



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT
A DÍLCŮ
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

MOŽNOSTI SNIŽOVÁNÍ ENERGETICKÉ
A EKOLOGICKÉ NÁROČNOSTI CIHLÁŘSKÉ
VÝROBY
REDUCING OF ENERGY AND ECOLOGICAL DEMANDS OF BRICKMAKING
PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Tomáš Blažek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Radomír Sokolář,
Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav technologie stavebních hmot a dílců
Student:	Tomáš Blažek
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23
Studijní program:	B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor:	Stavebně materiálové inženýrství

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Možnosti snižování energetické a ekologické náročnosti cihlářské výroby

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cihlářská výroba se v současné době, vyznačující se energetickou nejistotou, naléhavě pokouší řešit otázky, které souvisejí především se snížením energetické náročnosti výroby a poklesu produkce oxidu uhličitého. Dosažení zadaných cílů bude provedeno na základě:

1. rešerše doposud publikovaných výsledků výzkumu v oblasti související s definovanými cíli bakalářské práce,
2. popisu stávající moderní cihlářské technologie a vlastního návrhu opatření, kterými by bylo možno realizovat zadané cíle bakalářské práce
3. vytvoření databáze dostupných alternativních lehčiv (ke standardně používaným dřevěným pilinám a papírenským kalům) se specifickým zaměřením pro cihelnu ve Šlapanicích u Brna (Wienerberger s.r.o.),
4. laboratorního ověření vybraných navržených opatření pro snížení energetické a ekologické náročnosti cihlářské výroby.

Předpokládaný rozsah práce 40 - 50 stran.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Cíle bakalářské práce je možno definovat ve třech zásadních bodech:

1. Posoudit možnosti radikálního snížení teploty výpalu cihlářského střepu.
2. Posoudit možnost snížení produkce oxidu uhličitého, která významně vzrůstá především při výpaluvápenatého typu cihlářských zemin.
3. Návrh efektivního přímého lehčení střepu vyhořívajícími lehčivými pro maximální úsporu paliva (zemníhoplynu) při výpalu cihlářských výrobků v tunelových pecích.

Seznam doporučené literatury a podklady:

- [1] Valenta, L. Keramická příručka. Vydavatelství technické literatury. Horní Maršov 1999.
- [2] Motyčka, L. Výpočty v keramice. Silikátová společnost České republiky. Praha, 1996.
- [3] Hanykýř, V., Kutzendorfner. Technologie keramiky. Vega. Hradec Králové 2001.
- [4] Pytlík, P., Sokolář, R. Stavební keramika. Technologie, vlastnosti a využití. CERM Brno 2002, ISBN80-7204-234-3

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 4. 11. 2022

L. S.

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
vedoucí ústavu

doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na možnost snížení potřebné teploty výpalu cihlářského střepu pomocí přidavku různých taviv, která podporují tvorbu krystalické fáze. Práce se též zabývá možností snížení potřebného množství paliva a s tím spojeným poklesem produkce oxidu uhličitého. V neposlední řadě práce uvádí možnosti užití alternativních lehčiv jako náhradu za dnes standardně používané dřevěné piliny.

KLÍČOVÁ SLOVA

cihlářský střep, snižování teploty výpalu, pokles produkce CO₂, vyhořívající lehčiva, taviva

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the possibility of lowering the required firing temperature of brick body by adding different fluxes that promote the formation of the crystalline phase. The thesis also examines the possibility of reducing the amount of fuel required and the associated decrease in carbon dioxide production. Finally, the thesis presents the possibilities of using alternative lightweighting agents as a substitute for the currently used standard wood sawdust.

KEYWORDS

brick body, reduction of firing temperature, decrease of CO₂ production, combustion of lightweighting agents, fluxes

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BLAŽEK, Tomáš. *Možnosti snižování energetické a ekologické náročnosti cihlářské výroby*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem Možnosti snižování energetické a ekologické náročnosti cihlářské výroby je shodná s odevzdanou listinnou formou

V Brně dne 26. 5. 2023

Tomáš Blažek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Možnosti snižování energetické a ekologické náročnosti cihlářské výroby zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2023

Tomáš Blažek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych chtěl touto formou poděkovat mému vedoucímu panu doc. Ing. Radomírovi Sokolářovi, Ph.D. za trpělivost, odborné vedení a cenné rady, které mi pomohly při vyhotovení mé bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod a cíl práce.....	13
1.1	Úvod	13
1.2	Cíl práce.....	13
2	Teoretická část	14
2.1	Sušení keramiky a cihlářských výrobků	14
2.2	Výpal keramiky a cihlářského střepu	14
2.3	Snižování teploty výpalu cihlářského střepu	15
2.3.1	Odpadní prach z okrasného kamene	15
2.3.2	Uhelný popílek.....	16
2.3.3	Popílek z cukrové třtiny	17
2.3.4	Popílek z rýžových slupek	18
2.3.5	Odpadní sklo	20
2.3.6	Vliv fosfátů.....	21
2.3.7	Vliv hydroxidů a křemičitanů sodných	22
2.3.8	Vliv odpadní produkce bóru.....	23
2.3.9	Hyperhnutí zeminy před vypálením	24
2.4	Snižování oxidu uhličitého při výpalu cihlářských zemin.....	26
2.4.1	Vliv vápenatých jílu	26
2.4.2	Technologie sušení a výpalu	27
2.4.3	Hmotnostní tok chladícího vzduchu.....	28
2.4.4	Břidlice	29
2.4.5	Výměník tepla na bázi tepelných trubek	29
2.4.6	Rekuperovaný vzduch z chladící zóny.....	30
2.4.7	Vliv popílků z pokrutin a mandlových skořápek	31
2.4.8	Vliv popílků z rýžových slupek a cukrové třtiny	31
2.4.9	Vliv uhelného popílku, žulového prachu a odpadního skla	32
2.5	Přímé lehčení střepu vyhořívajícími lehčivými	32
2.5.1	Dřevěné piliny	33
2.5.2	Dřevní popel.....	34
2.5.3	Kukuřičné klasy	35

2.5.4	Rýžové slupky	36
2.5.5	Pšeničná sláma.....	37
2.5.6	Bramborové slupky.....	37
2.5.7	Čistírenské kaly	38
3	Experimentální část.....	40
3.1	Metodika práce.....	40
3.1.1	Etapa I.....	40
3.1.2	Etapa II	40
3.1.3	Etapa III	41
3.2	Cíl experimentu.....	41
3.3	Zkoušky provedené na vstupních surovinách	41
3.3.1	Rentgenová difrakční analýza (XRD)	41
3.4	Zkoušky provedené na plastickém těstě.....	42
3.4.1	Stanovení plastičnosti pomocí Pfefferkornova přístroje (ČSN 72 1074) .	42
3.4.2	Stanovení absolutní vlhkosti (ČSN 72 1565-11).....	43
3.5	Zkoušky provedené na vysušených vzorcích.....	43
3.5.1	Stanovení délkových změn sušením (ČSN 72 1565-5).....	43
3.6	Zkoušky provedené na vypálených vzorcích	44
3.6.1	Kontrakčně-dilatační termická analýza (ČSN 72 1083).....	44
3.6.2	Diferenční termická analýza (DTA), vážková termická analýza (GTA)..	45
3.6.3	Stanovení délkových změn pálením (ČSN 72 1565-5)	45
3.6.4	Stanovení délkových změn celkových (ČSN 72 1565-5).....	45
3.6.5	Stanovení objemové hmotnosti (ČSN 72 1565-6).....	46
3.6.6	Stanovení nasákavosti (ČSN 72 1565-6).....	47
3.6.7	Stanovení zdánlivé pórovitosti (ČSN 72 1565-6).....	48
3.6.8	Stanovení pevnosti v tahu za ohybu (ČSN 72 1565-7)	48
3.6.9	Stanovení pevnosti v tlaku (ČSN 72 1565-7)	49
3.7	Vyhodnocení naměřených výsledků	50
4	Diskuze a shrnutí dosažených výsledků	61
5	Závěr.....	63
6	Zdroje	65
7	Seznam tabulek.....	70
8	Seznam obrázků	71

1 Úvod a cíl práce

1.1 Úvod

V dnešní energeticky náročné době se snažíme řešit otázky týkající se snížení energetické náročnosti výroby a poklesu produkce oxidu uhličitého. V cihlářské výrobě je především snaha o snižování potřebné teploty výpalu cihlářského střepu, který se v dnešní době pohybuje v rozmezí 850–900 °C, a tím úsporu paliva (zemního plynu). To vše by mělo za následek snížení celkové produkce oxidu uhličitého do ovzduší.

Pro snížení teploty výpalu napomáhají taviva, která podporují tvorbu krystalické fáze střepu silikátových materiálů za dřívější nižší teploty, než je obvyklá určená teplota sliňování daného materiálu.

Potenciál vyhořívajících lehčiv tkví v podpoře hoření, efektivním vedení tepla a vylehčení výsledného výrobku pro menší spotřebu materiálu a nižší zatížení konstrukce. V současnosti jsou nejvíce zastoupenou komoditou dřevěné piliny, kterých začíná být v poslední době nedostatek. Proto je snaha nacházet alternativní vyhořívající lehčiva, která by sloužila pro částečné či zcela úplné nahrazení dřevěných pilin.

Teoretická část bakalářské práce je zaměřena na průzkum dřívějších výzkumů, které se zabývali snížením teploty výpalu, snížením produkce oxidu uhličitého a alternativními vyhořívajícími lehčivy v cihlářské výrobě.

Experimentální část bakalářské práce se zabývá zkouškami a vyhodnocením pracovních směsí s přísadkami navržených taviv za účelem snížení teploty výpalu cihlářského střepu při zachování adekvátních fyzikálně-mechanických vlastností.

1.2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je průzkum možností, jak výrazným způsobem snížit teplotu výpalu cihlářského střepu s následným navržením a ověřením prozkoumaných taviv přidáním do cihlářské směsi při zachování či zlepšení jejich fyzikálně-mechanických vlastností. Cílem je i stanovení možností snížení produkce oxidu uhličitého vypouštěného do ovzduší životního prostředí s doprovodnou úsporou paliva, se kterou souvisí také průzkum možného alternativního přímého vylehčení cihlářského střepu vyhořívajícími lehčivy k dnešním standardně používaným dřevěným pilinám.

2 Teoretická část

Za klíčové vlastnosti keramických materiálů považujeme ty, které nám definují jejich základní strukturu. Materiály jsou podle těchto vlastností anorganické, nekovové, dalo by se říct nerozpustné ve vodě a jejich strukturu tvoří minimálně ze 30 % krystalická mřížka. Konkrétní vlastnosti pak produkt získá po vysušení a následném výpalu keramické směsi. Cílem je dosažení co nejlepších vlastností při zachování celistvosti výrobku a za co možná nejmenší energetické a ekonomické náročnosti [1].

2.1 Sušení keramiky a cihlářských výrobků

Mezi značně energeticky náročné procesy patří sušení, při kterém jsme schopni dosáhnout zpevnění materiálu při minimálním vzniku trhlin a zachování tvaru a celistvosti výrobku. Zaujímá až 30 % celkové spotřeby energie. Při sušení dochází k přestupu tepla ze sušícího média do materiálu za současného vypařování vlhkosti. Vlhkost, která při zvýšené teplotě z materiálu odchází, se v něm nachází ve třech formách. Jako první se ve vzorku nachází vlhkost volná s nulovou vazebnou energií, která se vypařuje do 100 °C. Dále kapilární vlhkost, která se spojuje fyzikální vazbou a odchází běžně do 300 °C. Nakonec mezi 400–700 °C se vypařuje adsorpční vlhkost, která je vázaná fyzikálně-chemickou vazbou. Tyto poslední dvě formy vázané vody se odstraňují poté až pálením. Sušit se dá konvenčně, tedy předáváním tepla teplým vzduchem do prostředí, nebo radiačně, kdy jsou použity tepelné zářiče produkující záření o vlnové délce do desítky mikrometrů [1].

