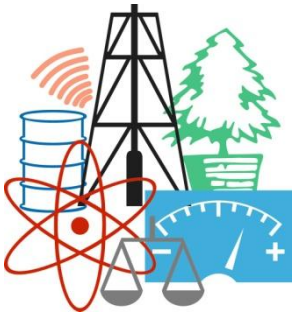
WASTE FORUM



ELECTRONIC PEER-REVIEWED JOURNAL ON ALL TOPICS
OF INDUSTRIAL AND MUNICIPAL ECOLOGY

RECENZOVANÝ ČASOPIS PRO VÝSLEDKY VÝZKUMU A VÝVOJE
Z OBLASTI PRŮMYSLOVÉ A KOMUNÁLNÍ EKOLOGIE

YEAR 2019 **No. 4**

Pages 295 – 414

Patron od the issue / Patron čísla

CENTRUM EXPERTŮ

www.expert.wasten.cz

© Czech Environmental Management Center 2019

OBSAH / INDEX

Úvodní slovo šéfredaktora / Editorial **297**

Pro autory / For authors **298**

Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí TVIP 2020 **299**

Theoretical and Methodological Aspects of Transition to a Circular Economy **300**
Teoretické a metodologické aspekty přechodu na oběhové hospodářství
Gabriela VACEKOVÁ, Michal PLÁČEK, Jana SOUKOPOVÁ

Development of operational functional sample of biotrickling filter with integrated heating of circulating liquid phase **308**
Vývoj provozního funkčního vzorku biotrickling filtru s integrovaným ohřevem cirkulační kapalné fáze
Jiří HENDRYCH, Jiří KROUŽEK

Observation of solid pollutants flowing during solid alternative fuel combustion **319**
Pozorovanie prúdenia emisií tuhých častíc počas spaľovania tuhého alternatívneho paliva
Nikola KANTOVÁ, Michal HOLUBČÍK, Jozef JANDAČKA, Alexander ČAJA

Characteristics of PM_{10}, $PM_{2.5}$ and NO_x pollutants in urban environment **325**
Charakteristiky znečisťujúcich látok PM_{10}, $PM_{2.5}$ a NO_x v mestskom prostredí
Dusan JANDACKA and Daniela DURCANSKA

***Paulownia Wallachia* a jej bioplynový potenciál** **333**
Paulownia Wallachia and its biogas potenciál
Michaela PLEKANCOVÁ, Lucia IVANOVÁ, Petra SZABOVÁ, Hela RUTZKÁ, Igor BODÍK

Vliv teploty na produkci bioplynu fermentačních zbytků **343**
Influence of temperature on biogas production from fermentation residues
Martin ŠOTNAR

The application of treated wastewater for the irrigation of fast-growing trees - field experiments on constructed wetland **350**
Opětovné využití odpadních vod při závlaze plantáží rychle rostoucích dřevin – Poloprovozní zkoušky na kořenové čistírně
Michal ŠEREŠ, Miloš ROZKOŠNÝ, Hana HUDCOVÁ, Pavel ŠALANDA, Petra INNEMANOVÁ, Pavel SEDLÁČEK

Waste reduction through using modern methods of construction **361**
Znižovanie množstva odpadov pomocou moderných metód výstavby
Marcela SPIŠÁKOVÁ, Mária KOZLOVSKÁ

Seldom Used By-product from Trimming Cement-bonded Particleboard Shows Potential for Modifying Building Materials Composition **368**
Vedlejší produkt s potenciálem pro modifikaci složení cementotřískových desek
Tomas MELICHAR, Jiri BYDZOVSKY, Amos DUFKA

Vliv prachového odpadu s obsahem silikátové matrice a organického plniva na vlastnosti cementových kompozitů **378**
Influence of Dust Waste Containing a Silicate Matrix and Organic Filler on Properties of Cement Composites
Tomas MELICHAR, Jiri BYDZOVSKY

Stavební systém s vysokým obsahem recyklovaných surovin na bázi mikromletého betonu **391**
Building system with a high content of recycled materials based on micronized concrete
Zdeněk PROŠEK, Jan TREJBAL, Pavel TESÁREK, George KARRA´A

Motivácia občanov Slovenska k triedeniu komunálneho odpadu **399**
Motivation of citizens of the Slovak Republic to separate municipal waste
Michal STRIČÍK, Monika BAČOVÁ, Monika ČONKOVÁ

WAST*en* Centrum expertů **414**

WASTE FORUM – recenzovaný časopis pro výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii
ISSN: 1804-0195; www.WasteForum.cz. Vychází čtvrtletně.
Vychází od roku 2008, od roku 2017 je indexován v databázi SCOPUS..
Ročník 2019, číslo 4
Vydavatel: CEMC – České ekologické manažerské centrum, z.s., IČO: 45249741, www.cemc.cz
Adresa redakce: CEMC, ul. 28. pluku 524/25, 101 00 Praha 10, ČR, fax: (+420) 274 775 869
Šéfredaktor: Ing. Ondřej Procházka, CSc., tel.: (+420) 723 950 237, e-mail: prochazka@cemc.cz, wasteforum@seznam.cz
Redakční rada: Ing. Vratislav Bednařík, CSc.; doc. Ing. Vladimír Čablík, Ph.D.; prof. Dr. Ing. Miroslav Černík, CSc.; prof. Ing. Tomáš Havlík, DrSc.; prof. Ing. František Hrdlička, CSc.; Ing. Slavomír Hredzák, CSc.; doc. Ing. Emília Hroncová, PhD.; prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.; prof. Ing. František Kaštánek, CSc.; prof. Ing. Mečislav Kuraš, CSc.; prof. Mgr. Juraj Ladomerský, CSc.; prof. Ing. Petr Mikulášek, CSc.; prof. Norbert Miskolczi; prof. Ing. Lucie Obalová, Ph.D.; Ing. Miroslav Punčochář, CSc., DSc.; Ing. Klára Slezáková, PhD.; Ing. Lenka Svecova, Ph.D.; doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.; prof. Ing. Lubomír Šooš, PhD.; prof. dr. hab. inž. Barbara Tora.
Web-master: Ing. Vladimír Študent
Redakční uzávěrka: 8. 10. 2019. **Vychází:** 18. 12. 2019

Patronem tohoto čísla je WASTen Centrum expertů – www.expert.wasten.cz

Úvodní slovo šéfredaktora

Vážení čtenáři,

v předmluvě minulého čísla jsem slíbil statistiku počtu příspěvků zaslaných do redakce a počty publikovaných a odmítnutých článků.

Z důvodu úspory místa (i své práce) jsem se soustředil na poslední tři roky, kdy je WF indexován ve SCOPUSu. Pozorné čtenáře upozorňuji, že ne vždy souhlasí součet publikovaných a odmítnutých článků s počtem článků v redakci. Příspěvek, o kterém se recenzent vyjádří, že je třeba jej přepracovat, bývá obvykle přesunut do dalšího čísla. V některých případech se to však stihne i s opětovným posouzením recenzentem v rámci jednoho čísla. Zde je slíbená statistika:

Číslo	Počet článků v redakci	Počet článků publikovaných/z toho v angličtině	Počet článků odmítnutých nebo vrácených k přepracování
1/2017	4	3/2	1
2/2017	12	7/4	5
3/2017	16	12/3	4
4/2017	17	14/7	3
1/2018	14	9/6	5
2/2018	24	20/12	4
3/2018	19	13/12	6
4/2018	19	16/12	3
1/2019	10	5/3	5
2/2019	20	11/3	9
3/2019	17	12/9	9
4/2019	14	12/7	5

Pravidelně se mne autoři ptají na impakt-faktor. Ten je však navázaný na Web of Science, kde WF zatím indexován není. Loni jsem o to požádal, ale nedávno mi sdělili, že až příští rok. Nicméně SCOPUS má rovněž své hodnocení časopisů, tzv. CiteScore, jehož hodnota pro WF za rok 2018 byla 0,08.

Výši tohoto skóre či v budoucnosti impakt-faktoru osobně nemohu nijak ovlivnit, vedle toho, že spolu s recenzenty budeme hlídat, aby vycházely jen kvalitní články. Významně to však mohou ovlivnit sami autoři, když své, ale hlavně cizí články z WF, budou citovat a nejlépe ve svých publikacích v jiných časopisech. Je to ostatně v jejich vlastním zájmu!

A nakonec zvu všechny čtenáře i autory tohoto časopisu na Týden výzkumu a inovací pro praxi TVIP 2020, který se koná 24. – 26. 3. 2020 v Hustopečích, který pořádá České ekologické manažerské centrum, vydavatel tohoto časopisu. Klíčovou součástí TVIP je tradičně symposium Výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii ODPADOVÉM FÓRUM 2020, jehož je WF mediálním partnerem. Díky tomu mohou být příspěvky tam prezentované následně publikovány také v tomto časopise. Více informací najdete v pozvánce na konci čísla nebo na www.tvip.cz. Zde jen to nejdůležitější: Uzávěrka přihlášek příspěvků je 15. ledna 2020.

Ondřej Procházka

Pro autory

WASTE FORUM je časopis určený pro publikování původních vědeckých prací souvisejících s průmyslovou a komunální ekologií. Tj. nejen z výzkumu v oblasti odpadů a recyklace, jak by mohl naznačovat název časopisu, ale i odpadních vod, emisí, sanací ekologických zátěží atd. Vychází pouze v elektronické podobě a čísla jsou zveřejňována na volně přístupných internetových stránkách **www.WasteForum.cz**.

Do redakce se příspěvky zasílají v kompletně zalomené podobě i se zabudovanými obrázky a tabulkami, tak zvaně ***„printer-ready“.*** Pokyny k obsahovému členění a grafické úpravě příspěvků spolu s přímo použitelnou **šablonou grafické úpravy** ve WORDu jsou uvedeny na www-stránkách časopisu v sekci **Pro autory.** Ve snaze dále rozšiřovat okruh možných recenzentů žádáme autory, aby současně s příspěvkem napsali tři tipy na možné recenzenty, samozřejmě z jiných pracovišť než je autor či spoluautory. Je vždy dobré mít rezervu.

Publikační jazyk je čeština, slovenština a angličtina. Preferována je angličtina a v tom případě je nezbytnou součástí článku na konci název, kontakty a abstrakt v českém či slovenském jazyce, přičemž rozsah souhrnu není shora nijak omezen.

Vydávání časopisu není nikým dotované. Proto, abychom příjmově pokryli náklady spojené s vydáváním časopisu, vybíráme publikační poplatek ve výši 500 Kč za každou stránku (bez DPH). V případě nepublikování příspěvku v důsledku negativního výsledku recenzního řízení je tato částka poloviční.

Uzávěrka nejbližšího čísla časopisu WASTE FORUM je 8. ledna 2020, další pak 8. dubna.

For authors

WASTE FORUM is an electronic peer-reviewed journal that primarily publishes original scientific papers from scientific fields focusing on all forms of solid, liquid and gas waste. Topics include waste prevention, waste management and utilization and waste disposal. Other topics of interest are the ecological remediation of old contaminated sites and topics of industrial and municipal ecology.

WASTE FORUM publishes papers in English, Czech or Slovak. Articles submitted must include a abstract in Czech (Slovak) or English language, respectively.

Manuscripts for publication in the journal WASTE FORUM should be sent only in **electronic form** to the e-mail address prochazka@cemc.cz. Manuscripts must be fully formatted (i.e. printer-ready) in MS WORD. The file should have a name that begins with the surname of the first author or the surname of the corresponding author.

All articles submitted for publication in WASTE FORUM undergo assessment by two independent reviewers. The reviews are dispatched to authors anonymously, i.e. the names of the reviewers are not disclosed to the authors.

All papers that was not subjected to a peer-review are labeled in a header of each page by the text ***Not peer-reviewed and commercial papers.***

Revenue to cover at least the costs associated with the issuance of the magazine, we select a publication fee **500 CZK per each new page of the paper.**

The deadline of the next issue is on January 8, 2019, more on April 8, 2020.

TVIP 2020

Týden vědy a inovací pro praxi a životní prostředí

WWW.TVIP.CZ

24. – 26. 3. 2020 | HUSTOPEČE

Vážení příznivci aplikovaného výzkumu, dovolujeme si Vás pozvat na další ročník **Týdne výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí – TVIP 2020**, který proběhne ve dnech 24. – 26. března 2020 v Hustopečích u Brna. Letošní TVIP zastřešuje dvě tematicky specializovaná odborná setkání: konferenci **APROCHEM** a symposium **ODPADOVÉ FÓRUM**.

Odpadové fórum 2020

Výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii — 15. ročník

OVZDUŠÍ

- Čistění odpadních plynů a spalin
- Snižování a měření emisí
- Doprava a lokální zdroje
- Kvalita ovzduší a zdravotní dopady

VĚDA A VÝZKUM PRO OBĚHOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ

- Šance a bariéry cirkulární ekonomiky
- Nové zdroje surovin a energie
- Inovativní technologické postupy a inovativní technologie
- Nové materiály a jejich aplikace

ODPADY

- Systémové otázky odpadového hospodářství
- Materiálové, biologické a energetické využití
- Nebezpečné odpady, odstraňování odpadů
- Sanace ekologických zátěží a následků havárií

VODA

- Čištění průmyslových odpadních vod
- Získávání cenných látek z odpadních vod
- Recyklace vody
- Nakládání s kaly
- Kapalné odpady

RADIOAKTIVNÍ ODPADY

Aprochem 2020

Rizikový management 29. ročník

RIZIKA

- Posuzování a řízení rizik
- Management řešení konkrétních havarijních situací
- Významné rizikové faktory současnosti ovlivňující činnost rizikových manažerů
- Výzkum, legislativa a finanční zdroje využitelné pro tuto oblast

Pořadatel: CEMC – České ekologické manažerské centrum, z.s.
28. pluku 524/25, Praha 10, PSČ 101 00, tvip@cemc.cz, **www.tvip.cz**

Důležité termíny

Termín konání: 24. – 26. 3. 2020
Termín přihlášek příspěvků: do 15. 1. 2020
Termín plných textů: do 15. 2. 2020
Termín přihlášek účasti: do 1. 3. 2020

Theoretical and Methodological Aspects of Transition to a Circular Economy

Gabriela VACEKOVÁ[a], Michal PLAČEK[a], Jana SOUKOPOVÁ[b]

[a] Faculty of Social Sciences, Charles University, Smetanovo nábřeží 6, 110 00 Praha 1, Czech Republic,
e-mail: gabriela.vacekova@fsv.cuni.cz, michalplacek@seznam.cz
[b] Faculty of Economics and Administration, Masaryk University, Lipová 41a, 60200 Brno, Czech Republic, e-mail: jana.soukopova@econ.muni.cz

Abstract

The transition to a more circular economy has been adopted as a guiding principle in several national policies. The present paper reviews the international definitional, theoretical, and methodological approaches to the circular economy originating in the Western environment with a view to assessing their applicability in the (post-) transitional context of Central and Eastern Europe and to identifying the elements of their integrative conceptual core. The main finding is that scientific research on circular economy and circular business thinking takes two relatively independent directions, descriptive and normative, as it is grounded in two different methodological approaches. The paper provides definitional clarifications and policy implications for the Czech environment and shows that it is possible to use a starting point for further research on circularity that would not be based on dichotomous approaches but on integrity, a holistic approach.

Key words: *Circular Economy, Circular Business Thinking, Transformation Process, CEE*

Introduction

Having gone through a transformation to a market economy, the concept of circularity in the (post-) transitional European countries has tremendous potential. The achievement of this potential, however, depends on the ability of post-communist countries to deal with socio-economic and political challenges that are no less tremendous. Much of the work that needs to be done towards achieving the potential that circularity offers involves the scientific analysis and reconstruction of basic conceptual foundations. This paper aims to review the international definitional and theoretical approaches to a circular economy originating in the Anglo-Saxon environment with a view to assessing their applicability in the (post-) transitional context and identifying the elements of their integrative conceptual core.

The theoretical relevance and practical importance of the development of the circular economy [1,2,3] around the world has been experienced by the post-communist economies and other economies. The trend towards emerging circularity in the transitional economies of Central and Eastern Europe has grown in recent years. Recently, the interest of Western scholars has rapidly increased concerning what is hidden in the concept of the circular economy, how the 'what' can be captured in reality, and what is not hidden and why [4]. Although basic ideas about the circular economy can be found in several schools of thought and the idea behind a circular economy has existed for a long time [5] and can be traced even to the prehistoric era [6], only recently have forces pushed businesses to shift their attention and intensify their efforts to be 'less linear' [3].

The transition to a circular economy requires a radical change and new ways of thinking. The knowledge base of a circular economy requires substantial work on expanding, deepening, and interconnecting existing pieces of knowledge from multidisciplinary perspectives, and this holds true even more for the (post-) transitional context of Central and Eastern Europe. The accession of several post-communist economies to the European Union has involved the complete transformation of a former command economy to one based on the market. A transformation of the economy was the precondition

for a radical change in the political system to create a capitalist social system, a process that was much broader than the changes to the economy. It opened a space for circular business thinking. Has this space been sufficiently used by (post-) transitional economies? If so, how? And if not, why not?

Literature overview: A concept of circular economy

Recent years have seen a proliferation of scholarly publications on the circular economy [7]. Several concepts have been used to define it; nevertheless, there is not yet a commonly agreed definition [8]. Despite the lack of conceptualization, circularity has been attracting the attention of scholars, as the shift to a circular economy demands a understanding of how companies can introduce circularity into their business models [9]. Most studies have used a case study approach. This captures several aspects and context-based features in specific firms or sectors, but it also limits their generalization. Merli et al. [7] highlighted the circular economy as an evolving concept that still requires development to consolidate its definition, boundaries, principles, and associated practices.

The prevailing perception of the circular economy is that it is a better alternative to the dominant economic development model of 'take, make, and dispose' [2]. The circular economy approach does not reject or suppress the strategy of economic or business development; only the understanding of how sustainable development can be achieved, and for the gains and pains of which parties, has started to change. The space around the issue of sustainability continues to expand. The European Commission states that: 'In a circular economy the value of products and materials is maintained for as long as possible; waste and resource use are minimized, and resources are kept within the economy when a product has reached the end of its life, to be used again and again to create further value' [10].

According to Geissdoerfer et al [11] the circular economy „is based on the idea of putting private business into the service of the transition to a more sustainable system." The system view is stressed also by Merli et a the circular economy 'is based on the idea of putting private business into the service of the transition to a more sustainable system.' The system view is stressed also by Merli et al. [7] who stated that the circular economy 'proposes a circular system in which the value of products, materials and resources is maintained in the economy as long as possible' . Camacho-Otero et al [12] stated that a circular economy 'aims at decoupling value creation from waste generation and resource use by radically transforming production and consumption systems.' The circular economy is viewed as a 'business's business' and is predominantly concentrated on ways to operationalize the implementation of sustainability issues at environmental, economic, and social levels [7]. This is obvious from the definition of Sinclair et al [13] adapted from a leading advocate and proponent of the circular economy, the Ellen MacArthur Foundation: 'The circular economy is one that is restorative or regenerative by intention and design. It replaces the concept of the end-of-life of a product with one that emphasizes reuse, repair, remanufacturing or recycling 'through the superior design of materials, products, systems, and business models' [1].

The central aim of the circular economy is to create value through material retention and so to help resolve environmental sustainability problems by reducing resource extraction and waste streams and to support businesses moving towards sustainability by creating value for their stakeholders with profit through the reduction of costs for materials, energy, and production [14]. The core process of the circular economy is in redesigning linear processes and flows of 'materials, energy, labour and information' to more circular ones [1]. To support the transition of companies and the whole society to a circular economy, the European Union has created several political documents and has introduced several laws and regulations.

Stahel [14] explains the essence of five key principles of the circular economy, which he considers to be about stock optimization when viewing stock as wealth in the form of manufactured products, health, education, and skills. Those principles are: The smaller the loop (activity-wise and geographically), the more profitable and resource efficient it is – where activity-wise means: 'don't repair what is not broken, don't remanufacture what can be repaired, and don't recycle what can be remanufactured); in this point, Stahel also criticizes global recycling businesses. Loops have no beginning and no end, replacing the value-added concept of a linear economy. The speed of the circular flows is crucial: the efficiency of managing stock in the circular economy increases with a decreasing flow speed; this principle is extremely

important for product design in terms of the quality of design itself and the quality of material and components that influence how many times a product can be 'circled' in one level of the recovery options hierarchy from resell to reincarnation. Continued ownership is cost-efficient: reuse, repair, and remanufacture without a change of ownership save double transaction costs. A circular economy needs a functioning market.

Lewandowski [9] summarizes other key principles of the circular economy: design out waste/design for reuse; build resilience through diversity; rely on energy from renewable sources; think in systems; waste is food/think in cascades/share values (symbiosis). Another key principle of a circular economy is to drive systemwide change [15].

The Ellen McArthur Foundation [1] defines three principles: preserve and enhance natural capital by controlling finite stocks and balancing renewable resource flows – for example, replacing fossil fuels with renewable energy, or using the maximum sustainable yield method to preserve fish stocks; optimize resource yields by circulating products, components, and materials at the highest utility at all times in both technical and biological cycles – for example, sharing or looping products and extending product lifetimes; and foster system effectiveness by revealing and designing out negative externalities, such as water, air, soil, and noise pollution, climate change, toxins, congestion, and negative health effects related to resource use.

Based on these principles, the Ellen MacArthur Foundation proposed the ReSOLVE Framework, containing six business actions that can be understood as a tool for generating circular strategies and growth initiatives: Regenerate - shift to renewable energy and materials; reclaim, retain, and regenerate health of ecosystems and return recovered biological resources to the biosphere. Share - keep product loop speed low and maximize the utilization of products by sharing them among different users (peer-to-peer sharing of privately-owned products or public sharing of a pool of products), by reusing them through their entire technical lifetime (second hand), and by prolonging their lifetime through maintenance, repair, and design for durability. Optimize - increase performance/efficiency of a product; remove waste in the production and supply chains (from sourcing and logistics, to production, use phase, end-of-use collection etc.); leverage big data, automation, remote sensing and steering. All these actions are implemented without changes to the actual product or technology. Loop - keep components and materials in closed loops and prioritize inner loops. For finite materials, this means remanufacturing products or components and recycling materials. For renewable materials, this means anaerobic digestion and extracting biochemicals from organic waste. Virtualize - dematerialize resource use by delivering utility virtually: directly or indirectly. Exchange - replace old with advanced non-renewable materials, apply new technologies, and choose new products/services.

Four distinct ways to create value in a circular economy are identified by the Ellen MacArthur Foundation[1] in the conceptualization of different powers: power of the inner circle; power of circling longer; power of cascaded use; and power of pure circles. The hierarchy of 'powers' reflects the challenges for companies to overcome, the need for new resources, reengineering, and innovation in relationships and partner networks, as well as the redesign of value creation, delivery, and capture logic, and of course also the level or extent of circularity. As can be seen, a circular economy presents many challenges to the traditional linear business models and adding the focus on sustainability does not always help to solve the problems that the circular economy aims to address [16].

Methodology

An analysis of the literature shows that scientific research of the circular economy takes two relatively independent directions, as it is grounded in two different methodological approaches. The first approach is descriptive and based on non-normative methodology and the corresponding explanation tools that clarify the role of circular business thinking in the economy. The second approach turns in the normative direction. It is based on normative methodology and on the explication or interpretation of a researched topic. The contrast between these two different methodological approaches to the circular economy is a specific example of the current state of scientific discussion in the areas of economics and social sciences. The contrast takes the form of 'two cultures' [17] or, in terms of scientific methodology, a form of

commensurability or incommensurability between normative and non-normative statements about, or explanations of, a researched topic [18].

The general contradictions between economics and social sciences are reflected in the scientific discussion about the circular economy and influence the role and functions of system business thinking. Our approach is based on a critical evaluation of this discussion and offers a different solution. The solution is an attempt to depart from the existing traditional approaches and reach some synthesis. The paper works on the assumption that it is possible to use a starting point that would not be based on dichotomous approaches but on integrity.

The methodological basis for this integrity is the holistic approach [18,19], enabling a shift towards the integrative theory. As Dewey [20] observed: 'the ultimate end and test of all inquiry is the transformation of a problematic situation (which involves confusion and conflict) into a unified one.' The paper is based on Dewey's theory of inquiry as it aims to go beyond the 'fact-value dichotomy' and follow the tradition of pragmatist philosophy, going back primarily to Dewey. The main research interest of pragmatist philosophy is in examining the societal problem-solving process. The paper seeks answers on how the circular economy participates and contributes to this process which indeed integrates normative and positive aspects: there is a normative imperative to solve problems, and there is positive interest in discovering how circular business thinking can actually do it.

The need for integrative research of the circular economy is determined by two groups of factors. The first group is the new social reality. This new reality includes transformations of the positions, roles, and functions of all market subjects. Therefore, this represents an objective side of the issue: the ontological layer of the circular economy. Recent and ongoing changes in the position and functioning of the circular economy require a corresponding scientific approach and tools that would enable proper research of these changes. Traditional existing approaches offer dichotomous solutions: either explanations or interpretations. The integrative theory bridges this dichotomy, offering a comprehensive view of the current issues related to the circularity phenomenon. The ambition of this paper is to contribute to the theoretical elaboration of the issue.

Two types of research methods were used to meet the paper's goal. An analysis of the two scientific approaches was used specifically in searching through theoretical resources. The synthesis method and the generalization method were applied in particular in connection with formulating theoretical conclusions. The paper is organized around two major themes. The first theme presents the conceptualization of the circular economy in the Anglo-Saxon environment. The next part is an inquiry that provides an analysis of the economic determinants of circular business thinking in the (post-) transitional area. This opens space for examining the issue from methodological and conceptual points of view. The paper ends by drawing conclusions and making suggestions for further research.

Results and discussion: The transition to a circular economy

The paper is based on the idea of 'evolutionism'. Using the example of Czechoslovakia (or rather the Czech Republic), we research the genesis of circular business thinking in the Czech society. We study the transformations that the Czech civil society has been undergoing and the traces left behind by previous historical developments. Such methodological anchoring enables the generalization of the research results. The Czech Republic is a typical country with a communist and post-communist history. Thus, the 'history is enrooted' in the evolution of Czech civil society organizations. This fact manifests itself in their path-dependent behaviour. The intensity of the impact of the path dependence depends on these key factors: the time spent on the path (the actual time the path dependence lasted) and the intensity of the influence of the past on the evolution of the civil society organizations. It is a non-ergodic process. Therefore, we are still encountering the impact of path dependence on the evolution of Czech civil society, even over thirty years after the fall of the communist regime.

These arguments are valid only from the purely theoretical point of view. As Sepp and Frear [23] noted, informal institutions differed between the Eastern and Western world. Informal institutions were one of the biggest problems during the transition. While formal institutions such as banking systems and commercial codes could be, and indeed were, implemented fairly quickly, changes in informal

institutions, reflecting people's attitudes towards political parties, elections, corruption, accuracy, and punctuality, are taking decades to be transformed. According to Dahrendorf [21], such changes need at least sixty years. What if this is the case with the transition to a circular economy as well?

The transformation in the economy is considered as both a major driver and an obstacle to the implementation of a circular economy [9,22]. The concept of the transitional economy came into existence at the end of the 1980s when all the countries concerned gradually abandoned the path towards socialism they had followed under the leadership of the Communist Party. While it can be argued that some elements of the market economy also existed in a centrally-commanded economy (as the state might have intervened in the market), the key feature of the communist regime was the way in which the economy was controlled or planned by the state and not driven by market forces [23].

In 1989 and 1990, citizen movements were decisive in overturning the political order and, with it, the economic configuration in Central and Eastern European countries [24]. There are big differences in the extent to which individual countries have implemented the development of market economies and the growth of democratic institutions that are seen as complementary to them. Today the transition to the market economy of the post-communist countries is seen as far from complete but generally typical of states at similar stages of economic development. This is a feature making them worth study in regards to the economic development of Western countries, including the circularity phenomenon.

Despite the lack of conceptualization, particularly for the (post-) transitional context, the circularity phenomenon has been attracting the attention of scholars also in the post-communist countries. In terms of business thinking innovation, the focus is on the transformation of existing business models. Business model innovation is considered an important part of a company's competitive advantage [25]. Recently, it has been presented as a fundamental aspect of the transition to a more sustainable economy [26]. At the macro level, the transformation of the economy has included changes to its structure: in terms of different sectors, industries, branch specializations, and products; in terms of the size of corporations; and in the nature of foreign trade. The transformation of the economy was the precondition for a radical change in the political system to create a capitalist social system, a process that was much broader than the changes to the economy. This holds true even for the circular business thinking.

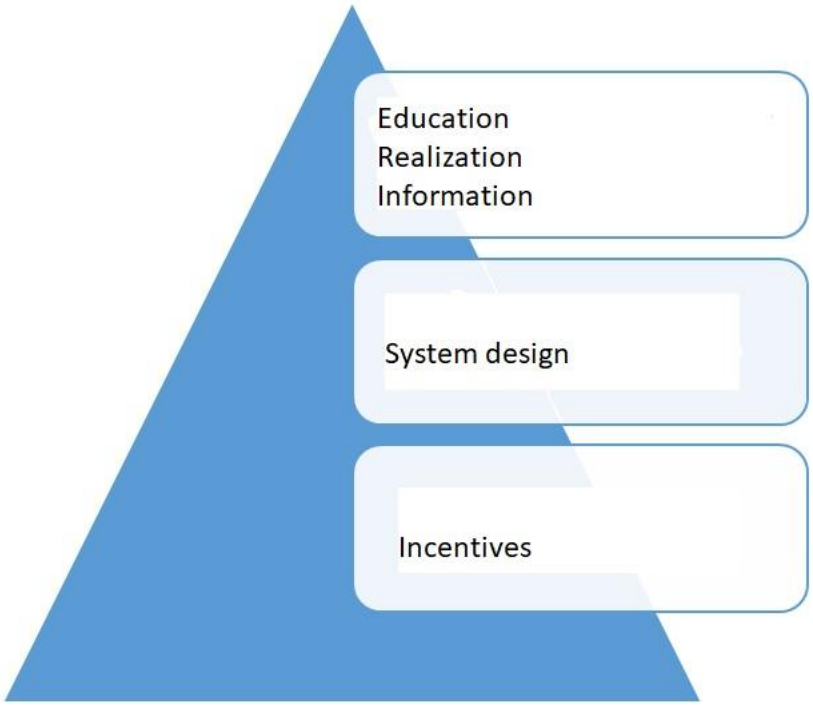
This transformation has involved systemic, institutional, and structural changes [27]. The transformation process is often criticized for not being consistently secured through institutional changes. The lack of a clear understanding of the circularity phenomenon on the micro level is also implicitly related to this criticism, which is the result of competition between economists and lawyers. Theoretical economists outside the transitional countries (especially consultants from the International Monetary Fund) were fervent proponents of the ideal (but hardly feasible) immediate implementation of the rule of law. According to one prominent critic of the economic transition, Joseph Stiglitz, the rule of law means well-defined and enforced property rights, broad access to these rights, and predictable rules for resolving property rights disputes in contrast to the non-existing protection of investors' returns from the confiscation of minority shareholders from 'tunnelling' – asset stripping typically conducted by the former socialist managers[28]. Such critics claimed that 'the economists had overtaken lawyers'[29] or that 'the transformers turned off the lights for a while to make embezzling easier'[33].

While the concept of a transitional economy has always been a kind of simplification or abstraction, all of the economies concerned, even after 30 years of transformation, share certain characteristics essentially because the institutions of their democracies and their market economies are not fully developed [34]. This lack of development also holds true for the circular economy. The circular economy is a rapidly developing phenomenon strongly promoted by the European Union through different policies and legislation.

Circular business thinking surveys in the Czech Republic show that consumers are aware of environmental issues. However, a personal benefit (healthy lifestyle, cost savings, etc.) always outweighs more abstract issues such as global warming or scarce resources. Czechs are willing to contribute to solving these problems, but the solutions should not represent too much effort and should be simple and practical [30]. Thus, compared with the situation in Western countries, the causal nexus of the circular economy in the Czech Republic is shifted from the level of individual business thinking to the level of an institutional environment. Put differently, in the Czech Republic, the circularity phenomenon

presents a legal and institutional phenomenon rather than an object of individual economic choice. An indication of this argument is that the legal and institutional definition of circularity is quite ambiguous. Institutional ambiguities are certainly acknowledged in the Western literature, which is sensitive to the existence of this phenomenon.

In terms of targeting public policies, individual instruments are categorized in the following diagram, where the top of the pyramid represents the most important mechanisms.



Scheme 1: Public policy targeting

Source: Own elaboration based on Slavik[30]

Regarding the mechanism category, it is necessary to explain why we want to change the system. These activities include education, curriculum adjustments, campaigns, websites, apps, and influencers. It is similarly important to explain how the transformation will be undertaken, including the redistribution of costs and revenues. For the success of this phase, information needs to be delivered to key stakeholder groups in an appropriate form and through appropriate channels. The next important step is the design of the system itself. It is necessary to verify and know the citizens' demands, requirements, and ideas about the circular economy. For an effective design, data must be constantly collected and evaluated, and evidence-based policy implemented. The design incentive is an important mechanism. In developing this mechanism, we should not only focus on citizens and businesses; the public administration should play a leading role that should be conducted by example through a clear strategy, prepared capacities, implementation of circular economy principles into key strategies, competitions, etc. Public participation through participatory budgets, crowdsourcing, forums, round tables, and more is important. The last category of incentive are the incentives themselves, which can be accomplished through Pigouvian taxes and subsidies.

Concluding remarks

Circularity has received increasing attention in the scientific literature worldwide. This literature is, however, largely Anglo-Saxon and it is not perfectly suited to the transitional economies. The lack of relevant research on circularity in the post-communist countries of Central and Eastern Europe shows a considerable gap that strongly indicates the need for deeper insight. This paper contributes to the conversation by rethinking the existing literature in the context of transitional economies, focusing on the

merits and limits of transition to a circular economy in (post-) transitional economies. In addition to its methodological insight, it provides a new perspective on the design of the transformation processes leading to circular business thinking. Macroeconomic reflections should follow the economic structure, consumption, and the energy policy mix. From the micro perspective, the focus should be on the conceptualization of the circular economy transformation on the municipal level. Furthermore, the paper aims to create space for discussing critical implications and making suggestions for further research.

Acknowledgement

This research received funding from the Technology Agency of the Czech Republic (TL01000305).

References

1 Ellen MacArthur Foundation: Towards the Circular Economy. Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition.

2 Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S.: A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner production, 114, 11 – 32.

3 Lieder, M., & Rashid, A. : Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. Journal of Cleaner production, 115, 36 – 51.

4 Homrich, A.S., Galvão, G., Abadia, L.G. and Carvalho, M.M. : The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. Journal of Cleaner Production, Vol. 175, 525 – 543.

5 Murray, A., Skene, K. and Haynes, K. : The circular economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. Journal of Business Ethics, Vol. 140, No. 3, 369 – 380.

6 Park, J. Y. and Chertow, M. R. : Establishing and testing the "reuse potential" indicator for managing wastes as resources. Journal of Environmental Management, Vol. 137, 45 – 53.

7 Merli, R., Preziosi, M. & Acampora, A. : How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. Journal of Cleaner Production, 178, 703 – 722.

8 Kirchherr, J., Reike, D. & Hekkert, M. : Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation and Recycling, 127, 221 – 232.

9 Lewandowski, M. : Designing the business models for circular economy—Towards the conceptual framework. Sustainability, 8(1), 1 – 28.

10 EC (European Commission). : Circular Economy Package: Questions and Answers.

11 Geissdoerfer, M., Morioka, S. N., de Carvalho, M. M. & Evans, S. : Business models and supply chains for the circular economy. Journal of Cleaner Production, 190, 712 – 721.

12 Camacho-Otero, J., Boks, C. and Pettersen, I. : Consumption in the Circular Economy: A Literature Review. Sustainability, 10(8), 1 – 26.

13 Sinclair, M., Sheldrick, L., Moreno, M. and Dewberry, E. : Consumer Intervention Mapping—A Tool for Designing Future Product Strategies within Circular Product Service Systems. Sustainability, Vol. 10, No. 6, 1 – 21.

14 Stahel, W. R. : Re-use and recycling: Waste prevention and resource savings in utilization. Ekistics, Vol. 60, 358 – 359.

15 Wastling, T., Charnley, F. and Moreno, M. : Design for Circular Behaviour: Considering Users in a Circular Economy. Sustainability, Vol. 10, No. 6, 1 – 21.

16 Klapalová, A. : Demonstrator baseline and market characteristics report. H2020 Deliverable.

17 Snow, C. P. : The two cultures. Cambridge University Press.

18 Ochrana, F. : Methodology of social science. Prague: Charles University in Prague, Karolinum Press.

19 Fay, B. : Current Philosophy of Social Sciences. Multicultural Approach. Prague: Sociologické nakladatelství.

20 Dewey, J. : The theory of inquiry. New York: Holt, Rinehart & Wiston.

21 Dahrendorf, R. : Reflections on the revolution in Europe. New York: Routlege.

22 EMF (Ellen Macarthur Foundation): Delivering the Circular Economy: a toolkit for policymakers. V1.1. Ellen MacArthur Foundation, 1 – 177.

23 Shleifer, A. and Treisman, D. : Normal countries: The east 25 years after communism. Foreign Aff., 93, 92 – 103.

24 Strachwitz, R. : Introduction. In Ch. Schreier (Eds.) 25 Years After: Mapping civil Society in the Visegrad Countries. Stuttgart: Lucius et Lucius Verlegsgesellschaft.

25 Spieth. P., Schneckenberg, D. & Ricart, J. : Business model innovation - state of the art and future challenges for the eld. R&D Management, 44, 237 – 247.

26 Klapalová, A. : Employee-driven innovation and reverse supply chain management. International Journal of Entrepreneurship and Innovation Management, 22(4 – 5), 489 – 510.

27 Lašek, J. : Structural aspects of Cczech economy transformation. Politická ekonomie, 46(1), 29 – 42.

28 Hoff, K., Stiglitz, J. : After the Big Bang? Obstacles for the emergence of the rule of law in post-communist societies. NBER WP 9282.

29 Stránský, J. : Co Klaus sám necítí, nikdy neposlechne. Interview for Hospodářské noviny, 8. 3. 2013.

30 Slavík, J. : Institucionální a ekonomická analýza využití bioodpadu v obcích. Available at: https://docplayer.cz/1391073-Institucionalni-a-ekonomicka-analyza-vyuziti-bioodpadu-v-obcich-jan-slavik-a-kol.html?fbclid=IwAR32G9jxdycF_vF14W1igKMqhlXkVA50VIIxhLVJNAJFg-azVrTCGNmbnAI

Teoretické a metodologické aspekty přechodu na oběhové hospodářství

Gabriela VACEKOVÁ[a], Michal PLAČEK[a], Jana SOUKOPOVÁ[b]

[a] Fakulta sociálních věd, Univerzita Karlova, Smetanovo nábřeží 6, 110 00 Praha 1,
e-mail: gabriela.vacekova@fsv.cuni.cz, michalplacek@seznam.cz
[b] Ekonomicko-správní fakulta, Masarykova univerzita, Lipová 41a, 60200 Brno,
e-mail: jana.soukopova@econ.muni.cz

Souhrn

Přechod na společnost fungující na principu oběhovosti byl přijat jako hlavní zásada ve veřejných politikách několika zemí. Tento článek se zabývá mezinárodními definičními, teoretickými a metodologickými přístupy k oběhovému hospodářství pocházejícími ze západního prostředí s cílem posoudit jejich aplikovatelnost v (post-) tranzitivním kontextu střední a východní Evropy a identifikovat prvky jejich integračního koncepčního jádra. Hlavním zjištěním je, že vědecký výzkum oběhového hospodářství a cirkulárního ekonomického myšlení nabírá dva relativně nezávislé směry (normativní / pozitivní), protože je založen na dvou různých metodických přístupech. Článek ukazuje, že je možné použít východiska pro další výzkum cirkularity, která by nebyla založena na dichotomických přístupech, ale na integritě (holistický přístup).

Klíčová slova: *oběhové hospodářství, cirkulární ekonomické myšlení, transformační proces, střední a východní Evropa*

Development of operational functional sample of biotrickling filter with integrated heating of circulating liquid phase

Jiří HENDRYCH, Jiří KROUŽEK

University of Chemistry and Technology Prague, Technická 5, 166 28 Praha 6, Czech Republic, e-mail: Jiri.Hendrych@vscht.cz

Abstract

Biotrickling is a relatively inexpensive and technically undemanding process for cleaning gas from various areas and industries. The subject of the research was the realization of three apparatuses for testing and operation of this technique. Initial system was a laboratory installation on which the key aspects of the process were tested. The findings were used in realization of compact model apparatus of biotrickling filter with classical and microwave heating of circulating liquid phase. The main part of the work is devoted to the description of this device. The final technical solution – up-scaled compact container unit installed at the biogas plant in the Central Bohemia region is briefly described.

Keywords: *biofiltration; biotrickling; heating; container unit; biogas plant; construction*

1 Introduction

The paper presents partial selected aspects and directions of activities related to the project of applied research and experimental development No. FV10790 “Biofiltration unit with dielectric heating” solved in the period 10/2016 – 12/2019.

The aim of the project was to develop and verify the technical solution of the operational functional sample of the biotrickling filter with integrated conventional and microwave heating of the circulating liquid phase to increase the efficiency of the process by intensifying the microbial processes. Thanks to this intensification it is possible to achieve smaller dimensions of the device, resp. shorter residence time of the processed gas. The process should be applicable due to modularity in the case of the elimination of volatile organic compounds, removal of odorous substances and more efficient biological elimination of hydrogen sulphide from the gas streams. The final design determines, that the device can be easily transported and installed as a complete unit.

Formation of gases containing undesirable organic and odorous substances is indivisibly linked to many industrial and production sectors, as well as to waste processing. Unlike adsorption and other off-gases treatment processes, biofilters represent a technically very simple and inexpensive process where undesirable components are removed or their content reduced to an acceptable level. Temperature is a basic parameter affecting chemical reactions, even where a biofactor is employed. Often the function of biofilters is insufficient, especially in winter period or if the good level of service and maintenance is not observed (sprinkling, pH adjustment, increasing pressure drop, creation of preferential flows, etc.). Both of these negative aspects are eliminated by the technical solution outlined below.

Biofiltration[1] works on the principle of passing treated gas through the filtration bed, which is made up of different material/materials. The filter bed material (carrier) is kept moist, nutrients are supplied, the pH is adjusted. Its particles are colonized by microorganisms that are involved in biotransformation of the incoming undesirable substances to carbon dioxide and water. Biotrickling is additionally supplemented with a circulating liquid recycling and a tank. The principle of both concepts follows very well from the simple scheme in the Figure 1. The explanation of transport and metabolic processes is beyond the content and objectives of this paper.

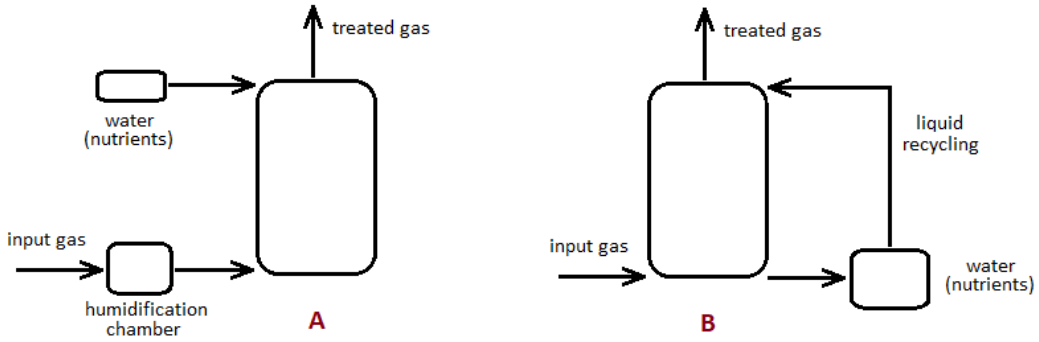


Figure 1: Scheme of biofilter (A) and biotrickling filter (B)[2]

Obviously, the biotrickling[3,4] filtration process is more accessible to facilitate continuous control of the properties of the circulating liquid phase, including heating that is applied to the process. The circulating liquid phase is a very suitable heat transfer medium in the system.

In terms of testing and development of the device conventional and microwave heating method was applied. Microwave heating brings many specifics. For example, the volumetric and rapid heating, the existence of non-thermal effects, or the possible action in the area of selection pressure on microorganisms present in the suspension biomass.

In the field of biofiltration and biotrickling filters, in addition to the specific design of the apparatus and the optimization of process parameters, a certain attention is also paid to the selection of suitable carrier materials of filter bed. It is essential that the material exhibits the desired service life, low pressure drop, low settling and spontaneous degradability, low cost and a satisfactory downstream waste profile at the end of its service life. The essential requirement is the nature of the material and its suitability for microbial consortia involved in ongoing processes.

From the point of view of published studies, there is a great deal of research into the biotrickling process in defined laboratory configurations with different residence time of the treated gas in the filter bed, different L/G ratio[5] and different geometry of the filtration chamber (column), content and type of pollutant[6,7,8]. Also published are papers documenting pilot operations/full-scale application of biotrickling technology[9,10].

2 Design of construction, arrangement for testing and development of model installation

2.1 Laboratory tests

The research carried out in this project included development from a laboratory scale, in which particular aspects of the process were studied - the choice of carrier materials, the study of their physical, physico-chemical and chemical properties that affect the vitality of emerging biofilms, temperature profiles in the bed. However, the test system showed a number of idealizations and limits in the assumptions for process up-scaling. The part of testing installation consisted of the apparatus shown schematically in the Figure 2. The filter bed working volume was limited to about 10 liters.

A large independent area of investigation was the study of pressure drop during modeled compression of bed, variable two-phase flow and characterization of microbial vitality during the process of gas filtration and thermal stress under conventional and microwave heating. Based on the laboratory investigation, the research team got an overview of the possibilities and limits of the studied process and the possibilities to design and construct an apparatus for the realization of the process in a medium scale with respect to the required range of variable process parameters.

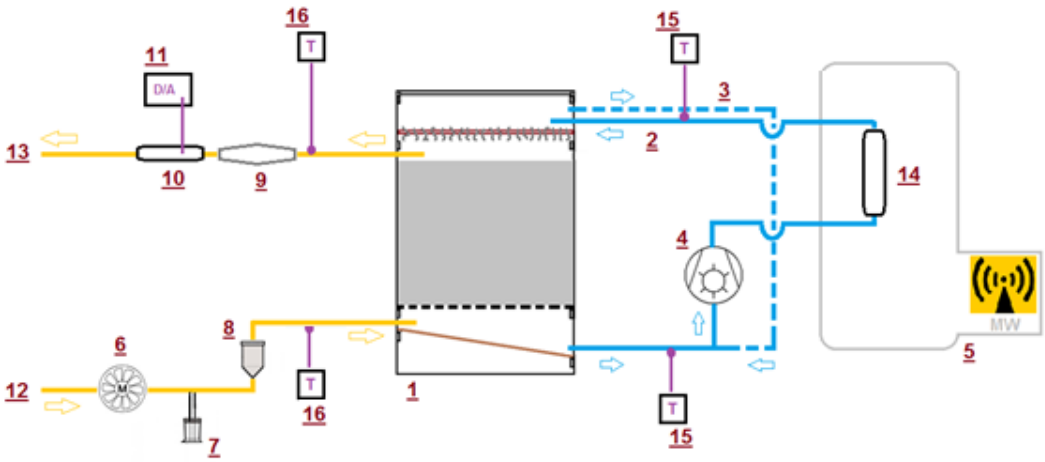


Figure 2: Scheme of laboratory equipment

1 - biofiltration cell, 2 - recycle of circulating liquid phase, 3 - overflow of liquid phase, 4 - peristaltic pump, 5 - cavity with MW irradiation, 6 - gas pump, 7 - element ensuring possibility of gas saturation with contaminant, 8 - flowmeter , 9 - drying cartridge, 10 - sampling port, 11 - sampling element or on-line detector, 12 - inlet gas, 13 – outlet gas, 14 - circulation liquid phase heating cartridge, 15 - thermocouple, 16 - thermocouple

2.2 Design and construction of model test installation

The performance and range of power and measuring elements of the model test installation were based on the intended/required capacities, which resulted from the existing laboratory research, recommended L/G ratios and the experience of the research team.

The key elements and resulting functions are described in the following simple diagram in the Figure 3 where the entire assembly of devices is shown. All components are incorporated into a frame with internal partition walls. Due to the realization of two types of independent heating - conventional and microwave, it was decided for practical reasons to incorporate microwave heating element with independent pump and flow meter into a separate supporting frame. This greatly streamlined the easy access to the appliance when the MW heating system is not currently used and can be shut down with its entire mobile structure.

The basic part is the filter chamber (1), which contains three zones for a given biotrickling filter arrangement. In the upper part of the body there is a segment (1A) serving for inflow of the heated circulating liquid phase and its uniform distribution throughout the horizontal filter profile, followed by a segment (1B) with a bed with carrier material, the bottom is formed by a collecting sump (1C) of circulating liquid phase.

The inlet of the circulating liquid phase is realized from a tank (2), which is provided with a heating element with a conventional heating method. The circulating liquid phase is pumped by a pump (3) via a flowmeter (4) to the upper part of filter. The pipe (5) is further provided with a spillway (6) and an outlet fitting (7) for exhausting the sump contents from the system. Each pipe branch contains adequate shut-off or control valves (8, 9). The winch serves both as a mixing tank for the assembly, and also as a bypass when a very small inlet to the filter head is required which could cause gradual damage of the pump by cavitation. The liquid flow rate is controlled by the control valve (10).

The upper part of the filter is terminated by a liquid phase distributor (11) which has been implemented in two embodiments, one type allowing variable level of liquid above the distributor, the other maintaining a constant level of the circulation liquid phase above the distributor by means of spillways. In case of use of the first type of distributor, the inlet part of the filter is further equipped with a overflow (12) of the circulation phase back to the tank. The overflow is realized in two different levels in the upper part of filter and provided with valves (13, 14).

A filter bed is installed in the central part of the filter. The output (15) of the treated gas is realized just below the distributor. Furthermore, thermocouples (16) and control thermocouples for sensing the temperature of the bed are arranged in the central part with an arrangement for measuring the vertical and horizontal temperature stratification. At the same time, fittings (17) are provided for the possibility of gas sampling/on-line analysis in various layers of the filter bed.

The lower liquid collecting part of the filter body serves to collect and drain the circulating liquid phase flowing through the biofilter bed. At the same time, the inlet (18) of the inlet gas flows into this zone. The bottom is double, the top baffle (19) is inclined to the collecting pipe. The outgoing pipe (20) of the circulating liquid phase is provided with a water seal (trap) (21) which ensures correct hydraulic conditions and prevents the entering of gas to the water circulation. A second flowmeter (22) is installed on the ascending pipe of the water seal. The outlet branch (23) with a valve and a fitting is realized through which the liquid phase can be freely discharged from the filter.

The gas is pumped into the filter bed by a pair of compressors (24, 25) and a ventilator (26). Each pipe branch contains valves (27) for the possibility of closing and regulating the flow. The gas flows through the control valve (28) and the flowmeter (29) into the filter body. In order to measure the pressure difference and sampling the gas for analysis, lockable fittings (30, 31), respectively clasps are provided on the inlet and outlet branches. Thermocouples (32, 33) monitor the inlet and outlet gas temperatures. The inlet and outlet branches are further connected by a pipe (34) to the shut-off valves so that the bed can be purged with compressed air.

Microwave heating peripherals form a separate part of the apparatus, they are implemented independently of the conventional heating equipment. The circulating liquid phase is pumped to the microwave heater (35) from the tank via a MW pump (36) through a flow meter (37) and returned to the tank from where it is distributed to the filter. The tank is equipped with a float indicator. The finalized model testing installation of the biotrickling filter is shown in the Figure. 4.

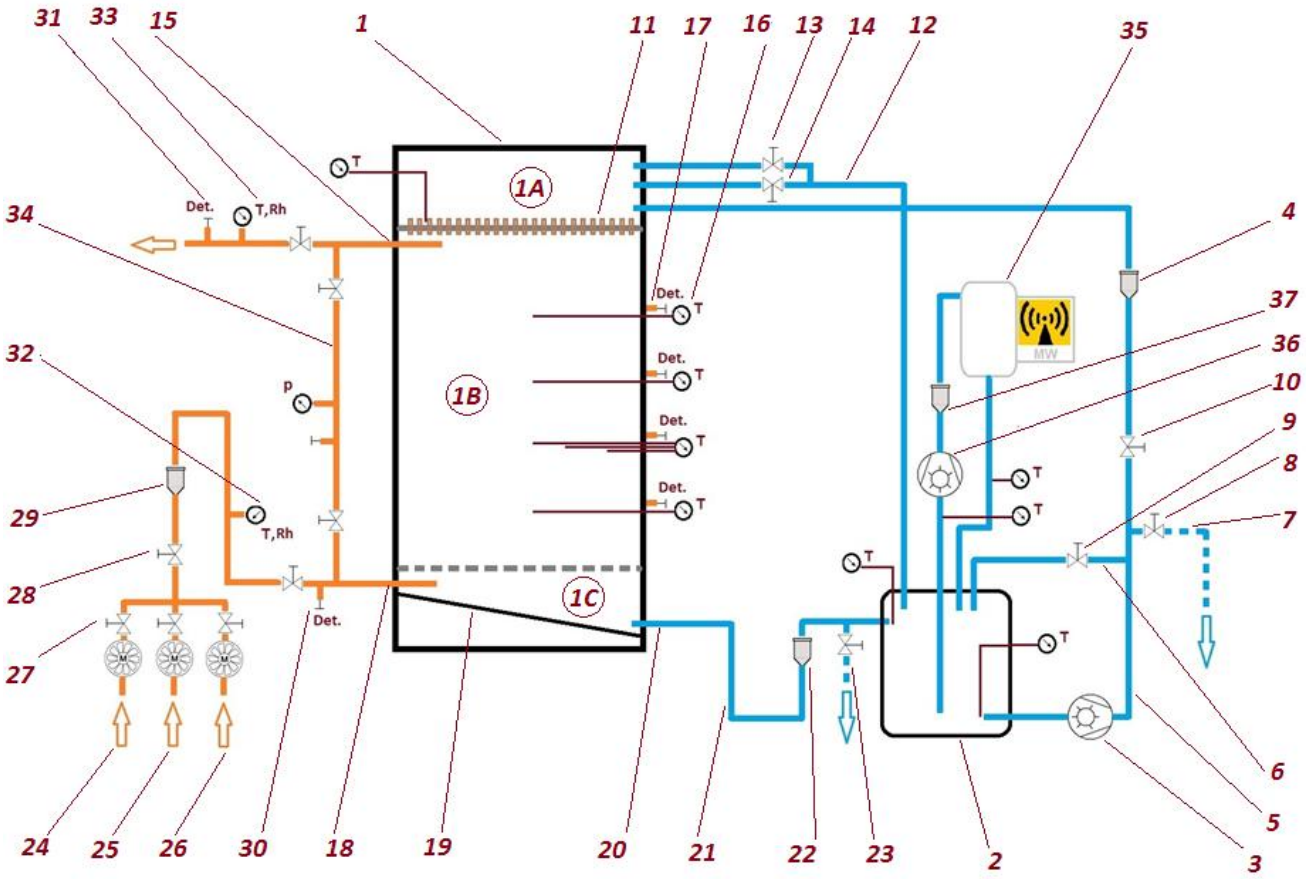


Figure 3: Scheme of model testing installation

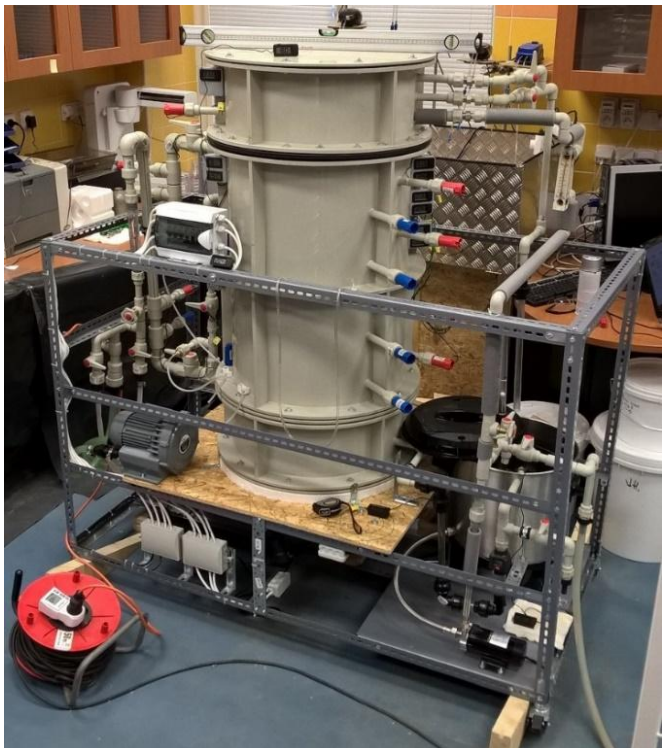


Figure 4: Model testing installation of biotrickling filter

Table 1 briefly summarizes the realized parameters and adjustable range of process conditions, which can be achieved after connecting all the components into the assembly taking into account the resulting pressure loss of the equipment and the range of flow meters.

