



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

**ANALÝZA PŮSOBENÍ MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ NA
STAVEBNÍ HMOTY**

ANALYSIS OF EMW RADIATION ON CONSTRUCTION SUBSTANCES

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. et Ing. Ing. David Průša

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. KAREL ŠUHAJDA, Ph.D.

BRNO 2024

Poděkování

Rád bych poděkoval zejména svým dvěma kolegům, školitelům, rádcům a akademickým vzorům za pomoc a vedení během mého doktorského studia – panu prof. Stanislavu Šťastníkovvi a panu doc. Karlu Šuhajdovi. Obou si velice vážím a přál bych všem studentům mít takové vedení, jaké jsem měl já.

Další velké díky patří Bohu, mé rodině, zejména babičce, dále mé partnerce Anetě za trpělivost a Kateřině za pomoc kdykoli bylo potřeba. Poslední důležitý kolega, kterého si dovolím zmínit je Tomáš Žajdlík, bez kterého by řada našich publikací nevyšla a vždy byl důležitou součástí týmu.

Děkuji, kolegové.

A sobě. Děkuji zejména a hlavně sobě, protože je potřeba obrovská vůle, tvrdohlavost a síla studovat doktorský program a zvládnout ho tak dobře, jak jsem to zvládnul právě já.

V Brně dne 11. 12. 2023

Ing. et Ing. Ing. David Průša
autor práce

Obsah

1	Úvod a cíle práce	5
2	Aktuálnost tématu	6
3	Vlhkostní režim stavebních hmot.....	8
3.1	Obecné poznatky o vlhkostních vlastnostech stavebních látek	8
4	Mikrovlnné záření.....	10
5	Vymezení problému a stanovení cíle práce.....	15
5.1	Vymezení problémů	15
5.2	Vymezení cílů	16
5.3	Experimentální program.....	17
6	Experimentální program 1	18
6.1	Urychlování tuhnutí betonových směsí.....	18
6.1.1	Hlavním cílem práce je ověření možnosti využití mikrovlnného záření při tuhnutí betonu.....	19
6.2	Materiály a metody	21
6.3	Výsledky experimentů a diskuze.....	23
6.4	Závěr.....	24
7	Experimentální program 2.....	25
7.1	Vysoušení vlhkosti ze stavebních hmot.....	25
7.2	Materiály a metody	26
7.3	Postup experimentálních prací	26
7.3.1	Fyzikální a mechanické vlastnosti cihel	27
7.3.2	Měření rychlosti ultrazvukových pulzů	27
7.4	Výsledky experimentů a diskuze.....	28
7.5	Závěr.....	30
8	Souhrnný závěr	32
9	Zdroje.....	33
10	Seznam publikací autora.....	37
10.1	2023.....	37
10.2	2022.....	37

10.3	2021.....	38
10.4	2020.....	39
10.5	2019.....	39
11	Práce autora na projektech	40
12	Užitné vzory.....	40

1 Úvod a cíle práce

Vlhkostní problematika ve stavebnictví je dnes stále aktuální téma a tvoří jednu z nejvíce obtížných oblastí v tomto odvětví. Odstranění vlhkosti ze stavebních látek a konstrukcí je obecně nazýváno jako „doplňková sanační metoda“. Samotné zabránění difuze vlhkosti do hmot a konstrukcí je pak sanace. Hlavním důvodem pro odstranění vlhkosti ze stavebních hmot a konstrukcí je v závažné změně vlastností daných materiálů, jak fyzikálních, tak mechanických.

V současné době je známá celá řada metod pro odstranění vlhkosti ze stavebních hmot a konstrukcí. Je ovšem žádoucí vyvíjet stále účinnější a pro praxi ekonomičtější a ekologičtější varianty. Základním kritériem je zpravidla rychlost a účinnost zařízení a dále také ekonomická náročnost provozu a nákladů na pořízení přístrojového vybavení.

Předložená disertační práce je zaměřena na oblast využití mikrovlnného záření ve stavební i laboratorní praxi, a to nejen jako doplňková sanace stavebních hmot, ale i jako potenciální urychlovač tuhnutí látek.

Metoda mikrovlnného vysoušení patří mezi nejrychlejší a nejefektivnější způsoby odstranění vlhkosti ze stavebních materiálů a konstrukcí. Tato technologie je sice známa již delší dobu, avšak kvůli nedostatečnému povědomí o ní není ve stavební praxi využívána zásadně. Omezené povědomí o základních principech mikrovlnného vysoušení, obavy o zdravotní rizika spojená s mikrovlnným zářením a vyšší cena mikrovlnných vysoušecích generátorů jsou překážkou pro masový rozvoj této metody. V důsledku toho existuje omezený zájem firem o využití mikrovlnné radiace pro sušení staveb, a zároveň i malá informovanost projektantů a stavitelů v této oblasti. Tato kombinace faktorů brání v širším uplatnění mikrovlnného vysoušení ve stavebnictví a omezuje jeho celkový rozvoj.

Hlavním cílem disertační práce je analýza působení mikrovlnného záření na stavební hmoty, a sice ve dvou úrovních. Jednou je analýza působení mikrovlnného záření na fyzikální a mechanické charakteristiky stavebních hmot, případně stavebních konstrukcí vystavených mikrovlnnému záření. Druhou úrovní je analýza působení mikrovlnného záření na čas hydratace, tuhnutí a tvrdnutí a následné fyzikální a mechanické charakteristiky stavebních hmot. První část práce je rešeršní, obsahuje celkem 6 kapitol, kde je popsána teorie o šíření tepla, vlhkosti a mikrovlnném záření využívané ve stavební praxi. Druhá část práce je rozdělena na **dvě hlavní kapitoly** a je věnována problematice působení mikrovlnného záření stavební hmoty, a to na čerstvé směsi se silikátovou pojivovou složkou a na keramické zdící prvky.

Průběh experimentální části je členěn v obou případech stejným způsobem, na stejné kapitoly.

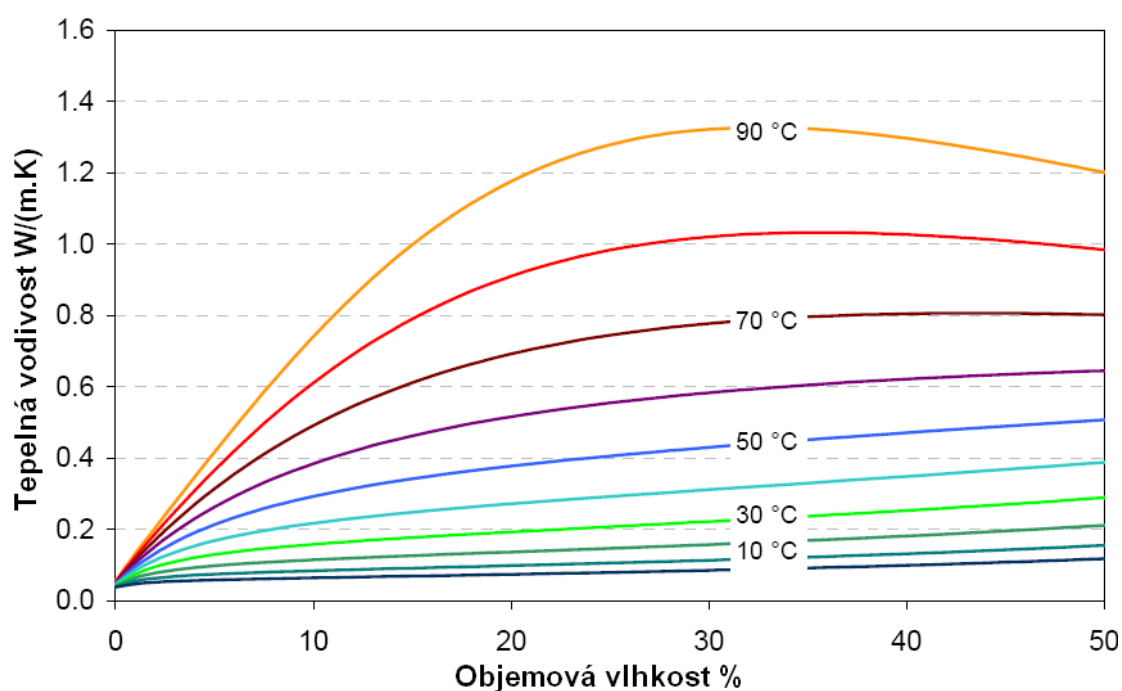
První experiment se zabývá problematikou využití mikrovlnného záření na čerstvé směsi betonové směsi.

Byly vytvořeny dvě sady vzorků se silikátovým pojivem, přičemž proces tuhnutí a tvrdnutí probíhal u první sady na vzduchu. u druhé sady vzorků byl proces tuhnutí urychlen pomocí mikrovlnného záření.

Druhý experiment se zabývá problematikou využití mikrovlnného záření na cihelné prvky a na změnu jejich mechanických a fyzikálních parametrů po expozici mikrovlnným zářením.

2 Aktuálnost tématu

Zásadní vliv na mechanické vlastnosti a fyzikálních vlastnosti stavebních materiálů má zejména vlhkost a teplota. Se zvyšujícím se množstvím vlhkosti stavebních hmot, konstrukcí a dílců se snižují jejich mechanické vlastnosti a tepelně technické vlastnosti (součinitel tepelné vodivosti λ). Změnu součinitele tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti a teplotě můžeme vidět na obrázku 1., kde jsou hodnoty součinitele tepelné vodivosti obecného materiálu vysazeny v izotermách a v závislosti na vlhkosti materiálu.^{1, 2}



¹ Šuhajda, K. Analysis of Interaction of Microwave Radiation with Moisture in Porous Building Materials. Habilitation Thesis, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, 2016.

² Ochs, Fabian and H. M. Müller-Steinhagen. "Temperature and Moisture Dependence of the Thermal Conductivity of Insulation Materials." (2005).

Obrázek 1. Tepelná vodivost minerální vlny v závislosti na objemové vlhkosti se střední teplotou jako parametrem podle modelu vrstev²

Dalším možným a významným problémem, který přímo souvisí s vlhkostí stavebních hmot a konstrukcí, je případné napadení biologickou korozí.

V zásadě se jedná o vegetaci mikroorganismů na vlhkých konstrukcích. Většinou se jedná o mikroskopické houby, plísně, ale mohou zde vznikat i dřevokazné houby.

Plísně významně nedegradují stavební materiály a konstrukce nicméně zcela zásadně a negativně ovlivňují vnitřní mikroklima objektu – uvolňují do prostoru své výtrusy (spory slouží k nepohlavnímu rozmnožování a přežití v nepříznivých podmínkách na dlouhou dobu).

Tyto výtrusy pak mohou způsobovat alergické reakce osob, které obývají napadené prostory a v horším případě i rakovinu.¹



Obrázek 2. Fotografie plísňe v koutě místnosti³



Obrázek 3. Fotografie plísňe pod mikroskopem⁴

Dřevokazné houby naopak degradují mechanické vlastnosti napadených konstrukcí, což může mít za následek následnou destrukci konstrukce. Význam vysoušení konstrukcí a hmot je dále umocněn tím, že mikrovlnná radiace má schopnost eliminovat tyto organismy při vysoušecím procesu.¹

³ Jak vyvětrat plíseň. Online. Naše Hobby. 2020. Dostupné z: <https://www.nasehobby.cz/jak-vyvetrat-plisen/>.

⁴ DOSEDĚLOVÁ, Adriana. Víme, jak vyvětrat plíseň. Online. Český kutil. 2019. Dostupné z: <https://ceskykutil.cz/clanek-22187-vime-jak-na-plisen-v-byte>.



Obrázek 4. Fotografie dřevokazné houby na dřevěném stropu⁵

3 Vlhkostní režim stavebních hmot

Důležitým faktorem, který má zásadní vliv na rozhodování o vhodnosti použití stavebních materiálů a konstrukcí v oblasti stavebnictví, je úroveň vlhkosti. Vliv vlhkosti má výrazný dopad na většinu mechanických a fyzikálních vlastností stavebních materiálů a stavebních konstrukcí. Co se týče mechanických vlastností, ovlivňuje zejména zpracovatelnost, pevnost, odolnost proti mrazu a životnost stavebních materiálů. z hlediska fyzikálních vlastností má zejména v dnešní době velký význam pro sledování tepelně-technických charakteristik, které mají význačný dopad na životní prostředí. Materiály s nadměrnou vlhkostí jsou také náchylné k biologické korozi, zejména v případě výskytu plísní.

