analyzed plant in kg. Emissions are not calculated for transport and sorting.

Table 3. The air emissions estimated from the analyzed plant calculated by IWM-PL software

Emission to water [kg]	RDF production	Biological treatment	Landfilling	Recycling	Sum
BOD	0.22	849.70	794.28	-0.63	1643.57
COD	6.47	1439.92	794.71	-18.05	2223.05
Suspensions	102.09	46.31	32.47	-984.13	-803.26
TOC	31.10	14.11	6.07	-131.97	-80.69
AOX	0.00	0.00	4.12	-0.29	3.83
Hydrocarbons h.	0.00	0.00	0.00	-0.00	0
Dioxins/furans	0.00	0.00	0.00	-0.00	0
Fenols	0.18	0.08	0.77	-1.96	-0.93
Al	1338.50	607.25	91.87	-1243.17	794.45
NH ₄ ⁺	2.66	148.05	40.34	-16.89	174.16
Arsenic	2.70	1.23	0.22	-2.50	1.65
Ba	110.04	49.92	7.55	-133.59	33.92
Cd	0.07	0.03	0.03	-0.08	0.05
Chlorides	8997.78	4082.12	1005.17	-1002.20	13082.87
Cr	13.42	6.09	1.06	-12.56	8.01
Cu	6.71	3.05	0.60	-6.08	4.28
Cyanides	0.00	0.00	0.00	0.00	0
Fluorides	0.00	0.00	0.94	-0.52	0.42
Pb	6.73	3.06	0.59	-6.41	3.97
Hg	0.00	0.00	0.00	0.00	0
Ni	6.77	3.07	0.84	-6.15	4.53
Nitrates	32.48	14.74	2.23	-16.74	32.71
Phosphates	80.31	36.43	5.51	-74.33	47.92
Sulfates	10517.23	4771.47	729.41	-6113.41	9904.7
Sulfides	0.04	0.02	0.00	-0.43	-0.37

Figure 6 shows damage function modeling from balancing of the water stage. The results from Figure 5 were calculated and presented in Ecopoints (Pt) in Figure 6. The highest influence has arsenic in carcinogens category, about 2700 Pt.

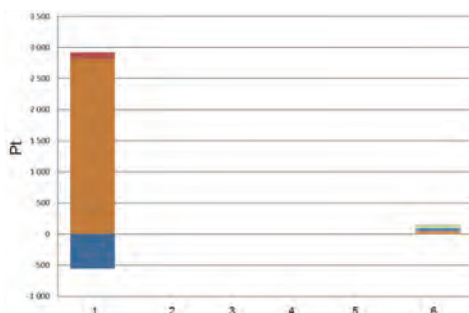


Fig. 6. The second water report: damage function modeling in 6 impact assessment categories calculated by IWM-PL software: 1 – carcinogens, 2 – organic compounds on the human respiratory system (HRS), 3 – climate changes, 4 – inorganic compounds in the HRS, 5 – acidification, 6 – ecotoxicity

4.3. Final report

The final report summarizes results from air and water and counting them for 2 damage categories: human healthy and ecosystem quality. The balance of benefits and losses resulting from waste processing in the analyzed MBT plant is presented in the final report (Fig. 7). Negative results confirmed that analyzed MBT plant does not negatively affect the environment.

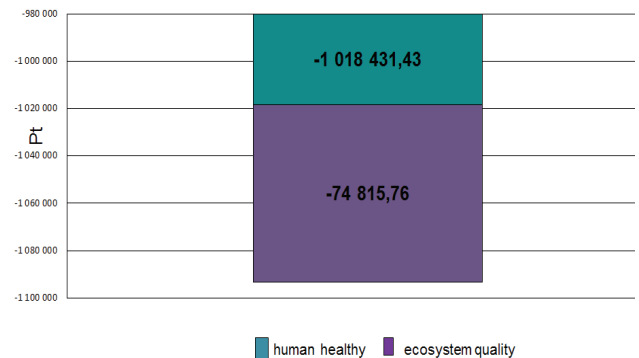


Fig. 7. Final report from damage function modeling in two damage categories: human healthy and ecosystem quality

5. Conclusions

The analyzed MBT plant produces emissions to air in one category: inorganic compounds in the HRS. CO₂ is below zero because incineration of waste: RDF and biodried fraction produced in biological treatment stage (that is in accordance with the technology concept).

MBT plant produce emissions to water in 2 categories: carcinogens (arsenic, cadmium, fenols) and ecotoxicity (chrome, copper, nickel).

Final report shows that analysed MBT plant doesn't have negative impact on the environment.

References

- [1] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives.
- [2] ISO 14041: *Environmental management. Life cycle assessment. Goal and scope definition and inventory analysis.*
- [3] ISO 14042: *Environmental management. Life cycle assessment. Restricts use and development of impact assessment.*
- [4] ISO 14043: *Environmental management. Life cycle assessment. Life cycle interpretation.*
- [5] ISO/TR 14049: *Environmental management. Life cycle assessment. Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis.*

- [6] Pikoń K.: *LCA as tool in sustainable development policy introduction*. Archives of Waste Management and Environment Protection 14 (3), 2012, 55-64.
- [7] Schluchter W., & Rybaczewska-Błażejowska M.: *Life cycle sustainability assessment of municipal waste management systems*. Management, 16 (2), 2012, 361-372.
- [8] Dębicka M., & Żygadło M.: *The LCA as a method to support waste management system*. Archives of Waste Management and Environmental Protection 2013, 15(1), 38-45.
- [9] Den Boer E., Den Boer J., Jager J.: *Waste management planning and optimisation. LCA IWM*. Stuttgart, Germany, 2005.
- [10] Grzesik K.: *Application of the IWM-PL Model for the Life Cycle Assessment (LCA) of Municipal Waste Management in Kraków. Part 1*. Geomatics and Environmental Engineering Vol. 7, no. 3, 2013, 35-55.
- [11] Grzesik K.: *Application of the IWM-PL Model for the Life Cycle Assessment (LCA) of Municipal Waste Management in Kraków. Part 2*. Geomatics and Environmental Engineering Vol. 7, no. 4, 2013, 43-58.
- [12] Grzesik-Wojtysiak K.: *Ocena modelu IWM-PL – polskiej aplikacji do analizy cyklu życia systemów gospodarki odpadami*. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, 60(3), 2013, 101-115.
- [13] Kraszewski A., Pietrzyk-Sokulska E.: *Ocena gospodarki odpadami. Uwarunkowania prawne i technologiczne oraz kryteria oceny funkcjonowania gospodarki odpadami. (Evaluation of waste management. Law and technology requirements)*. Część I. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2011.
- [14] Kraszewski A., Pietrzyk-Sokulska E.: *Ocena gospodarki odpadami. Praktyczne zastosowania (Evaluation of waste management. The practical applications)*. Część II. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2011.
- [15] Kraszewski A., Pietrzyk-Sokulska E.: *Ocena gospodarki odpadami. Program komputerowy. (Evaluation of waste management. The computer program)*. Część III. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2011.

Maria Żygadło
Marlena Dębicka

Ocena oddziaływania mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów (MBP) metodą LCA

1. Wstęp

W przepisach wyraźnie preferowane są technologie przetwarzania odpadów, które nie powodują zanieczyszczenia wody, powietrza i gleby oraz minimalizują uciążliwości odorowe i hałas [1]. Wybór najlepszej technologii przetwarzania odpadów może być podparty metodą zwaną oceną cyklu życia (ang. Life Cycle Assessment LCA). Zakres i fazy oceny środowiskowej LCA opisują międzynarodowe normy ISO 14041 [2], ISO 14042 [3], ISO 14043 [4], ISO/TR 14049 [5]. Analiza LCA opiera się na szeregu założeń i uśrednień [6-8]. Tradycyjne modele LCA mogą być wspierane analizami z wykorzystaniem programów komputerowych. Program IWM-PL jest pierwszą aplikacją polskojęzyczną, stworzoną na bazie programu IWM-2 przez zespół polskich naukowców [9]. Możliwości i ograniczenia IWM-PL przedstawiła Grzesik w swoich publikacjach [10-12].

2. IWM-PL [13, 14, 15]

Użytkownik IWM-PL wprowadza uproszczony zakres danych dotyczących bilansu materiałowo-energetycznego. Jednostką funkcjonalną IWM-PL jest całkowita ilość odpadów wprowadzonych do systemu. W zakres analizy wchodzi 10 **kategorii głównych**: zbiórka odpadów, proces sortowania, proces produkcji paliwa alternatywnego, proces biologicznego przetwarzania, proces termicznego przetwarzania, spalanie RDF, składowanie odpadów, recykling i ocena ekonomiczna inwestycji. Program uwzględnia wszystkie przepływy przez system tzw. wejścia i wyjścia, które powodują uwalnianie emisji do środowiska. Bardzo duży wpływ na analizę LCA mają: morfologia odpadów, dane dotyczące zużycia energii elektrycznej, oleju napędowego, ilość i jakość biogazu i odcieków.