Table 1: Realized parameters and adjustable range of process variable parameters

Filter internal diameter	50 cm
Max. carrier filling	61 cm
Max. carrier volume	120 l
Max. operating temperature of the circulating liquid phase	40 °C
Power of a conventional heater	1.8 kW
Power of a microwave heater	1.0 kW
Circulation liquid phase flow through the biofilter	0.1 – 1.4 l/min
Gas flow through the biofilter /hight of carrier 52 cm (102 l)/	2 – 16 m^3/h
EBRT /hight of carrier 52 cm (102 l)/	184 - 23 s
L/G ratio /hight of carrier 52 cm (102 l)/	0.4 – 42 l/m^3

Equipment resp. systematic survey of the process is characterized by a large number of variable adjustable parameters. The aim of the paper is to introduce the developed devices, not to show a very large acquired data collection. The following parameters can be selected as independent variables:

- gas flow,
- circulation liquid flow,
- target temperature attained in the device,
- method/type of the heating conventional/microwave,
- type and concentration of the input substance in treated gas.

Dependent variables (assuming tests are performed at steady state) are then particularly the efficiency of contamination removal, energy consumption, temperature setting in defined profiles, and possibly quantification of microbial activity/occurence.

Testing of the device and limiting conditions was very time-consuming and included several months during year 2018. Performing tests in the same apparatus and on the same type of filter bed with different time intervals (aging and colonization of bed) can significantly affect results, so the experiment cannot be repeated under exactly the same conditions.

The tests were carried out after adaptation of microorganisms with model contamination of the treated gas by introduction of acetone, hydrogen sulphide and odorous substances simulated by the exhaust from the box with degradation products of biological material. Number of technological important microorganisms was performed by analysis of the suspended circulating biomass (plate count). Input/output contamination of the gas and content of pollutants in sampling profiles along the filter body was performed using on-line detectors with respect to the background response. This procedure of monitoring VOCs in the area of interest is in accordance with published studies[11,12]. Portable MiniRAE 2000 analyser (RAE Systems, USA) was used, containing an internal pump with a flow rate of 0.5 L/min and a 10.6 eV lamp. The sampling line contained a teflon filter with a pore size of 5 μm. The instrument was calibrated with isobutene, the response refers to total VOCs as isobutene equivalents.

The following graphical output can be used as an example of the achieved types of results. Experimental conditions: gas flow Q(G) 8 m^3/h, circulation liquid flow Q(L) 0.4 l/min, steady operation, microwave heating, substance - acetone, selected independent variable - input concentration of the monitored substance and temperature of the filter body, monitored dependent variable - removal efficiency and detector response depending on the increasing concentration of the substance at the inlet to the filter.

The efficiency is calculated from residual and input concentration. The monotonically decreasing function of efficacy did not occur with increasing concentration of the substance at the input. However, in terms of emissions amount, it is necessary to bear in mind that this also means that as the increasing input concentration of the substance increases the emission concentration as shown in the Figure 5A/B.

Furthermore, the effect of the filter body temperature is evident: at 15 °C (lower temperatures under the given climatic conditions in the test room and the technique used could not be achieved) the lower VOC removal efficiency was achieved. For the curves obtained at 19 °C and 28 °C, an increase in process efficiency is evident. The efficiency curve for 36 °C and 38 °C showed subsequently a decrease in removal efficiency. In the light of the effect of temperature on the efficiency of the process, no difference was observed between conventional and microwave heating of the circulating liquid phase. It is also possible to express the dependence of the removal efficiency for the selected input concentrations of the substance. The dependence is shown in the Figure 6A/B. It can be seen that the optimum efficiency was reached in the temperature range of about 20 – 30 °C; with a lower input concentration the maximum efficiency shifted to the upper edge of listed temperature interval, while for a higher input concentration the maximum efficiency shifted to the lower edge of the temperature interval.

The character of the temperature dependence is determined by the fact that both physical processes (substance vapor absorption into the circulating liquid) and biochemical processes (transport of the substance into cells of microorganisms and metabolism) take place in the system. As the temperature increases, the solubility of gases in the liquid decreases and the volatility of the organic substances increases. Increasing temperature limits the dissolution of the pollutant carried in the gas stream into liquid, which is an essential step for the downstream step of the biochemical process. Lowering temperature slows down the metabolism of microorganisms. The resulting effect of these processes gives a certain temperature optimum under given experimental conditions. This finding is in principle consistent with the published data for the removal of BTEX vapors by biotrickling filter; removal efficiency increased as the operating temperature increased in the range of 15 – 30°C, and subsequently decreased as the operating temperature decreased in the range of 30 – 50 °C. In the range of 25 – 35 °C the optimum was found for BTEX vapors removal[13].

Too intensive heating of the biotrickling filter bed results in reduced availability of contaminants for microorganisms and biochemical degradation, while also leading to higher energy requirements. Conversely, low temperatures, for example in winter season, significantly limit the microbial activity of the microorganism consortia.

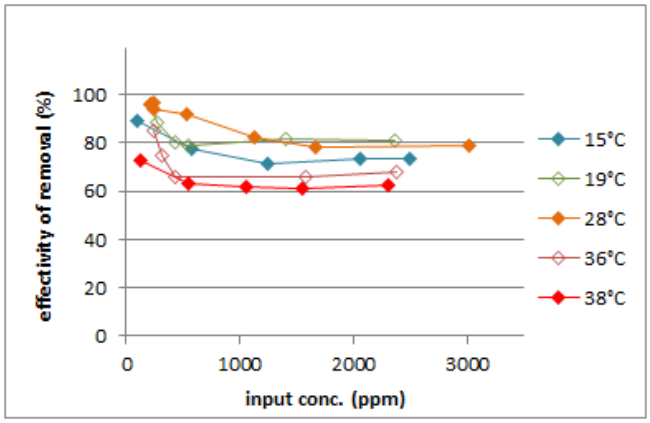


Figure 5A: Removal efficiency depending on the input concentration of the substance and filter body temperature

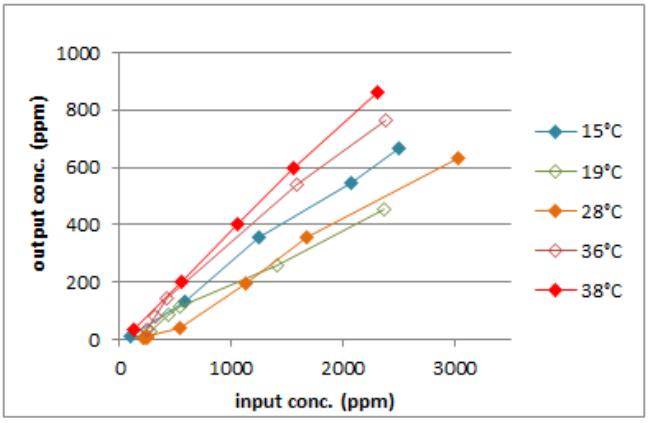


Figure 5B: Output concentration depending on the input concentration of the substance and filter body temperature

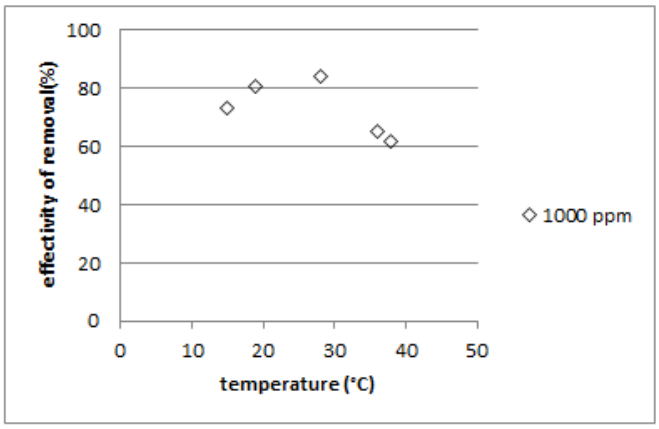


Figure 6A: Removal efficiency depending on the filter body tempertaure for input conc. 1000 ppm

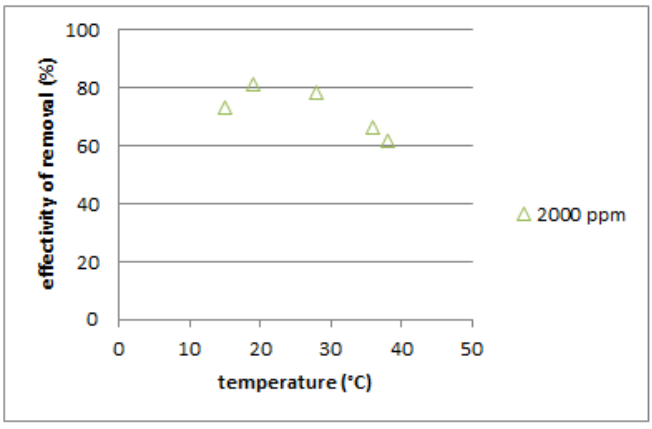


Figure 6B: Removal efficiency depending on the filter body tempertaure for input conc. 2000 ppm

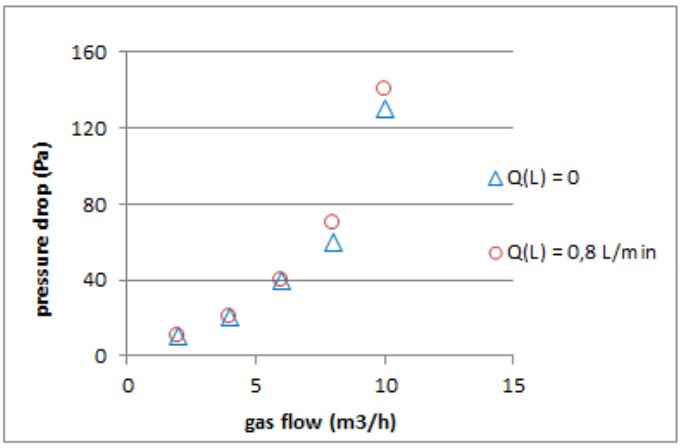


Figure 7: Pressure drop depending on gas flow and circulation liquid flow

Among other types of dependencies that can be shown, for example, the pressure drop dependending on the gas flow and the circulation liquid flow is given (Figure 7). Due to the porosity of the filter bed and the relative low intensity of the liquid flow, the effect of the liquid flow caused minimal pressure drop. The pressure drop varied dramatically with the increasing gas flow.

2.3 Operational functional sample of the biotrickling filter at the target locality

Compact operational unit was installed at the biogas plant in the Central Bohemia region for elimination of odour from the receiving tank. Container unit corresponds in principle to the model test installation described in the previous paragraph, taking into account the capacity concept and the use of industrial power and monitoring components and adequate construction materials. Compared to the model installation, automatic replenishment of the evaporated water is installed in the sump of the circulation liquid and the dosing automat of the alkaline solution for adjusting the pH value of the circulation liquid phase.

It is necessary to realize periodically partial discharge of the content of the sump of the circulating liquid phase due to the increasing content of organic substances and salinity. This wastewater is let out back to the receiving tank of the biogas plant, for which the amount and the periodicity of discharges are negligible.

The container, the filter body and the pipeline are provided with thermal insulation. The control panel has a wireless internet connection and process monitoring, regulation interventions, shutdowns and technology restart can be done remotely. Protective monitoring and control circuits shut down the unit in case of inadequate hydrodynamic conditions. Presence of the operator is only necessary in case of unexpected faults, replenishment of the alkaline solution into the dosing pump reservoir and in the case of scheduled maintenance.

A detailed piping and instrumentation diagram the container unit is not provided for intellectual property protection. By way of illustration, the partial equipment of the container unit and the filter body with a sight glass into the circulation liquid phase sump is shown in the Figure 8A and Figure 8B.

During several months of testing operation, the subcomponent design and remote control was optimized based on occured faults. Furthermore, it was necessary to apply additional peripherals to prevent introduction of particles from the receiving tank into the apparatus, or to introduce measures for the protection of sensors.

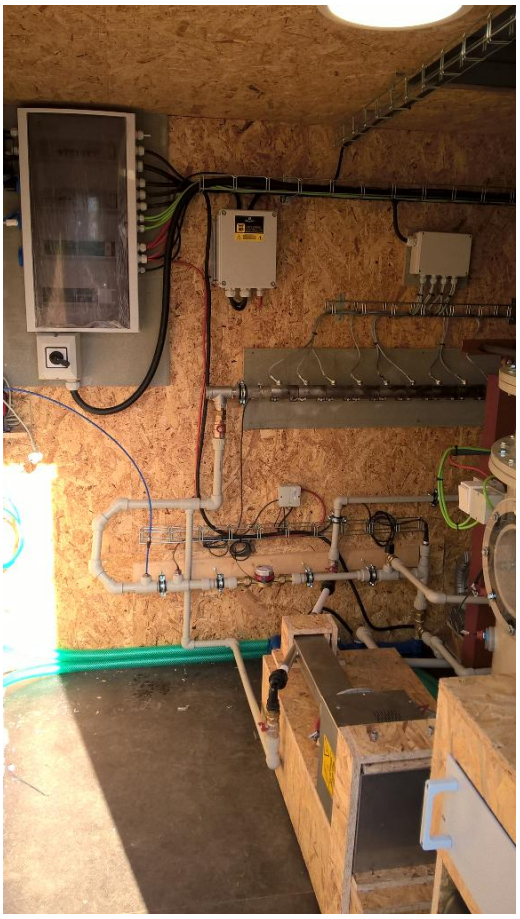


Figure 8A: Piping and wiring

Figure 8B: Body of biotrickling filter

3 Conclusion

The work describes the partial focus of applied research in the development of laboratory, model and operational installation of biotrickling filter with integrated microwave and conventional heating of the circulating liquid phase. Up-scaling and optimization of individual devices reflected the identified aspects and the required range process parameters. The challenge for further process testing on an operational scale is the long-term stability of the system and behavior and real energy consumption during different seasons.

List of symbols

BTEX	benzene, toluene, ethylbenzene and xylene
EBRT	empty bed residence time
L/G	liquid/gas
MW	microwave
VOC	volatile organic compound

Acknowledgment

The paper is based on the activities of applied collaborative research supported by the Ministry of Industry and Trade, project no. FV10790 which is realized in cooperation between Chemcomex, Czech Technical University in Prague and University of Chemistry and Technology Prague.

References

1. Kennes, C., Veiga, M. C. (ed.) (2013). *Air Pollution Prevention and Control*. 1st ed. John Wiley & Sons, Ltd.
2. Kennes, C., Veiga, M. C. (2002). Inert filter media for the biofiltration of waste gases–characteristics and biomass control. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, *1*(3), 201 – 214.
3. Brinkmann T. et al. (2016). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector. Luxembourg: Publications Office of the European Union, Chapter 3, 388 – 393.
4. Muñoz, R., Malhautier, L., Fanlo, J. L., Quijano, G. (2015). Biological technologies for the treatment of atmospheric pollutants. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, *95*(10), 950 – 967.
5. Kennes, C., Rene, E. R., Veiga, M. C. (2009). Bioprocesses for air pollution control. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, *84*(10), 1419 – 1436.
6. Duan, H., Koe, L. C. C., Yan, R. (2005). Treatment of H_2S using a horizontal biotrickling filter based on biological activated carbon: reactor setup and performance evaluation. *Applied microbiology and biotechnology*, *67*(1), 143 – 149.
7. Li, Z. X., Yang, B. R., Jin, J. X., Pu, Y. C., Ding, C. (2014). The operating performance of a biotrickling filter with Lysinibacillus fusiformis for the removal of high-loading gaseous chlorobenzene. *Biotechnology letters*, *36*(10), 1971 – 1979.
8. Ordaz, A., Figueroa-González, I., San-Valero, P., Gabaldón, C., Quijano, G. (2018). Effect of the height-to-diameter ratio on the mass transfer and mixing performance of a biotrickling filter. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, *93*(1), 121 – 126.
9. Chen, J. M., Jiang, L. Y., Sha, H. L. (2006). Removal efficiency of high-concentration H_2S in a pilot-scale biotrickling filter. *Environmental technology*, *27*(7), 759 – 766.
10. Deshusses, M. A., Webster, T. S. (2000). Construction and economics of a pilot/full-scale biological trickling filter reactor for the removal of volatile organic compounds from polluted air. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *50*(11), 1947 – 1956.
11. López, R., Cabeza, I. O., Giráldez, I., Díaz, M. J. (2011). Biofiltration of composting gases using different municipal solid waste-pruning residue composts: Monitoring by using an electronic nose. *Bioresource technology, 102*(17), 7984 – 7993.
12. Cabeza, I. O., López, R., Giraldez, I., Stuetz, R. M., Díaz, M. J. (2013). Biofiltration of α-pinene vapours using municipal solid waste (MSW)–pruning residues (P) composts as packing materials. *Chemical engineering journal, 233*, 149 – 158.
13. Lu, C., Lin, M. R., Chu, C. (1999). Temperature effects of trickle-bed biofilter for treating BTEX vapors. *Journal of Environmental Engineering, 125*(8), 775 – 779.

Vývoj provozního funkčního vzorku biotrickling filtru s integrovaným ohřevem cirkulační kapalné fáze

Jiří HENDRYCH, Jiří KROUŽEK

Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6,
e-mail: Jiri.Hendrych@vscht.cz

Souhrn

Biotrickling představuje relativně levný a technicky nenáročný proces čištění vzdušin z různých oblastí a odvětví. Předmětem výzkumu byla realizace postupně tří aparátů pro testování a provozování uvedené techniky. Výchozím systémem byla laboratorní instalace, na níž byly testovány stěžejní aspekty procesu. Poznatky byly využity při realizaci kompaktní modelové sestavy biotrickling filtru s klasickým a mikrovlnným ohřevem cirkulační kapalné fáze. Popisu tohoto zařízení je věnovaná stěžejní část práce. Závěrem je stručně představeno finální technické řešení v měřítku provozního funkčního vzorku – kompaktní kontejnerové jednotky instalované v době tvorby textu 5 měsíců na bioplynové stanici ve Středočeském kraji, kde slouží v pilotním provozu pro eliminaci zápachu z příjmové jímky bioplynové stanice.

Klíčová slova: *biofiltrace; biotrickling; ohřev; kontejnerová jednotka; bioplynová stanice; konstrukce*

Observation of solid pollutants flowing during solid alternative fuel combustion

Nikola KANTOVÁ, Michal HOLUBČÍK, Jozef JANDAČKA, Alexander ČAJA

Department of Power Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Žilina, Univerzitna 1, 010 26 Žilina, Slovakia
e-mail: nikola.kantova@fstroj.uniza.sk, michal.holubcik@ fstroj.uniza.sk, jozef.jandacka@ fstroj.uniza.sk, alexander.caja@ fstroj.uniza.sk

Abstract

The production of waste materials is big global problem. One of the waste treatment options is a combustion. Waste material has to be appropriately prepared and combusted with low formation of the emissions, such as solid pollutants also called particulate matter. This article deals with an observation of these solid pollutants flowing through the flue gas tract of small heat source during solid alternative fuel combustion. Solid alternative fuel is waste material formed by its separation and modification. Flue gas tract is optimized by three baffles for separation of particulate matter and realized on 3D model. CFD simulations are used for observation of flowing. The observation of particulate matter flowing during wood chips combustion is also described in this article. In the results, we can see comparison between solid pollutants flowing from combustion of solid alternative fuel and wood chips.

Keywords: *solid pollutants, particulate matter, alternative fuels, waste material*

Introduction

Solid alternative fuels (in the Figure 1) are materials, which are formed by separation and modification of waste materials composed from plastics, paper, textiles, rubber and other combustible materials. It is a crushed mixture of substances from selected industrial and sorted municipal wastes, which have a clearly defined composition of substances and a determined granulometric structure [1].

Figure 1: Solid alternative fuels [2]

For comparison is wood chips such as combustible fuel. Wood chips are one of the forms of solid biomass. It may consist of wood, bark, needles, green leaves, twigs and undressed admixture [3].

Combustible release rate during the combustion are the most important factors affecting the combustion of biofuels [4]. During combustion are formed emissions, such as solid pollutants also called particulate matter (PM). Fine dust is denoted by PM10 and consists of particles of diameter less than 10 μm floating in the air [5]. PM concentration depends on several factors including the method of combustion, type and moisture of fuel, quantity, temperature and speed of the combustion air, etc. [6]. Fine dust flows into the human body through the respiratory organs and may cause various respiratory and cardiovascular diseases [7, 8]. Indeed, chronic exposure to fine dust may have serious effects on human pulmonary functions [9].

This article deals with an observation of these solid pollutants flowing through the flue gas tract of small heat source during solid alternative fuel combustion. Flue gas tract is optimized by three baffles for separation of particulate matter and realized on 3D model. CFD simulations could be used for observation of flowing. CFD uses numerical analysis and algorithms to solve and analyze problems that involve fluid flows [10]. The observation of particulate matter flowing during wood chips combustion is also described in this article. In the results, we can see comparison between solid pollutants flowing from combustion of solid alternative fuel and wood chips. the influence of type fuel on the particulate matter flowing through the flue gas tract of small heat source.

Mathematical simulations

Flue gas tract of small heat source (wood stove) is optimized by three baffles for separation of particulate matter. Then, flue gas tract is realized on 3D model, which is shown with its mesh in the Figure 2. Mesh has 194787 elements and all elements has Aspect Ratio lower than 10.

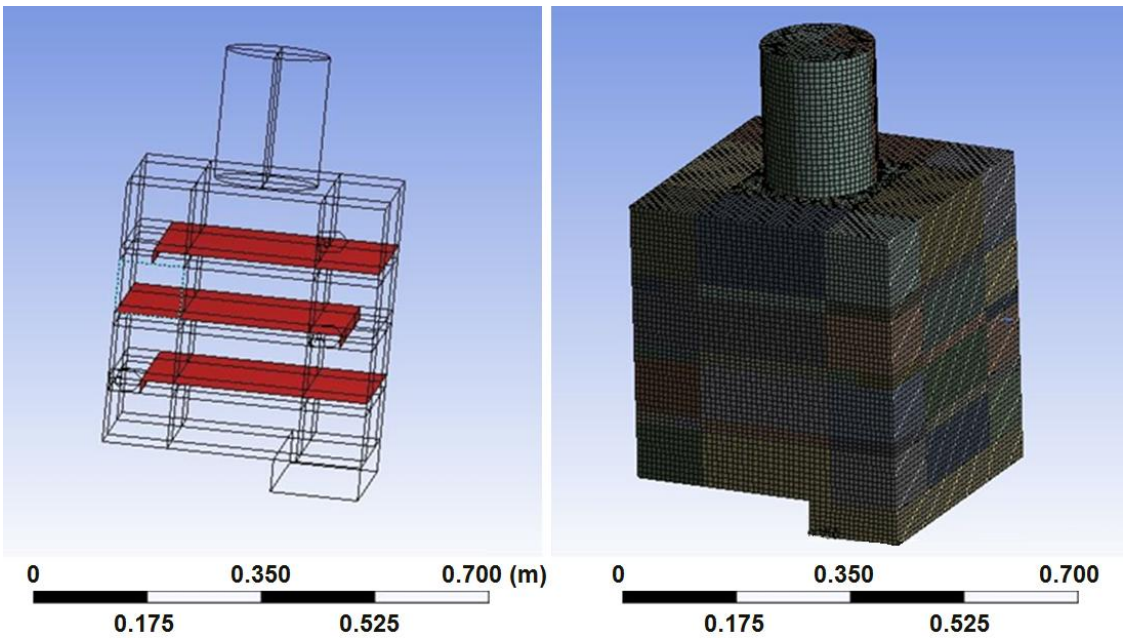


Figure 2: 3D model and its mesh

Particles enter into the model through surface with 135 x 400 mm and leave the model through chimney with diameter of 160 mm. Flue tract is thought as a cube with length of edge 400 mm. Baffles are placed perpendicular to the flue track with length of 350 mm.

The flowing of particles is realized by using a Lagrangian reference frame, which predicts the trajectory of a discrete phase particle by integrating the force balance on the particle [11, 12]. The flowing of air is realized by using Navier - Stokes equations, which describe the motion of viscous fluid substances.

The object is simulated by the k - ε realizable model with standard wall function. The Lagrangian approach can get particles motion and distribution by integrating the force balance on the particle, and also is convenient for users to modify the forces of particles to make the numerical results better [13]. Since particles distribution and motion result from the different forces that strongly link to the airflow field, it is essential to calculate the parameters of air phase precisely.

Particles size distribution in program Ansys is realized by using Rosin - Rammler distribution function. Particles are considered spherical and also the influence of turbulence on particle motion. Flowing is time steady, without combustion and the influence of gravity is considered. It is difficult to describe a material consisting of various size fractions using a single value parameter. In some cases, as in the description of filter sand in water treatment practice, two parameters have been used. One of these two parameters usually describes the absolute size of the particles (usually at some specified point on the particle distribution curve, such as “50% finer than size x”), and the other describes the uniformity of the sizes (using some calculation of the slope of the particle size distribution curve) [14]. The shape of the particle size distribution curve is best described by a continuous function.

In the simulation with solid alternative fuel as used fuel is mass flow in inlet set on 0.0180 kg s^{-1} based on the stoichiometric calculations. Pressure on outlet is set on -12 Pa. In the simulation with wood chips as used fuel is mass flow in inlet set on 0.0138 kg s^{-1} based on the stoichiometric calculations Pressure on outlet is also set on -12 Pa. Characteristic of used fuels is shown in the Table 1. This characteristic is needed for stoichiometric calculations in program Ansys. Content of carbon, hydrogen, nitrogen and sulfur was realized on elemental determinator. Moisture and ash content was measured on thermogravimetric analyzer, which determines the composition of organic, inorganic, and synthetic materials. Calorific value was found out on calorimeter.

Table 1: Characteristic of used fuels

Parameter	Unit	Value for the material	
		Solid alternative fuel	Wood chips
C	% $_{mass}$	55.41	50.34
H	% $_{mass}$	7.16	6.76
N	% $_{mass}$	0.06	0.00
S	% $_{mass}$	0.07	0.00
Moisture	% $_{mass}$	4.68	9.50
Ash	% $_{dry\ (mass)}$	11.89	0.81
Calorific value	MJ kg^{-1}	14.96	15.88

There is used hybrid initialization. The calculation has converged.

Results

It is needed to create a plane in the middle of 3D model because of individual profiles. In the Figure 3, you can see velocity profiles with range from 0 to 5 m s^{-1}. Maximum flow velocity for wood chips is 2.48 m s^{-1} and for solid alternative fuel is 7.98 m s^{-1}.

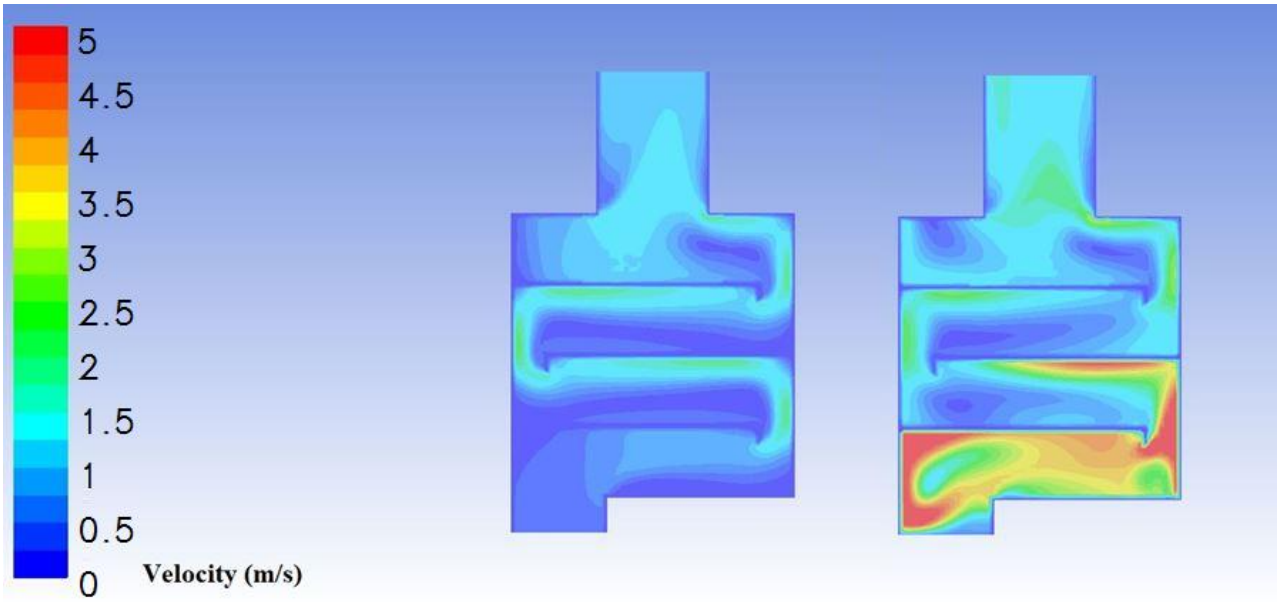


Figure 3: Velocity profiles for wood chips (left) and solid alternative fuel (right)

The next results are showed in the Figure 4, where are particle diameter profiles. Minimum diameter is 15 μm and maximum is 150 μm. Based on the results, we can observe different flowing of particulate matter from combustion of wood chips and solid alternative fuel. During the flowing of PM from solid alternative fuel, we can see significantly higher values of velocities. During the flowing of PM from wood chips, we can notice, that the particles with size over 100 μm don't pass through the first baffle and the particles with the size up to 60 μm flow into the chimney. The greater range of particles in the chimney is during combustion of solid alternative fuel.

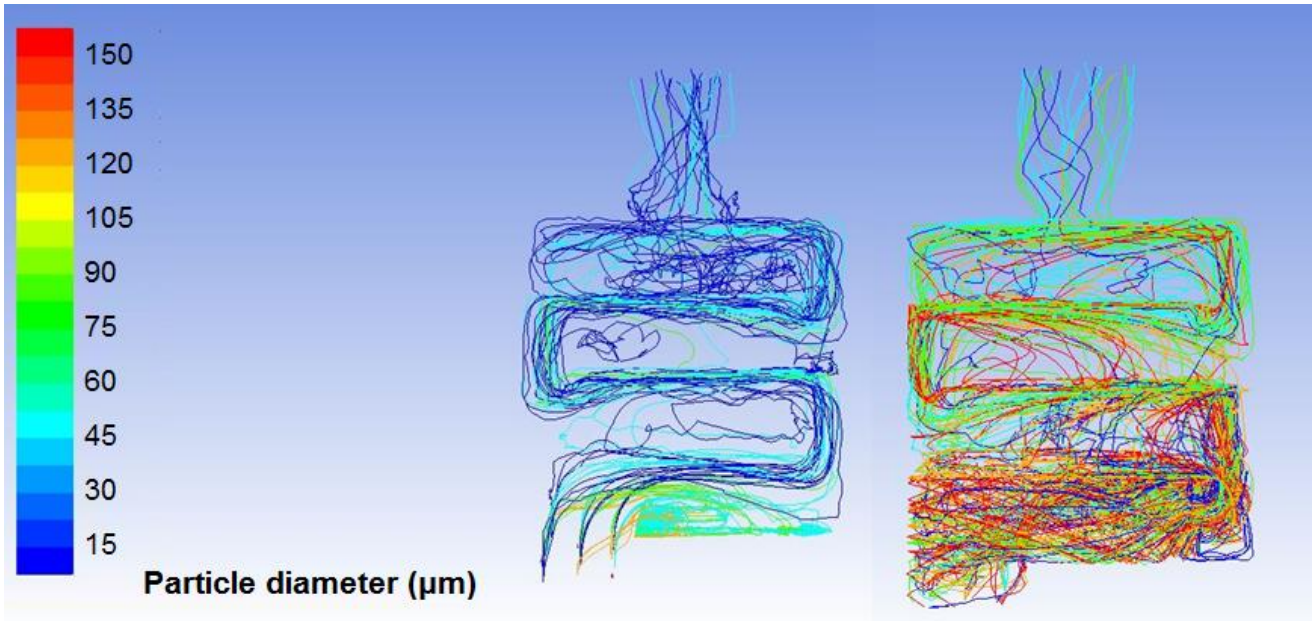


Figure 4: Particle diameter profiles for wood chips (left) and solid alternative fuel (right)

These obtained results correspond with the results of PM measurements during combustion of various alternative solid fuels where alternative fuels had an approximately 6 to 12.5 times higher concentration of TZL in flue gases compared to the manufacturer's recommended fuel, wood [15]. The higher particulate matter production during alternative fuels combustion in domestic conditions in comparison with standard fuels like wood pieces and coal was also obtained in the works [16] and [17].

Conclusions

During combustion emissions are formed, such as particulate matter. PM concentration depends on several factors including the type of fuel. We observed the flowing of PM from combustion of wood chips and solid alternative fuel by using program Ansys. Based on the results, we can conclude that during the flowing of PM from solid alternative fuel, there were higher velocities and also greater range of escaped particles than during the flowing of PM from wood chips. The higher content of escaped particles from solid alternative fuel is due higher ash content in this fuel. These results have shown that combustion of alternative fuels, especially on the basis of waste, significantly increases the production of emissions, mainly particular solid pollutants. Referring to these results the users of heat sources should only use the permitted fuels recommended by the producer of the heat source.

Acknowledgment

This work has been supported by the projects VEGA 1/0479/19 "Impact of combustion conditions on the production of particulate matter in small heat sources", APVV-17-0311 "Research and development of zero waste technology for the decomposition and selection of undesirable components from process gas generated by the gasifier" and KEGA 033ŽU-4/2018 "Heat sources and pollution of the environment".

References

1. Koncepcia rozvoja mesta Žilina v oblasti tepelnej techniky. (2015). Available from: https://www.enviroportal.sk/eia/dokument/240242
2. Jalovec, R.: V Trnave sa začalo vyrábať palivo z komunálneho odpadu. (2012). Available from: http://www.trnava.sk/sk/aktualita/v-trnave-sa-zacalo-vyrabat-palivo-z-komunalneho-odpadu
3. Banski, A., Dzurenda, L.: Hustota a sypná hmotnosť energetickej štiepky z dendromasy plantážnicky pestovaných porastov rýchlorastúcich drevín., Acta Facultatis Xylologiae Zvolen, 56(2), 17 – 26, 2014
4. Vitázek, I., Majdan, R., Mojžiš, M.: Volatile combustible release in biofuels, Agronomy Research 16(5), 2229 – 2241, 2018
5. Sim, J. B., Woo S. H., Yook, S. J., Kim, J. B., Bae G. N., Oh, S. G.: Baffle dust collector for removing particles from a subway tunnel during the passage of a train, Journal of Mechanical Science and Technology 32 (3) (2018) 1415 – 1421
6. Ďurčanský, P., Holubčík, M., Malcho, M.: Effect of combustion air redistribution at performance characteristics of small heat source. In: Meeting of Departments of Fluid Mechanics and Thermomechanics 2016, ISBN 978-0-7354-1426-6, In Scopus database
7. Pope, C. A., Dockery, D. W., Spengler, J. D., Raizenne, M. E.: Respiratory health and PM10 pollution: a daily time series analysis, American Review of Respiratory Disease, 144 (3) (1991) 668 – 674.
8. Pope, C. A., Schwartz, J., M. Ransom, R.: Daily mortality and PM10 pollution in Utah Valley, Archives of Environmental Health: An International Journal, 47 (3) (1992) 211 – 217.

9. Schwartz J.: Particulate air pollution and chronic respiratory disease, Environmental Research, 62 (1) (1993) 7 – 13.
10. Ryfa A., Buczyński R., Chabiński M., Szlęk A., Białecki R.A.: Decoupled numerical simulation of a solid fuel fired retort boiler, Applied Thermal Engineering 2014
11. Fluent user' guide, online
12. Dastoori, K., Makin, B., Kolhe, M., Des-Roseaux, M., Conneely, M.: CFD modelling of flue gas particulates in a biomass fired stove with electrostatic precipitation, Journal of Electrostatics 71 (2013) 351 – 356
13. Zhang, H., Wang., F., Wang, Y., Wang. H.: CFD Simulation of Cooking Particle Distribution and Motion, Procedia Engineering 205 (2017) 1800 – 1806
14. Vesilind, P. A.: The Rosin-Rammler particle size distribution, Resource Recovery and Conservation, 5 (1980) 275 – 277
15. Holubčík, M., Kantová, N., Jandačka, J., Kolková, Z.: Alternative solid fuels combustion in small heat source, MATEC Web of Conferences 168, 08002 (2018)
16. Xiu, M., Stevanovic, S., Rahman, M. M., Pourkhesalian, A. M., Morawska, L., Thai, P. K.: Emissions of particulate matter, carbon monoxide and nitrogen oxides from the residential burning of waste paper briquettes and other fuels, Environmental Research, Vol. 167, 2018,536 – 543
17. Hrdlička, J., Skopec, P., Dlouhý, T., Hrdlička, F.: Emission factors of gaseous pollutants from small scale combustion of biofuels, Fuel 165 (2016) 68 – 74

Pozorovanie prúdenia emisií tuhých častíc počas spaľovania tuhého alternatívneho paliva

Nikola KANTOVÁ, Michal HOLUBČÍK, Jozef JANDAČKA, Alexander ČAJA

Katedra energetickej techniky, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žilina, Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovenská republika
e-mail: nikola.kantova@fstroj.uniza.sk, michal.holubcik@ fstroj.uniza.sk, jozef.jandacka@fstroj.uniza.sk, alexander.caja@ fstroj.uniza.sk

Souhrn

Tvorba odpadného materiálu je veľkým celosvetovým problémom. Jednou z možností ako spracovať odpad je spaľovanie. Odpadný materiál musí byť vhodne pripravený a spaľovaný s podmienkou nízkej tvorby emisií, ako sú aj tuhé znečisťujúce látky (TZL). Predmetný článok sa zaoberá pozorovaním prúdenia týchto látok spalinovým traktom malého zdroja tepla počas spaľovania tuhého alternatívneho paliva. Tuhé alternatívne palivo predstavuje odpadný materiál vytvorený jeho separáciou a modifikáciou. Spalinový trakt je optimalizovaný tromi prepážkami na zachytávanie TZL a realizovaný ako 3D model. Na pozorovanie prúdenia boli použité CFD simulácie. V článku je taktiež opísané pozorovanie prúdenia TZL počas spaľovania drevnej štiepky. Vo výsledkoch si môžeme všimnúť porovnanie medzi prúdením tuhých znečisťujúcich látok vzniknutých v priebehu spaľovania tuhého alternatívneho paliva a drevnej štiepky.

Klíčová slova: *emisie, tuhé znečisťujúce látky, alternatívne palivá, odpadný materiál*

Characteristics of PM_{10}, $PM_{2.5}$ and NO_x pollutants in urban environment

Dusan JANDACKA and Daniela DURCANSKA

University of Žilina, Faculty of Civil Engineering, Department of Highway Engineering, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic, e-mail: dusan.jandacka@fstav.uniza.sk

Abstract

We carried out a series of measurements at various measuring stations (five measuring stations) in Žilina, Slovakia, during different measuring seasons. The main objective was to find out the characteristics of particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) and nitrogen oxides (NO_x) pollutants in urban environment of Žilina City. In particular, the concentrations of pollutants, the distribution of particulate matter, the relationship of particulate matter and nitrogen oxides, the content of selected chemical elements in the particulate matter fraction were examined. A varied behavior of the particulate matter and nitrogen oxides with respect to the measurement station and the measurement season was found. Significant changes in the concentrations of particulate matter and nitrogen oxides are caused not only by primary sources (e.g., road traffic in the city of Žilina), but mainly by the negative events (combination of air pollution sources and meteorological conditions). Maximum 24-hours concentrations of particulate matter PM and nitrogen oxides NO_x were measured during the winter season at the measuring station on Komenského street: PM_{10} 114.9±15.6 μg/m^3, $PM_{2.5}$ 84.5±20.6 μg/m^3 and NO_x 95.6±51.2 μg/m^3. There were some measuring stations with a higher proportion of course fraction $PM_{2.5-10}$ or fine fraction $PM_{2.5}$ in Žilina City. The relationship was analysed between PM_{10} and NO_x. Differences in the concentrations of investigated chemical elements contained in the PM were found. The coarse fraction $PM_{2.5-10}$ was mainly represented by the chemical elements Mg, Al, Si, Ca, Cr, Fe, and Ba and the fine fraction $PM_{2.5}$ was represented by the chemical elements K, S, Cd, Pb, Ni, and Zn.

Keywords: *particulate matter, nitrogen oxides, urban air pollution, chemical composition of particulate matter*

Introduction

The main sources of air pollution in urban areas are exhaust emissions, re-suspension of road dust and household heating using wood and coal[1, 2, 3, 4].

Particularly particulate matter (PM) is a problematic pollutant in cities. Concentrations of $PM_{2.5}$ or PM_{10} often exceed human health limit values[5, 6, 7].

The effects of PM on human health are caused after its inhalation and penetration to the lungs and the blood circulatory system, which leads to adverse effects to respiratory, cardiovascular, immunity and neural systems. The ultrafine particles (with diameters <0.1 micrometre) can even reach the brain through the nose[8]. The chemical and physical interaction between PM and lung tissue may cause irritation or damage. The smaller the particle, the deeper they reach in the lungs. The impact of PM on mortality rate is clearly related to the fraction $PM_{2.5}$, which makes 40 - 80% of weight concentration of PM_{10} in the ambient air in Europe[1, 5]. In addition, the "coarser" fraction 2.5-10 μm $PM_{2.5-10}$ of the fraction PM_{10} has impact on human health and influences mortality rate.

Nitrogen dioxide (NO_2) is a reactive gas which is mainly formed by oxidation of nitrogen monoxide (NO). The high temperature combustion processes (e.g. processes in car engines and power plants) are the main sources of NO and NO_2. These two gases are commonly known as NO_x. Nitrogen monoxide accounts for the major part NO_x emissions. A small part of NO_x emissions is directly emitted as NO_2, usually 5 - 10% for the majority of combustion sources. Vehicles burning diesel are an exception. They

usually produce higher proportions of NO_2, up to 70% NO_x is NO_2, since their exhaust treatment systems increase the direct emission of NO_2[9].

Nitrogen oxides (NO_x) contribute to the formation of secondary inorganic aerosols (SIAs) through the formation of nitrates thus contributing to the concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$[1, 5, 10].

This study is focused on the monitoring of PM_{10}, $PM_{2.5}$ and NO_x pollutants in the urban environment of Žilina. Characteristics of pollutants and relationships between pollutants in urban environments are investigated by various methods and analyses (measurement methods, chemical analyses, statistical analyses).

Measurement and analysis methodology

Measurements of particulate matter PM_{10}, $PM_{2.5}$ and nitrogen oxides NO_x were realised at 5 measurement stations in city of Žilina. We measure 7 days at each measurement station:

- Univerzitná Street (uvp), (49°12'6.61"N, 18°45'14.24"E): 14th – 20th November 2017;
- A. Hlinka Square (hlin), (49°13'29.08"N, 18°44'31.10"E): 22th — 28th February 2018;
- Komenského Street (zsk), (49°12'58.64"N, 18°44'15.63"E): 01th — 07th March 2018;
- Košická Street (tep), (49°13'8.30"N, 18°45'36.80"E): 19th – 25th April 2018;
- Štrková Street (strk), (49°11'35.27"N, 18°43'37.12"E): 9th – 15th May 2018.

To establish the amount of particulate matter present in the ambient air, a reference method (the gravimetric method) was applied, pursuant to the standards of STN EN 12341 (2016). The sampling was performed using low-volume flow samplers (LECKEL LVS3, Low-Volume Samplers, company Sven Leckel Ingenieurbüro GmbH). Two fractions of particulate matter were monitored concurrently, specifically PM_{10} and $PM_{2.5}$. The particulate matter was sampled on the filters for 24 hours (10 a.m. – 10 a.m. the next day). Finally, using this method, we obtained seven 24-hour concentrations for each PM fraction at each measurement station (in sum, 70 exposed filters). An optical method for determining the hourly particulate matter concentration (PM_{10} and $PM_{2.5}$) was also used. The Fidas® 200 fine dust aerosol spectrometer for simultaneous measurement from the company Palas® was used. There were measured pollutant NO_x (sum of NO_2 and NO) by using the standard chemiluminescence method of measuring the concentration of nitrogen dioxide and nitrogen monoxide in Žilina City. The AC32M chemiluminescent nitrogen oxide analyser from the company Environnement S. A. was used.

The relationship between particulate matter fractions PM_{10}, $PM_{2.5}$ and NO_x was evaluated by Regression Analysis (RA) by statistical software “R” and open-source tool “Openair”.

RA relates to a group of techniques serving the purpose of Linear Dependency Analysis between the two variables. It specifies estimates of β parameter in a regressive model:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon_1. \quad (1)$$

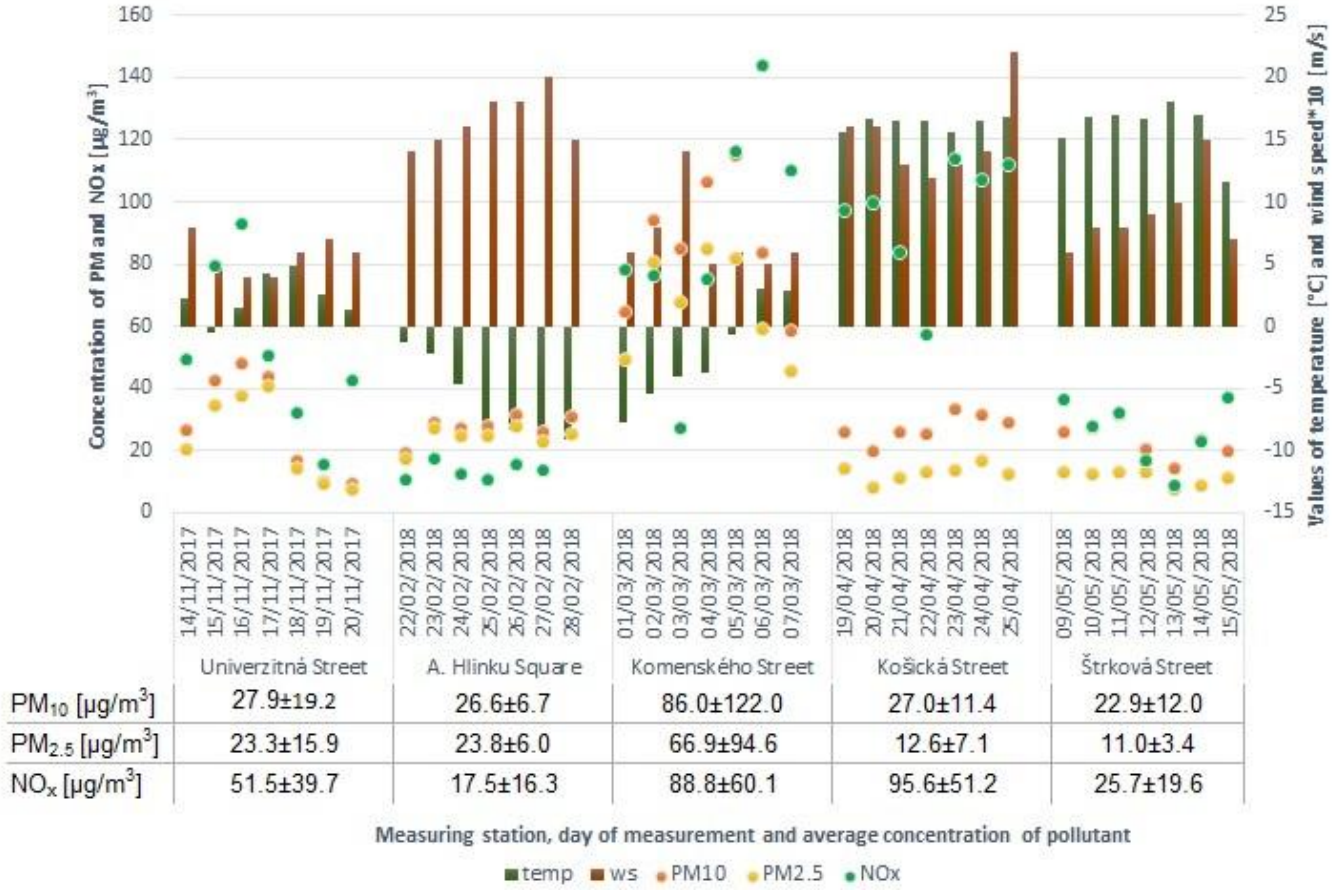
Where x_1 is independent variable, in this case one independent variable - NO_x and y_i is to be views as a dependent variable ($PM_{2.5}$ or PM_{10}). β_1 *is* to be understood as regression parameter and b_1 its estimate. An absolute member of β_0 is an intersection of regression hyperplane with the y axis. The estimate of b_1 is to be understood as the direction of the regression hyperplane from the direction of x_1 and are called partial regression parameters (eventually partial regression coefficients for the standardized variables).

To identify and determine the amounts of chemical elements (Mg, Al, Si, K, Ca, S, Cr, Cu, Fe, Cd, Sb, Ba, Pb, Ni, and Zn) in the samples of particulate matter, spectroscopic methods were utilized (Inductively coupled plasma mass spectrometry - ICP-MS). The analyses of the 70 filters (35 filters for each PM fraction) and the determination of chemical elements present in the fractions PM_{10} and $PM_{2.5}$ were performed pursuant to the standard STN EN 14902 (2006). These exposed filters were obtained using gravimetric method. The tests were carried out in the laboratory of the Transport Research Centre in Brno, Czech Republic.

Meteorological parameters (temperature (temp), pressure (pres), wind speed (ws), and wind direction (wd)) were also recorded during monitoring. Hourly meteorological parameters were used for further analysis. All measured concentrations were corrected for normal physical conditions (101.325 kPa and 0 °C).

Results and discussion

Optical method measurement data (hourly data) were used for an evaluation of the particulate matter concentrations and mass distribution. Concentrations of air pollutants PM_{10}, $PM_{2.5}$ and NO_x were different at the measuring stations in Žilina City. This is due to different measurement periods (different meteorological parameters) and the presence of different air pollution sources during the measurements (road transport, local heating). The highest average concentration of PM_{10} and $PM_{2.5}$ was found at the Komenského Street measuring station. Low air temperatures and low wind speeds were detected during the measurement at Komenského Street. The highest average NO_x concentration was found at the measuring station Košická Street. High traffic volumes about 30 000 vehicles/24 h are achieved at the measuring station Košická Street (Figure 1).



	Univerzitná Street	A. Hlinku Square	Komenského Street	Košická Street	Štrková Street
PM_{10} [µg/m³]	27.9±19.2	26.6±6.7	86.0±122.0	27.0±11.4	22.9±12.0
$PM_{2.5}$ [µg/m³]	23.3±15.9	23.8±6.0	66.9±94.6	12.6±7.1	11.0±3.4
NO_x [µg/m³]	51.5±39.7	17.5±16.3	88.8±60.1	95.6±51.2	25.7±19.6

Figure 1: Concentrations of pollutants and meteorological parameters during different measuring seasons in Žilina City

The mass distribution of particulate matter also differed at the measuring stations. From the total measured fraction PM_{10}, the course fraction $PM_{2.5-10}$ concentration was calculated as the difference between the PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations [22]. The course fraction $PM_{2.5-10}$ was most represented at Košická Street and at Štrková Street, representing 54% and 52% of the total fraction of PM_{10}, respectively. This is due to intense road traffic and a higher wind speed, where road dust resuspension occurs, especially through freight traffic. At Komenského Street, the course fraction $PM_{2.5-10}$ was 23% of the total PM_{10} fraction, whilst it was only 12% at A. Hlinka Square and 16% at Univerzitná Street.

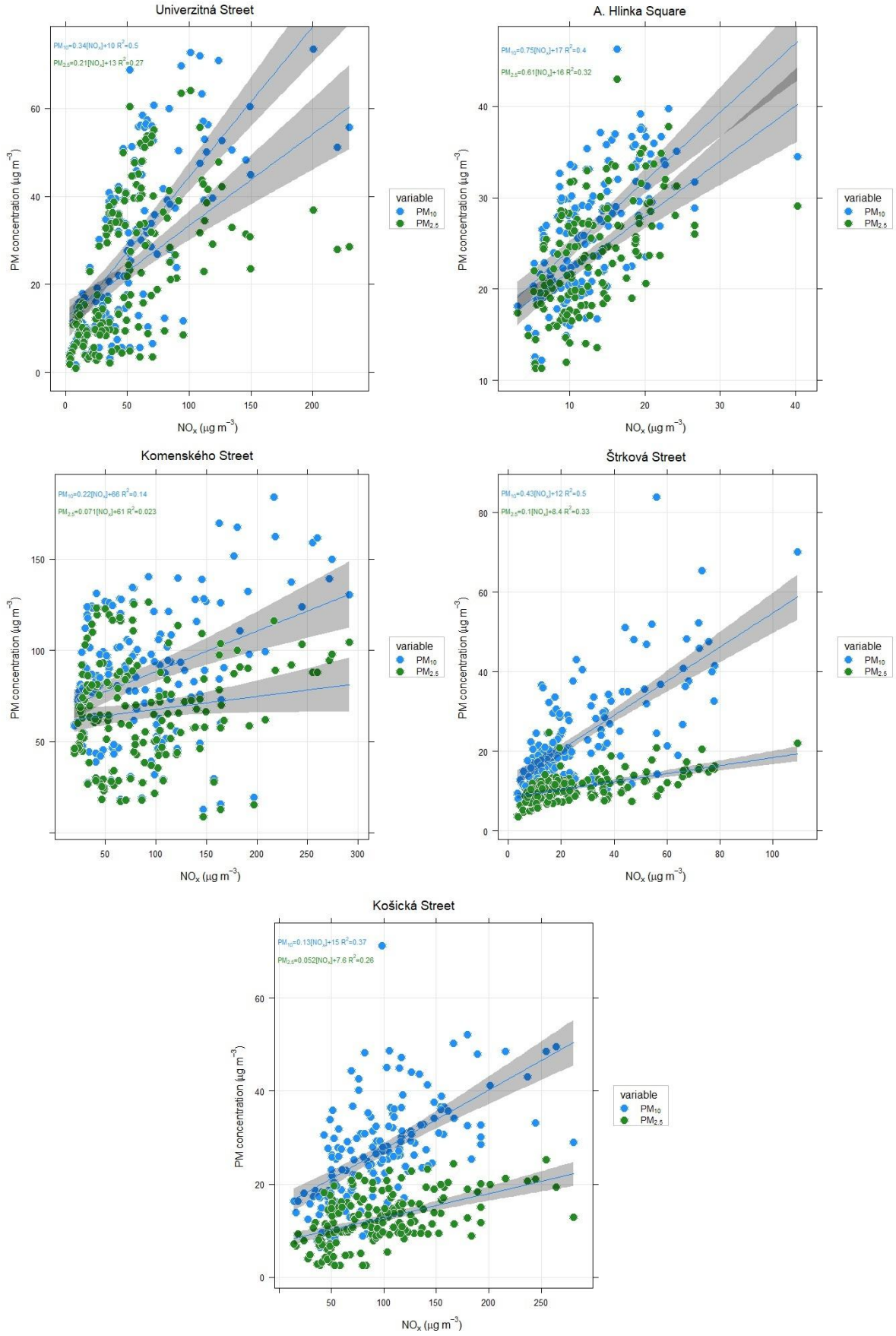


Figure 2: Relationship between PM and NO_x at different measuring stations in Žilina City

The relationship between fraction PM_{10}, $PM_{2.5}$ and NO_x was evaluated for each measurement station separately. Optical method measurement data (hourly data) were used for an evaluation. Using scatter plots and regression analysis (RA), we can observe the most significant relationship between PM_{10} and NO_x at the measurement station Štrková Street (we can describe 50% of the original data by the model) (Figure 2). There is present road traffic at the measurement stations Univerzitná Street, Komenského Street, Košická Street and Štrková Street. The regression models of the $PM_{2.5}$ fine fraction and the NO_x are characterised by lower determination coefficients R^2 (Figure 2). This result suggests a relationship between PM_{10} (includes coarse fraction $PM_{2.5-10}$) and NO_x (road traffic marker) [13].