2.2 Výpal keramiky a cihlářského střepu

Vedle sušení je druhý ekologicky i ekonomicky náročný proces zvaný výpal, při němž výrobek získává svoje konečné vlastnosti. Dochází ke tvorbě krystalické mikrostruktury, materiál se zhutňuje a slinuje. Ve spotřebě zaujímá až 60 % celkové energie a naším cílem je tuto spotřebu co nejvíce minimalizovat. Při výpalu dochází v určitých teplotních stádiích k různým procesům. Kromě modifikačních přeměn křemene a spalování organických příměsí se uskutečňují také rozklady kaolinu. Při 600 °C dochází k dehydroxylaci kaolinu na metakaolinit za značné ztráty hmotnosti. Mezi 970–980 °C na-

stává exotermický efekt za doprovodného velkého smrštění. Vytváří se nedokonale vyvinutý spinel a volné SiO_2 se přeměňuje na cristobalit. Nad $1200\text{ }^\circ\text{C}$ dochází k poslednímu rozpadu na produkty mullitu a cristobalitu [2].

Průběh spalování nám můžou značně ovlivnit jiné přítomné látky a oxidy. Např. Fe_2O_3 se při výpalu chová jako tavenina, kdy zbylé FeO zreaguje s dalšími oxidy za vzniku eutektické taveniny způsobující menší potřebnou teplotu tavení. Nebo pokud máme ve směsi přítomný CaCO_3 , tak jeho rozklad zefektivňuje vyhořívání organických látek [1].

2.3 Snížování teploty výpalu cihlářského střepu

Pro dosažení konečných mechanických vlastností cihlářského výrobku je potřeba daný výrobek vypálit. Teplota výpalu se běžně u cihlářských výrobků pohybuje okolo $900\text{ }^\circ\text{C}$. Je to jeden z nejdůležitějších, ale také i ekonomicky nejnáročnějších technologických procesů. Pro snížení ekonomické náročnosti výpalu se do směsi přidávají různé oxidy, které fungují jako taviva, spojují a účastní se na tvorbě nových krystalických fází a to má za následek snížení celkové teploty výpalu střepu [1].

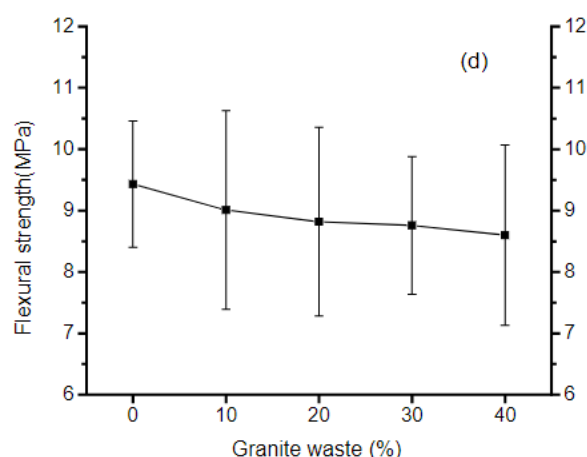
2.3.1 Odpadní prach z okrasného kamene

Jednou z možných příměsí do cihlářské směsi se jevíly horniny žuly, mramoru, břidlice, respektive odpadní prach ze zpracování okrasného kamene, neboli Ornamental rock powder waste. Například použití žuly je značně výhodné díky jejímu vysokému obsahu křemene a alkalických oxidů, které reagují s oxidy křemíku za vzniku taveniny [3].

Z chemické analýzy [4] bylo vyčteno prakticky totožné složení žuly jako u jílu. Ve výzkumu bylo vzato několik směsí, nejdřív s čistým jílem a poté s postupným přidáváním po 10 % žuly. Po provedení několika experimentů bylo dojito k závěru, že žula by se dala v určitém množství použít do keramické směsi.

Stejný závěr byl potvrzen v následující studii [5], kdy byla kapalná fáze, vzniklá z alkalických oxidů, vytvořena už okolo $700\text{ }^\circ\text{C}$. Je to způsobené tím, že žula má narozdíl od jílu velký obsah K_2O a Na_2O , které podporují tvorbu taveniny, stejně tak dobře jako Fe_2O_3 , které nám po výpalu zajistí červenou barvu střepu.

Žula jako příměs nám v případě výzkumu [4] byla schopna zlepšit plasticitu těsta pro optimální vytlačování ze šnekového lisu, zároveň bylo docíleno snížení lineárního smrštění a byla do jisté míry omezena nasákavost. S nasákavostí je úzce spojeno i snížení otevřené pórovitosti. Povrch vypáleného střepu byl hladší, s nižším faktorem nerovnosti jako u čistě vypáleného jílu. Z Obr. 1 vyplývá, že žádných významných změn u krystalických fází a u konečných ohybových pevností nebylo dosaženo. Vzorky byly vypáleny pouze na 970 °C a nejpříznivější výsledky byly dosaženy u vzorků s 30–40 % přídavku žuly.



Obr. 1 Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na množství přidané příměsi u vzorků s aditivem odpadního prachu z okrasného kamene žuly (GW)
Zdroj: [4]

2.3.2 Uhlíkový popílek

V průmyslu je uhlí jeden z nejdůležitějších materiálů díky své rozšířené energetické spotřebě, která v některých zemích dosahuje nad 42 % celkové spotřeby. V roce 2006 se v ČR podílela na výrobě elektrické energie dokonce ze 62 %. Celková produkce elektrárenského popílku nebývá velkých hodnot. Proto se snažíme popílek druhotně zužitkovat v jiných odvětvích, kde to nepřinese negativní důsledky, ale naopak zefektivní výrobu. Z chemického hlediska popílek obsahuje podobné oxidy jako jíl. Výrazný je zde oxid železitý, který ve směsi zastává funkci taviva [6].

Obzvláště ložový popílek má velké procento Fe_2O_3 , které se pak následně projevuje při výpalu červenou barvou střepu. Všeobecně popílek ovšem snižuje pórovitost, nasákavost a lineární smrštění, což má za následek menší šanci na vytvoření trhlin v procesu sušení. S přibývajícím množstvím popílku i teplotou výpalu nabírá výsledný vypálený střep na

pevnosti v tahu za ohybu i v tlaku. Nicméně u ložového popílku nastal ve studii [7] pokles pevnosti v tlaku s přidáním mezi 10–15 % při výpalu na 1100 °C nebo při přidavku mezi 15–20 % popílku s výpalem na 1000 °C. Plasticita zde byla bohužel zhoršena, proto je doporučováno do směsi přidat malé množství plastifikátoru.

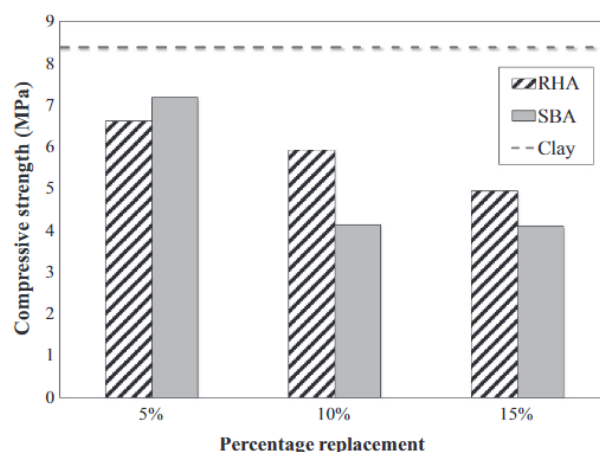
Granulometrie cihlářské směsi hraje velkou roli v technologických procesech. Konkrétně více pomletý popílek dokázal ve výzkumu [6] srazit teplotu výpalu o celých 150 °C. Navíc při experimentu, kdy byl místo roztoku vodního skla použit roztok trifosfátu pentasodného, bylo dosaženo u výsledného výrobku větších pevností v tahu za ohybu a menších vlhkostních tlaků. Ovšem při výpalu nad 1150 °C bylo kvůli trifosfátu sodnému vyvoláno druhotné nadýmaní a to bylo doprovázeno zvýšenou uzavřenou pórovitostí společně s nízkým stupněm smrštění při intenzivním výpalu. Úletový popílek byl charakterizován jako dobrá druhotná surovina do jílové směsi, pokud bylo dodrženo značného pomletí. Nepomletý popílek nevyhověl kvůli distribuci pórů a relativně vysoké nasákavosti zkoušce mrazuvzdornosti po 100 zmrazovacích cyklech. Tento problém by se dal eliminovat vyšší teplotou výpalu.

2.3.3 Popílek z cukrové třtiny

Další surovina, která stála za vyzkoušení jako příměs do cihlářské směsi, byl popílek z cukrové třtiny, neboli sugarcane bagasse ash (SBA). Ten je získáván spalováním cukrové třtiny v alkoholovém průmyslu. Na začátku byly ve výzkumu [8] vyzdvihnuté větší rozdíly v chemickém složení. Tyto popílky měly značně velkou hodnotu siliky, respektive větší množství SiO_2 než u jílu. Na druhou stranu bylo u popílků z cukrové třtiny postrádáno velké množství oxidu hlinitého a železitého.

Zrna v popílkách nebyla optimálně zastoupena. Byla nalezena značná procentuální absence zrn písku, která hrají důležitou roli při mechanických vlastnostech výsledného výrobku. S pevnostmi je úzce spjata pórovitost vzorku. Při přidání organické příměsi s nízkým obsahem alkálií a velkým obsahem zrn SiO_2 , stála zrna samostatně, nedokázal se vytvořit dostatek taveniny na jejich spečení, tudíž se ve studii [9] vytvořil pórovinový cihlářský střep. Z Obr. 2 je vidět, že ztráta pevnosti se rapidně zvyšovala s větším množstvím přidaného popílku. Na pevnostech nic nebylo změněno ani za přítomnosti značného obsahu křemene, který neměl k sobě dostatečné množství Al_2O_3 pro dosažení reakce za

vzniku optimálního množství minerálu mullitu a cristobalitu. Tudiž pevnost v tlaku a tahu za ohybu byla zřetelně nízká s přidavkem popílku z cukrové třtiny.



Obr. 2 Graf závislosti pevnosti v tlaku na množství a druhu přidané příměsi u vzorků s aditivem popílku z rýžových slupek (RHA) a cukrové třtiny (SBA)
Zdroj: [9]

Kvůli velké pórovitosti vykazovaly vzorky ve výzkumu [10] i velkou nasákavost vody. Na to se dá navázat zkouškou mrazuvzdornosti, kdy byly vzorky podrobeny až 50 zmrazovacím cyklům. Podle ASTM C67 je vyhovující výrobek, u kterého se nevyskytnou žádné trhliny a úbytek hmotnosti je menší než 3 % po 50 cyklech. Trhliny nebyly objeveny na žádném vzorku, úbytek hmotnosti vyhovoval po 30, ale po 50 cyklech byl více jak 3 %. Ztráta hmotnosti byla způsobena kvůli protečení vody do pórů vzorku při rozmrazování a při opakovaném zmrazování voda v pórech zmrzla, rozpínala se a to vytvářela značné tlaky na vzorek s doprovodnou jeho degradací.

Ve výsledku by se tento materiál dal použít jako příměs do keramických směsí, ale pouze v omezeném množství, konkrétně maximálně do 5 %. Jedinou jeho značnou výhodou bylo, že po přidání této organické látky, došlo k poměrně dobrému vylehčení střeptu. Dal by se tedy použít pro výrobu lehkých stavebních materiálů, kde by nebyl zvýšený požadavek na pevnost a mrazuvzdornost prvku [9].

2.3.4 Popílek z rýžových slupek

Celkové zužitkování popílku z rýžových slupek, neboli rice husk ash (RHA), je založeno na produkci sekundární suroviny při mletí rýže ve zpracovatelském průmyslu.