3. Charakterystyka analizowanego zakładu MBP

Zakład przetwarza 45 000 Mg nieposortowanych odpadów stałych. Przepływ strumieni odpadów przedstawia rysunek 2, natomiast morfologię zaprezentowano w tabeli 1. Udział frakcji odpadów kierowanych do produkcji paliwa alternatywnego wynosi 40%, pozostałe odpady przetwarzane są metodami biologicznymi. Odpady organiczne stanowią największy udział w składzie odpadów (ok. 40%).

4. Wyniki analizy IWM-PL

4.1. Emisje do powietrza

Tabela 2 przedstawia zanieczyszczenia emitowane przez zakład MBP do powietrza w kg. Program IWM-PL obliczył zerowe emisje z transportu i procesów sortowania, co jest zgodne z ideą technologiczną zakładu. Program poddaje kalkulacji ilość zanieczyszczeń pochodzących z transportu i sortowania tylko podczas selektywnej zbiórki odpadów, która nie występuje w analizowanym zakładzie. Należy podkreślić, że wyniki ujemne zanieczyszczeń znajdujące się w tabeli 2 są interpretowane jako emisje uniknięte. Na rysunku 3 przedstawiono emisje do powietrza w 6 kategoriach wpływu. Emisje wystąpiły w kategorii układ oddechowy- związki nieorganiczne.

4.2. Emisje do wody

Tabela 3 przedstawia wartości substancji szkodliwych emitowanych do wody w kg. Emisji nie oblicza się dla transportu i sortowania, analogicznie jak w przypadku emisji do powietrza. Na rysunku 5 przedstawiono emisję do wody w 6 kategoriach wpływu. Program IWM-PL oszacował, że emisje do wody występują tylko w dwóch kategoriach: rakotwórczość i ekotoksyczność. Arsen ma największy udział procentowy w kategorii rakotwórczość, natomiast chrom, miedź i nikiel dominują w kategorii ekotoksyczność.

4.3. Raport końcowy

Końcowy raport podsumowuje wyniki z powietrza i wody, przeliczając je na dwie kategorie szkody: zdrowie ludzkie i jakość ekosystemu. Bilans korzyści i strat wynikających z przetwarzania odpadów w analizowanym zakładzie MBP został zaprezentowany w raporcie końcowym (rys. 7). Ujemne wartości wskazują, że zakład nie wpływa negatywnie na środowisko.

5. Wnioski

Zakład mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów produkuje emisje do powietrza w jednej kategorii: układ oddechowy- związki nieorganiczne.

Ilość CO₂ jest ujemna dzięki spalaniu paliwa alternatywnego RDF, przez co oszczędzamy zasoby paliw tradycyjnych. Zakład MBP wytwarza szkodliwe substancje do wody w dwóch kategoriach: rakotwórczość (arsen, kadm, fenole) oraz ekotoksyczność (chrom, miedź, nikiel). Raport końcowy wykazał, że analizowany przypadek przetwarzania odpadów nie pogarsza stanu środowiska.

MIXED BIOMASS AS AN ALTERNATIVE ENERGY FUEL

Abstract

The use of biomass as a renewable energy source is applicable in the production of electricity and heat. The main fuel is wood in the form of fragmented wood, edgings, whirlpools, wood chips, sawdust, briquettes and pellets. This publication refers to the use of waste processing aspect of the food industry, as well as ready biofuel component in mixtures with sawdust. Tests of moisture content in analytical aspect of combustion heat were conducted. Analysis of the results shows that the energy potential of waste plant is possible to use in the combustion process, thus reducing wood consumption in the power generation sector.

Keywords: forest biomass, pomace fruit, vegetable waste, testing combustion heat, moisture study

1. Introduction

The waste originating from processing fruit and vegetable ceased to be a nuisance for most manufacturing plants. With the support from EU funds dryers were created. The dried assortment is used in the food industry, agriculture and energy. Although it has different physical and chemical parameters, the research conducted in the field of energy efficiency shows that solid biofuel from waste involving fruit and forest biomass can successfully replace coal in energy production. There are, however, obstacles in technological manufacture of pellets or briquettes with certain types of agro-waste. Pomace from fruit characterized by different degrees of viscosity, flow ability, differ by the addition of pectin, resins or organic compounds, factors which determine the possibility of their pelleting without binding additives. Therefore, a proposal of mixes testing becomes justified, consisting of loose pomace and sawdust containing a resin component as a factor naturally assemblage components.

2. Research on moisture and heat of combustion conducted on mixed biomass

Analytical studies of moisture and heat of combustion were carried out in a laboratory at the Faculty of Environmental, Geomatics and Energy

Engineering in Kielce. The study was a mixture of various kinds of biomass with a percentage: 50% pomace from fruit or other plant biomass and 50% sawdust. The drying process was conducted by the use of the dryer. In order to obtain the fraction of < 0.2 mm biomass is ground in a mill intended for that purpose, and then sieved through a sieve. Samples of the same mixtures were dried in three ceramic crucibles, reading the weighing results every half hour until stabilization of the weight ± 0.001 g each of them in accordance with the applicable standard [1].

3. Pelleting blends agro sawdust

Characteristics of the material component is extremely important in achieving a durable fuel. Pellets of pure sawdust with a diameter of 6 mm or 8 mm were formed at the pellet production machine resulting in ready biofuel. However, some types of pomace are not possible to combine without the direct pelletizing binder, because they are too dry and free flowing. Such a process ends up getting only approx. 10% of the unstable pellet which is formed under pressure in the device. As a result of this treatment most of the biomass remains in their original form. The pomace from raspberries, aronia, currants and strawberries require sawdust mixed with resin, which will retain the cohesiveness of pellets

(Fig. 1, Fig. 2). Currently, the experimental phase is the percentage of sawdust mixed with different types of waste processing. The amount of binder resin must be selected so that the pellet is stable both during transport to the receiver, and during the loading tray in the oven as well as the mechanical process of biomass feed to the combustion chamber.



Fig. 1. Pellets from sawdust coniferous-deciduous



Fig. 2. Pellets from sawdust and strawberries



Fig. 3. Pellets from sawdust and raspberries



Fig. 4. Pellets from sawdust and currants

The blend (Fig. 3, Fig. 4) involving dry pomace fine fraction to a few millimeters, but also the fractions of particulate form finer pellet length of from 0.5 cm to 1 cm and more brittle. Hence, it is experimentally proved that it is reasonable to increase the share of sawdust conifers to provide more permanent structural biomass intended for combustion.

4. Humidity and heat of combustion study of biomass mixtures

The combustion heat test held in the calorimeter KL-12 involving pure oxygen, where samples of 1 g were burnt. The results were averaged in the case of a calorific value of the difference of at most 130 J/g in accordance with the standard [2].

Table 1. Study of moisture and heat from biomass combustion mixtures

The mix of participation 50% biomass and 50% sawdust	Average analytical moisture content [%]	Average value combustion heat [MJ/kg]
mix with pear pomace	6.92	23.24
mix with apple pomace	7.13	23.98
mix with red currant	7.12	23.68
mix with chokeberry	7.54	23.29
mix with walnut shells	7.19	23.90
mix with seeds of cherry	7.00	24.30
mix with strawberries	6.26	23.73
mix with raspberries	5.69	25.74
mix with black currant	7.14	24.26

The test results set out in Table 1 show that moisture analytical sample of compound plant biomass 50% wood shavings 50% is below 7.6%. The smallest value of a blend of raspberry pomace with sawdust 5.69%. The test samples also show a high calorific value of more than 23.20 MJ/kg. The highest value of 25.74

MJ/kg was observed by burning a mixture of dried raspberries with sawdust. Not always pomace or mix with lower moisture content have the highest calorific values at the same time. For example, ground cherry stones in 50% share of sawdust humidity 7.00% are characterized by the size of the heat of combustion order of 24.30 MJ/kg. Each of the nine samples tested is derived mostly from various plant species. Mixtures are characterized by the combustion heat in the range of 23.2-25.7 MJ/kg, whereas a measurable value for the marc contained in the range of 22.5 MJ/kg to 26.5 MJ/kg, recorded in the laboratory prior to analysis blends.