Higher concentrations of PM_{10}, $PM_{2.5-10}$, $PM_{2.5}$ and NO_x were found during the winter months (lower air temperatures) by using time variation evaluation. The NO_x pollutant shows higher concentrations mainly during the working week. Lower NO_x concentrations are observed on weekends. Pollutant concentrations (NO_x, $PM_{2.5-10}$) showed high concentrations in the morning (7 am) and in the afternoons (5 pm) (Figure 3). This corresponds to the behavior of traffic volume during the day (Figure 4).

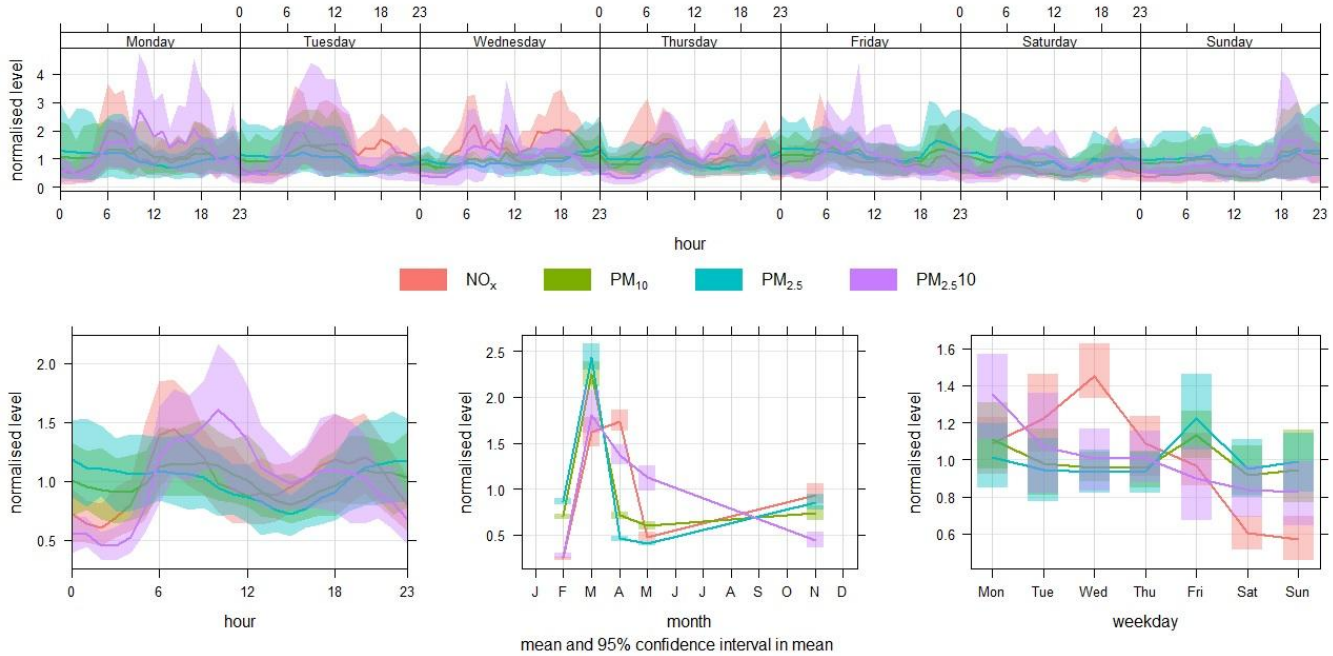


Figure 3: Time variation of pollutants concentrations evaluated from all measurements in Žilina City

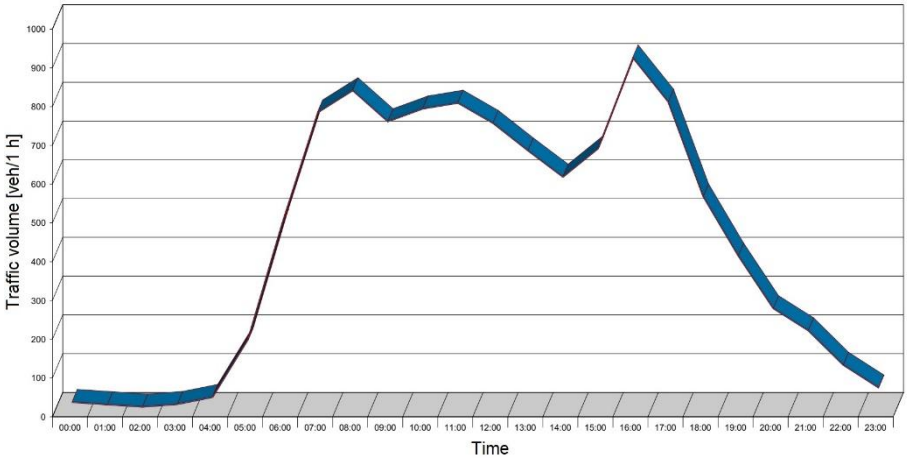
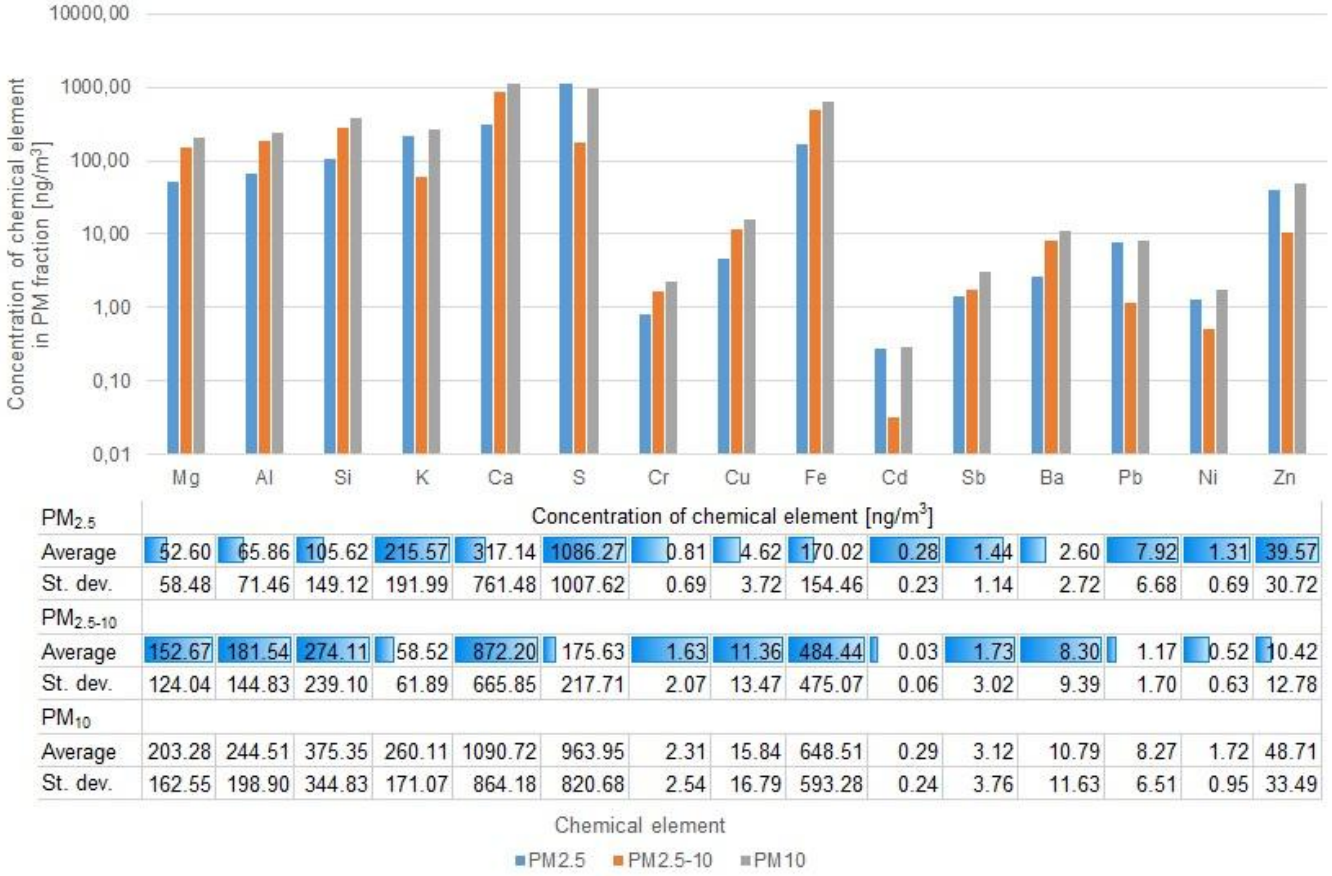


Figure 4: Example of daily behavior traffic volume at Komenského Street

A number of chemical elements (Mg, Al, Si, K, Ca, S, Cr, Cu, Fe, Cd, Sb, Ba, Pb, Ni, and Zn) were detected using chemical analyzes of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particulate matter. The higher concentrations of chemical elements K, S, Cd, Pb, Ni, Zn were in the $PM_{2.5}$ fraction (fine fraction). The higher concentrations of chemical elements Mg, Al, Si, Ca, Cu, Fe, Ba were in the $PM_{2.5-10}$ fraction (course fraction) (Figure 5, 6).



	Concentration of chemical element [ng/m^3]														
$PM_{2.5}$															
Average	52.60	65.86	105.62	215.57	317.14	1086.27	0.81	4.62	170.02	0.28	1.44	2.60	7.92	1.31	39.57
St. dev.	58.48	71.46	149.12	191.99	761.48	1007.62	0.69	3.72	154.46	0.23	1.14	2.72	6.68	0.69	30.72
$PM_{2.5-10}$															
Average	152.67	181.54	274.11	58.52	872.20	175.63	1.63	11.36	484.44	0.03	1.73	8.30	1.17	0.52	10.42
St. dev.	124.04	144.83	239.10	61.89	665.85	217.71	2.07	13.47	475.07	0.06	3.02	9.39	1.70	0.63	12.78
PM_{10}															
Average	203.28	244.51	375.35	260.11	1090.72	963.95	2.31	15.84	648.51	0.29	3.12	10.79	8.27	1.72	48.71
St. dev.	162.55	198.90	344.83	171.07	864.18	820.68	2.54	16.79	593.28	0.24	3.76	11.63	6.51	0.95	33.49

Figure 5: Concentration of chemical elements in different fraction of PM evaluated from all measurements in Žilina City

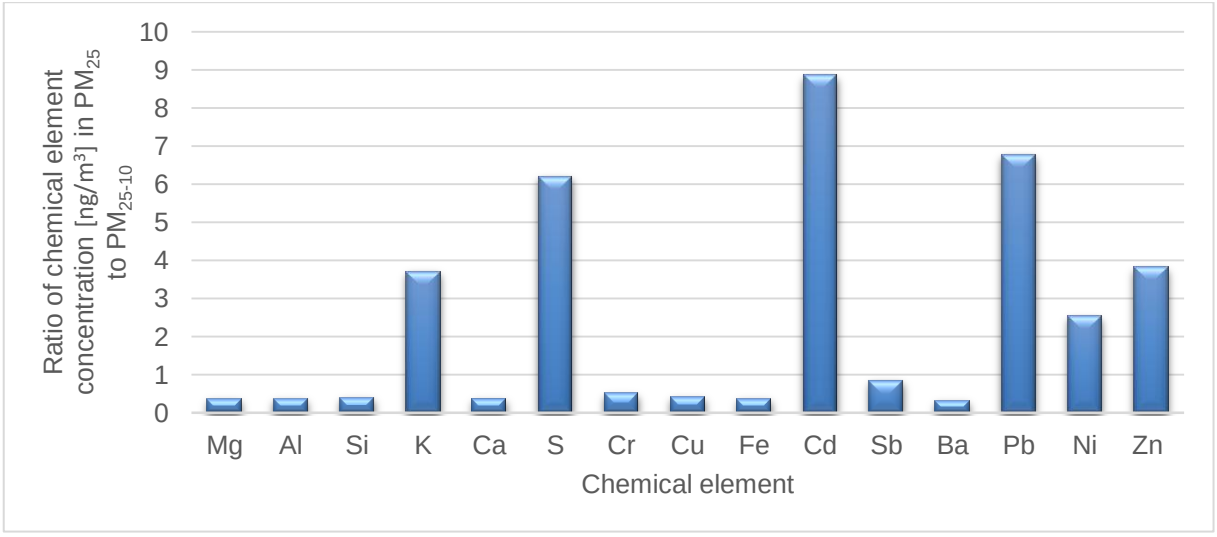


Figure 6: Ratio of chemical element concentration in particulate matter $PM_{2,5}$ fraction to $PM_{2,5-10}$ fraction in Žilina City

Each of these metals may come from a specific source [1, 2, 3, 4, 14, 15]. Depending on the dominant proportion of the individual chemical elements in the PM fractions and the possible origin of these elements, we can generally assume a source of particulate matter: $PM_{2.5-10}$ – resuspension road dust, $PM_{2.5}$ - combustion. Chemical elements with a higher proportion in the $PM_{2,5-10}$ coarse fraction can come from traffic related abrasions, from the Earth's crust. Chemical elements with a higher proportion in the $PM_{2,5}$ fine fraction can come from traffic related combustion, household heating. Measurements stations were localized especially in the vicinity of urban roads.

Conclusions

Monitoring of air pollution in Žilina was focused on PM_{10}, $PM_{2.5}$ and NO_x pollutants and their characteristics. There were analyzed concentrations of pollutants, relationship between particulate matter and nitrogen oxides, distribution of particulate matter and chemical composition of particulate matter (chemical element).

The highest concentrations of pollutants were observed during winter measuring seasons. It was during measurement at Komenského Street measuring station. Maximum 24-hours concentrations of particulate matter PM and nitrogen oxides NO_x were: PM_{10} 114.9±15.6 μg/m^3, $PM_{2.5}$ 84.5±20.6 μg/m^3 and NO_x 95.6±53.7 μg/m^3. The mass distribution of particulate matter differed at the measuring stations. The course fraction $PM_{2.5-10}$ was most represented at Košická Street and at Štrková Street, representing 54 % and 52 % of the total fraction of PM_{10}, respectively. This is due to intense road traffic and a higher wind speed, where road dust resuspension occurs, especially through freight traffic. At Komenského Street, the course fraction $PM_{2.5-10}$ was 23 % of the total PM_{10} fraction, whilst it was only 12% at A. Hlinka Square and 16% at Univerzitná Street. The level of air pollution detected from measurements in the city of Žilina is mainly limited by PM_{10} and $PM_{2.5}$ particulate matter concentrations.

A one-dimensional regression model characterized the relationship between particulate matter and nitrogen oxides. There was a more significant relationship with PM_{10}. The smallest dispersion of PM_{10} concentrations was described by the model (independent variable NO_x) at Komenského Street R^2 = 0.14, and the largest dispersion of PM_{10} concentrations was described by the model at Štrková Street R^2 = 0.50 at significance level α <0.05. In some cases, when the NO_x concentrations were increasing also PM_{10} concentrations were increasing. Pollutant concentrations (NO_x, $PM_{2.5-10}$) showed high concentrations in the morning (7 am) and in the afternoons (5 pm). This corresponds to the behavior of traffic volume during the day.

Evaluation of selected chemical elements showed that some chemical elements are predominantly in fine fraction $PM_{2,5}$: K, S, Cd, Pb, Ni, Zn and some in $PM_{2,5-10}$ coarse fraction: Mg, Al, Si , Ca, Cr, Cu, Fe, Sb, Ba. Based on the representation of elements in PM fractions and their theoretical potential sources, we assume a $PM_{2.5-10}$ source - road dust resuspension and $PM_{2.5}$ source - combustion.

Acknowledgment

This contribution/publication is the result of the project implementation: Centre of excellence for systems and services of intelligent transport II., ITMS 26220120050 supported by the Research & Development Operational Programme funded by the ERDF.

Európska únia
Európsky fond regionálneho rozvoja
Operačný program VÝSKUM a VÝVOJ
Agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR pre štrukturálne fondy EÚ

"Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ"

References

1. Jandacka, D.; Durcanska, D.; Bujdos, M.: Transp. Res. Part D *50*, 397 (2017)
2. Pant, P.; Harrison, R.M.: Atmos. Environ. 77, 78 (2013)
3. Thorpe, A.; Harrison, R.M.: Sci. Total Environ. 400, 270 (2008)
4. Ho, K.F.; Lee, S.C.; Chow, J.C.; Watson, J.G.: Atmos. Environ. 37, 1023 (2003)
5. European Environment Agency. Air Quality in Europe—2013 Report; European Environment Agency: Copenhagen, Denmark, 2013; p. 107
6. European Environment Agency. EEA Signals 2016: Towards Clean and Smart Mobility. Transport and environment in Europe; European Environment Agency: Copenhagen, Denmark, 2016; p. 64
7. WHO. Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide—Global Update 2005; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2006; p. 20
8. Breysse, P. N. et al.: Atmos. & Health 6, 333 (2013)
9. Grice, S., Stedman, J., Kent, A., Hobson, M., Norris, J., Abbott, J., Cooke, S.: Atmos. Environ. 43, 2154 (2009)
10. Choi, J. K., Heo, J. B., Ban, S. J., Yi, S. M., Zoh, K. D.: Atmos. Environ. 60, 583 (2012).
11. STN EN 12341 (2016) Ambient air Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM_{10} or $PM_{2,5}$ mass concentration of suspended particulate matter
12. STN EN 14902 (2006) Ambient air quality. Standard method for the measurement of Pb, Cd, As and Ni in the PM_{10} fraction of suspended particulate matter
13. Prakash, S., Bodisco, T., A.: Trans. Res. Part D: Trans. and Environ. 72, 220 (2019)
14. Almeida, S. M., Pio, C. A., Freitas, M. C., Reis, M. A., Trancoso, M. A.: Atmos. Environ. 40 (11), 2058 (2006)
15. Zhang, X. Y., Cao, J. J., Li, L. M., Arimoto, R., Cheng, Y., Huebert, B., Wang, D.: Atmos. Environ. 36 (26), 4189 (2002)

Charakteristiky znečisťujúcich látok PM_{10}, $PM_{2.5}$ a NO_x v mestskom prostredí

Dušan JANDAČKA a Daniela ĎURČANSKÁ

Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, Katedra cestného staviteľstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovensko, e-mail: dusan.jandacka@fstav.uniza.sk

Súhrn

Počas rôznych meracích období sme vykonali sériu meraní na rôznych meracích staniciach (päť meracích stanovíšť) v Žiline. Hlavným cieľom bolo zistiť charakteristiku znečisťujúcich látok tuhých častíc (PM_{10} a $PM_{2,5}$) a oxidov dusíka (NO_x) v mestskom prostredí mesta Žilina. Preskúmali sa najmä koncentrácie znečisťujúcich látok, distribúcia tuhých znečisťujúcich látok, vzťah medzi tuhými časticami a oxidmi dusíka, obsah vybraných chemických prvkov v tuhých časticiach. Zistilo sa rôzne správanie sa tuhých znečisťujúcich látok a oxidov dusíka vo vzťahu k meraciemu stanovišťu a meraciemu obdobiu. Významné zmeny v koncentráciách tuhých znečisťujúcich látok a oxidov dusíka sú spôsobené nielen primárnymi zdrojmi (napr. cestná doprava v meste Žilina), ale hlavne negatívnymi udalosťami (kombinácia zdrojov znečistenia ovzdušia a meteorologických podmienok). Maximálne 24-hodinové koncentrácie tuhých znečisťujúcich látok a oxidov dusíka NO_x boli namerané počas zimnej sezóny na meracom stanovišti na Komenského ulici: PM_{10} 114,9±15,6 µg/m^3, $PM_{2,5}$ 84,5±20,6 µg/m^3 a NO_x 95,6±51,2 µg/m^3. V meste Žilina boli niektoré meracie stanovištia s vyšším podielom hrubej frakcie $PM_{2,5-10}$ alebo jemnej frakcie $PM_{2,5}$. Bol analyzovaný vzťah medzi PM_{10} a NO_x. Zistili sa rozdiely v koncentráciách skúmaných chemických prvkov obsiahnutých v PM. V hrubej frakcii $PM_{2,5-10}$ boli prevažne zastúpené chemické prvky Mg, Al, Si, Ca, Cr, Fe a Ba a v jemnej frakcii $PM_{2,5}$ chemické prvky K, S, Cd, Pb, Ni a Zn.

Kľúčové slová: *tuhé častice, oxidy dusíka, znečistenie ovzdušia v meste, chemické zloženie tuhých častíc*

Paulownia Wallachia a jej bioplynový potenciál

Michaela PLEKANCOVÁ, Lucia IVANOVÁ, Petra SZABOVÁ, Hela RUTZKÁ, Igor BODÍK

Oddelenie environmentálneho inžinierstva, Fakulta chemickej a potravinárskej technológie, Slovenská technická univerzita, Radlinského 9, 812 37 Bratislava, e-mail: michaela.plekancova@stuba.sk

Súhrn

Predkladaná práca mala za cieľ stanoviť bioplynový potenciál rýchlorastúcej dreviny Paulownia Wallachia. Práca sa zaoberala sledovaním produkcie bioplynu z krátkodobého i dlhodobého hľadiska, kedy boli substrátom práve listy spomínanej rastliny vo svojej čerstvej aj silážovanej forme. Substrát bol testovaný z krátkodobého hladiska, a to prostredníctvom metanogénnych testov pri rôznych pomeroch substrátu k anaeróbnemu kalu. Experiment pozostával aj z prevádzky miešaných anaeróbnych reaktorov v mezofilných podmienkach, ktoré boli prevádzkované pri objemovom zaťažení asi 1 g X_{org}/l.d. Reaktory boli v prevádzke od októbra 2018 do decembra 2018 a denne boli do nich dávkované listy ako organický substrát a tiež sa v týždenných intervaloch analyzovali chemické parametre. Výsledky ukázali priaznivý nárast produkcie bioplynu, ktorý sa približne po 30 dňoch ustálil. Na základe výsledkov tejto práce je zrejmé, že Paulownia Wallachia má bioplynový potenciál a mohla by byť vhodnou alternatívou pri produkcii bioplynu vo svete i na Slovensku. Rastlina dokáže na tonu surového materiálu vyprodukovať viac ako 120 m^3 bioplynu ako zdroja energie.

Kľúčové slová: *Paulownia Wallachia; mezofilná anaeróbna fermentácia; bioplyn*

Úvod

Jedným zo zásadných politických aj ekonomických problémov 21. storočia je otázka energie, a jej udržateľnosť a hospodárenie s ňou. V dôsledku pomalého, ale takmer istého vyčerpania základných zdrojov energie svet v súčasnosti poukazuje najmä na alternatívne zdroje energie. Tieto zdroje sú obnoviteľné a zároveň majú menej škodlivý dopad na životné prostredie a patrí medzi nich napríklad slnečné žiarenie, voda, vietor, rašelina, biomasa, bioplyn.

Anaeróbna fermentácia predstavuje široko uplatniteľnú metódu biokonverzie komplexných organických substrátov na obnoviteľnú energiu vo forme metánu [1]. Anaeróbna fermentácia je biochemický proces, pri ktorom sa mikrobiálnymi procesmi rozkladá organická hmota bez prístupu vzduchu na dve hlavné zložky metán - CH_4 a oxid uhličitý - CO_2 [2]. V súčasnosti sa v anaeróbnej fermentácii uprednostňujú substráty z rastlinnej výroby (kukuričná siláž), potravinárskeho odpadu (kuchynské a reštauračné odpady), hnojovica a pod. [3]. Tieto organické substráty okrem hnojovice sú využívané aj na kŕmne účely. S cieľom zamedziť plytvaniu krmiva na výrobu energie je vhodné vyhľadávať nové alternatívne zdroje na výrobu energie. Jedným z alternatívnych zdrojov, ktorý by mohol mať v budúcnosti pri anaeróbnej fermentácii uplatnenie je aj rýchlorastúca drevina ázijského pôvodu z rodu Paulownia.

Stromy rodu Paulownia možno zaradiť do skupiny rýchlorastúcich drevín nielen pre ich rýchly rast (3 – 5 metrov ročne) a veľké množstvo dreva generované v relatívne krátkom časovom období, ale aj vysokú schopnosť adaptácie na rôzne klimatické podmienky [4].

Obrázok 1: Rastlina Paulownia Wallachia

Paulownia je vysoko tolerantná voči nepriaznivým podmienkam a vďaka svojmu bohatému koreňovému systému je schopná z pôdy odstraňovať rôzne minerály, udržiavať v nej optimálnu vlhkosť a zlepšovať jej celkový stav. Drevo Paulownie je veľmi ľahké, no zároveň silné a pevné a v porovnaní s inými drevinami pomerne rýchlo schne [5]. Toto drevo je zároveň veľmi ľahko opracovateľné a aj z tohto dôvodu sa využíva v širokej škále priemyselných odvetví (výroba hudobných nástrojov, stavebníctvo, výroba nábytku, tepelný izolant) [6].

Stromy Paulownia sú pestované predovšetkým pre svoje drevo, no v posledných rokoch sa ich listy využívajú aj na kŕmne účely poľnohospodárskych zvierat (najmä prežúvavcov). Listy Paulownia sú totiž bohaté na rôzne minerály, ako je vápnik, zinok, fosfor a železo. Navyše listy Paulownie obsahujú aj pomerne vysoké množstvo celulózy, bielkovín a dusíka [4].

V predloženej štúdii sme sa zaoberali možnosťou využitia energetického potenciálu listov zo stromu Paulownie. Cieľom bolo odsledovať a zhodnotiť schopnosť listov tejto rastliny v anaeróbnych podmienkach produkovať bioplyn a sledovať mieru zastúpenia metánu v ňom.

Experimentálna časť

Substrát

Testovaným substrátom na výrobu bioplynu boli listy Paulownie. Tabuľka 1 udáva analýzu obsahu najviac zastúpených látok v listoch *Paulownia Wallachia*.

Tabuľka 1: Chemické zloženie listu Paulownia wallachia [4]

Zložka	%
Organické látky	91,4
Proteíny	22,6
N	2,8 – 3
Ca	2,1
Zn	0,9
Fe	0,6
P	0,6
K	0,4

Pred samotným testovaním metanogénneho potenciálu listov Paulownie (obrázok 2) bola potreba úpravy jednotlivých listov nastrihaním, resp. nasekaním (obrázok 3) listov rastliny nadrobno a ich umiestnenie do uzavretých nádob, pričom jedna z nich bola používaná ako čerstvý materiál a druhá bola určená na silážovanie pri laboratórnej teplote (obrázok 4). Silážovanie listov prebiehalo po dobu dvoch týždňov bez prístupu vzduchu.

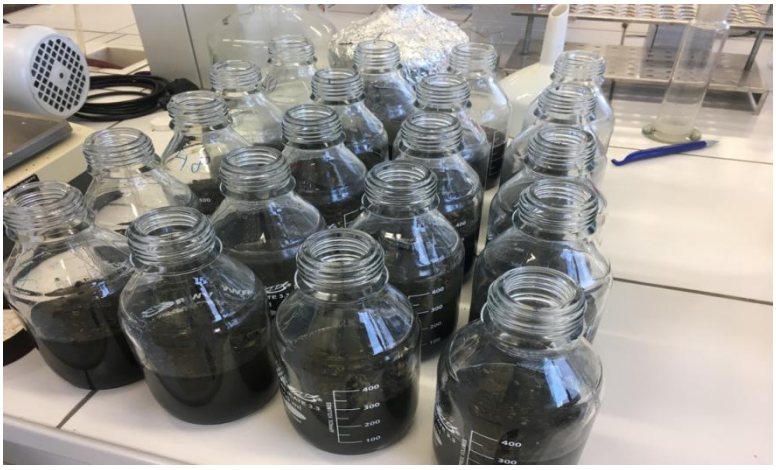
Obrázok 2: List rastliny Paulownia Wallachia

Obrázok 3: Nasekané listy Paulownia Wallachia

Obrázok 4: Nasekaná rastlina pripravená na silážovanie

Testy metanogénneho potenciálu

Testy metanogénneho potenciálu boli realizované v sklenených fľašiach s objemom 500 ml. Do fliaš sme nadávkovali mezofilný neadaptovaný kal, skúmaný substrát a vodu na doplnenie objemu 330 ml a fľaše sme umiestnili do laboratória vyhrievaného na 37 °C. Základné sledovanie spočívalo v odčítavaní kvapaliny vytlačenej bioplynom v byrete.



Obrázok 5: vsádzkové anaeróbne reaktory – metanogénne testy

Mezofilný anaeróbny reaktor

Test anaeróbnej fermentácie listov *Paulownie wallachie* prebiehal v dvoch paralelne pracujúcich mezofilne vyhrievaných anaeróbnych reaktorov A a B. Reaktory boli naplnené anaeróbnym stabilizovaným mezofilným kalom o objeme 1,4 l z ČOV Devínska Nová Ves a kal bol vytemperovaný na 37 °C a neustále premiešavaný.

Vyprodukovaný bioplyn bol vedený cez plynové hodiny. Do oboch reaktorov bolo pridávané rovnaké množstvo substrátu, ktoré korešponduje k anaeróbnemu kalu v pomere 1:1 vzhľadom na organickú sušinu. Neskôr sa do reaktora B začal pridávať silážovaný substrát.

Analýzy

Raz týždenne bola odoberaná vzorka kalu z reaktora, v ktorej sa meralo pH, pH kalovej vody a NMK. Analyticky sa stanovovala v kalovej vode CHSK, celkový dusík, celkový fosfor a amoniakálny dusík. Na analýzy CHSK, celkový dusík, celkový fosfor a amoniakálny dusík boli využívané kyvetové testy spoločnosti HACH LANGE, s.r.o. Koncentráciu celkových látok a SŽ (stratu žíhaním) sme stanovovali podľa Horákovej [7]. Produkcia bioplynu sa odčítavala z plynových hodín, kam bol bioplyn privádzaný z premývačky naplnenej destilovanou vodou.

Zloženie bioplynu bolo merané mobilným plynovým analyzátorom GA 2000 Plus firmy Geotechnical Instruments, UK.

Výsledky a diskusia

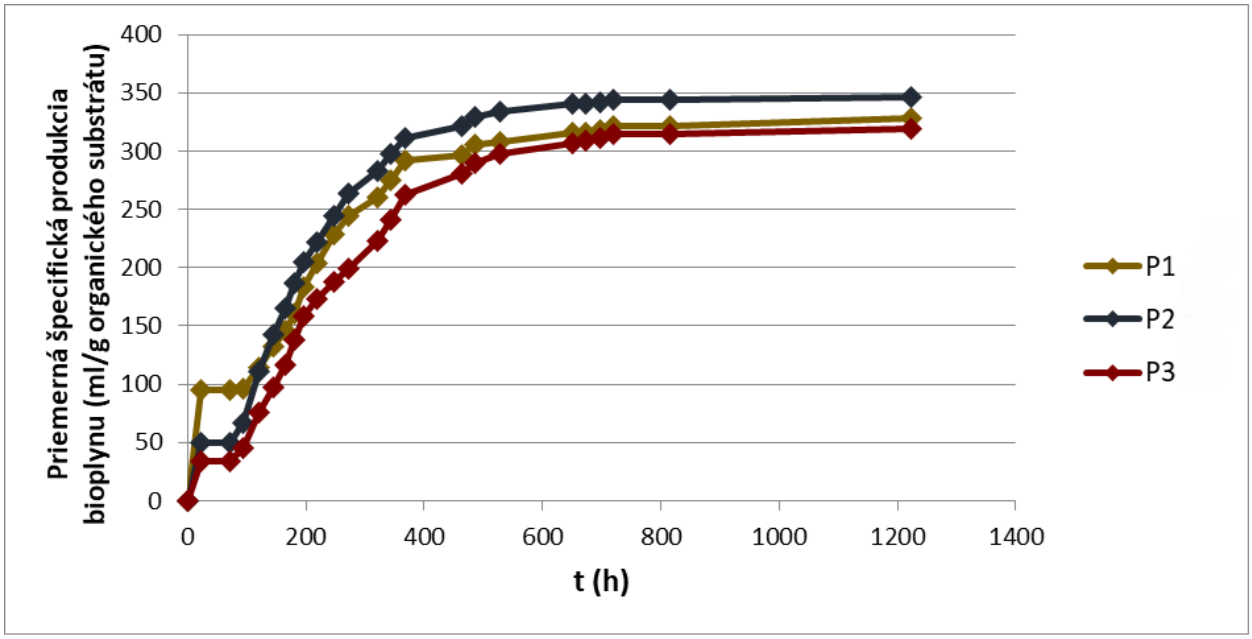
Metanogénne testy

Na overenie vhodnosti listov Paulownie ako substrátu pre anaeróbne procesy sme zostavili sériu metanogénnych testov. Metanogénne testy sa realizovali v dvanástich vsádzkových reaktoroch, v štyroch sériách s rôznym obsahom substrátu. Pri každej sérii sme sledovali tri paralelné pokusy. Pred spustením metanogénnych testov sme v každej fľaši zmerali pH, rovnako aj po ukončení testov.

Po spustení testov nastal veľmi rýchly nárast produkcie bioplynu, neskôr sa jeho produkcia ustaľovala a na 30. deň od spustenia už môžeme konštatovať ustálenie procesu. Priemerné hodnoty množstva bioplynu v troch paralelných testoch:

- P1 (substrát:kal = 1:1): 93,03 ml bioplynu
- P2 (substrát:kal = 2:1): 213,47 ml bioplynu
- P3 (substrát:kal = 3:1): 300,90 ml bioplynu

Na základe výsledkov z analýzy sušiny substrátu sme vyprodukované množstvo bioplynu vztiahli na hmotnostnú jednotku organických látok v substráte. Získali sme teda špecifickú produkciu bioplynu na množstvo organického substrátu (po žíhaní pri 550 °C) v ml/g.



Obrázok 6: Priemerná špecifická produkcia bioplynu vztiahnutá na gram organického substrátu

Z obrázku 6 je zrejmé, že najvyššia špecifická produkcia bioplynu je zaznamenaná u vzorky, v ktorej bol pomer substrátu k anaeróbnemu kalu 2:1, zvyšné dve vzorky s odlišnou koncentráciou substrátu majú však veľmi podobné množstvo a priebeh vyprodukovaného bioplynu.

Počas metanogénnych testov sme merali aj zloženie vyprodukovaného bioplynu, pričom nás zaujímalo hlavne zastúpenie metánu v ňom, ktoré by sa malo pohybovať optimálne od 50 do 70 %. Výsledky pre jednotlivé koncentrácie substrátu sú zhrnuté v tabuľke 2.

Tabuľka 2: Zloženie bioplynu v jednotlivých testoch

Vzorka	Obsah CH_4 %
Paulownia Wallachia 1:1	49,1
Paulownia Wallachia 2:1	56,4
Paulownia Wallachia 3:1	57,1

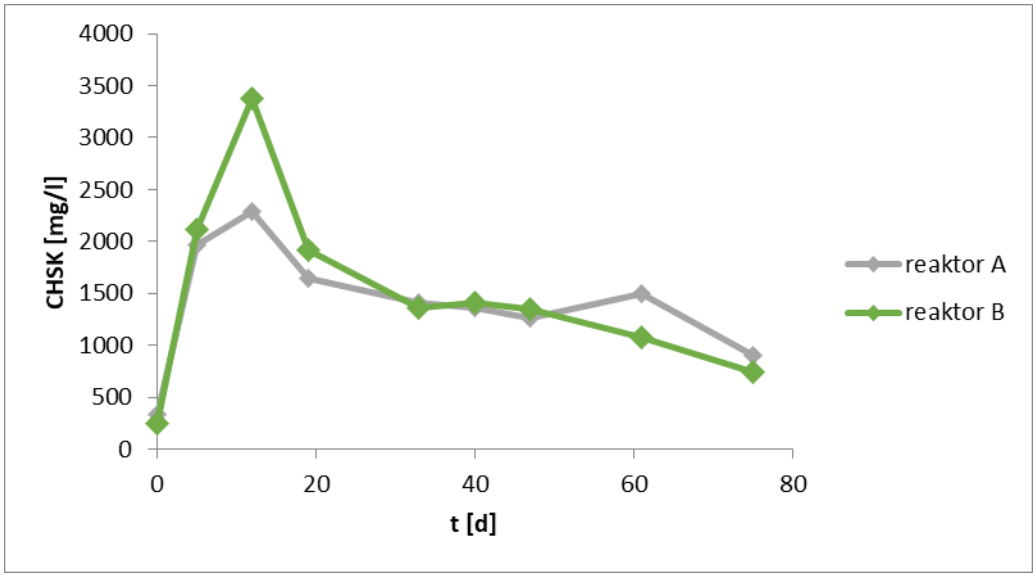
So zvyšovaním pomeru listov *Paulownia Wallachia* sa zvyšovalo aj percento zastúpenia metánu vo vyprodukovanom bioplyne. Najvyšší obsah metánu 57,1 % vyprodukoval pomer substrátu *Paulownie Wallachie* 3:1. Tento obsah už možno považovať za technologicky akceptovateľný aj v reálnych podmienkach.

Metanogénne testy teda potvrdili schopnosť listov *Paulownia Wallachia* efektívne produkovať bioplyn. Ako z výsledkov testov vyplýva, substrát je schopný produkovať asi 350 ml bioplynu/g org. substrátu, čo je porovnateľné s momentálne používanými substrátmi na výrobu bioplynu, ako napr. kukuričná siláž. Rovnako je uspokojivý aj obsah metánu v bioplyne.

Mezofilné anaeróbne reaktory

Na základe pozitívnych výsledkov metanogénnych testov, v ktorých sa listy Paulownie javia ako potenciálne zaujímavý a využiteľný substrát na výrobu bioplynu, sme sa na potvrdenie dosiahnutých výsledkov rozhodli pokračovať formou dlhodobej prevádzky anaeróbnych reaktorov. Do oboch reaktorov bolo pridávané rovnaké množstvo substrátu, pričom zaťaženie reaktora sa udržiavalo na hodnote asi 1 g_{Xorg} substrátu na kg_{Xorg} kalu za deň. Reaktory boli prevádzkované 75 dní. Na sledovanie metanogénneho procesu v anaeróbnych reaktoroch sa počas celej ich prevádzky sledovali základné analytické parametre, ako množstvo vyprodukovaného bioplynu, CHSK, NMK, pH a pod.

Hodnota pH v reaktoroch sa počas celej doby prevádzky pohybovala v rozmedzí 6,32 – 7,30 čo predstavuje vzhľadom na hodnoty uvedené v teórií optimálne podmienky pre priebeh anaeróbnych procesov. Hodnota pH kalovej vody bola mierne vyššia, konkrétne 7,04 – 7,98, pričom jej najvyššia hodnota bola zaznamenaná až v závere merania. Každý týždeň bola v kalovej vode sledovaná chemická spotreba kyslíka, pričom jej koncentrácia sa pohybovala v rozmedzí 329 až 2285 mg/l v reaktore a s priemernou hodnotou 1406 mg/l, v prípade reaktora B bol rozsah CHSK medzi 244 a 3380 mg/l a stredná hodnota na úrovni 1512 mg/l.



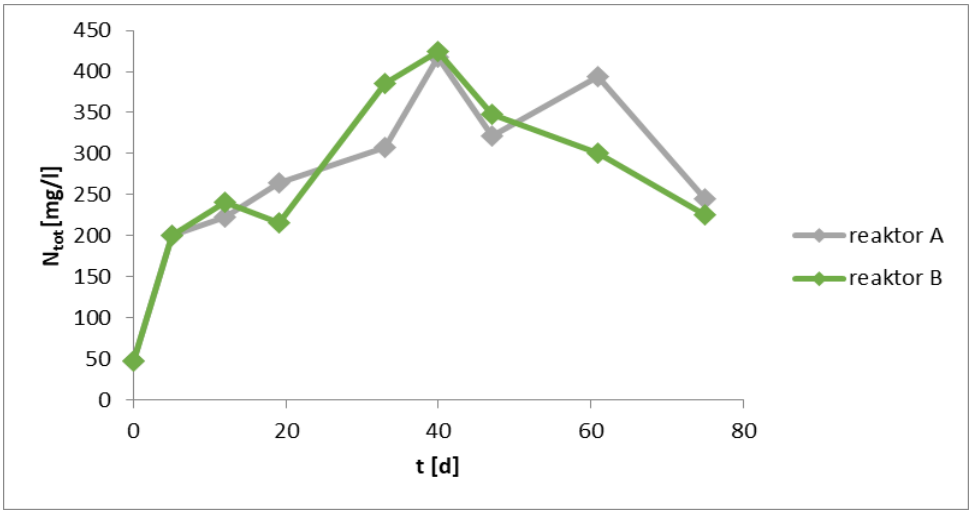
Obrázok 7: Graf zobrazujúci nameranú koncentráciu chemickej spotreby kyslíka v kalovej vode v závislosti od času

Ako môžeme vidieť na obrázku 7, pridaním listov Paulownie do reaktorov koncentrácia CHSK sa zo začiatku výrazne zvýšila, neskôr sa vzhľadom na rozklad organického materiálu v procese anaeróbnej fermentácie začal jej obsah znižovať na hodnoty pod 1000 mg/l, čo možno taktiež považovať za optimálne hodnoty.

Týždenne sa uskutočňovalo aj sledovanie obsahu nižších mastných kyselín (NMK) v kalovej vode, ktorý počas prvých týždňov značne vzrástol až na hodnoty 1307 mg/l (reaktor A) a 1333 mg/l (reaktor B),

potom však začal výrazne klesať. Ku koncu prevádzky boli koncentrácie NMK v reaktoroch už len minimálne a v prípade oboch reaktorov neprekročili 200 mg/l, čo z hľadiska prevádzky anaeróbnych reaktorov možno považovať za optimálny rozsah.

Ďalším parametrom, ktorý sa v reaktoroch týždenne sledoval, bol obsah celkového N_{tot} a amoniakálneho N-NH_4 dusíka v kalovej vode. V reaktore A sa hodnoty N_{tot} pohybovali v rozsahu 46,7 – 418 mg/l a koncentrácia amoniakálneho dusíka bola v rozmedzí 27,7 – 312 mg/l. Obsah celkového a amoniakálneho dusíka v reaktore B bol veľmi podobný, pokles sme zaznamenali až po začatí s dávkovaním silážovaného materiálu do tohto reaktora. Hodnoty koncentrácie celkového dusíka v reaktore B boli 47,1 – 424 mg/l, kým amoniakálny dusík sa pohyboval v rozsahu 23,8 – 322 mg/l. Obsah amoniakálneho dusíka v oboch reaktoroch vždy predstavoval viac ako 50 % koncentrácie celkového dusíka. Na grafe (obrázok 8) môžeme vidieť ku koncu testovania pokles koncentrácie dusíka i keď koncentrácia bola stále v stovkách mg/l, možno však očakávať ďalší pokles dusíka v kalovej vode. Pri dlhodobej prevádzke reaktora, resp. pri reálnej prevádzke s použitím iba mono-substrátu listov Paulownie, by bolo potrebné pri znižovaní koncentrácie dusíka pridávanie kosubstrátu s vyšším podielom dusíka.



Obrázok 8: Koncentrácia celkového dusíka v kalovej vode v závislosti od času

Každé dva týždne bola vykonávaná aj analýza koncentrácie celkového fosforu, ktorý zo začiatku nadobúdal hodnoty približne okolo 25 mg/l, no zhruba po mesiaci začal jeho obsah klesať, kedy sme zaznamenali koncentrácie pod 10 mg/l. Zastúpenie celkového fosforu sa pohybovalo v koncentračnom rozsahu od 5,42 do 28,96 mg/l. Vzhľadom na vplyv zloženia substrátu, ako jedného z faktorov ovplyvňujúcich anaeróbny proces, by sa pomer CHSK:N:P mal približne pohybovať od 300:6,7:1 do 500:6,7:1 [8]. Možno povedať, že fosforu ako nutrientu samotného bolo vo vzorkách menej, ako je žiaduce, a mohol by to byť jeden z limitujúcich faktorov počas dlhodobej prevádzky anaeróbneho reaktora. Podobne ako sme to konštatovali v prípade dusíka, aj kvôli nízkemu podielu fosforu v listoch Paulownie sa javí vhodné pri reálnej dlhodobej prevádzke uvažovať o pridávaní vhodného kosubstrátu.

Počas celej prevádzky reaktorov sa spolu s chemickými analýzami stanovovali aj celkové látky (stanovené ako celková sušina pri teplote 105 °C). Ty sa v oboch reaktoroch pohybovali v podobných rozmedziach, a to približne od 3,98 – 5,39 g/l po 21,26 – 22,01 g/l. Organický podiel sušiny sa percentuálne (určený ako SŽ – strata žíhaním) pohyboval od 60 do 70 %.

Pre sprehľadnenie jednotlivých analýz uvádzame v tabuľkách 3 a 4 minimálne, maximálne a stredné hodnoty vyššie spomínaných parametrov.

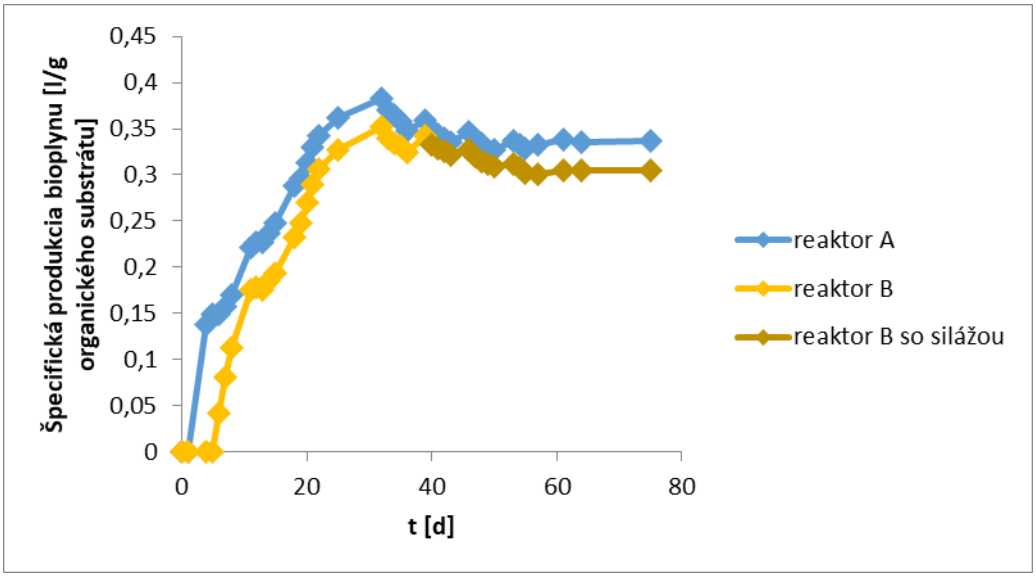
Tabuľka 3: Prehľad parametrov sledovaných v kale

Parameter		Denná produkcia bioplynu (l/d)	pH_k	X_{celk} (g/l)	X_{org} (g/l)	SŽ (%)
Reaktor A	min.	0,02	6,45	5,39	3,25	60,30
	max.	1,02	7,25	21,26	14,97	70,41
	priemer	0,47	6,98	14,97	10,68	71,34
Reaktor B	min.	0,05	6,32	3,98	2,44	61,31
	max.	1,09	7,3	22,01	15,24	69,24
	priemer	0,45	6,97	12,89	9,05	70,21

Tabuľka 4: Prehľad parametrov sledovaných v kalovej vode

Parameter		pH_f	CHSK (mg/l)	$N\text{-}NH_{4+}$ (mg/l)	$N\text{-}NH_3$ (mg/l)	N_{tot} (mg/l)	P_{tot} (mg/l)	NMK (mg/l)
Reaktor A	min.	7,04	329	27,7	0,19	46,7	5,42	190
	max.	8,04	2285	312	101,42	418	28,04	1307
	priemer	7,67	1406	203,3	13,25	288,87	13,75	551
Reaktor B	min.	7,19	244	23,8	0,20	47,1	3,98	171
	max.	7,96	3380	322	56,30	424	28,96	1333
	priemer	7,72	1512	206,78	8,73	267,81	13,27	536

Celková produkcia v reaktore A, do ktorého sa počas celej doby prevádzkovania pridával iba čerstvý substrát (listy), bola 18,36 litrov s priemerným obsahom metánu 57,5 %, v reaktore B, kam sa po 40 dňoch začal privádzať silážovaný substrát, bola táto hodnota približne o 13 % nižšia, konkrétne 16,23 litrov s priemerným obsahom metánu 55,5 %. Pri produkcii bioplynu sme sa sústredili hlavne na jeho špecifickú produkciu vztiahnutú na hmotnostnú jednotku organického substrátu, ktorú sme vyhodnotili graficky na obrázku 9.



Obrázok 9 :Graf zobrazujúci priebeh špecifickej produkcie bioplynu z reaktorov

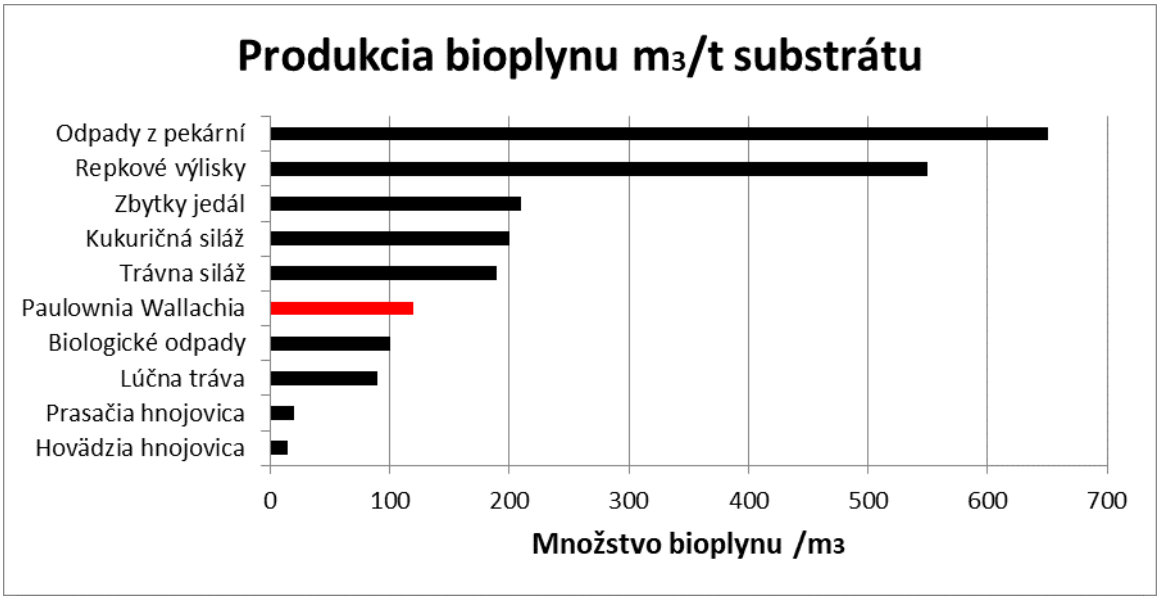
Dlhodobá prevádzka anaeróbnych reaktorov so substrátom z listov *Paulovnia Wallachia* potvrdila výsledky metanogénnych testov. Aj v dlhodobých testoch bol zvolený substrát schopný produkovať bioplyn cca 350 ml/g organického substrátu. Z daných výsledkov je vidieť, že substrát z listov *Paulownie Wallachie* má potenciál konkurovať niektorým v súčasnosti používaným substrátom na výrobu bioplynu. Jediným negatívom sa javí len nízky obsah dusíka, resp. fosforu v listoch a bolo by potrebné jeho externé dopĺňanie, prípadne kombinácia s iným substrátom.

Záver

V práci sme testovali vhodnosť listov zo stromu *Paulownia Wallachia* ako substrátu na výrobu bioplynu. Výsledky metanogénnych testov boli veľmi priaznivé, ukázali rýchly nárast produkcie bioplynu pri rôznych koncentráciách substrátu a na základe týchto výsledkov môžeme zhodnotiť, že *Paulownia Wallachia* rozhodne má metanogénny potenciál a mohla by sa tak stať jedným z alternatívnych zdrojov surovín na výrobu bioplynu. Zastúpenie metánu vo vyprodukovanom bioplyne bolo prijateľné a pohybovalo sa v rozmedzí hodnôt 49 – 57 % CH_4.

Na základe pozitívnych výsledkov metanogénnych testov boli v mezofilných podmienkach realizované dlhodobé testy produkcie bioplynu. Test prebiehal v dvoch mezofilných semikontinuálnych reaktoroch s objemovým zaťažením Bv = 1 g Xorg/l.d. Výsledky dlhodobých testov boli veľmi priaznivé, nakoľko ukázali rýchly rast produkcie bioplynu s najvyššou hodnotou dennej produkcie 0,382 l/d a aj prijateľné zastúpenie metánu v bioplyne, ktoré sa pohybovalo od 55,5 – 57,5 %.

Spracovaním výsledkov sme dospeli k záveru, že *Paulownia Wallachia* rozhodne má energetický potenciál a mohla by sa tak zaradiť k surovinám, ktoré sa využívajú v technológiách na výrobu bioplynu.



Obrázok 10: Produkcia bioplynu v m^3 na tonu surového substrátu z rôznych surovín [9]

Na obrázku 10 je znázornené, aký má Paulownia potenciál na výrobu bioplynu. Paulownia Wallachia z jednej tony surového materiálu (listov) dokáže vyrobiť cca 120 m^3 bioplynu (respektíve 350 m^3/t organickej sušiny).

Negatívom tohto substrátu je iba nedostatočná koncentrácia fosforu a preto by sa substrát z listov Paulownia wallachia nemohol využívať ako monosubstrát. Pri dlhodobej prevádzke anaeróbneho reaktora by mohla nastať inhibícia procesu v dôsledku nedostatku makronutrientov. Z tohto dôvodu by bola vhodná kombinácia listov Paulownie s iným substrátom s vysokým obsahom fosforu a pravdepodobne aj dusíka po nejakom čase.

Rovnako musíme konštatovať že išlo o prvotné testy a bude potrebné dlhodobejšie testovanie vybraného substrátu.