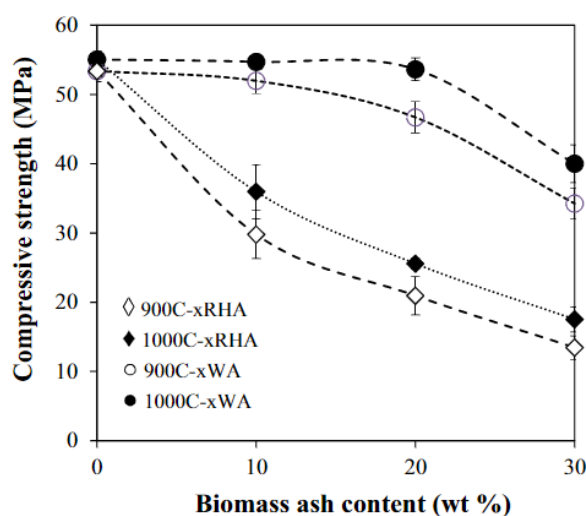
Z celkové hmotnosti rýžového zrna zaujímá 10 % rýžová slupka, u které se dá po spálení dostat až 20 % popílku využitelného jako druhotnou surovinu [11].

Po provedení chemické analýzy bylo zjištěno ze studie [10], že procentuální zastoupení všech oxidů bylo dost podobné jako v předchozím experimentu s popílkem z cukrové třtiny. Největší hodnoty bylo dosaženo opět u SiO_2 , konkrétně do 80 %. Vzhledem k nižšímu obsahu oxidu křemičitého, zastoupení Al_2O_3 , Fe_2O_3 a alkalických oxidů bylo příznivější.

Při experimentu [12] byl s větším přídavkem popílku snížen index plasticity a lineární smrštění a to mělo za následek menší pravděpodobnost poprskání povrchu vzorku. Nicméně nasákavost byla po smísení 4 % a více popílku zvýšena.

Se zvyšující se nasákavostí byla v případě studie [9] zhoršena mrazuvzdornost vzorků, které byly podrobeny 50 zmrazovacím cyklům. Trhliny se sice nevyskytly, ovšem ztráta hmotnosti do 3 % vyhověla pouze do 30 cyklů.

Vzorky byly při výzkumu [13] vypalovány na teploty 900 °C a 1000 °C. Při přidání 10 % popílku do směsi, byla vytvořena ve struktuře kapalná fáze při nižší teplotě s následnou i nižší teplotou slinutí. Zlepšení vlastností, jako například snížení nasákavosti, zvýšení objemové hmotnosti nebo pevnosti v tlaku, bylo opět prokázáno se zvyšující se teplotou výpalu. Také slinutí bylo efektivnější při vyšší teplotě. Naopak ale s hojnějším zastoupením popílku ve směsi došlo ke zhoršení daných vlastností, jak je patrné z Obr. 3.



Obr. 3 Graf závislosti pevnosti v tlaku na množství a druhu přidané příměsi a na teplotě výpalu u vzorků s aditivem popílku z rýžových slupek (RHA) a dřeva (WA)
Zdroj: [13]

Pro porovnání některých vlastností byl proveden experiment, kdy místo popílku ze slupek byly použity přímo rýžové slupky. Došlo se k závěru, že vzorky s popílkem vykazovaly lepší hodnoty pevností a objemových hmotností [14].

Ve shrnutí by se dalo říct, že popílký, získané výpalem rýžových slupek, by se daly použít pro výrobu lehčených výrobků, díky jejich modifikaci objemové hmotnosti zrn. Potřebná teplota výpalu byla snížena, ale s přidavkem více jak 4 % popílků do jílové směsi byly zhoršeny mechanické a fyzikální vlastnosti vzorků. Záleží na požadavcích určených zhotovitelem, ale maximálně do 10 % by se dal popílek z rýžových slupek použít jako druhotná příměs [13].

2.3.5 Odpadní sklo

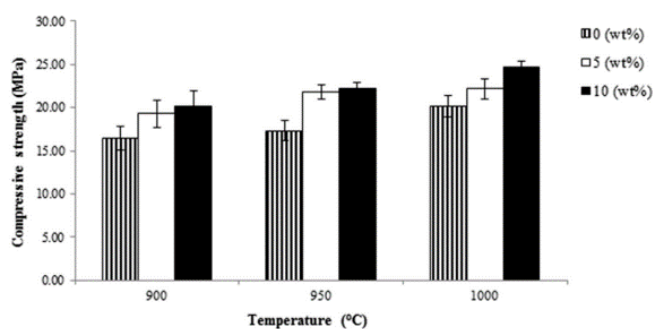
V dnešní době se sklo stalo jedním z nepostradatelných materiálů díky své funkčnosti a variabilitě na trhu. Vzrůstá tudíž tendence na znovuvyužití odpadního skla, neboli Glass waste (GW), do stavebních materiálů z důvodu velkého objemu tohoto odpadu, který je navíc v přírodě nerozložitelný. Proto je snaha pro něj najít jiné uplatnění v průmyslu při recyklování [15].

Běžně bývá jako přídavek do jílových směsí používáno sodnovápenaté sklo ($\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O--CaO}$). Tento skelný křemičitan je ve výsledku vytvářen při zrání tělesa jílového vzorku, kdy dochází ke snížení teploty zrání a to může evokovat fakt, že pokud by byl tento silikát přidán do jílové směsi, mohla by být snížena výsledná teplota výpalu cihlářského střepu. Odpadní sklo mělo v případě výzkumu [16] podobné chemické složení i procentuální zastoupení jednotlivých oxidů jako jílová matrice. Po přidání sodnovápenatého skla do směsi byly hned tři typy oxidů dominantní. Na úkor ostatních oxidů mělo sklo totiž větší obsah SiO_2 , se kterým bylo dosaženo menší citlivosti k sušení a menšího smrštění, Na_2O , které jako fungovalo jako tavivo a CaO , které zkrátilo dobu slinutí střepu.

Ve výzkumné studii [15] byly vzorky vypalovány na teploty od 850 °C do 1050 °C. Objemová hmotnost zůstala po jakékoliv změně, ať už přidáním více odpadního skla či zvýšením teploty, zachována. Naopak lineární smrštění bylo znatelně zmenšeno po přidavku skla. Toto by mohlo mít pozitivní dopad na výsledný vzhled a stabilitu vzorku, kdy pravděpodobnost, že by se vyskytly nějaké vnitřní trhlinky, by byla velice nízká. Jak bylo očekáváno, u pórovitosti i nasákavosti byl dosažen pokles s větším množstvím příměsi

i s vyšší teplotou výpalu kvůli lépe se vytvářející kapalně fázi ve struktuře vzorku. S tím byla spojena i pevnost v tlaku, u které byl zaznamenán příznivý narůst.

V tomto experimentu [16] bylo též prokázáno, že odpadní sklo by se dalo použít jako druhotná příměs do jílové směsi za účelem snížení energetické náročnosti při výpalu cihlářského střepu. Z naměřených hodnot z této studie bylo dokázáno v Obr. 4, že podobné hodnoty pevností, co byly vykazovány vzorky bez příměsi vypálené na zhruba 1000 °C, byly docíleny s přidavkem 5–10 % odpadního skla při výpalu okolo 900 °C.



Obr. 4 Graf závislosti pevnosti v tlaku na množství přidané příměsi a na teplotě výpalu u vzorků s aditivem odpadního skla (GW)
Zdroj: [16]

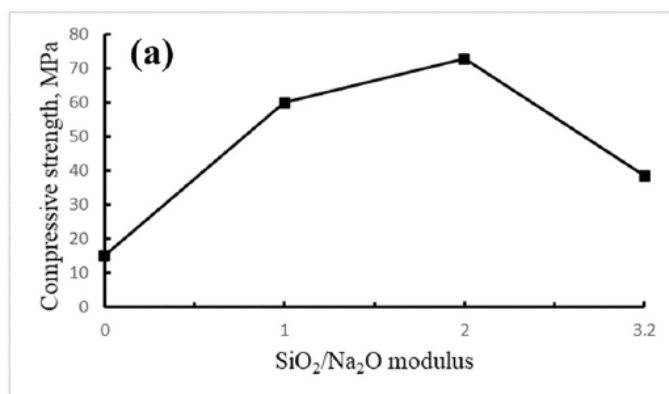
2.3.6 Vliv fosfátů

Výzkum [17] byl zaměřen na možnost využití kyseliny fosforečné a dalších fosforečanů jako pojícího prostředku pro výrobu například materiálů, tmelů a cementů. Tyto schopnosti jsou ceněny i z hlediska dřívější reakce matrice. Je zde docíleno reakce hliníku s danými fosforečnany za vzniku nových fází fosforečanů hlinitých už při nižších teplotách. Tato skutečnost byla dokázána i v provedené XRD analýze, kdy už byly při 800 °C vytvářeny píky $AlPO_4$. Byly zkoušeny fyzikálně-mechanické vlastnosti vzorků s přidavkem různého množství fosforečnanu. Bylo dosaženo výsledků, kdy pórovitost byla s větším množstvím aditiva snížena a naopak mechanická pevnost byla zvýšena. Co bylo důležité, tak už jen při přidání 5 % kyseliny fosforečné bylo docíleno navýšení pevnosti z 5,90 MPa na 10,09 MPa při výpalu vzorku na 800 °C. Výsledná pevnost byla dokonce vyšší, než když byl vypálen pouhý kaolin na teplotu 1100 °C. Při přidavku nadměrného množství fosfátů byly bohužel výsledné parametry zhoršeny, konkrétně mezi 10–15 % aditiva. Do 10 % tohoto přidavku by se dalo uvažovat snížení výsledné teploty výpalu pro docílení stejných či vyšších mechanických vlastností.

Dosažení podobného výsledku se snažila docílit studie [18], ve které byl jako přídavek vyzkoušen roztok kyseliny fosforečné a hydrogen fosforečnanu diamonného v různých poměrech. Vzorčky byly následně vypalovány od 400 °C do 900 °C vždy v intervalech po 100 °C a byly podrobeny fyzikálně-mechanickým zkouškám. Se zvyšujícím se množstvím fosforečnanu diamonného bylo docíleno u vzorků nižší nasákavosti z důvodu hutnější těžší struktury. Ta zapříčinila i vyšší pevnosti v tahu za ohybu, které byly ale přesto docela nízké. Největší pevnosti byly zastoupeny mezi 1–2 MPa. Nejvyšších pevností zde bylo dosaženo při 500 °C v porovnání s neupravenými hliněnými vzorky vypálenými na 800 °C.

2.3.7 Vliv hydroxidů a křemičitanů sodných

Výzkum [19] ověřoval, že by při přidání křemičitanu sodného do hydroxidu sodného jako alkalického aktivátoru, bylo docíleno urychlení reakcí mezi těmito roztoky. To by mělo za následek snížení teploty tavení. Byly vytvořeny různé poměry těchto roztoků, kdy modul 0 znamenal, že jen NaOH byl použit jako alkalický aktivátor. Vzorčky byly vypalovány ve dvou vypalovacích procesech. Při vypalování od 100 °C do 500 °C byla ověřována rychlost proběhlých reakcí, kdy nejnižší pórovitost 13,9 % a nejvyšší pevnost v tlaku 72,4 MPa byla dosažena při modulu 2 s teplotou výpalu 500 °C, je ukázáno v Obr. 5. Následné nižší pevnosti byly způsobené kvůli extrémům, kdy byl pravděpodobně v jednom případě nedostatek alkálií a v druhém případě byl vytvořen hlinitanokřemičitý gel. Druhý vypalovací proces se stával z teplot v rozmezí od 600 °C do 1000 °C. V tomto teplotním intervalu byly měřeny referenční vzorky a v porovnání s prvním procesem bylo podobných hodnot, které vyšly u modulu 2, dosaženo kolem 900 °C.