Table 2. The heat of combustion of plant biomass

Type of biomass	Average value combustion heat [MJ/kg]
pomace of pears	22.55
pomace of apple	23.79
pomace of red currants	25.02
pomace of chokeberry	24.46
shell walnuts	24.87
cherry pits	23.04
pomace of strawberries	24.19
pomace of raspberries	26.53
pomace of black currants	24.18

The results of the heat of combustion research of mix with sawdust revolve around the results obtained for the marc, peanut hulls, the seed of a cherry. The table above average calorific value contains the lowest values for pomace pears, which is the same (Table 1) for a mixture of these with sawdust. Raspberries have the highest value as in the case of the test mixtures with their participation. By analyzing the comparative performance of the two statements, it may be noticed that some of the pomace with high energy values slightly decreases when mixed with sawdust, but some samples tested gains in the amount of MJ/ton acting component of the mixture.

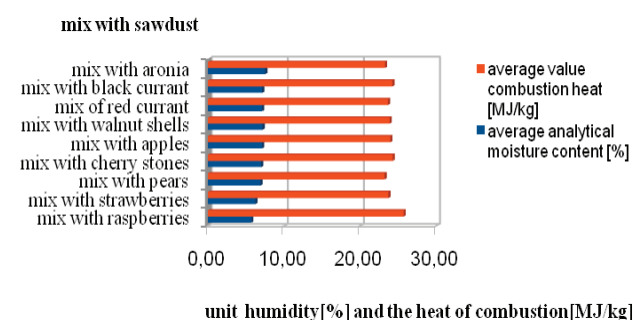


Fig. 5. Graph of the analytical moisture and heat of combustion of biomass

5. Technological conditions for the production of pellets

Biofuels plant both pellets and briquettes are produced with the participation of the binder in various forms. According to patent No. PL165547 pellets contain pitch and asphalt, which is inconsistent with the principles of environmental protection. Polish patent No. PL 194593 for briquetting fine coal, coke, sawdust, peat or straw, adhesive in the form of collagen derived from animal hides were applied. However, UK 174678 and UK 174,972 distinguish starchandits derivatives modified with resin, urea – formaldehyde as a binder. The variety of bonding additives is determined by the level of moisture biomass [3]. In view of the conditions relating to the use of fully organic fuel without additives or mixtures, it was decided on the basis on the natural properties of the components used in the study, to design mixtures which will optimize using a mixture of dried fruit with sawdust and forestry. Noticeably low moisture components level will increase the density of the material subjected to the process of pelletizing, which will translate to reach the resin binder for loose particles pomace. Additional factors that provide consolidation of the waste oils particles are fruit and pectin, which, despite the humidity to 10% are effective in the process of compression under pressure.

6. The use of biomass in Poland

In Poland, the increase in biomass of various origin as a renewable energy source is observed. According to data from the Energy Regulatory Office for 2014 power plant biomass amounted to 995.2 MW while in 2015 amounted to 1,103.115 MW [4]. Not only the big energy companies but also the local district heating in housing estates and individual clients use pellets or briquettes from biomass combustion process instead of fossil fuels. Not without significance is the fact that in Poland the production of structural wood generates waste possible to direct or indirect use. Fruit and vegetables processing industry has expanded its offer with-dried pomace which energetic use is becoming more common. Industrial waste turns out to be high-energy biofuel that is used in the individual combustion or incineration with other solid fuels and gas. Every region in the country has processing plants, from which the waste can be used locally as an energy source. Plant dryers were built where the pomace drying process take place to the humidity level to 15%, and thus it is possible to use it in furnaces and boilers biomass.

On the Polish territory there is a big availability in obtaining raw material waste without the necessity to invest high costs for transport from remote regions. Raw material base for the production of pellets or briquettes is varied. Laboratory tests conducted at Kielce University of Technology, prove the possibilities of using forest biomass energy, combined with agro-biomass waste and process ability. Not without significance this type of biomass is very popular in the fuel market, because it has many advantages that enable it to replace coal in the production of electricity and heat, and they are:

- local availability of waste,
- moisture sufficient for the production of pellets or briquettes,
- high calorific value,
- reducing greenhouse gas emissions compared with coal,
- negligible amount of dust emission of 0.10-0.26 kg/h for selected pomace (1.14 kg/h of coal) [5],
- a negligible amount of ash based on the operational state: about 3.5% (18.66 ± 3.32 for carbon) [5],
- ease of loading and transport.

According to the research work of the Institute of Wood Technology, in the wood processing factories in Poland, it is formed approx. 7.5 million m³ of waste of all kinds. After using it only by wood industry approx. 3 million m³ are left to use. By 2020 it is expected that the direct and indirect supply of wood biomass for energy purposes will amount to a total of over 12 thousand tone. Biodegradable industrial waste is estimated to the same prospect in amount more than one thousand tons [6].

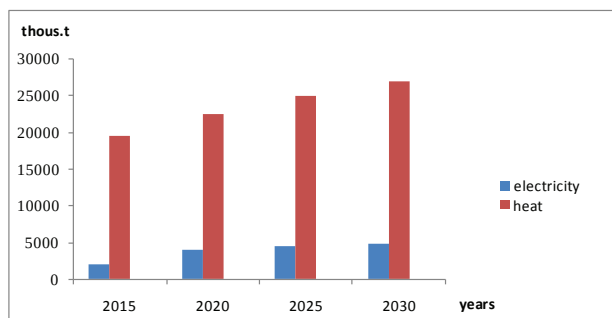


Fig. 6. The demand for biomass by National Action in the Field of Renewable Energy is shaped by the values shown below, broken down into electricity and heat [7]

7. Conclusions

Manufacturing processes and processing carried out in the various branches of the national economy generate waste that can be used at very little expense,

for example in the wider energy sector. The exchange of fuel from fossil to biomass in power plants, power plants and heating plants in residential areas has been present for a long time. Some plants produce energy burn only biomass in perennial cycle or part thereof, other co-incinerate biomass with coal dust or gas. The problem is consumers who continue to use the fuel in the form of coal, which is burdensome for the environment, especially in large urban areas. Energy use offer of forest and agro biomass is addressed to companies producing electricity and heat in urban and rural settlements and to companies offering biofuels as sales product as well as to individual customers. Innovative solutions in heating boilers for biomass have to use high-efficient assortment with favorable physical parameters, which in the combustion process obtains the expected thermal power. Optimization of quantitative and qualitative should translate well to the account of the overall economic process of acquiring, processing and use of biofuels. If the cost of replacing the existing energy carrier can be replaced at the expense of biofuels, whose efficiency is found to be sufficient to achieve the objective utility aim, then it will be possible to speak about full success in the renewable energy sector.

References

- [1] PN-EN ISO 18134-1:2015: Biopaliwa stałe. Oznaczanie zawartości wilgoci. Metoda suszarkowa.
- [2] PN-EN ISO 1928:2002: Paliwa stałe. Oznaczanie ciepła spalania metodą spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej.
- [3] http://www.malopolskaoze.pl/publicystyka_zbior/pellet_biomasowo_%E2%80%93_3_odpadowy,_sposob_jego_wytwarzania__d5570_pol.html
- [4] odnawialneźródłaenergii.pl/oze/1436-moc-zainstalowana-oze
- [5] Borycka B.: *Walory ekologiczne spalania biomasy z odpadów owocowo-warzywnych*, Energetyka nr 12/2009, s. 848.
- [6] Świtalska K., Pawlak S.: *Strategia popularyzacji biomasy D4.14. Intelligent Energy Europe for a sustainable future*, Wielkopolska Agencja Zarządzania Energią.
- [7] Grzybek A.: *Biomasa w energetyce*, Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Oddział Warszawa, Poznań 2011.

Paweł Purgał
Joanna Pasternak

Mieszanki biomasowe jako alternatywne paliwo energetyczne

1. Wstęp

Odpad pochodzący z przetwórstwa owocowego oraz warzywnego przestał już być uciążliwością dla większości zakładów produkcyjnych. Przy wparciu funduszy unijnych powstały przykładowe suszarnie. Wysuszony sortyment znajduje zastosowanie w przemyśle spożywczym, rolniczym, a także energetycznym. Mimo iż posiada on zróżnicowane parametry fizyczne oraz chemiczne, to badania realizowane w zakresie efektywności energetycznej wykazują, iż biopaliwo stałe z udziałem odpadów owocowych i biomasy leśnej może z powodzeniem zastąpić węgiel kamienny w procesie wytwarzania energii. Istnieją jednak przeszkody natury technologicznej w wyprodukowaniu peletu czy brykietu z niektórych rodzajów agro-odpadu. Wytloki z owoców charakteryzują się odmiennym stopniem lepkości, sytkości, ponadto różnią się zawartością pektyn, żywicy czy związków organicznych, które to czynniki determinują możliwość ich peletowania bez dodatków wiążących. Zatem zasadna staje się propozycja badania mieszanek, składających się z sypkich wytlóków i trocin drzewnych, zawierających składnik żywiczny jako czynnik naturalnie scalający komponenty.