Literatúra

1. Li, W., et al., Methane production through anaerobic digestion: Participation and digestion characteristics of cellulose, hemicellulose and lignin. Applied Energy, 2018. 226: p. 1219 – 1228.
2. Lin, Y., et al., Anaerobic digestion of pulp and paper mill sludge pretreated by microbial consortium OEM1 with simultaneous degradation of lignocellulose and chlorophenols. Renewable Energy, 2017. 108: p. 108 – 115.
3. Hutňan, M., M. Czolderová, and J.J.C. Fuentes, Substráty spracovávané na bioplynových staniciach v SR, in Kaly a Odpady 2016, I. Bodík, M. Hutňan, and M. Fáberová, Editors. 2016, Vydaveteľstvo NOI Bratislava: Hotel Senec. p. 207.
4. Icka, P., Damo, R., Icka, E., 2016. "Paulownia Tomentosa, a Fast Growing Timber." Annals "Valahia" University of Targoviste - Agriculture 10 (1). Walter de Gruyter GmbH: 14 – 19. doi:10.1515/agr-2016-0003.
5. Yadav, N. K., Vaidya, B. N., Henderson, K., Frost Lee, J., Marshay Stewart, W., Arun Dhekney, S., Joshee, N., 2013. "A Review of Paulownia Biotechnology: a Short Rotation, Fast Growing Multipurpose Bioenergy Tree." American Journal of Plant Sciences 04 (11). Scientific Research Publishing, Inc,: 2070 – 82. doi:10.4236/ajps.2013.411259.
6. El-showk, S., El-showk N., 2003. "An Alternative for Sustainable Forestry." History.
7. Horáková, M., et al, Analytika vody. Vol. 2. vydání. 2003, Praha: VŠCHT
8. Bodík, I., Derco, J., Drtil, M., Hutňan, M., Mackuľak, T., Prousek, J., Balážová Pijáková, I., Fáberová, M., Hrdlička, L., Ivanová, L., Imreová, Z., Kecskés, J., Luptáková, A., Valíčková, M., 2016. Laboratórium odboru II – environmentálne technológie. Bratislava: Fakulta chemickej a potravinárksje technológie STU, 2016. ISBN 978-80-89597-47-5
9. AGROPORADENSTVO, 2006. [cit. 19.06.2019]. Dostupné na internete: http://old.agroporadenstvo.sk/oze/bioplyn/bioplynove_stanice.htm

Paulownia Wallachia and its biogas potencial

Michaela PLEKANCOVÁ, Lucia IVANOVÁ, Petra SZABOVÁ, Hela RUTZKÁ, Igor BODÍK

Department of Environmental Engineering, Faculty of Chemical and Food Technology, Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 9, 812 37 Bratislava, e-mail:plekancova@stuba.sk

Summary

The aim of this work was to determine the biogas potential of the fast-growing plant Paulownia Wallachia. The work dealt with the monitoring of biogas production in a long and a short term, when the plant was used in its fresh and ensiled form.

The substrate was tested in the short term by methanogenic tests at different substrate to anaerobic sludge ratios.The experimental part consists also from a monitoring of the operation of mixed anaerobic reactors in mesophilic conditions, which were operated at a volumetric load of 1 g Xorg/l.d. The organic substrate was dosed into the reactors from October 2018 to December 2018, and different chemical parameters were analyzed on weekly basis. The results showed a favorable increase in biogas production, which stabilized after approximately 30 days. Based on the results of this work it is clear that Paulownia Wallachia has a biogas potential and it is a suitable alternative for biogas production in the world and Slovakia as well. The plant can produce more than 120 m^3 of biogas per one tonne of raw substrate with about 55 % methane portion in biogas.

Keywords: *Paulownia Wallachia; mesophilic anaerobic digestion; biogas*

Vliv teploty na produkci bioplynu fermentačních zbytků

Martin ŠOTNAR

Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno
e-mail: martin.sotnar@mendelu.cz

Souhrn

Fermentační zbytek z bioplynové stanice má potenciál ke zbytkové produkci bioplynu. Bylo provedeno testování této produkce bioplynu a metanu s dobou testování 180 dní při teplotách 41 °C, 27 °C a 16 °C. Nejvíce bioplynu bylo vyprodukováno vzorkem A při teplotním režimu 41 °C, a sice 152.9 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$. U metanu stejný vzorek vyprodukoval při 41 °C až 86,4 × 10^{-3} m^3 kg^{-1}. Statisticky významný rozdíl byl shledán mezi měrnou produkcí bioplynu i metanu u všech variant testu. Dále byla produkce bioplynu a metanu v závislosti na teplotě proložena polynomem druhého stupně. Rovnice polynomu pro bioplyn můžeme napsat ve tvaru Y = (-42,927 ± 38,349) + (5,223 ± 2,9566) · X + (-0,0181 ± 0,0510) · X^2, (R^2 = 0,957) a pro metan Y = (-26,85 ± 27,94) + (2,3296 ± 2,1541) · X + (0,0033 ± 0,0372) · X^2, (R^2 = 0,939). Tyto rovnice umožňují následné určování případů zastřešení a vytápění konkrétních uskladňovacích jímek na fermentační zbytek s ohledem na dobu trvání testu 180 dní. Teoretická produkce elektrické energie kogenerační jednotou při využití průměrné produkce metanu za 180 dní testu, vzniklého při 41 °C je 70 685,0 kWh.

Klíčová slova: *anaerobní fermentace, fermentační zbytek, metan, produkce energie*

Úvod

Fermentační zbytek je výstupem (sekundárním produktem) anaerobní fermentace na bioplynové stanici. Anaerobní fermentace probíhá ve čtyřech fázích, kterými jsou hydrolýza, acidogeneze, acetogeneze a metanogeneze[1]. Výsledkem je ekologické a obnovitelné palivo bioplyn[2] a fermentační zbytek. Tento materiál je složitá směs organických a anorganických substrátů, živin, degradovatelných organických látek a vody[3]. Jeho vlastnosti jsou ovlivněny zejména časem a způsobem skladování fermentačního zbytku, charakteristikou a skladbou vstupních substrátů do procesu anaerobní fermentace a procesními podmínkami, za kterých fermentace probíhá[4].

Fermentační zbytek uložený v uskladňovací jímce obsahuje bioplynový potenciál, který může zvýšit úroveň produkce bioplynu[5, 6]. Experimentální měření emise bioplynu z uskladňovací nádrže bioplynové stanice o výkonu 1 MWh poukázal na značnou odlišnost 0,190 – 0,468 $m^3 \cdot m^{-2} \cdot den^{-1}$.[7] Mimo jiné také dochází k emisím NH_3, které u stejných uskladňovacích nádrží bylo 0,06 – 4,44 g $NH_3 \cdot m^{-2}$.

Uvolňováním hlavních složek bioplynu - metanu (CH_4) do ovzduší je porušována ozonová vrstva v stratosféře. Amoniak (NH_3) navíc způsobuje erozi a okyselení půd, což znamená, že bioplyn a NH_3 uvolněný z uskladňovacích nádrží na fermentační zbytek představují nebezpečí pro životní prostředí[8].

Další motivací pro řešení problematiky produkce bioplynu fermentačním zbytkem uskladněném v nádrži je závazek České republiky dle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/28 k produkci energie z obnovitelných zdrojů 13 % do roku 2020. Pro Evropskou unii je tato hodnota 20 % do roku 2020. Využitím zbytkové produkce bioplynu fermentačních zbytků se zvyšuje množství energie získané z obnovitelných zdrojů energie.

Využití bioplynu z fermentačního zbytku může mít, vzhledem k prodeji energie z tohoto zdroje energie, i pozitivní ekonomický dopad pro provozovatele bioplynové stanice. Uskladnění fermentačního zbytku v nádržích se provádí z legislativních a technologických důvodů. Vysoušení a spalování fermentačního zbytku je energeticky náročné a naráží na problém nedostatku organické hmoty na zemědělské půdě. Na druhé straně fermentační zbytek potenciálně může obsahovat těžké kovy, patogeny, vysoké dávky dusíku, které ve výsledku omezují aplikaci na půdu[9]. Aplikace fermentačního

zbytku na zemědělskou půdu není možná v kteroukoliv roční dobu. Proto se uskladňovací nádrže dimenzují k uskladnění 120 – 180 dní produkce fermentačního zbytku bioplynovou stanicí[10].

Cílem této studie je určení produkce bioplynu a metanu z fermentačních zbytků. Byly provedeny testy anaerobní fermentace s dobou zdržení 180 dní při různých teplotách. Tyto výsledky umožní následné určování případů zastřešení a vytápění konkrétních uskladňovacích jímek na fermentační zbytek s ohledem na dobu trvání testu.

Experimentální část

V této práci byly použity vzorky fermentačních zbytků ze zemědělských bioplynových stanic. Tyto fermentační zbytky byly odebrány vždy při vstupu do uskladňovacích jímek. Tyto zemědělské bioplynové stanice pracují v kontinuálním režimu tekuté anaerobní fermentace s dvoustupňovou technologií. Složení vstupních materiálů do bioplynových stanic bylo především kejda a hnůj hospodářských zvířat (prasečí nebo skotu) a kukuřičná siláž (v součtu ± 90 %).

Pro laboratorní testování bylo využito vybavení celorepublikové referenční laboratoře bioplynových transformací na Mendelově univerzitě v Brně. Při testování produkce bioplynu a metanu se jednalo o 24 zkušebních fermentorů R1 – R24 o objemu 0,005 m^3. Testování bylo provedeno podle modifikovaného standardu VDI 4630. Tyto fermentory jsou umístěny ve třech oddělených systémech vyhřívaných vodních lázní. Každý vzorek byl dávkován do více testovacích fermentorů. Jednalo se vždy o dva fermentory v jednom systému. Celkem tři systémy tedy obsahovaly 6 fermentorů se stejným vzorkem a celkem 6 kontrolních fermentorů pro ověření funkčnosti systému. Každý fermentor byl nadávkován 3,3 kg materiálu. Každý systém byl udržován při jiné teplotě. Jednalo se o systém s teplotou 41 °C, dále s teplotou 27 °C a 16 °C s dobou zdržení 180 dní. Vyhodnocení produkce bioplynu je pro srovnání nutné přepočíst na fyzikálně normální podmínky (T_0 = 0 °C, p_0 = 101 325 Pa).

Obsah sušiny byl stanoven při 105 ± 3 °C dle normy ČSN EN 14 346:2006 za použití elektrické sušárny VENTICELL Standard 111. Obsah organické sušiny (spalitelných látek) byl stanoven spalováním při 550 ± 25 °C dle normy ČSN EN 15 169:2007 v muflové peci LMH 07/12. Analýza složení bioplynu byla provedena měřicím přístrojem Dräger X-am 8600.

Produkce metanu a bioplynu byla vyhodnocena pomocí základních deskriptivních statistik. Je uváděn průměr a rozsah naměřených hodnot. Veškeré statistické analýzy probíhaly na hladině významnosti 5 %, tedy výsledky s p-hodnotou menší než 0,05 jsou považovány za statisticky významné.

Výsledky a diskuse

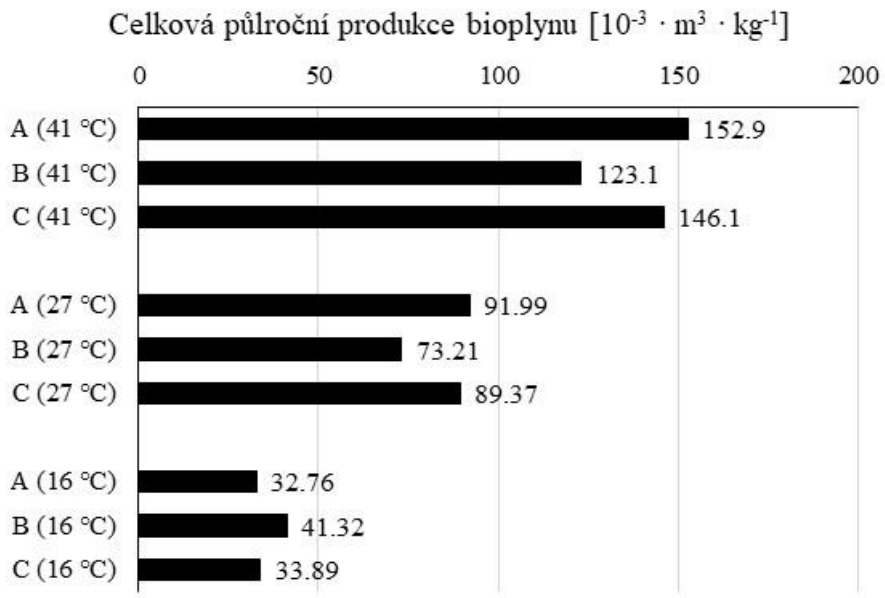
Charakteristika vstupních materiálů je znázorněna v následující tabulce 1, kde uvedené hodnoty jsou aritmetickým průměrem naměřených hodnot.

Tabulka 1: Charakteristika fermentačních zbytků testu

Charakteristika	Jednotka	Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C
Doba zdržení v BPS	Den	34	60	51
Sušina	%	7,86	7,66	3,99
Spalitelné látky	%	79,86	75,69	72,19
pH	-	7,83	7,79	7,91

Hodnoty, které lze v provozu bioplynové stanice ovlivňovat, jsou doba zdržení materiálu ve fermentoru a sušina materiálu. Sušina je ovlivněna přírodními podmínkami, které určují sušinu vstupní suroviny, např. kukuřičné siláže. Druhou stránkou je ředění vstupní suroviny z technologických důvodů prasečí kejdou, případně technologickou vodou nebo vracením kapalné frakce fermentačního zbytku.

Proto budou výsledky konfrontovány především s těmito hodnotami. Produkce bioplynu dlouhodobého testu jednotlivých vzorků je na obrázku 1.



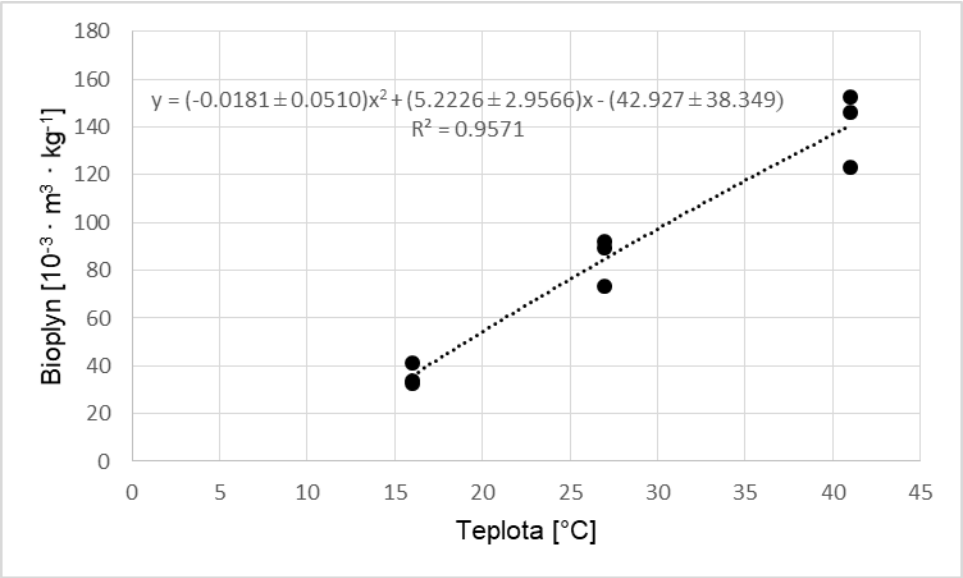
Obrázek 1: Celková půlroční specifická produkce bioplynu [10^{-3} m^3 kg^{-1}] při různých teplotách. Produkce je vztažena na hmotnostní množství organické sušiny materiálu.

Uvedený obrázek 1 zobrazuje celkovou produkci bioplynu jednotlivých vzorků ve třech teplotních režimech, vztaženou na kg organické sušiny. Nejvíce bioplynu bylo vyprodukováno vzorkem A při teplotním režimu 41 °C, a sice 152,9 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$. Tato skutečnost může být dána charakterem materiálu, který měl nejkratší dobu zdržení v bioplynové stanici a nejvíce spalitelných látek. Nejméně bioplynu však bylo naměřeno při teplotě 16 °C opět u vzorku A. Uvedené produkce v jednotlivých teplotních režimech 41 °C, 27 °C, 16 °C statisticky průkazně vykazovaly odlišnosti ($p<0,05$).

V článku[11] testovali zbytkovou produkci bioplynu fermentačních zbytků při různých teplotách, odebraných z bioplynové stanice s krátkou dobou zdržení. Při teplotě 15 °C a době trvání testu 70 dní dosáhli produkce přibližně 0,8 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$ čerstvé hmoty. V našem případě by byla průměrná hodnota při teplotě 16 °C a době zdržení 180 dní 36 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$, což odpovídá přibližně 2,35 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$ bioplynu z čerstvé hmoty. Vzhledem k delší době zdržení je hodnota vyprodukovaného bioplynu v našem testu vyšší. Dále pak produkce bioplynu závisí na kvalitě vstupních surovin, organické zátěži fermentoru, doby zdržení původního materiálu ve fermentoru, prostředí a teplotě skladování fermentačního zbytku[12].

Vzhledem k délce testu půl roku nemá tak výrazný vliv doba zdržení materiálu ve fermentoru před uskladněním v nádrži na fermentační zbytek. Vliv sušiny v případě, kdy se jedná o měrnou produkci, také nelze jednoznačně hodnotit. Rozdíly tak mohou být dány použitou technologií, kvalitou vstupních surovin a další. Pro predikci produkce bioplynu byl vytvořen lineární model produkce bioplynu, vyobrazený na obrázku 2. Tento model je použitelný v intervalu naměřených hodnot.

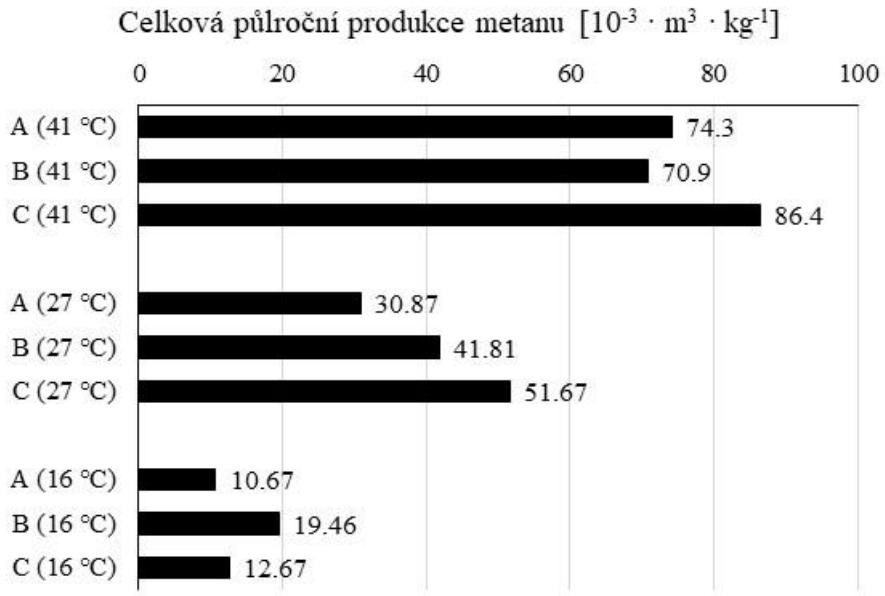
Z obrázku 2 je možné určit, že s rostoucí teplotou roste produkce bioplynu. To je také důvodem, proč provozovatelé bioplynových stanic navyšují, v rámci technologických možností, teplotu anaerobní fermentace používanou pro produkci bioplynu. Naměřená data byla proložena polynomem 2. řádu, který se běžně pro závislost V(T) u této problematiky používá.[13] Druhá derivace $d^2Y/dX^2 < 0$ uvádí, že dochází ke zpomalování produkce bioplynu.



Obrázek 2: Model predikce celkové půlroční produkce bioplynu [10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$] v závislosti na teplotě
Rovnice: $Y = (-42{,}927 \pm 38{,}349) + (5{,}223 \pm 2{,}9566) \cdot X + (-0{,}0181 \pm 0{,}0510 \cdot X^2)$, ($R^2 = 0{,}957$)
Produkce je vztažena na hmotnostní množství organické sušiny materiálu.

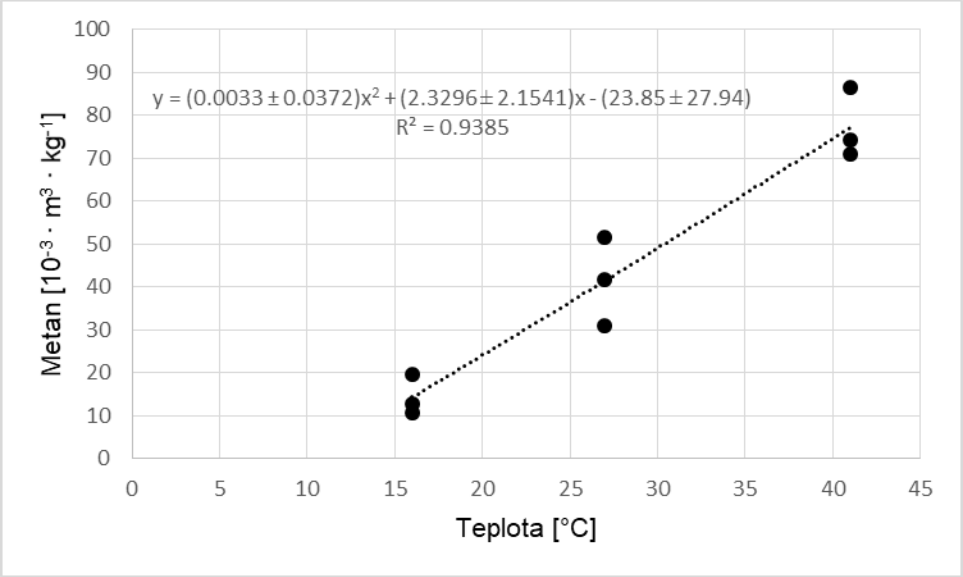
V článku[11] provedli 70 dní testu při různých teplotách. Pokud dosadíme do zjištěné rovnice hodnotu pro teplotu 25 °C z tohoto článku, dostáváme produkci 76,34 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$. Naměřená hodnota produkce bioplynu v tomto článku byla přibližně 58 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$. Rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou je v tomto případě dán rozdílnou dobou trvání testu. V našem případě se za 180 dní testu vyprodukovalo větší množství bioplynu.

Z tohoto modelu je také možné vycházet při kalkulaci nákladů a doby návratnosti investice, při zamýšlení zastřešení a případném ohřevu fermentačního zbytku v uskladňovací nádrži před jeho dalším využitím. Důležitým faktorem při této kalkulaci však není pouze bioplyn, ale především produkce metanu obsaženého v bioplynu. Měrná produkce metanu uvedených vzorků je znázorněna na obrázku 3.



Obrázek 3: Celková půlroční měrná produkce metanu [10^{-3} m^3 kg^{-1}] při různých teplotách.
Produkce je vztažena na hmotnostní množství organické sušiny materiálu.

V průběhu testu za 180 dní vzniklo nejvíce metanu u vzorku C při 41 °C, a sice 86,4 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$. Tento vzorek vykazuje největší potenciál produkce vztažený na kg organické sušiny. Absolutní množství metanu by se však lišilo od vzorků s vyšším obsahem sušiny. Nejméně metanu bylo zjištěno u vzorku a při teplotě 16 °C, zde se jednalo o 10,67 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$. Vzhledem k tomu, že produkce bioplynu při 41 °C byla největší u vzorku A, stejně jako při teplotním režimu 27 °C, tak je zřejmé, že se koncentrace metanu u jednotlivých vzorků lišila. Spalitelného metanu tedy bylo při teplotě 41 °C i 27 °C vyprodukováno nejvíce u vzorku C. V teplotním režimu 16 °C to bylo u vzorku B. V článku[7] zjistili při průměrné koncentraci metanu v bioplynu 56 % produkci 2,4 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$. Tato hodnota byla naměřena při průměrné teplotě 29.2 °C z každodenní vsázky fermentačního zbytku do uskladňovací nádrže. Pokud bychom tento materiál naměřili každý den po dobu trvání testu 180 dní, byla by hodnota celkové produkce 432 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$. Tato hodnota je vyšší než u našeho testu, protože se nejedná o vsázkové měření, ale kontinuální. Pro predikci produkce metanu byl vytvořen model produkce metanu na obrázku 4.



Obrázek 4: Celková měrná produkce metanu [10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$] při různých teplotách
Rovnice: $Y = -(26,85 \pm 27,94) + (2,3296 \pm 2,1541) \cdot X + (0,0033 \pm 0,0372) \cdot X^2$, ($R^2 = 0,939$)
Produkce je vztažena na hmotnostní množství organické sušiny materiálu.

Celková měrná produkce metanu znázorňuje tendenci produkce metanu ve vztahu k měřeným teplotním režimům. Jedná se o polynom druhého řádu použitelný pro predikci produkce metanu v rozsahu teplot 16 – 41 °C. Druhou derivací uvedené rovnice polynomu druhého řádu $d^2Y/dX^2 > 0$ uvádíme, že dochází ke zrychlování produkce metanu. Vzhledem k směrodatným odchylkám členů této rovnice je možné dojít k závěru, že se reakce zpomaluje, stejně jako v případě produkce bioplynu.

Teplota používaná pro anaerobní fermentaci na bioplynových stanicích se pohybuje od 35 °C až po běžných 41 °C, 43 °C i více. Udržování vhodné teploty v uskladňovací jímce je otázka investičních a provozních nákladů. Emise metanu za 180 dní z uskladňovací nádrže bioplynové stanice s dobou zdržení 60 dní a teplotě anaerobní fermentace 38 °C byla změřena 19,23 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$.[14] U tohoto testu byla naměřena průměrná teplota v uskladňovací jímce 12,2 °C. Při výpočtu teploty dosazením naměřené produkce metanu v testu z uvedeného článku do vypočtené rovnice polynomu druhého řádu byla získána hodnota 19,26 °C. Uvedené hodnoty odpovídají skutečnostem s ohledem na dobu trvání testu, způsobu měření produkce metanu a proměnlivosti vlastností vstupních surovin.

Celková, průměrná produkce metanu za dobu trvání testu u teplotního režimu 41 °C byla 77 x .10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$. V případě úvahy modelové uskladňovací jímky na fermentační zbytek o objemu 4800 m^3 by v této jímce při jejím naplnění bylo 219 336 kg organické sušiny produkující metan. Celková produkce by tedy byla 0,077 x 219 336 = 16 888,87 m^3 metanu. Vzhledem k výhřevnosti metanu 9,965 $kWh \cdot m^{-3}$ je celkový potenciál energie 16 888,87 x 9,965 = 168 297,61 kWh. Při spalování bioplynu obsahujícím metan v kogenerační jednotce se účinnost získání elektrické energie uvažuje přibližně 42 %. Jedná se tedy o 70 685,0 kWh elektrické energie.

Závěry

Produkce bioplynu a v něm obsaženého metanu je ovlivněna, mimo jiné, teplotou, při které anaerobní fermentace probíhá. Testy anaerobní fermentace fermentačních zbytků byly provedeny při teplotách 16 °C, 27 °C a 41 °C. Statisticky významný rozdíl byl shledán mezi měrnou produkcí bioplynu i metanu všech variant testu. Nejvíce bioplynu bylo vyprodukováno vzorkem A při teplotním režimu 41 °C, a sice 152.9 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$. U metanu stejný vzorek vyprodukoval při 41 °C až 86,4 × 10^{-3} $m^3 \cdot kg^{-1}$. Teoretická produkce elektrické energie kogenerační jednotou při využití průměrné produkce metanu za 180 dní testu vzniklého při 41 °C je 70 685,0 kWh.

Při uskladnění fermentačního zbytku do uskladňovací nádrže je možné uvažovat její zastřešení a jímání vzniklého plynu. Získaná data mohou být použita pro následné určování případů zastřešení a vytápění konkrétních uskladňovacích jímek na fermentační zbytek s ohledem na dobu trvání testu 180 dní. Do budoucnosti je plánováno provedení testů s měřením produkce po určitých časových úsecích.

Literatura

1. Zhou, J., Zhang, R., Liu, F., Yong, X., Wu, X., Zheng, T., Jiang, M., Jia, H. (2016). Biogas production and microbial community shift through neutral pH control during the anaerobic digestion of pig manure. Bioresource Technology, 217, 44 – 49, ISSN: 0960-8524.
2. Vitázek, I., Klúčik, J., Uhrinová, D., Mikulová, Z., Mojžíš, M. (2016). Thermodynamics of combustion gases from biogas. Research in agricultural engineering, 62, 8 – 13, ISSN: 1805-9376.
3. Möller, K. (2015). Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. Agronomy for Sustainable Development, 35, 1021 – 1041, ISSN: 1773-0155
4. Marcato, C., E., Mohtar, R., Revel., J., C., Pouech, P., Hafidi, M., Guiresse, M. (2009). Impact of anaerobic digestion on organic matter quality in pig slurry. International Biodeterioration & Biodegradation, 63(3), 260 – 266, ISSN: 0964-8305
5. Menardo, S., Gioelli, F., Balsari, P. (2011). The methane yield of digestate: effect of organic loading rate, hydraulic retention time, and plant feeding. Bioresource Technology 102, 2348 – 2351, ISSN: 0960-8524.
6. Vitez, T., Haitl, M., Karafiát, Z., Mach, P., Fryč, J., Lošák, T., Szostková, M. (2011). Use of bio-enzymatic preparations for enhancement biogas production. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 59(26), 203 – 208, ISSN:1211-8516.
7. Gioelli, F., Dinuccio, E., Balsari, P. (2011). Residual biogas potential from the storage tanks of non-separated digestate and digested liquid fraction. Bioresource Technology. 102, 10248 – 10251, ISSN: 0960-8524.
8. Goebes, M. D., Strader, R., Davidson, C. (2003). An ammonia emission inventory for fertilizer application in the United States. Atmos. Environ. 37, 2539 – 2550.
9. Monlau, F., Sambusiti, C., Ficara, E., Aboulkas, A., Barakat, A., Carrère, H. (2015). New opportunities for agricultural digestate valorization: current situation and perspectives. Energy & Environmental Science, 8, 2600 – 2621, ISSN: 1754-5706
10. Regione Piemonte, (2007). Regolamento 10/R Disciplina generale dell'utilizzazioneagronomica degli effluenti zootecnici e delle acque reflue e programma di azione per le zone vulnerabili da nitrati di origine agricola (Legge regionale 61/ 00).
11. Angelidaki, I., Boe, K., Ellegaard, L. (2005). Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of full-scale biogas plants. Water Science and Technology, 52(1 – 2), 189 – 194, ISSN: 0273-1223.
12. Hansen, T., L., Sommer, S., G., Gabriel, S., Christensen, T., H. (2006). Methane production during storage of anaerobically digested municipal organic waste. Journal of Environment Quality, 35(3), 830 – 836, ISSN: 1537-2537

13. Guo, P., Zhou, J., Ma, R., Yu, N., Yuan, Y. (2019). Biogas Production and Heat Transfer Performance of a Multiphase Flow Digester. Energies 12(10):1960, 1 – 18, ISSN: 1996-1073.
14. Maldaner, L., Wagner-Riddle, C., VanderZaag, A., C., Gordon, R., Duke, Ch. (2018). Methane emissions from storage of digestate at a dairy manure biogas facility. Agricultural and Forest Meteorology, 258, 97 – 107, ISSN: 0168-1923.

Influence of temperature on biogas production from fermentation residues

Martin ŠOTNAR

Mendel University in Brno, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Czech Republic
e-mail: martin.sotnar@mendelu.cz

Summary

The fermentation residue from the biogas plant has the potential for residual biogas production. This biogas and methane production was tested during 180 days at 41 °C, 27 °C and 16 °C. Most of the biogas was produced by sample a with temperature regime of 41 °C, where the specific productionof this sample was 152.9 × 10^{-3} m^3 · kg^{-1}. The same sample produced at 41 °C volume of 86.4 × 10^{-3} m^3 · $kg^{-1}$of methane. A statistically significant difference was found between the specific biogas and methane production of all test variants. Furthermore, the production of biogas and methane, depending on temperature, was interleaved by a second degree polynomial. The polynomial equations for biogas can be written in the form Y = (-42,927 ± 38,349) + (5,223 ± 2,9566) · X (-0,0181 ± 0,0510) · X^2, (R^2 = 0,957) and for methane Y = (- 26.85 ± 27.94) + (2.3296 ± 2.1541) · X (0.0033 ± 0.0372) · X^2, (R^2 = 0.939). These equations allow the subsequent determination of cases of roofing and heating of specific storage wells to the fermentation residue with respect to the test duration of 180 days. The theoretical electricity production by the cogeneration unit using the average methane production for 180 days of the test, generated at 41 °C, overall 70 685.0 kWh.

***Keywords**: anaerobic fermentation, fermentation residue, methane*

The application of treated wastewater for the irrigation of fast-growing trees - field experiments on constructed wetland

Michal ŠEREŠ[a,b], Miloš ROZKOŠNÝ[c], Hana HUDCOVÁ[c], Pavel ŠALANDA[a,b], Petra INNEMANOVÁ[a,b], Pavel SEDLÁČEK[c]

[a] DEKONTA, a.s., Dřetovice 109, 273 42 Stehelčeves, Czech Republic, e-mail: michal.seres@dekonta.cz

[b] Institute for Environmental Studies, Faculty of Science, Charles University, Benátská 2, 128 01 Prague 2, Czech Republic

[c] TGM Water Research Institute, Mojmírovo nám. 16, 612 00 Brno, Czech Republic, e-mail: milos.rozkosny@vuv.cz

Abstract

Due to the progressive decrease in precipitation in the Czech Republic, the need for the irrigation of agricultural crops is steadily increasing. It is proposed that the problem of a lack of water resources might be partially solved via the reuse of treated wastewater in certain agricultural sectors however there is a very little known about the possible advantages or disadvantages of such sources of water under the local climate conditions. For this purpose, a semi-operated irrigation field was established at Hostětín in the Zlín region of the Czech Republic which was subsequently planted with willow cuttings (Salix viminalis L.). The plants were irrigated by means of two different water sources – wastewater from the local municipal treatment plant and local groundwater. During the 2018 and 2019 growing seasons, we observed the significantly enhanced growth of the wastewater irrigated willows – biomass yield was of 6.6 and 31.3 t/ha respectively under wastewater irrigation conditions, while only 1.0 and 1.8 t/ha was produced under fresh water irrigation conditions. The biomass quality was assessed via calorific values and showed lower gross and net calorific values for the wastewater irrigated willow biomass, i.e. 18.5 and 17.2 MJ/kg of dry matter respectively compared to 19.2 and 17.9 MJ/kg. *However, the overall high yields of the biomass more than compensated for this disadvantage. This study confirmed the hypothesis that treated wastewater can be used in agricultural areas in which it does not endanger either public health or the environment.*

Keywords: *Wastewater reuse, drop irrigation, constructed wetlands, fast-growing trees*

Introduction

Although water consumption per capita is decreasing on a continuous basis, a total of 744 million m^3 of water was treated in wastewater (WW) treatment plants in the Czech Republic in 2018 [1]. Of a total of 2 677 WW treatment plants that treated 97.6% of all the WW produced in that year, only 773 plants included tertiary treatment for the removal of phosphorus [2]. Due to the fact that overall precipitation in the Czech Republic has been decreasing over the last few years [3], the need for the irrigation of agricultural crops is increasing steadily. Moreover, the moderate climate change scenario predicted for the period 2050 – 2070 suggests that approx. 40 – 70% of the permitted consumption of irrigation water will not be covered by existing water sources [4]. It is proposed that the problem of a lack of water resources might be partially solved via the reuse of treated WW in certain agricultural sectors such as the farming of fast-growing trees (FGT). Almost 1 million m^3 of treated WW is used annually by the agricultural sector across the European Union [5]. While this source of irrigation water is particularly important in southern European countries such as Spain, it also makes a significant contribution in several northern European countries such as Denmark. In rural areas, so-called willow-based zero

discharge constructed wetlands are often employed as recycling systems [6]. The application of WW for the irrigation of FGT results in higher biomass yields together with the recycling of nutrients and a reduction in the volume of WW [7, 8]. FGT plantations not only work as low cost WW treatment plants as in the case of zero discharge constructed wetlands, but also produce biomass for the production of energy, thus reducing the need for fossil fuels [9]. Due to the decrease in greenhouse gas emissions as a result of its carbon neutrality, many authors have suggested the use of FGT biomass provides one of the most efficient technological solutions for reducing the production of carbon [10, 11, 12, 13]. Due to their shallow root system, high resistance to root system flooding, high evapotranspiration rates and high nutrient and heavy metal adsorption rates [7, 14, 15], willows (e.g. *Salix viminalis*, *Salix dasyclados*) are considered to be one of the most suitable FGTs in terms of the recycling of WW. Moreover, willows irrigated with WW produce twice or three times the biomass yield of non-fertilised willows [15]. Due to high evaporation rates, large amounts of WW can be used in such systems [16].

While the reuse of WW for the irrigation of fast-growing trees is not explicitly covered by Czech legislation, the general reuse of WW is governed in the Czech Republic principally by Act No. 254/2001 Coll. [17] that permits the disposal of accumulated treated WW via the irrigation of crops in doses that do not infiltrate into the groundwater (§ 38, subsection 9). However this only can be allowed in exceptional cases and after the issuance of the opinion of specialist (hydrogeologist) that it will not negatively influence the groundwater. Moreover, the increased reuse of water is encouraged in Government decree No. 620 of 2015 [18] that sets out measures for decreasing the negative aspects of drought and water scarcity. In addition, the Adaptation to Climate Change in the Czech Republic Strategy [19] established new rules concerning the reuse of treated WW with particular reference to reducing the use of quality water sources in cases where it is sufficient to use treated WW.

Existing legislation, however, lacks direction with respect to the specific application of WW for the irrigation of FGT plantations; moreover, very few precedents exist with respect to the reuse of WW in this context. This study aims to demonstrate the advantages of the reuse of WW in willow plantations focusing particularly on the harvested yield as a result of targeted plant-induced nutrient reduction.

Experimental part

Experimental location

A semi-operated irrigation field was established in 2017 in the village of Hostětín in the Zlín region of the Czech Republic specifically for the purposes of the experiment. The municipality features a combined sewage system that was built for the collection of both municipal WW and surface water runoff from the paved areas of the village. The capacity of the CW is 48 m^3/day representing a maximum peak flow WW of 4 L/s and an average daily WW flow of 0.55 L/s. The constructed wetland features 4 treatment stages - mechanical pretreatment, an initial horizontal subsurface flow filter CW (505 m^2), a second horizontal subsurface flow constructed wetland filter (626 m^2) and a biological stabilisation pond [20]. While the constructed wetland exhibits a high degree of efficiency concerning the removal of organics, the removal of nutrients is low, a fact that favours the reuse of treated water for the irrigation of FGT as a tertiary treatment method [21].

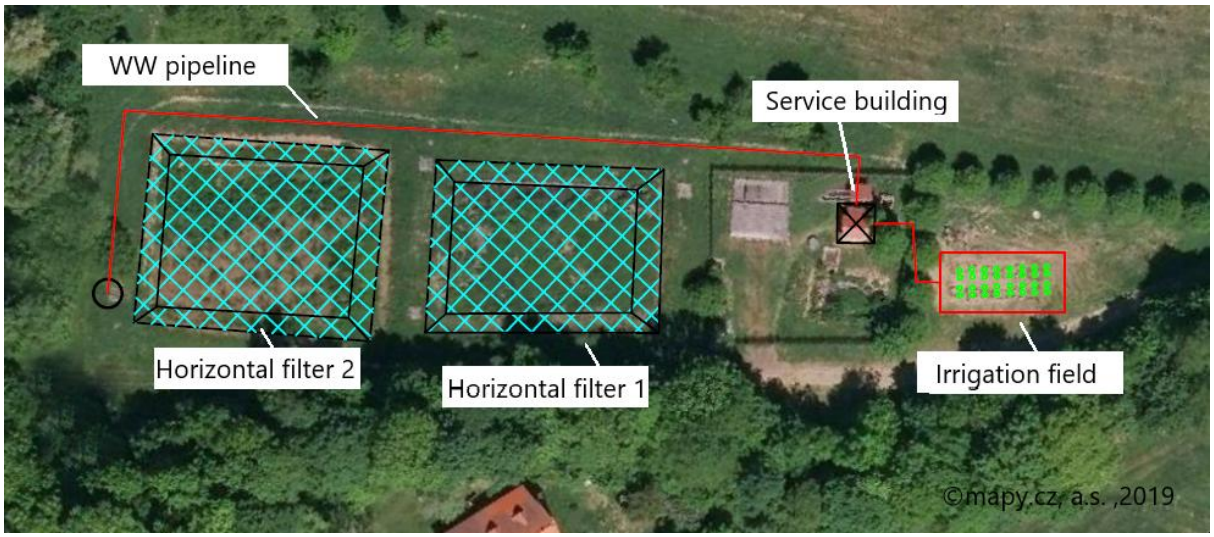


Figure 1: Schematic image of the experimental location

The experimental irrigated field was constructed adjacent to the existing constructed wetland. The WW used for irrigation was pumped directly from the CW discharge shaft to a small storage tank installed inside a service building located near to the new irrigation plot. Fresh groundwater (FW) extracted from a well was used as the WW control variant. The fresh water was also pumped into a storage tank located inside the service building. In addition, an irrigation control system (CS) with a Hunter I-Core control unit was installed in the service building. The CS was equipped with a rain sensor that automatically shut down the irrigation system in the case of heavy rainfall (>3 mm), the aim of which was to prevent the leakage of nutrients and, potentially, pathogenic microorganisms and hazardous substances into the groundwater. The CS was connected to two water pumps (Q = 0.5 L/s) for the pumping of the WW and FW into the drip irrigation hose system from the storage tanks. The pumps were equipped with 1" disk filters so as to prevent the clogging of the drippers. The DRIP irrigation hoses were installed in the irrigation field (with dimensions of 8 x 4 metres) that had previously been planted with *Salix viminalis L.* as the model FGT in 4 rows with a total of 24 cuttings. The planting density was selected in accordance with suggestions provided in [22]. The willows were planted in a 0.5 x 1m grid in fluvisols. The initial soil quality of the irrigation plot is summarised in Table 1.

Table 1: Soil quality at the commencement of the experiment

Parameter	**Unit**	**Value**
Bulk density	g/cm^3	1.2
Porosity	%	53.2
pH (25 °C)		7.7
Mg	mg/kg of DM	4,627.0
Na	mg/kg of DM	129.3
K	mg/kg of DM	2,666.7
Ca	mg/kg of DM	28,550
Cl^-	mg/kg of DM	8.7
S	mg/kg of DM	454.0
Total phosphorus	mg/kg of DM	707.3
Total nitrogen	mg/kg of DM	2,330
Total organic carbon	% of DM	2.9

Two of the rows were irrigated with the WW and the other two with the control FW. A further 12 willow cuttings (4 x 3) were planted adjacent to the irrigation plot and were not irrigated at all (marked with the abbreviation Cont). The plants were irrigated via DRIP irrigation hoses 4 m in length, each serving 6 willows. The hoses were equipped with regulated drippers positioned at 40 cm intervals so as to provide an average flow of approx. 2 L/hour. The total amount of water applied to the field together with the water quality parameters is summarised in Table 2.

Table 2: Total volume of water applied in the 1st (S1) and 2nd (S2) seasons with the total amount of nutrients added by the water

Season and source of water	Volume (m^3)	Total organic carbon (kg)	Total nitrogen (kg)	Total phosphorus (kg)
S1 - WW	23.4	0.42	0.54	0.07
S1 - FW	17.2	0.05	0.03	0.00
S2 - WW	9.4	0.12	0.10	0.02
S2 - FW	5.8	0.03	0.03	0.00

A semi-professional meteorological station was installed near to the experimental field and the WW treatment plant for the recording of information on the air temperature, humidity, precipitation, wind and UV radiation in one-hour interval. A number of small USB dataloggers (air temperature, humidity) were installed within the experimental field at locations with differing degrees of shade so as to obtain more precise datasets. The meteorological data for the observed time period are shown in Figure 2.

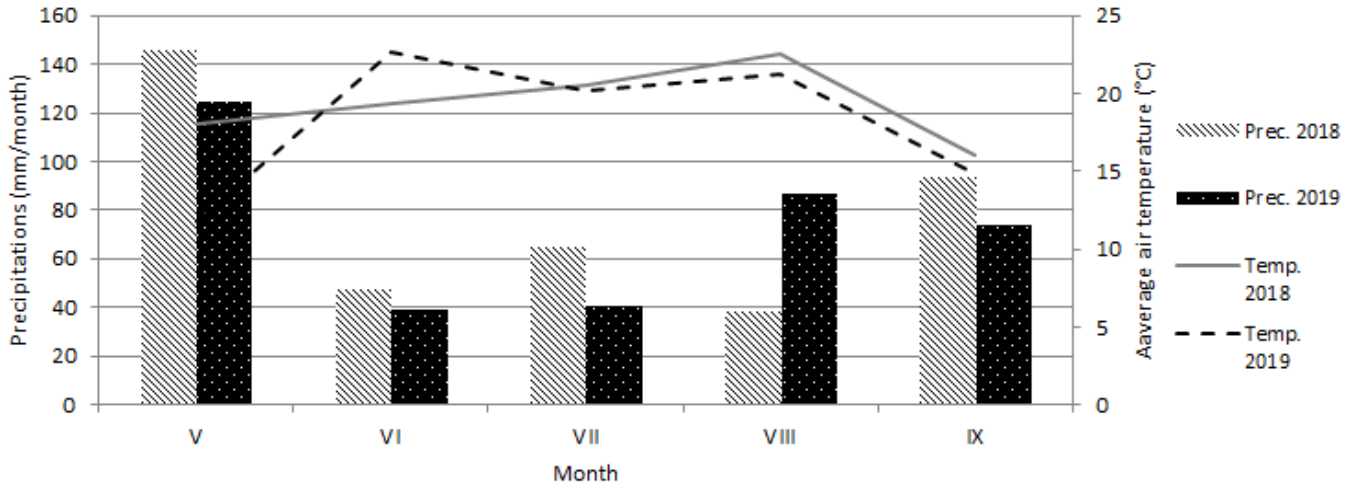


Figure 2: Meteorological data from the experimental location for seasons S1 (2018) and S2 (2019)

The drip irrigation method was chosen in an effort to prevent the occurrence of hygiene risks arising from the dissemination of pathogenic microorganisms. The layout of the irrigation field and the settings of the automatic CS were determined in accordance with suggestions provided by Stupavský (2008) [7]. The field was irrigated from the beginning of May to the end of September 2018 (first season – S1) and from May to September 2019 (second season – S2). The drip irrigation system provided equal doses of water to each plant and ensured the supply of a sufficient amount of water for the root systems of the willows. The amounts of water supplied by both the irrigation systems were recorded by means of water meters.

Sampling and analysis

Samples of the inflow of WW and FW, the drainage water and the soil were taken regularly during both growing seasons; in the case of the water, once per month and concerning the soil, prior to the commencement of irrigation at the start of each season and following the conclusion of irrigation at the end of each season. Qualitative analysis was performed employing standardised methods aimed at obtaining information on i) the basic characteristics of the water (temperature, dissolved oxygen, pH, conductivity and turbidity), the content of suspended solids and organic compounds, nutrient concentrations, the content of ions and selected elements and microbial contamination, and ii) the characteristics of the soil, the content of selected elements and nutrients, including the plant forms available, and microbial contamination.

The length of the branches and the total annual harvested biomass of the willow plants were also recorded; only the final yield of the harvested biomass was considered for the purposes of this study. The length of the branches was measured at the end of each season (between September and October). Three measurements from each three were then evaluated using statistic methods. The wood yield was recorded at the end of both seasons. All the willow branches were cut, weighed and analysed in the experimental laboratory. The dry matter of the harvested biomass was measured via the gravimetric method and subjected to examination with respect to the gross and net calorific values employing the calorimetry approach based on ČSN ISO 1928 [23].

Statistical analysis was done using software R version 3.5.1. In the first step the normality of data was evaluated by histogram and Shapiro-Wilk normality test rejecting the null hypothesis of normality for irrigated plants from S1 and S2 and declining it for non-irrigated willows. To compare data from S1 we used the paired sample t-test. For the S2 data set we used Wilcoxon test and paired sample t-test.

Results and discussion

As can be seen from Table 2, the total amount of water applied to the irrigation field during the growing season differed between S1 (23.4 m^3 of WW and 17.2 m^3 of FW) and S2 (9.4 m^3 of WW and 5.8 m^3 of FW). Moreover, a difference was observed between the total volumes of WW and FW within each season, which was due primarily to a number of technical problems during S1 and, probably, to differing pressures in the hoses and reduced irrigation water flow rates. However, these issues did not significantly influence the total amount of nutrients that were supplied to each plant. Of greater importance was the differences in the WW and FW volumes between the two seasons. The volumes of WW and FW applied in S2 were lower than those in S1, i.e. 60% and 66% respectively, which was due to the differing character of the precipitation regimes during the two growing seasons. Although the total precipitation in the two growing seasons did not differ significantly (S1 and S2, 389 and 364 mm respectively), the intensity of the rain events in S2 was higher. Since the rain sensor halted the irrigation process for 24 hours if the amount of rain exceeded 3 mm, the irrigation system was operational for a shorter total time than in S1. This factor also influenced the total amount of nutrients supplied to the plants and, therefore, may have exerted a negative effect on total biomass production.

This study focused primarily on providing a comparison of the amount of biomass produced as a result of irrigation with WW and FW. The comparison involved the consideration of three differing perspectives, i.e. i) the length of new branches that grew during the respective season; ii) the total amount of biomass created per season and iii) the calorific values of the willow wood.

Length of newly-grown branches

As can be seen in Figure 3, the average length of the branches was significantly higher with respect to the plants irrigated with WW in both seasons (as also shown in Figure 4). The average lengths of the branches after S1 and S2 were 195 and 306 centimetres respectively for the WW-irrigated plants and only 125 and 148 centimetres respectively for the FW-irrigated willows. The control trees that were not irrigated failed to survive the dry conditions of the summer of 2018. New control willow cuttings were planted at the beginning of S2; however, only a small number survived the dry summer conditions. While

Khurelbaatar et al. [8] document a 40% mortality rate for young willows irrigated with wastewater and 90% for non-irrigated plants, our study documented 0% mortality for the wastewater-irrigated plants after two seasons, 8% mortality for the groundwater-irrigated plants after two seasons and 100% (S1) and 70% (S2) mortality for the non-irrigated plants. The same source also describes the much higher growth rate of WW-irrigated willows, recording trunk diameters of up to 13 mm. However, our study considered only the length of the branches, i.e. a parameter that is determinant with respect to industrial applications e.g. basket production. A more efficient comparison of the yield was provided by the consideration of the production of biomass (see below).

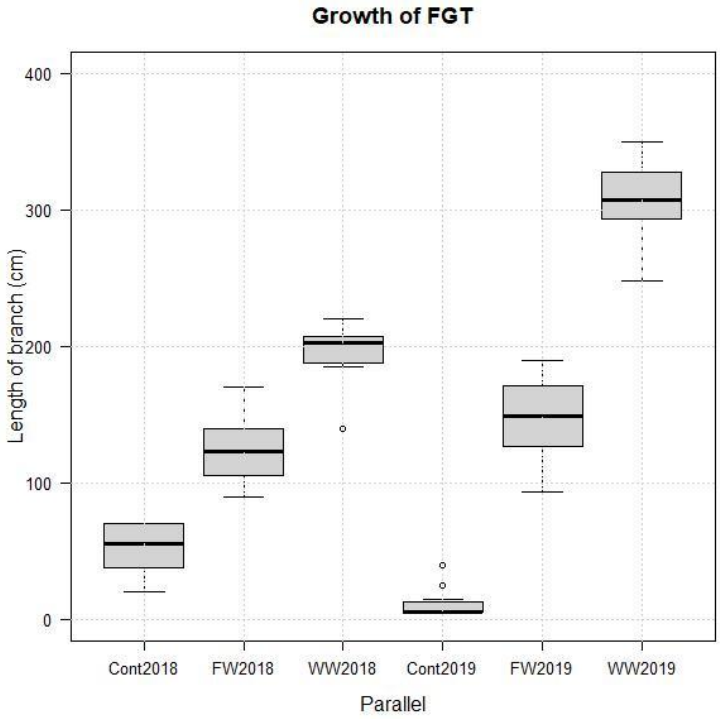


Figure 3: Boxplot comparison of the growth of the willow branches after S1 and S2

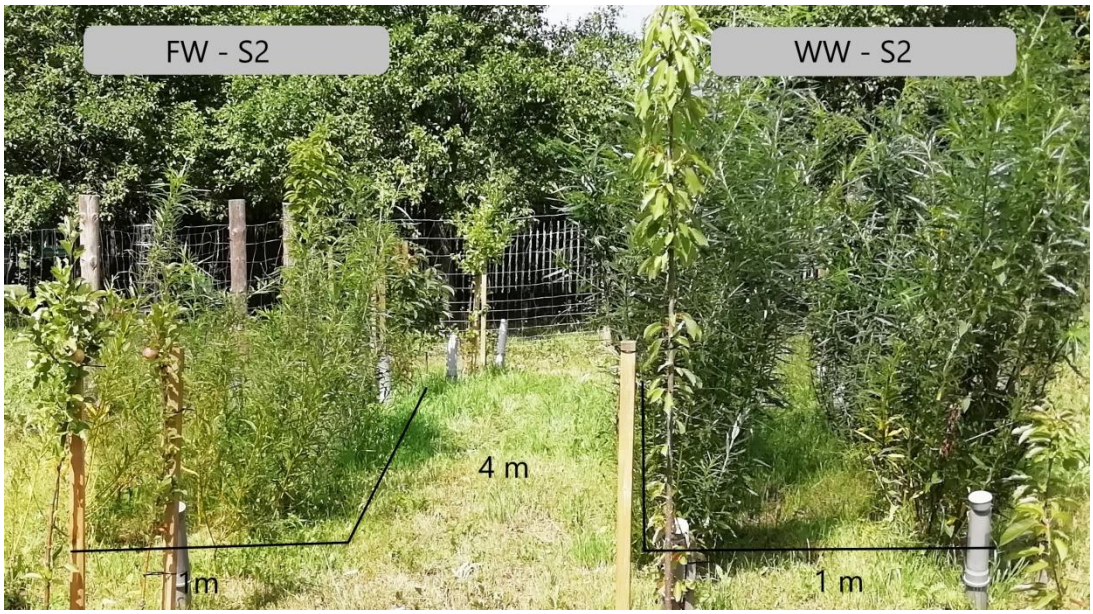


Figure 4: Images of the field experiment in the middle of S2

Biomass production

The production of biomass differed significantly between S1 and S2 (see Figure 5) for the WW-irrigated plants by the Wilcoxon signed rank test. The differences between the seasons were not statistically significant for the FW-irrigated willows. The biomass production of the WW-irrigated plants was found to significantly exceed those irrigated with FW (proved by Wilcoxon signed rank test), particularly in the second season. While the total weight of biomass produced under FW irrigation conditions during S1 and S2 was 0.4 and 0.7 kg respectively, the amount of WW-irrigated biomass was determined at 2.7 and 12.5 kg respectively.

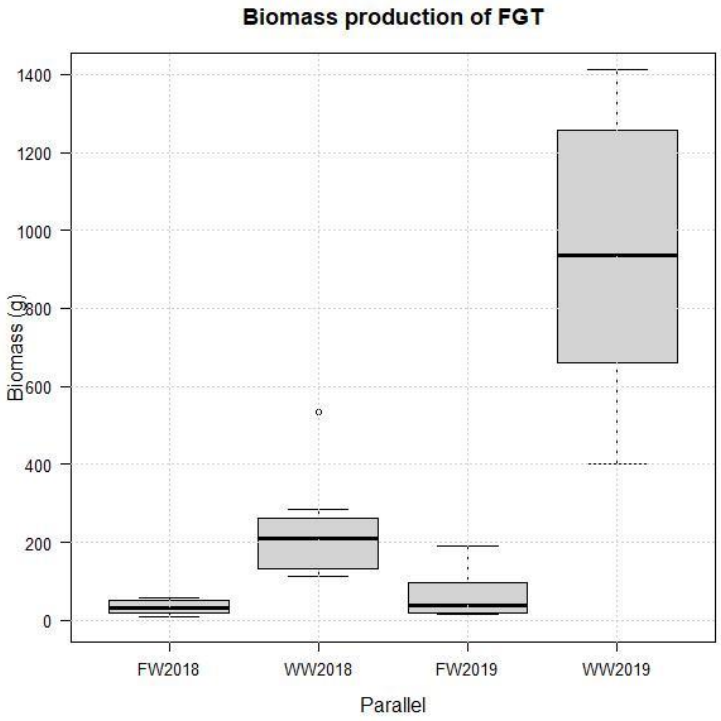


Figure 5: Boxplot comparison of the production of biomass (in grams) for each willow after S1 and S2

After recalculating the yield to hectares, we determined the production of the FW-irrigated biomass in S1 and S2 at 1.0 and 1.8 t/ha/year respectively, while for the WW-irrigated plants the yield was 6.6 and 31.3 t/ha/year respectively. While some authors [15] have reported 2-3 times higher biomass yields after two years of irrigation with WW, our study resulted in harvested yields of almost 18 times higher after two years of irrigation with WW. Hardcastle et al. (2006) [24] reported the production of 8 t/ha/year of willow biomass in a conventional FGT plantation. Khurelbaatar et al. (2017) [8], on the other hand, reported the production of 15.2 t/ha/year after the second season, which is in accordance with the findings of Dimitriou and Aronsson (2011) [25] who describe the production of 15 t/ha/year in experimental lysimeters.