Obr. 5 Graf závislosti pevnosti v tlaku na modulu příměsi SiO₂/Na₂O u vzorků s tímto aditivem
Zdroj: [19]

Jako tavivo, které vytváří taveninu při nižší teplotě a dochází tak k dřívějšímu procesu slinování, by se dalo použít vodného roztoku křemičitanu sodného, neboli vodního skla (Na_2SiO_3). Tímto způsobem snížení potřebné teploty výpalu se zabývala nedávná studie [20], která navíc použila uhličitan hořečnatý jako inhibitor růstu zrn, pro docílení vyšších mechanických pevností. Výchozí surovinou byl použit prášek oxidu hlinitého. Teplota tavení korundu se pohybuje kolem 2000 °C. Připravené vzorky byly tedy vypáleny na 1600 °C a podrobeny fyzikálně-mechanickým vlastnostem.

Přidáním vodního skla bylo docíleno vytvoření hutnější struktury, kdy byla nasákavost snížena na třetinu své původní hodnoty u vzorku s množstvím aditiva 5 %. U přídatku 10 % byl zaznamenán pokles hodnoty nasákavosti dokonce z původních 7,32 % na 0,38 %, poté došlo naopak k lehkému navýšení nasákavosti při opětovném přidání aditiva. Rozdílné množství uhličitanu hořečnatého zde nehrálo zásadní roli. To bylo projevováno až na výsledných pevnostech v ohybu výrobku. Při porovnání vzorků, u kterých bylo použito 10 % Na_2SiO_3 , byl dosažen značný rozdíl po přepočtu mezi 11,7 MPa u 0,5 % MgCO_3 a 30,2 MPa u 1 % MgCO_3 . Výsledkem práce bylo tedy značné snížení nasákavosti s přidavkem daného taviva a zvýšení pevností s přidavkem inhibitoru růstu zrn [20].

Podle výzkumu [21], by se dala s použitím Na_2SiO_3 vyrábět například zdravotnická keramika mnohem efektivněji, kdy by nebylo zapotřebí tak drahých pecí pro výpal ve vysokých teplotách. Ve výzkumu byla použita zirkoničitá keramika s přidavkem aditiva 5 %, kdy bylo docíleno snížení teploty slinutí ze 1400 °C na 1200 °C. Bylo dosaženo lehkého úbytku pevností a navýšení pórovitosti o 0,7 %. Výsledkem by se dalo říct, že křemičitan sodný je vhodným aditivem pro snížení teploty výpalu.

2.3.8 Vliv odpadní produkce bóru

Pro snížení teploty výpalu se používají nejrůznější taviva. Jedním dobrým tavivem je uváděn například borax, kdy v reakci s oxidem křemičitým a dalšími alkalickými látkami vytváří kapalnou skelnou fázi doprovázenou nižší teplotou tavení. Právě odpadní produkce bóru v sobě obsahuje složky jak jílových minerálů, tak tavících sloučenin bóru. Tímto odpadním produktem se zabýval výzkum [22] právě z důvodu snížení výsledné teploty výpalu.

Vzorky byly zkoušeny na fyzikálně-mechanické vlastnosti a byly vypáleny na 700 °C až 900 °C. Porovnávací vzorek byl stanoven bez přidání jílu s obsahem oxidu boritého vypáleného na různé teploty, přičemž při 900 °C vykazoval tmavě červenou barvu, pevnost v tlaku v přepočtu 20,8 MPa a nasákavost 16,59 %. S nejnižší teplotou výpalu na 700 °C bylo neblíže přiblíženo k referenčním pevnostem se vzorkem složeným ze 30 % jílu s obsahem tavících oxidů. Pevnost byla po přepočtu bohužel nižší okolo 18,5 MPa s podobnou nasákavostí 16,39 % a nahnědlou barvou. Dále byly vzorky testovány i na zkoušku mrazuvzdornosti. Nakonec bylo ukázáno, že do 30 % by se tyto jíly s obsahem aditiva daly použít pro výrobu červených cihel. Bylo dosaženo patričného snížení nasákavosti, lehkého snížení pevnosti a ne tolik výrazné změně barvy při výpalu na teplotu o 200 °C menší [22].

Možností využití boraxu se zabývala i studie [23], která byla zaměřena na možnost použití tohoto aditiva pro výrobu lehkých udržitelných cihel z perlitu s dostatečně vysokou mechanickou pevností. Dávka perlitu byla ponechána stále stejná na 5 %, přídavek aditiva byl zvětšován až do 20 %. Vzorky byly vypalovány na teplotu 900 °C. U pórovitosti byl zaznamenán pokles z 27,4 % na 24,8 % při přídavku 20 % aditiva bóru. Bylo to způsobeno pravděpodobně tím, že čím dál tím více vznikající tavenina byla schopna vyplnit póry, které byly díky perlitu ve vzorku vytvořeny. Byl způsoben ovšem pozitivní dopad na pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu. S přídavkem až 20 % aditiva byla pevnost v tlaku zvýšena z 19,62 MPa na 30,42 MPa a pevnost v ohybu šla nahoru z 2,4 MPa na 2,85 MPa. Díky tomuto výzkumu by se dalo říct, že přídavek bóru má pozitivní dopad na zlepšení mechanických pevností cihel a celkové případné trvanlivosti stavby.

2.3.9 Hyperhutnění zeminy před vypálením

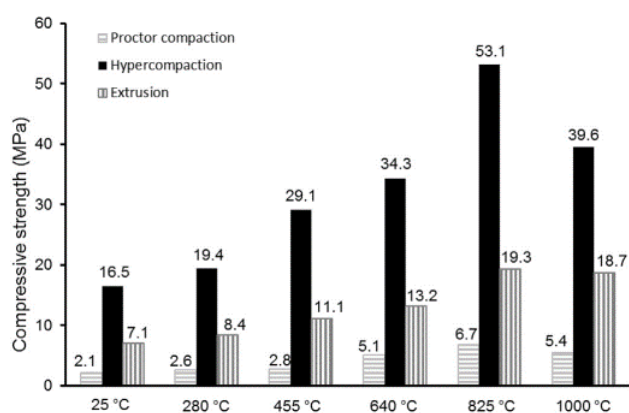
V dnešní době je cílem produkovat cihlářské výrobky s co největší stabilitou, minimální nasákavostí a vysokou mechanickou pevností za co nejnižší energetické spotřeby. Tohoto požadavku by mohlo být docíleno buď přidáním různých příměsí, které nám upraví strukturu vzorku nebo přímou předúpravou vstupní zeminy.

Pro tento experiment byla zkoušena zemina, složená z 40,8 % písku, 42,9 % siltu a 16,3 % hlíny, do které nebyla přidána žádná příměs, ale výrobky byly vyrobeny třemi různými procesy. První vzorek zeminy byl upraven extruzí, kdy zemina prošla mlýnem,

kde částice byly rozdraceny a prosety přes síto 1 mm. Druhý byl podroben zkoušce zhutnění podle Proctora. Zde byla vlhká zemina uložena na 24 hodin pro vyrovnání vlhkostních tlaků a následně vyplněna do formy a stlačena pístem na dosažení stanovené objemové hmotnosti podle Proctorova minima. Nakonec třetí, která byla opět uložena na 24 hodin a zhutněna tlakem 100 MPa za použití dvojitého stlačování dvěma písty z každé strany. Tím bylo docíleno snížení tření o boční stěny a dosaženo zvýšení odolnosti proti tření, větší rovnoměrnosti napětí a pórovitosti uvnitř vzorku. Vzorky byly vypáleny a podrobeny různým zkouškám.

Porozimetrická zkouška vniknutí rtuti prokázala, že póry byly více homogenně rozloženy u extrudovaná zeminy než u zbylých dvou, právě díky rozemletí a prosetí přes síto 1 mm. Díky zkoušce byla ukázána i distribuce pórů u hyperhutnění při vypalování na různé teploty. Do 455 °C byly póry rovnoměrně zastoupeny, nad touto teplotou byl rapidně zvýšen počet větších pórů, pravděpodobně kvůli vyhoření organických látek a dehydroxylaci vázané vody.

Druhá zkouška byla složena z pevnosti v tlaku, kdy pevnosti vzorků Proctora byly nižší než pomocí extruze, pravděpodobně kvůli horšímu rozložení pórů a nerovnoměrnosti napětí způsobené vytvářením. Byla zpozorována ale velmi vysoká pevnost u vzorků, u kterých byla zemina hyperhutněna dvěma písty. Vysokých pevností bylo dosaženo už při nízkých teplotách výpalu a s rostoucí teplotou byla pevnost stále zvyšována až do 1000 °C, kde byl zaznamenán lehký pokles oproti očekávání.



Obr. 6 Graf závislosti pevnosti v tlaku na druhu procesu úpravy zeminy před použitím do vzorku a na teplotě výpalu daných vzorků
Zdroj: [24]

Předposlední zkouškou byla stanovena zkouška úbytku hmotnosti po ponoření do vody. Do 455 °C byly odolnější proti vnikání vody extrudované vzorky, díky utěsněnému povrchu lisováním. Nad tuto hodnotu byl úbytek hmotnosti zanedbatelný.

Poslední zkouškou bylo vyrovnání kapacity vlhkosti, kde u vzorků bylo dosaženo podobných hodnot. Pomocí Proctorovy zkoušky byly lehce vyšší díky větší pórovitosti. Vyrovnávání kapacity vlhkosti také značně klesalo s přibývajícím teplotou kvůli postupnému vytváření skelné fáze.

Z výše provedených zkoušek vyšly jako ideální vzorky ty, které byly podrobeny hyperhnutnění. Bylo dosaženo nejvyšších pevností, jak je stanoveno v Obr. 6, neměly špatnou odolnost proti působení vodou za nižších teplot a jejich vyrovnání kapacity vlhkosti bylo téměř totožné. Proto by se dalo usoudit, že hyperhnutnění zeminy před zpracováním vzorků je značně efektivní a dalo by se docílit vyšší energetické úspory než klasicky vyráběné cihly [24].

2.4 Snížení oxidu uhličitého při výpalu cihlářských zemin

Oxid uhličitý je plyn bez charakteristického zápachu, který má ovšem ve větších koncentracích negativní důsledky na zdraví člověka a na podmínky, ve kterých žijeme, např. změna klimatu. CO₂ vzniká především tepelným rozkladem vápence, dále hořením organických látek nebo při značném spalování ($C + O_2 \rightarrow CO_2$).

Vzhledem ke zhoršující se situaci klimatického podnebí, způsobeného vyšší emisivitou CO₂ do ovzduší, se přikláníme k využívání obnovitelných zdrojů energie. Také se snažíme najít alternativy do směsí, které by nám pomohly zlepšit podmínky pro výpal výrobků. Například přidat příměsi, které napomáhají tvorbě taveniny a tím docílí výpalu na nižší teplotu, upravit technologii výpalu pro podporu pecních hořáků nebo užít vyhovující příměsi, které napomáhají a podporují hoření.

2.4.1 Vliv vápenatých jílu

Jíly mohou obsahovat určité množství vápence. Podle procentuálního zastoupení jílu vůči vápenci jsou rozdělovány na jíly, vápnité jíly, nízko/vysokoprocentní slíny, jílovité vápence a vápence.

V Andalusii byla provedena analýza 20 relevantních výrobních závodů v keramickém odvětví, kdy byla zohledněna kvantita produkce, množství a typ použitého surového

materiálu, výrobky a jejich teplota výpalu. Ve většině vzorků bylo obsaženo jen nepatrné procento organických hmot, proto zde nebyly počítány. Bylo k nim přihlíženo ovšem v případech s použitím například břidlice. Byly odebrány vzorky jednotlivých výrobků vypalovaných na různé teploty a podrobeny odlišným zkouškám. Nejlevnější a nejjednodušší varianta, jak zjistit složení jílu, byl Bernardův kalcimetr. Dražší variantou by pak byla například prvková mikroanalýza nebo XRD analýza.