2. Badania wilgotności i ciepła spalania prowadzone na mieszanekach biomasy

Badania wilgotności analitycznej oraz ciepła spalania zostały przeprowadzone w laboratorium na Wydziale Inżynierii Środowiska Geomatyki i Energetyki w Kielcach. Badaniu poddano mieszanki różnego rodzaju biomasy przy udziale procentowym: 50% wytlóków owocowych lub innej biomasy roślinnej i 50% trociny. Proces suszenia przeprowadzono z wykorzystaniem metody suszarkowej. W celu uzyskania frakcji < 0,2 mm biomasę mielono w młynku przeznaczonym do tego celu, a następnie przesiano przez sito. Próbkę tych samych mieszanek suszono w trzech ceramicznych tyglach, odczytując wyniki ważenia co pół godziny, aż do ustabilizowania masy $\pm 0,001$ g w każdym z nich, zgodnie z obowiązującą normą [1].

3. Peletowanie mieszanek agrobiomasy z trociną

Charakterystyka materiału komponentowego jest niezwykle istotna w uzyskaniu trwałego paliwa. Pelety z czystych trocin o średnicy 6 mm lub 8 mm zostały uformowane w zakładzie produkcyjnym w maszynie do peletowania, czego efektem jest gotowe biopaliwo. Natomiast niektóre rodzaje wytlóków nie są możliwe do bezpośredniego peletowania bez użycia lepiszcza, gdyż są zbyt suche i sypkie. Proces taki kończy się uzyskaniem jedynie ok. 10% nietrwałego peletu, który powstaje pod wpływem ciśnienia w urządzeniu. W efekcie takiej obróbki większość biomasy pozostaje w pierwotnej formie. Wytloki z malin, aronii, porzeczek czy truskawek wymagają zmieszania z żywiczną trociną, która zachowa spistość peletu. Obecnie fazą doświadczalną jest procentowy udział trocin w mieszance z poszczególnymi rodzajami odpadów przetwórczych. Ilość spoiwa w postaci żywicy musi być tak dobrana, aby pelet był trwały zarówno w czasie transportu do odbiorcy, jak i podczas załadunku podajnika w piecu oraz podczas procesu mechanicznego podawania biomasy do komory spalania.

Przedstawione mieszanki (rys. 3, rys. 4) z udziałem suchych wytlóków o drobnych frakcjach do kilku milimetrów, ale również frakcjach pyłowych, tworzą pelet drobniejszy o długości od 0,5 cm do 1 cm i bardziej kruchy. Stąd doświadczalnie uzasadnione jest zwiększenie udziału trocin iglastych zapewniających trwalszą strukturalnie biomasę, przeznaczoną do procesu spalania.

4. Badanie wilgotności i ciepła spalania mieszanek biomasy

Badanie ciepła spalania mieszanek odbywało się w kalorymetrze KL-12 z udziałem czystego tlenu, gdzie spalano próbki o masie 1 g. Otrzymane wyniki uśredniano w przypadku uzyskania wartości ciepła spalania o różnicy co najwyżej 130 J/g, zgodnie z normą [2].

Wyniki badań zawarte w tabeli 1 wykazują, że wilgoć analityczna próbek mieszanek biomasy roślinnej 50% z trocinami drzewnymi 50%, kształtuje się poniżej 7,6%. Najmniejszą wartość posiada mieszanka wyłoków z malin z trocinami – 5,69%. Badane próbki wykazują jednocześnie wysokie wartości ciepła spalania, tj. powyżej 23,20 MJ/kg. Najwyższą wartość 25,74 MJ/kg zaobserwowano, spalając mieszankę suszu z malin z trociną. Nie zawsze wyłoki owocowe lub mieszanki, mając niższe wartości wilgotności posiadają jednocześnie najwyższą kaloryczność. Przykładowo zmielone pestki wiśni w 50% udziale z trociną przy wilgotności 7,00% charakteryzują się wielkością ciepła spalania rzędu 24,30 MJ/kg. Każda z dziewięciu przebadanych próbek pochodzi w większości z różnych gatunkowo roślin. Mieszanki charakteryzują się ciepłem spalania w zakresie $23,2 \div 25,7$ MJ/kg, podczas gdy wartości mierzalnej dla samych wyłoków zawierały się w przedziale $22,5$ MJ/kg $\div$ $26,5$ MJ/kg, odnotowanym podczas badań laboratoryjnych, poprzedzających analizę mieszanek.

Wyniki badań ciepła spalania mieszanek z trociną liściasto-iglastą oscylują wokół wyników uzyskanych dla samych wyłoków, łupin z orzechów czy pestek z wiśni. Tabela średnich wartości ciepła spalania (Tab. 2) zawiera najniższe wartości dla wyłoków z gruszek, co przekłada się analogicznie (Tab. 1) dla mieszanki z trociną. Wartość najwyższą wykazują maliny, podobnie jak w przypadku badanej mieszanki z ich udziałem. Analizując porównawczo wyniki z obu zestawień, można zauważyć, że część wyłoków, charakteryzując się wysokimi wartościami energetycznymi, nieznacznie je obniża po zmieszaniu z trociną, jednak część badanych próbek zyskuje na ilości MJ/tonę, stanowiąc komponent danej mieszanki.

5. Technologiczne uwarunkowania produkcji peletu

Biopaliwa pochodzenia roślinnego zarówno pelety, jak i brykiety są produkowane z udziałem lepiszcza różnej postaci. Według patentu nr PL165547 brykiety z biomasy zawierają pak i asfalt, co jest niezgodne z zasadami ochrony środowiska naturalnego. W polskim opisie patentowym nr PL 194593 do brykietów z miału węglowego, koksu, trociny, torfu czy słomy zastosowano lepiszcze w postaci kolagenu, uzyskanego ze skór zwierzęcych. Z kolei PL 174678 i PL 174972 wyróżniają jako spoiwo skrobię i jej pochodne modyfikowane dodatkowo żywicą mocznikowo-formaldehydową. Różnorodność domieszek spajających jest determinowana poziomem zawilgocenia biomasy

[3].

Z uwagi na uwarunkowania związane z wykorzystaniem paliwa w pełni ekologicznego bez dodatków czy domieszek, postanowiono w oparciu o naturalne właściwości zastosowanych w badaniach komponentów, zaprojektować mieszanki optymalnie wykorzystujące udział suszu owocowego oraz trociny leśnej. Zauważalnie niski poziom wilgotności elementów składowych pozwoli na zwiększenie zagęszczenia materiału poddanego procesowi peletowania, co przełoży się na dotarcie żywicznego lepiszcza do sypkich cząstek wyłoków. Dodatkowymi czynnikami, zapewniającymi scalenie cząstek odpadów owocowych, będą oleje i pektyny, które mimo wilgotności do 10% pozostają efektywne w procesie sprasowania pod ciśnieniem.

6. Wykorzystanie biomasy w Polsce

W Polsce obserwuje się wzrost energetycznego wykorzystania biomasy różnego pochodzenia jako odnawialne źródło energii. Według danych URE na 2014 rok moc instalacji biomasowych wynosiła 995,2 MW, podczas gdy w 2015 roku wynosiła 1103,115 MW [4]. Nie tylko duże zakłady energetyczne, ale lokalne ciepłownie osiedlowe, a także klienci indywidualni wykorzystują pelety czy brykiety z biomasy do procesu spalania zamiast paliw kopalnych. Nie bez znaczenia pozostaje fakt, iż w Polsce produkcja drewna konstrukcyjnego generuje odpady możliwe do pośredniego lub bezpośredniego wykorzystania. Przemysł przetwórczy owoców i warzyw poszerzył swoją ofertę o podsuszone wyłoki, których wykorzystanie energetyczne jest coraz bardziej powszechne. Odpady przemysłowe okazują się być wysokoenergetycznym biopaliwem, które wykorzystywane jest w indywidualnym procesie spalania lub współspalania z innymi paliwami stałymi i gazowymi. Każdy region w kraju posiada zakłady przetwórcze, z których odpady można wykorzystywać lokalnie jako źródło energii. Powstają przyzakładowe suszarnie, które oferują towar posiadający poziom wilgotności do 15%, a więc możliwy do wykorzystania w piecach i kotłach biomasowych. Na terenie Polski istnieje duża dogodność w pozyskaniu surowca odpadowego, bez konieczności inwestowania wysokich nakładów finansowych na transport z odległych regionów.