3.1 Obecné poznatky o vlhkostních vlastnostech stavebních látek

Stavební materiály zpravidla nejsou zcela suché, s výjimkou některých specifických případů. Voda proniká do těchto materiálů již během výrobního procesu, dále během skladování a vlivem klimatických podmínek a mikroklimatu se do nich dostává prostřednictvím difuze vodních par, transmise, kapilárního vzestupu, nasákavosti a sorpce.

⁵ RUBEŠOVÁ, Marie. Dřevokazné houby – a jak na ně. Online. Chatař chalupář. 2019. Dostupné z: <https://www.chatar-chalupar.cz/drevokazne-houby-%E2%80%93-a-jak-na-ne/>

Ve stavební praxi se voda vyskytuje v různých skupenstvích, konkrétně ve formě ledu, kapaliny a vodní páry. Nejvíce jsou vlhkosti vystaveny vnější stavební konstrukce, zejména obvodové stěny a střechy. Konstrukce, které nejsou vystaveny teplotním nebo vlhkostním rozdílům a nemají přímý zdroj vlhkosti, jsou naopak méně citlivé na změny vlhkosti.

Pro správný návrh opatření k eliminaci vlhkosti ve stavebních konstrukcích je nezbytné pochopit principy a chování vody v těchto konstrukcích. Klíčovými vlhkostními vlastnostmi jsou rovnovážná vlhkost (sorpce), nasákavost, kapilární vzestup, difuze vodních par a vodivost vlhkosti.

Vlhkost stavebního materiálu se týká obsahu vody v různých formách (pevná, kapalná, plynná) a má významný vliv na mnoho mechanických a fyzikálních vlastností těchto materiálů. Množství vlhkosti v cihelném zdivu se klasifikuje podle normy ČSN P 73 0610⁶ do různých stupňů podle tabulky 1.

Tabulka 1. Stupeň vlhkosti zdiva⁶

Stupeň vlhkosti	Vlhkost zdiva u_m v %
Velmi nízká	$u < 3$
Nízká	$3 < u < 5$
Zvýšená	$5 < u < 7,5$
Vysoká	$7,5 < u < 10$
Velmi vysoká	$u > 10$

Vlhkost stavebního materiálu je ovlivňována vlhkostí okolního prostředí, které materiál obklopuje. Za stabilních teplotních a vlhkostních podmínek vytváří stavební materiál rovnovážnou (sorpční) vlhkost, která odpovídá okolní vlhkosti vzduchu.

Vlhkost stavebního materiálu během své životnosti podléhá vlivům mnoha faktorů a je proto proměnlivá. Vlhkost, kterou má stavební materiál během výrobního procesu, se nazývá výrobní vlhkost. Po ukončení výrobního procesu se tato výrobní vlhkost postupně mění, buď se zvyšuje nebo snižuje v závislosti na okolních klimatických podmínkách a vnitřním prostředí, až dosáhne stabilního stavu, který se nazývá ustálená vlhkost.^{6, 7}

⁶ ČSN P 73 0610 (730610) Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva – Základní ustanovení. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2000.

⁷ MRLÍK, F. - Vlhkostné problémy stavebních materiálů a konstrukcí, 1. vyd., Alfa, Bratislava 1985, ISBN #9955.

4 Mikrovlnné záření

Počátky využívání mikrovlnného záření sahají do první poloviny 20. století, ačkoli jeho existenci předpověděl již v roce 1865 James Clerk Maxwell⁸. Mezi prvními popsal princip oscilace magnetronu v roce 1924 profesor Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze August Žáček, v zahraničním časopise byl jeho objev publikován v roce 1928 a od té doby je považován za vynálezce magnetronu.⁹ Teprve na konci války a po ní se začalo vážněji hovořit o mikrovlnném ohřevu a jednou z nejdůležitějších osobností, které se na něm podílely, byl Percy L. Spencer, který se zabýval spotřebitelskými a komerčními mikrovlnnými troubami. Svůj první patent na mikrovlnný ohřev potravin podal v říjnu 1945. Jeho spolupracovníci popisují tento objev jako postupný proces pokusů a omylů, kdy se prováděly experimenty, při nichž například praskala kukuřice nebo vybuchovala vejce. Percy Spencer pracoval pro společnost Raytheon, kde se soustředil především na vynález mikrovlnné trouby, ale i další společnosti se zabývaly výzkumem mikrovlnného záření, jen se více soustředily na průmyslové aplikace; například v roce 1947 byl publikován článek, který se zabýval urychlováním procesů pomocí mikrovln.¹⁰ Později, v 60. a 70. letech, pokročil vývoj mikrovlnné technologie natolik, že se začaly objevovat první mikrovlnné trouby pro domácnosti. Dnes má mikrovlnnou troubu téměř každá domácnost a princip mikrovlnného ohřevu se používá i v mnoha dalších odvětvích mimo potravinářství¹¹. Široké uplatnění našel například v lékařství¹², ve zmíněném potravinářském průmyslu¹³, v armádě¹⁴ a také ve stavebnictví¹⁵.

V tomto odvětví již byla provedena řada studií, které potvrdily možnost využití mikrovln pro sušení stavebních materiálů^{16,17,18,19}.

⁸ Maxwell, J.C. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* **1865**, 155, 459–512

⁹ The 70th birthday of Prof. Dr. August Žáček. *Czech J. Phys.* **1956**, 6, 204–205.

¹⁰ Kinn, T.P.; Marcum, J. Possible Uses of Microwaves for Industrial Heating. *Prod. Eng.* **1947**, 18, 137–140.

¹¹ Osepchuk, J.M. A History of Microwave Heating Applications. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **1984**, 32, 1200–1224.

¹² Gartshore, A.; Kidd, M.; Joshi, L.T. Applications of Microwave Energy in Medicine. *Biosensors* **2021**, 11, 96.

¹³ Guzik, P.; Kulawik, P.; Zajac, M.; Migdał, W. Microwave applications in the food industry: An overview of recent developments. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2022**, 62, 7989–8008.

¹⁴ Hoehn, J.R. Defense Primer: Military Use of the Electromagnetic Spectrum. Library of Congress. Congressional Research Service 2022, Report IF11155, Version 15. Available online: <https://crsreports.congress.gov/product/details?prodcode=IF11155>

¹⁵ Procházka, M.; Sobotka, J.; Šuhajda, K.; Novotný, M. Microwave radiation and its application on construction materials. *Eng. Struct. Tech.* **2016**, 8, 150–156.

¹⁶ Makul, N. Effect of low-pressure microwave-accelerated curing on the drying shrinkage and water permeability of Portland cement pastes. *Elsevier* **2020**, 13, e00358.

¹⁷ Kvapilova, V. Evaluation of microwave drying effects on historical brickwork and modern building materials. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2020**, 867, 012026.

¹⁸ Kvapilova, V.; Suhajda, K. Possibility of Using Microwave Radiation for Rehabilitation of Historical Masonry Constructions. *Key Eng. Mat.* **2020**, 868, 119–126.

¹⁹ Tauhiduzzaman, M.; Hafez, I.; Bousfield, D.; Tajvidi, M. Modeling Microwave Heating and Drying of Lignocellulosic Foams through Coupled Electromagnetic and Heat Transfer Analysis. *Processes* **2021**, 9, 2001.

Mikrovlny jsou součástí elektromagnetického záření s frekvencí mezi 300 MHz a 300 GHz, což odpovídá vlnové délce mezi 1 m a 1 mm. Pro průmyslové účely jsou povoleny vyšší frekvence, ale ve stavebnictví byla celosvětově používaná frekvence 2,45 GHz s odpovídající vlnovou délkou 12,2 cm.

Mikrovlny patří do širokého spektra elektromagnetických vln, které zahrnuje také například oblast viditelného světla. Jejich chování popisují Maxwellovy rovnice. Platí pro ně, že vektory charakterizující magnetické a elektrické pole jsou v každém bodě a v každém okamžiku k sobě kolmé a oba jsou kolmé ke směru pohybu vlny. Jejich amplitudy mají konstantní poměr a ve vakuu se elektromagnetické vlny pohybují rychlostí světla, takže platí vztah:

$$c = l \cdot f$$

kde c je rychlost světla ve vakuu,

l je vlnová délka,

f je vlnová frekvence^{29, 20}.

Mikrovlnné záření způsobuje ohřev a molekuly se v elektrickém poli orientují podle své polarizace. Při kontaktu mikrovlnného záření s molekulami vody dochází k transformaci elektromagnetické energie a ohřevu. Následuje ohřev stavebních materiálů.²⁸

Mikrovlny spadají do oblasti elektromagnetických vln s nižší frekvencí než sluneční záření, takže nezanechávají žádné zbytkové záření, které by bylo zdraví škodlivé. Používání mikrovlnných zařízení je zcela bezpečné a k jakémukoli poškození zdraví může dojít pouze při přímém ozáření z několika cm po dobu alespoň několika minut, ať už provedeném úmyslně, nebo nesprávnou manipulací se zařízením.²⁹

Největší riziko pro lidské zdraví představuje příliš silné mikrovlnné záření. Používání mikrovlnných zařízení se zářící vyzařujícími takové elektromagnetické záření venku představuje vážné nebezpečí pro osoby v oblasti s vysokou hustotou mikrovlnné energie. Povolené úrovně intenzity elektromagnetického pole v pásmu 2,45 GHz jsou stanoveny předpisy EU, včetně směrnice 2004/40/ES a doporučení 1999/510/ES, a také předpisy pro jednotlivé země. Předpisy obvykle stanovují přípustnou intenzitu elektromagnetického pole (od $7 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ do $61 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$) nebo hustotu ve wattch (od $0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ do $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).

²⁰ Sobotka, J.; Šuhajda, K.; Jiroušek, Z. Microwave Theory in Construction Practice. TZB-Info 2017. Available online: <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/15568-mikrovlnna-teorie-ve-stavebni-praxi>

Základní teorie elektromagnetického pole byla založena na řadě fyzikálních zákonů vycházejících z experimentů a poznatků spojených se jmény jako Coulomb, Savart, Ampere a Faraday. Pro rozvoj teorie měly zásadní význam Faradayovy práce, zejména objev elektromagnetické indukce, a práce Maxwella, který po objevu pojmu výtlačného proudu vypracoval model elektromagnetického pole.²¹

Obecné elektromagnetické pole, ať už přírodní nebo vytvořené člověkem, je nestacionární (existuje v něm stálá časová proměnlivost). Proměnlivost pole lze často považovat za okrajovou nebo pomalou. Po tomto zjednodušení lze pole rozdělit na čtyři typy: (a) statické pole, kde se všechny náboje považují za klidové; (b) stacionární pole generované náboji, které tvoří stacionární proudy; (c) kvazistacionární pole, které je zjednodušením obecného nestacionárního pole, protože se zde nezohledňuje tzv. posunový proud proti volným proudům elektronů; a (d) nestacionární pole, tj. obecné elektromagnetické pole³⁴.

Ve stavebnictví existuje mnoho aplikací mikrovlnné energie. Používá se k vysoušení stavebních materiálů a konstrukcí¹, k urychlení tuhnutí směsí²², ke sterilizaci biotických škůdců²³, nebo dokonce k měření vlhkosti.²⁴

Zahřívání materiál je vystaven vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli, které způsobuje polarizaci molekul, vodivost a magnetické procesy. Vnitřní energie molekul se postupně zvyšuje, což způsobuje zahřívání materiálu. Při dokonalém mikrovlnném ohřevu je rozložení intenzity mikrovlnného pole v dané oblasti zcela rovnoměrné a teplo vzniká rovnoměrně v celém objemu materiálu, ale v reálné situaci tomu tak není.

Přítomnost vln závisí na konstrukci použitého zařízení a na typu materiálu uvnitř ohřívací komory. Množství absorbované energie se liší podle velikosti, tvaru, dielektrické konstanty a permitivity materiálu. Kromě těchto vlastností samotného zahřívání objektu jsou důležité zejména frekvence a intenzita elektromagnetického pole. Teplo vzniklé v předmětech se šíří do okolí přenosem tepla. Působí-li mikrovlnná energie na materiál příliš dlouho, může dojít k přehřátí a poškození objektu.²⁷

Jednou z výhod mikrovlnného záření je selektivní ohřev. Složky byly zahřívány podle své schopnosti absorbovat elektromagnetickou energii, proto byla zahřívána především ta nejvíce absorbující, což je obvykle volně vázaná voda. Tato složka pak ohřívá ostatní

²¹ Novotný, M.; Šuhajda, K.; Sobotka, J.; Gintar, J.; Dová, E.S.; Mádl, M.; Jiroušek, Z. Use of microwave radiation in building industry through application of wood element drying. *Wood Res.* **2014**, 59, 389–400

²² Průša, D.; Šťastník, S.; Šuhajda, K. The possibilities of using microwave radiation to accelerate the solidification of mixtures consisting of a polymer matrix binder and a waste thermal insulation filler. *AIP Conf. Proc.* **2022**, 2488, 020023.