Z výsledku analýz bylo poté provedeno vyhodnocení a výrobní závody byly rozříděny do tří kategorií. Do první, kdy výrobní vykazovaly produkci emisí CO₂ jen do 5 %. U těch bylo využíváno jen malé množství organických příměsí. Druhá skupina s emisivitou mezi 5 a 10 % s 20 až 30 % vápence v jílu, by se měla zaměřit na snížení produkce CO₂, protože teplota výpalu zde nehraje takovou roli. Poslední skupina, kde byly emise naměřeny nad 10 %, tak vápence byly obsaženy v dané směsi přes 30 %. Zde by se mělo dbát zvýšené pozornosti a provádět vyhodnocení produkce emisí CO₂, které potenciálně můžou představovat ekologický problém.

Závěrem se dá říci, že na základě úvodního faktu o tepelném rozkládání vápence lze usoudit, že čím více vápence ve směsi budeme mít, výsledný výpal bude vykazovat více emisí CO₂. Jakmile hodnoty přesahují více než 10 % vypuštěného CO₂ do ovzduší, měly by se provádět podrobné analýzy k zamezení takové produkce [25].

2.4.2 Technologie sušení a výpalu

Všeobecně největší spotřebu paliva při výrobě cihlářských výrobků zaujímá sušení a výpal. Při keramické výrobě je až 83 % vyprodukovaného CO₂ způsobeno těmito dvěma procesy. Dalšími procesy je například mletí, stlačování (vytváření) nebo glazování.

U sušení by se podle studie [26] dalo přejít například na mikrovlnné sušení, kdy by byl výrobek nahříván z obou stran, jak z vnitřní tak i vnější. Vypařování vlhkosti by se zefektivnilo a čas potřebný na sušení by se výrazně zkrátil. Tímto způsobem bychom byli schopni ušetřit až 75 % spotřeby energie a stejné procentuální množství produkce CO₂. Druhá možnost by byla recyklace horkého vzduchu ze sušení k dosažení až 15% snížení emisivity CO₂.

U výpalu by mohlo být docíleno snížení emisí CO₂, když by se přešlo ze spalování uhlí na použití zemního plynu. Ten je z hlediska výpalu výhodnější díky své vyšší výhřevnosti než uhlí a díky nižší emisivitě. Byla by snížena produkce emisí CO₂ až

o 31,3 %. Druhou možností by bylo nasazení vysokorychlostního spalování v peci, kdy by bylo umožněno lepšího průchodu plynu a snížení tak emisí CO₂ o 25 až 30 %. Pokud by byla dále použita metoda rychlého výpalu při nižší teplotě, byla by zkrácena doba výpalu o 20 minut a bylo by dosaženo snížení spotřeby energie o 30 % [26].

2.4.3 Hmotnostní tok chladícího vzduchu

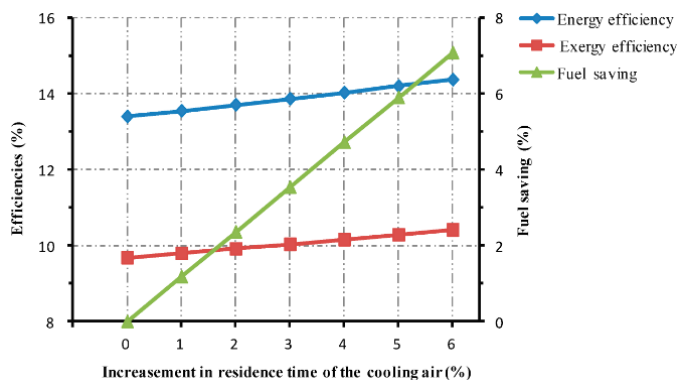
Jednou z možností, jak omezit množství produkovaného oxidu uhličitého, by byla podle výzkumu [27] změna parametrů průtoku chladícího vzduchu ve válcové peci při výpalu cihlářských výrobků.

Dala by se například zvýšit celková rychlost proudícího toku a tím by se mohlo docílit větší výměny tepla mezi vypalovanou tvarovkou a chladícím vzduchem. Zároveň by došlo však ke zmenšení teploty rekuperovaného vzduchu a plynu využívaného ke sušení, ale co by bylo důležitější, byla by zmenšena spotřeba paliva, spojená se spalováním a vznikem CO₂. U analýzy bylo prokázáno, že za každé jedno procento zvýšení toku vzduchu by byla snížena teplota výrobku o 2,81 % a právě by bylo ale také docíleno snížení spotřeby paliva o 0,44 % v důsledku energie rekuperovaného vzduchu vráceného zpět do pece, kde by fungoval jako okysličovadlo.

Druhá zkouška spočívala ve srovnání energetické efektivity v závislosti na rozdílných teplotách chladícího média. Z experimentu vyplynulo, že při nižší teplotě docházelo k zintenzivnění výměny tepla, tudíž s přibývajícím teplotou chladícího vzduchu klesla celková efektivita a ještě k tomu se zvýšila spotřeba paliva.

U dalšího pokusu bylo prokázáno, že pokud by se například zvýšila doba, po kterou by byly ponechány vypálené výrobky vystavené chladícímu vzduchu, efektivita energie by byla přibližně zvýšena o 14 % a spotřeba paliva snížena o 1,18 %, jak je ukázáno v Obr. 7. Má to jednu nevýhodu a to tu, že produkce výroby cihlářských tvarovek se celkově zmenší.

Z uvedených zkoušek bylo stanoveno, že největší vliv na snížení produkce CO₂ mělo zvýšení výdrže chladícího vzduchu působící na vypálené výrobky. Respektive by bylo ušetřeno 28,363 kg vypuštěných emisí oxidu uhličitého do ovzduší za hodinu. 17,484 kg ze snížení teploty chladícího média a 10,597 kg ze zvýšení jeho rychlosti má také pozitivní účinek na snížení emisivity CO₂ a navíc by nijak nebyla ovlivňována rychlost produkce cihelny [27].



Obr. 7 Graf závislosti energetické efektivity a úspory paliva na době výdrže chladicího vzduchu působícího na vypálené výrobky
Zdroj: [27]

2.4.4 Břidlice

Studie [28] ve Španělsku se snažila prokázat snížení emisivity po přidání jílovité břidlice do směsi hlíny. Vzorokly byly vypalovány na 850 °C a 950 °C, jelikož nad tyto hodnoty by neměla teplota výpalu významný podíl na emisivitě, i když by se dané směsi daly použít pro výrobu keramických výrobků až při výpalu nad 1050 °C. Největší emisivita byla zaznamenána v rozmezí teplot 500–800 °C, kdy nastává rozklad uhličitanů ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$).

Bylo docíleno až 65 % snížení CO_2 při přidavku 50 % břidlice a výpalu na 850 °C. Při 950 °C byla efektivita trochu snížena v důsledku přidavku paliva na docílení vyšší teploty.

Podobný pokus byl proveden s přidavkem wollastonitu, přičemž na každých 100 tun břidlice bylo docíleno přes 10 tun snížení produkce CO_2 vypuštěného do ovzduší.

I přes to, že s přidavkem wollastonitu byla efektivnost vyšší než jen s břidlicí, při porovnání pořizovací ceny daných komponent v témže roce, by se dalo dojít k závěru, že by použití čisté břidlice bylo ekonomicky přívětivější [28].

2.4.5 Výměník tepla na bázi tepelných trubek

V poslední době začaly být tepelné výměníky čím dál více populární z hlediska ušetření energie a spotřeby paliva. Jejich efektivita je způsobena vysokou tepelnou konduktivitou trubek, neboli schopností vést elektrický proud. Základ tvoří trubka naplněná částečně pracovní tekutinou. Ve spodní části se vyskytuje v kapalně fázi. Po přivedení tepla

se kapalina začne ohřívat a vypařovat. Díky rozdílným hustotám pára stoupá ke chladicímu médiu. Zde kvůli rozdílné teplotě kondenzuje a vydává teplo, které je dále odváděno. Zkondenzovaná kapalina se opět vrací zpět do míst kapalně fáze [29].

Celý experiment ze studie [30] byl založen na vložení výměníku do oběhu cihelny a zkonstruování systému tak, aby tepelné trubky byly schopny přivádět horký vzduch z chladicích míst pece do míst sušáren. Do sušáren je přiváděn vzduch o teplotě okolo 100 °C. To je docíleno spalováním určitého množství zemního plynu. Ušetření tohoto plynu by mohlo být dosaženo, pokud by se horký vzduch přivedl na podporu sušáren. Z výpočtů pro teoretickou pec za normálního chodu bylo docíleno závěru, že by se s nasazením výměníku tepla mohlo dokázat zužitkovat více než 863 MWh tepelné energie z chladicího sektoru pece. Pokud by byl dále využit, bylo by tím dosaženo snížení nejen ekonomické náročnosti v oblasti sušení, ale bylo by i zredukováno 164 tun oxidu uhličitého vypuštěného do ovzduší ročně z jedné jediné pece [30].

2.4.6 Rekuperovaný vzduch z chladicí zóny

Důležitým hlediskem při snižování produkovaných emisí CO₂ je co možná nejefektivnější zamezení úniku tepla do okolního prostředí. V analýze [31] bylo ukázáno, že maximálně 20 % vložené energie bylo efektivně využíváno ve výpalu cihlářských výrobků. V průběhu výpalu bylo pak zbylé množství energie ztraceno pecními komíny, z čehož ty byly na ztrátách v chladicí části podíleny nejvíce, nebo průchodem skrz stěny pece.

Jedna z méně náročných možností, která by se dala zřídit v cihelnách při výpalu cihlářského a keramického střepu, by bylo použití silnějších stěn. Nepocházelo by k únikům tepla, tudíž by nebylo zapotřebí vyšší spotřeby paliva na zvýšení či udržení dané teploty. Přidáním tepelně izolačních stěn by se zároveň více začal zvedat statický tlak.

O něco efektivnější by ovšem bylo zavedení izolovaného potrubí z chladicí oblasti pece do části vypalovací. Princip spočívá v nasátí vzduchu z procesu chlazení, smísení části tohoto vzduchu s vnějším vzduchem na pracovní teplotu 105 °C a přemístění za konstantního tlaku v izolovaných trubkách do spalovací části pece. Při měření teploty vstupujícího vzduchu do vypalovací části se došlo k hodnotám v průměru okolo 1000 °C. Tento vhněný vzduch fungoval jako okysličovadlo, tudíž se dal využít jako spalovací teplo k použitým hořákům. To znamená, že pro docílení vyšší teploty, by nebylo potřeba

tak velké spotřeba paliva. Díky naměřeným výsledkům se dospělo k závěru, že vzduch, který v sobě nesl energii v hodnotě 685 kW, dokázal ušetřit až 17,3 % vložené energie. Toto mělo za následek nejen snížení emisí CO₂ produkovaných při spalování, ale i snížení finančních prostředků investovaných do spalování. Konkrétně při 8064 odpracovaných hodinách za rok by se dalo ušetřit v přepočtu lehce přes 4,5 milionu korun českých [31].

2.4.7 Vliv popílků z pokrutin a mandlových skořápek

Pro španělský průmysl jsou jednou z hlavních komodit výroby pevné zbytky po lisování olejnin, neboli pokrutiny, a mandlové skořápky. Popel z těchto dvou hlavních surovin obsahuje velké množství alkálií, respektive přes 35 % oxidu draselného napomáhající tavení. Tyto popílků byly smíchány ve výzkumu [32] se dvěma druhy jílové suroviny. První, která byla používána pro výrobu červeně vypálených cihel, způsobené větším množstvím Fe₂O₃ v jílu, a druhá pro vysoce žáruvzdorné materiály. Příklad popílků byl stanoven na 5 %, 10 %, 20 % a vzorky byly vypáleny na maximální teplotu 1300 °C.