Baza surowcowa do produkcji peletów czy brykietów jest zróżnicowana. Badania laboratoryjne przeprowadzone na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach dowodzą możliwości wykorzystania energetycznego biomasy leśnej, łączonej z agrobiomasą i odpadami przetwórczymi. Nie bez powodu ten

rodzaj biomasy cieszy się dużym zainteresowaniem na rynku paliw, posiada on bowiem wiele zalet, które pozwalają na zastąpienie nim węgla kamiennego w procesie wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej, a są to:

- lokalna dostępność odpadów
- wilgotność wystarczająca do produkcji peletu czy brykietu
- wysokie wartości ciepła spalania
- zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych w porównaniu z węglem
- znikoma ilość emisji pyłu $0,10 \div 0,26$ kg/h dla wybranych wyłoków ($1,14$ kg/h dla węgla) [5]
- znikoma ilość popiołu w przeliczeniu na stan roboczy: do ok. $3,5\%$ ($18,66 \pm 3,32$ dla węgla) [5],
- łatwość załadunku i transportu.

W istniejących w Polsce zakładach przemysłowych przerobu drewna, według prac badawczych Instytutu Technologii Drewna, powstaje ok. $7,5$ mln m^3 odpadów różnego rodzaju. Po wykorzystaniu go przez sam przemysł drzewny pozostaje do wykorzystania ok. 3 mln m^3 . Na 2020 rok przewiduje się, że bezpośrednio i pośrednio dostawy biomasy drzewnej na wykorzystanie do celów energetycznych wyniosą łącznie ponad 12 tys. ton. Odpady przemysłowe ulegające biodegradacji szacuje się na tę samą perspektywę w ilości ponad 1 tys. ton [6].

7. Podsumowanie

Procesy wytwórcze i przetwórcze, realizowane w różnych gałęziach gospodarki krajowej, generują odpady, które mogą być wykorzystane przy niewielkich nakładach finansowych, m.in. w szeroko rozumianej energetyce. Od dłuższego czasu następuje wymiana paliwa z kopalnego na biomasowe w elektrowniach, elektrociepłowniach oraz w ciepłowniach osiedlowych. Niektóre zakłady produkcji energii spalają tylko biomasę w całorocznym cyklu lub jego części, inne współspalają biomasę z miałem węglowym lub gazem. Zostaje problem klientów indywidualnych, którzy nadal korzystają z opału w postaci węgla kamiennego, co jest uciążliwe dla środowiska naturalnego, szczególnie w dużych aglomeracjach miejskich. Oferta energetycznego wykorzystania biomasy leśnej i agrobiomasy skierowana jest do przedsiębiorstw, produkujących energię elektryczną i ciepłą w miejskich i wiejskich jednostkach osadniczych oraz do firm oferujących biopaliwa jako produkt sprzedażowy, a także do klienta indywidualnego. Innowacyjne rozwiązania kotłów grzewczych na biomasę mają na celu wysoce efektywne wykorzystanie sortymentu

o korzystnych parametrach fizycznych, który w procesie spalania uzyska oczekiwaną moc cieplną. Optymalizacja ilościowa i jakościowa powinna przekładać się również na rachunek ekonomiczny całłościowego procesu pozyskiwania, przetwarzania i wykorzystania biopaliwa. Jeśli koszt zastąpienia dotychczasowego nośnika energii uda się zastąpić kosztem biopaliwa, którego wydajność okaże się być wystarczająca do osiągnięcia założonego celu użytkowego, wówczas będzie można mówić o pełnym sukcesie w sektorze odnawialnych źródeł energii.

MAREK TELEJKO¹
EWA ZENDER-ŚWIERCZ²
Kielce University of Technology
¹mtelejko@tu.kielce.pl,
²ezender@tu.kielce.pl

MICROCLIMATE IN ROOMS HEATED BY TILED FIREPLACE WITH THE FUNCTION OF ACCUMULATION OF HEAT

Abstract

The article presents the analysis of microclimate in rooms equipped with tiled fireplace with the function of accumulation of heat. Two research series, conducted in used premises, were presented.

Keywords: Building physics, ventilation, indoor air quality, heating by tiled fireplace

1. Introduction

One of the most important problems of modern structure engineering is not the isolating users from the external environment, but reaching and keeping the parameters of internal air. The parameters of internal air describe the microclimate in buildings. When these parameters are on the adequate level, we can talk about thermal comfort. Lots of thermal comfort parameters cannot be measured. The research conducted for many years, were supposed to find a link between the subjective feelings of users and the parameters describing interior microclimate. This studies led to determine five group of factors [1-7]:

1. The thermal comfort – the inside temperature, the temperature of surrounding surfaces, the air humidity, the air velocity, the insulation of clothing, the people activity, and the like.
2. The air quality (cleanliness of air) – harmful or troublesome substances, the solution of ventilation system, the exchange of air in building, and the like.
3. The lighting – the daylight, the intensity and the color of artificial light, and the like.
4. The noise – the attenuation of external or internal partitions.
5. Other factors: the factors associated with sense of smell, the visual factors, and the like.

The authors have focused their attention on the microclimate parameters, which are classified

as thermal comfort parameters and air quality parameters. There was the untypical heating system in the analyzed building. As the main source of heat, the tiled fireplace with the function of accumulation of heat, was used (in contrast to traditional, water heating used in Poland).

2. Subject and methods of the study

The research were carried out in premises situated on the ground floor of two-storey building. However, it should be noted, that they constituted a separate entity (with separate entrance from the outside) equipped with the individual heating system. The traditional brick building built in the middle of sixties of the last century was analyzed. In 2011 year, the three-layer external walls were additionally insulated with layer of the polystyrene and the new facade was made. The building was equipped with gravitational ventilation.

The total area of the analyzed premises is about 80 m². Their function is a showroom and dealership. They are used in the hours of 7 am to 5 pm.

In order to determine conditions in the room, the following microclimate parameters were measured: air temperature, relative humidity and carbon dioxide concentration (which was the indicator of the air quality). In addition, the flow rate in gravitational ducts and the variations of direction of air flow, were being recorded. Two cycles of measuring were carried

out. Each of them lasted 14 days. The first cycle was carried out in the autumn, the second in the winter. The interval of recording the measured parameters was set for 5 minutes.

The main source of heat was the tiled fireplace with the function of accumulation of heat mounted in 2013 year. The additional source of heat was a two-function gas boiler. This source was turning on only in case of very low external temperatures and it powered the traditional plate heaters of steel, which were mounted on the external walls. During the analysis, the gas boiler was turned off.



Fig. 1. The tiled fireplace – the appearance and the diagram of operation [8]

The main source of heat was the tiled fireplace, which combines the features of the traditional fireplaces and stoves used for heating premises. The difference is in the used modern materials. The any contribution of steel or iron may constitute the furnace connected with the accumulative heat exchanger, provided that the stream of external air, necessary to burn, will be delivered. The accumulating ducts are made of the modern, heavy fireclay or the thermal mass of fireproof concrete). The right amount of air flowing into the furnace ensures an optimum and complete combustion of wood and proper heating of accumulation material. The exhaust gas are flowing out from the furnace at high temperature, which equals 600-1000°C. This parameter is reduced to 100-200°C in the mouth of the chimney, what means high efficiency of this solution.

3. Results

In all premises of the analyzed service premises the variation of the microclimate parameters was similar. The values of the measured parameters (CO_2 concentration, indoor temperature, humidity of air)

were increasing since turn on and start usage of the tiled fireplace. In a short time parameters reached maximum values (Fig. 2). The values of some parameters were falling down, when users of premises have left building. In night's hours, the parameters have reached high values again.

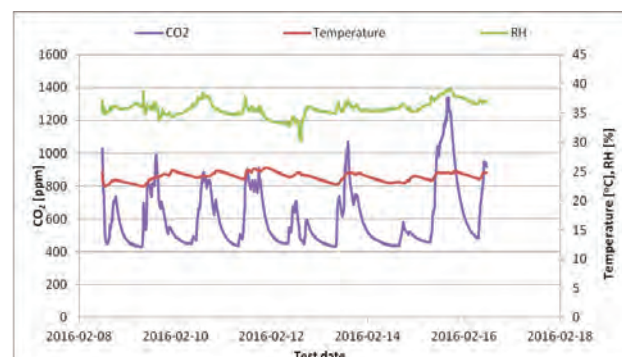


Fig. 2. The weekly variability of the microclimate parameters

The relative humidity and the carbon dioxide concentration decreased when the employees had left the premises (Fig. 3). This decrease was slow but immediate. In turn the temperature usually continues to rise (Fig. 3). A further increase the indoor temperature was resulted from the heat accumulation in the tiled fireplace. This source still has been heating the premises after firing the wood. After a few hours the internal temperature started to fall down, until the tiled fireplace was burning again. It should be noted, that decreasing of air humidity was not continuous. The air humidity stabilized, and then increased slightly, before start of work in the object and before people appearance in building.