²³ Novotný, M.; Škramlík, J.; Šuhajda, K.; Tichomirov, V. Sterilization of Biotic Pests by Microwave Radiation. *Procedia Eng.* **2013**, 57, 1094–1099.

²⁴ Kääriäinen, H.; Rudolph, M.; Schaurich, D.; Tulla, K.; Wiggenhauser, H. Moisture measurements in building materials with microwaves. *NDT E Int.* **2001**, 34, 389–394.

materiálové složky, což vede k důkladnějšímu ohřevu objektu. Mikrovlnná energie dokáže materiál ohřát účinněji než běžný ohřev z povrchu. Využívala se pro sušení různých materiálů a urychlení tvrdnutí směsí. Mezi nevýhody této metody patří vyšší spotřeba energie, možné změny mechanických vlastností předmětu a možné lokální přehřátí v důsledku nestejnoměrnosti mikrovlnného pole a nehomogenity ohřívaného materiálu. v neposlední řadě je zde také požadavek na odbornou způsobilost při práci s EMW zářením.^{27, 30}

Proces mikrovlnného sušení/tvrdnutí lze rozdělit do čtyř fází. První z nich je vlastní ohřev molekul vody ve spojení se sekundárním ohřevem materiálu. Druhá fáze spočívá v odpařování vody obsažené v povrchové vrstvě materiálu. Během třetí fáze se objem vody zvětšuje v důsledku jejího zahřívání. To způsobuje zvýšení tlaku, který se šíří všemi směry, včetně povrchu materiálu, a nutí ohřátou vodu k vytlačení na povrch. Poslední fází je postupné ochlazování. Voda na povrchu materiálu se průběžně odpařuje. Rozdíl v obsahu vlhkosti na povrchu a v hloubce materiálu má za následek rozdíl v parciálním tlaku, který umožňuje transport vlhkosti k povrchu. Odpařování vlhkosti z povrchu sušícího se materiálu vyžaduje značné množství tepla. v důsledku toho se povrch materiálu a okolní vzduch ochlazují.²⁷

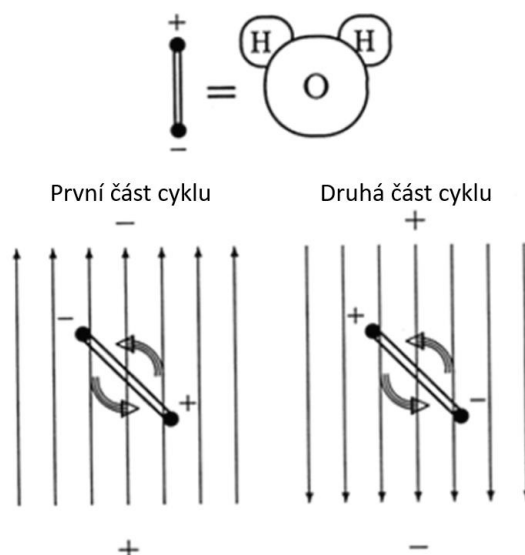
Rychlost sušení ovlivňují následující faktory: teplotní gradient, obsah vlhkosti v povrchové vrstvě, relativní vlhkost okolí sušícího se materiálu, schopnost materiálu rozvádět vodu ze svého jádra na povrch, povrchová úprava sušeného materiálu a tepelná vodivost sušícího se materiálu.^{27, 30}

Mikrovlny se můžou šířit v různých médiích, samozřejmě s nižší rychlostí než ve vakuu. Ve vzduchu je tento rozdíl malý, jiná je situace ve vodě, kde se mikrovlny šíří 9krát nižší rychlostí, a v důsledku toho se i vlnová délka devětkrát zkrátí na 1,36 cm. Při přechodu mikrovln z jednoho prostředí do druhého dochází na rozhraní k odrazovým a lomovým jevům stejně jako u světla. v podstatě jde o kombinaci tří případů – část energie mikrovln se od povrchu odráží, část v látce absorbuje nebo materiálem prochází.

Při absorpci mikrovln v materiálu se snižuje amplituda vlny. Míra absorpce je charakterizována pomocí penetrační hloubky, což je vzdálenost, kterou mikrovlnné záření v materiálu musí projít, aby jeho intenzita klesla na 13,53 % původní hodnoty.

Pokud použijeme k popisu mikrovln de Broglieho vztah, zjistíme, že na ně lze pohlížet také jako na částice s energií 0,00001 eV, což je energie velmi malá a nestačí ani k rozbití nejslabší chemické vazby. Odtud tedy schopnost mikrovln ohřívat neplatí. Pro ohřev se využívá jevu, kdy permanentní dipóly se v stejnosměrném elektrickém poli orientují do energeticky nepříjemnější polohy.

Pokud dojde k přeplování pole, snaží se molekuly nesoucí náboj opět otočit do nejvhodnější pozice. Snaha vyrovnat se s měnícím se elektrickým polem mikrovln vede k rotačnímu pohybu, při němž dochází ke kolizím a tření se sousedními molekulami a ke vzniku tepla. Nejběžnější molekulou, jejíž permanentní dipólový moment vede k její rotaci při ozařování mikrovlnami je voda, která je zároveň ve značném množství přítomna v biologických materiálech a způsobuje tak jejich ohřev v mikrovlnné troubě.^{21, 22, 26}



Obrázek 14. Schéma molekuly vody se silovým účinkem pole mikrovlnné energie^{25, 26}

Ohřívání materiálů se vkládá do vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, kde dochází k polarizaci molekul, vodivostním mechanismům a k magnetickým efektům uvnitř materiálů. Zvyšuje se vnitřní energie molekul a tím se materiál postupně ohřívá.

Při dokonalém mikrovlnném ohřevu je rozložení intenzity mikrovlnného pole zcela rovnoměrné v celé ohřívací oblasti a teplo vzniká stejnoměrně v celém objemu materiálu. Výskyt vlnění je závislý na konstrukci zařízení a na materiálech uvnitř ohřívací komory. Míra absorbovaného výkonu závisí na velikosti, tvaru, na dielektrické konstantě a permitivitě látky. Kromě samotného předmětu je důležitá zejména frekvence a intenzita elektromagnetického pole. u řady materiálů je poměrná permitivita závislá také na teplotě i na frekvenci, ale u většiny materiálů narůstá permitivita s frekvencí. Teplo, které se v ohříváných objektech generuje, se prostupem tepla šíří do okolí.

Pokud ponecháme mikrovlnnou energii na materiál působit příliš dlouho, může dojít k přehřátí či poškození ohřívaného předmětu.

Mikrovlnná energie se využívá v mnoha odvětvích lidské činnosti; nejen k ohřevu potravin, ale i například k vysoušení knih či tkanin, restaurování uměleckých děl, tavení skla a v mnoha dalších technologiích.^{21, 26}

Mezi výhody mikrovlnného záření patří zejména tzv. selektivní ohřev. Ohřívá se pouze složka, která absorbuje větší množství elektromagnetické energie (většinou se jedná o volně vázanou vodu). Takto se zajistí ohřátí vrstvy materiálu do větší hloubky od povrchu. Tato ohřátá složka pak dále ohřívá další části materiálu.

Mikrovlnami lze prohrát materiál účinněji než pouhým ohřevem od povrchu, proto se této techniky používá k vysoušení různých materiálů. s tím souvisí i případné urychlení vytvrzení čerstvých pojivových směsí, jak je popsáno v tomto příspěvku dále. Optimální výkon zdroje mikrovlnného záření a dobu, po kterou bude působit tak, aby co nejméně mikrovlnný výkon poškodil krystalovou mřížku pojivové složky směsi.

Nevýhodou je již zmíněná vyšší energetická náročnost, v případě cementových kompozitních materiálů pak jiné mechanické vlastnosti a možná lokální přehřátí v důsledku mikrovlnného pole i samotného materiálu. v neposlední řadě pak také požadavek na odbornou způsobilost s EMW zářením.^{22, 25, 26}

5 Vymezení problému a stanovení cíle práce

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1., v Evropě je v současné době celá řada metod, které slouží jako doplňková sanace. Vzhledem ke stále vyšším nárokům na tyto metody je vhodné a žádoucí hledat metody nové a zajistit tak časovou a ekonomickou úsporu.

Vysoušení hmot a stavebních konstrukcí musí být zejména rychlé, efektivní a ekonomicky výhodné. Tyto požadavky splňuje mimo jiné i mikrovlnné vysoušení. Nespornou výhodou této metody je, oproti jiným metodám vysoušení, že působí v celém objemu vysoušeného materiálu či konstrukce.

5.1 Vymezení problémů

Mikrovlnné vysoušecí zařízení představují složité technologie, které se běžně nenacházejí na komerčním trhu. Většinou jsou vyráběny na zakázku různými specializovanými firmami, které se zabývají vývojem těchto sofistikovaných zařízení. Bohužel, společnosti angažované ve výzkumu a vlastním vývoji mikrovlnných vysoušecích zařízení postupně ubývají.

Současně s vývojem výzkumných institucí a vysokých škol se na trhu objevují firmy, které se zaměřují na aplikace mikrovlnného vysoušení. Tyto společnosti často nadhodnocují schopnosti svých zařízení ve snaze získat konkurenční výhodu.

Bohužel, v mnoha případech chybí relevantní informace o parametrech a charakteristikách zařízení, a není jasné, za jakých podmínek byly tyto charakteristiky určeny. Používání mikrovlnného vysoušení bez vlastního ověření těchto parametrů pro konkrétní praktickou aplikaci může být rizikové.

Situace na trhu s aplikacemi mikrovlnného záření pro stavební látky a konstrukce v České republice i v Evropě je zdánlivě vyřešená, ale ve skutečnosti je komplikovaná. Některé firmy prezentují mikrovlnné vysoušení jako účinný a levný způsob odstranění vlhkosti z konstrukcí, ale výzkumné práce na FAST VUT v Brně naznačují opak. Množství vysušené vlhkosti za daný čas, které slibují výrobci, není běžně dosažitelné běžnými komerčně dostupnými mikrovlnnými vysoušeči.

Dalším problémem je nevhodnost mikrovlnného vysoušení v oblastech s kovovými prvky ve zdivu nebo v ozařovaných konstrukcích. Existují také zdravotní obavy ohledně mikrovlnného záření pro osoby pohybující se v jeho blízkosti během vysoušení, což bylo potvrzeno několika studiemi. Bezpečnostní opatření při aplikaci mikrovlnného vysoušení jsou klíčová, ale relevantní informace často chybí.

Navzdory těmto výzvám je mikrovlnné vysoušení efektivní a bezpečné, pokud jsou dodržovány bezpečnostní zásady. Vědecký výzkum zaměřený na praktické ověření účinků mikrovlnného vysoušení různých stavebních materiálů a konstrukcí je klíčovým směrem vývoje. Je však důležité, aby tyto experimenty byly dobře definované a měřily všechny relevantní charakteristiky pro následnou validaci.

5.2 Vymezení cílů

V práci byly stanoveny dva hlavní cíle, které směřovaly k analýze působení mikrovlnného záření na stavební hmoty.

Prvním hlavním cílem je analýza působení mikrovlnného záření na fyzikální a mechanické charakteristiky stavebních hmot, případně stavebních konstrukcí.

Druhým hlavním cílem je analýza působení mikrovlnného záření na čas hydratace, tuhnutí a tvrdnutí a následné fyzikální a mechanické charakteristiky stavebních hmot.

Tyto cíle byly dosaženy prostřednictvím dvou skupin experimentálních programů, zahrnujících studium cihelných zdících prvků a čerstvých směsí se silikátovou pojivovou složkou.

První skupina experimentální činnosti je zaměřená na cihelné zdící prvky, kde byla zkoumána možnost využití mikrovlnného záření pro vysoušení. Tato metoda byla standardně

aplikována při sanaci vlhkého zdiva, ale nebylo zcela známo, jak by vysoušení mikrovlnným zářením ovlivnilo fyzikální a mechanické vlastnosti cihelných prvků. Důležité je podotknout, že experimenty probíhaly na vzorcích cihel označených jako P20. Další experimenty související s touto problematikou, které byly provedeny jako součást dalšího výzkumu, nebyly vzhledem k celkovému rozsahu v této práci detailně publikovány.

Druhá skupina experimentů byla věnována možnostem využití mikrovlnného záření na čerstvé směsi se silikátovou pojivovou složkou, která hydratuje. Je obecně známo, že při vyšších teplotách silikátový hydratovaný materiál tuhne a ztvdne rychleji než materiál tuhý a ztvrdlý běžným způsobem. Přestože bylo známo, že výsledné pevnosti mohou být nižší, provedené experimenty s tímto materiálem měly nejednoznačné výsledky, a proto toto nebylo možné jednoznačně konstatovat. Cílem těchto experimentů bylo sjednotit existující informace a provést další analýzy, včetně RTG analýzy, kde byly zkoumány prvky přítomné během hydratace ve vzorcích.