Calorific values

A further approach to describing the efficiency of the application of WW for the irrigation of FGTs consists of the consideration of the gross calorific value (GCV) and net calorific value (NCV), which reflect the energy content of the wood and, indirectly, indicate the quality of the FGT biomass. This study considered the GCV and NCV of the biomass in the dry matter state, see Figures 6 and 7.

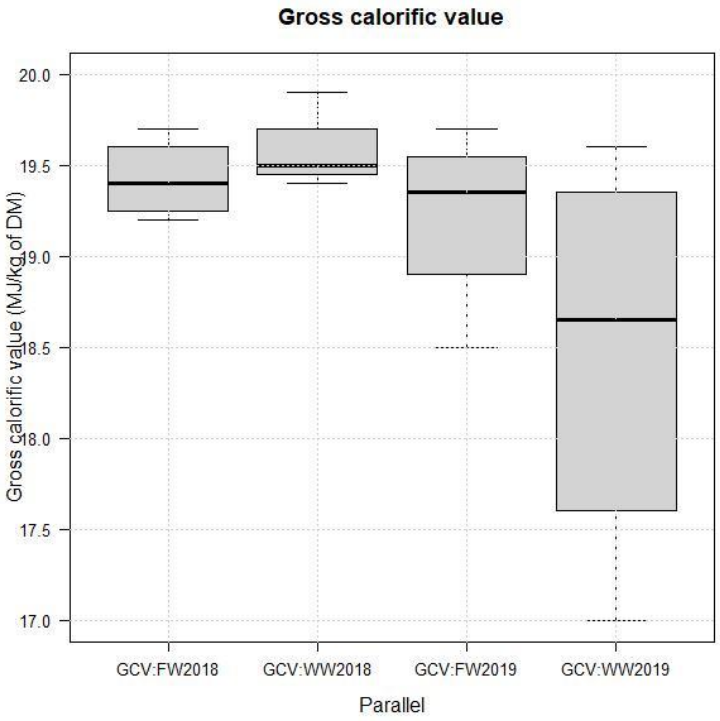


Figure 6: Gross calorific value of the dry matter of the biomass irrigated with FW and WW in S1 and S2.

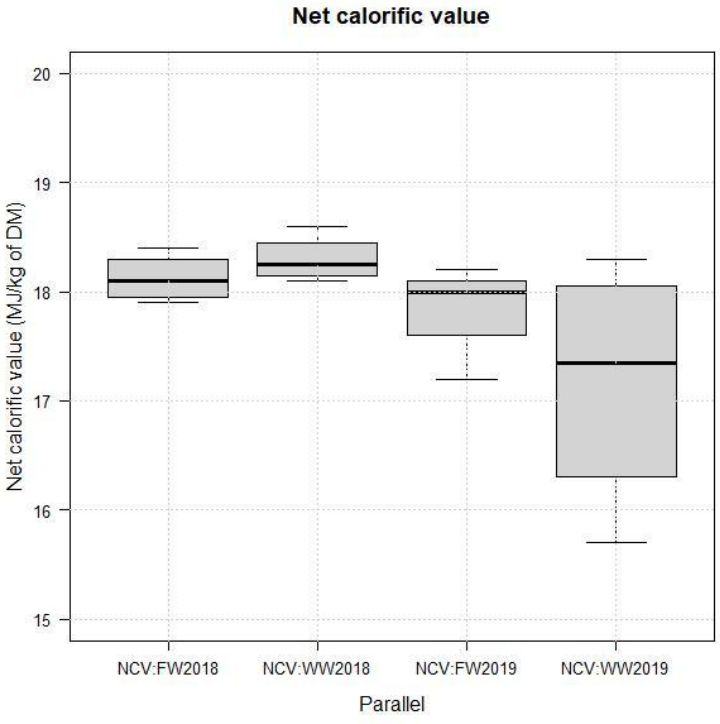


Figure 7: Net calorific value of the dry matter of the biomass irrigated with FW and WW in S1 and S2

As shown in the graphs above, the willows irrigated in S1 with WW exhibited slightly higher GCVs and NCVs than did the other samples (19.6 and 18.3 MJ/kg of DM respectively), while in S2 the WW-irrigated willows exhibited the lowest GCVs and NCVs (just 18.5 and 17.2 MJ/kg of DM respectively).

Nevertheless, these results are still comparable with those of other studies. For example Stolarsky et al. (2013) [26] recorded a GCV for *Salix* spp. non-irrigated with WW of 19.5 MJ/kg of DM and Ledin (1996) [27] determined an NCV for *Salix* spp. non-irrigated with WW of 19.6 MJ/kg of DM. Labrecque et al. (1997) [28], when studying the effect of the fertilisation of different willow species with wastewater treatment sludge, reported an NCV for *Salix viminalis* of an average of 19.2 MJ/kg. A further study [29] reported similar GCVs and NCVs for *Salix viminalis* to those determined by our study (18.9 and 17.7 MJ/kg respectively). Although the results indicate slightly lower calorific values for the biomass produced via irrigation by WW, the significantly higher biomass yield than that of the freshwater-irrigated plants more than compensates for this disadvantage, a factor that is positively reflected in the economic results of FGT plantations.

Conclusions

This study aimed to determine whether the use of wastewater for the irrigation of fast-growing trees exerts a positive growth effect. Fast-growing tree plantations are widely used as tertiary wastewater treatment systems, the main advantages of which lie in the reuse of nutrients that remain in the wastewater and a decrease in the volume of wastewater that is released into the environment.

During the two-year study period, we observed an increase in the production of willow (*Salix viminalis L.*) biomass even though the total volume of water supplied via the drip irrigation system in the second season was significantly lower than in the first season. The mortality rate of the non-irrigated plants was 100% after S1 and 70% after S2 which was caused by the very hot and dry weather during the summer of 2018 and similar weather conditions during the summer of 2019 in combination with the soil type at the site which was characterised by a low water retention capacity. Following the second testing season, the average lengths of the willow branches irrigated with wastewater and fresh groundwater were determined at 306 and 148 cm respectively. The biomass yield was determined at 1.8 t/ha/year for the groundwater-irrigated plants and 31.3 t/ha/year for the treated wastewater-irrigated plants. The quality of the biomass was assessed via calorific values which revealed that despite the lower gross and net calorific values of the wastewater-irrigated willow biomass, the total yield per area more than compensated for this disadvantage.

Acknowledgments

This study was financially supported by the Technology Agency of the Czech Republic - project no. TH02030583. Thanks go to Darren Ireland BA for the language correction of the English text.

References

1. ČSU. Vodovody, kanalizace a vodní toky - 280021-19 1.2.2. Sewerage systems. Available online <https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2018> (2019).
2. ČSU. Vodovody, kanalizace a vodní toky - 280021-19 1.3.1. Wastewater treatment plants (WWTPs). Available online <https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2018> (2019).
3. Daňhelka J., Kubát J. Sucho v roce 2018 - Předběžné hodnocení. ČHMU, Praha (2019).
4. Punčochář P., Rolečková E., Fousová E. Sucho - Vážná hrozba pro Českou republiku. MZe (2015).
5. Drewes J. E., Hübner U., Zhiteneva V., Karakurt S. Characterization of unplanned water reuse in the EU - Final Report. the European Commission DG Environment, Munich (2017).

6. Vymazal, J. Constructed wetlands, Subsurface flow. Applications in Ecological Engineering (Jørgensen, S., E. Eds.). pp. 134. Copenhagen University, Denmark (2009).
7. Stupavský, V. Biom.cz, available online <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bezpecne-vyuziti-komunalnich-odpadnich-vod-a-cistirenskych-kalu-k-zavlaze-a-hnojeni-plantazi-rychle-rostoucich-drevin> (2008).
8. Khurelbaatar G., Sullivan C.M., van Afferden M., Rahman K.Z., Fühner C., Gerel O., Londong J., Müller R.A. Ecol Eng. 98, 82 (2017).
9. Aronsson P., Perttu K.L. Forest Chron. 77, 293 (2001).
10. Dimitriou I., Mola-Yudego B., Aronsson P. Bioenerg. Res. 5, 537 (2012).
11. Cocco D. Proc. Instn. Mech. Engrs. Part A: J Power Energy 221, 637 (2007).
12. Styles D., Jones M. Biomass Bioenerg. 31, 759 (2007).
13. Heller M.C., Keoleian G.A., Mann M.K., Volk T.A. Renew Energy 29, 1023 (2004).
14. Aronsson, P. Nitrogen Retention in Vegetation Filters of Short-Rotation Willow Coppice. Doctoral thesis. Silvestria 161. Swed. Univ. Agric. Sci., Uppsala, Sweden, (2000).
15. Perttu K.L., Kowalik P.J. Biomass Bioenerg. 12, 9 (1997).
16. Dimitriou I., Aronsson P. Unasylva 56, 47 (2005).
17. Act no. 254/2001 Coll., on Waters and Amendments to some acts (the Water Act), Prague, (2001).
18. Government Resolution No. 620/2015, to prepare the implementation of measures to mitigate the negative impacts of drought and water scarcity,Prague, (2015).
19. Strategy on Adaptation to Climate Change in the Czech Republic Approved in Government Resolution No 861 dated 26 October 2015. Ministry of Environment, Prague, (2015).
20. Rozkošný M., Sedláček P. VTEI 1, 7 (2013).
21. Rozkošný M., Kriška M., Šálek J., Bodík I., Istenič D. Natural Technologies of Wastewater Treatment, pp. 138, VUT, Brno, (2014).
22. Weger J., Havlíčková K. Biom.cz, available online <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zasady-a-pravidla-pestovani-rychle-rostoucich-drevin-r-r-d-ve-velmi-kratkem-obmyti> (2002).
23. ČSN ISO 1928 Solid mineral fuels — Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method, and calculation of net calorific value (2010).
24. Hardcastle P., Calder I., Dingwall C., Garrett W., McChesney I., Mathews J., Savill P. LTS International. (2006).
25. Dimitriou I., Aronsson P. Biomass Bioenerg. 35, 161 (2011).
26. Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyżaniak M. Renew. 59, 100 (2013).
27. Ledin, S. Biomass Bioenerg. 11, 75 (1996).
28. Labrecque M., Teodorescu T.I., Daigle S. Biomass Bioenerg 12, 409 (1997).
29. Szyszlak-Bargłowicz J., Zając G., Piekarski W. Agrophys. 26, 175 (2012).

Opětovné využití odpadních vod při závlaze plantáží rychle rostoucích dřevin – Poloprovozní zkoušky na kořenové čistírně

Michal ŠEREŠ[a,b], Miloš ROZKOŠNÝ[c], Hana HUDCOVÁ[c], Pavel ŠALANDA[a,b], Petra INNEMANOVÁ[a,b], Pavel SEDLÁČEK[c]

[a] DEKONTA, a.s., Dřetovice 109, 273 42 Stehelčeves, Česká republika, e-mail: michal.seres@dekonta.cz
[b] Ústav pro životní prostředí, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Benátská 2, 128 01 Praha 2, Česká republika
[c] Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Mojmírovo nám. 16, 612 00 Brno, Česká republika, e-mail: milos.rozkosny@vuv.cz

Abstract

Vzhledem k poklesu srážkových úhrnů v ČR, a to zejména ve vegetačním období, zaznamenáváme rovněž potřebu navýšení závlahy zemědělských plodin. Nedostačující zásoby vody pro tuto závlahu by v některých zemědělských sektorech mohly být potenciálně řešeny s využitím vyčištěných odpadních vod, nicméně doposud existuje řada otázek ohledně rizik a přínosů využití těchto vod při závlahách. Pro tento účel byla v obci Hostětín ve Zlínském kraji vybudována pokusná závlahová plocha, která byla osázena vrbou košíkářskou. K sazenicím byla přivedena kapková závlaha napojená na automatický dávkovací systém, který k vrbám přiváděl vodu ze dvou zdrojů – odpadní vodu z obecní kořenové čistírny a čistou vodu z vrtu. V průběhu dvou vegetačních období 2018 a 2019 byla patrná výrazně vyšší produkce biomasy v sekci závlahy odpadní vodou, která byla 6,6, resp. 31,26 t/ha, zatímco u plochy zavlažované čistou vodou to bylo pouze 1,0, resp. 1,77 t/ha. Kvalita biomasy byla hodnocena pomocí spalného tepla a výhřevnosti. V druhé sezóně 2019 je u vzorků biomasy zavlažované odpadní vodou patrná nižší hodnota spalného tepla i výhřevnosti, a to 18,5, resp. 17,2 MJ/kg sušiny ve srovnání s 19,2, resp. 17,9 MJ/kg sušiny u plodin zavlažovaných vodou z vrtu. Celkově vyšší výnosnost biomasy na plochu plantáže nicméně výrazně zvyšuje energetickou výtěžnost rychle rostoucích dřevin. Tato studie tedy potvrdila hypotézy, že odpadní voda může být opětovně využita v zemědělské produkci a to tam, kde nehrozí přímé ohrožení zdraví lidí.

Klíčová slova: *opětovné využití odpadních vod, kapková závlaha, kořenová čistírna odpadních vod, rychle rostoucí dřeviny*

Waste reduction through using modern methods of construction

Marcela SPIŠÁKOVÁ[a], Mária KOZLOVSKÁ[b]

Technical university of Košice, Civil Engineering Faculty, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice, Slovakia
e-mail: marcela.spisakova@tuke.sk, maria.kozlovska@tuke.sk

Abstract

The construction industry in Slovakia has been relying heavily on traditional construction technology. Buildings are usually constructed by the conventional cast in-situ methods. Recently, the modern methods of construction (MMC) are more apply for its performance improvement in construction, improvement of economic, environmental and social aspects of construction. The aim of submitted paper is to describe the waste reduction potential of using modern methods of construction which was determined through a questionnaire survey. The primary step of survey was to find out the state of awareness in professional public about the MMC and determine the importance level of particular factors for the selection of construction technology. Subsequently, based on expert opinions or professional experiences, the respondents evaluated the potential of waste reduction through the MMC using and identified the construction processes which may contribute to significantly reduce construction and demolition waste. The conclusion of paper is focused on the results comparison of this research and similar foreign research in this issue.

Key words: *modern methods of construction, construction and demolition waste, reduction, potential, questionnaire survey*

Introduction

The development in the field of construction production has a significant impact to production of waste derived from the construction industry. Based on volume, construction and demolition waste (C&DW) is the largest waste stream in the European Union[1]. C&DW represents the remnants of what is essentially new building material[2]. The construction industry, historically, produces high levels of waste during the construction process, which present even 33,5% of total waste generation in the EU[3]. Considering this, worldwide policies, have promoted the incorporation of sustainable practice within the construction industry, a principal focus being the reduction of waste and recycling of material and responsible sourcing[4]. There are a range of opportunities to minimise waste before it is created and the earlier they are implemented within the project the greater the potential to significantly reduce waste. One of them is using of modern methods of construction (MMC) which has a range of benefits compared to traditional methods of construction including the potential to greatly minimise on site waste.

MMC can be defined as a method in which less or greater extent building blocks (walls, floor slabs, beams, columns and staircases) are mass-produced in the factory under strict supervision with high quality[5]. The term of modern method of construction was established in the UK as a common label for the construction methods of construction based on the off-site technologies (prefabrication elements or parts of constructions are made off-site and then transported and assembled on site) and innovative on-site technologies (parts of construction elements are produced in the factory, but its functional location is completed[6]. MMC presents the improvements in the products or processes employed in the construction industry, ranging from innovative components to be used on site through to whole building systems manufactured off-site. Off-site refers to MMC which has predominantly been manufactured and assembled in a factory controlled environment and on-site refers to MMC which brings together systems or components which are predominantly assembled on-site. According he Housing research and development [7] are known 5 systems of MMC:

- off-site manufactured – volumetric,
- off-site manufactured – hybrid, pods
- off-site manufactured – panellised,
- off-site manufactured – sub-assemblies and components,
- on-site manufactured modern methods of construction.

Figure 1: Types of MMC according the NHBC Foundation [7]

The many studies describe the drivers and barriers of MMC using[8]. One of the MMC using drivers is construction waste minimisation. The construction waste minimisation by MMC is realised due to the controlled environment and the "production line" type process where there is repeatability in construction. Many foreign studies have confirmed the potential of MMC using as a possible tool for construction waste reduction[9,10,11,12]. The magnitude of waste reduction depends on the level of using MMC, waste levels have an average reduction of 65% and up to 70% when compared with traditional construction method[9]. The organization Waste and Resource Action Programme (WRAP)[12] processed the case study focused on the benefits and waste reduction achieved from using different forms of MMC construction compared with traditional construction methods. For example, this study shows a 22% waste reduction using light steel frame construction and 11% for timber frame, compared to traditional methods. The study shows that the top three waste streams for each system were plaster/cement (largely comprising plasterboard), timber and packaging. Figure 2 shows a breakdown of the types of waste arising from the three types of MMC.

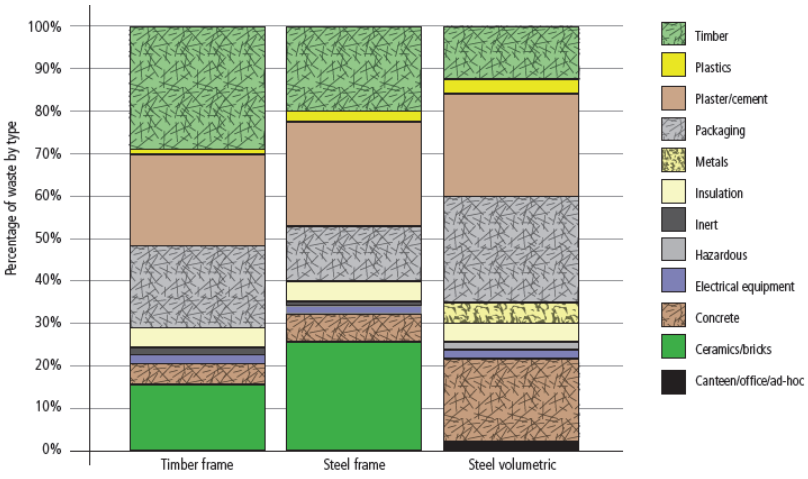


Figure 2: Composition of waste in three MMC types [12]

All analysed studies were from abroad. Similar research in Slovakia has not yet been realized. Therefore, the aim of submitted paper is finding out the waste reduction potential of using MMC in Slovakia and comparison of results with foreign studies.

Materials and methodology

The research focused on the waste reduction potential of using MMC in Slovakia was realized through the questionnaire survey. A questionnaire was developed and administered to 725 professionals in the building industry in Slovakia. The survey was conducted over a period of 3 months in 2018. There were 51 respondents with a response rate of 7%. The majority of respondents were experienced contractors (80%), architects were 18%, producers of precast 2% same as consulting companies (Figure 3). The questionnaire, consisting of 11 questions, was designed to address the following issues: general information, construction methods, waste reduction and benefits and barriers of MMC using.

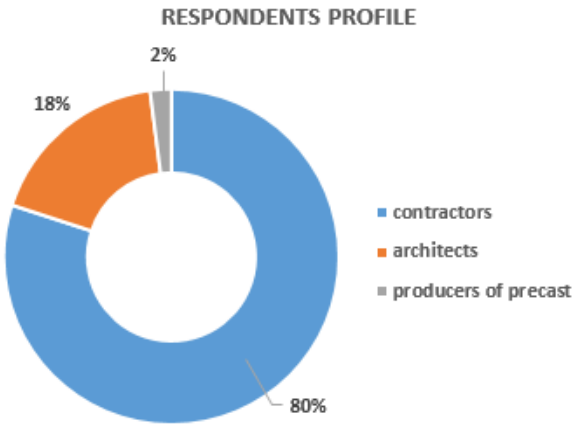


Figure 3: Respondents profile of questionnaire survey

The research aim was divided into 4 steps:

- to find out he state of awareness in professionals about the MMC - the relevance of the responses was assessed,
- to determine the importance level of particular factors for the selection of construction technology,
- to evaluate the potential of waste reduction through the MMC using,
- to identify the construction processes which may contribute to significantly reduce C&DW.

In the questionnaire, the respondents were requested to assign an appropriate rating on a Likert scale[13] of 1 – 5, from the highest to the lowest level, against each factor to reflect the importance of the factors in each question. The means of the factors were calculated based on the following weightings:

- ‘‘Least important” was given a negative two (-2) weight,
- ‘‘Less important” was assigned a negative one (-1) weight,
- ‘‘Neutral” was given a zero (0) weight,
- ‘‘Important” was assigned a positive one (+1) weight,
- ‘‘Most important” was given a positive two (+2) weight.

The mean of each factor was calculated by the following equation.

Mean of factor:
$$\overline{x_i} = \frac{\sum_{j=1}^{5} w_j * f_{ij}}{\sum_{j=1}^{5} f_{ij}} \quad (1)$$

where, W_j = weights of the degree of importance j of factors (-2, -1, 0, +1, +2), f_{ij} = corresponding frequencies of the degree of importance j of factor i, $\sum_{j=1}^{5} f_{ij}$ = total number of respondents.

The ranking of the factors was then based on the means calculated using the above equation. The higher the mean, the higher the ranking.

Results and discussion

The construction industry in Slovakia has been relying heavily on traditional construction technology (masonry, concreting). The modern methods of construction present relatively new construction technology. Despite this, knowledge of professionals concerning the MMC is sufficient.

Approximately 60% of professionals (Table 1) know or realized in their practice mainly frame construction (timber, steel) and precast concrete panels. The least known modern technology is cross laminated timber (CLT) panels. Only 9,8% respondents know no modern method of construction.

Table 1: Awareness state of professionals about modern method of construction types, Source: authors

	Type of modern method of construction								
	Off-site MMC						On-site MMC		
	Timber frame	Lightweight steel frame	Structural insulated panels - SIPs	CLT panels	Precast concrete panels	Volumetric construction	Insulating concrete forms - ICFs	Gluelaminated framed buildings	Oak framed buildings
Awareness of MMC [%]	58.8	62.7	31.4	7.8	58.8	33.3	54.9	35.3	17.6

Next part of research is focused on the importance level identification of particular factors for the selection of construction technology (Figure 4). Not surprisingly, the respondents determine that cost is the most important factor (1.49) in selection of construction methods or technologies for building projects. The reduction of C&DW is the least important factor (0.392) in the minds of the professionals in construction industry. This ranking is identical with many foreign researches[10]. For instance, the research of The Hong Kong Polytechnic University confirms the ranking of factors when selecting a construction method. Surprisingly, the second most important factor when choosing technology in Hong Kong was the construction time. In Slovakia, the professionals indicated as a second most important factor the familiarity with the construction technology. We can assume that the high mean of this factor significantly influences the construction duration – the constructor knows the possible time, technological and space advantages, disadvantages and threats of particular modern method.

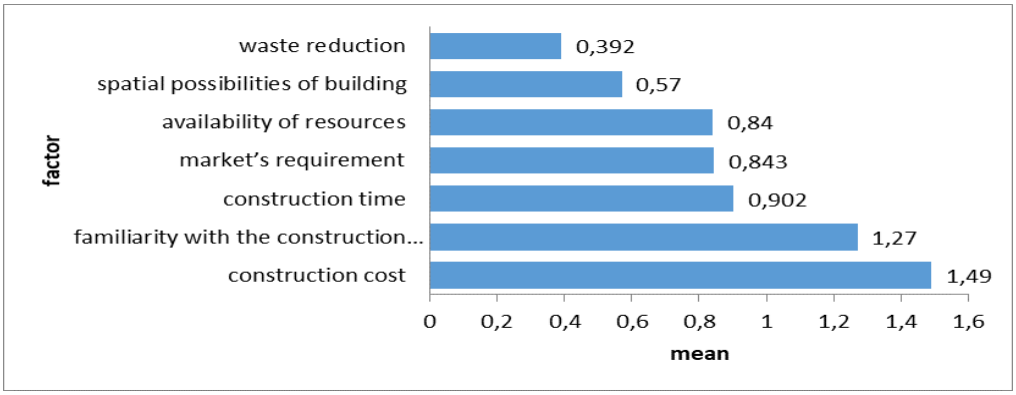


Figure 4: The importance level of particular factors for the selection of construction technology

The respondents according own expert opinions or professional experiences determined the ranking of construction works friendly to construction waste during the traditional construction methods (TMC) using (Figure 5). The ranking confirmed our assumptions. The most significant producer of construction waste presents the finishing works of walls, ceilings, floors (plaster, cement, plasterboard, etc). Oppositely, the friendliest construction processes to waste production are scaffolding and formwork. The constructors mainly use the scaffolding and formwork systems that can be used multiple times.

The results of two researches[10,14] were showing that timber formwork was the major contributor to construction waste, accounting for 30% of the total identified waste because the formwork systems are not use. Wet trades, such as concreting, masonry, plastering and tiling on-site were considered as the second major waste generator as well as in Slovakia (masonry work, concrete work).

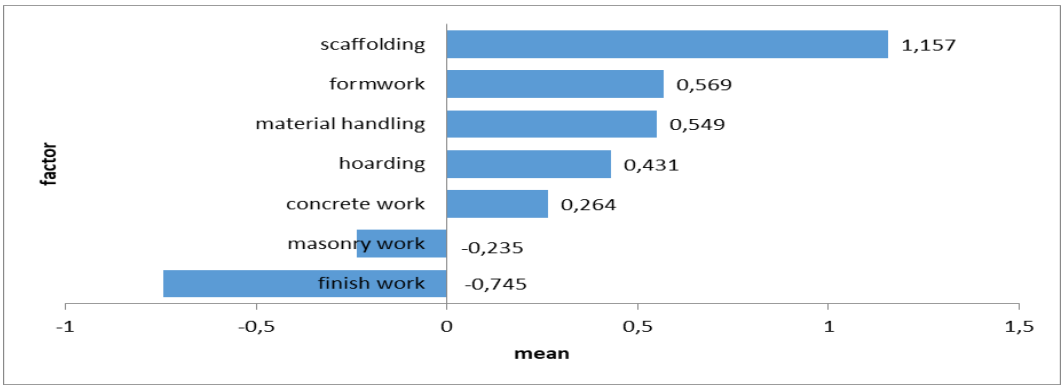


Figure 5: The construction works friendly to construction waste at traditional methods of construction using

One of partial aims of questionnaire survey was to find out the potential of waste reduction through the MMC using according the professionals (Table 2) as well as to determine the waste reduction potential for particular construction processes (Figure 4). Certainly, the magnitude of waste reduction depends on the level of using MMC. The most professionals (47.1%) identified the potential of C&DW reduction during MMC using in interval 11 – 30%. Surprisingly, nearly a third (29.3%) of respondents could not determine the waste reduction potential. Respondents in Slovakia were pessimistic in their statements compared with foreign respondents. The respondents in Hong Kong identified the waste levels reduction an average of 65% and up to 70% when compared with traditional construction method). The study of RICS international standards team[15] identified the waste reduction potential in 80% with 95% of that waste being recyclable.

Table 2: The potential of waste reduction through the MMC using according the professionals [in %]

Potential of waste reduction through the MMC using							
Rate waste reduction	< 10 %	11 – 20%	21 – 30%	31 – 40%	41 – 50%	>51%	cannot determine
Frequency of responses [%]	9.8	25.5	21.6	5.9	2	5.9	29.3

Considering that the primary use of masonry works at MMC is not significant, the survey confirmed our assumptions. The respondents see the greatest potential for waste reduction in particular during the masonry works (44.32%). The high level of prefabrication provides production of the significant part of constructions in the controlled environment of production line. Therefore, we can have assumed the minimizing the need for finishing works at building site. Respondents reaffirm your opinion, they identified the waste reduction in 43.14%. On the other hand, also in the application of MMC need to use scaffolding. The respondents do not foresee great potential for waste reduction during the scaffolding, because in MMC application is also used the scaffolding systems (used multiple times).

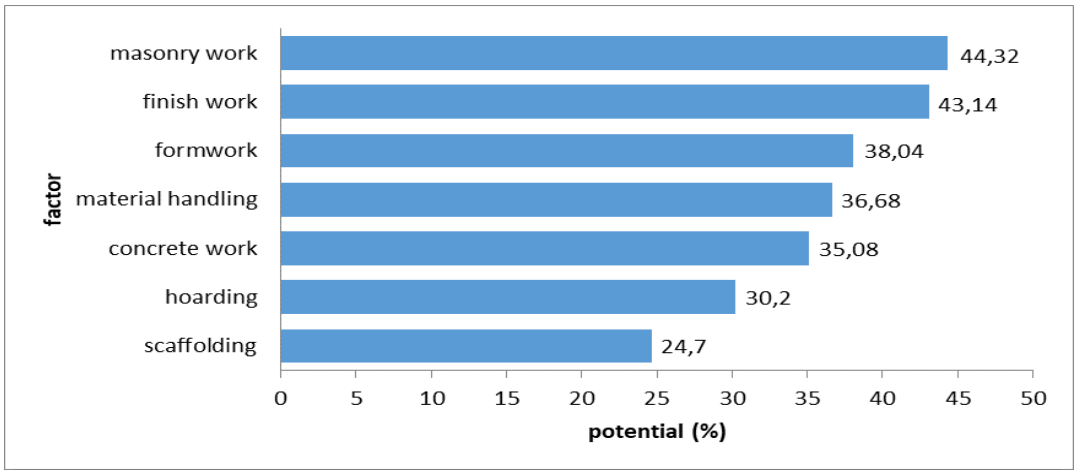


Figure 6: The potential of waste reduction during particular construction works through the MMC using [in %]

Conclusions

The waste generation quantities significantly varied from construction project to project. The waste generation may mostly be related to the construction method selection, the availability of on-site sorting and recycling facilities for construction waste, and the level of education and training of the workers. Waste also arises as a result of design concepts and decisions. The MMC is a possible solution to major causes of waste arising during both the design and construction stages.

The submitted questionnaire survey was focused on the find out the waste reduction potential of using modern methods of construction in Slovakia. The results of research reaffirmed the claim, that the reduction of construction and demolition waste is the least important factor in the minds of the professionals in construction industry. On the other hand, professionals confirmed the high the potential of C&DW reduction during MMC using.

Acknowledgment

The article presents a partial research result of project VEGA - 1/0557/18 „Research and development of process and product innovations of modern methods of construction in the context of the Industry 4.0 principles".

References

1. https://ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-0_en, accessed in 17. 9. 2019
2. Grunner, K., Dudas, J.: An accurate measurement of the volume of construction waste dumps by unmanned means. In: Waste forum, 2017, vol. 5, pp. 401 – 407
3. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/scoreboard2018/indicators/19._Construction_and_demolition_waste.pdf, accessed in 17. 9. 2019
4. Toyinbo, O.: Sustainable Construction Technologies, 2019, 107.
5. Trikha, J.: Industrialised building system: Prospect in Malaysia. In: Proceeding of world engineering congress, Kuala Lumpur, 1999
6. Lovell, H., Smith, S. J.: Agencement in housing markets: The case of the UK construction industry. In: Geoforum, 2010, vol. 41. pp. 457 – 468
7. A guide to Modern methods of construction, NHBC Foundation, 2006, London

8. Kozlovska, M., Spisakova, M., Mackova, D.: Modern methods of construction towards adoption in Slovakia, EuroScientia, Brusel, 2017
9. Chen, Y., Okudan, G. E., Riley, D. R.: Sustainable performance criteria for construction method selection in concrete buildings. In: Automation in construction, 2010, pp. 235 – 244
10. Jaillon, L., Poon, C. S., Chiang, Y. H.: Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong. In: Waste Management, 2009, pp. 309 – 320
11. Tam, V. W. Y., Tam, C. M., Zeng, S. X., Ng, W. C. Y.: Towards adoption of prefabrication in construction. In: Building and Environment, 2007, pp. 3642 – 3654
12. Current practices and future potential in modern methods of construction, Waste and resource programme, 2007, UK
13. Likert, R.: a technique for the measurement of attitudes. In: Archives of Psychology, 1932, pp. 55
14. Poon, C.S., Yu, A.T.W., Jaillon, L.: Reducing building waste at construction sites in Hong Kong. In: Construction Management and Economics, 2004, pp. 461 – 470
15. Modern methods of construction – a forward-thinking solution to the housing crisis?, Report of RICS, 2018

Znižovanie množstva odpadov pomocou moderných metód výstavby

Marcela SPIŠÁKOVÁ, Mária KOZLOVSKÁ

Technická univerzita v Košicích, Stavební fakulta, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice, Slovensko, e-mail: marcela.spisakova@tuke.sk, maria.kozlovska@tuke.sk

Súhrn

V podmienkach slovenského stavebníctva sa využívajú najmä tradičné spôsoby výstavby, väčšinou realizované priamo na stavenisku. V súčasnosti vystupujú do popredia aj moderné metódy výstavby (MMV) s potenciálom zvyšovať výkonnosť stavebníctva, zlepšovať ekonomické, environmentálne a sociálne aspekty výstavby. Cieľom príspevku je popísať potenciál znižovania odpadov prostredníctvom využívania moderných metód výstavby, ktorý bol určený prostredníctvom dotazníkového prieskumu.

Prvotným krokom prieskumu bolo zistiť stav povedomia odbornej verejnosti o moderných metódach výstavby a určiť mieru dôležitosti jednotlivých faktorov pri výbere technológie výstavby. Následne, respondenti na základe svojich odborných skúsenosti zhodnotili potenciál moderných metód výstavby v oblasti znižovania stavebných odpadov a identifikovali stavebné procesy, v rámci ktorých je možné dosiahnuť významné zníženie ich množstva. Záver príspevku je zameraný na porovnanie výsledkov v danej problematike s podobnými zahraničnými výskumami.

Kľúčové slová: *moderné metódy výstavby, stavebné a demolačné odpady, znižovanie, potenciál, dotazníkový prieskum*

Seldom Used By-product from Trimming Cement-bonded Particleboard Shows Potential for Modifying Building Materials Composition

Tomas MELICHAR, Jiri BYDZOVSKY, Amos DUFKA

Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Veveri 331/95, 602 00 Brno, Czech Republic,
e-mail: melichar.t@fce.vutbr.cz, bydzovsky.j@fce.vutbr.cz, dufka.a@fce.vutbr.cz

Abstract

The paper presents the suitability of an alternative raw material for use in cement-bonded particleboards. It focuses upon those trimmings produced as by-product when these boards are cut to size. The research aims to determine how this seldom used by-product might be reconstituted for use in a modified matrix. It was also determined the optimal particle size of these trimmings. The properties of the tested materials were analyzed after 90 days of curing. Given the intended purpose of the raw material as cement bonded particle boards, special conditions of higher temperature and humidity were set for the first stages of curing. The investigation involved the testing of physical-mechanical properties (DTA, XRD) including analyzing microstructure (SEM).

Keywords: *Cuttings from cement-bonded particleboards formatting, cement, modification, physico-mechanical parameters, microstructure.*

Introduction

Cement-bonded particleboards are a fairly common material. The Czech producer CIDEM Hranice, a.s. produces about 55,000 m^3 of these boards every year. Much like the case in other manufacturing processes, this generates by-products that would be considered waste unless used in some other way. In this case the by-product is the trimmings from cement-bonded particleboard manufacture (yearly production approx. 5,000 t). Only a small percent of these cuttings are currently used, the majority ending up in landfill. Simultaneously, the manufacturing process is constantly under pressure to reduce its environmental impact and costs. Therefore, the research that was focused on modifying the cement matrix of the boards, further investigated the use of these cuttings as a useful by-product.

Studying the information currently available on this topic, it becomes evident that this is a rather poorly explored area. There are numerous publications on cement-bonded particleboards, although none mention the reuse of trimmings as a modification component. Cement-bonded particleboards and, more generally, cement composites with organic filler are commonly modified by a variety of secondary fillers. [1-9] The idea of modifying the matrix of these boards using alternative materials; i.e. cuttings or trimmings produced during their manufacture is therefore very interesting in terms of developing new or strongly modified building materials.

Experimental part

The cement-bonded particleboard cuttings (see Figure 1) were supplied by the manufacturer. These were treated to be made suitable for application in the cement composite. Due to both ease of use and effectiveness, this was performed using a jaw crusher (Retsch BB200 Mangan), where several sizing-gap settings were tested, ranging from 2 to 10 mm in particle size (see Figure 4). The optimum setting proved to be 2 mm, as it produces up to 10% fine particles of less than 63 μm in size (see Figure 3). This material of particle density 2,350 kg/m^3 (tested in helium pycnometer Micromeritics AccuPyc 100-cc with accurracy 0.03% of reading and plus 0.03% of sample capacity) and specific surface area of 246 kg/m^2 (tested in Blaine

apparatus ZEB / PC-Blaine Star 441) was then used in the modification of the binder component of these composites. The amount of 10% (weight percentage) of crushed cuttings was utilized for the research (grains up to 63 μm only). Concerning the composition of the cutting/trimmings, they represent a composite material consisting of a cement matrix and wood chips mineralized by soluble glass.

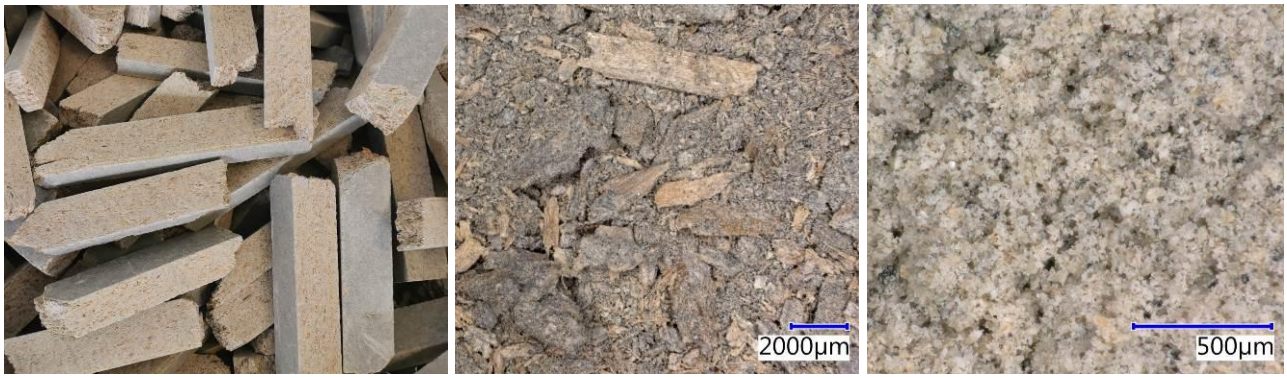


Figure 1, 2 and 3: Cuttings from cement-bonded particleboards – raw (Fig. 1 - left), after crushing in a jaw crusher (Fig. 2 – middle; image from optical microscope) and separated grains of 0-63 μm (Fig. 3 – right; image from optical microscope)

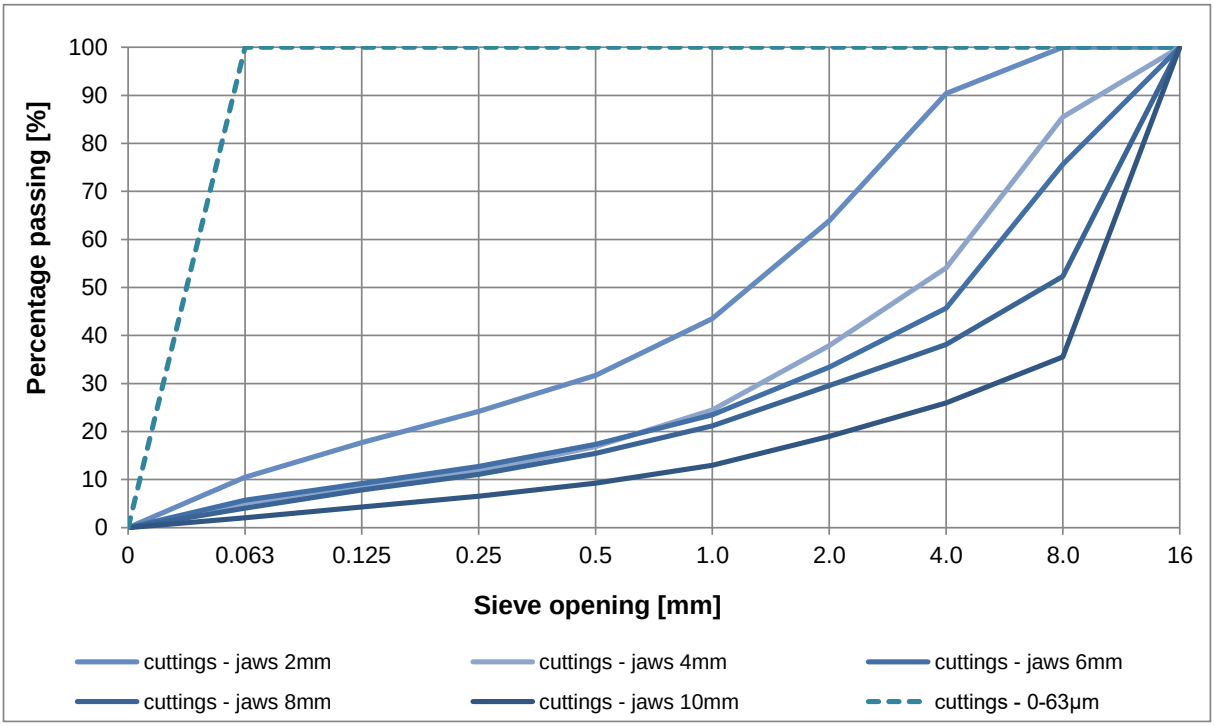


Figure 4: Particle size distribution; effect of grinding (material used in the following research – dashed curve)

To evaluate the usability of the cuttings in various building materials, their phase composition was examined. The focus was on determining the ratio of cement matrix and wood chips (see Figure 5). This was performed by a combination of thermal, chemical and calorimetric analyses (tested in electric furnace CLASIC 2018S, calorimeter IKA C200 with temperature measurement resolution 0.0001K, differential thermal analyzer Mettler Toledo TGA/DSC 1 STAR System with sensitvity of DSC sensor 0.1 mW and resolution of temperature 0.00003 °C).

The thermal analysis of a composite containing fundamentally different components is characterized by several processes taking place simultaneously. Several changes thus occur at certain temperatures - e.g.

the breakdown of hydration products (CSH gels or phases, portlandite, etc.) as well as the decomposition of wood chips. Detailed analysis was performed with cuttings crushed at a sizing-gap of 2 mm.

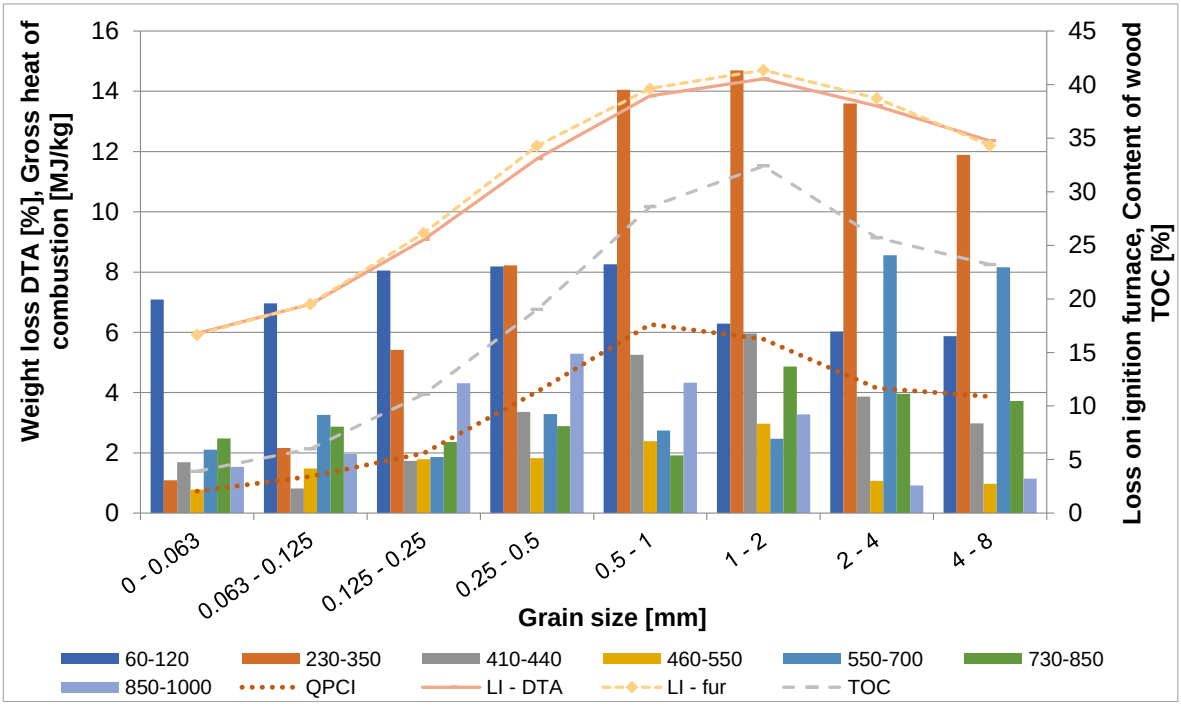


Figure 5: Thermal analyses of crushed and separated cuttings from cement-bonded particleboards (distance of jaws in crusher 2 mm) – DTA (1000 °C; legend of decomposition intervals – see Table 1), Q_{PCI} gross heat of combustion, LI loss on ignition in furnace (1000 °C), content of wood by TOC

Table 1 below shows all reactions that were identified by differential thermal analysis. It is clear that the decomposition of wood takes place over a rather broad temperature range (230 to 700 °C), which is also typical for the cement matrix decomposition. This was supported by the presence of exothermic effects at this temperature interval. The reason for such a wide interval is the fact that the wood chips are quite thoroughly mineralized. Their degree of mineralization then increases the maximum temperature needed for the wood to decompose. Therefore DTA was supplemented by other analyses, such as combustion heat, loss on ignition, and wood content (evaluated from TOC analysis, carried out at laboratory ALS Czech Republic, s.r.o.).

Table 1: Temperature intervals of decomposition of all mineralogical components, incl. wood particles in cuttings

60–120°C	230–350°C	410–440°C	460–550°C	550–700°C	730–850°C	850–1000°C
water leak	exothermic decomposition of wood	exothermic decomposition of wood	decomposition of $Ca(OH)_2$	second phase of CSH gels decomposition	decomposition of carbonates, mostly $CaCO_3$	residual decomposition of carbonates
	decomposition of CSH gels	decomposition of CSH gels	residual decomposition of wood	residual decomposition of wood		

The results of the analyses (presented in Figure 5) show the cement and wood chips distribution (cuttings crushed with distance of jaws 2 mm. Thermal, chemical and calorimetric analyses correspond to one another. A quick and rough estimate of the ratio between the cement matrix and the wood chips can be obtained from loss on ignition values. Detailed information is provided by DTA where losses between 230 and 350 °C follow very closely the progression of combustion heat and TOC values.

However, an exact wood content can only be determined from TOC, where the result of this value using reference wood chips and cement provides information on the wood content in the cuttings as well.

Crushing separates the chips from the cement matrix. However, this process is not completely effective and a portion of the cement matrix remains bonded with the wood. For instance, crushed particles of 0 to 63 μm still contain 3.9% wood (i.e. mineralized chips). It is also apparent that a portion of the wood chips is crushed together with the matrix. The individual fractions were separated using the sieve analysis. If more sophisticated methods were used, the wood content in some fractions of the cuttings might be eliminated (mainly particles smaller than 63 or 125 μm).

Cuttings with the particle size of 0 to 63 μm were used as a binder substitute in a cement mortar of standard composition (see ČSN EN 196-1), replacing 5, 10, 15 and 20% of cement. Specimens with the dimensions of 40 × 40 × 160 mm were prepared for testing. The goal was to determine how the modification influences the cement matrix and, by extension, the particleboards. This is why they were aged under conditions that simulated the manufacturing process. Specifically, this entailed heat curing (while still in moulds) and increased moisture. Higher temperature (minimum 40° C) and humidity were applied over several hours. After heat curing the specimens were cured in laboratory conditions for 7 days and afterwards were moved back to the chamber for the second stage of heat curing (at a minimum temperature of 65° C).

The sample sets per each curing time consisted of 3 specimens. Totally, 48 specimens of modified composition and 12 reference specimens were produced. Approximately 700 g of the crushed cuttings were used for this purpose. The properties were tested and evaluated after 9, 14, 28 and 90 days. Curing of 28 and 90 days are required by the ČSN EN 450-1 standard to set efficiency indexes. The intention of using the cuttings as cement substituent was why the testing principles stated in the ČSN EN 450-1 standard were used. The standard is valid for the fly ash. However, no technical standard relevant for crushed cuttings was found. Curing of 7 and 14 days represents the actual conditions of cement-bonded particleboard manufacturing. Curing after 9 days was chosen because the second stage of heat curing ends and curing after 14 days represents time when the boards can be considered ready for shipping. During heat curing, specimens were kept under laboratory conditions; i.e. at a temperature of ca 22° C and relative humidity of c. 45%. All specimens were tested for bulk density in hardened state, compressive strength and flexural strength after 9, 14, 28 and 90 days of curing. Bulk density and (compressive, flexural) strengths were measured in accordance with ČSN EN 196-1 (strengths tested in electric-hydraulic press machine Ratiotec RT 200/10-1D servo with accuracy class 1 according the EN 7500-1). To understand the action of the alternative component in the composite, its microstructure was analysed by a scanning electron microscope (analyzed in scanning electron microscope TESCAN MIRA3 XMU with resolution 1.2 to 1.5 nm at 30 kV in SE mode and 2 nm at 30 kV in BSE mode).

Results and discussion

The replacement of cement with alternative components had an influence on the final values of bulk density depending on the amount of the alternative material (see Figure 6, 7). The influence of curing is also interesting, as it is also resulted in differences of average bulk density. The highest bulk density was reached after 14 days of curing by the reference mixture, which was not modified. Decreases in bulk density in mortars with the crushed cuttings as a partial cement replacement were observed in cases with higher alternative material content. This shows a dependence of bulk density on the amount of cuttings. The initial decreases in bulk density were probably caused by the gradual release of moisture. The fact that mixtures containing the crushed cuttings saw a marked decrease in bulk density is due to their composition (among others including 4% of wood). Mixtures containing crushed cuttings had lower values of bulk density due to residues of wood chips (they contained 4% of wood).

Another important finding is the behaviour of this material, which is most likely an inactive filler and will be further discussed in the section on strength. Thus it does not reinforce the structure nor increase bulk density. A further important finding is that the alternative material behaved as inactive filler, as will be discussed below, i.e. it does not reinforce the structure and increase bulk density. Compared to bulk density, compressive strength shows a rather different trend (Figure 8, 9). The longer the curing is, the

higher the compressive strength is. This is valid for all tested mixtures. However, at higher dosages of the cuttings, strength tends to increase slowly. At 15 and 20%, replacement caused an evident decrease of the strength of cement-bonded particleboards, where a 15% replacement caused a strength decrease by up to 32% (after 28 days of curing), while 20% resulted in up to a 46% decrease (after 28 days curing). After 90 days of curing there was slightly less decrease; i.e. 27 and 44% (at dosages of 15 and 20% respectively).

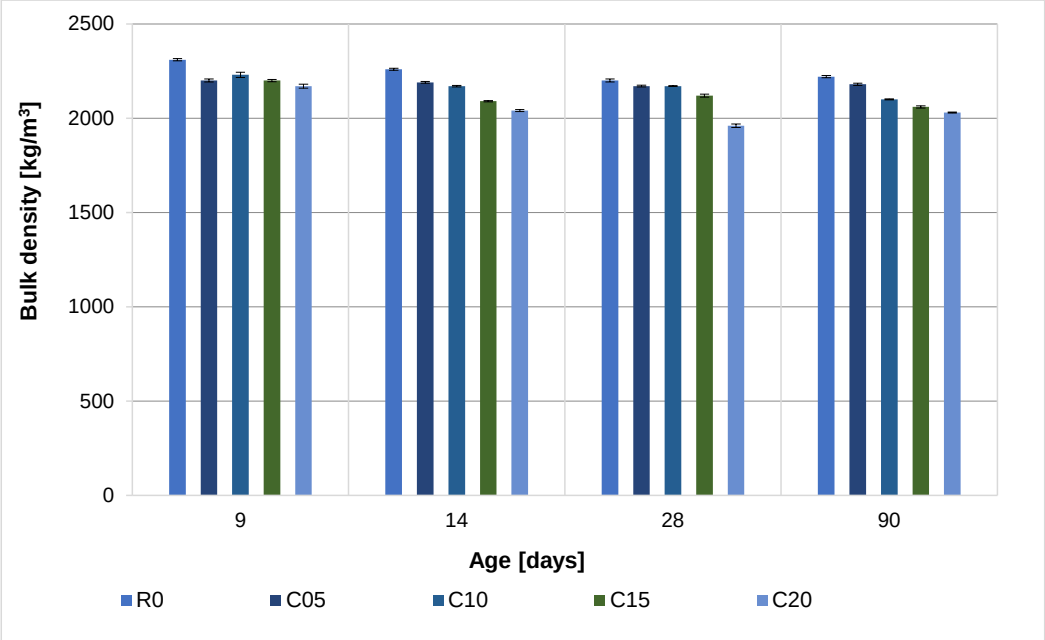


Figure 6: The influence of the alternative raw materials on the bulk density of cement composites with modified composition (incl. absolute error bars)

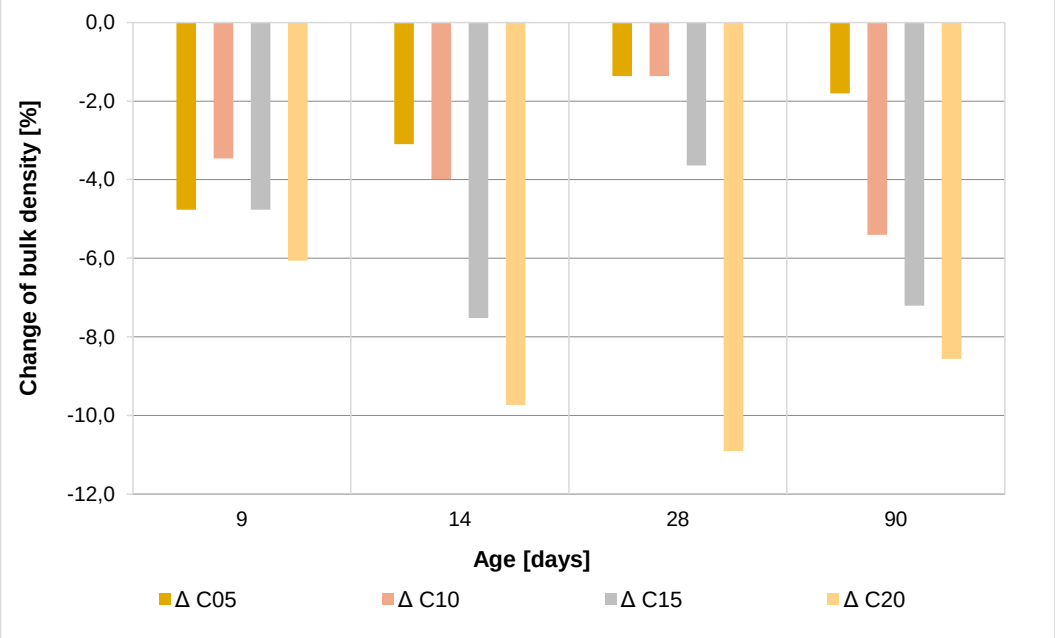


Figure 7: The influence of the alternative raw materials on the bulk density changes of cement composites with modified composition

An interesting finding is that values of bulk density are rather similar (especially when compared with the reference mortar), whereas the values of compressive strength closely reflect the modification. The reason for this decrease could be the wood content (crushed wood chips where mineralization is compromised), which increases along with the proportion of cuttings. Two-stage heat curing of the mixture, combined with saturated water vapour can produce volume changes in the wood. Despite the fact that this aspect was not tested and evaluated, this is quite an intriguing area for possible further research.