Největšího úspěchu bylo dosaženo s použitím 5 a 10 % pokrutiny a 10 % mandlových skořápek do první směsi jílu a pouze 10 % s přidáním pokrutiny do druhé směsi. Způsobené to bylo především větším množstvím K₂O v pokrutině než ve skořápkách, díky kterým byla výrazně snížena teplota výpalu. Konkrétně teplota slinutí se pohybovala okolo 1000 °C. Zvýšená příměs už pak nadále jen způsobila navýšení teploty slinutí. Složení biomasy vykazovalo ztrátu žhání okolo 40 % z nevyhořelých zbytků a zbytků uhličitánů. Tím bylo pravděpodobně docíleno zvýšení pórovitosti a tím horší schopnosti spečení.

Vybrané vzorky byly pak podrobeny různým zkouškám a byla zjištěna pórovitost, nasákavost, lineární smrštění, objemová hmotnost a pevnost v tahu. Nakonec byla propočítána teoretická úspora energie a snížení emisí CO₂ na daných vzorcích. Pro tepelně izolační materiály bylo docíleno největší úspory v přepočtu okolo 4,3 milionu korun českých s přidáním 10 % mandlových skořápek. Pro výrobu cihlářských výrobků mezi 2,6 – 3 miliony českých korun s použitím 5–10 % pokrutiny [32].

2.4.8 Vliv popílků z rýžových slupek a cukrové třtiny

Ve výsledku by se tyto popílků daly použít pro snížení produkce CO₂, ale jen v omezené míře. Podle studie [13] obsahovaly popílků z rýžových slupek něco málo kolem 2 % K₂O. V tomto výzkumu bylo docíleno snížení teploty, ale zároveň s přidáním větším

množstvím byla zvýšena pórovitost a tím i nasákavost. Teoretické znatelné ušetření nákladů a snížení emisivity by se dalo dosáhnout s přidavkem maximálně 5 % popílku z rýžových slupek při zachování relativně dobrých mechanických vlastností.

O něco horších výsledků by se pravděpodobně dosáhlo s přidáním popílku z cukrové třtiny. Jak studie [9] ukázala, daný popílek měl pouze 0,32 % K_2O a 0,28 % N_2O , tudíž k výraznému snížení teploty nedošlo. Materiál ale vyhoří a dojde tak k výraznému vylehčení střepu. Ke snížení emisivity CO_2 dojde ale teoreticky velmi málo.

2.4.9 Vliv uhelného popílku, žulového prachu a odpadního skla

Nejmenších hodnot alkálií bylo dosahováno u uhelného popílku podle tabulky ze studie [6]. Z těchto tří surovin by měl mít tedy nejmenší vliv na snížení vypalovací teploty a s tím spojené i ušetření na energetické spotřebě paliva doprovázené emisemi CO_2 . Nicméně měl narozdíl od dalších dvou příměsí největší procento Fe_2O_3 , které zde zastávalo též funkci taviva a snižovalo interval slinování. Proto přidáním popílku bylo docíleno snížení teploty až o 150 °C a tím i snížení produkce CO_2 .

Pozitivních hodnot bylo dosaženo i s přidáním odpadního skla ve výzkumu [16]. S přidavkem skla byla snížena teplota výpalu o přibližně 100 °C při zachování prakticky stejných mechanických vlastností. Toto nastalo z důvodu vysokého obsahu Na_2O , konkrétně 13,67 %. Tudíž odpadní sklo by se teoreticky dalo použít jako efektivní příměs pro snížení emisivity cihlářské pece.

S použitím prachu ze žulového kamene byl začátek slinování posunut už na 700 °C a konečný výrobek byl vypalován na teplotu okolo 950 °C. Na snížení teploty výpalu mělo podíl značné procento alkálií, které bylo obsaženo v žule podle studie [4]. Žula měla i pozitivní efekt na smrštění a pórovitost materiálu. Díky výraznému snížení teploty, by se dala použít do směsi i za účelem teoretického snížení produkce emisí CO_2 .

2.5 Přímé lehčení střepu vyhořívajícími lehčivými

V dnešní době se pro výrobu cihlářského střepu do jílové směsi přidávají různá organická lehčiva za účelem vylehčení střepu a snížení potřebného paliva pro jeho výpal. Tato lehčiva obsahují ve své struktuře organické složky, které při výpalu střepu vyhořívají, přeměňují se na popílek, se kterým podporují hoření a napomáhají celkovému šíření tepla skrz výrobek. Po vyhoření těchto složek dojde navíc k vylehčení střepu. Konstrukce

pak není tolik namáhaná použitým výrobkem a díky použití vyhořívajících lehčiv se zvýší tepelně a zvukově izolační vlastnosti. V ČR jsou nejvíce zastoupeným lehčivem dřevěné piliny. Stalo se to převážně kvůli přemnožení kůrovci v posledních letech a spousta stromů muselo být pokáceno a předáno na zpracování. Ovšem za poslední dobu období kůrovců ustává a pilin začíná být pro cihlářskou výrobu nedostatek. Proto se snažíme najít alternativní organická lehčiva, která by dokázala nahradit značnou část použitých dřevěných pilin.

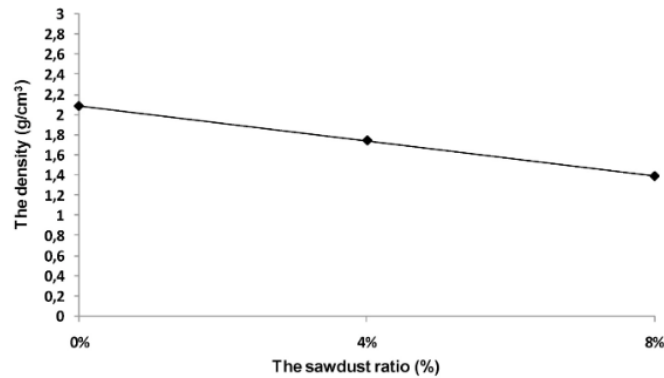
2.5.1 Dřevěné piliny

Piliny jsou odštěpky organického původu. Získávají se ze zpracování v dřevním průmyslu. Chemické složení pilin je 50 % uhlíku, 6 % vodíku a 44 % kyslíku. Dá se z nich vyrábět mimo jiné i korek.

U výzkumu [33], který se zabýval závislostí fyzikálně-mechanických vlastností výrobků vylehčených dřevěnými pilinami, musel být upraven vypalovací proces. Při původních 6 h na vypalovací teplotě 850 °C byly s přidavkem pilin vytvořeny trhlinky a černá jádra. Vypalovací teplota byla upravena na zhruba 2 h pro docílení podobného vzhledu jako vzorek bez pilin. Díky vyhořívání organického lehčiva ve vzorku bylo s přidavkem 8 % pilin docíleno snížení objemové hmotnosti o 600 kg/m³. To nastalo v důsledku vzniku zdánlivé pórovitosti. Výrobek byl lehčí, tudíž by nezatěžoval příliš konstrukci a kvůli vyšší pórovitosti byl materiál lepší pro použití z hlediska tepelné a zvukové pohltivosti.

Například při přidavku až 25 % pilin bylo docíleno podle studie [34] snížení tepelné vodivosti z 0,30 na 0,19 W/(m*K). V závislosti na tom byla razantně zvýšena nasákavost, konkrétně přes 20 % při 8 % a přes 60 % při přidavku 25 % pilin.

Musí se počítat také s tím, že s vylehčením střepe dojde ke snížení pevnosti v tlaku. Obr. 8 interpretuje příklad vzorků, u kterých byla vykazována pevnost v tlaku pouhých 10 MPa, tak bylo dosaženo poklesu pevnosti až o 50 % s přidáním 8 % pilin ve studii [33].



Obr. 8 Graf závislosti objemové hmotnosti na množství přidaného lehčiva u vzorků s aditivem dřevěných pilin (SD)
Zdroj: [33]

U odolnějších vzorků, které vykazovaly pevnost v tlaku 25 MPa nebyl zaznamenán z počátku tak razantní pokles. Největšího rozdílu ve snížení pevnosti bylo dosaženo okolo 40 % pórovitosti ve výzkumu [34].

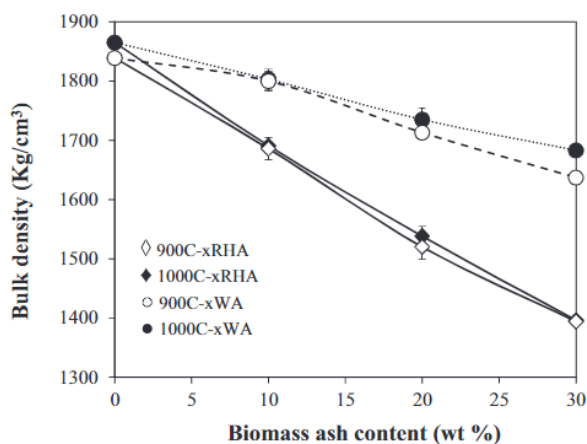
2.5.2 Dřevní popel

Jako alternativu pro dosavad používané piliny by se dal do směsi přidávat dřevní popel. Podle chemické analýzy ze studie [13] dřevní popel obsahoval procentuálně velké množství CaO. Oxid vápenatý nám ve směsi zkracuje interval slinutí. Na druhou stranu nám také ale snižuje kyselinovzdornost střepu.

Ve studii [35] byly vyzdvihovány u dřevního popela jeho pucolánové vlastnosti. Popel jako pucolánová příměs fungoval jako pojivo a bylo zaručeno vytvoření kompaktnější struktury. Dále pucolány jsou látky, které za přítomnosti vody reakcí s hydroxidem vápenatým tvrdnou a vykazují nárůst pevností. Toto mělo pravděpodobně za následek to, proč byla směs s přídavkem 10 % dřevního popela vyznačována vyšší pevností v tlaku než kterékoliv směsi s různým přídavkem pilin. Dokonce byly vyšší než u samotného referenčního vzorku.

Ve výzkumu [34] byly porovnávány fyzikální vlastnosti vypálených vzorků s přídavkem 25 % různého lehčiva. U vzorků s dřevním popelem byla dosahována ze všech tří použitých lehčiv nejmenší hodnota pórovitosti a k ní odpovídající nasákavosti, která byla stanovena okolo 27 %.

Tuto hodnotu bylo možno ověřit i podle studie [13], kde bylo docíleno podobných výsledků. Navíc díky kompaktnější struktuře materiálu měl vzorek vyšší tepelnou vodivost než například s použitím rýžových slupek. Naštěstí díky vyhořívajícímu popelu byla dosažena hodnota tepelné vodivosti nižší než u referenčního vzorku. O to důležitější bylo snížení objemové hmotnosti, kterou se podařilo snížit, ale jen o pouhých 200 kg/m^3 , jak je vyhodnoceno v Obr. 9.



Obr. 9 Graf závislosti objemové hmotnosti na množství přidaného lehčiva a na teplotě výpalu u vzorků s aditivem popílku z rýžových slupek (RHA) a dřeva (WA)
Zdroj: [13]

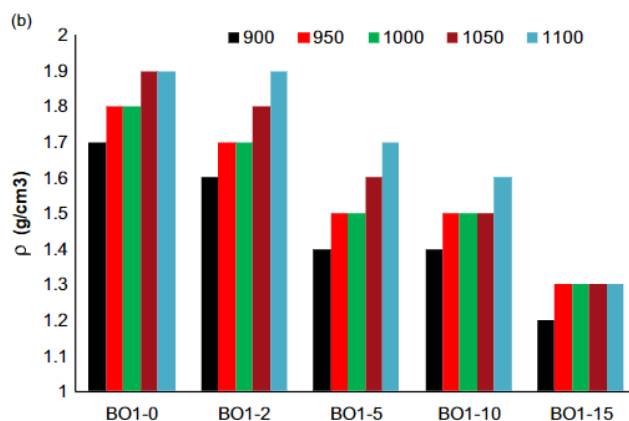
2.5.3 Kukuřičné klasy

Z kukuřice se používají především pro potravinářský průmysl její zrnka, přičemž zbytek se dá zařadit mezi organický odpad. Z chemické analýzy popela podle výzkumu [35] byla zaznamenána velká ztráta žíháním, která by mohla být vedena k vylehčení střepe, a velké množství oxidu draselného, který by mohl ve směsi zastávat funkci taviva a snížit potřebnou teplotu výpalu.