Výsledky všech experimentů byly integrovány do několika článků, publikovaných v periodikách s vysokým impakt faktorem. Tímto způsobem bylo zajištěno, že široká veřejnost, včetně odborníků, měla přístup k informacím o probíhajícím výzkumu. Tato práce nejenže prezentuje dosažené výsledky, ale také poskytuje platformu pro další rozšíření a zkoumání této oblasti v budoucnu.

5.3 Experimentální program

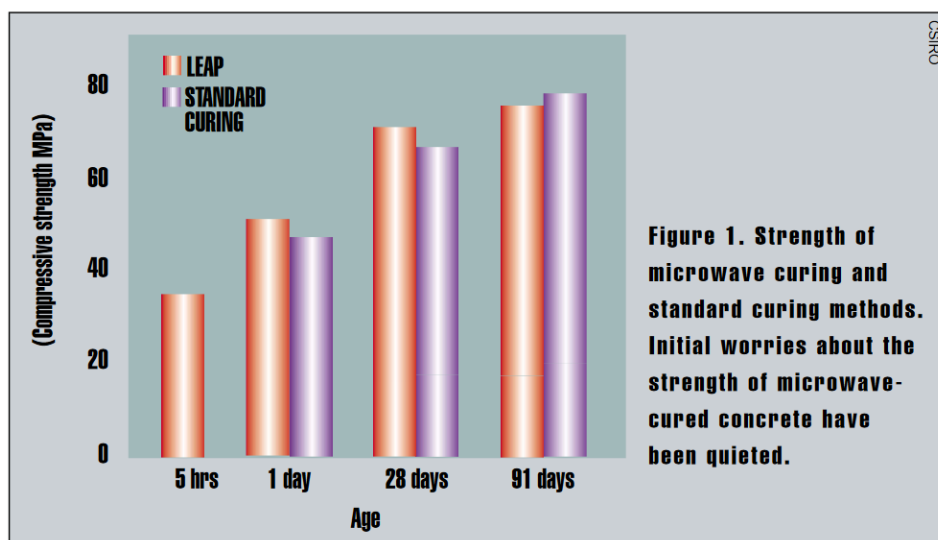
V rámci práce byly provedeny experimenty, týkající se přímo vlivu působení mikrovlnného záření na stavební hmoty, ale nejsou zde podrobněji přímo uvedeny, namísto toho se v práci uvádí dva dokončené experimenty.

Prvotní experimenty zkoumaly například vliv působení mikrovlnného záření na tepelně-izolační hmoty a plastické látky. Tyto experimenty byly řádně sepsány a publikovány v mezinárodních periodikách, ale jedná se o počáteční výzkum, na který autor naváže v budoucnu. Jednalo se například o využití odpadních tepelně izolačních hmot jako plnivo do keramických cihel, optimalizace tvaru cihel, využití mikrovlnného záření pro urychlení tuhnutí pojivové složky z vybrané hmoty, kde jako plnivo sloužily odpadní hmoty atd. Z hlediska práce pak autor předkládá pouze dokončené experimenty s prokazatelnými výsledky, které mohou obohatit stavební praxi o důležité poznatky.

6 Experimentální program 1

6.1 Urychlování tuhnutí betonových směsí

Možné využitím mikrovlnného záření ve stavební praxi může být při tuhnutí kompozitních směsí, například v kompozitech, kde jsou využity silikátové materiály, které hydratují. Konkrétně například urychlení tuhnutí betonu v jeho počátečních fázích a nabytí manipulačních pevností. Takto by byla možnost rychleji dostat betonové dílce z forem a zajistit tak vyšší míru produkce. Pilotní výzkumy proběhly již v roce 2002. Postarala se o ně společnost australská společnost Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) pod vedením Dr. Swee Liang Mak a nazvala tento výzkum Low Energy Accelerated Processing (LEAP). Výsledkem jejich pilotního výzkumu bylo, že lze využít mikrovlnné záření pro urychlení tuhnutí betonu, přičemž rozdíl pevností u referenčních vzorků betonu a vzorků betonu, kde proběhlo urychlení tuhnutí je do 10 % po 28 dnech a po 4 hodinách a 30 min je dokonce dosaženo při vodním součinitel 0,5 zhruba 4násobné pevnosti proti referenčním vzorkům.²⁵



Obrázek 18. Pevnost betonu v tlaku vzorků referenčních, které tuhly na vzduchu a vzorků betonu, kde proběhlo urychlení tuhnutí pomocí mikrovlnného záření²⁵

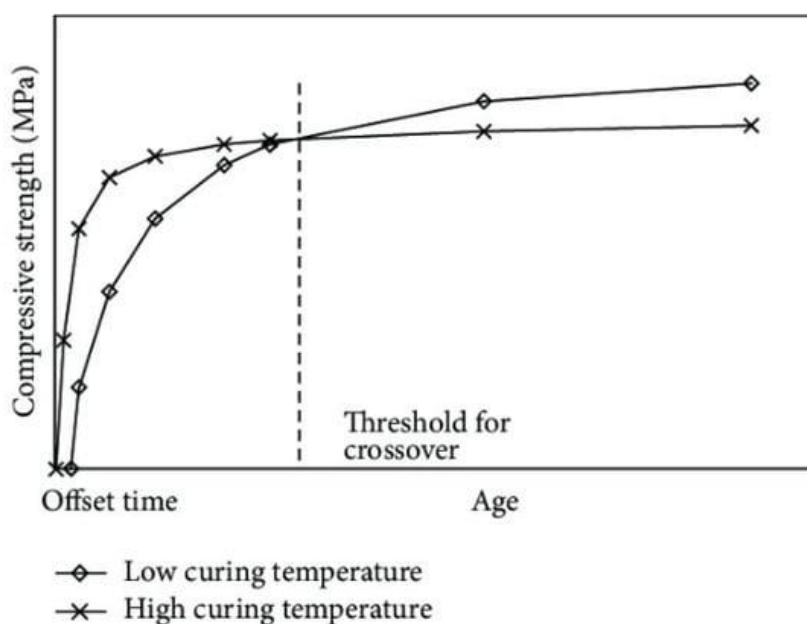
Předložený výzkum navazuje na počátečních, předešlé výzkumy a dále je rozšiřuje zejména o analýzu působení mikrovlnného záření na C-S-H gely při tuhnutí betonu a následně na vlastnosti ztvrdlého betonu.

²⁵Fuhrmann, J.M. Micro-curing. Concrete Construction 2002. Available online: https://www.concreteconstruction.net/_view-ob-460ject?id=00000154-1d54-db06-a1fe-7f5ca5030000

Zkoumány jsou zastoupení jednotlivých minerálů pomocí DTA a RTG analýzy a jejich struktura pomocí mikroskopu. Dále jsou pak metodicky ověřeny výstupy z předcházejících experimentů – ověřeny jsou pevnostní charakteristiky a nasákavost.

6.1.1 Hlavním cílem práce je ověření možnosti využití mikrovlnného záření při tuhnutí betonu.

Důvodem pro tento experiment je snaha urychlit proces tuhnutí tak, aby bylo možno snížit časovou náročnost, kdy produkty musí být uloženy ve formách, než získají manipulační pevnost. Při urychlení tuhnutí a získání manipulační pevnosti dříve by tak byla zajištěna vyšší produkce betonu. Snahy o urychlení procesu tuhnutí betonu v minulosti již proběhly a existuje celá řada způsobů, jak urychlit tento proces. Nicméně výsledné vlastnosti betonu se značně liší od referenčních hodnot, standardně je pevnost betonu, kde proběhlo urychlení tuhnutí, nižší o 20 %.²⁶



Obrázek 19. Graf vývoje pevnosti betonu v důsledku různých počátečních teplot vytvrzování, 2015.²⁷

Kjellsen a Detwiler²⁸ zjistili, že 28denní pevnost v tlaku vzorků betonu, které tuhly při 5 °C je přibližně 80 % pevnosti vzorků odlitých a vytvrzených při 21 °C až 46 °C. Pevnost

²⁶ Sumra Yousuf, Payam Shafigh, Zainah Ibrahim, Huzaifa Hashim, Mohammad Panjehpour Crossover Effect in Cement-Based 462

Materials: A Review. Applied Sciences, 2019, mdpi.com.

²⁷ Yang, K.-H.; Mun, J.-S.; Cho, M.-S. Effect of Curing Temperature Histories on the Compressive Strength Development of High- 464

Strength Concrete. Adv. Mater. Sci. Eng. 2015, 2015, 12.

²⁸ Kjellsen, K.; Detwiler, R. Later-age strength prediction by a modified maturity model. ACI Mater. J. 1993, 90, 220–227.

v tlaku v pozdějším věku bude nižší při vyšších teplotách betonáže. Podle Newmana a Choo²⁹ je pevnost v tlaku v po delší době betonů, které byly vystaveny vyšším teplotám, obecně nižší než pevnost v tlaku standardně vytvrzených betonů a je to způsobeno nižší rychlostí reakce při nižších teplotách. v praxi to znamená, že malty a betony by měly být vytvrzovány delší dobu, aby získaly požadovanou pevnost. Khan a Abbas³⁰ uvádějí, že reakce při zvýšených teplotách poskytuje relativně vysoké pevnosti v raném věku, ale dlouhodobá pevnost a trvanlivost jsou běžně sníženy. Lothenbach a kolektiv³¹ uvádí, že hydratace cementu je silně ovlivněna teplotou.

Vyšší teplota vede hydrataci k vysoké pevnosti v raném stádiu. v pozdějším věku se pevnost cementů hydratovaných při vysoké teplotě snižuje ve srovnání s cementy hydratovanými při pokojové teplotě. Sajedi a Razak³² uvedli, že změny teploty způsobené buď teplem hydratace, nebo změnami vnějšího prostředí výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti, zejména pevnost betonu a malty v tlaku v rané fázi. Kim a kolektiv³³ experimentálními výsledky prokázali, že betony a malty vystavené vysokým teplotám získávají větší pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu v rané fázi, ale nižší pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu v pozdějším věku ve srovnání s betony vystavenými pokojovým teplotám při tuhnutí. Namarak a kolektiv³⁴ uvádí, že zvýšená teplota vytvrzování může urychlit pucolánové i hydratační reakce a dosáhnout větší pevnosti v tlaku v raném věku. v pozdějším věku však malty a betony, které tuhly při vysoké teplotě dosahují pevnosti v tlaku menší než při normální teplotě při tuhnutí.

Podobné chování konstatovali také Ezziane a kolektiv³⁵, přičemž došlo ke snížení pevnosti v tlaku, když byly betony vystaveny vysoké teplotě při tuhnutí s náhradou cementu přírodním pucolánem. Tyto poznatky kontrují výsledky Dr. Swee Liang Mak²⁵, u jehož výzkumu, kde pomocí mikrovlnného záření urychloval tuhnutí betonu, byly výsledky pevností v tlaku vzorků vytvrzených pomocí mikrovlnného záření srovnatelné s výsledky pevností u referenčních vzorků.

²⁹Newman, J.; Choo, B.S. *Advanced Concrete Technology 3: Processes*; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2003.

³⁰Khan, M.S.; Abbas, H. Performance of concrete subjected to elevated temperature. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 2016, 20, 532–543.

³¹Lothenbach, B.; Winnefeld, F.; Alder, C.; Wieland, E.; Lunk, P. Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. *Cem. Concr. Res.* 2007, 37, 483–491.

³²Sajedi, F.; Razak, H.A. Thermal activation of ordinary Portland cement–slag mortars. *Mater. Des.* 2010, 31, 4522–4527.

³³Kim, J.-K.; Han, S.H.; Song, Y.C. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results. *Cem. Concr. Res.* 2002, 32, 1087–1094.

³⁴Namarak, C.; Satching, P.; Tangchirapat, W.; Jaturapitakkul, C. Improving the compressive strength of mortar from a binder of fly ash–calcium carbide residue. *Constr. Build. Mater.* 2017, 147, 713–719.

³⁵Ezziane, K.; Bougara, A.; Kadri, A.; Khelafi, H.; Kadri, E. Compressive strength of mortar containing natural pozzolan under various curing temperature. *Cem. Concr. Compos.* 2007, 29, 587–593.

Jelikož je pojivovou složkou betonu cement, experiment zkoumá a ověřuje vliv působení mikrovlnného záření právě na něj, resp. na CSH gel.³⁶

Je zde tedy možnost dále rozšířit tento výzkum na různé druhy betonu.