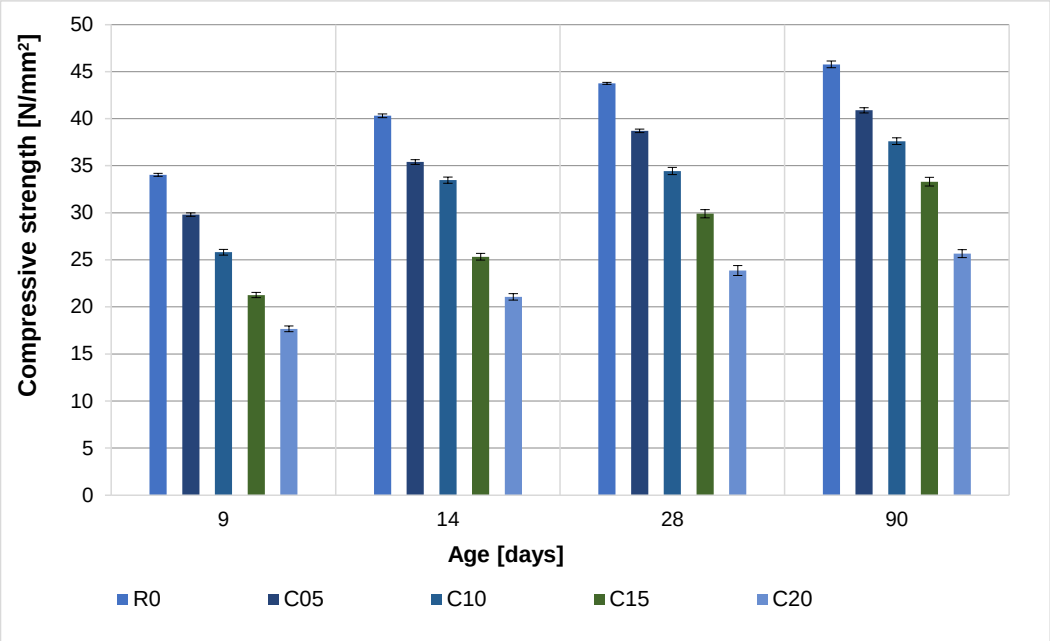


Figure 8: The influence of the alternative raw materials on the compressive strength of cement composites with modified composition (incl. absolute error bars)

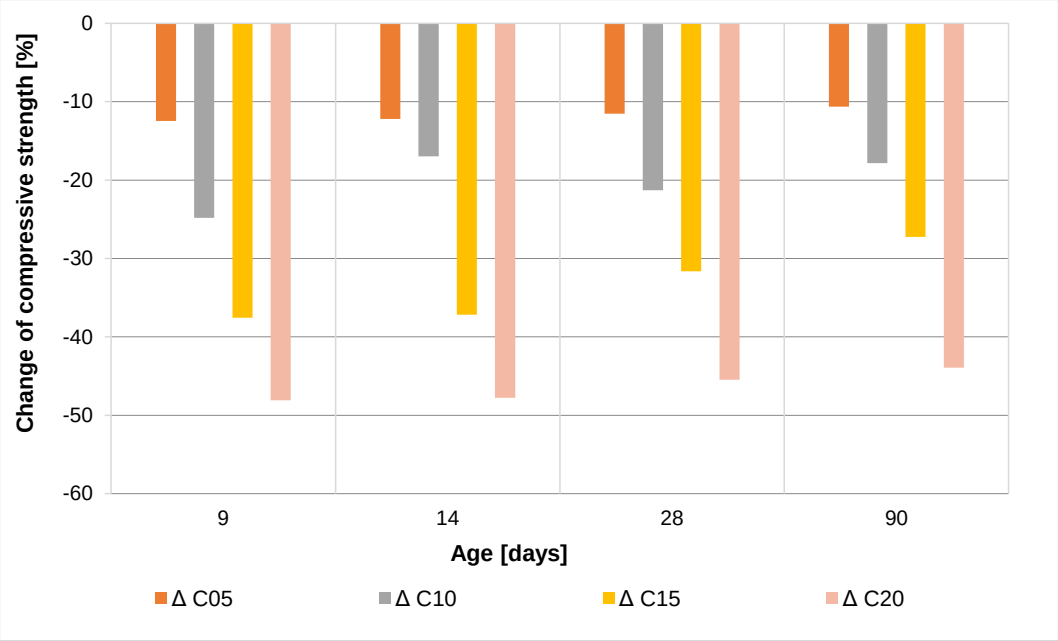


Figure 9: The influence of the alternative raw materials on the compressive strength changes of cement composites with modified composition

The highest flexural strength was reached in case of reference mixture, while in case of modified mortars a significant decrease was observed. The trend of flexural strength values basically copied that of compressive strength ones. Flexural strength was affected less than compressive strength. The mortars containing the cuttings suffered a decrease in flexural strength by 18 to 40 % compared to the reference. The decreases varied with curing as well, however, less than in case of compressive strength.

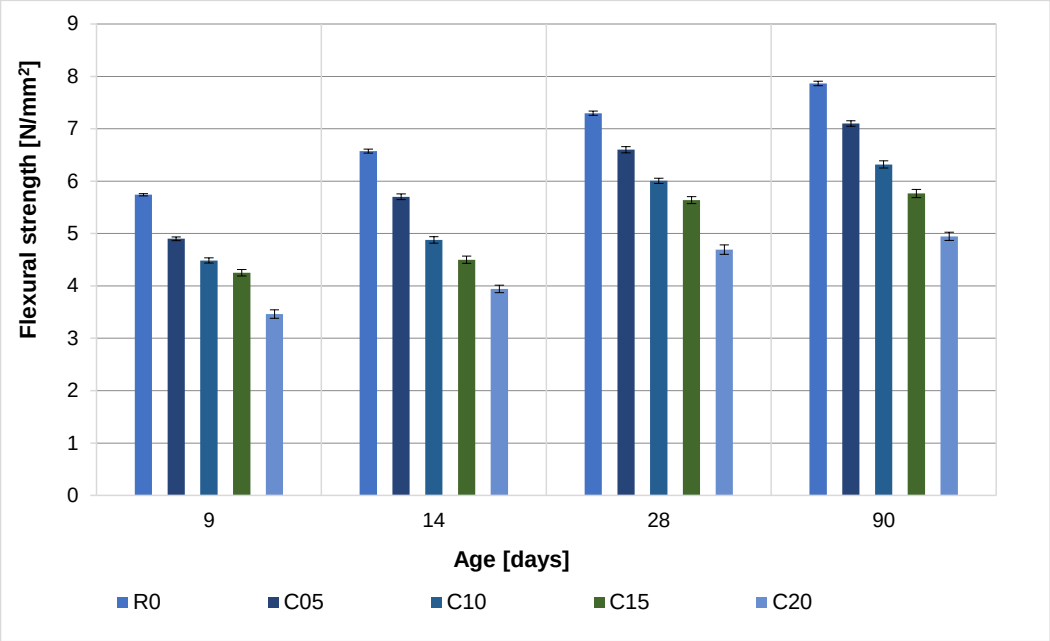


Figure 10: The influence of the alternative raw materials on the flexural strength of cement composites with modified composition (incl. absolute error bars)

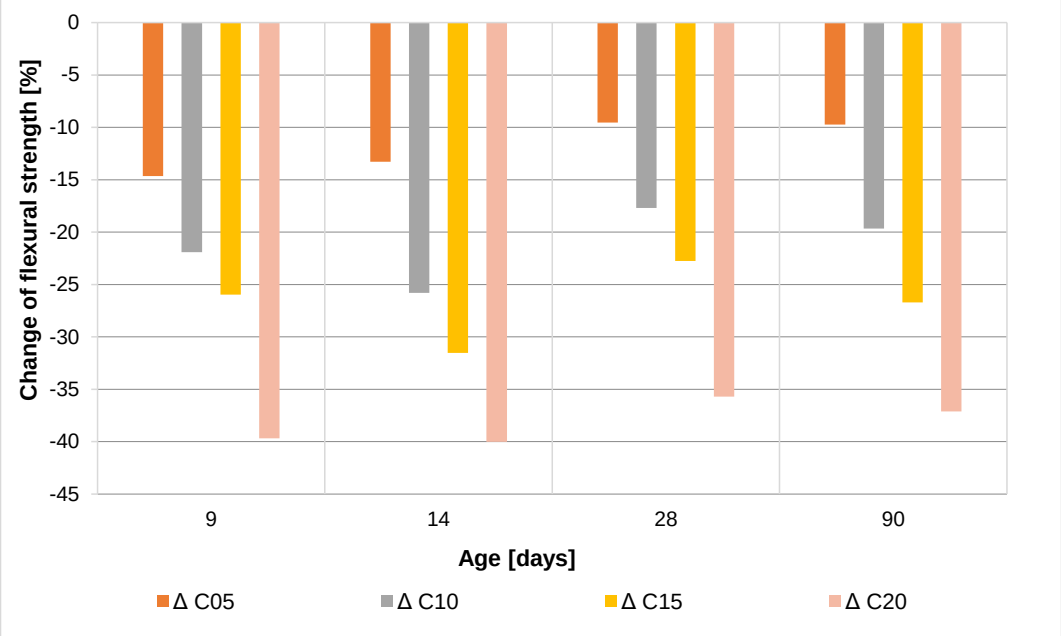


Figure 11: The influence of the alternative raw materials on the flexural strength changes of cement composites with modified composition

The results of measurements of the physical-mechanical properties indicate that the crushed cuttings from cement-bonded particleboards function as fine-grained filler in the composites. Thus they take no active part in creating the structure of the cement matrix.

The influence of cuttings on the cement matrix was then analysed by physical-chemical analyses. A quantitative phase composition analysis (XRD with Rietveld refinement, SAXS – Panalytical Empyrean Series 2 with linearity of 2theta through whole range ≥ ± 0.01°) failed to identify any major differences between the mixtures. All materials contained practically the same minerals. Slight differences were found only in a minor increase in the background which characterises the glass phase. This occurs mainly in the crushed cuttings containing soluble glass bonded with the material (mainly originating from wood mineralization). Other small differences, were found in the individual diffraction lines (strong portlandite in the reference mixture, etc.).

A qualitative analysis (DTA) confirmed the findings of XRD especially in terms of $Ca(OH)_2$, calcite and CSH phase content which was slightly higher in the reference mixture. The reason for this is the character of the alternative material, which predominantly contains a cement matrix with 4% of wood chips.

Regarding the character of material and the results of the above-described tests, the microscopic examination focused on the seeking of defects and anomalies in the cement matrix. It should be said that it was very difficult, sometimes impossible, to distinguish the cement matrix of the mortar from the matrix of the cuttings. The identifying feature of the cutting particles was mainly by the presence of small wood particles.

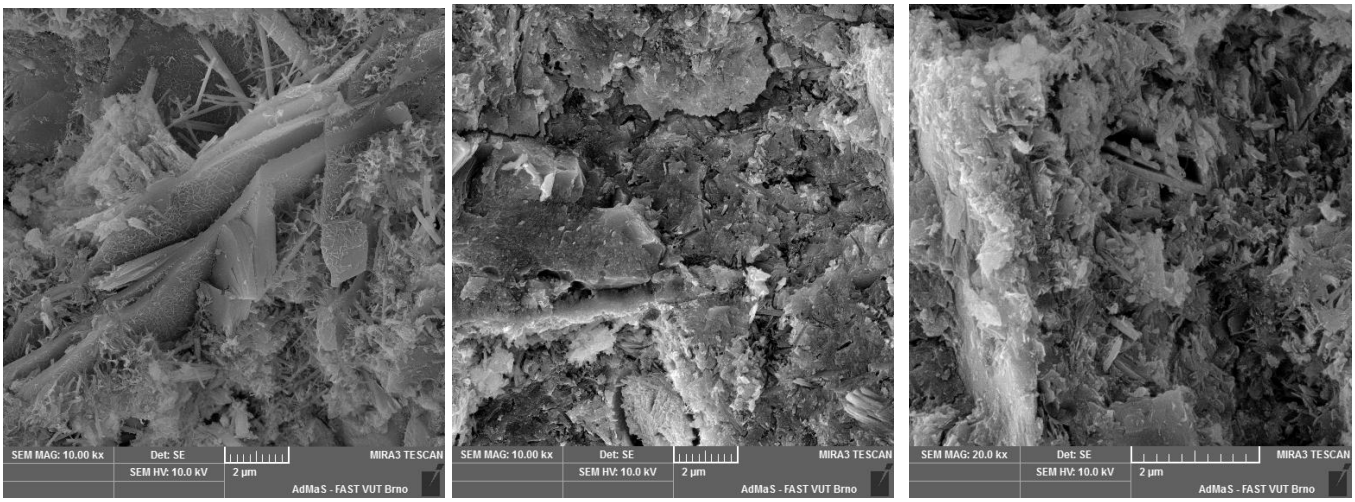


Figure 12, 13 and 14: Microstructure of mixture R0 (left, 10,000× magnification), C10 (middle, 10,000× magnification) and C20 (right, 20,000× magnification) at the age of 90 days

However, the microscopic examination revealed no major defects or inconsistencies in the structure of the modified materials. The cement matrix and the cuttings crushed in a jaw crusher are compatible with one another.

Conclusions

The results show that the cuttings produced during the manufacturing of cement-bonded particleboards have some use in the production of cement composites (however, as no more than a 10% replacement of cement), which have undergone heat-curing at an early age (higher temperature and humidity). It is most likely inert filler which does not take active part in the formation of the cement composite structure. This fact was also apparent in the final parameters of tested composites. There were more observed decreases of strength associated with an increased content of the alternative material over both – after 28 and 90 days curing.

Based on the results and findings, the following conclusions can be stated:

- To utilise the cuttings from cement-bonded particleboards more effectively (i.e. their re-use in particleboard manufacturing or in cement composites generally), more extensive research will need to be performed to optimize the treatment of the cuttings (composition, particle size, etc.). Using the cuttings as described above is only feasible as partial cement substitute is not more than 8% of cement content.
- An interesting direction for future research is the analysis of various processes of producing finer grains combined with the separation of the cement matrix from the wood. If it would be possible to completely remove all wood chips from the crushed or milled cuttings, the properties of the final composite would not suffer deterioration even at higher amounts of the alternative material (15 and 20%).
- Only when the composition and properties of the cuttings are optimized will it be possible to proceed with a thorough investigation into the composition of cement-bonded particleboards. This will involve, along with basic physical, mechanical and chemical properties, an assessment of durability, which is also another key parameter to determine the material's usability in construction.
- Use of residual amount of crushed cuttings grains, i. e. 63 μm to 16 mm, is also significant. There is no further utilization for this alternative raw material. Further research could be focused on usage of cuttings, such as dry levelling compound for floors. No other strong adjustments of the cuttings would be necessary for such floor component. The cuttings would be crushed and subsequently only grains of inappropriate size would be eliminated.

Acknowledgment

This paper has been worked out and presented with the financial support of the Czech Science Foundation (GA ČR) project 19-00291S, "Analysis of processes during forming the structure in silicate composites with organic fillers and their behaviour at specific conditions of stress".

References

1. Cabral M. R., Nakanishi E. Y., Mármol G., Palacios J., Godbout S., Lagacé R., Savastano H., Fiorelli J.: Potential of Jerusalem Artichoke (Helianthus tuberosus L.) stalks to produce cement-bonded particleboards, Industrial Crops and Products, Volume 122 (2018) pp. 214 – 222.
2. Soroushian P., Hassan M.: Evaluation of cement-bonded strawboard against alternative cement-based siding products, Construction and Building Materials, Volume 34 (2012) pp. 77 – 82.
3. Olorunnisola A. O.: 16 - Experimental investigations on cement-bonded rattan cane composites, Editor(s): Holmer Savastano Junior, Juliano Fiorelli, Sergio Francisco dos Santos, Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites, Woodhead Publishing (2017) pp. 429 – 444.
4. Ashori A., Tabarsa T., Sepahvand S.: Cement-bonded composite boards made from poplar strands, Construction and Building Materials, Volume 26, Issue 1 (2012) pp. 131 – 134.
5. Karade S.R.: Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes, Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 8 (2010) pp. 1323 – 1330.
6. Wolfe, R.W. Gjinolli, A.: Cement bonded wood composites as an engineering material. The use of recycled wood and paper in building applications Madison, WI, Forest Prod. Soc., 1996, pp. 84 – 91
7. Gong, A. Kamdem, D. Harichandran, R.: Compression Tests on Wood-Cement Particle Composites Made of CCA Treated Wood Removed From Service, 2004, pp. 8 – 11.
8. Poornima, J. Sivaraja, M.: Performance enhancement of concrete structures using natural fibre composites, Eur. J. Sci. Res. 80 (3) (2012) pp. 397 – 405.
9. Soroushian, P., Won, J.-P., Hassan, M.: Durability characteristics of CO_2-cured cellulose fiber reinforced cement composites, Constr. Build. Mater. 34 (2012) 44 – 53.

Vedlejší produkt s potenciálem pro modifikaci složení cementotřískových desek

Tomáš MELICHAR, Jiří BYDŽOVSKÝ, Ámos DUFKA

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno
e-mail: melichar.t@fce.vutbr.cz, bydzovsky.j@fce.vutbr.cz, dufka.a@fce.vutbr.cz

Souhrn

Článek prezentuje potenciál vybrané alternativní suroviny s ohledem na výrobu cementotřískových desek. Důraz byl kladen na odřezky vznikající jako vedlejší produkt při opracování těchto desek. Záměrem prezentovaného výzkumu bylo hodnocení vlivu této vybrané složky na finální parametry cementových kompozitů s modifikovanou matricí. Pozornost byla věnována úpravě granulometrického složení odřezků. Vlastnosti testovaných hmot modifikovaného složení (matrice) byl sledován v časovém horizontu 90 dní zrání kompozitů. Vzhledem k zamýšlenému využití suroviny (výroba cementotřískových desek) byly v úvodních fázích zrání hmot nastoleny specifické podmínky zrání (zvýšená teplota a vlhkost). V rámci výzkumu byly testovány fyzikálně mechanické a chemické (XRD, DTA) vlastnosti, včetně analýzy mikrostruktury (SEM).

Klíčová slova: *Odřezky z formátování cementotřískových desek, cement, modifikace, pevnost, mikrostruktura.*

Vliv prachového odpadu s obsahem silikátové matrice a organického plniva na vlastnosti cementových kompozitů

Tomáš MELICHAR, Jiří BYDŽOVSKÝ

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, e-mail: melichar.t@fce.vutbr.cz, bydzovsky.j@fce.vutbr.cz

Souhrn

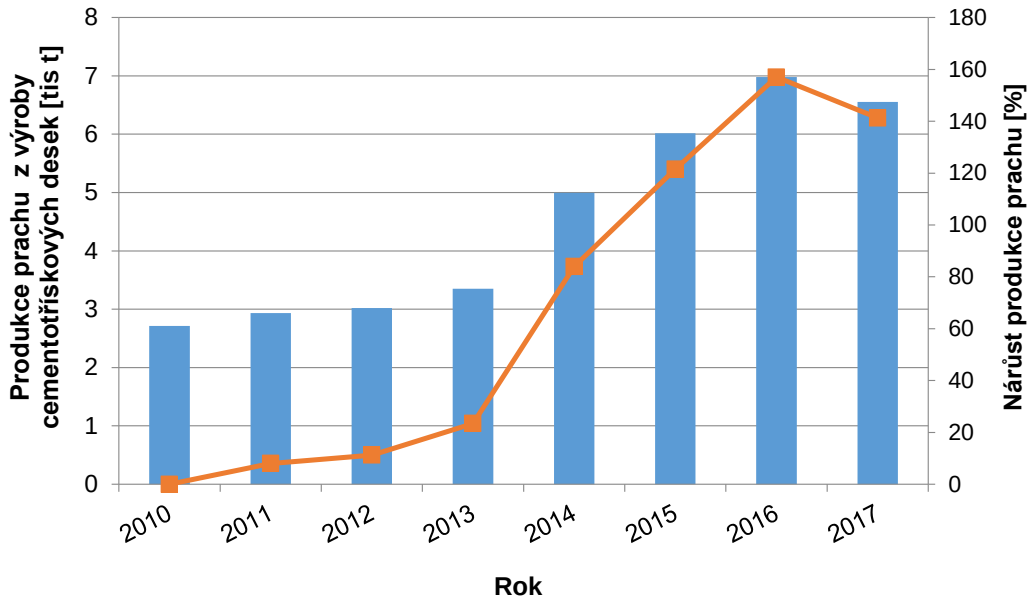
Článek prezentuje výzkum zaměřený na hodnocení vlastností cementových kompozitů modifikovaných prachem z opracování cementotřískových desek. Byla posouzena možnost částečné náhrady cementu (až 8 %) zmíněným prachem. Parametry prachu byly upraveny. Vlastnosti cementových kompozitů byly analyzovány po 28 a 90 dnech zrání v laboratorních podmínkách. Cementové kompozity na bázi cementové matrice a anorganického kameniva neobsahovaly žádné další přísady a příměsi. Výsledky prezentovaného výzkumu lze shledat jako přínosné. Velmi jednoduchou úpravou vlastností prachu lze v případě hmot modifikovaných tímto prachem (jako substituent cementu) docílit parametrů srovnatelných s referenční hmotou.

Klíčová slova: *Prach z opracování cementotřískových desek, vedlejší produkt, odpad, úprava složení, alternativní surovina, cementový kompozit, parametry.*

Úvod

Při výrobě cementotřískových desek je produkováno značné množství vedlejších produktů, které nejsou dále využívány a tudíž představují odpad. S ohledem na výzkum jejich využití pro modifikaci cementových kompozitů se jako zajímavý jeví prach (z odprašovací věže č. 4 – viz obrázek 1), který má původ při opracování cementotřískových desek. Toto opracování zahrnuje řezání, frézování, vrtání či broušení desek dle aktuálních požadavků zákazníka. Prach vzniká též v místech výrobní linky s vyšší prašností. Těmito místy jsou například přesypy při přepravě materiálu, míchací zařízení nebo vrstvicí stroje. Proto jsou součástí výrobní linky desek také odsávací zařízení, která jsou vhodně rozmístěna právě se záměrem zachycení vznikajícího prachu. Prach je zachytáván v cyklonech a na textilních filtrech ve čtyřech odprašovacích věžích (č. 1, 2, 4 a 5). Do každé z věží je přiváděn prach z jiné části výrobní linky. Dle aktuálních informací výrobce spol. CIDEM Hranice, a.s. je ročně vyprodukováno přibližně 7 tis. t tohoto typu odpadu. Podrobnější vývoj produkce odpadu (souhrn ze všech odprašovacích věží) je uveden na následujícím grafu (viz obrázek 2).

Obrázek 1: Prach z odprašovací věže č. 4 v závodu CIDEM Hranice, a.s. (odběr průběžně 2018)



Obrázek 2: Vývoj produkce odpadního prachu z výroby a opracování cementotřískových desek se zohledněním nárůstu produkce v letech 2010 až 2017

Provedením průzkumu s ohledem na odborné publikace (např. [1-9]) nebylo zjištěno, že by se někdo podrobně zabýval problematikou opětovného využití prašného odpadu vznikajícího na výrobní lince cementotřískových desek.

Proto byl zde prezentovaný výzkum zaměřen na podrobnou analýzu prachu vznikajícího při opracování cementotřískových desek a dále na jeho využití jako částečné náhrady pojiva v cementových komopozitech. Pro analyzování prachu byla využita kombinace fyzikálně chemických a termických analytických technik. S ohledem na zkoumání vlivu prachu jako parciální složky pojiva byla pozornost zaměřena na hodnocení základních fyzikálně mechanických charakteristik, vč. detailního posouzení struktury optickým mikroskopem.

Použité suroviny

Pro účely níže prezentovaného výzkumu byl vybrán prach, který je zachytáván ve věži č. 4 (výrobní závod CIDEM Hranice, a.s.). V odprašovací věži č. 4 je odsáván prach z frézy a z CNC stroje (novější typ – výrobní linka disponuje více typy těchto zařízení). Vzhledem k původu prachu (vznik z opracování pomocí CNC, resp. frézy) a se zohledněním minimálních výkyvů v úpravě složení receptur cementotřískových desek lze předpokládat prakticky konstantní vlastnosti prachu. Podobnost prašného odpadu pocházejícího z frézy a CNC totiž eliminuje výkyvy zrnitosti (a tudíž celkového složení) v případě provozu pouze jednoho z výše uvedených zařízení pro opracování desek, čímž tedy nebude docházet k výraznějším odchylkám vlastností prachu.

Prach byl aplikován jako alternativní složka pojiva v cementových kompozitech (maltách). Pro ověření potenciálu z hlediska opětovného využití prachu v cementových kompozitech byl důraz kladen na zhotovení zkušebních těles s dávkou 4 – 8 % jako náhrada cementu. Pro výrobu malt byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R (závod Mokrá), jehož parametry odpovídají požadavkům EN 197-1. Dále byl použit normalizovaný křemičitý písek CEN, EN 196-1 (tj. přírodní křemičitý písek sestávající ze zaoblených částic a jehož obsah oxidu křemičitého je nejméně 98 %).

Metodika experimentů

Prach, který je odsáván z frézy a CNC zařízení (při opracování cementotřískových desek) a dále dopravován do věže č. 4, byl odebrán průběžně během roku 2018 (celkem 4 odběry – březen, červen, září, prosinec). Tyto odběry prokázaly vysokou shodu jejich vlastností a byl z nich připraven reprezentativní vzorek. Před aplikací prachu do cementových kompozitů bylo nejprve třeba podrobné analýzy podstatných parametrů prachu. Důraz byl kladen na posouzení následujících charakteristik prachu z odprašovací věže č. 4 (dále také „prach V4“):

- sypná hmotnost – v souladu s EN 1097-3;
- měrná hmotnost – v souladu s EN 1097-7, ČSN EN ISO 8130-2 (přístroj Micromeritics AccuPyc 100-cc);
- měrný povrch – v souladu s EN 196-6 (permeabilní metodou v Blainově přístroji, ZEB / PC-Blaine Star 441);
- distribuce a velikost částic – v souladu s EN 933-1, ČSN EN ISO 8130-13 (sítovým rozborem a na přístroji využívajícím princip laserové difrakce Malvern Mastersizer 2000);
- mikrostruktura – detailní posouzení struktury bylo realizováno s využitím přístroje Keyence VHX-950F, umožňujícího zvětšení až 200×;
- ztráta žíháním (termický rozklad) – principiálně dle ČSN 720103 (modifikace – žíhání pouze do 1000 °C, vzorek o hmotnosti cca 15 – 20 g, elektrická pec CLASIC 2018S);
- spalné teplo – v souladu s EN ISO 1716 (přístroj IKA C200);
- mineralogie, poměr anorganické a dřevní hmoty – v souladu s ČSN 721083 (diferenční termická analýza s využitím přístroje Mettler Toledo TGA/DSC 1 STAR System, analýza v oxidační atmosféře o průtoku vzduchu 0,2 l/min, při hmotnosti vzorku cca 70 mg) ;
- obsah dřevní hmoty stanovený z obsahu organického uhlíku (TOC) – v souladu s EN ISO 29541, EN ISO 16948, EN 15407, EN ISO 10694 (byly analyzovány jednak referenční vzorky, tj. pouze cement, dále surové třísky a následně vzorky prachu; ze zjištěných dat bylo procentuálně vyjádřeno na základě obsahu uhlíku množství dřevní hmoty);
- chemické složení – principiálně dle EN 725-4 (na přístroji PANanytical Axios – XRF analýza).

Výsledky analyzování vlastností prachu jsou uvedeny v samostatné kapitole.

Byly navrženy tři receptury cementových malt normového složení (ČSN EN 196-1 – 1 díl cementu, 3 díly křemičitého písku a vodní součinitel 0,5, který byl modifikován dle konzistence rozlitím – viz dále v textu), kdy byl substituován cement v množství 4, 6 a 8 % prachem z opracování cementotřískových desek.

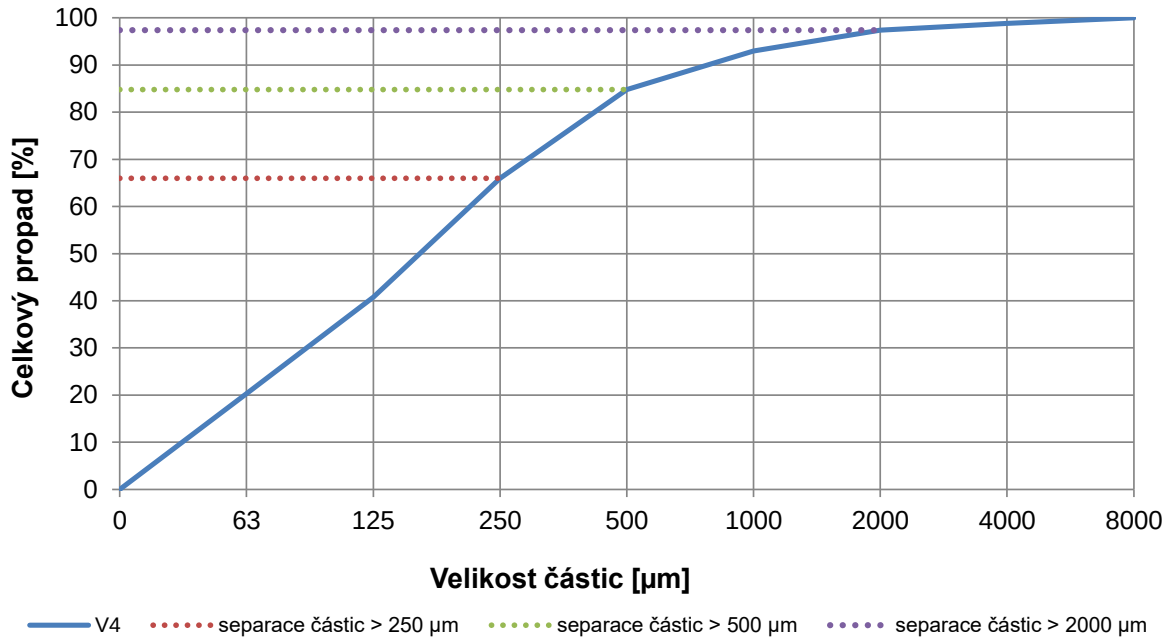
Dále byly pro všechny tři dávky zkoumány tři varianty úpravy složení prachu, a to konkrétně eliminace podílů zrn větších než 2; 0,5 a 0,25 mm. Pro tento účel byla zhotovena zkušební tělesa o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Celkem bylo zhotoveno 60 zkušebních těles (pro stanovení každého parametru 3 tělesa, z nichž byl stanoven průměr, který je uveden níže v grafech – viz obrázek 14 až 16), která po výrobě zrála v laboratorním prostředí, tj. o teplotě cca 22 °C a relativní vlhkosti přibližně 50 % po dobu 28 a 90 dní.

Při výrobě kompozitů byla nejprve vyrobena hmota referenční, na níž byla stanovena konzistence (dle ČSN EN 1015-3) a dle zjištěného parametru byla upravena dávka u všech následujících modifikovaných hmot, tj. všechny vyrobené hmoty vykazovaly stejnou konzistenci (rozlití v intervalu 115 až 120 mm), ovšem rozdíly mohly nastat v případě dávky vody, tzn. vodního součinitele (hodnoty w – viz obrázek 15 a 16).

Hmoty modifikovaného složení byly podrobeny analyzování objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu, pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu, a to v každém sledovaném stáří, tj. po 28 a 90 dnech. Postup stanovení objemové hmotnosti (stanovením rozměrů v kombinaci s gravimetrickou metodou, vyjádření poměrem hmotnosti k objemu zkušebních těles), dále pevnostních charakteristik byl metodicky proveden dle ČSN EN 196-1. Dále byla s ohledem na spolupůsobení alternativní složky v kompozitním materiálu detailně analyzována struktura pomocí optického mikroskopu.

Výsledky a diskuze – analýza alternativní suroviny

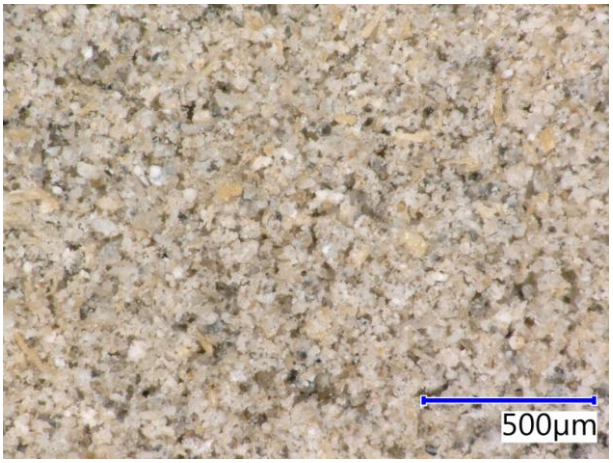
Bylo zjištěno, že prach vykazuje sypnou hmotnost 620 kg/m^3 a dosahuje měrného povrchu 95 m^2/kg s měrnou hmotností 2016 kg/m^3. Podstatné je rovněž složení z hlediska velikosti částic jednotlivých zrn. Byly analyzovány podíly zrn různých velikostí (viz obrázek 3). Dominantní hmotnostní podíl prachu V4 zaujímají zrna do velikosti 500 µm (cca 85 %). Zrna velikosti 500 až 1000 µm představují cca 8 % z celkového množství prachu V4 a zrna o velikosti částic 1 až 2 mm zaujímají přibližně 4% podíl. Je tedy evidentní, že se jedná o poměrně jemnozrnnou partikulární látku. Na základě výsledků sítového rozboru a s ohledem na možné využití prachu při výrobě cementových komopozitů (zahrnujících mimo jiné i cementotřískové desky) byly navrženy 3 varianty, tj. s eliminací nadsítného > 250, 500 a 2000 µm, což je znázorněno i v následujícím grafu (obrázek 3).

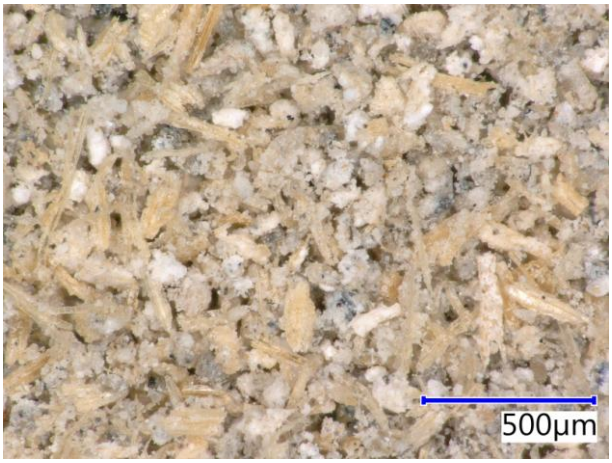


Obrázek 3: Vyhodnocení rozboru velikosti částic prachu V4 s vyznačením separace nežádoucích zrn, tj. nad 250, 500 a 2000 µm (tyto 3 varianty byly navrženy pro posouzení vlivu na cementové kompozity)

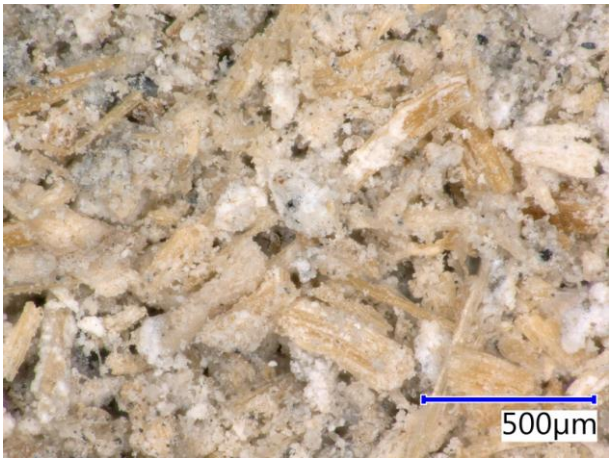
Pro analyzování charakteru zkoumaného prachu byl využit také optický mikroskop. Snímky na obrázcích 4 až 10 zachycují detailní pohled na strukturu prachu, a to i v případě jednotlivých frakcí. Ze snímků 4 až 7 je evidentní, že prach obsahuje značné množství dřevní hmoty, jejíž podíl se s rostoucí velikostí zrn zvyšuje.

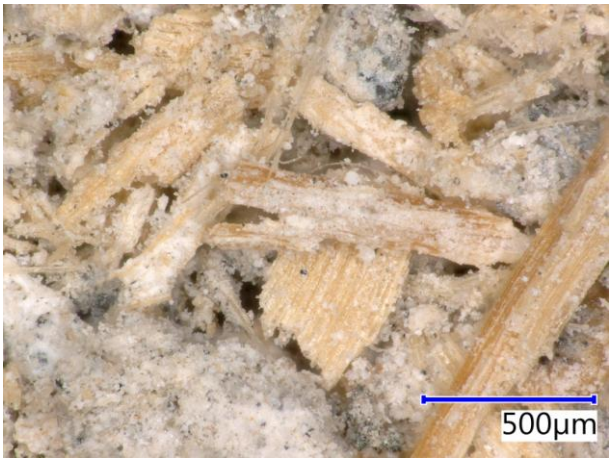
Záměrně byly analyzovány jednotlivé frakce prachu, aby bylo patrné, jak se mění složení a vlastnosti těchto složek, neboť je možné uvažovat o poměrně jednoduchém kroku – separaci (síty) a následném využití upraveného odpadu při výrobě stavebních hmot. Snímky poukazují na skutečnost, že se v prachu nacházejí jak částice samotné cementové matrice, tak plniva (dřevěných třísek) a rovněž i kompozitní částice, tj. dřevěné třísky se zbytky přilnuté matrice, přičemž tyto kompozitní částice jsou více patrné spíše od velikosti částic 500 µm.





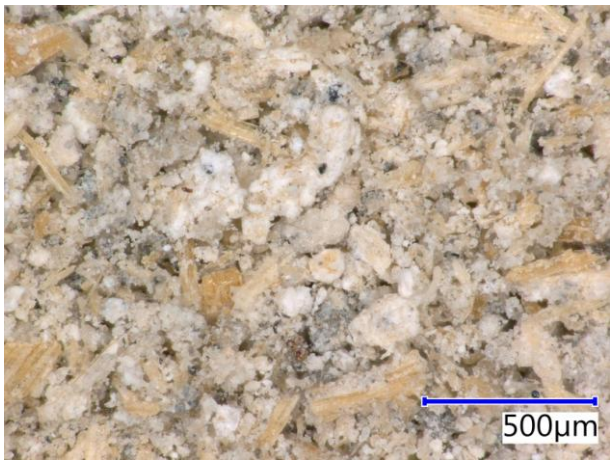
Obrázek 4, 5: Detailní pohled na strukturu prachu V4 – velikost částic 0 až 63 µm (vlevo; obrázek 4) a 63 až 125 µm (vpravo; obrázek 5)



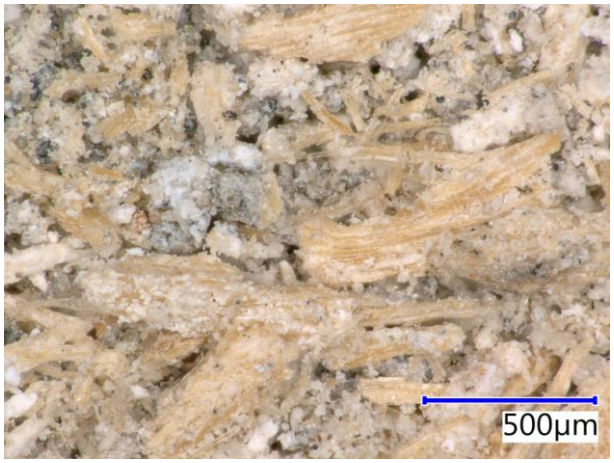


Obrázek 6, 7: Detailní pohled na strukturu prachu V4 – velikost částic 125 až 250 µm (vlevo; obrázek 6) a 250 až 500 µm (vpravo; obrázek 7)

Níže na snímcích je zachycena detailně struktura prachu V4, a to konkrétně všech tří typů (obrázek 8 až 10), které byly využity pro navazující experimenty, tj. pro substituci pojiva v cementových kompozitech. Snímky potvrzují předchozí zjištění, tj. se zvyšující se velikostí částic roste podíl dřevních částic a dále také kompozitních částic obsahujících cementovou matrici ulpívající na dřevěných třískách.



Obrázek 8, 9: Detailní pohled na strukturu prachu V4 – velikost částic 0 až 250 µm (vlevo; obrázek 8) a 0 až 500 µm (vpravo; obrázek 9)



Obrázek 10: Detailní pohled na strukturu prachu V4 – velikost částic 0 až 2000 µm

Po separaci dosahovaly jednotlivé typy prachu V4 rozdílných parametrů, a to i s ohledem na měrný povrch a měrnou hmotnost, což je uvedeno v tabulce 1. Je patrné, že s postupnou eliminací částic větších než 2000 500 a 250 µm docházelo k mírnému zvýšení měrné hmotnosti, což koresponduje s předchozími zjištěními (zvyšující se podíl dřevní hmoty v případě větších částic prachu). Dále byla posouzena závislost postupné separace nadsítného na zvyšujícím se měrném povrchu prachu V4. Nárůst měrného povrchu ovšem nebyl nikterak zásadní.

Tabulka 1: Výsledky stanovení měrného povrchu a měrné hmotnosti prachu V4 s ohledem na úpravu jeho složení eliminací nežádoucích částic

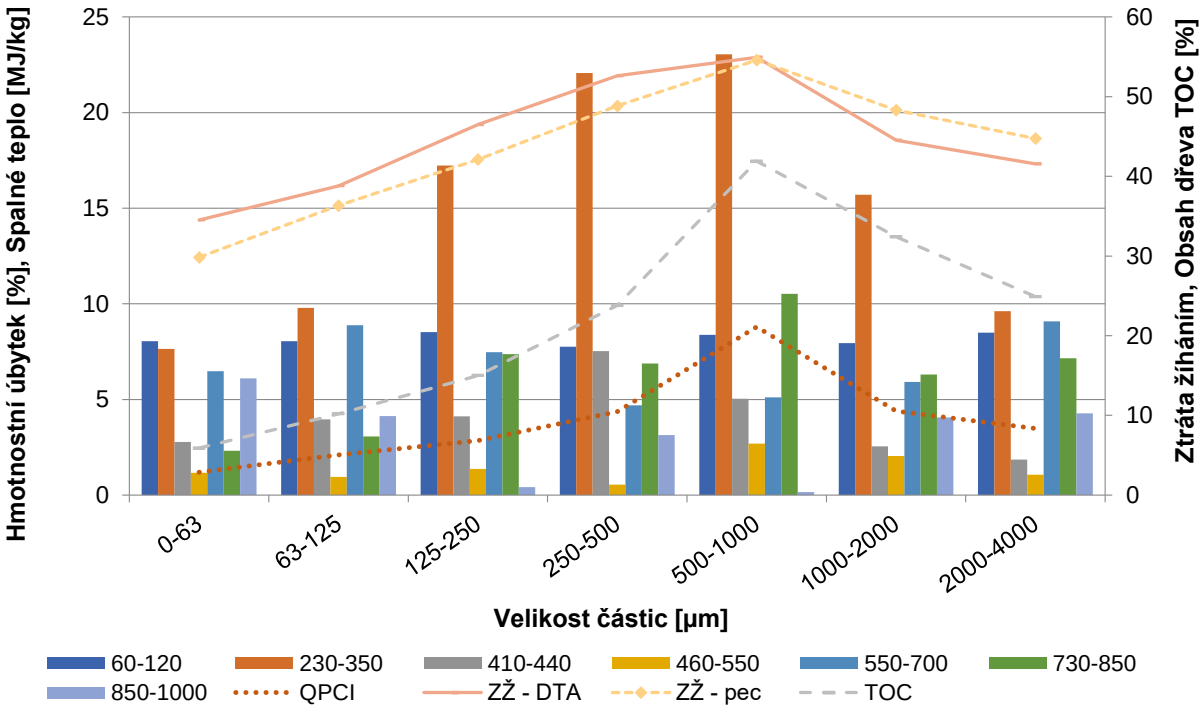
Prašný odpad	Měrná hmotnost [kg/m^3]	Měrný povrch [m^2/kg]
V4 < 2000 µm	2180	108
V4 < 500 µm	2240	117
V4 < 250 µm	2280	125

Pozornost bylo dále třeba věnovat i složení s ohledem na mineralogii, obsah chemických sloučenin, podíl cementové matrice a dřevní hmoty. Fyzikálně-chemické a termické analýzy byly doplněny také kalorimetrickými testy (spalné teplo – Q_{PCI}). Tyto charakteristiky totiž do velké míry determinují chování finálních hmot s obsahem prachu V4 (a to zejména při vyšších dávkách prachu jako substituční složky). Na následujících obrázcích 11 a 12 jsou zachyceny vybrané vzorky před a po stanovení spalného tepla.

Obrázek 11, 12: Vybrané vzorky před a po provedení kalorimetrické analýzy spalného tepla Q_{PCI} (prach V4 bez eliminace částic)

Výsledky chemické analýzy poukazují na složení typické pro silikátovou matrici na bázi cementového pojiva, kdy byly kvantifikovány tyto složky testovaného prachu: CaO (42,7 %), Al_2O_3 (13,4 %), Fe_2O_3 (4,7 %), SiO_2 (12,1 %), SO_4^{-2} (0,47 %), Na_2O (0,25 %), K_2O (0,093 %), MgO (0,076 %), Cl^- (< 0,01 %) a MnO (0,041 %).

Následující graf (obrázek 13) uvádí souhrn vyhodnocení komplexu fyzikálně-chemických, termických a kalorimetrických analýz. Jmenovitě se jedná o diferenční termickou analýzu (DTA); pro kvantitativní posouzení mineralogického složení a ztráty žíháním), dále termický rozklad v peci (pouze ztráta žíháním – ovšem větší vzorek, než v případě DTA), chemický rozbor (stanovení obsahu organického uhlíku – TOC a tedy i obsahu dřevní hmoty) a stanovení spalného tepla (Q_{PCI}; což vypovídá také o obsahu dřevní hmoty). Tento komplex analýz byl realizován pro jednotlivé frakce prachu V4 separátně tak, aby bylo možné podrobně analyzovat všechny podstatné souvislosti.



Obrázek 13: Fyzikálně-chemické, kalorimetrické a termické analýzy prachu V4 pro jednotlivé velikosti částic

Při vyhodnocení DTA je nejprve je nutné definovat, k jakým rozkladným procesům dochází v jednotlivých intervalech. Bylo zjištěno, že hmotnostní úbytky charakteristické pro určité fáze (portlandit, uhličitany, CSH) či sloučeniny (dřevo – v případě cementotřískových desek je používáno smrkové) byly identifikovány v různých teplotních oblastech, a to napříč celým teplotním intervalem DTA. Pozornost byla zaměřena jednak na typické složky cementové matrice a dále pak také na obsah dřevní hmoty.

Charakteristika dekompozičních procesů pro jednotlivé teplotní intervaly je uvedena v tabulce 1. Během vyhodnocování DTA bylo zjištěno, že rozklad dřeva překrývá poměrně široký teplotní interval (230 až 700 °C). V tomto teplotním rozmezí rovněž dochází i k rozkladu silikátových složek matrice cementových kompozitů. Přítomnost dřevní hmoty byla v teplotním rozmezí 230 až 700 °C potvrzena vznikem exotermních efektů.

S ohledem na různé odborné publikace[10-14], v nichž jsou uvedeny poznatky týkající se termického rozkladu dřeva, se jedná o poměrně široké rozmezí teplot. Esteves a Pereira[10] uvádí, že při teplotách nad 250 °C dochází k dekarbonizaci při vzniku CO_2 a dalších produktů pyrolýzy. Pyrolytický rozklad dřeva, konkrétně hemicelulózy, se dle Carriera a kol.[11] odehrává při nižších teplotách, které jsou charakterizovány rozmezím 250 až 300 °C. Následně dochází k rozkladu celulózy při teplotě 300 až

350 °C a v konečné fázi se pak v teplotním intervalu 300 až 500 °C rozkládá lignin. Celulóza je sice polysacharid, ovšem dle Siebela a kol.[13] celulóza ve dřevě reprezentuje krystalické části dřevní hmoty, zatímco struktura hemicelulózy a ligninu je amorfní. Hlavní mechanickou funkcí hemicelulózy a ligninu je zpevnění celulózových fibril, což uvádí Wikberg a kol.[15]. Dle Siebela a kol.[12,13] je celulóza v krystalické formě při teplotách pod 300 °C téměř inertní vůči termickému rozkladu.

Barta-Rajnai a kol.[14] provedli podrobnou analýzu termického rozkladu smrkového dřeva, a to zvláště pro jednotlivé části této dřeviny (kmenové dřevo, kůra atd.), přičemž na základě výsledků DSC[14] analýzy je patrné, že rozklad dominantně obsažených složek (celulózy a hemicelulózy) probíhá v teplotním rozmezí přibližně 250 až 560 °C, kdy od 430 °C výše již probíhají rozkladné děje spíše v minoritním rozsahu. Je tedy evidentní, že zjištěný horní teplotní limit (230 až 700 °C) je s ohledem na chování smrkového dřeva během termického namáhání vyšší. Příčinou tohoto jevu je především skutečnost, že třísky jsou v cementotřískových deskách poměrně dokonale mineralizovány (zejména vodní sklo a cement). Účinnou mineralizací je tak zvýšena maximální teplota potřebná k rozkladu těchto dřevěných třísek. Proto byla DTA doplněna o další analýzy, tj. Q_{PCI}, ZŽ a TOC.

Tabulka 1: Teplotní intervaly rozkladu složek charakteristických pro analyzovaný materiál, tj. prach z opracování cementotřískových desek (věž č. 4)

60–120 °C	230–350 °C	410–440 °C	460–550 °C	550–700 °C	730–850 °C	850–1000 °C
uvolnění vody	exotermický rozklad dřeva	exotermický rozklad dřeva	rozklad $Ca(OH)_2$	druhá fáze rozkladu CSH gelů	dekompozice uhličitanů, zejm.$CaCO_3$	zbytkový rozklad uhličitanů
	rozklad CSH gelů	rozklad CSH gelů	exotermický rozklad dřeva	zbytkový rozklad dřeva		

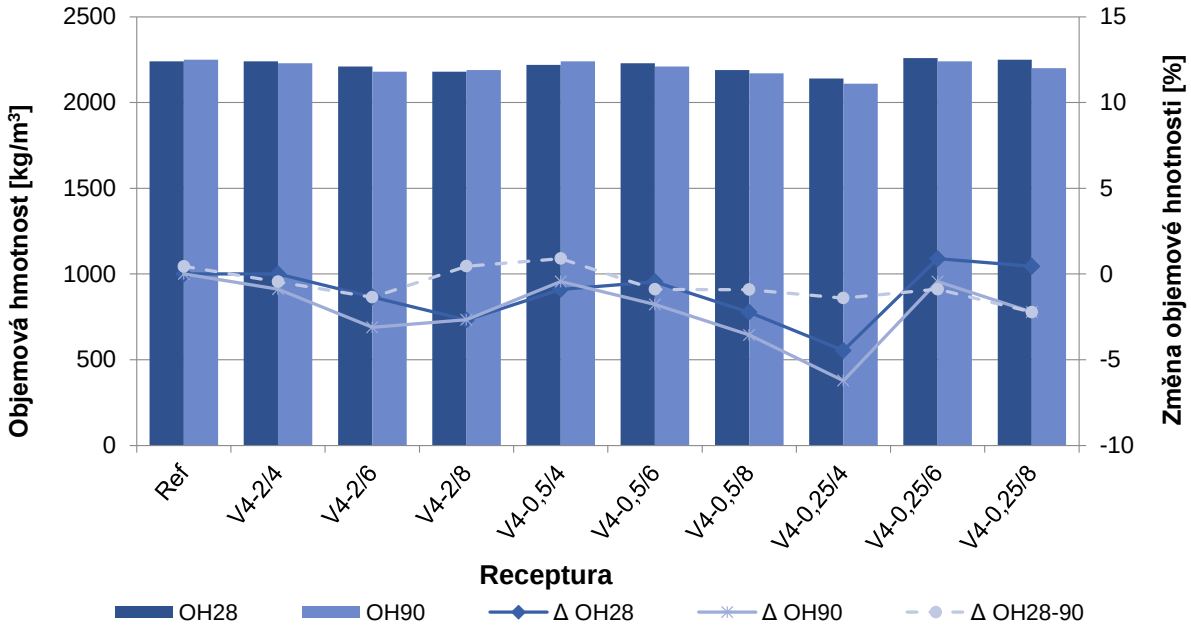
Komparace výsledných hodnot provedených analýz v předcházejícím grafu (obrázek 13) jasně poukazují na velmi dobrou korespondenci použitých analytických technik. Průběhy křivek TOC a Q_{PCI} se s mírným posunem prakticky vzájemně kopírují, tj. obsah dřeva koreluje s hodnotami spalného tepla. Co se týká DTA a ZŽ, tak byla opět prokázána korespondence s výsledky TOC, přičemž se mírně liší trend jednotlivých křivek. Hodnoty hmotnostních úbytků charakteristických pro danou složku v jednotlivých teplotních intervalech také relativně dobře korespondují s průběhy křivky obsahu dřeva, ovšem jsou již patrné odchylky, které jsou zapříčiněny přítomností více fází, resp. složek v daném teplotním intervalu. I přesto hmotnostní úbytky v intervalu 230 až 350 °C (z DTA) poměrně dobře kopírují průběh spalného tepla a hodnot obsahu dřevní hmoty (TOC).

Orientační posouzení prachu s ohledem na poměr cementové matrice a dřevní hmoty je možné s využitím termického rozkladu v elektrické peci (při stanovení ztráty žíháním; vhodnější pro obsáhlejší soubor vzorků s vyloučením zcela nevhodných variant pro daný účel použití), ovšem pro exaktní posouzení složení analyzovaného prachu je vhodné využít přímo stanovení TOC, kdy při analyzování třísek (které jsou přímo používány pro výrobu cementotřískových desek) lze přesně stanovit obsah dřeva v prachu vznikajícím během opracování desek.

V tomto konkrétním případě byl např. pro prach V4 o velikosti zrn 500 až 1000 µm stanoven obsah dřeva 42 % (TOC), čemuž odpovídá spalné teplo cca 9 MJ/kg a hodnoty hmotnostních úbytků cca 55 % (ZŽ a DTA) s hmotnostním úbytkem v intervalu teplot 230 až 350 °C cca 23 %. Zrna o velikosti 125 až 250 µm se vyznačovala obsahem dřeva 15 % (TOC), čemuž odpovídá spalné teplo cca 3 MJ/kg a hodnoty hmotnostních úbytků cca 42, resp. 46 % (ZŽ, resp. DTA) s hmotnostním úbytkem v intervalu teplot 230 až 350 °C cca 17 %.