Vzorky byly připraveny s příměsí do 15 % a vypáleny na různou vypalovací teplotu od $900 \text{ }^\circ\text{C}$ do $1100 \text{ }^\circ\text{C}$. Vypálený střepe měl výrazně červenou barvu, která byla předznačena rentgenovou difrakční analýzou zaznamenávající výrazné množství minerálu hematitu Fe_2O_3 . Dále byly prověřeny fyzikální a mechanické vlastnosti střepe.

U lineárního smrštění nebylo dosahováno příliš znatelné změny. Zato objemová hmotnost byla snížena až o 600 kg/m^3 při přidavku 15 % a výpalu na $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ vyplývající z Obr. 10. Nasákavost byla zvyšována se zvyšující se pórovitostí a největšího nárůstu

bylo dosaženo při přidání mezi 10 až 15 % lehčiva. Když byla přidána pouhá 2 %, nasákavost dokonce klesla při 1100 °C a při 5 % přidání příměsi byla podobná jako u referenčního vzorku [36].

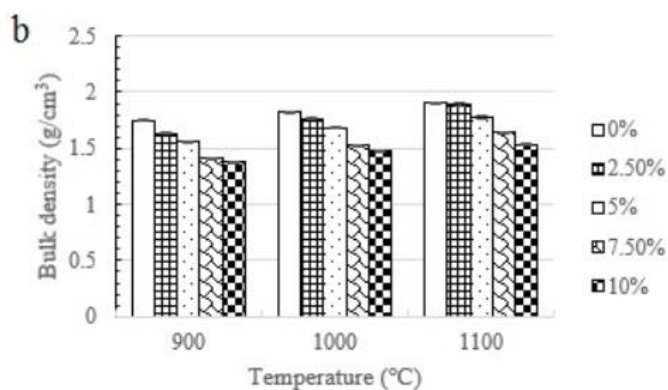


Obr. 10 Graf závislosti objemové hmotnosti na množství přidávaného lehčiva a na teplotě výpalu u vzorků s aditivem kukuřičných klasů (CC)
Zdroj: [36]

2.5.4 Rýžové slupky

Z již dříve řečeného obsahu rýžových slupek a díky velké spotřebě rýže se dá usoudit, že by se tento organický odpadní materiál dal druhotně využít jako lehčivo do cihlářského střepu. Z pohledu chemického složení byl popel z rýžových slupek složen převážně z křemene, který snižuje citlivost k sušení, a z určitého množství alkalického oxidu draselného, který by mohl fungovat jako tavivo pro snížení potřebné teploty výpalu [13].

Studie [37] byla zaměřena na vzorky s příměsí 2,5–10 % vypálené na 900 °C, 1000 °C a 1100 °C. Lineární smrštění díky velkému množství křemene ve slupkách nebylo pro zkoušku relevantní, jelikož bylo změněno tak o 1 %. Zajímavé ovšem bylo, že zprvu při přidání 2,5 % příměsi bylo lineární smrštění zmenšeno. Byl zaznamenán určitý nárůst nasákavosti až o 10 %, který byl vyvolán zvýšenou pórovitostí vzorků. Oproti předějším příměsím bylo docíleno markantních výsledků. Pozornost byla upoutána především ve výsledném snížení pevnosti v tlaku až na jednu pětinu původní hodnoty při 10 % příměsi vypáleného vzorku na 1100 °C. Při lehčení střepu byla sledována hlavně výsledná objemová hmotnost, která byla snížena v Obr. 11 tak o 400 kg/m³.



Obr. 11 Graf závislosti objemové hmotnosti na množství přidaného lehčiva a na teplotě výpalu u vzorků s aditivem rýžových slupek (RH)
Zdroj: [37]

2.5.5 Pšeničná sláma

Vysokou produkci v zemědělském průmyslu zaujímá také pšenice. Po jejím zpracování zbude velké množství obilných klasů jako druhotný produkt. Tento odpadní zbytek by se dal spálit na popel a použit jako příměs do jílové směsi. Nebo v případě studie [38] byly rozemlety klasy na zrnka o velikosti 0,5–1 mm, ty byly dále smíchány s jílem a byly vytvořeny vzorky vždy s odlišným procentuálním zastoupením této příměsi. Vzorky byly následně vypáleny na teplotu 920 °C.

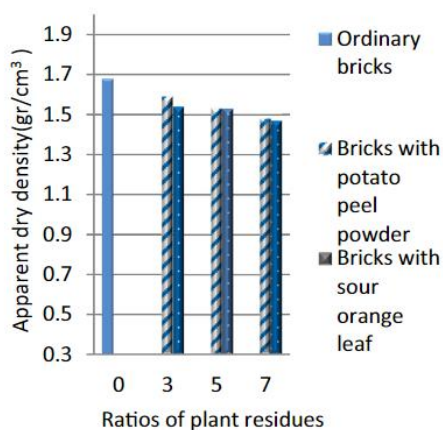
Po přidání příměsi bylo zmenšeno lineární smrštění, tudíž u vzorků bylo docíleno menší citlivosti k sušení. Bylo tudíž předpokládáno, že filler obsahoval z chemického hlediska velké množství SiO_2 . Po přidání 8 % příměsi byla objemová hmotnost snížena z 1950 kg/m^3 na 1460 kg/m^3 , tudíž bylo zaznamenáno vylehčení vzorků až skoro o 500 kg/m^3 . S tím bylo spojeno i zvýšení pórovitosti a s ní související nasákavosti skoro o 20 % referenční hodnoty. Pevnost v ohybu byla zmenšena přibližně o 2 MPa na 4 % příměsi, při 8 % nastal výraznější pokles a to asi o 56 % z původní hodnoty. Tepelná vodivost byla zlepšena, bylo dosaženo snížení na $0,28 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, na skoro poloviční hodnotu referenčního vzorku.

2.5.6 Bramborové slupky

Brambory jsou jedna z komodit, která má nižší celkovou produkci ve světě, třeba až o polovinu méně než je produkce například výše zmíněné pšenice nebo rýže. Na druhou stranu jejich slupky zaujímají podstatnou část odpadního materiálu, ať už ze zemědě-

ského průmyslu, či z kuchyně nebo domácností. U výzkumu [39] bylo pojednáváno o alternativním využití těchto slupek při zamíchání do jílové směsi s přísadkou 3 %, 5 % a 7 % této příměsi. Slupky musely být nejdříve vysušeny a rozemlety na jemný prach. Výsledné vzorky byly vypáleny na 1100 °C.

U chemické analýzy prachu bylo prokázáno největší množství kalcitu a menší množství křemene. Z této analýzy by se dalo předpokládat, že výsledný vzorek by měl vykazovat větší citlivost k sušení a menší pevnosti (SiO_2) a střep by měl mít zkrácený interval slinutí (CaO). Pevnost v tlaku byla vyznačena poklesem na polovinu referenční hodnoty už při přidání pouhých 3 % tohoto prachu. Při 7 % byla změna razantní a pevnost byla pětina. Pórovitost s nasákovostí byla zvýšena maximálně o 10 %. Celkové smrštění bylo podle předpokladu zvětšeno, dokonce až o 3,5 %. Sledováno bylo především snížení objemové hmotnosti, které bohužel nebylo tak výrazné, jak bylo předpokládáno. Z původní referenční hodnoty stanovené kolem 1700 kg/m^3 byl zaznamenán pokles pouze na zhruba 1500 kg/m^3 patrný v Obr. 12. Toto bylo způsobeno pravděpodobně menším navýšením pórovitosti, která byla doprovázena menším snížením tepelné vodivosti.



Obr. 12 Graf závislosti zdánlivé hustoty na množství přidaného lehčiva u vzorků s aditivem prachu z bramborových slupek (PPP)
Zdroj: [39]

2.5.7 Čistírenské kaly

Zrecyklování kalů by velice prospělo našemu životnímu prostředí. Denně se vyprodukuje přes 45 miliónů tun odpadních kalů, které způsobují díky škodlivým látkám sekundární znečištění. Tyto látky by se čistě teoreticky daly zneškodnit díky slinování

střepu při vysokých teplotách. Jíly mají podobné chemické složení jako čistírenské kaly, s tím rozdílem, že kaly obsahují značné množství fosforu, železa a vápníku.

Studie [40] byla zaměřena na přidání až 30 % přídavku do jílové směsi. Příměs čistírenských kalů musela být nejdříve vysušena a následně pomleta na velikost zrn 0–2 mm. Vzorky byly vypáleny na 900 °C. Z mineralogické analýzy bylo odhaleno, že hlavním minerálem základních složek byl křemen, a dále menší množství illitu, muskovitu a kal-citu. Nesly s sebou ovšem veliké množství tavících oxidů, které by mohly snížit teplotu tavení a oxid železitý, který by mohl zapříčinit červenou barvu střepu.

Přednostně byla studie zaměřena na objemovou hmotnost, u které bylo docíleno poklesu o 570 kg/m³ a zmenšení smrštění až o 5 % při 30 % přídavku příměsi. Pevnost v tlaku byla ze začátku v podstatě nezměněna, ale od 20 % příměsi byla razantně snížena. Navíc pravděpodobně díky nárůstu otevřené pórovitosti byla poměrně dost zvýšena i nasákavost, přibližně o 18,5 %. Nakonec byla stanovena i tepelná vodivost střepu, která byla díky narůstající pórovitosti snížena z 0,74 až na 0,39 W/(m·K) s hodnotou příměsi 30 %.

3 Experimentální část

3.1 Metodika práce

Experimentální část bakalářské práce je rozdělena na tři etapy.

3.1.1 Etapa I

Etapa I se zaměřuje na popis vstupních surovin, které jsou použity pro vytvoření plastického těsta potřebného na přípravu zkušebních těles. Mezi základní vstupní suroviny patří jíla a písek. Jako 70 % směsi je zvolena vápenitá jílová zemina z cihelny Holice, jednoho z výrobních závodů Wienerberger s.r.o. a jako 30 % směsi je použit velmi jemný křemenný písek frakce 0–2 mm odebraný z lokality Žabčice. Mezi zkoumané suroviny se řadí aditiva, která ve směsi fungují jako taviva a snižují nám teplotu výpalu cihlářského střepu. Na základě výzkumu [17], [18], kde bylo prokázáno, že určité množství fosforečnanů bylo schopno snížit teplotu výpalu za současné navýšení pevností, tak je pro experiment vybráno a použito 10 % kyseliny fosforečné (H_3PO_4) a 2 % hexametafosfátu sodného (NaPO_3)₆. Po průzkumu několika studií [19], [20], [21], ve kterých bylo naznačeno možné použití vodních skel pro zlepšení tavících účinků směsi, je vybráno 10 % sodného vodního skla (Na_2SiO_3) s modulem $m = 1,6$ (značící vysoký obsah sodných alkálií) a 10 % nasyceného roztoku hydroxidu sodného (NaOH) pro ověření zmíněných vlastností. Nakonec je použit i nasycený roztok boraxu při 20 °C ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) díky provedeným experimentům [22], [23].

3.1.2 Etapa II

Etapa II popisuje zkoušky vstupních surovin, konkrétně rentgenovou difrakční analýzu, dále popisuje postup vyhotovení zkušebních těles a zkoušky na plastickém těstě, ze kterého jsou tělesa vyrobena. Smícháním všech surovin a homogenizací s adekvátním množstvím záměsové vody vznikne plastická směs, která je podrobena zkoušce stanovení plastičnosti keramických těst Pfefferkornovým přístrojem. Je vytvořeno 6 pracovních směsí, přičemž jedna z nich je referenční bez přidání jakéhokoliv taviva. Od každé směsi je vytvořeno 7 zkušebních cihlek. Velká cihelka je dle ČSN 72 1565-4 zkušební tělisko, které je vytvarované do předepsaného geometrického tvaru určitým technologickým postupem pomocí vysunutí dna formy a následně rozpůlené o rozměrech

100 mm × 50 mm × 20 mm [41]. Dále jsou vybraná tělesa podrobena zkoušce stanovení skutečné vlhkosti.