6.2 Materiály a metody

Experimentální program proběhnul na několika vzorcích betonu. Kvůli transparentnosti a reprodukovatelnosti jednotlivých experimentů byla směs, která tvořila výsledný beton, vždy stejná. Konkrétně se jednalo o směs, kde byla pojivová složka cement CEM I 42,5 R, plnivo byl sklářský písek a voda. Zastoupení jednotlivých složek směsi bylo v poměru 1:3:0.5.

Hlavním cílem experimentu bylo zjistit vliv působení mikrovlnného záření na čerstvý beton při jeho tuhnutí a tvrdnutí.

Celkem bylo vytvořeno 24 vzorků této směsi, které byly uloženy do ocelových a silikonových forem o vnitřním rozměru 40 x 40 x 160 mm. 24 vzorků tuhlo a tvrdlo standardním způsobem v ocelových formách na vzduchu a 24 vzorků bylo vystaveno působení mikrovlnného záření.

Na 12 z těchto 24 vzorků působilo mikrovlnné záření při tuhnutí čerstvé směsi celkem 30 min a na dalších 12 vzorků působilo mikrovlnné záření po dobu 60 min. Vzorky byly umístěny od generátoru mikrovlnného záření 30 cm, jak je uvedeno v následujícím obrázku.

Tyto vzorky byly dále uloženy ve vodní lázni po dobu 7, 14 a 28 dnů a následně byly provedeny pevnostní zkoušky – pevnost v tlaku a v tahu, zjištění nasákavosti a objemové hmotnosti.

Dále bylo vytvořeno 6 vzorků čerstvých směsí uloženo do kruhových nádob o průměru 80 mm a hloubce 10 mm. 3 z těchto vzorků tuhly a tvrdly standardním způsobem na vzduchu, 3 vzorky byly vystaveny působení mikrovlnného záření. u těchto vzorků bylo po 30 min pomocí lihu zastaveno tuhnutí a byly vystaveny DTA analýze. Cílem bylo zjistit zastoupení jednotlivých slinkových minerálů ve směsích a najít rozdíly při tuhnutí oběma způsoby.

Jednotlivé suroviny byly dávkovány a míchány podle pevně stanoveného postupu. Nejprve bylo vysušeno kamenivo, poté naváženy jednotlivé komponenty, tak aby bylo zajištěn beton, který bude mít stejné vlastnosti pro všechny směsi. Navážené komponenty byly dávkovány do míchačky s nuceným oběhem v pořadí kamenivo a cement. Tato směs se míchala po dobu 90 sekund, což zajistilo vysokou homogenitu suché složky.

³⁶ Průša, D.; Šuhajda, K.; Žajdlík, T.; Svobodová, K.; Šťastník, S.; Hobzova, K.; Novotný, M. The effect of EMW radiation on the solidification of C-S-H gels: its influence on the mechanical and physical properties of solidified cement mixtures. Gels 2023, přijato k publikování

Po zhomogenizování směsi byla dávkována záměsová voda.

Čerstvý beton byl ukládán do forem, které byly vytřeny separačním přípravkem pro snadnější odformování.) Byly použity celkem dva typy forem o vnitřních rozměrech 40 x 40 x 160 mm, a to ocelová a silikonová. Hutnění betonu probíhalo pomocí vibrace – byl využit střešací vibrační stolek pro trámčové trojformy. Celkem bylo vytvořeno 48 vzorků této směsi, které byly uloženy do ocelových a silikonových forem o vnitřním rozměru 40 x 40 x 160 mm. 24 vzorků tuhlo a tvrdlo standardním způsobem v ocelových formách na vzduchu a 24 vzorků bylo vystaveno působení mikrovlnného záření.

Na 12 z těchto 24 vzorků působilo mikrovlnné záření při tuhnutí čerstvé směsi celkem 30 min a na dalších 12 vzorků působilo mikrovlnné záření po dobu 60 min. Vzorky byly umístěny od generátoru mikrovlnného záření 30 cm a 50 cm, jak je uvedeno v obrázku 25.⁵⁶

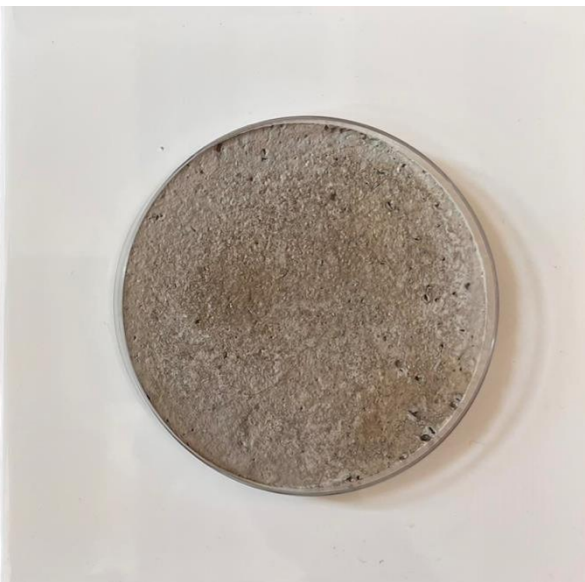
Odformování těles probíhalo vždy do 24 hodin od uložení betonu do forem, tělesa byla čitelně označena a uložena do prostředí ve kterých byla ošetřována. Pro betony byl zvolen jeden společný způsob ošetřování, uložení těles do vodní lázně o teplotě 20 °C.

Na obrázku 26 vidíme vzorek betonu, který tuhnul 30 min standardním způsobem a na obrázku 27 vidíme beton, který tuhnul s využitím mikrovlnného záření.

Na obrázku 28 vidíme vzorek betonu, který tuhnul 60 min standardním způsobem a na obrázku 29 vidíme beton, který tuhnul s využitím mikrovlnného záření.³⁶



Obrázek 26 Fotografie vzorku betonu v kruhové misce, který tuhnul standardním způsobem po 30 minutách tuhnutí³⁶



Obrázek 27 Fotografie vzorku betonu v kruhové misce, který byl vystaven mikrovlnnému záření po dobu 30 min³⁶



Obrázek 28 Fotografie vzorku betonu
v kruhové misce, který tuhnul standardním způsobem
po 60 minutách tuhnutí³⁶



Obrázek 29 Fotografie vzorku betonu
v kruhové misce, který byl vystaven mikrovlnnému
záření po dobu 60 minut³⁶

6.3 Výsledky experimentů a diskuze

Bylo navrženo a vyrobeno celkem 24 vzorků betonu, konkrétně se jednalo o trámce o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, na kterých proběhly pevnostní zkoušky, zkouška nasákavosti a stanovení objemové hmotnosti a dále bylo vytvořeno 6 vzorků čerstvých směsí uloženo do kruhových nádob o průměru 80 mm a hloubce 10 mm. 3 z těchto vzorků tuhly a tvrdly standardním způsobem na vzduchu, 3 vzorky byly vystaveny působení mikrovlnného záření.

Výsledné vlastnosti můžeme vidět v tabulce 9. Označení experimentu č. 1 znamená, že beton tuhnul a tvrdnul standardním způsobem na vzduchu.

Označení experimentu č. 2 znamená, že beton byl vystaven mikrovlnnému záření po dobu 30 minut a následně ihned odformován z formy a po ustálení na pokojovou teplotu byl uložen ve vodní lázni.

Označení experimentu č. 3 znamená, že beton byl vystaven mikrovlnnému záření po dobu 60 minut a následně ihned odformován z formy a po ustálení na pokojovou teplotu byl uložen ve vodní lázni.³⁶

Tabulka 9. Výsledné hodnoty objemové hmotnosti, pevnosti v tahu, pevnosti v tlaku a nasákavosti vzorků po 7, 14 a 28 dnech.³⁶

Vlastnost		7 dnů	14 dnů	28 dnů
Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Experiment 1	2000	1980	2070
	Experiment 2	2010	2040	1950
	Experiment 3	2050	2040	1960
Pevnost v tahu [MPa]	Experiment 1	2,5	2,9	3,7
	Experiment 2	1,8	2,1	3,8
	Experiment 3	1,3	1,4	3,6
Pevnost v tlaku [MPa]	Experiment 1	39	46,5	56,5
	Experiment 2	29,8	36	49
	Experiment 3	17,3	27,5	38
Nasákavost [%]	Experiment 1	9,62	8,56	8,96
	Experiment 2	7,86	9,06	10,59
	Experiment 3	9,26	9,18	10,18

6.4 Závěr

Na základě provedených experimentů a jejich následného vyhodnocení nelze zcela potvrdit tvrzení Dr. Swee Lianga Maka a výsledky jeho experimentu LEAP, který uvádí, že pevnosti v tlaku jsou srovnatelné u referenčních vzorků betonu, které byly vytvrzeny standardním způsobem na vzduchu, a u vzorků, které byly vystaveny mikrovlnnému záření.²⁵

Experiment byl proveden ve třech sadách. v první sadě byly použity vzorky betonu, které byly vytvrzeny standardním způsobem na vzduchu. Ve druhé sadě byly vzorky betonu vystaveny mikrovlnnému záření po dobu 30 minut. Ve třetí sadě byly vzorky betonu vystaveny mikrovlnnému záření po dobu 60 minut.

Zatímco výsledné pevnosti v tahu betonových vzorků jsou po 28 dnech u všech experimentů srovnatelné, po 7 a 14 dnech lze pozorovat trend, kdy pevnost v tahu čerstvého betonu klesá s rostoucí dobou vystavení mikrovlnnému záření.

U výsledných pevností v tlaku pozorujeme tento trend u všech vzorků.

Příčinu tohoto rozdílu ve vlastnostech nacházíme ve vyšší teplotě, které byl beton vystaven, přesně jak uvádí Namarak a kolektiv⁵² a také Ezziane a kolektiv.³⁴

Hodnoty objemové hmotnosti a absorpce lze u všech vzorků považovat za srovnatelné a obecně nelze výsledný vliv mikrovlnné expozice na tyto vlastnosti vzorků jednoznačně určit.

Rentgenová analýza ukazuje, že vzorky obsahují stejné minerály a v přibližně stejném poměru. Obecně nelze říci, že by mikrovlnná expozice měla vliv na zastoupení jednotlivých slíkových minerálů při hydrataci C-S-H gelu.

Výhodou mikrovlnného ohřevu obecně je, že k ohřevu vlhkosti obsažené v porézním systému stavebního materiálu dochází přímo v materiálu; děje se tak prostřednictvím absorpce mikrovlnného záření vlhkostí. Při mikrovlnném ohřevu je dosaženo manipulační pevnosti v relativně krátkém čase a proces výroby betonových dílců lze urychlit.

K dalším výhodám patří, že mikrovlnný ohřev přímo ve stavebním materiálu je rychlý; že mikrovlnné sušení lze aplikovat na širokou škálu stavebních materiálů; a že mikrovlnné zářiče jsou mobilní a snadno ovladatelné.

Mezi nevýhody patří například to, že náklady na pořízení mikrovlnného generátoru jsou vyšší; že mikrovlnné záření je zdraví škodlivé, a proto není vhodné, aby se nacházelo v blízkosti ozařovaného materiálu; a že není možné kontinuální měření teploty v ozařovaném materiálu, protože teplotní čidla jsou na bázi kovů, takže interagují s mikrovlnným zářením.³⁶

7 Experimentální program 2

7.1 Vysoušení vlhkosti ze stavebních hmot

Řešení vlhkosti ve stavebních konstrukcích je jedním z nejaktuálnějších témat ve stavebnictví. Existuje celá řada metod, jak zabránit pronikání vlhkosti do konstrukcí a jak vlhkost ze stavebních materiálů skutečně odstranit. Tyto metody lze dnes považovat za poměrně účinné, je však nutné je dále rozvíjet a přicházet s ekonomičtějšími a zejména ekologičtějšími řešeními. Problémy s vlhkostí ve stavebních materiálech jsou obzvláště závažné, protože voda v nich obsažená výrazně ovlivňuje jejich fyzikální a mechanické vlastnosti. v současné době se v České republice a obecně v Evropě používá více metod odstraňování vlhkosti ze stavebních materiálů, které splňují většinu požadavků dnešní stavební praxe.

Základními kritérii pro jejich použití jsou rychlost a účinnost sušení, ekonomická náročnost procesu, náklady na potřebné vybavení a celková šetrnost metody k životnímu prostředí. Běžně používané metody sušení stavebních materiálů jsou účinné, ale doba sušení může být poměrně dlouhá a jejich použitelnost a vhodnost závisí na druhu stavebního materiálu.