Výsledky a diskuse – modifikované kompozity

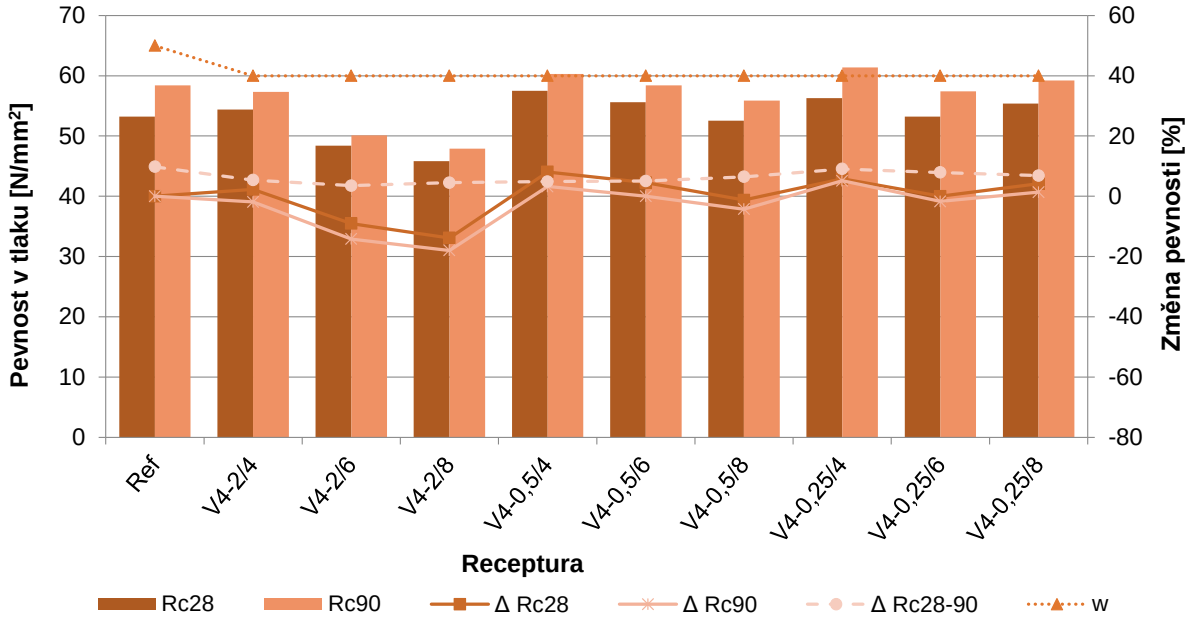
Objemové hmotnosti nebyly substitucí cementu prachem z opracování cementotřískových desek (dále jen prach V4) výrazně ovlivněny (obrázek 14). Toto ovšem také souvisí i nižší dávkou modifikační složky prachu V4. Projevila se mírná závislost objemové hmotnosti na zvyšující se dávce alternativní suroviny, jakož i vliv úpravy složení prachu V4. S rostoucí dávkou prachu V4 se velice mírně snižovala objemová hmotnost, s výjimkou receptury V4-0,25/4, což lze charakterizovat jako zajímavé zjištění. Z hlediska stáří malt nebyl zaznamenán prakticky žádný vliv na vývoj objemové hmotnosti, přičemž změny objemové hmotnosti se pohybovaly v řádu jednotek procent (do 6 %).



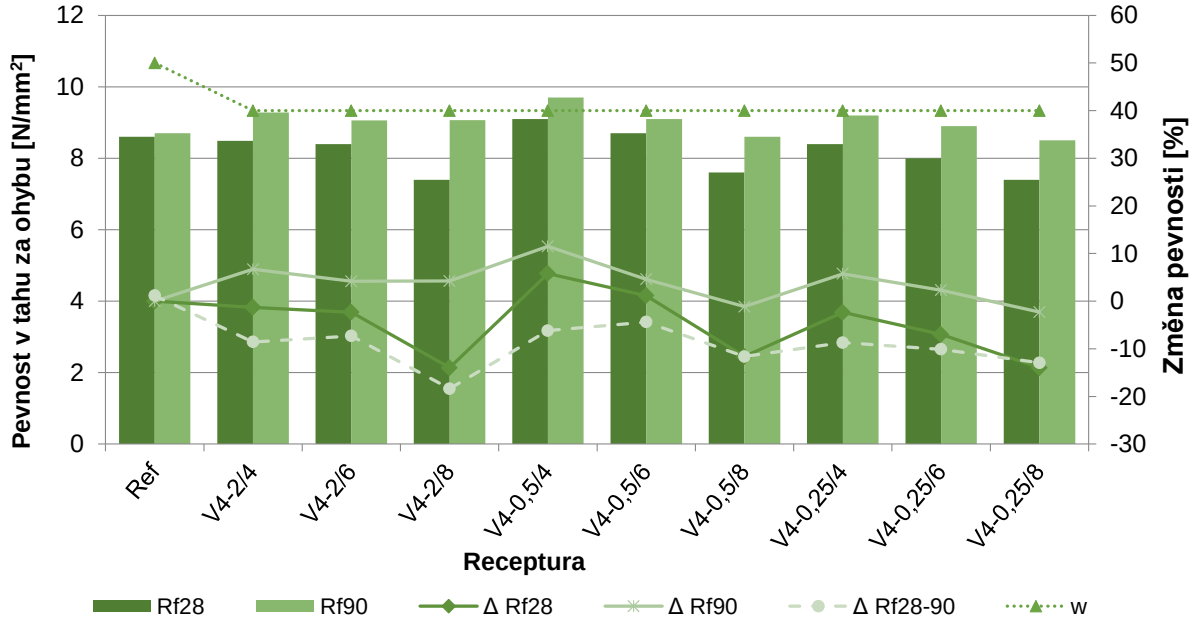
Obrázek 14: Objemová hmotnost (včetně jejích změn) cementových kompozitů modifikovaných prachem z opracování cementotřískových desek

Z hlediska pevností v tlaku se již vliv modifikace složení matrice cementových kompozitů projevil výrazněji (obrázek 15). Je patrné, že se zvyšujícím se stářím dochází k nárůstu pevností v tlaku. Toto zjištění bylo potvrzeno v případě všech testovaných hmot. Výrazněji se projevila úprava modifikační složky, kdy hmota V4-2/8 (tj. dávka V4 v množství 8 %) se vyznačovala poklesem pevnosti v tlaku cca 14 %, resp. 18 % po 28 dnech, resp. 90 dnech.

Přínosným zjištěním jsou průběhy pevností hmot obsahujících prach V4 s maximální velikostí zrna 0,5 a 0,25 mm. V tomto případě poklesy pevností při substituci cementu 8 % prachu V4 (konkrétně V4-0,5/8) dosahují hodnot cca 1 %, resp. 4 % po 28 dnech, resp. 90 dnech. Varianta hmot s prachem obsahujícím zrna maximální velikosti 0,25 mm pak vykazuje obdobné poklesy. Zajímavým zjištěním je, že objemové hmotnosti všech receptur lze charakterizovat jako poměrně vyrovnané (především při porovnání s referenční maltou), kdežto průběhy tlakových pevností jsou zasaženy modifikací složení cementové matrice zkoumaných kompozitních hmot již o poznání výrazněji. Z dosažených hodnot pevnosti v tlaku vyplývá minimální vliv rozdílnosti úpravy zrn prachu V4 pod 0,5 mm, kdy hmoty V4-05 a V4-0,25 vykazují minimální diference a prakticky je v tomto ohledu lze považovat za totožné.



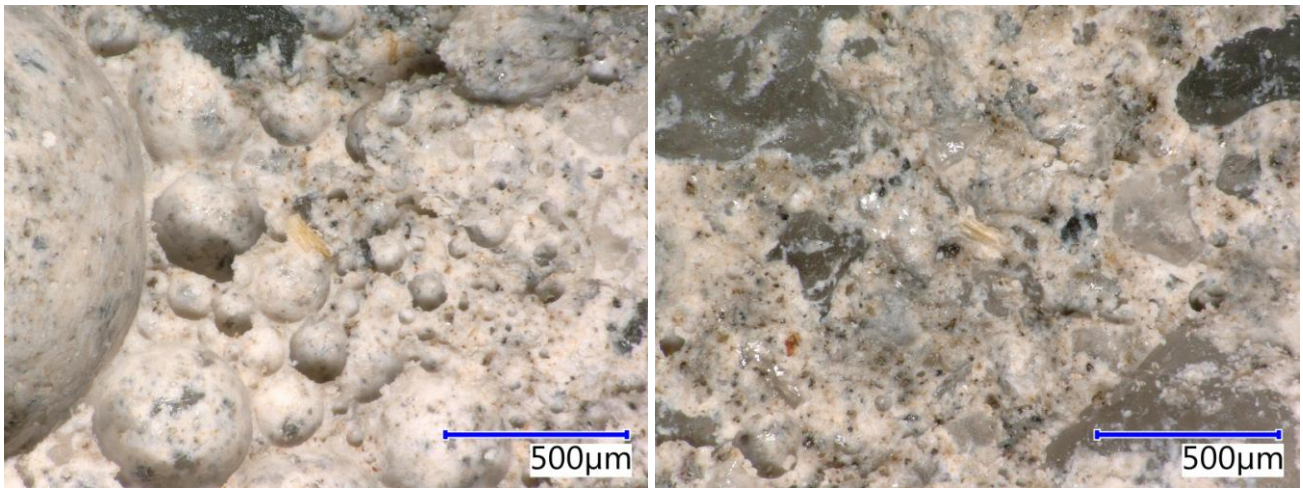
Obrázek 15: Pevnost v tlaku (včetně jejích změn) cementových kompozitů modifikovaných prachem z opracování cementotřískových desek (dále je v grafu znázorněn i vodní součinitel v % - w)



Obrázek 16: Ohybová pevnost (včetně jejích změn) cementových kompozitů modifikovaných prachem z opracování cementotřískových desek (dále je v grafu znázorněn i vodní součinitel v % - w)

Trend ohybových pevností v mnoha ohledech kopíruje pevnost v tlaku (obrázek 16). Došlo zde ovšem k anomálii, a to sice, že hmota modifikovaná prachem V4 s maximálním zrnem 0,5 mm dosahuje vyšších hodnot pevností v tahu za ohybu, než hmota, u níž byla eliminována všechna zrna nad 0,25 mm. Zajímavé je také, že průběh ohybových pevností hmot V4-0,5 a V4-0,25 nekopíruje trend hodnot pevnosti v tlaku. Lze usuzovat na vliv vyššího procenta částic dřeva i jejich větších rozměrů, které mohou působit jako vlákna, jež se při dobrém zakotvení v cementové matrici projeví příznivě na ohybových pevnostech.

Níže na snímcích 17 a 18 je patrná mikrostruktura hmot V4-0,5/08, tj. obsahujících prach V4 s odstraněním zrn větších, než 0,5 mm, přičemž byl prach aplikován v dávce 8 % (substituce cementu).



Obrázek 17 a 18: Detailní zachycení struktury hmot s 8% obsahem prachu V4 (s max. velikostí zrna 0,5 mm) jako substituentu pojiva v cementových kompozitech

Detailním zkoumáním cementových kompozitů s parciální náhradou cementu prachem V4 bylo zjištěno, že se jedná o hmoty s kompaktní strukturou, kde byly částice prachu distribuovány rovnoměrně a v okolí zrn obsahujících dřevní hmotu či samotných dřevěných třísek nedocházelo k žádným defektům apod. Pozornost byla také zaměřena na lomové plochy po provedení testu ohybové pevnosti, kdy bylo evidentní, že docházelo k poruchám dřevěných částic (a ne k jejich oddělování od cementové matrice, tj. poruchám soudržnosti s touto matricí). Z toho je patrné, že prach V4 působí s primárními složkami cementových kompozitů synergicky a jeví se jako vhodná modifikační složka.

Závěr

Dosažené výsledky a zjištění prokázaly, že prach V4, který vzniká jako vedlejší produkt (prozatím bez dalšího využití) výroby cementotřískových desek, se jeví jako vhodný pro využití jako alternativní složka v cementových kompozitech. Přínosem je zjištění, že pro aplikaci prachu V4 lze doporučit pouze jednoduchý krok mechanické předpravy, a to vytřídění zrn nad 0,5 mm. Je tedy patrné, že není třeba zařazení komplikovaných a případně např. energeticky náročných kroků předúpravy (drcení, mletí či jiná úprava složení), které jsou rovněž náročné z ekonomického hlediska.

Pro navazující výzkum lze jednoznačně doporučit ověření dalších podstatných charakteristik cementových kompozitů modifikovaných prachem V4, jako zejména trvanlivost (mrazuvzdornost, odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám, CO_2 atd.). Z hlediska obsahu dřevní hmoty je rovněž podstatné se zabývat posouzením objemových změn při proměnlivé vlhkosti okolního prostředí.

Značně přínosné a podstatné jsou i výsledky a zjištění týkající se analýzy prachu V4, který obsahuje mineralizovanou dřevní hmotu, kdy bylo prokázáno, že takto upravené dřevo (mimo jiné při pyrolytickém rozkladu) se chová rozdílně v porovnání s nijak neošetřenou (chemicky, termicky atp.) dřevinou. Analýza a vyhodnocení vlastností konkrétní suroviny (v tomto případě prach vznikající z opracování cementotřískových desek) totiž při jejím dalším využití (např. jako jedna z alternativních složek nového materiálu) hraje poměrně klíčovou roli. Na základě zjištěných vlastností lze totiž již parciálně usuzovat na chování finálního kompozitu.

Pro praxi mají zjištěné poznatky jednoznačný přínos – vysoký potenciál využití prachu V4 při výrobě cementových kompozitů modifikovaného složení.

Poděkování

Tento výsledek byl realizován za finanční podpory projektu GA ČR číslo 19-00291S s názvem „Analýza procesů při utváření struktury silikátových kompozitů s organickými plnivy a jejich chování za specifických podmínek namáhání“.

Literatura

1. Ezerskiy V., Kuznetsova N. V., Seleznev A. D., Evaluation of the use of the CBPB production waste products for cement composites, Construction and Building Materials, Volume 190 (2018) 1117 – 1123.
2. Wang L., Chen S. S., Tsang D. C. W., Poon Ch. S., Shih K. Value-added recycling of construction waste wood into noise and thermal insulating cement-bonded particleboards, Construction and Building Materials, Volume 125 (2016) 316 – 325.
3. Ashori A., Tabarsa T., Sepahvand S.: Cement-bonded composite boards made from poplar strands, Construction and Building Materials, Volume 26, Issue 1 (2012) 131 – 134.
4. Cabral M. R., Nakanishi E. Y., Mármol G., Palacios J., Godbout S., Lagacé R., Savastano H., Fiorelli J.: Potential of Jerusalem Artichoke (Helianthus tuberosus L.) stalks to produce cement-bonded particleboards, Industrial Crops and Products, Volume 122 (2018) 214 – 222.
5. Cavdar A. D., Yel H., Boran S., Pesman E. Cement type composite panels manufactured using paper mill sludge as filler, Construction and Building Materials, Volume 142 (2017) 410 – 416.
6. He P., Hossain M. U., Poon Ch. S., Tsang D. C. W. Mechanical, durability and environmental aspects of magnesium oxychloride cement boards incorporating waste wood, Journal of Cleaner Production, Volume 207 (2019) 391 – 399.
7. Caprai V., Gauvin F., Schollbach K., Brouwers H.J.H. Influence of the spruce strands hygroscopic behaviour on the performances of wood-cement composites, Construction and Building Materials, Volume 166 (2018) 522 – 530.
8. Menezzi, C., Castro, V., Souza, M. Production and properties of a medium density wood-cement boards produced with oriented strands and silica fume. Ciencia y tecnología, Volume 9, Issue 2, Maderas (2007) 105 – 115.
9. Wang B. Z., Wang H., Nanjing X. L. Wood-cement compatibility revie. China. Forestry University College of Materials Science and Engineering (2014).
10. Esteves, B.M., Pereira, H.M. Wood modification by heat treatment: a review, BioResources, 4 (1) (2009) 370 – 404.
11. Carrier M., Loppinet-Serani A., Denux D., Lasnier J-M., Ham-Pichavant F., Cansell F., Aymonier C. Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass, Biomass and Bioenergy, Volume 35, Issue 1 (2011) 298 – 307.
12. Yildiz S., Gezer E. D., Yildiz U. C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat, Building and Environment, Volume 41, Issue 12 (2006) 1762 – 1766.
13. Yildiz S., Gümüşkaya E. The effects of thermal modification on crystalline structure of cellulose in soft and hardwood, Building and Environment, Volume 42, Issue 1 (2007) 62 – 67.
14. Barta-Rajnai E., Wang L., Sebestyén Z., Barta Zs., Khalil R., Skreiberg Ø., Grønli M., Jakab E., Czégény Z. Effect of Temperature and Duration of Torrefaction on the Thermal Behavior of Stem Wood, Bark, and Stump of Spruce, Energy Procedia, Volume 105 (2017) 551 – 556.
15. Wikberg H., Maunu S. L. Characterisation of thermally modified hard- and softwoods by 13C CPMAS NMR, Carbohydrate Polymers, Volume 58, Issue 4 (2004) 461 – 466.

Influence of Dust Waste Containing a Silicate Matrix and Organic Filler on Properties of Cement Composites

Tomas MELICHAR, Jiri BYDZOVSKY

Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Veveri 331/95, 602 00 Brno, Czech Republic, e-mail: melichar.t@fce.vutbr.cz, bydzovsky.j@fce.vutbr.cz

Summary

The paper presents research into the evaluation of properties of cement composites modified by the dust waste from machining cement-bonded particleboards. The possibility of a partial replacement of cement by the mentioned dust (up to 8%) was considered. Dust parameters were modified. The properties of cement composites were analyzed after 28 and 90 days of ageing under laboratory conditions. Cement composites based on cement matrix and inorganic aggregates did not contain any other additives or admixtures. The research has brought about beneficial outcomes. Parameters well compared to the reference material can be reached by a very simple modification of dust properties in case of materials modified by such dust (as a cement substituent).

Keywords*: Dust from processing cement-bonded particleboards, by-product, waste, modification of composition, alternative raw material, cement composite, parameters.*

Stavební systém s vysokým obsahem recyklovaných surovin na bázi mikromletého betonu

Zdeněk PROŠEK[a], Jan TREJBAL[a], Pavel TESÁREK[a], George KARRA´A[b]

[a] České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, Česká republika, e-mail: zdenek.prosek@fsv.cvut.cz
[b] Lavaris, s.r.o., Areál Šroubáren 43, 252 66 Libčice nad Vltavou, Česká republika

Souhrn

Předložený článek popisuje využití betonového odpadu frakce 0/4 mm. Efektivní aplikace takto jemné zrnitosti prozatím v technické praxi nebyly nalezeny. Pomocí vysokorychlostního mletí je možné tento materiál nejen homogenizovat, ale i mechanicky aktivovat a následně využít například při výrobě komplexních zdicích systémů. Článek rozšiřuje výsledky publikované v časopise WASTE FORUM 2/2018. V první části je charakterizován mletý recyklát, který byl získán z nosných sloupů demolované železobetonové konstrukce. Druhá část se soustředí na návrh složení směsí materiálů pro stavební systém s vysokým obsahem recyklovaných surovin. Součástí tohoto systému jsou lehčené zdicí bloky, stavební lepidla a omítky. Měrný povrch recyklátu byl zjišťován pomocí laserové granulometrie. Další část popisuje výrobu zkušebních těles a jejich následné mechanické testování. Jednalo se především o stanovení modulu pružnosti pomocí nedestruktivní impulzní metody. Pevnost v tlaku a v tahu za ohybu byla charakterizována naopak využitím makroskopických destruktivních metod. Mikrostruktura materiálu byla sledována pomocí elektronového řádkovacího mikroskopu. Sérii experimentů uzavřelo měření tepelně technických parametrů pomocí tepelných toků.

Klíčová slova: *Cirkulární ekonomika, stavební a demoliční odpad, odpadní beton, recyklace, mikromletý beton, zdicí systém, silikátový kompozit.*

Úvod

Odpadní beton tvoří majoritní podíl stavebních a demoličních odpadů. Aby se zabránilo jeho ukládání na skládky či neefektivnímu využití (násypy, zásypy apod.), hledají se další možnosti účinné aplikace. Veškeré takové snahy se opírají především o fakt, že tento odpadní materiál obsahuje nejen minerální plnivo, hydratované, a tedy inertní pojivo, ale především také nezanedbatelnou část doposud nehydratovaného pojiva, tzv. zbytkových slínků. K jejich využití jsou ovšem nezbytné sofistikované technologie, které dokáží tyto slínky obnažit a umožnit jejich opakovanou aplikaci při výrobě alternativních cementových pojiv. Patří mezi ně například mechanická aktivace pomocí velmi jemného vysokorychlostního mletí. Jejím výstupem je mikromletý recyklovaný beton. Jedná se o surovinu, jejíž jednotlivé částice jsou co do velikosti srovnatelné či dokonce menší než částice standardního cementu. Uvedeným způsobem upravený recyklovaný beton je tak schopen nahradit nejen písek, ale i pojivo v cementových kompozitních materiálech. Je zřejmé, že takové řešení má jisté limity. Mimo jiné se ukázalo, že při náhradě zhruba 30 hm. % cementu dochází k očekávánému výraznému poklesu pevnosti v tlaku, ovšem pevnost v tahu za ohybu naopak roste [1, 2].

Dalším řešením může být chemická aktivace betonového recyklátu i cementu pomocí různých aditiv, např. strusky. V případě běžných betonů je toto řešení poměrně známé a rozšířené [3, 4]. Jeho obdoba se hledá i u speciálních a vysokohodnotných betonů [5, 6]. Shodné principy lze samozřejmě aplikovat i na materiály s recyklovaným betonem, např. při výrobě lehčených bloků, kde je nutné získat kvalitní cementovou matrici, která je následně různými způsoby vylehčena, podrobněji viz např. v [7–10].

Vstupní materiály a charakterizace jejich vlastností

Jak již bylo zmíněno výše, tento článek se věnuje charakterizaci a popisu využití betonového jemně mletého recyklátu. Shodný experimentální přístup byl již dříve aplikován na podobných odpadních materiálech, například na mikromletém mramoru nebo na jiných betonových vzorcích [1]. V tomto případě byl použit recyklát získaný z monolitického betonového sloupu z areálu pražské továrny Walter Motors (1911). Z experimentálních důvodů byly vyrobeny dva typy recyklátu, které se vzájemně lišily způsobem technologie jejich přípravy. V prvním případě byla z frakce 0/4 mm odseparována frakce 0/1 mm a tato následně upravena pomocí vysokorychlostního mletí. Vznikl tak vzorek, který dále nese označení Sloup A. Ve druhém případě byla během mletí použita původní frakce 0/4 mm bez dalšího třídění, dále nazývána Sloup B. Oba vzorky byly zpracovány pomocí vysokorychlostního mlýnu S1000 firmy Lavaris, s. r. o. (Libčice nad Vltavou, Česká republika) o výkonu 2×30 kW. Pro účely mletí vzorku Sloup A byl použit rotor s patentovanými piny o průměru 400 mm, zatímco v případě vzorku Sloup B byl průměr 150 mm. Rychlost mletí byla 300 m/s.

Oba typy jemně mletého recyklátu byly podrobeny charakterizaci velikosti zrn pomocí laserového granulometru Analyssete 22 (suchou metodou). Měrný povrch obou materiálů byl změřen vzdušnou permeabilní metodou (Blaineova metoda) na přístroji Matest E009V. U zkoumaných materiálů byl dále sledován vývoj hydratačního tepla po jejich smísení s vodou. Pro tyto účely byl využit isotermální kalorimetr TAMAir. Aby byla jednotlivá měření vzájemně porovnatelná, vývoj hydratačního tepla byl normován na 1 g cementu.

Pro testování mechanických vlastností byla vyrobena zkušební tělesa o rozměrech 40×40×160 mm. Sestávala z cementu (CEM I 42,5 R, Radotín) a zkoumaného mletého recyklátu. Zatímco referenční sada byla vyrobena pouze z cementu, modifikovaná směs (Sloup A, Sloup B) kombinovala cement s recyklátem v hmotnostním poměru 1:1. Vodní součinitel byl 0,35, resp. 0,42. Navržen byl tak, aby oba typy směsí dosáhly stejné hodnoty rozlivu 180±5 mm. Zkouška rozlití byla realizována na střásacím stolku. Do formy o tvaru segmentu kuželu (horní průměr 70 mm, spodní průměr 100 mm, výška 60 mm) byly ve dvou vrstvách vkládány zkoumané směsi, přičemž každá z nich byla zhutněna 10 údery dusadlem. Po sejmutí formy a 15s přestávce bylo vzniklé těleso v 15 cyklech setřásáno. Následoval dvojí na sebe kolmý odečet průměru spodní podstavy, který po spočtení aritmetického průměru udává tzv. hodnotu rozlivu. Zkoušky mechanických vlastností prismatických těles se týkaly analýzy pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu (3-bodový). Obě probíhaly na lisu FHF Strassentest.

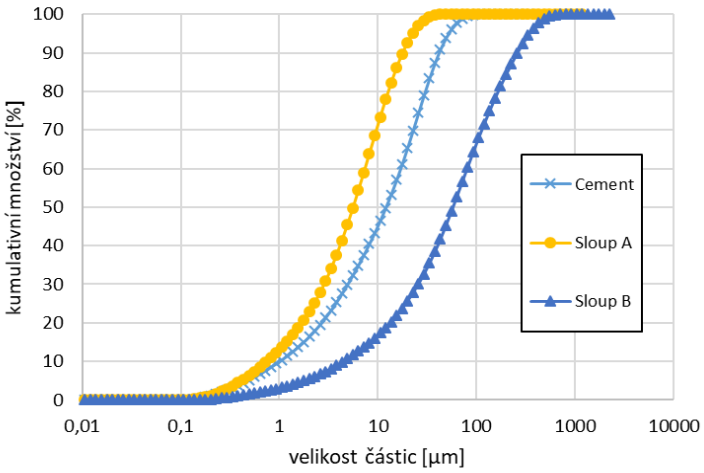
Pro komplexní přehled o vlastnostech zkoumaných materiálů byla provedena analýza jejich mikrostruktury. Ze všech třech zkoumaných zástupců byly vyrobeny nábrusy a tyto následně podrobeny rozboru struktury pomocí elektronového mikroskopu ZEISS Merlin vybaveného EDS a WDS detektorem. Nejprve byla provedena mikrostrukturální analýza na vstupních surovinách, tedy na vzorcích Sloup A a Sloup B. Následovala obrazová analýza SEM snímků, která umožňuje odlišit a kvantifikovat jednotlivé fáze z odstínů šedi.

Na obrázku 1 jsou porovnány kumulativní křivky zrnitosti. Patrný je výrazný rozdíl mezi oběma vzorky betonového recyklátu. Vzorek Sloup A je jemnější než Sloup B a překonává dokonce i referenční cement. Lze tedy předpokládat, že jeho reaktivita bude vyšší oproti vzorku Sloup B. Shodný trend odhalilo i měření měrného povrchu; Sloup A vykázal největší hodnotu 860 m^2/kg. Následoval cement s 380 m^2/kg. Nejmenší specifický povrch 177 m^2/kg byl zjištěn u vzorku Sloup B.

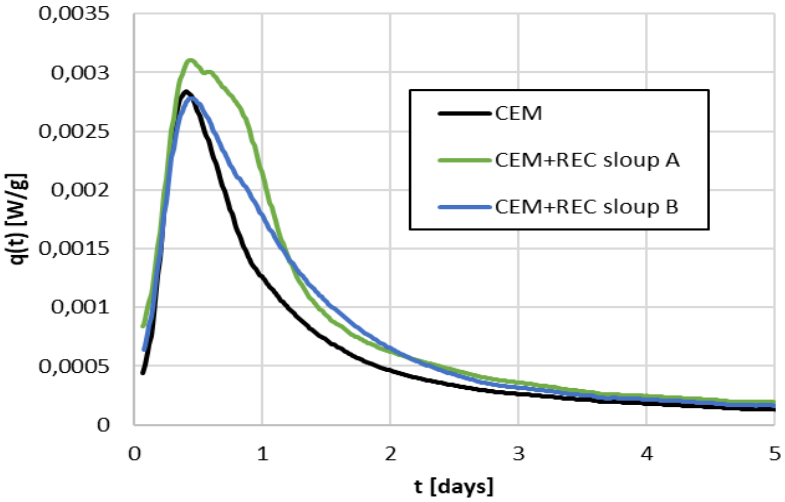
Vývoj hydratačního tepla ukazuje obrázek 2. Dle očekávání největší množství tepelné energie uvolňovala směs Sloup A. Opět tedy byl potvrzen její vysoký reaktivní potenciál, jak již naznačily experimenty popisované výše. Lze tedy předpokládat, že tato směs dosáhne vyšších hodnot pevnostních charakteristik (především pevnosti v tlaku) než Sloup B.

Obrázek 3 shrnuje zjištěné mechanické vlastnosti zkušebních těles. Může se zdát překvapivé, že vzorky Sloup B v pevnosti v tahu za ohybu více než dvojnásobně překonaly referenční cementová tělesa. Hodnota pro Sloup A zůstala přibližně uprostřed mezi nimi. Vysvětlení tohoto jevu je nutné hledat v procesech tuhnutí a tvrdnutí zkušebních těles. Aplikace recyklátu s hrubším mletím omezuje účinek tepelných kontrakcí a tedy vznik smršťovacích trhlin v cementové matrici. Dochází tak k redukci defektů kontinuity, které logicky nejsou schopné transferovat tahová napětí. V tomto ohledu může dále přispívat

relativně nižší materiálová tuhost recyklátu. V případě tlakových pevností panují rozdílné trendy. Poškození matric zde nehraje takovou roli, takže problémy se smršťovacími trhlinami ustupují do pozadí. Nejvyšších hodnot pevnosti dosáhl logicky referenční cement. Oproti ohybovým zkouškám zde ovšem lepší mechanické vlastnosti vykázaly vzorky Sloup A než Sloup B (rozdíl cca 12 MPa). Směs Sloup A obsahuje nejmenší zrna, která vyplňují přirozenou porézní strukturu cementové matrice. Z tohoto důvodu lze hovořit o betonových jemně mletých recyklátech jako o velmi účinném mikroplnivu, které se nakonec podepsalo na dosažení relativně vysoké pevnosti v tlaku.

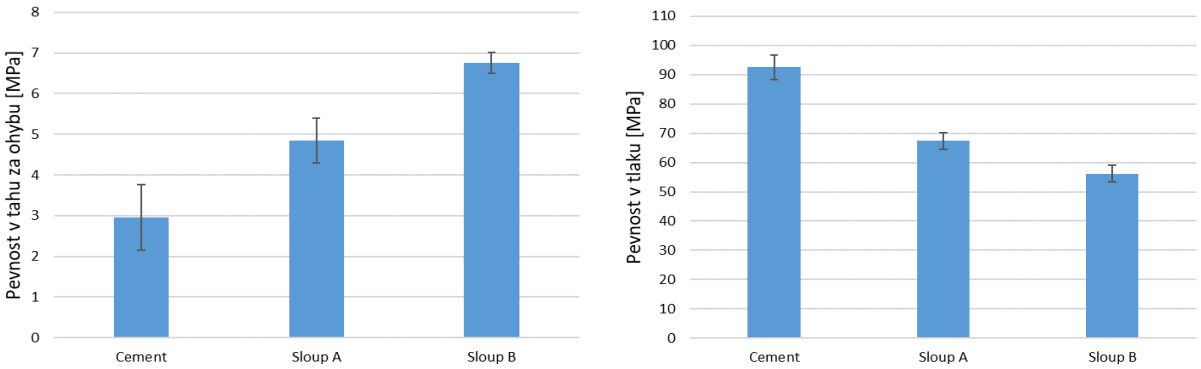


Obrázek 1: Kumulativní křivka zrnitosti

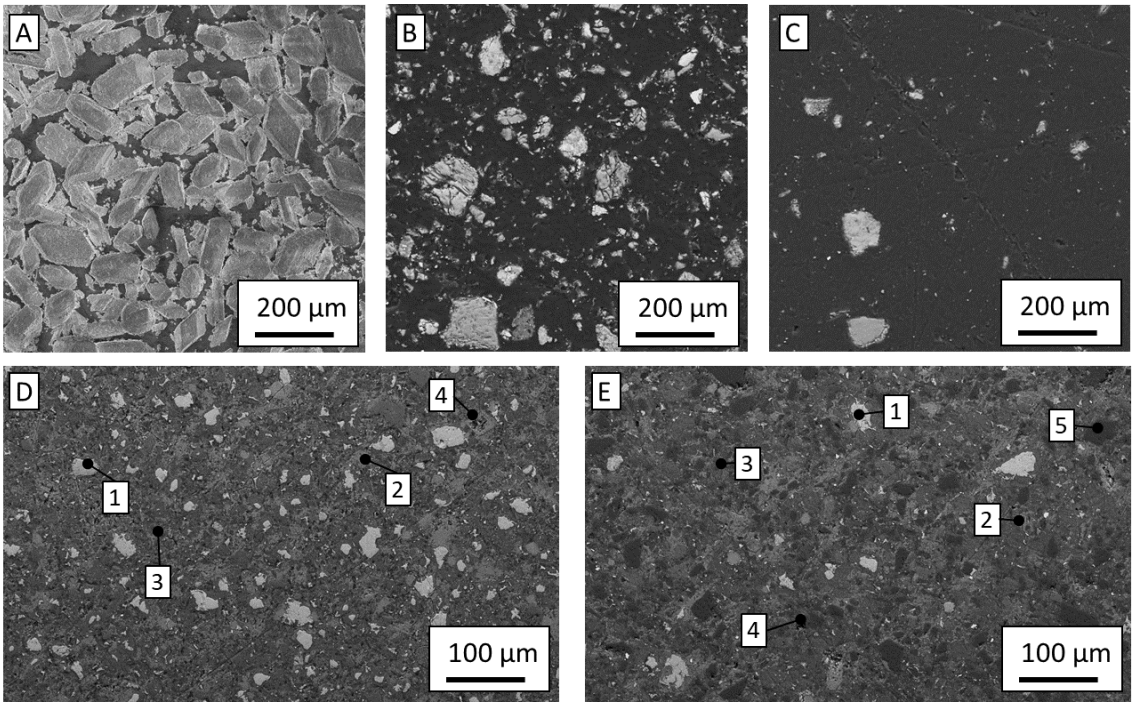


Obrázek 2: Vývin hydratačního tepla po dobu prvních 7 dní

Z výsledků mikrostrukturní analýzy (obrázek 4 B a C) lze zpozorovat velký rozdíl ve velikosti zrn, který již dříve odhalila granulometrie. Zrna vzorku Sloup A jsou přibližně 10× menší než u varianty Sloup B. Tvar zrn obou zmíněných recyklovaných materiálů je obdobný, stejně tak jako jejich kulovitý tvar s nerovnými okraj. Nejdůležitější hledanou fází byly nezhydratované slínky. Jak se ukázalo, Sloup A jich obsahoval 8,5±0,5 %, zatímco Sloup B 3,2±0,5 %. Dalším sledovaným faktorem bylo zapojení recyklátu v mikrostruktuře (obrázek 4 D a F). Z výsledků je patrné jeho pozitivní začlenění, kde jednotlivá zrna nikterak nebrání hydrataci slínků a nedochází k vytváření ITZ (Interfacial Transition Zone – mezifázová přechodová oblast).



Obrázek 3: Porovnání pevností v tahu za ohybu a v tlaku pro testované materiály



Obrázek 4: Snímky z elektronového mikroskopu. Detektor sekundárních elektronů, zvětšení 250×: a) referenční cement, b) mikromletý recyklovaný Sloup A, c) mikromletý recyklovaný Sloup B; Detektor zpětně odražených elektronů, zvětšení 500 ×: d) referenční cementová pasta, e) cementová pasta s 50 hm. % recyklovaného betonu. Popis fází: 1 – nezhydratovaný slínek, 2 – portlandit, 3 – C-S-H gel, 4 – trhliny a póry, 5 – zrno křemene.

Návrh stavebního systému s vysokým podílem recyklovaných surovin

Provedené analýzy umožnily stanovit potenciál vstupních materiálů pro vývoj a výrobu komplexního stavebního systému sestávajícího z lehčených zdicích bloků, tenkovrstvého lepidla, jádrové omítky a štuku. Mimo jiné bylo zjištěno, že pro zdicí bloky je vhodný betonový recyklát Sloup A, protože vykazuje relativně dobré pevnosti v tlaku. Oproti tomu Sloup B je svými vlastnostmi (pevnost v tahu za ohybu, nižší míra smršťování) předurčen pro aplikace do tenkovrstvého lepidla a omítkového systému. Kombinace obou dvou druhů recyklátu musela být optimalizována empiricky, protože popsat jejich fyzikálně-chemické vlastnosti teoreticky a výsledné charakteristiky materiálů modelovat není prakticky možné.

Vývoj zdicího systému si od prvopočátku kladl následující cíle: omezit množství použitého cementu, omezit nebo eliminovat použití písku, vyhnout se použití stavební chemie nebo výrazným způsobem omezit její aplikaci a používat co nejjednodušší technologie pro výrobu. Uvažováno též bylo s širokou mírou variability výsledných řešení. Materiálová skladba stavebního systému musí být modulární, tzn., množství a vlastnosti jednotlivých vstupních materiálů musí vést k dopředu známým vlastnostem výsledného výrobku. Využito je synergie a vzájemné kompatibility jednotlivých stavebních prvků, opírající se o využití stejného druhu jednotlivých materiálů.

Pro prezentaci v tomto článku byly vybrány takové směsi, které obsahovaly co největší přípustnou náhradu za cement, ovšem s ohledem na zachování požadovaných fyzikálních a technologických vlastností. Za všechny jmenujme např. pevnostní charakteristiky, interakce jednotlivých komponent stavebního systému, odolnost vůči povětrnosti, aj.

Lehčený zdicí prvek byl navržen na bázi cementové matrice s použitím mikromletého plniva a minerálních vedlejších produktů. Struktura byla vyztužena polymerovými vlákny (průměr 12 μm, délka 4 mm). Materiál byl vylehčen pomocí pěnotvorné přísady. Jedná se o výrobek, který splňuje optimální kombinaci mechanických, tepelně-technických a vlhkostních parametrů. Může být tedy použit např. při výstavbě obvodových nosných stěn pozemních staveb. Výhodou navrženého procesu výroby je variabilita, která se opírá o litou směs, z níž lze vyrábět zdící tvarovku o různých rozměrech a tvarech. Finální směs je vytvořena ze třech základních vstupních materiálů, přičemž dva z nich jsou odpadní. Jedná se o (i) odpadní mikromletou mramorovou moučku zlepšující konzistenci směsi, (ii) odpadní mikromletý konstrukční beton zastávající roli plniva a mechanicky aktivovaného pojiva a (iii) cement sloužící jako primární pojivo. Dále jsou použita aditiva, která zlepšují mechanické nebo tepelně technické vlastnosti. Jde o plastifikační a napěňovací přísady. Při výrobě jsou nejdříve smíchána vlákna s cementem, následně se přidá voda a plastifikační přísada. V dalším kroku je přidána napěňovací přísada. Nakonec byl do směsi postupně přidáván recyklát, směs byla řádně zamíchána a zalita do forem. Hmotnostní poměry jednotlivých materiálů jsou shrnuty v tabulce 1.

Tenkovrstvé lepidlo použité pro lepení lehčených zdicích bloků kombinuje obdobné materiály jako lehčený zdicí prvek, postrádá však vláknitou výztuž. Hmotnostní poměry opět sumarizuje tabulka 1. Při výrobě byla suchá směs nejprve řádně homogenizována a následně k ní byla přidávána záměsová voda. Nanášení navržené tenkovrstvé malty při zdění přesných tvárnic bylo prováděno standardně zednickou lžící a ocelovým nebo plastovým zubatým hladítkem.

Vícevrstvý omítkový systém – z důvodu využití co největšího množství recyklovaného materiálu byla omítka navržena jako vícevrstvý systém, který obsahoval jádrovou omítku a finální povrch ve formě štuku. Systém je vhodný jak pro exteriérové, tak i interiérové prostředí. Je kompatibilní s lehčenými zdicími prvky a dosahuje minimálního smrštění. Oproti výše uvedeným dvěma komponentům obsahuje, především z důvodu požadované vysoké přilnavosti k podkladu, relativně malé množství odpadního materiálu. Nanášení navržené malty při omítání probíhá ručním nahazováním a následně stržením latí. Po zavadnutí je malta zahlazena dřevěným nebo plastovým hladítkem. Omítka slouží jako podklad pod finální štukové omítky. Nanášení štuku je pomocí hladítka v menších vrstvách. Omítka slouží jako finální povrch, případně ji lze opatřit nátěry. Složení omítkového systému je uvedeno v tabulce 1.

Všechny komponenty stavebního systému byly podrobeny analýze základních užitných vlastností. Mezi ně patřily mechanické (pevnost v tlaku a v tahu za ohybu, moduly pružnosti) a tepelně technické vlastnosti (součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita). Aby mohly být tyto experimenty realizovány, z představovaných materiálů musela být vyrobena zkušební tělesa. V případě zdicích bloků se jednalo o funkční celky, tedy kusová staviva, jejichž rozměry se mohou lišit v závislosti na konkrétním využití (šířka zdiva, skladebné rozměry, …), zatímco tenkovrstvé lepidlo, stejně tak jako omítkový systém, bylo reprezentováno normovými zkušebními tělesy o rozměrech 40×40×160 mm.

Destruktivní testování pevnostních charakteristik probíhalo na lisu FHF Strassentest. Pro stanovení modulu pružnosti a smykového modulu pružnosti byla využita nedestruktivní rezonanční metoda. Založena je na sledování kmitání zkušebních těles, které je buzeno rázovými impulzy. Použité zařízení sestává z měřicí stanice (Brüel & Kjær, typ 3560-B-120) a rázového kladívka (Brüel & Kjær, typ 8206). Jakmile je rázům exponované těleso uvedeno do rezonance, lze odvodit jeho vlastní frekvenci a z ní následně modul pružnosti, resp. smykový modul pružnosti.

Tabulka 1: Složení prvků stavebního systému

Složení směsi / užitné vlastnosti		Prvek stavebního systému			
		Lehčený zdicí blok	**Tenkovrstvé lepidlo**	**Jádrová omítka**	**Štuk**
Složení [hm. %]	Pojivo – Cement CEM I 42,5R	36,3	20	10	10
	Přírodní plnivo	-	-	40	-
	Další přísady a vlákna	3,7	-	-	-
	Mikromletý odpadní mramor	10	10	5	90
	Mikromletý beton Sloup A	40	20	15	-
	Mikromletý beton Sloup B	10	50	30	-
	Vodní součinitel w/c	0,6 – 0,8	1,4 – 1,6	1,1 – 1,3	2,5 – 2,7
	Množství odpadní suroviny	**60**	**80**	**50**	**90**

Tepelně technické vlastnosti byly analyzovány pomocí přístroje Isomet model 2104 (Applied Precision) a dvou kontaktních sond o celkovém měřitelném rozsahu součinitele tepelné vodivosti 0,04 až 2,0 W/m·K. Dynamické přímé měření je založeno na principu teplotní odezvy sledovaného materiálu exponovaného impulzům teplotních toků. Sondy byly umístěny ve dvou různých pozicích na každém prvku stavebního systému. Výsledky udávané v tabulce 2 jsou získány aritmetickým průměrem získaných hodnot.

Tabulka 2: Užitné vlastnosti prvků stavebního systému

Složení směsi / užitné vlastnosti		Prvek stavebního systému			
		Lehčený zdicí blok	**Tenkovrstvé lepidlo**	**Jádrová omítka**	**Štuk**
Užitné vlastnosti	Objemová hmotnost [kg/m^3]	600 – 700	1550 – 1650	1620 – 1820	1520 – 1620
	Pevnost v tlaku [MPa]	min. 4,0	min. 6,0	min. 7,5	min. 4,1
	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	min. 2,0	min. 1,5	min. 1,9	min. 1,0
	Dynamický modul pružnosti [GPa]	min. 3,2	min. 7,5	min. 8,3	min. 3,5
	Dynamický smykový modul [GPa]	min. 1,1	min. 3,0	min. 3,2	min. 1,0
	Součinitel tepelné vodivosti [W/m·K]	0,20-0,26	0,62-0,72	0,75-0,85	0,65-0,85
	Měrná tepelná kapacita [J/kg·K]	1500 – 1800	750 – 850	750 – 900	800 – 900

Zjištěné mechanické a tepelně-technické vlastnosti jednotlivých prvků zdicího systému shrnuje tabulka 2. Jak již bylo zmíněno dříve, celý systém byl navržen jako modulární, tzn., že výsledné vlastnosti jednotlivých prvků systému jsou řízeny v závislosti na množství a vlastnostech použitých vstupních materiálů. Díky tomu je možné nejprve definovat požadavky na konkrétní systémový prvek, samozřejmě v mezích jeho fyzikálních možností, a následně vhodnou skladbou vstupních materiálů vytyčených parametrů dosáhnout.

Připomeňme, že pro účely prezentace tohoto systému byly využity směsi obsahující co největší přípustné zastoupení recyklovaných materiálů (50 až 90 hm. %), tedy co nejnižší množství cementu, ovšem při dosažení přijatelných mechanických parametrů výsledného produktu. Hodnoty mechanických vlastností obsažené v tabulce 2 jsou vždy minimální zaručené pro recepturu danou v tabulce 1. V případě volby jiných poměrů vstupních surovin, především zvýšením dávkování dalších přísad (stavební chemie, vláknitá výztuž), ale při zachování podílu recyklovaných surovin, lze tyto hodnoty zvýšit. Objemová hmotnost a tepelně-technické parametry jsou udány dosažitelným rozsahem. Lze říci, že představený stavební systém dosahuje parametrů na trhu již zavedených materiálů. Nabízí se srovnání např. s pórobetonovými systémy.

Závěr

Představený stavební systém může konkurovat na trhu zavedeným materiálům, především pórobetonovým systémům. Dosahuje srovnatelných fyzikálních a funkčních parametrů. Jeho největší výhodou je vysoký obsah recyklovaného materiálu, který může mít původ jak ve stavebním a demoličním odpadu, tak i v podobě vadných nebo odpadních kusů či odprašků stavebních materiálů vzniklých při jejich výrobě či úpravě.

Vysokorychlostní mikromletí v obou případech dokáže odpad proměnit v surovinu jasně definovaných vlastností, kterou lze opětovně využít při výrobě nových tvarovek či jiných materiálů. Další výhodou je modularita systému. Jedná se o možnost kombinovat množství jednotlivých vstupních materiálů tak, aby byly dosaženy požadované vlastnosti výsledného produktu. Další nespornou devízou představovaného systému je jeho opětovná 100% recyklovatelnost. V nekonečných cyklech lze pomocí procesu vysokorychlostního mletí znovu upravit a vytvořit opětovně mikromletý recyklát. Výsledný produkt tedy nevytváří odpadní materiál ani v průběhu výroby, ani na konci cyklu jeho životnosti.

V rámci výzkumu proběhly prvotní experimenty na aplikaci znovu recyklované mikromleté betonové moučky. Předběžné výsledky 100% recyklovatelnost potvrzují, zároveň ale logicky odhalují postupnou degradaci užitných vlastností výsledného produktu s každým přibývajícím cyklem znovuvyužití. Jedná se zhruba o 10% pokles, který lze ovšem eliminovat přídavkem panenských surovin.

Poděkování

Výstupu bylo dosaženo s finanční podporou projektu MPO TRIO č. FV20503 „Lehčené zdící materiály na bázi mikromletých minerálních vedlejších produktů s řízenými užitnými vlastnostmi“ a za podpory Fakulty stavební ČVUT v Praze (SGS projekt SGS19/148/OHK1/3T/11).

Literatura

1. Z. Prošek a kol.: Srovnání vlivu mikromletého betonu a mramorové moučky na mechanické vlastnosti cementových past. WASTE FORUM 2 (2018), 262 – 267.
2. J. Topič a kol., Influence of increasing amount of recycled concrete powder on mechanical properties of cement paste, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 236 (2017), 1 – 7.
3. J. Trejbal a kol., Chemická aktivace mikromletého betonu, TZB-info (2019).
4. Z. Prošek et al., Role of lime, fly ash, and slag in cement pastes containing recycled concrete fines, Construction and Building Material 201 (2019), 702 – 714.
5. V. Nežerka et al., Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete, Cement and Concrete Composites 103 (2019), 252 – 262.
6. A. Gholampour, T. Ozbakkaloglu, Performance of sustainable concretes containing very high volume Class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag, Journal of Cleaner Production 162 (2017), 1407 – 1417.
7. J. Gao et al., Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete, Cement and Concrete Composites 19 (1997), 307 – 313.
8. B. Balaji, N. Sathyakumar, High strength light weight concrete, International Journal For Technological Research In Engineering 3 (2016), 1637 – 1639.
9. R. Anilkumar et al., Durability Performance of Structural Light Weight Concrete, Sustainable Construction and Building Materials 25 (2018), 853 – 861.
10. J. Ďureje a kol., Foamed cement paste with micronized recycled concrete-measuring of compressive strength and thermal conductivity, Experimental Stress Analysis - 57th International Scientific Conference (2019), 66 – 69.

Building system with a high content of recycled materials based on micronized concrete

Zdeněk PROŠEK[a], Jan TREJBAL[a], Pavel TESÁREK[a], George KARRA´A[b]
[a] Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, Czech Republic
[b] Lavaris, s.r.o., Areál Šroubáren 43, 252 66 Libčice nad Vltavou, Czech Republic

Summary

The presented paper describes a utilization of waste concrete of fraction equal to 0/4 mm. So far, effective application of such fines has not been solved in technical practice. Such a material can be homogenized and even mechanically activated using high-speed micro-milling. It can be consequently used for example during production of complex new wall masonry systems. The paper continues on results that have been published in WASTE FORUM 2/2018. The first part contains characterization of milled recyclate originated from supporting columns from demolished reinforced concrete structure. The second one focuses on a design of composition of mixtures to be used for construction system containing high amount of recycled materials. This system includes lightweight masonry blocks, construction adhesives, and plasters. The specific surface area was determined by using laser granulometry. The next part of the paper describes the production of test specimens and their consequent mechanical testing. Modulus of elasticity was determined by means of a nondestructive impulse resonance method, while tensile and flexure strengths were examined by macroscopic destructive tests. The microstructure of the material was observed using a scanning electron microscopy. The series of experiments was closed by measuring of thermal parameters using heat flow.

***Keywords**: Circular economy, Construction and demolition waste, Waste concrete, Recycling, Micro-milled concrete, Masonry system, Silicate composite*

Motivácia občanov Slovenska k triedeniu komunálneho odpadu

Michal STRIČÍK, Monika BAČOVÁ, Monika ČONKOVÁ

Podnikovohospodárska fakulta v Košiciach, Ekonomickej univerzity v Bratislave, Tajovského 13, 041 30, Košice, Slovenská republika
e-mail: michal.stricik@euke.sk, monika.bacova@euke.sk, monika.conkova@euke.sk

Súhrn

Príspevok poukazuje na postoje a aktivity občanov týkajúce sa vnímania otázok životného prostredia a nakladania s komunálnym odpadom so zameraním sa na faktory motivácie a angažovania sa v oblasti triedenia a nakladania s komunálnym odpadom. Analyzuje vplyv príslušnosti občanov k rôznym kategóriám na postoje a aktivity respondentov s cieľom rozlišovania segmentov občanov s charakteristickým zmýšľaním a správaním, pre ktorých môže byť individuálne prispôsobená motivačná kampaň, manažment či legislatívne špecifikácie. Na základe výsledkov dotazníkového prieskumu realizovaného v roku 2018 v rámci Slovenskej republiky a dlhodobého štúdia problematiky navrhujeme opatrenia, ktoré by prispeli k postupnému znižovaniu tvorby komunálneho odpadu a intenzifikovali úroveň jeho triedenia. Za najdôležitejšie faktory, ktoré podľa prieskumu motivujú občanov k vyššej úrovni triedenia komunálnych odpadov patrí predovšetkým osveta a vzdelávanie v tejto oblasti, legislatívne postihy pre tých, ktorí netriedia komunálny odpad a finančná motivácia tých, ktorí triedia komunálny odpad.

Kľúčové slová: *zhodnocovanie odpadov, triedenie komunálnych odpadov, udržateľný rozvoj, motivácia občanov*

Úvod

Najvyššou prioritou sofistikovaného odpadového hospodárstva je predchádzanie vzniku odpadu[1]. Záväzná hierarchia odpadového hospodárstva predstavuje základný kameň európskej politiky a legislatívy v oblasti odpadov. Je kľúčom k prechodu na obehové hospodárstvo. Základným cieľom hierarchie odpadového hospodárstva je minimalizovať nepriaznivé účinky na životné prostredie a zvýšiť, ako aj optimalizovať efektívnosť využívania zdrojov v oblasti odpadového hospodárstva.[2, 3] Ak už nejaký odpad vznikne, mal by sa do maximálne možnej miery recyklovať.

Európska komisia (EK) prijala v roku 2015 Akčný plán EÚ pre obehové hospodárstvo. Obehové hospodárstvo (ObH) vo svojom základnom princípe odpad považuje za využiteľný zdroj.

Zákaz skládkovania zvyšuje mieru zhodnocovania odpadu. Krajiny s obmedzením skládkovania komunálneho, recyklovateľného a využiteľného odpadu majú vyššiu mieru využitia komunálneho odpadu a odpadu z obalov. Túto skutočnosť dokladujú hlavne dosiahnuté výsledky v krajinách ako Nemecko, Rakúsko, Švajčiarsko, Holandsko, Dánsko, Švédsko, Luxembursko, Belgicko, Nórsko, Fínsko. Príklady krajín, ktoré už dosiahli veľké miery zhodnocovania odpadu, môžu iniciovať pozitívne zmeny potrebné pre prechod k obehovému hospodárstvo, a tým aj k efektívnejšiemu využívaniu plastových odpadov, ktoré majú značnú materiálovú a energetickú hodnotu.[4]

Nemožno opomenúť ani tú skutočnosť, že ObH nevzniká ako izolovaný európsky projekt, pretože najmä ázijské krajiny tento koncept uplatňujú už niekoľko rokov. Dôležitosť zmien si uvedomujú aj Severná Amerika a niektoré krajiny Južnej Ameriky. Prijatie konceptu ObH vo väčšine krajín, či optimálne celosvetovo, je základnou podmienkou úspechu jeho aplikácie.[5] Zároveň je však potrebné zdôrazniť, že aj v prípade vysoko cirkulačnej ekonomiky bude vždy potrebné určité množstvo primárnych zdrojov a bude potrebné odstrániť určitý zvyškový odpad.

Patronem tohoto čísla je WASTen Centrum expertů – www.expert.wasten.cz

Podľa údajov Eurostatu[6] v 28 krajinách Európskej únie sa v roku 2017 vyprodukovalo 248 653 tisíc ton komunálneho odpadu (KO), čo v prepočte predstavuje 486 kg KO na obyvateľa. V porovnaní s krajinami EÚ je produkcia KO na Slovensku relatívne nízka. Pri porovnávaní produkcie KO na jedného obyvateľa je nižšia, ako je priemerná úroveň EÚ (v poradí krajín s najnižšou produkciou KO bolo Slovensko na piatom mieste).

Podľa Správy o stave životného prostredia Slovenskej republiky bolo v roku 2017 na Slovensku vyprodukovaných vyše 14,2 milióna ton odpadu. Komunálne odpady z tohto množstva tvorili takmer 2,14 milióna ton, čo predstavuje 393 kg KO na obyvateľa. Vo vzájomnom porovnaní s rokom 2016 to predstavuje nárast o 33 kg komunálneho odpadu na obyvateľa.[7, 8]

Slovenská republika má v oblasti odpadového hospodárstva stanovené ciele, ktoré vychádzajú z cieľov prijatých Európskou úniou.[2] Jedným z týchto cieľov je dosiahnutie 50%-nej miery recyklácie komunálnych odpadov, ktorá má byť dosiahnutá do roku 2020 v súlade s programom odpadového hospodárstva Slovenskej republiky na roky 2016 – 2020.[9] Už teraz však môžeme predpokladať, že daný cieľ sa nám do roku 2020 pri súčasnom tempe recyklácie nepodarí splniť.

O vážnosti situácie svedčí aj skutočnosť, že Európska komisia zaslala Slovenskej republike varovanie[10], v ktorom konštatuje, že v roku 2016 bola miera recyklácie KO (vrátane kompostovania) na Slovensku (podľa údajov EUROSTATU) vo výške 23 %, zatiaľ čo skládkovanie bolo na úrovni 65 %. Na základe analýzy existujúcich a pevne plánovaných politík v oblasti nakladania s odpadom vníma Komisia ako riziko, že v roku 2020 nedôjde na Slovensku k 50% príprave na opätovné použitie/recykláciu KO.