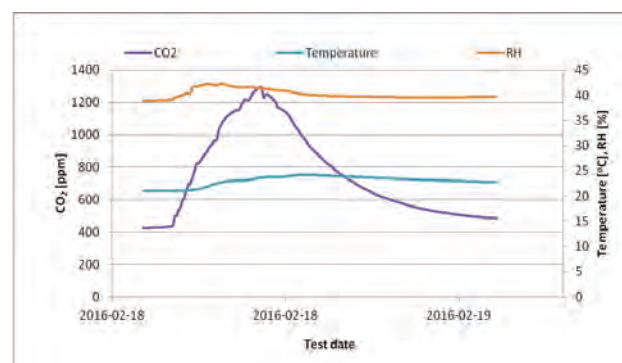


Fig. 3. The daily variability of the microclimate parameters in the analyzed premises

It should be noted that the values of the measured parameters depended on the location of the measuring device in relation to the tiled fireplace location. The

fireplace was located in the central part of premises, which allows for heating all the room, at the analyzed building. The measuring devices were located at the workplace, closest to the fireplace (approx. 2.5 m) and near the front door (approx. 7 m). The values of average temperatures measured on the measuring position No. 1 differed from the values measured on the measuring position No. 2 only by 0.4°C. The difference in the average values of the relative humidity equaled to 1% and the difference in the average values of CO₂ concentration equaled to almost 200 ppm. The differences in the relative humidity and in the CO₂ concentration were so small that they were undetectable by users. However, people, who were occupying space at a greater distance from the heat source were complaining of low temperature just after the start of work. While people, whose jobs were near to tiled fireplace, reported that temperature is too high already approx. 2-3 hours after the start of heating. These feelings have a close relationship with the minimum and maximum temperatures recorded on two measuring positions (Table 1).

Table 1. The parameter values recorded in the 1 and 2 measuring stations

Parameter	Position No. 1			Position No. 2		
	Min.	Max.	Average	Min.	Max.	Average
Temperature [°C]	19.9	25.4	23.0	18.5	23.1	22.6
RH [%]	32.1	45.5	38.0	30.3	46.6	37.0
CO ₂ [ppm]	423	1342	641	409	1029	467

During weekends variability of microclimate parameters also have an established pattern. Since the moment of complete consumption of fuel, the temperature has been dropping until Monday morning. Then a fireplace was again lighted. The lowest recorded temperature on Monday morning did not differ significantly from the temperatures recorded in other days morning (before starting the heating). It equaled 19.1°C. When the air temperature was dropping, the relative humidity of air was increasing. The maximum recorded value of humidity on Monday morning reached 50%, and values recorded on another weekdays did not exceed 45%. The values of CO₂ concentration measured in the morning were the lowest during the day, and regardless of what day of the week it reached the similar values to the parameter concentration in the outside air.

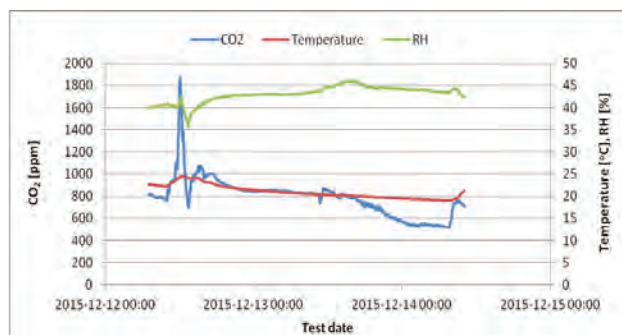


Fig. 4. The variation of microclimate parameters during the weekend

4. Conclusions

The analysis of the obtained data of microclimate parameters, especially daily variability of indoor temperature, showed that heating by tiled fireplace with the function of accumulation of heat is not good solution. However, due to the burning of biofuels, it is in line with the current trend of sustainable construction. To ensure the thermal comfort of people staying in premises which are heated in analyzed manner, the great drop of inside temperature, at night hours have to be eliminated. The negative effect is possible to eliminate, by using the fuel feeder (timber) into the combustion chamber. In this way the combustion is continuous and the temperature is constant all day. This means, that the problem with the parts of premises which are not enough heated (located at greater distance from the fireplace) is eliminated. Another solution is using additional heat source, for example a gas boiler and the water central heating which is traditionally used in Poland.

The recorded values of air humidity were in range of the recommended values. Also, the authors did not raise an objections to the CO₂ concentration values. The values exceeding 1200 ppm were recorded exceptionally, and they were temporary. The rapid decline of the parameter value was observed after leaving the premises by employees. The average CO₂ concentration of external air equaled 419 ppm. The recorded average values of parameters in premises let to classify the buildings to the average category of indoor air quality (IDA 2) according to [9]. Taking into account the maximum recorded values of CO₂ concentration in the analyzed premises, they should be classified in the category of the moderate indoor air quality (IDA 3). The classification in the such a high category is possible because of the proper air flow into the combustion chamber, the high sealing the building and the ensuring correct air exchange because of window vents.

References

- [1] Kabza Z., Kostyrko K., Zator S., Łobzowski A., Szkolnikowski W.: *Adjusting the microclimate of premises (in Polish)*, Agenda Wydawnicza PAK-u, Warszawa 2005.
- [2] Maczek K., Schnotale J., Skrzyniowska D., Sikorska-Bączek R.: *Air treatment in environmental engineering for systems of ventilation and air conditioning (in Polish)*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej (Publisher Cracow University of Technology), Krakow 2004.
- [3] Popiołek Z. (red.): *The energy-efficient creation of the internal environment (in Polish)*, Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania, Politechnika Śląska, Gliwice 2005.
- [4] Fanger P.O., Popiołek Z., Wargacki P.: *The internal environment. Its impact on the health, comfort and productivity (in Polish)*, Politechnika Śląska, Gliwice 2003.
- [5] Kateusz P.: *The original solutions of ventilation issues (in Polish)*, ENER-INDOOR, Gliwice 2005
- [6] Popiołek Z.: *Proceedings of Workshop Measurement and Control Techniques for HVAC System and Indoor Climate*, ENER-INDOOR, Gliwice 2005.
- [7] Olenets M., Piotrowski J.Z., Stroy A.: *Heat transfer and air movement in the ventilated air gap of passive solar heating systems with regulation of the heat supply*, Energy and Buildings, Vol. 103, pp. 198-205, 2015
- [8] <http://www.cebud.eu/index.php?page=news&kid=2&pkid=29&ppkid=180>
- [9] EN 13779:2007 Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems.

Marek Telejko
Ewa Zender-Świercz

Mikroklimat w pomieszczeniach ogrzewanych piecem kominkowym z funkcją akumulacji ciepła

1. Wstęp

Jednym z najważniejszych problemów współczesnego budownictwa nie jest fakt odizolowania użytkowników od warunków zewnętrznych, ale w jaki sposób ukształtować i utrzymać pożądane przez nich warunki wewnętrzne.

W trakcie badań opisanych w tym artykule uwagę skupiono nad parametrami mikroklimatu zaliczanymi do komfortu cieplnego oraz jakości powietrza. W rozpatrywanym obiekcie nietypowy był system ogrzewania. Jako główne źródło ciepła wykorzystany został piec kominkowy z możliwością akumulacji ciepła.

2. Przedmiot i zakres badań

Budynek w którym prowadzono badania wykonany został w połowie lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku w technologii murowanej. Trójwarstwowe ściany zewnętrzne w roku 2011 zostały dodatkowo zaizolowane od zewnątrz warstwą styropianu z wyprawą elewacyjną. Obiekt posiada wentylację grawitacyjną. Pomieszczenia, w których realizowano badania mają łączną powierzchnię ok. 80 m². Badania obejmowały rejestrację przebiegu zmian temperatury, wilgotności

względnej oraz stężenia CO₂. Zrealizowano dwa cykle pomiarowe, z których każdy trwał 14 dni.

Głównym źródłem ciepła był piec kominkowy z możliwością akumulacji ciepła. Dodatkowe źródło ciepła stanowił dwufunkcyjny kocioł gazowy uruchamiany jedynie w przypadku bardzo niskich temperatur zewnętrznych.

3. Wyniki badań

We wszystkich pomieszczeniach analizowanego obiektu przebieg zmienności parametrów mikroklimatu odbywał się według tego samego schematu. Wartości mierzonych parametrów wzrastały od momentu rozpoczęcia użytkowania oraz uruchomienia pieca kominkowego. W krótkim czasie osiągały one wartości maksymalne. Po opuszczeniu pomieszczeń przez użytkowników wartości poszczególnych parametrów spadały, aby w okresie nocy przyjąć ponownie wartości wyjściowe.

Wyznaczono dwa stanowiska pomiarowe oddalone o 2,5 m oraz 7 m od źródła ciepła. Wartości średnie temperatury odnotowane na stanowisku pomiarowym nr 1 różniły się od wartości na stanowisku nr 2 zaledwie o 0,4°C. Różnica wartości średnich wilgotności względnej wynosiła 1%, a stężenia CO₂ prawie

200 ppm. W zależności od odległości od źródła ciepła użytkownicy skarżyli się na przegrzanie lub niedogrzejanie pomieszczeń.