Jedním z přístupů k sušení stavebních materiálů je použití mikrovlnného záření. Tato metoda je známa přibližně od roku 1945, ale ve stavební praxi se v současné době stále ještě příliš nepoužívá. Důvodem jsou vyšší pořizovací náklady mikrovlnných generátorů a neznalost základních principů mikrovlnného sušení, což souvisí i s obavami o zdraví při vystavení tomuto typu záření. Kombinace těchto důvodů spolu s nízkou informovaností o této metodě vede k omezenému zájmu o využívání mikrovlnného záření ve stavební praxi.³⁷

³⁷ Průša, D.; Šuhajda, K.; Žajdlík, T.; Svobodová, K.; Šťastník, S.; Hobzova, K.; Venkrbec, V. Effect of Microwave Radiation on the Compressive Strength of Solid Ceramic Brick. Buildings 2023, 13, 1018. <https://doi.org/10.3390/buildings13041018>

7.2 Materiály a metody

Experimentální stanovení základních charakteristik studovaného materiálu je uvedeno v následující kapitole. Je třeba poznamenat, že všechny zde uvedené experimenty byly provedeny na keramickém stavebním materiálu, konkrétně na plných pálených cihlách s označením P20. Účelem bylo experimentálně ověřit vliv sušení cihel mikrovlnným zářením na mechanické vlastnosti cihel.⁶⁵

7.3 Postup experimentálních prací

Pro experimentální měření bylo připraveno celkem 10 vzorků. Vzorky byly skladovány v laboratorních podmínkách s řízenou teplotou vnitřního vzduchu v rozmezí 19,9 °C až 22,3 °C. Postup provádění testu lze shrnout do sledu laboratorních činností.

Nejprve byly vzorky vysušeny v sušicí komoře do konstantní hmotnosti při teplotě 100 °C. Poté byly zváženy a byly stanoveny jejich základní mechanické a fyzikální vlastnosti a porovnány s hodnotami deklarovanými výrobcem. Poté byly vzorky namočený do nádrže s vodou na 24 h. Následně byly opět zváženy a byly vypočteny hodnoty jejich nasákavosti a zdánlivé pórovitosti. v dalším kroku byly vzorky vysušeny pomocí mikrovlnného záření ve dvou sadách (pět vzorků bylo vystaveno mikrovlnnému záření pouze jednou a dalších pět vzorků bylo vystaveno 10 cyklům). v obou případech byl 1 vzorek ozařován po dobu 1 h, 2 vzorky po dobu 2 h a poslední 2 vzorky po dobu 4 h. Kolem vzorků byla vytvořena kovově stíněná komora zvaná Faradayova klec, aby se omezilo šíření mikrovlnného záření do okolí. Po expozici byly vzorky zváženy a poté vysušeny v sušicí komoře do konstantní hmotnosti při teplotě 100 °C. Následně byla změřena rychlost šíření ultrazvukového impulzu a stanovena vypočtená pevnost v tlaku cihel. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 12.³⁷

Tabulka 12. Zjištěné vlastnosti vzorků³⁷

Číslo vzorku	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Nasákavost [%]	Pevnost v tlaku [MPa]	Zdánlivá pórovitost [%]
1	1,737	14,72	32,2	25,58
2	1,418	14,62	33,6	25,12
3	1,755	14,17	44,3	24,86
4	1,769	13,28	31,1	23,49
5	1,720	15,01	34,5	25,96
6	1,726	14,25	43,3	24,59
7	1,719	13,65	40,1	23,46
8	1,739	13,20	42,9	22,96
9	1,736	13,66	31,9	23,72
10	1,726	14,16	32,8	24,44

7.3.1 Fyzikální a mechanické vlastnosti cihel

Objemová hmotnost cihel byla stanovena podle normy ČSN 72 2603³⁸, protože vzorky byly geometricky pravidelné. Sledovaná vlastnost vzorků cihel byla hodnocena v tzv. vzduchosuchém stavu v laboratorním prostředí.³⁹

Nasákavost byla stanovena podle normy ČSN 72 2603. Současně se stanovením objemové hmotnosti byla stanovena nasákavost a zdánlivá pórovitost vzorků³⁷.

Ke kvantifikaci pevnosti cihel v tlaku byla použita korelace mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln a rychlostí šíření zvuku v materiálu.

7.3.2 Měření rychlosti ultrazvukových pulzů

Experiment byl proveden měřením průchodu ultrazvukové vlny vzorky a byl proveden přímým sondováním vzorků. Pro měření doby průchodu ultrazvukového impulsu byl použit následující postup: po délce cihly bylo měření provedeno ve třech měřicích bodech, které byly rovnoměrně rozmístěny po měřené ploše. Skutečná měřicí frekvence sond byla zvolena 54 kHz, aby byla splněna podmínka $a \geq 1,25\lambda$ (kde a je minimální rozměr vzorku v místě měření a λ je vlnová délka), a pojivem byl Sonogel, běžně používaný ve zdravotnictví. V každém bodě měření byla provedena tři měření doby průchodu ultrazvukového impulsu.

³⁸ SN 72 2603; *Skúšanie Tehliarskych Výrobkov. Stanovenie Hmotnosti, Objemovej Hmotnosti a Nasiakavosti*. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 1979.

³⁹ Khestl, F. *Ceramics. Testing of Building Materials and Products*. Technical University of Ostrava: Ostrava, Czech Republic, 2010. Available online: https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=cihly_zkouseni

Ultrazvuk je definován jako mechanická vibrace částic prostředí o frekvenci vyšší než 20 kHz. Pro zkoušení stavebních materiálů se obvykle používají sondy s frekvencí od 40 kHz do 150 kHz. Když se ultrazvuková vlna šíří prostředím, jeho částice vibrují v různých směrech vzhledem ke směru šíření vlny. Podle toho lze ultrazvukové vlny rozlišit na čtyři typy: podélné (částice média kmitají rovnoběžně se směrem šíření vlny), příčné (částice média kmitají kolmo ke směru šíření vlny), povrchové (šíří se po povrchu tlustých těles a neovlivňují objem média pod nimi) a deskové (tyto vlny vznikají v tenkém kovu, jehož tloušťka je podobná vlnové délce).⁴⁰

Koncepce metody spočívá ve vysílání opakovaných ultrazvukových impulsů do materiálu vysílacím snímačem a následné detekci impulsů prošlých zkoumaným materiálem přijímacím snímačem, tj. měření časového intervalu, který uplyne při průchodu impulsu měřicí základnou. Měření lze provádět přímým, nepřímým a polopřímým sondováním. Měření prováděná metodou rychlosti ultrazvukových impulsů jsou ovlivněna několika faktory, a to vlhkostí, vadami ve struktuře zkoumaného materiálu, rozměry a tvarem vzorku, vlastní frekvencí sond a také způsobem akustické vazby mezi sondami a zkoumaným materiálem. Tyto faktory je nutné zohlednit při vývoji metodiky měření pro konkrétní materiály.^{40, 41}

Existuje korelace pro predikci pevnosti v tlaku cihel na základě parametrů měřených metodou rychlosti ultrazvukových impulsů. Na základě výsledků experimentálních měření byl stanoven odhad pevnosti cihel v tlaku podle vzorce:

$$f_c = 10,754V - 0,5367V^2 + 6,1707 \text{ [MPa]} \quad |r = 0,698,$$

kde f_c je pevnost v tlaku cihly v MPa,

V je rychlost šíření ultrazvukového impulsu v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

r je korelační koeficient.⁷¹

7.4 Výsledky experimentů a diskuze

Analýza získaných výsledků poskytla poznatky o vhodnosti použití mikrovlnného záření pro vysoušení cihelných materiálů. Provedené experimenty potvrdily málo významný vliv mikrovlnného sušení na pevnost v tlaku porézního keramického materiálu.

⁴⁰ Brožovský, J. *Use of the ultrasonic pulse method for detecting the compressive strength of different types of bricks (Využití ultrazvukové impulsové metody pro zjišťování pevnosti v tlaku různých druhů cihel)*. TZB-Info 2018. Available online: <https://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/17190-vyuziti-ultrazvukove-impulsove-metody-pro-zjistovani-pevnosti-v-tlaku-ruznych-druhu-cihel>

⁴¹ Silva, F.A.N.; Delgado, J.M.P.Q.; Cavalcanti, R.S.; Azevedo, A.C.; Guimarães, A.S.; Lima, A.G.B. *Use of Nondestructive Testing of Ultrasound and Artificial Neural Networks to Estimate Compressive Strength of Concrete*. Buildings **2021**, 11, 44.

Výsledky experimentů lze pozorovat v tabulkách 13 a 14 a výsledné doby šíření ultrazvukových vln jsou uvedeny v tabulce 15. Grafické znázornění výsledků lze vidět na obrázcích 42 a 43.³⁷

Tabulka 13. Výsledné vlastnosti vzorků po expozici mikrovlnným zářením po jednom cyklu³⁷

Číslo vzorku	Doba expozice [h]	Hmotnost vysušeného vzorku [kg]	Hmotnost nasáklého vzorku [kg]	Hmotnost vzorku po vystavení mikrovlnnému záření [kg]
4	2	4,670	5,290	4,830
7	2	4,536	5,155	4,896
8	4	4,590	5,196	4,657
9	1	4,582	5,208	5,102
10	4	4,554	5,199	4,586

Tabulka 14. Výsledné vlastnosti vzorků po expozici mikrovlnným zářením po deseti cyklech³⁷

Číslo vzorku	Doba expozice [h]	Hmotnost vysušeného vzorku [kg]	Hmotnost nasáklého vzorku [kg]	Hmotnost vzorku po vystavení mikrovlnnému záření [kg]
1	2	4,583	5,258	4,844
2	1	4,535	5,198	5,042
3	2	4,631	5,287	4,660
5	4	4,540	5,225	4,544
6	4	4,555	5,204	4,559

Tabulka 15. Změřená rychlost šíření ultrazvukové vlny vzorky před a po expozici mikrovlnným zářením po deseti cyklu³⁷

Číslo vzorku	Průměrná doba průchodu ultrazvuku cihlami (suchý stav; konstantní hmotnost) při $f = 54$ kHz [μs]	Průměrná doba průchodu ultrazvuku cihlami (po vystavení mikrovlnnému záření) při $f = 54$ kHz [μs]
1	160,59	157,00
2	154,41	151,80
3	116,34	114,70
5	165,17	169,70
6	151,05	143,40

Údaje o pevnosti v tlaku experimentálně zkoušených keramických cihel byly vypočteny odhadem na základě metody šíření ultrazvukové vlny, která je přímo ovlivněna homogenitou

materiálu na přenosové cestě mezi vysílačem a přijímačem, zejména ve struktuře materiálu. Bylo také zjištěno, že vlhkost materiálů ovlivňuje rychlost šíření ultrazvukového impulsu.^{42, 43} Přítomnost vlhkosti materiálu, která se v porézní struktuře materiálů projevuje jako kapalná fáze vody a vyplňuje volný prostor pórů, zvyšuje rychlost šíření ultrazvuku v materiálu (rychlost ultrazvuku ve vodě je asi 3,5krát vyšší než ve vzduchu).⁷³ Proto je nutné během měření stanovit stav vlhkosti vzorků, aby byla zajištěna reprodukovatelnost výsledků měření.

Aby se vyloučil vliv vnitřní vlhkosti na výsledky, byly keramické cihly před provedením experimentu vysušeny na konstantní hmotnost.

U pálených hliněných cihel obecně platí, že přítomnost drobných trhlinek v cihle není vadou, pokud nemá nepříznivý vliv na deklarovanou pevnost v tlaku. Z hlediska hodnocení pevnosti v tlaku plných pálených cihel ultrazvukovou metodou je vliv neuspořádaných vad v mikrostruktuře vzorků cihel velmi výrazný, a proto jsou zjištěné údaje spíše odhadem. Technicky nebylo možné provést objektivně průkazné destruktivní zkoušky pevnosti v tlaku na zkoumaných cihlách, a proto byl použit výpočet odhadu pevnosti v tlaku – jak je patrné z výše uvedených výsledků. Tento odhad má svá omezení v podobě statistické chyby. Přesto lze tento postup odhadu pevnosti v tlaku doporučit pro další výzkum.³⁷

7.5 Závěr

Na základě provedených experimentů a jejich následného vyhodnocení bylo možné potvrdit vliv sušení mikrovlnným zářením na pevnost v tlaku porézního keramického materiálu. Získané údaje dokazují, že mikrovlnné záření může být vhodnou metodou pro sušení plných pálených cihel, neboť neovlivňuje pevnost v tlaku cihel. Experiment byl proveden ve dvou sadách, kdy byly plné pálené cihly sušeny mikrovlnným zářením po různě dlouhou dobu, a ani po deseti cyklech expozice nedošlo ke změnám naměřených hodnot pevnosti. Pórovitost keramiky je obvykle 15-25 %, takže je pochopitelné, že zde byl k dispozici vnitřní prostor pórů pro odvod vodních par do okolního prostředí.