Na základe posúdenia, ktoré je základom včasnej výstrahy, dospela Komisia[10] k záveru, že:

- oddelený zber recyklovateľných materiálov vrátane biologického odpadu sa ešte neuskutočňuje účinne;
- chýbajú ekonomické stimuly pre domácnosti na triedený odpad;
- systémy rozšírenej zodpovednosti výrobcov na Slovensku nezahŕňajú úplne náklady na triedený zber a
- treba viac investícií do projektov vyššieho stupňa hierarchie odpadov (napríklad recyklácie), ktoré presahujú spracovanie zvyškových odpadov.

Cieľom Slovenskej republiky do roku 2020 je zvýšiť recykláciu odpadu z domácností a z iných zdrojov, ktoré obsahujú podobný odpad ako domácnosti najmenej na 50 % podľa hmotnosti. Aby bol tento cieľ splnený, je potrebné zvýšiť úroveň triedeného zberu recyklovateľných častí komunálnych odpadov. Týmito časťami rozumieme najmä papier, lepenku, plast, kov, sklo a biologicky rozložiteľný odpad. Nakoľko jednotlivé vytriedené zložky komunálnych odpadov nie sú plne recyklovateľné, ciele pre mieru triedeného zberu komunálnych odpadov prevyšujú samotný cieľ recyklácie. Ciele pre mieru triedeného zberu sú 20 % v roku 2016, 30 % v roku 2017, 40% v roku 2018, 50 % v roku 2019 a 60 % v roku 2020.[9]

Európska únia považuje oblasť nakladania s komunálnym odpadom za veľmi dôležitú, Európsky parlament schválil v apríli roku 2018 ambiciózne ciele, a to: do roku 2025 zvýšiť mieru recyklácie komunálneho odpadu na 55 % a do roku 2035 na 65 %. Ďalším ambicióznym cieľom je dosiahnuť, aby od roku 2035 na skládkach neskončilo viac ako 10 % odpadu.

Aby mohli byť tieto ciele splnené, je potrebné vykonať zmeny v aktuálnom systéme nakladania s komunálnym odpadom v jednotlivých mestách, mestských častiach a obciach na Slovensku, nakoľko na Slovensku dlhodobo pretrváva vysoký podiel skládkovania odpadov na celkovom nakladaní s odpadmi. Práve skládkovanie je považované za environmentálne najmenej vhodnú formu nakladania s komunálnym odpadom. Je zarážajúce, že aj napriek tejto skutočnosti sa na Slovensku skládkovalo v roku 2017 viac ako 61 % komunálnych odpadov (medziročný pokles o 5 %). Priemer krajín EÚ v množstve skládkovaného odpadu je pod 25 % a postupne klesá. Cieľom Slovenskej republiky je teda znižovať množstvo takto zneškodňovaného odpadu a docieliť postupný prechod na vhodnejšie formy nakladania s komunálnym odpadom, ktorý by viedol k napĺňaniu stanovených recyklačných cieľov. V roku 2017 sa na Slovensku recyklovalo 29 % celkovo spracovaných komunálnych odpadov vrátane kompostovania.[11,12]

Úroveň recyklácie odpadov je vo veľkej miere ovplyvnená politikou a cieľmi recyklácie a sociálnymi normami, pretože tieto iniciujú stimuly a efekty recyklácie[13]. Jedným z dôležitých faktorov úspechu pri implementovaní preventívnych opatrení vzniku komunálneho odpadu a zvyšovaní miery recyklácie komunálneho odpadu sú postoje obyvateľov v otázkach nakladania s komunálnym odpadom, vnímanie následkov kontaminácie životného prostredia odpadmi, ako aj legislatívne opatrenia.[14]

Existujú rôzne závery výskumov vplyvu motivačných faktorov na zvýšenie podielu vytriedenej časti KO. Pozitívny vplyv motivačných faktorov dokumentovali napríklad štúdie v Českej republike[15, 16] a iných krajinách[17]. Výskum v Taliansku preukázal, že motivácia jednotlivcov nekoreluje s ich správaním vplývajúcim na zvyšovanie podielu recyklovateľnej časti komunálnych odpadov, pričom správanie zodpovedné za minimalizáciu množstva vyprodukovaného komunálneho odpadu je závislé jedine na vnútornom presvedčení[18]. Čím viac poznatkov majú obyvatelia o vplyve komunálneho odpadu na životné prostredie a zároveň veria zmyslu opatrení zvyšujúcich mieru recyklácie, tým sú ochotnejší spolupracovať a triediť odpad[19, 20]. Samozrejme v konečnom dôsledku je pre mieru recyklácie a celkový manažment odpadového hospodárstva smerodajný multidimenzionálny prístup zohľadňujúci okrem motivácie občanov aj legislatívne, finančné a logistické aspekty[21, 22].

Cieľ a metodika práce

Cieľom nášho príspevku je zhodnotiť postoje občanov a ich vnímanie otázok životného prostredia a komunálneho odpadu so zameraním sa na faktory motivácie a angažovania sa v oblasti triedenia a nakladania s komunálnym odpadom analyzovaním rôznych jednoducho identifikovaných skupín obyvateľov.

Na základe dotazníkového prieskumu vykonaného v rámci Slovenskej republiky navrhujeme opatrenia, ktoré by prispeli k postupnému znižovaniu tvorby komunálneho odpadu a intenzifikovali úroveň jeho triedenia, ako aj materiálového zhodnocovania.

Výsledky prieskumu vychádzajú z primárne zistených údajov počas riešenia projektu VEGA č. 1/0582/2017, v rámci ktorého bol v roku 2018 (v období od mája do novembra) realizovaný e-mailový dotazníkový prieskum zameraný na otázky nakladania s komunálnym odpadom a motivácie občanov so zameraním na zvýšenie úrovne triedenia komunálnych odpadov.

Dotazník bol distribuovaný v elektronickej podobe využitím formulárového nástroja spoločnosti Google. Dotazníkový prieskum prebiehal medzi náhodne oslovenými, resp. navzájom si odporúčajúcimi občanmi prostredníctvom problematike venovanej internetovej stránky, na ktorú smerovali zdieľané odkazy Facebooku, či príspevku v dvoch tlačených periodikách a niekoľkých obecných novinách. Potenciálny posun výberovej vzorky k skupine, ktorá sa zaujíma o vytýčenú problematiku, nie je považovaný za prekážku z dôvodu účelu výskumu a jeho zamerania na identifikáciu motivačných faktorov triedenia a spôsobov minimalizácie produkcie zmesového KO, a nie na zmapovanie súčasného reprezentatívneho stavu v oblasti separovania KO na Slovensku.

Otázky, ktoré dotazník obsahoval z oblasti triedenia komunálneho odpadu, boli zamerané na osobné názory, postoje a správanie sa, ako aj na všeobecnú časť s údajmi o respondentoch a bydlisku slúžiacich pre kategorizáciu odpovedí. Konkrétne znenie otázok bude uvedené pri jednotlivých analýzach. Respondenti boli požiadaní, aby odpovede na otázky vzťahovali na miesto bydliska (trvalého alebo prechodného), kde platia poplatky za komunálny odpad a v ktorom sa počas roka najčastejšie zdržujú. Celkovo sa dotazníkového prieskumu zúčastnilo 479 respondentov, z ktorých 263 bývalo v obciach a 216 v mestách. V rodinnom dome bývalo 319 respondentov, v bytovom dome 152 respondentov a iný typ bydliska uviedlo 8 respondentov. Zároveň môžeme konštatovať, že prieskumu sa zúčastnilo 165 mužov a 314 žien.

Závery z dotazníkového prieskumu budú podrobované overeniu štatistickými testami, v tomto príspevku pomocou neparametrického Chi-square testu, ktorý testuje závislosť medzi dvomi premennými nominálneho alebo ordinálneho typu. Nulová hypotéza testu vyjadruje nezávislosť dvoch testovaných premenných. Nulovú hypotézu zamietneme a potvrdíme štatistickú významnosť a existenciu podmieneného vzťahu medzi premennými na hladine významnosti $\alpha = 0,05$. Hoci vzorka respondentov

nie je reprezentatívna a nemôžeme všetky závery prieskumu aplikovať automaticky na všetkých občanov, môžeme ale aspoň štatisticky významné vzťahy, či individuálne názory využiť k rozšíreniu poznatkovej bázy, na ktorej bude možné koncipovať efektívnejší systém nakladania s odpadmi.

Na základe získaných odpovedí, osobného zmýšľania, uvedomenia, postojov a správania sa zapojených respondentov v ďalšej časti príspevku vyhodnotíme dosiahnuté výsledky s orientáciou na nasledovnú problematiku:

- zaujímate sa o súčasný stav a budúcnosť životného prostredia,
- hodnotenie kvality životného prostredia v meste/obci,
- aktivity občanov k minimalizácii množstva vyprodukovaného komunálneho odpadu,
- zistenie, či je v meste /obci organizovaný triedený zber komunálneho odpadu,
- identifikácia druhu poplatku za komunálny odpad a vnímanie jeho výšky občanmi,
- zapojenie občanov do triedeného zberu komunálneho odpadu a identifikácia triedených zložiek KO,
- zistenie motivácie občanov k triedeniu odpadu,
- identifikácia faktorov motivácie občanov k zvýšeniu úrovne triedenia komunálneho odpadu.

Výsledky a diskusia

Záujem občanov o súčasný stav a budúcnosť životného prostredia je možné považovať za jeden z faktorov, ktoré budú vplývať na ich prístup k nakladaniu s odpadom. Z nášho prieskumu z odpovedí na otázku: „Zaujímate sa o stav a budúcnosť životného prostredia?“ vyplynulo, že aktívne (aktívne, resp. často aj aktívne = zoskupenie Áno) sa o súčasný stav a budúcnosť životného prostredia zaujíma väčšina respondentov (56,78 %), a to 64,24 % spomedzi mužov a 52,87 % spomedzi žien. Relatívne neutrálny postoj k tejto otázke (niekedy, resp. pasívne = zoskupenie Čiastočne) zaujalo 41,13 % respondentov a negatívne (= zoskupenie odpovedí „nejako bolo, nejako bude“, resp. „nebudem sa obmedzovať kvôli neistej budúcnosti, žijem len raz“) sa v tejto otázke vyjadrilo 2,09 % respondentov. Významovo zoskupené početnosti pôvodne podrobnejšie členených odpovedí respondentov vyjadrujúcich záujem o životné prostredie sú v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Záujem občanov o stav a budúcnosť životného prostredia (zoskupené odpovede)

Intenzita záujmu	Percentuálny podiel	% rozdelenie intenzity záujmu u mužov	% rozdelenie intenzity záujmu u žien
Áno	56,8	64,24	52,87
Čiastočne	41,1	32,12	45,86
Nezáujem	2,1	3,64	1,27
Spolu	**100 % (479 respondentov)**	**100 % (165 mužov)**	**100 % (314 žien)**

Rozdiely v deklarácii záujmu o životné prostredie medzi mužmi a ženami naznačujú častejšiu jednoznačnosť pri vyjadrení intenzívneho záujmu, či nezáujmu u mužov. Aj u žien zhodne prevláda aktívny záujem o životné prostredie, čo je jednoznačné pozitívum v súvislosti s požadovaným vývojom a cieľmi nakladania s odpadom, no vo väčšej miere ako medzi mužmi sa medzi ženami vyskytujú k životnému prostrediu neutrálne pristupujúce ženy.

Opisované rozdiely medzi mužmi a ženami sú podporené štatistickým overením platnosti hypotézy o neexistencii vplyvu pohlavia na intenzitu prejavu záujmu občanov o stav a budúcnosť životného prostredia. Testovacia štatistika testu $\chi^2 = 10,32$ a p-hodnota 0,0057 umožňujú zamietnuť nulovú hypotézu o zhode rozdelení názorov u oboch pohlaví na hladine významnosti $\alpha < 0,05$, a teda je možné konštatovať, že skutočne existujú rozdiely pri prejavovaní záujmu o súčasný stav a budúcnosť životného prostredia pri porovnávaní mužov a žien. S väčšou pravdepodobnosťou teda nájdeme medzi mužmi zanietených aktivistov, ale aj environmentálnych ignorantov.

Z hľadiska charakteru bydliska aktívne sa o súčasný stav a budúcnosť životného prostredia zaujíma podľa nášho prieskumu 52,78 % respondentov žijúcich v mestách a 60,08 % žijúcich v obciach, relatívne neutrálny postoj zaujalo 44,44 % respondentov žijúcich v mestách a 38,40 % žijúcich v obciach a negatívne reagovalo 2,78 % respondentov žijúcich v mestách a 1,52 % respondentov žijúcich v obciach. Hoci by sa mohlo zdať, že obyvatelia obcí častejšie prezentujú vyšší záujem o životné prostredie, štatistický test tento predpoklad nedokázal potvrdiť na hladine významnosti $\alpha < 0,05$, preto musíme konštatovať, že obyvatelia miest aj obcí sú v záujme o životné prostredie uniformní ($\chi^2 = 3,06$ a p-hodnota 0,2162).

Aktívny záujem vyjadrilo 59,56 % respondentov žijúcich v rodinných domoch, 51,32 % žijúcich v bytoch a 50 % respondentov, ktorí uviedli iný typ bydliska; neutrálny záujem 46,71 % respondentov žijúcich v bytoch, 38,56 % žijúcich v rodinných domoch a 37,50 % respondentov, ktorí uviedli iný typ bydliska; negatívny záujem vyjadrilo 1,97 % respondentov bývajúcich v bytoch, 1,88 % v rodinných domoch a 12,5 % respondentov, ktorí uviedli iný typ bydliska. Nepatrne vyššie početnosti sa vyskytli pri potvrdení aktívneho záujmu o životné prostredie medzi občanmi obcí, avšak štatisticky nevýznamné rozdiely nám tento záver neumožňujú zovšeobecniť na hladine významnosti $\alpha < 0,05$ ($\chi^2 = 2.90$ a p-hodnota 0,2351), a tak nebudeme typ bydliska považovať za faktor záujmu o životné prostredie. Typ bydliska identifikovaný ako „iné“ sme pre jeho malý výskyt do úvahy nebrali, a podobne nebude relevantný ani pri posudzovaní ďalších otázok.

Pri otázke, ako hodnotia kvalitu životného prostredia respondenti vo svojom meste/obci sme zistili početnosti uvedené súhrnne aj podľa pohlavia, charakteru bydliska a typu bydliska v tabuľke 2.

Tabuľka 2: Hodnotenie kvality životného prostredia

Kvalita životného prostredia	Počet respondentov	Percentuálny podiel	z toho (v %)						
			pohlavie		charakter bydliska		typ bydliska		
			muži	ženy	mesto	obec	rodinný dom	bytový dom	iné
Dobrá až veľmi dobrá	131	27,35	33,94	23,88	21,76	31,94	29,47	22,37	37,5
Priemerná	295	61,58	58,18	63,37	64,81	58,94	60,50	64,48	50,0
Horšia až veľmi zlá	53	11,07	7,88	12,75	13,43	9,12	10,03	13,15	12,5
Spolu	**479**	**100%**	**100% (165)**	**100% (314)**	**100% (216)**	**100% (263)**	**100% (319)**	**100% (152)**	**100% (8)**

Štatisticky významnými sa javia rozdiely medzi pohlaviami, keď muži sa prezentujú ako spokojnejší, uvádzajúc častejšie vyššie úrovne vnímanej kvality životného prostredia ($\chi^2 = 6.52$ a p-hodnota 0,0384), ako aj rozdiely medzi respondentmi s iným charakterom bydliska, keď obyvatelia obcí vyjadrujú častejšie vyššiu úroveň spokojnosti ($\chi^2 = 7.14$ a p-hodnota 0,0281), pričom typ bydliska opäť na hladine významnosti $\alpha < 0,05$ nám respondentov neovplyvnil ($\chi^2 = 3.083$ a p-hodnota 0,2140).

Na priamu tretiu otázku Či „robíte niečo pre to, aby ste minimalizovali množstvo vyprodukovaného odpadu“ 424 občanov odpovedalo kladne – áno (88,5 %) a 55 respondentov nie (11,5 %). Môžeme relatívne pozitívne hodnotiť vysoké percento tých respondentov, ktorí sa snažia minimalizovať množstvo vyprodukovaného odpadu.

Tabuľka 3: Prístup k minimalizovaniu množstva vyprodukovaného komunálneho odpadu

Snaha minimalizovať množstvo odpadu	Počet respondentov	Percentuálny podiel
Áno	424	88,5
Nie	55	11,5
Spolu	**479**	**100,0**

Štatisticky významné rozdiely na hladine významnosti 0,05 medzi mužmi a ženami v snahe o minimalizáciu vyprodukovaných odpadov nie sú (χ^2 = 0,101 a p-hodnota 0,7505). Z prieskumu ale vyplynulo, že podiel respondentov z obcí, ktorí kladne odpovedali je štatisticky významne vyšší ako z miest (χ^2 = 10.267 a p-hodnota 0,0059) a že respondenti bývajúci v rodinných domoch viac dbajú o minimalizáciu vyprodukovaného komunálneho odpadu ako respondenti bývajúci v obytných bytoch (χ^2 = 13.062 a p-hodnota 0,0015).

Pri hodnotení 4. otázky zameranej na zistenie, či je v meste/obci organizovaný triedený zber komunálneho odpadu, môžeme konštatovať, že až v 96,4 % obcí je organizovaný triedený zber komunálneho odpadu na rôznej úrovni organizácie, ako je to uvedené v nasledovnej tabuľke 4. Až 17 respondentov (3,6 %) uviedlo, že nevie, či je v ich obci organizovaný triedený zber komunálnych odpadov (9 respondentov), prípadne že takýto zber nie je organizovaný (8 respondentov).

Tabuľka 4: Je vo Vašom meste /obci organizovaný triedený zber komunálneho odpadu?

Prítomnosť organizovaného triedeného zberu komunálneho odpadu	**Počet respondentov**	**Percentuálny podiel**
Áno, všetky triediteľné zložky komunálneho odpadu sú zbierané v primeraných časových intervaloch alebo príležitostne.	206	43,0
Áno, niektoré zložky komunálneho odpadu sú zbierané pravidelne, iné musím odniesť do zberného dvora v obci	161	33,6
Áno, niektoré zložky komunálneho odpadu sú zbierané pravidelne, iné musím odniesť do zberného dvora mimo obce	72	15,0
Áno, niektoré zložky komunálneho odpadu sú zbierané pravidelne, ale nedostatočne	23	4,8
Nie, zbiera sa len zmesový odpad	8	1,7
Neviem	9	1,9
Spolu	**479**	**100,0**

Výsledok zistenia nám potvrdil náš predpoklad, že triedený zber stále nie je zavedený vo všetkých slovenských obciach, čo je nielen v rozpore s legislatívou, ale absencia organizovaného triedeného zberu predstavuje aj potenciálny demotivačný faktor, dokonca bariéru pre minimalizovanie tvorby zmesového KO.

Na otázku, či sa respondenti zapájajú do triedenia komunálneho odpadu odpovedala viac než polovica respondentov 260 (54,3 %), že vždy, 133 respondentov (27,8 %) väčšinou a 21 respondentov (4,4 %) sa zapája často. Niekedy sa do triedenia zapája 31 respondentov (6,5 %), zriedka 26 respondentov (5,4 %) a nikdy 8 respondentov (1,7 %). Zoskupené odpovede o zapájaní sa respondentov do triedeného zberu komunálneho odpadu v členení podľa vybraných charakteristík zobrazuje tabuľka 5.

Tabuľka 5: Aktivita respondentov pri zapojení do triedeného zberu komunálneho odpadu

Aktivita pri triedení komunálneho odpadu	**Počet respondentov**	**Percentuálny podiel**	**z toho (v %)**						
			pohlavie		**charakter bydliska**		**typ bydliska**		
			muži	**ženy**	**mesto**	**obec**	**rodinný dom**	**bytový dom**	**iné**
Väčšinou až vždy	393	82,05	78,79	83,76	75,93	87,08	86,21	74,34	62,50
Niekedy	52	10,85	12,72	9,87	12,96	9,12	8,78	15,13	12,50
Zriedka alebo nikdy	34	7,1	8,49	6,37	11,11	3,80	5,01	10,53	25,00
Spolu	**479**	**100,0%**	**100% (165)**	**100% (314)**	**100% (216)**	**100% (263)**	**100% (319)**	**100% (152)**	**100 % (8)**

Relatívne vysoký podiel respondentov, ktorí triedia komunálny odpad v porovnaní so staršími prieskumami v Čechách a na Slovensku môže zodpovedať pravdepodobnému ovplyvneniu súhrnnej štatistiky spôsobom výberu respondentov, t. j. šírením dotazníka vo väčšej miere medzi občanmi do problematiky zainteresovanými, na druhej strane rozsiahla podpora a propagácia triedenia recyklovateľných zložiek KO sa tiež môže prejaviť vo zvyšovaní podielu občanov triediacich KO a navyše i najnovší prieskum realizovaný oficiálnou prieskumnou agentúrou na Slovensku[23] i viaceré zdokumentované prieskumy vo svete[24] uvádzajú vyše 90%-né podiely respondentov, ktorí triedia aspoň jednu zložku KO. K posunu vo výsledkoch preto z dôvodu šírenia dotazníku cez internet nemuselo dôjsť.

U respondentov nás zaujímajú rozdiely medzi jednotlivými identifikovateľnými podskupinami respondentov. Rozdiely v aktivite respondentov medzi mužmi a ženami sú na hladine významnosti štatisticky nevýznamné $\alpha < 0,05$ ($\chi^2 = 1,82$ a p-hodnota 0,4026), t. j. konštatujeme, že muži aj ženy sa do triedeného zberu zapájajú v rovnakej miere, ale vplyv charakteru bydliska a typu bydliska sa preukázal na danej hladine významnosti ako štatisticky významný. Obyvatelia obcí majú tendenciu častejšie sa do triedeného zberu zapájať ($\chi^2 = 12,33$ a p-hodnota 0,0021) a podobne sú aktívnejší ako obyvatelia bytov obyvatelia rodinných domov ($\chi^2 = 14,07$ a p-hodnota 0,0071).

Pri analýze motivácie respondentov k triedeniu KO môžeme konštatovať, že 364 respondentov (76 %) je významne motivovaných triediť komunálny odpad, čo vyjadrili, svojim áno – 113 respondentov, väčšinu áno 139 respondentov, a často primerane – 112 respondentov. Komunálny odpad triediť sú motivovaní občania niekedy/trochu v počte 43 respondentov, zriedka/málo je motivovaných 28 respondentov a podľa ich vlastného vyjadrenia vôbec nie je motivovaných triediť 37 respondentov, čo je necelých 8 % respondentov, 92 % respondentov je teda aspoň zriedka motivovaných k triedeniu. Priaznivým zistením po porovnaní tabuľky 6 s úrovňami motivácie s tabuľkou 5 reprezentujúcou intenzitu triedenia KO je skutočnosť, že hoci občania deklarujú v priemere nižšiu úroveň motivácie k triedeniu, napriek tomu sa podieľajú na triedení intenzívnejšie, ako by sa podľa úrovne motivácie dalo očakávať.

Tabuľka 6: Motivácia respondentov k triedeniu komunálneho odpadu

Motivácia	**Počet respondentov**	**Percentuálny podiel**
Väčšinou, určite áno, často	364	75,99
niekedy/trochu	43	8,98
zriedka alebo vôbec	65	13,57
iné	7	1,46
Spolu	**479**	**100,0**

Veľmi dôležité informácie nám poskytla otvorená otázka „Faktory motivácie k triedeniu komunálneho odpadu z pohľadu občanov“, v ktorej respondenti uvádzali, čo ich motivuje, prípadne čo by ich motivovalo k vyššiemu záujmu o triedenie komunálneho odpadu a jej vyhodnotenie, ako je uvedené v nasledovnej tabuľke. Na túto otvorenú otázku odpovedalo 440 respondentov z celkového počtu 479 respondentov, pričom viacerí respondenti uviedli viac ako jednu odpoveď, a tak je celkový súčet odpovedí, vrátane tých respondentov, ktorí neodpovedali 529. Až 247 respondentov (51,6 %) vyjadrilo svoju osobnú motiváciu v snahe o zlepšenie životného prostredia. Spomedzi mnohých alternatív sa medzi odpoveďami často nachádzali odpovede zamerané na znečisťovanie oceánov plastmi, či globálne znečisťovanie planéty a zmena klímy. Išlo napríklad o odpovede nasledovného charakteru: „Prirodzený postoj k prírode, zdrojom a ďalším generáciám.“, „Kvalita životného prostredia, ktorá sa každým rokom znižuje. Mám záujem, aby budúce generácie nežili v znečistenom životnom prostredí.“

Veľká časť odpovedí bola orientovaná na potrebu peňažnej motivácie a zníženia poplatku za komunálny odpad pre tých, ktorí triedia, čo vyjadrilo 73 respondentov (15,2 %). Spomedzi najzaujímavejších odpovedí vyberáme:

- „Na obciach sa dá lepšie odsledovať, kto separuje – mohli by mať nižšie poplatky (respektíve tí, čo neseparujú, by mali mať vyššie poplatky) – väčšinu obyvateľov finančná stránka separácie motivuje najviac“,
- „Motivuje ma záujem o životné prostredie a motivovalo by ma, keby som platil nižšie poplatky za komunálny odpad, keď už separujem“,
- „Motivuje ma hlavne úcta k prírode. Všeobecne by zvýšilo záujem o triedenie nejaká úľava na poplatku za komunálny odpad“,
- „Skôr odpoviem, čo motivuje dnes ľudí – peniaze. Ak triedením odpadu budú platiť menej alebo z toho vyplynú iné finančné úľavy, vtedy môžu zmeniť svoje správanie a postoj k triedeniu.“,
- „Občan by mal byť určitou formou odmenený za to, že odpad triedi.“,

- „Mne to nedá. Ale samozrejme svetom hýbu peniaze. Ak obec ponúkne za triedenie odmenu vo forme zníženia poplatku, veľa ľudí sa zapojí.“,
- „Navrhujem výšku poplatku za komunálny odpad odstupňovať podľa toho, či občan triedi, alebo netriedi odpad – kto triedi, mal by platiť nižší poplatok.“,
- „Čím viac vytriedim, tým menej mám zmiešaného komunálneho odpadu, a teda znižujem objem, z ktorého by vyplýval nižší poplatok za TKO.“,
- „Iný poplatok oproti tým, čo netriedia – zníženie poplatku za komunálny odpad, keď je jednoznačne potvrdené, že ho triedim.“

Tretiu skupinku tvorili odpovede zamerané na potrebu rozšírenia počtu, prípadne dostupnosti kontajnerov, prípadne vriec na triedený odpad, ako aj potrebu častejšej frekvencie zvozu vytriedených zložiek komunálneho odpadu. Počet takýchto odpovedí bol 68 (14,2 %). Ako podnetné návrhy a odpovede vyberáme: „Lepšia dostupnosť triediacich kontajnerov aj v práci (nemocnica, poliklinika, úrady, je tam veľa obalov, ktoré sa netriedia).“, „Rozšírenie triedeného zberu v obci.“

Časť respondentov si uvedomuje aj zlý prístup od ostatných obyvateľov, čo vyjadrili v potrebe lepšieho prístupu občanov k triedeniu 19 respondentov (4 %), ako aj lepší prístup štátu, miest a obci, čo vyjadrilo 16 respondentov (3,3 %). Na potrebu väčšej propagácie a príkladov z iných miest a štátov (či už pozitívnych, alebo aj negatívnych) upozorňovalo 30 respondentov (6,3 %). Dvanásť respondentov (2,5 %) upozorňovalo na potrebu zaviesť vratné fľaše a plechovky.

Rozumnými argumentmi na potrebu zmeny legislatívy a prípadne uplatňovanie pokút upozorňovalo 14 respondentov (2,9 %), z ktorých odpovedí vyberáme: „Zmena systému platby za komunálny odpad“, či „Zmena legislatívy, ktorá je nedostačujúca, lebo obec nemôže odmeniť ľudí, ktorí separujú.“ Celkový prehľad odpovedí respondentov rozdelených do skupín podľa obsahu je v tabuľke 7.

Tabuľka 7: Faktory motivácie občanov k triedeniu komunálneho odpadu

Faktor motivácie	**Počet odpovedí respondentov**	**Percentuálny podiel**
Zlepšenie životného prostredia	247	51,6
Peňažné prostriedky a zníženie poplatku za komunálny odpad	73	15,2
Väčšia dostupnosť kontajnerov/častejší vývoz vytriedeného KO	68	14,2
Lepší prístup občanov k triedeniu	19	4,0
Lepší prístup štátu/mesta/obce k triedeniu	16	3,3
Reklama/viac informácií o triedenom odpade a znečisťovaní, príklady z iných miest/štátov	30	6,3
Zaviesť vratné plastové fľaše a plechovky	12	2,5
Zmena legislatívy a uplatnenie pokút	11	2,3
Recyklácia odpadu a jeho následné využitie	14	2,9
Nič/neviem/bez odpovede	39	8,1
Spolu	**529**	**-**

Na otázku ohľadom poplatku za komunálny odpad odpovedalo 370 respondentov, pričom 330 respondentov uviedlo, že platí poplatok na osobu a kalendárny deň a 40 respondentov podľa množstva za 1 l odpadu (počtu vývozov za rok, objemu zbernej nádoby v litroch a počtu zberných nádob), tak ako je to uvedené v tabuľke 8.

Tabuľka 8: Druh poplatku za zneškodňovanie KO v meste/obci, ktorý platia respondenti

Druh poplatku	**Počet respondentov**	**Percentuálny podiel**
Podľa sadzby na osobu a kalendárny deň	330	89,2
Podľa množstva za 1 l odpadu (počtu vývozov za rok, objemu zbernej nádoby v litroch a počtu zberných nádob)	40	10,8
Spolu	**370**	**100**

Pri poplatku za KO je veľmi dôležité si uvedomiť, ako respondenti tento poplatok vnímajú z hľadiska vynaložených peňažných prostriedkov. Z odpovedí sme zistili, že 59 respondentov (15,33 %), ktorí odpovedali na túto otázku, považuje tento poplatok za vysoký, alebo príliš vysoký. Najväčšiu skupinu predstavuje 241 respondentov (62,6 %), ktorí tento poplatok považujú za primeraný, alebo sa výškou poplatku za komunálny odpad nezaoberajú. Až 85 respondentov (22,07 %) považuje poplatok za nízky a podľa nich by mal byť vyšší, alebo mohol by byť vyšší, aby sa dalo vyriešiť viac problémov s odpadom, prípadne ho považujú za nedostatočný pre optimálne riešenie problematiky KO. Vnímanie výšky poplatku respondentmi v kategorizácii podľa pohlavia, charakteru a typu bydliska zobrazuje tabuľka 9.

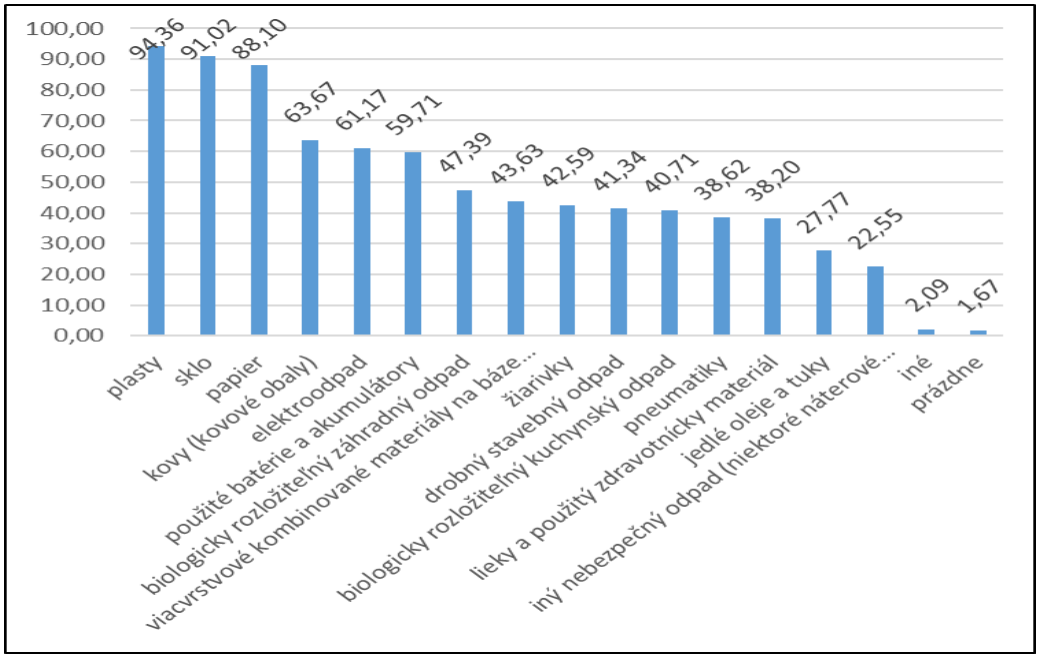
Tabuľka 9: Vnímanie výšky poplatku za zneškodňovanie komunálneho odpadu občanmi

Vnímaná výška poplatku	**Počet respondentov**	**Percentuálny podiel**	**z toho (v %)**						
			pohlavie		**charakter bydliska**		**typ bydliska**		
			muži	**ženy**	**mesto**	**obec**	**rodinný dom**	**bytový dom**	**iné**
Vysoká	59	15,33	16,03	14,96	21,25	11,12	14,13	18,75	0,00
Primeraná	241	62,60	55,73	66,14	64,38	60,44	60,22	68,75	50,00
Nedostatočná	85	22,07	28,24	18,90	14,37	28,44	25,65	12,50	50,00
Spolu	**385**	**100%**	**100% (131)**	**100% (254)**	**100% (160)**	**100% (225)**	**100% (269)**	**100% (112)**	**100% (4)**

Rozdiely medzi mužmi a ženami sú štatistiky bezvýznamné (χ^2 = 4,98 a p-hodnota 0,0828), obyvatelia miest častejšie považujú nastavené poplatky za vysoké, obyvatelia obcí častejšie vnímajú poplatky ako nedostatočné (χ^2 = 14,70 a p-hodnota 0,0006) a podobne sú významné rozdiely vo vnímaní poplatkov medzi obyvateľmi rodinných domov a bytov, keď v rodinných domoch častejšie považujú poplatky za nízke až nedostatočné a obyvatelia bytov naopak za vysoké, niekedy až príliš (χ^2 = 8,29 a p-hodnota 0,159).

Z celkového počtu respondentov percentuálne podiely tých respondentov, ktorí triedia jednotlivé zložky komunálneho odpadu sú zobrazené v grafe 1. Pri zisťovaní, ktoré zložky komunálneho odpadu respondenti triedia, sme zistili, že až 452 občanov (94 %) zapojených do prieskumu triedi plasty, 436 občanov (91 %) sklo, 422 občanov (88 %) papier a 305 občanov (64 %) kovový odpad. Len necelých 41 % respondentov triedilo biologicky rozložiteľný kuchynský odpad. Je potrebné si uvedomiť, po oboznámení sa s motivačnými faktormi triedenia, že dôležitú úlohu v štruktúre najčastejšie triedených odpadov zohráva okrem motivácie aj dostupnosť zberných nádob a organizácia odvozu.

Graf 1: Percentuálne podiely respondentov, ktorí triedia jednotlivé položky komunálneho odpadu



Diskusia

Podobné štúdie sa častokrát zameriavajú len na súhrnné charakteristiky vyjadrujúce stav v zmýšľaní a konaní občanov v súvislosti s produkciou a nakladaním s KO opisovaný početnosťami, resp. podielmi respondentov v jednotlivých kategóriách bez ohľadu na účel a relevantnosť rozdielov. Naše analýzy však rozdielnosti v početnostiach overujú testami štatistických hypotéz, aby potvrdili alebo vyvrátili ich štatistickú významnosť, t. j. nenáhodnosť rozdielov výsledkov. Týmto môžu byť naše zistenia nápomocné pri optimalizácii legislatívy, či pri nasmerovaní zástupcov samospráv pri segmentácii producentov odpadov za účelom uplatňovania motivačných faktorov vedúcich k napĺňaniu vytýčených cieľov.

Na zvýšenie úrovne triedenia komunálneho odpadu, v ktorej Slovenská republika zaostáva za najvyspelejšími krajinami a európskym priemerom, je nevyhnutné zvýšiť motiváciu občanov v danej oblasti. Pre oblasť nakladania s komunálnym odpadom s cieľom dosiahnuť zlepšenie navrhujeme nasledovné opatrenia, ktoré vychádzajú z dotazníkového prieskumu realizovaného v rámci projektu VEGA a dlhodobého štúdia problematiky:

- zaviesť triedený zber komunálneho odpadu vo všetkých obciach na Slovenku, prípadne zaviesť účinné systémy nakladania s komunálnym odpadom, ktoré by motivovali občanov k nižšej produkcii zmesového komunálneho odpadu a vyššej úrovni triedenia všetkých zložiek komunálneho odpadu vrátane biologický rozložiteľných odpadov,
- na národnej úrovni pre efektívnejšie nakladanie s komunálnym odpadom navrhujeme prijať legislatívne opatrenia týkajúce sa novely zákona o odpadoch a predovšetkým zákona o miestnych daniach a poplatkoch, aby umožňovali úpravu všeobecne záväzných nariadení prijímaných mestami a obcami v podobe, ktorá umožní platiť nižšie poplatky pre tých občanov, ktorí triedia komunálny odpad alebo ich inak finančne motivovať,
- zavedenie systému zálohovania PET fliaš a plechoviek v SR,
- podporovať vzdelávanie a osvetu v oblasti nakladania s komunálnym odpadom, či už v samospráve, pre širokú verejnosť, alebo na jednotlivých stupňoch škôl.

Slovenské mestá a obce boli povinné od 1. 1. 2010 zaviesť separovaný zber štyroch zložiek komunálneho odpadu: papier, plasty, sklo a kovy.[25] Napriek tomuto faktu, ktorý upravoval starší zákon o odpadoch, výsledky nášho prieskumu poukazujú na skutočnosť, že 1,7 % respondentov sa vyjadrilo, že v ich obci nie je ani v roku 2018 zavedený triedený zber komunálneho odpadu. Tento stav potvrdzujú aj zistenia Slovenského štatistického úradu[12], podľa ktorého v roku 2017 materiálovo zhodnocovalo komunálny odpad 99,48 % obci, pričom najhoršia situácia bola v Nitrianskom kraji s hodnotou 98,59 %, čo poukazuje na skutočnosť, že triedený zber nie je zavedený vo všetkých samosprávach Slovenska.

V jednotlivých samosprávach je dôležité zaviesť správny motivačný systém. Skúsenosti z Českej republiky prezentujú zistený veľký rozdiel v triedení odpadu medzi domácnosťami a obcami, u ktorých je zavedený systém poplatkov PAYT (Pay-As-You-Throw) a medzi tými, u ktorých tento systém zavedený nie je. V obciach a domácnostiach, ktoré majú daný systém PAYT zavedený, občania vytriedia viac odpadu a produkujú menej zostatkového odpadu. Naopak v obciach a domácnostiach, kde tento systém nemajú, občania triedia menej.[26, 27] Podobný názor majú viacerí autori, ktorí upozorňujú na možnosť dosiahnutia nižšej produkcie odpadu jeho množstvovým spoplatnením.[28, 29] Na Slovensku je v súlade so zákonom o odpadoch zavedený v mnohých obciach množstvový zber komunálneho odpadu, ako to umožňuje § 81 (ods. 10) zákona o odpadoch v aktuálnom znení.[30, 31]

Vážnosť nakladania s komunálnym odpadom si uvedomujú aj v Českej republike, kde už v súčasne platnom zákone o odpadoch je stanovené, že na skládky je od roku 2024 zakázané ukladať zmesový komunálny odpad a recyklovateľné a využiteľné odpady ustanovené vykonávacím právnym predpisom, hoci EÚ plánuje zakázať skládkovania využiteľných odpadov až od roku 2030. Teraz je dôležité včas na túto skutočnosť zareagovať a zabezpečiť efektívne a kapacitne dostatočnú infraštruktúru pre spracovanie odpadov odklonených zo skládkovania, ktorá zaujme potenciálnych investorov a bude odbornou aj občiansku verejnosťou akceptovateľná.[4] V tejto súvislosti môžu mať veľký význam aj efektívne inštruktážne návrhy, intelektuálny rozvoj a inovácie, ktoré sú v zásade založené na výskume a artefaktoch.[32]

Ministerstvo životného prostredia SR už koncom roka 2015 upozorňovalo, že Slovensko nesplní platný recyklačný cieľ pre rok 2020, ktorým je recyklácia 50 % komunálnych odpadov. V roku 2015 sa aj napriek snahe ministerstva podarilo dosiahnuť len 14,9 % recyklácie komunálnych odpadov. V ďalších rokoch môžeme sledovať len miernu úroveň zlepšenia.

Tento negatívny stav chce aspoň trochu zmierniť zákonom o vyšších poplatkoch za uloženie odpadov, ktorý vstúpil do platnosti od roku 2019. Zákon je navrhnutý tak, aby obce motivoval k maximálnemu triedeniu komunálneho odpadu, to znamená „čím viac triediš, tým menej platíš“.[31, 33] Pre porovnanie výška poplatku za uloženie odpadu na skládku odpadov pri deklarovaní 5 vytriedených zložiek odpadu bola do roku 2018 4,98 €.t^{-1}. V roku 2019 sa bude za uloženie komunálneho odpadu na skládku platiť poplatok pri úrovní triedenia pod 10 % 11 €.t^{-1}, pričom tento poplatok narastie pri tejto úrovni triedenia až na 33 €.t^{-1} od roku 2021. Pri úrovni viac ako 60 % vytriedeného komunálneho odpadu je pre rok 2019 poplatok 7 €.t^{-1} a do roku 2021 narastie na 11 €.t^{-1}.

Táto právna úprava ale neumožňuje priamu finančnú motiváciu občanov, ktorá by mohla byť zapracovaná do všeobecne záväzných nariadení miest a obcí. V súčasnosti je táto možnosť v Slovenských podmienkach možná len komplikovaným spôsobom prostredníctvom uplatnenia § 82 ods. (3) „Obec môže na základe žiadosti poplatníka na zmiernenie alebo odstránenie tvrdosti zákona vyrubený poplatok znížiť alebo odpustiť rozhodnutím.“[34]

Záver

Na základe dotazníkového prieskumu a jeho vyhodnotenia v rámci riešenia projektu sme zistili výsledky, z ktorých vyberáme najdôležitejšie zistenia:

- väčšina respondentov sa zaujíma o súčasnosť a budúcnosť životného prostredia, pričom intenzita záujmu i nezáujmu je viac vystupňovaná u mužov ako u žien;
- kvalita životného prostredia je najčastejšie hodnotená ako priemerná, častejšie sú však spokojnejší muži a obyvatelia vidieka;
- minimalizovať produkciu KO sa snaží 88,5 % respondentov; pričom častejšie sa takéto správanie vyskytuje na vidieku a v rodinných domoch v porovnaní s mestami a bytovými domami;
- iba 96,4 % respondentov uviedlo, že v mieste bydliska je organizovaný triedený zber KO. Aj keby bol v mieste bydliska organizovaný triedený zber KO, a občania o ňom nevedeli, jeho absencia, ako aj absencia zberu len niektorej zložky triedeného KO, predstavuje potenciálny demotivačný faktor či bariéru pre minimalizovanie zmesového KO;
- hoci občania deklarujú v priemere nižšiu úroveň motivácie k triedeniu, napriek tomu sa podieľajú na triedení intenzívnejšie, ako by sa podľa úrovne motivácie dalo očakávať;
- najdôležitejšie faktory motivácie sú snaha o zlepšenie životného prostredia, otázka financií, dostupnosť kontajnerov a častejší vývoz vytriedených zložiek komunálneho odpadu;
- poplatok za komunálny odpad je takmer pre dve tretiny respondentov primeraný a takmer 22 % respondentov by akceptovalo aj vyšší poplatok na riešenie problémov v nakladaní s KO;
- z analyzovaných komodít sa respondenti najčastejšie zapájajú do triedenia plastov (94 %), skla (91 %), papiera (88 %) a významné je aj triedenie kovových odpadov (64 %). Len 41 % respondentov triedi biologicky rozložiteľný kuchynsky odpad. Dôležitú úlohu v štruktúre najčastejšie triedených odpadov zohráva okrem motivácie aj dostupnosť zberných nádob a organizácia odvozu.

Za najdôležitejšie opatrenia zamerané na zvýšenie úrovne triedenia komunálneho odpadu a zníženie množstva skládkovaného odpadu vyplývajúce z dotazníka i dlhodobého štúdia problematiky považujeme:

- zaviesť triedený zber komunálneho odpadu v súlade s legislatívou i odporúčaniami Európskej komisie vo všetkých obciach na Slovensku, prípadne zaviesť účinné systémy nakladania s komunálnym odpadom aj vo väzbe na biologický rozložiteľný odpad,
- prijať legislatívne opatrenia umožňujúce finančne motivovať občanov ku triedeniu komunálneho odpadu, ako aj
- zavedenie systému zálohovania PET fliaš a plechoviek v Slovenskej republike,
- zvýšiť osvetu o potrebe triedenia KO zo strany Ministerstva Životného prostredia SR, obcí, ako aj Organizácií zodpovednosti výrobcov.

Veríme, že prijatie týchto opatrení pomôže k zlepšeniu v oblasti nakladania s komunálnym odpadom v Slovenskej republike a k priblíženiu sa k stanoveným cieľom uloženým v tejto oblasti pre Slovensko.

Poďakovanie

Príspevok je čiastočným výstupom projektu VEGA č. 1/0582/2017 "Modelovanie ekonomickej efektívnosti materiálovo energetického zhodnocovania komunálnych odpadov" riešenom na Podnikovohospodárskej fakulte Ekonomickej univerzity v Bratislave so sídlom v Košiciach vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky, začo jej vyjadrujeme svoje poďakovanie.

Literatúra

1. Hutner P., Thorenz A., Tuma A.: Waste prevention in communities: a comprehensive survey analyzing status quo, potentials, barriers and measures. Journal of cleaner production *141*, 837 (2017).
2. Smernica Európskeho parlamentu a Rady 2008/98/ES z 2008 o odpade. (2008).
3. Balík opatrení v oblasti obehového hospodárstva. (2015).
4. Kulhánková P.: Aktuální otázky oběhového hospodářství se zaměřením na plasty. TVIP (2018).
5. Horsák Z.: Oběhové hospodářství v praxi. TVIP (2018).
6. Eurostat. [env_wasmun]
7. Správa o stave životného prostredia Slovenskej republiky v roku 2016. Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, Slovenská agentúra životného prostredia, (2017).
8. Správa o stave životného prostredia Slovenskej republiky v roku 2017. Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, Slovenská agentúra životného prostredia, (2018).
9. Program odpadového hospodárstva SR na roky 2016 – 2020. (2015).
10. Správa Komisie o vykonávaní právnych predpisov EÚ o odpadoch vrátane správy o včasnom varovaní pre členské štáty, ktorým hrozí nedostatok pripravenosti na rok 2020 na opätovné použitie/recykláciu komunálneho odpadu. (2018).
11. Pobožná M.: Odpady v Slovenskej republike 2016. Štatistický úrad v Slovenskej republike. (2017).
12. Pobožná M.: Odpady v Slovenskej republike 2017. Štatistický úrad v Slovenskej republike. (2018).
13. Kannangara M., Dua R., Ahmadi L., Bensebaa F.: Modeling and prediction of regional municipal solid waste generation and diversion in Canada using machine learning approaches. Waste Manage. 74, 3 (2018).
14. Corsini F., Gusmerotti N. M., Tesla F., Iraldo, F.: Exploring waste prevention behaviour through empirical research. Waste Manage. 79, 132 (2018).
15. Struk M.: Distance and incentives matter: The separation of recyclable municipal waste. Resour. Conserv. Recycl. 122, 155 (2017).
16. Slavik J., Pavel J.: Do the variable charges really increase the effectiveness and economy of waste management? a case study of the Czech Republic. Resour. Conserv. Recycl 70, 68 (2013).
17. Xiao L., Zhang G., Zhu Y., Lin T.: Promoting public participation in household waste management: a survey based method and case study in Xiamen city, China. Journal of cleaner production 144, 313 (2017).
18. Gilli M., Nicolli F., Farinelli P.: Behavioural attitudes towards waste prevention and recycling. Ecol. Econ. 154, 294 (2018).
19. Junquera B., Ángel del Brío J., Muñiz M.: Citizens' attitude to reuse of municipal solid waste: a practical application. Resour. Conserv. Recycl. 33, 51 (2001).
20. Vidová J.: Households as an important part of the circular economy. Waste forum. 3, 178 (2019).
21. Chang N. B., Pires A., Martinho G.: Empowering Systems Analysis for Solid Waste Management: Challenges, Trends, and Perspectives. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 16, 1449 (2011).
22. Bing X., Bloemhof J. M., Pereira Ramos T. R., Barbosa-Povoa A. P., Wong Ch. Y., van der Vorst J. G. A. J: Research challenges in municipal solid waste logistics management. Waste Manage. 48, 584 (2016).
23. Potočár R.: Prieskum odhalil, koľko ľudí na Slovensku triedi odpad a prečo niektorí netriedia vôbec. Median, s.r.o. (2019).
24. Singh N., Lavina A.: Waste separation at household level: Comparison and contrast among 40 countries. Indian Journal of Applied Research, *5* (1), 558, (2015).
25. Zákon č. 409/2006 Z. z. o odpadoch v znení neskorších predpisov
26. Šauer P., Pařizková L., Hadrabová A.: Charging systems for municipal solid waste: Experience

from the Czech Republic. Waste Manage. 28, 2772 (2008).
27. Šauer P., Mildeová S.: Risk reduction of households waste: contingent valuation analysis. Prague Economic Papers, 7(1), 67 (1998).
28. Sidique S. F., Satish V. J., Lupi F.: Factors influencing the rate of recycling: An analysis of Minnesota counties. Resour. Conserv. Recycl. 54, 242 (2010).
29. Puig-Ventosa I.: Charging systems and PAYT experiences for waste management in Spain. Waste Manage. 28, 2767 (2008).
30. Zákon č. 79/2015 Z. z. o odpadoch.
31. Zákon č. 329/2018 Z. z. o poplatkoch za uloženie odpadov.
32. Gallo P., Mihalcova B., Vegsoova O., Dzurov-Vargova T. & Busova N.: Innovative Trends in Human Resources Management: Evidence for the Health Care System. Marketing and Management of Innovations. 2, 11 (2019).
33. Nariadenie vlády SR č. 330/2018 Z. z., ktorým sa ustanovuje výška sadzieb poplatkov.
34. Zákon č. 582/2004 Z. z. o miestnych daniach a miestnom poplatku za komunálne odpady a drobné stavebné odpady.

Motivation of citizens of the Slovak Republic to separate municipal waste

Michal STRIČÍK, Monika BAČOVÁ, Monika ČONKOVÁ

Faculty of Business Econimics of the University of Econimics in Bratislava with seat in Košice, Tajovského 13, 041 30 Košice, Slovakia

Summary

The paper evaluates the attitudes and activities of citizens regarding the perception of environmental issues and the management of municipal waste, focusing on the factors of motivation and involvement in the field of sorting and management of municipal waste. It also analyzes the impact of citizens' belonging to different categories on the attitudes and activities of respondents in order to distinguish segments of citizens with characteristic thinking and behavior, for which an incentive campaign, management or legislative specifications can be individually tailored. Based on the results of a questionnaire survey conducted in 2018 within the Slovak Republic and a long-term study of the issue, we propose relevant measures that would contribute to a gradual reduction of municipal waste generation and intensify the level of its sorting. Among the most important factors, according to the survey, that motivate citizens to a higher level of municipal waste separation, are especially education and training in this area, legislative sanctions for those who do not sort municipal waste and financial motivation of those who separate municipal waste.

Keywords*: waste recovery, municipal waste sorting, sustainable development, citizens' motivation*

Poznámka redakce (hlavně) pro čtenáře z České a Slovenské republiky:

Autoři článku některé připomínky recenzentů přijali a článek upravili a doplnili o další informace. Nicméně s některými uvedenými tvrzeními a doporučeními jeden z recenzentů nadále nesouhlasí. Týká se to zejména účinnosti systémů PAYT a zavedení zálohového systému pro PET lahve a nápojové plechovky.

Vzhledem k tomu, že se na toto téma vedou již dlouho odborné diskuse, rozhodl jsem se příspěvek přesto zařadit a doplnit jej citací z recenzentova vyjádření:

„…*Doporučení vázat tyto systémy (systémy PAYT) na množství produkovaných vytříděných odpadů, resp. podíl vytříděných odpadů z domácností, není vhodné. Ze zkušeností v ČR i v zahraničí vyplývá, že finanční motivace pro obyvatele je funkční právě ve vazbě na omezení produkce směsných KO (zde je*

ale potřeba zajistit kontrolovatelnou aplikaci motivačního systému), ale nemá žádný zásadní vliv na zvýšení produkce vytříděných využitelných odpadů. Jednak to může vést k tomu, že někteří občané v enormní snaze získat slevu/odměnu do „svých" vytříděných odpadů dodávají i odpady přemístěné z veřejné sběrné sítě nebo jiných zdrojů. Dalším aspektem je, že systém založený na množství vytříděných složek popírá princip předcházení vzniku odpadů. Domácnosti, které produkují pouze minimum odpadů, nevytřídí dostatečné množství k získání slevy/odměny. Dalším aspektem jakýchkoliv motivačních systémů zůstává fakt, že poplatky (alespoň v ČR) za odpad jsou tak nízké, že se případná odměna/sleva pohybuje v řádech desetikorun max. stokorun ročně, což je při běžných nákladech na život domácností zcela zanedbatelné. Na druhé straně zavedení motivačních finančních systémů vždy zatíží celkové náklady na OH obce.

Stejně tak nelze souhlasit s doporučením na zavedení zálohových systémů sběru PET lahví a plechovek. Sám autor souhlasí s tím, že je to otázka na širší diskuzi, přesto ale v článku dál prezentuje názor respondentů za významné doporučení pro úpravu slovenského odpadového hospodářství…"

Autor výše uvedenou výtku komentoval takto:

„Na rozdiel od Českej republiky v súčasnosti na Slovensku nie je možné finančne motivovať tých, ktorí sú na začiatku celého reťazca produkcie komunálneho odpadu (napríklad nižší poplatok)..."

Šéfredaktor

CENTRUM EXPERTŮ

KONZULTAČNÍ SYSTÉM KLASTRU WASTEN, z. s.
V OBLASTI ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ

Špičkový experti vám poskytnou své znalosti a cenné rady v oblasti oběhového hospodářství, materiálového i energetického využití odpadů. Zaručujeme špičkové know-how, zahraniční zkušenosti i výsledky moderního výzkumu.

Naše služby

- ON-LINE KONZULTACE
- OSOBNÍ KONZULTACE
- STUDIE A ANALÝZY
- MĚŘENÍ, TESTOVÁNÍ A OVĚŘOVÁNÍ
- SMLUVNÍ VÝZKUM

Výběr konzultačních témat

- Posuzování životního cyklu
- Ekodesign
  Doc. Ing. Vladimír Kočí, Ph.D., MBA (VŠCHT Praha)
- Energetika a energetické využití odpadů
- Čistírenské kaly a způsoby jejich zpracování
  Ing. Michael Pohořelý, Ph.D. (VŠCHT Praha)
- Termický rozklad a termická depolymerizace materiálů
  Doc. RNDr. Miloslav Bačiak Ph.D. (ENRESS s.r.o.)
- Financování investic v oblasti odpadového hospodářství
  RNDr. Radek Hořeňovský (Euroforum Group, a.s.)
- Problematika perzistentních organických látek (POP´s) v životním prostředí
  Ing. Tomáš Ocelka, PhD. (E&H services a.s.)
- Inovativní sanační technologie a environmentální analýza
  Ing. Marek Šír, Ph.D. (VŠCHT Praha)

ZEPTEJTE SE EXPERTA NA
http://www.expert.wasten.cz/

EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
OP Podnikání a inovace
pro konkurenceschopnost

KLASTR INOVATIVNÍCH FIREM

v oblasti využití odpadů

WASTen, z.s.
Sídlo: Králova výšina 3132/7,
400 01 Ústí nad Labem
Předseda výboru:
RNDr. Radek Hořeňovský
Mob.: +420 732 747 993
E-mail: office@wasten.cz

www.wasten.cz