4. Podsumowanie

Analizując otrzymane wartości parametrów mikroklimatu należy stwierdzić, że ogrzewanie piecem kominkowym z możliwością akumulacji ciepła nie jest najkorzystniejszym sposobem ogrzewania pomieszczeń. Dla zapewnienia komfortu cieplnego ludzi przebywających w pomieszczeniach ogrzewanych w ten sposób niezbędne byłoby wyeliminowanie znacznych spadków temperatury wewnętrznej w okresie nocy. Jest to możliwe poprzez zastosowanie podajnika paliwa (drewna) do komory spalania lub zastosowanie dodatkowego źródła ciepła.

ANATOLIY M. PAVLENKO

Kielce University of Technology

e-mail: apavlenko@tu.kielce.pl

HANNA V. KOSHLAK

Ivano-Frankovsk National Technical University Oil and Gas, Ukraine

e-mail: annready@yandex.ua

JERZY ZB. PIOTROWSKI

Kielce University of Technology

e-mail: piotrowski@tu.kielce.pl

DETERMINATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN THE PHASE-CHANGE HEAT STORAGE DEVICE

Abstract

This article describes information about the research of the heat transfer coefficient from air to water on the basis of comparison of theoretical calculations with the use of mathematical modeling and experimental studies of small copies of the heat accumulator to operate in the charging mode and discharging process without phase change.

Keywords: heat transfer coefficient, heat accumulator

1. Introduction

Efficient use of heat energy during operation of the heat supply system is impossible without solving the problem of accumulation of heat. The most promising is the use of the phase-change heat storage device, because it provides a high density of stored energy, small changes in temperature and stable temperature at the outlet of the accumulator [1]. Important thermal characteristics of the heat exchanger is the heat transfer coefficient from the working fluid (air) to a heat exchange surface with heat storage material (water). Moreover, one should distinguish between local and overall heat transfer coefficient. The first relates to locally minor part of the surface, the second to the entire heat exchange surface [2].

2. Review of recent sources of research and publications

Similar heat exchange processes which taking place in the heat storage device occurs when fluid flow around the horizontal pipe and when flow of liquid or gas ablation the horizontal plate, calculated according to formulas given in the sources [3, 4] the value of the heat transfer coefficient is in the range of 2.3 W/m²C to 13 W/m²C. In a complete performance

description heat transfer processes in this type heat storage device is reduced to a multidimensional nonlinear nonstationary Stefan problem [5, 6], constrained convection in the liquid phase. The nonlinearity of the mathematical model is to change the heat transfer coefficient depending on the mode of movement that takes place in the heat exchanger, changes temperature difference in time between the heat exchange mediums, the direction of circulation of the supply air, that is why its definition with the use of experimental studies is one of the main tasks.

3. Formulation of the problem

The aim of this work is the determination of the heat transfer coefficient from air to water on the basis of comparison of theoretical calculations with the use of mathematical modeling and experimental studies of small copies of the heat accumulator to operate in the charging mode and discharging process without phase change.

4. The basic material and results

For mathematical simulation of transition heat transfer processes inside the heat storage device as the

basis used known linear mathematical model [7]. To determine the change of temperature of air and water along the length of the heat accumulator will divide it into sections and make up a system of equations of heat balance for each:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_w \cdot c_w \cdot \frac{dt_w}{dz} + m_{ice} \cdot c_{ice} \cdot \frac{dt_{ice}}{dz} + r \cdot \frac{dm_{ice}}{dz} = \\ \alpha_i \cdot F_i \cdot \left(\frac{t_{air}^{in} + t_{air}^{out}}{2} - t_i \right) \\ c_{air} \cdot G_{air} \cdot \frac{dt_{air}}{dz} = \\ \alpha_i \cdot F_i \cdot \left(\frac{t_{air}^{in} + t_{air}^{out}}{2} - t_i \right) \end{array} \right. \quad (1)$$

where: m_w – the mass of water in the i -th section of the accumulator, kg; c_w – heat capacity of air, kJ/kg·K; m_{ice} – the mass of ice in the i -th section of the accumulator, kg; c_{ice} – heat capacity of ice, kJ/kg·K, $\frac{dt_{ice}}{dz}$ – changes in ice temperature over a period of time $\frac{dt_w}{dz}$ – changes in water temperature over a period of time $\frac{dt_w}{dz}$, K; α_i – the heat transfer coefficient in the i -th section of the battery, W/m²·K; G_{air} – mass flow of supply air, kg/s; $\frac{t_{air}^{in} + t_{air}^{out}}{2}$ – average temperature of air in the accumulator, K; F_i – heat exchange surface area in the i -th section of the accumulator, which is in contact with the air, m²; t_i – the temperature of the heat exchange surface in the i -th section of a heat accumulator, K; r – latent heat of melting, kJ/kg; $\frac{dm_{ice}}{dz}$ – change in ice mass for the period of time $\frac{dt_{air}}{dz}$ – changes in water temperature over a period of time $\frac{dt_w}{dz}$, K.

The first equation in system (1) is the thermal balance of the water, and the second is the thermal balance of the air. To calculate this problem using digital methods, it is necessary to divide the storage tank into n layers with equal mass of heat storage material, which are arranged along the flow of air. For modeling the processes of charging and discharging, and to apply in practice mathematical models are collected pilot plant and conducted a series of experimental measurements.

To measure the temperature in the heat accumulator are used electronic temperature sensors with the

output values of the temperature on the digital display (the measurement accuracy 0.1 K), for measuring air velocity – microanemometer. From the equations of thermal balance of the heat storage device define the formulas which allows to find the average temperature of the air and changes in water temperature for the i -th layer using the method of finite differences [8]:

$$\overline{t_{air}} = \frac{2 \cdot c_{air} \cdot G_{air} \cdot t_{air}^{in} / z + \alpha_i \cdot F_i \cdot t_i}{\alpha_i \cdot F_i + 2 \cdot c_{air} \cdot G_{air} / z} \quad (2)$$

$$\Delta t_w = \frac{\alpha_i \cdot F_i \cdot (t_{air} - t_i)}{m_w \cdot c_w / z} \quad (3)$$

Basic characteristics of accumulator:

- 1) overall dimensions:
a × b × h = 600 × 600 × 1150 mm;
- 2) mass of heat storage material (water) – 98 kg;
- 3) cross-sectional area – 0.04 m²;
- 4) size of heat transfer surface – 2.26 m²;
- 5) equivalent diameter for the passage of air – 16,4 mm;
- 6) diameter of the duct for inflow of air – 100 mm.

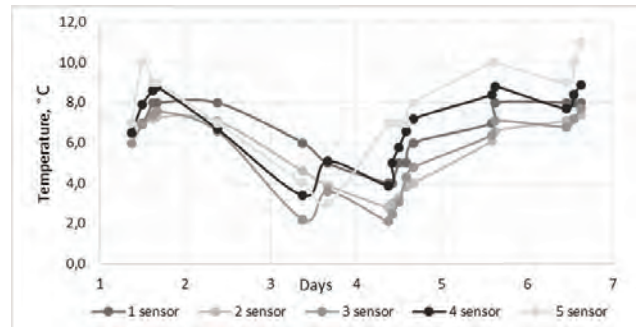


Fig. 1. Graph of the temperature distribution in heat storage device with a daily changing temperature of outdoor supply air (experimental data)

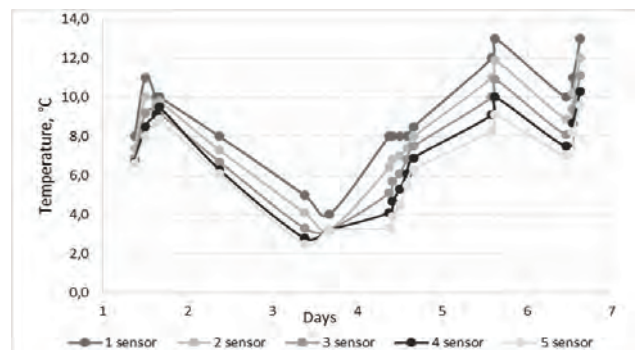


Fig. 2. Graph of the temperature distribution in heat storage device with a daily changing temperature of outdoor supply air (mathematical modeling)

The experiment was conducted in February duration of six days. The temperature of the air which flow to the accumulator was equal and changed as the outdoor air temperature. From the graphs it is seen that in the heat storage device alternate the processes of charge and discharge, the range of temperature fluctuations is $4 \div 5^\circ\text{C}$.

The temperature distribution in the accumulator calculated for different values of heat transfer coefficients and determined the average deviation [8, 9] of theoretical temperature values from experimental. The heat transfer coefficient can be determined from the conditions of equality of this deviation to zero.