Výsledné pevnosti v tlaku zkoušených cihel byly vypočteny z rychlosti šíření ultrazvukových vln, ačkoli tímto postupem lze získat pouze odhad pevnosti, což vede k vyšší nejistotě měření. Ukázalo se, že rozdíly v rychlosti šíření ultrazvukové impulsní vlny mezi vysušenými vzorky a vzorky po vystavení mikrovlnnému záření jsou zanedbatelné.

⁴² Schuller, M.P. *Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures*. Prog. Struct. Eng. Mat. **2003**, 5, 239–251.

⁴³ Lencis, U.; Udris, A.; Korjaks, A. *Moisture Effect on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Cured under Normal Conditions and at Elevated Temperature*. Constr. Sci. **2013**, 14, 71–78.

Tento závěr byl potvrzen, a to i přes možnou nehomogenitu mikrovlnného záření, výrobní odchylky ve vlastnostech keramických cihel a/nebo vliv případné nerovnoměrné zbytkové vlhkosti z neúplného vysušení vzorků (výsledné odhady pevnosti v tlaku lze pozorovat v tabulce 17).

Tabulka 17. Přehled průměrné doby průchodu ultrazvukového impulsu.³⁷

Číslo vzorku	Odhad pevnosti v tlaku vysušených vzorků [MPa]	Odhad pevnosti v tlaku vzorků po vystavení mikrovlnnému záření [MPa]
1	23,8	24,2
2	24,5	24,7
3	29,6	29,9
4	23,4	22,9
5	24,9	25,7
6	29,1	29,3
7	27,5	26,2
8	28,9	28,4
9	23,7	23,7
10	24,1	24,2
Hodnoty nejistot měření byly vyjádřeny na hladině spolehlivosti 95%	$26,0 \pm 5,0$	$25,9 \pm 4,9$

Nicméně tento experiment byl velmi omezený a má sloužit především jako podnět k dalšímu výzkumu, který by měl určit vliv EMW záření na různé typy cihel s různou pórovitostí, a získat tak průkaznější výsledky. Tato oblast je velmi perspektivní, protože hlavní výhodou mikrovlnného ohřevu je, že k ohřevu a odpařování vlhkosti obsažené v porézním systému keramické cihly dochází přímo v materiálu prostřednictvím absorpce mikrovlnného záření vodou. Ostatní metody sušení vedou potřebné teplo z povrchu sušeného materiálu a proces odstraňování vlhkosti je pomalejší a obvykle energeticky náročnější.³⁷

8 Souhrnný závěr

Disertační práce se zaměřuje na analýzu vlivu mikrovlnného záření na stavební hmoty a je strukturována do dvou hlavních částí: rešeršní a experimentální.

Rešeršní část obsahuje šest hlavních kapitol, kde teoreticky rozpracovává mechanismus šíření vlhkosti a tepla, uvádí účinky mikrovlnného záření a popisuje způsoby sanace vlhkých stavebních materiálů.

V první experimentální části jsou zkoumány účinky mikrovlnného záření na čerstvé stavební směsi s využitím hydratujícího silikátového pojiva, konkrétně portlandského cementu CEM I 42,5 R. Zjištěno bylo, že urychlení procesu tuhnutí výrazně ovlivňuje pevnost v tlaku vzorků. Pozorovaný trend naznačuje, že prodlužované působení mikrovlnného záření snižuje výslednou pevnost po 7. i 28. dnech. Tato zjištění jsou v souladu s obecnými znalostmi. I přes nižší pevnosti v tlaku u vzorků vystavených mikrovlnnému záření, nebyly pozorovány výrazné rozdíly v dalších vlastnostech, jako je pevnost v tahu za ohybu, nasákavost a objemová hmotnost, ve srovnání s referenčními vzorky.

Druhá experimentální část se věnuje sanaci vlhkého zdiva pomocí mikrovlnného záření, zejména cihelných zdících prvků. Experimenty byly prováděny na pálených cihlách, ačkoli vzhledem k jejich vysoké pórovitosti nebyly pozorovány významné změny vlastností oproti referenčním vzorkům.

V závěrech práce je zdůrazněn potenciální přínos pro stavební praxi v oblasti urychlení tuhnutí betonových směsí a možnosti vysoušení cihelných zdív mikrovlnným zářením. Navrhuje se, že i přes nižší pevnosti betonu v důsledku působení mikrovln, by tato metoda mohla být využita v prefabrikaci betonu. Dále se naznačuje, že vysoušení cihelných vzorků pomocí mikrovlnného záření nevedlo k výrazným změnám v jejich fyzikálních a mechanických vlastnostech.

V dalším výzkumu by bylo vhodné rozšířit první experimentální oblast o další vzorky cihel a ve druhé experimentální oblasti zkoumat vliv mikrovlnného záření na různé druhy cementů nebo jiná pojiva. Redukce množství vody pomocí plastifikátorů by mohla být dalším směrem pro pokračování výzkumu. Takový rozšířený výzkum by mohl poskytnout hlubší porozumění a možná vyústit v novou disertační práci.

9 Zdroje

1. ŠUHAJDA, Karel. *Analysis of Interaction of Microwave Radiation with Moisture in Porous Building Materials*. Habilitation Thesis, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, 2016.
2. Ochs, Fabian and H. M. Müller-Steinhagen. “*Temperature and Moisture Dependence of the Thermal Conductivity of Insulation Materials*.” (2005).
3. *Jak vyvětrat plíseň*. Online. Naše Hobby. 2020. Dostupné z: <https://www.nasehobby.cz/jak-vyvetrat-plisen/>. [cit. 2023-10-17].
4. DOSEDĚLOVÁ, Adriana. *Víme, jak vyvětrat plíseň*. Online. Český kutil. 2019. Dostupné z: <https://ceskykutil.cz/clanek-22187-vime-jak-na-plisen-v-byte>. [cit. 2023-10-17].
5. RUBEŠOVÁ, Marie. *Dřevokazné houby – a jak na ně*. Online. Chatař chalupář. 2019. Dostupné z: <https://www.chatar-chalupar.cz/drevokazne-houby-%E2%80%93-a-jak-na-ne/>.
6. ČSN P 73 0610 (730610) *Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva – Základní ustanovení*. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2000.
7. MRLÍK, F. - *Vlhkostné problémy stavebních materiálů a konstrukcí*, 1. vyd., Alfa, Bratislava 1985, ISBN #9955
8. BALÍK, M. *Vysušování zdiva I*. druhé rozšířené vydání, Praha: Grada Publishing, 1999. ISBN 80-7169-856-3
9. Maxwell, J.C. *A dynamical theory of the electromagnetic field*. Philos. Trans. R. Soc. Lond. **1865**, 155, 459–512
10. The 70th birthday of Prof. Dr. August Žáček. Czech J. Phys. **1956**, 6, 204–205.
11. Kinn, T.P.; Marcum, J. *Possible Uses of Microwaves for Industrial Heating*. Prod. Eng. **1947**, 18, 137–140. Osepchuk, J.M. *A History of Microwave Heating Applications*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **1984**, 32, 1200–1224.
12. Osepchuk, J.M. *A History of Microwave Heating Applications*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **1984**, 32, 1200–1224.

13. Gartshore, A.; Kidd, M.; Joshi, L.T. *Applications of Microwave Energy in Medicine. Biosensors* **2021**, 11, 96.
14. Guzik, P.; Kulawik, P.; Zając, M.; Migdał, W. *Microwave applications in the food industry: An overview of recent developments. Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2022**, 62, 7989–8008.
15. Hoehn, J.R. *Defense Primer: Military Use of the Electromagnetic Spectrum*. Library of Congress. Congressional Research Service 2022, Report IF11155, Version 15. Available online: <https://crsreports.congress.gov/product/details?prodcode=IF11155>
16. Procházka, M.; Sobotka, J.; Šuhajda, K.; Novotný, M. *Microwave radiation and its application on construction materials. Eng. Struct. Tech.* **2016**, 8, 150–156.
17. Makul, N. *Effect of low-pressure microwave-accelerated curing on the drying shrinkage and water permeability of Portland cement pastes. Elsevier* **2020**, 13, e00358.
18. Kvapilova, V. *Evaluation of microwave drying effects on historical brickwork and modern building materials. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2020**, 867, 012026.
19. Kvapilova, V.; Suhajda, K. *Possibility of Using Microwave Radiation for Rehabilitation of Historical Masonry Constructions. Key Eng. Mat.* **2020**, 868, 119–126.
20. Tauhiduzzaman, M.; Hafez, I.; Bousfield, D.; Tajvidi, M. *Modeling Microwave Heating and Drying of Lignocellulosic Foams through Coupled Electromagnetic and Heat Transfer Analysis. Processes* **2021**, 9, 2001.
21. Sobotka, J.; Šuhajda, K.; Jiroušek, Z. *Mikrovlňná teorie ve stavební praxi. TZB-Info* 2017. Dostupné online: <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/15568-mikrovlenna-teorie-ve-stavebni-praxi> [cit. 2023-10-17].
22. Novotný, M.; Šuhajda, K.; Sobotka, J.; Gintar, J.; Dová, E.S.; Mádl, M.; Jiroušek, Z. *Use of microwave radiation in building industry through application of wood element drying. Wood Res.* **2014**, 59, 389–400
23. Průša, D.; Šťastník, S.; Šuhajda, K. *The possibilities of using microwave radiation to accelerate the solidification of mixtures consisting of a polymer matrix binder and a waste thermal insulation filler. AIP Conf. Proc.* **2022**, 2488, 020023.
24. Novotný, M.; Škramlík, J.; Šuhajda, K.; Tichomirov, V. *Sterilization of Biotic Pests by Microwave Radiation. Procedia Eng.* **2013**, 57, 1094–1099.
25. Kääriäinen, H.; Rudolph, M.; Schaurich, D.; Tulla, K.; Wiggenhauser, H. *Moisture measurements in building materials with microwaves. NDT E Int.* **2001**, 34, 389–394.

26. Fuhrmann, J.M. *Micro-curing*. Concrete Construction 2002. Available online: https://www.concreteconstruction.net/_view-object?id=00000154-1d54-db06-a1fe7f5ca5030000 (accessed on 18 September 2023)
27. Sumra Yousuf, Payam Shafigh, Zainah Ibrahim, Huzaiifa Hashim, Mohammad Panjehpour *Crossover Effect in Cement-Based Materials: A Review*. Applied Sciences, 2019, mdpi.com.
28. Yang, K.-H.; Mun, J.-S.; Cho, M.-S. *Effect of Curing Temperature Histories on the Compressive Strength Development of High-Strength Concrete*. Adv. Mater. Sci. Eng. 2015, 2015, 12.
29. Kjellsen, K.; Detwiler, R. *Later-age strength prediction by a modified maturity model*. ACI Mater. J. 1993, 90, 220–227.
30. Newman, J.; Choo, B.S. *Advanced Concrete Technology 3: Processes*; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2003.
31. Khan, M.S.; Abbas, H. *Performance of concrete subjected to elevated temperature*. Eur. J. Environ. Civ. Eng. 2016, 20, 532–543.
32. Lothenbach, B.; Winnefeld, F.; Alder, C.; Wieland, E.; Lunk, P. *Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes*. Cem. Concr. Res. 2007, 37, 483–491.
33. Sajedi, F.; Razak, H.A. *Thermal activation of ordinary Portland cement–slag mortars*. Mater. Des. 2010, 31, 4522–4527.
34. Kim, J.-K.; Han, S.H.; Song, Y.C. *Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results*. Cem. Concr. Res. 2002, 32, 1087–1094.
35. Namarak, C.; Satching, P.; Tangchirapat, W.; Jaturapitakkul, C. *Improving the compressive strength of mortar from a binder of fly ash-calcium carbide residue*. Constr. Build. Mater. 2017, 147, 713–719.
36. Ezziane, K.; Bougara, A.; Kadri, A.; Khelafi, H.; Kadri, E. *Compressive strength of mortar containing natural pozzolan under 476 various curing temperature*. Cem. Concr. Compos. 2007, 29, 587–593.
37. Průša, D.; Šuhajda, K.; Žajdlík, T.; Svobodová, K.; Šťastník, S.; Hobzova, K.; Novotný, M. *The effect of EMW radiation on the solidification of C-S-H gels: its influence on the mechanical and physical properties of solidified cement mixtures*. Gels **2023**, přijato k publikování

38. Průša, D.; Šuhajda, K.; Žajdlík, T.; Svobodová, K.; Šťastník, S.; Hobzova, K.; Venkrbec, V. *Effect of Microwave Radiation on the Compressive Strength of Solid Ceramic Brick*. *Buildings* **2023**, *13*, 1018. <https://doi.org/10.3390/buildings13041018>
39. Khestl, F. *Ceramics. Testing of Building Materials and Products*. Technical University of Ostrava: Ostrava, Czech Republic, 2010. Available online: https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=cihly_zkouseni [cit. 2023-10-17].
40. Brožovský, J. *Use of the ultrasonic pulse method for detecting the compressive strength of different types of bricks (Využití ultrazvukové impulsové metody pro zjišťování pevnosti v tlaku různých druhů cihel)*. TZB-Info 2018. Available online: <https://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/17190-vyuziti-ultrazvukove-impulsove-metody-pro-zjistovani-pevnosti-v-tlaku-ruznych-druhu-cihe>
41. Silva, F.A.N.; Delgado, J.M.P.Q.; Cavalcanti, R.S.; Azevedo, A.C.; Guimarães, A.S.; Lima, A.G.B. *Use of Nondestructive Testing of Ultrasound and Artificial Neural Networks to Estimate Compressive Strength of Concrete*. *Buildings* **2021**, *11*, 44.
42. Schuller, M.P. *Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures*. *Prog. Struct. Eng. Mat.* **2003**, *5*, 239–251.
43. Lencis, U.; Udris, A.; Korjaks, A. *Moisture Effect on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Cured under Normal Conditions and at Elevated Temperature*. *Constr. Sci.* **2013**, *14*, 71–78.

10 Seznam publikací autora

10.1 2023

- SVOBODOVÁ, K.; PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K. MOŽNOSTI TVORBY ROZPOČTU INFORMAČNÍHO MODELU BUDOVY. JUNIORSTAV. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2023. s. 638-645. ISBN: 978-80-86433-80-6. ISSN: 1190-1535.
- PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K.; ŽAJDLÍK, T.; SVOBODOVÁ, K.; ŠŤASTNÍK, S.; HOBZOVÁ, K.; VENKRBEC, V. Effect of Microwave Radiation on the Compressive Strength of Solid Ceramic Brick. *Buildings*, 2023, roč. 13, č. 4, s. 1-11. ISSN: 2075-5309.
- Průša, D.; Šťastník, S.; Šuhajda, K.; Svobodová, K.; Žajdlík, T.; Hobzová, K.; Novotný, M. The Effect of Microwave Radiation on the Solidification of C-S-H Gels: Its Influence on the Solidified Cement Mixtures. *Gels* **2023**, 9, 889. <https://doi.org/10.3390/gels9110889>
- Žajdlík, T.; Šuhajda, K.; Průša, D. Medium-Scale Fire Resistance Testing of Timber Structures with Composite Cement Fibre Materials. *Buildings* **2023**, 13, 527. <https://doi.org/10.3390/buildings13020527>

10.2 2022

- PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; POLÁŠEK, J.; ŠUHAJDA, K. VLIV VEGETAČNÍ STŘECHY A KLASICKÉ PLOCHÉ STŘECHY NA TEPELNOU STABILITU OBJEKTU. JUNIORSTAV 2022, 24. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno: ECON publishing. s.r.o., 2022. s. 683-688. ISBN: 978-80-86433-76-9.
- PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K.; ŠŤASTNÍK, S. MOŽNOSTI VYUŽITÍ MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ PRO URYCHLENÍ TUHNUTÍ SMĚSÍ TVOŘENÉ POJIVEM Z POLYMERNÍ MATRICE A PLNIVEM Z ODPADNÍCH TEPELNĚ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ. JUNIORSTAV 2022 24. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2022. s. 557-562. ISBN: 978-80-86433-76-9.

10.3 2021

- PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K.; ŠŤASTNÍK, S. Využití odpadních tepelně-izolačních materiálů pro výplňové hmoty do keramických dutinových tvarovek. JUNIORSTAV 2021 23. ODBORNÁ KONFERENCE DOKTORSKÉHO STUDIA. Brno: 2021. s. 771-777. ISBN: 978-80-86433-75-2.
- PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K.; ŠŤASTNÍK, S.; ŽAJDLÍK, T. Numerické řešení vlivu vegetační vrstvy na teplotu v jednotlivých vrstvách vegetační ploché střechy. TZB-info, 2021, roč. 2021, č. 29.3.2021, s. 1-6. ISSN: 1801-4399.
- PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K.; ŠŤASTNÍK, S. Využití odpadních tepelně-izolačních materiálů pro výplňové hmoty do keramických dutinových tvarovek. TZB-info, 2021, roč. 2021, č. 13.4.2021, s. 1-6. ISSN: 1801-4399.
- PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; ŠUHAJDA, K.; ŽAJDLÍK, T. The possibilities of filling ceramic hollow bricks with the use of waste thermal insulation materials. In AIP Conference Proceedings. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2021. ISBN: 978-0-7354-4041-8. ISSN: 0094-243X.
- PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; ŠUHAJDA, K. The Possibilities of Using Microwave Radiation to Accelerate the Solidification of Mixtures Consisting of a Polymer Matrix Binder and a Waste Thermal Insulation Filler. In AIP Conference Proceedings. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2021. ISBN: 978-0 7354-4041-8. ISSN: 0094-243X.
- POLÁŠEK, J.; PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; ŠUHAJDA, K.; ŽAJDLÍK, T. The Effect of a Green Roof on Thermal Stability of a Building when Compared to a Conventional Flat. In AIP Conference Proceedings. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2021. ISBN: 978-0-7354-4041-8. ISSN: 0094-243X.
- Stanislav Stastnik, David Prusa; Design optimization of filled ceramic blocks. *AIP Conf. Proc.* 1 September 2023; 2849 (1): 370010. <https://doi.org/10.1063/5.0164656>

10.4 2020

- PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; POLÁŠEK, J. RECYKLACE TEPELNĚ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ VE STAVEBNÍM ODVĚTVÍ. RECYCLING 2020 - Církulární ekonomika ve stavebnictví, recyklace a využívání druhotných stavebních materiálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství, 2020. s. 82-89. ISBN: 978-80-214-5894-9.
- PRŮŠA, D. Termoreflexní izolace ve stavebnictví. JUNIORSTAV 2020, 22. ODBORNÁ KONFERENCE DOKTORSKÉHO STUDIA. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2020. s. 895-899. ISBN: 978-80-86433-73-8.
- PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; ŠUHAJDA, K.; POLÁŠEK, J.; ŽAJDLÍK, T. Recycling of thermal insulation materials. In AIP Conference Proceedings. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2020. s. 1-5. ISBN: 978-0-7354-4041-8. ISSN: 0094-243X.
- PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; ŠUHAJDA, K.; POLÁŠEK, J. Reflectance expression of exterior plasters. In AIP Conference Proceedings. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2020. s. 1-6. ISBN: 978-0-7354-4041-8. ISSN: 0094-243X.
- ŠŤASTNÍK, S.; PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K. Optimization of geometric arrangement of filled ceramic blocks. In THERMOPHYSICS 2020: 25th International Meeting of Thermophysics and 20th Conference REFRA. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2020. s. 1-4. ISBN: 978-0-7354-4041-8. ISSN: 0094-243X.

10.5 2019

- David Průša. Thermoreflexive insulation in building industry. In 4th International Meeting of Thermophysics, THERMOPHYSICS 2019 and 20th Conference on Modern Refractory Materials and Key Achievements in High-temperature Technologies, REFRA 2019. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2019. s. 1-6. ISBN: 978-0-7354-1917-9. ISSN: 0094-243X.

11 Práce autora na projektech

Typ	Kód	Řešitel	Začátek, konec	Zařazení
spec. výzkum	FAST-J-21-7238	Ing. David Průša	1. 1. 2021 31. 12. 2021	řešitel
spec. výzkum	FAST-J-21-7373	Ing. Tomáš Žajdlík	1. 1. 2021 31. 12. 2021	spoluřešitel
TAČR ap.	TH04030425	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc. Ph.D.	1. 1. 2020 31. 12. 2021	člen řeš. týmu
spec. výzkum	FAST-J-20-6467	Ing. Tomáš Žajdlík	1. 1. 2020 31. 12. 2020	spoluřešitel
spec. výzkum	FAST-J-20-6356	Ing. David Průša	1. 1. 2020 31. 12. 2020	řešitel
TAČR ap.	TH04030425	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc. Ph.D.	1. 4. 2019 31. 12. 2019	spoluřešitel

12 Užité vzory

Užitný vzor s názvem Technologická linka pro materiálové využití drených odpadních izolačních materiálů na bázi minerálních vláken a polystyrenu, který byl zapsán dne 9.8.2022 na Úřadu průmyslového vlastnictví jako užitný vzor č. 36257.

13 Životopis

13.1.1 VZDĚLÁNÍ

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Doktorský program: Pozemní stavby, prezenční forma

2019–2024

Disertační práce: Analýza působení EMW záření na stavební látky

Školitel práce: doc. Ing. Karel Šuhajda, Ph.D.

Vysoká škola báňská – technická univerzita v Ostravě, Fakulta stavební,

Magisterský program: Stavební inženýrství – BIM inženýring, kombinovaná forma

2021–2023

Diplomová práce – Management tepelně technických informací v digitálním modelu stavby (BIM).

Školitel práce: doc. Ing. Petr Konečný, Ph.D.

Státní závěrečná zkouška z pozemního stavitelství a BIM ve stavitelství, informační modelování a management staveb, management životního cyklu staveb

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,

Magisterský program Management stavebnictví, prezenční forma

2019–2021

Diplomová práce: Rozpočtování staveb jako součást informačního modelování budov (BIM).

Vedoucí práce: doc. Ing. Alena Tichá, Ph.D.

Státní závěrečná zkouška z pozemního stavitelství, ceny a kalkulace ve stavebnictví, projektové řízení staveb, management stavebního podniku a investiční činnosti ve výstavbě

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,

Magisterský program Stavebně materiálové inženýrství, prezenční forma

2017–2019

Diplomová práce: Identifikace tepelné vodivosti a tepelné kapacity stavebních látek metodou „Hot Wire Method“.

Vedoucí práce: prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc., Ph.D.

Státní závěrečná zkouška z Technologie výroby stavebních hmot, trvanlivost stavebních materiálů a kompozitních materiálů

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,

Bakalářský program Stavebně materiálové inženýrství, prezenční forma

2012–2017

Bakalářská práce: Ověření metodiky měření materiálových charakteristik tepelné vodivosti a tepelné kapacity stavebních látek metodou „Hot Wire Method“.

Vedoucí práce: prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc., Ph.D.

13.2 Pracovní zkušenosti

Mendelova univerzita. – akademický pracovník

10/2023–nyní

Výuka digitalizace stavebnictví, stavebních materiálů, pozemního stavitelství atd.

Výzkumná činnost v rámci pracoviště.

Publikační činnost.

Oekoplan s.r.o. – externí technik

2022–2023

Příprava podkladů pro výpočet PENB a nabytí potřebné praxe pro získání oprávnění k výkonu činnosti energetického specialisty.

Renfield s.r.o. – projektový manažer

03/2022–10/2023

Projektový manažer dvou developerských projektů (vždy přes 40 stavebních objektů). Zajištění a kontrola podkladů pro všechny fáze výstavby. Jednání s klienty, investory, realitními kanceláři, architekty atd.

Marketingový specialista společnosti – nástroje Google, sociální sítě, koordinace eventů a nastavování marketingových strategií.

Vysoké učení technické v Brně – výzkumná činnost

2019–2022

Práce na projektech (J-projekty, TAČR) v rámci recyklačních technologií. Tvorba nových materiálů a návrhy využívání technologií mikrovlnného vytvrzování pro směsi s polymerní a silikátovou maticí. Posouzení vlivu EMW záření po sanaci na stavební hmoty.

Publikační činnost v databázi SCOPUS, WoS a v recenzovaných periodických (tzb-info.cz).

Výuka tepelné ochrany budov a pozemního stavitelství v rámci doktorského studia.

2020 Pasportizace objektů v Brně, Obřanech, konkrétně celý areál

Esslerovy textilní továrny s využitím informačního modelování budov (BIM). Předpokládá se spolupráce na návrhu rekonstrukce v roce 2022. Pasportizace a laser scany menších objektů v Brně (např. Arnoldova vila) v rámci spolupráce na vedení diplomových prací na Stavební fakultě VUT v Brně.

Consultest s.r.o. – laboratorní technik

2017–2018

Tvorba a kontrola časového a finančního harmonogramu zakázky. Koordinace zakázek – nábor zaměstnanců, kontrola pracovní činnosti, rozdělování pracovních pozic na pracovišti.