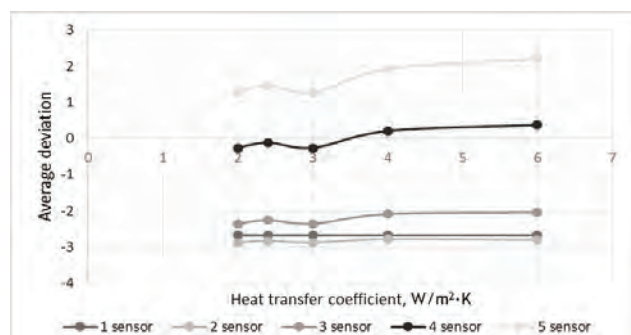


Fig. 3. Determination of the heat transfer coefficient with daily temperature change of supply air

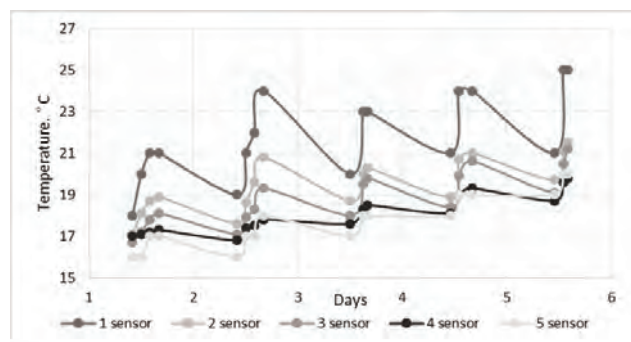


Fig. 4. Graph of the temperature distribution in heat storage device with using additional heat source (experimental data)

Also conducted a series of experimental studies for the mode of operation using artificial sources of heat (inside the supply air duct was installed electric incandescent lamp) to get more stable temperature of the air which entering to the heat accumulator. For the five day period of studies temperature in the heat storage device has changed to $7 \div 7.5^\circ\text{C}$.

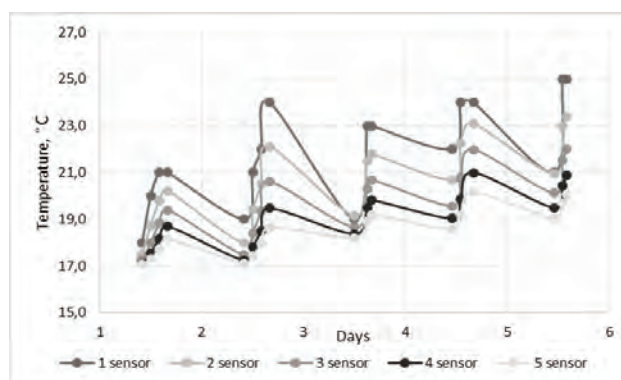


Fig. 5. Graph of the temperature distribution in heat storage device with using additional heat source (mathematical modeling)

Heat transfer coefficient is affected by the speed and direction of air movement, temperature difference and hydrodynamic conditions of the heat exchange process.

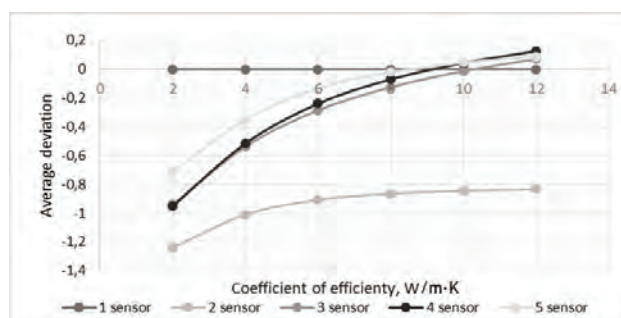


Fig. 6. Determination of the heat transfer coefficient with using additional heat source

Most precisely it is possible to determine the heat transfer coefficient by analyzing the average deviation of air temperatures in the locations of the sensors 3, 4 and 5.

5. Conclusions

1. Compiled non-stationary mathematical model for determining the temperature distribution in the cross sections of the phase-change heat storage device.
2. Made experimental researches of heat exchange processes in the heat storage device and theoretical calculations using mathematical models.
3. On the basis of the obtained theoretical and experimental temperature distributions calculated their average deviation and the coefficient of heat transfer: for the mode of work with the daily change of temperature it is $3.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, for the mode of charging with the use of artificial sources of energy it is $9.5\text{--}10 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

References

- [1] Bystrov V.P., Livchak A.V.: *Teploakkumuljatory ispol'zovaniem fazovogo perehoda Voprosy jekonomii teplojenergeticheskikh resursov v sistemah ventiljacii i teplosnabzhenija: sb. nauch. trudov*. M.: Izd-vo CNII-JePIO, (1984), pp. 75-90.
- [2] Pavlenko A., Koshlak H.: *Oradea*, Editura Universităţii din Oradea, (2015), p. 136.
- [3] Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.: *Teploperedacha*, Energija, (1965), p. 424.
- [4] Miheev M.A., Miheeva I.M.: *Osnovy teploperedachi*. M.: Jenergija (1977), p. 344.
- [5] Stefan problem Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Stefan_problem.
- [6] Vuik C.: *Some historical notes about the Stefan problem*, 4 (11) (1993), pp. 157-167.
- [7] Chistovich S.A., Aver'janov V.K., Tempel' Ju.Ja., Bykov S.I.: *Avtomatizirovannye sistemy teplosnabzhenija i otopenija*, Strojizdat (1987), p. 248.
- [8] Fokin K.F.: *Stroitel'naja teplotekhnika ograzhdajushhih chastej zdanija*, Strojizdat (1973), p. 287.
- [9] Minashkin V.G., Shmojlava R.A. and others: *Teorija statistiki*, EAOI (2008), p. 296.
- [10] Gromyko G.L.: *Teorija statistiki*, INFRA-M (2005), p. 476.

MARIA NOWAK (Font size 10 pt Times New Roman)
Kielce University of Technology
e-mail: mmmm@tu.kielce.pl

HOW TO PREPARE THE MANUSCRIPT (Font size 14 pt Times New Roman)

Abstract

*The abstract should not exceed 10 lines. It should provide information about the objectives of the work, methods used and test results obtained in the course of the experiments/analyses.
(Font size 10 pt Times New Roman Italic)*

Keywords: phrases, words (Font size 10 pt Times New Roman)

1. Introduction

The introduction should present the background of the work (font size 11 pt Times New Roman).

2. Main text

2.1. General information

The paper volume should not exceed 8 pages of A4 size with font size of 11 pt (Times New Roman). The number in square brackets [1] should be used for quotations. The paper should be sent by email to sae@tu.kielce.pl. The papers in the journal are reviewed.

2.2. Figures

Figures (in black and white or colour) should be of good quality and numbered with the sequence of their appearance in the text. They should be centered and have a caption of 10 pt size. High resolution files *.JPG, *.WMF, *.CDR, *.TIFF, *.EPS, *.BMP files should be used and inserted into the text as well as sent as separate files. 10 pt spacing should be left between the figure and the text.

2.3. Tables

Tables should be centered. Titles should be placed above the tables and written with font size of 10 pt (Times New Roman). The same applies to the text in the table (see example below).

Table 1. Title of the table.

No	table	table	table
1	table	table	table
2	table	table	table
3	table	table	table

2.4. Equations

Equations and formulas should be centered and numbered in brackets. 11 pt spacing should be left between the equation and the text above and below it.

3. Conclusions

References (arranged in the citing order):

- [1] Nowak M.: *Modelowanie konstrukcyjne (Structural modelling)*. Postępy Technologiczne 10 (2000), pp. 30-34.
[2] Zarylski R.: *Pomiary dynamiczne (Dynamic measurements)*. WNT, Warszawa 1971.
(Font size 10 pt Times New Roman)

Maria Nowak

Tytuł w języku polskim

1. Wprowadzenie

2. Tekst artykułu

Tekst w języku polskim ma odpowiadać swoim układem wersji angielskiej, może być skrócony. Nie powinien zawierać tabel, rysunków, wzorów, a jedynie odniesienie do tych, które znajdują się w wersji angielskiej. Objętość artykułu nie powinna przekraczać 8 stron czcionką 11 (Times New Roman). Bibliografię należy umieszczać w nawiasie kwadratowym [1] i numerować w kolejności alfabetycznej. Artykuły należy przesłać na adres sae@tu.kielce.pl. Artykuły są recenzowane.

3. Wnioski

THE REVIEW PROCESS

The following requirements need to be met by the paper:

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

The reviewers:

A. Bartosik, R. Chatys, R. Dachowski, O. Moroz, L. Lichołai,
Z. Rymarczyk, V. Sidorov, Z. Tartachynska, A. Zwierzchowska