3.1.3 Etapa III

Etapa III obsahuje provedené zkoušky a stanovení na vysušených a vypálených vzorcích pro zjištění jejich fyzikálně-mechanických vlastností. Vzorky byly vysušeny na $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ a následně byly různé vzorky vypáleny na odlišné teploty. Konkrétně vždy jeden vzorek od každé pracovní směsi byl vypálen na $550 ^\circ\text{C}$, $650 ^\circ\text{C}$, $750 ^\circ\text{C}$ a ze čtyř směsí na $900 ^\circ\text{C}$. Mezi zkoušky na vysušených vzorcích patří stanovení smrštění sušením. Na vypálených vzorcích je provedena zkouška termického rozboru keramických surovin, konkrétně kontrakčně-dilatační termická analýza, diferenční a vázková termická analýza. Dále je stanoveno smrštění pálením a celkové smrštění, objemová hmotnost hydrostatickým vážením, nasákavost, zdánlivá pórovitost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku.

3.2 Cíl experimentu

Cílem experimentu je navržení a ověření prozkoumaných zmíněných taviv přidáním do cihlářské směsi za účelem možného snížení výsledné teploty výpalu při zachování podobných fyzikálně-mechanických vlastností či dokonce jejich zlepšení. Taviva tvoří skelnou fázi struktury silikátových materiálů za dřívější nižší teploty, než je obvyklá určená teplota slinování daného materiálu. Potenciál taviv je nejen tedy ve snížení potřebné teploty výpalu cihlářského střepu, ale i v úspoře spotřebovaného paliva a s tím související redukcí ekologického zatížení životního prostředí oxidem uhličitým. Vzhledem k malému počtu vyhotovených těles slouží experiment hlavně jako orientační, kdy je cílem dosáhnout teoretického přehledu o vlastnostech použitých taviv a jejich vlivu na výsledné fyzikální a mechanické vlastnosti cihlářského střepu.

3.3 Zkoušky provedené na vstupních surovinách

3.3.1 Rentgenová difrakční analýza (XRD)

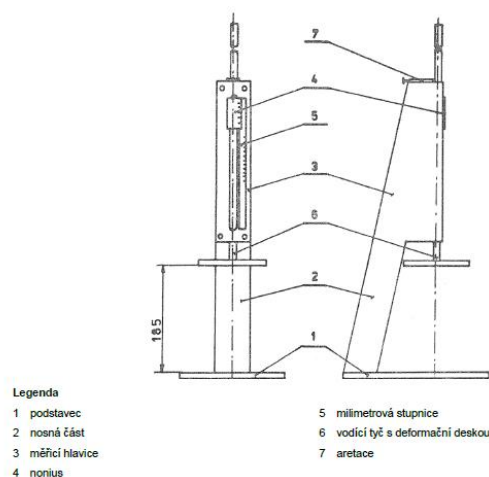
Díky metodě XRD je umožněno stanovení mineralogické složení zkoumaného materiálu pomocí odrazů (difrakcí) rentgenového záření dopadajícího pod určitým úhlem. Materiál je nejprve podrcen na velikost částic menších než 0,063 mm a následně vložen

do formičky ve tvaru obdélníka nebo kruhu. Je překryt krycím sklíčkem a vložen do difraktografu. Z přístroje je vyhodnocen graf zvaný difraktogram, kde se na ose X nachází hodnoty úhlů záření 2θ a na ose Y intenzita. Na difraktogramu jsou zaznamenány tzv. píky, pro které jsou následně určeny dané mezimřížkové vzdálenosti. Každý minerál je charakterizován vlastní mezimřížkovou vzdáleností a na základě těchto hodnot stanovených z difraktogramu jsou určeny pomocí kartotéky ASTM (American Society for Testing and Materials) jednotlivé minerály [42].

3.4 Zkoušky provedené na plastickém těstě

3.4.1 Stanovení plastičnosti pomocí Pfefferkornova přístroje (ČSN 72 1074)

Tvarování je usnadněno určitou vlhkostí, která je obsažena v plastickém těstě. Dle ČSN 72 1074 je plastičnost určena z deformačního poměru na Pfefferkornově přístroji. Z vytvořeného plastického těsta je zhotoven zkušební váleček o průměru $(33 \pm 0,5)$ mm a výšce $(40 \pm 0,5)$ mm. Rozměry válečku jsou nejprve změřeny na přístroji. Pfefferkornův přístroj je nastaven do výchozí polohy, deska je uvolněna a je ponechána volným pádem ze 185 mm zdeformovat daný váleček umístěný ve středu desky. Následně jsou změřeny rozměry válečku po zdeformování [43].



Obr. 13 Schéma Pfefferkornova přístroje
Zdroj: [43]

$$d = \frac{h_1}{h_0} \quad (1)$$

kde je

h_1 výška plastického těsta po deformaci [mm]

h_0 výška plastického těsta před deformací [mm]

d deformační poměr plastického těsta [-]

[43]

3.4.2 Stanovení absolutní vlhkosti (ČSN 72 1565-11)

Voda je v materiálu vázána třemi různými způsoby. Je dělena na volnou, fyzikálně a chemicky vázanou. Může být zbavena sušením a následným výpalem. Absolutní vlhkost materiálu je dle ČSN 72 1565-11 charakterizována množstvím vody ve vzorku ku hmotnosti vysušeného vzorku při $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ vyjádřená v procentech [43].

$$w_a = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (2)$$

kde je

m_n hmotnost vzorku po vytvoření [g]

m_s hmotnost vzorku po vysušení [g]

w_a absolutní vlhkost vzorku [%]

[43]

3.5 Zkoušky provedené na vysušených vzorcích

3.5.1 Stanovení délkových změn sušením (ČSN 72 1565-5)

Dle ČSN 72 1565-5 je délková změna sušením definována jako změna lineárních rozměrů zkušební vzorku v důsledku procesu sušení vyjádřená v procentech. Může být docíleno smrštění, kdy je změna stanovena jako záporná. Vyhodnocení zkoušky je provedeno z porovnání změny vzdálenosti vtisknuté zkušební úsečky na zkoumaném tělese po vytvoření a po vysušení. Na vzorcích o rozměrech $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ je vyznačena diagonálně úsečka o velikosti $(100,0 \pm 0,05) \text{ mm}$ [44].

$$DS = \frac{l_s - l_z}{l_z} \cdot 100 \quad (3)$$

kde je

- l_z vzdálenost břitu razničky (100 mm) [mm]
- l_s délka úsečky měřená na protilehlých stranách jedné vysušené cihelky [mm]
- DS délková změna sušením [%]

[44]

3.6 Zkoušky provedené na vypálených vzorcích

3.6.1 Kontrakčně-dilatační termická analýza (ČSN 72 1083)

Délková teplotní změna při výpalu je stanovena dle ČSN 72 1083 z kontrakčně-dilatační termické analýzy KDTA, kdy vysušený je změřený vzorek umístěn do oblasti konstantní teploty v peci dilatometrického přístroje. Vzorek je ze začátku zahříván lineárně vzrůstající teplotou (2–10) °C za minutu. Během výpalu je zaznamenána délková změna vzorku v závislosti na stoupající teplotě. Výsledkem této zkoušky je křivka zobrazující závislost délkové změny na teplotě vyjádřená v procentech nebo v milimetrech [45].

$$D = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 \quad (4)$$

kde je

- Δl délková změna ve sledovaném teplotním rozmezí [mm]
- l délka zkušebního tělesa [mm]
- D délková teplotní změna [%]

dle D:

- D > 0 dilatace (roztažnost)
- D < 0 kontrakce (smrštění)
- D = 0 rozmezí délkových invariancí

[45]

3.6.2 Diferenční termická analýza (DTA), vážková termická analýza (GTA)

Pomocí DTA je stanovena křivka rozdílu teplot mezi vzorkem a inertním standardem v závislosti na teplotě standardu. Na začátku je navážen vzorek o hmotnosti 0,1–2 g a stejné množství standardu, kterou budou následně zahřívány lineárním vzestupem teploty (10 ± 2) °C za minutu. Průběh křivky nad nulovou hranicí je nazýván exotermní reakcí, průběh pod hranicí zase endotermní reakcí. Vyhodnocení je stanoveno porovnááním vykreslené křivky se standardními křivkami uvedenými v přílohách nebo literatuře.

Společně s DTA je provedena i vážková termická analýza (GTA). Při této zkoušce je zjištěna změna hmotnosti navážky vzorku o hmotnosti 0,2–2 g v průběhu zahřívání. Navážený vzorek je zahříván předepsanou rychlostí a výstupem je znázorněna křivka změny hmotnosti v procentech nebo gramech navážky [45].

3.6.3 Stanovení délkových změn pálením (ČSN 72 1565-5)

Dle ČSN 72 1565-5 je délková změna pálením definována jako změna lineárních rozměrů zkušebního vzorku v důsledku procesu pálení vyjádřená v procentech. Může být docíleno smrštění, kdy je změna stanovena jako záporná, nebo naopak kladná v případě nárůstu. Vyhodnocení zkoušky je provedeno z porovnání změny vzdálenosti vtisknuté zkušební úsečky na zkoumaném tělese po vysušení a po výpalu. Na vzorcích o rozměrech 100 mm × 50 mm × 20 mm je vyznačena diagonálně úsečka o velikosti $(100,0 \pm 0,05)$ mm [44].

$$DP = \frac{l_p - l_s}{l_s} \cdot 100 \quad (5)$$

kde je

l_s délka úsečky měřená na protilehlých stranách jedné vysušené cihelky [mm]

l_p délka úsečky měřená na protilehlých stranách jedné vypálené cihelky [mm]

DP délková změna pálením [%]

[44]

3.6.4 Stanovení délkových změn celkových (ČSN 72 1565-5)

Dle ČSN 72 1565-5 je délková změna celková definována jako změna lineárních rozměrů zkušebního vzorku v důsledku procesu sušení a pálení vyjádřená v procentech. Může být docíleno smrštění, kdy je změna stanovena jako záporná, nebo naopak kladná

v případě nárůstu. Vyhodnocení zkoušky je provedeno z porovnání změny vzdálenosti vtisknuté zkušební úsečky na zkoumaném tělese po vytvoření a po výpalu. Na vzorcích o rozměrech 100 mm × 50 mm × 20 mm je vyznačena diagonálně úsečka o velikosti $(100,0 \pm 0,05)$ mm [44].

$$DC = \frac{l_p - l_z}{l_z} \cdot 100 \quad (6)$$

kde je

l_z vzdálenost břitu razničky (100 mm) [mm]

l_p délka úsečky měřená na protilehlých stranách jedné vypálené cihelky [mm]

DC délková změna celková [%]

[44]

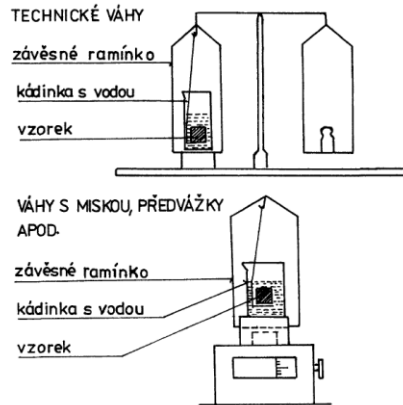
3.6.5 Stanovení objemové hmotnosti (ČSN 72 1565-6)

Objemová hmotnost vzorku je definována dle ČSN 72 1565-5 jako poměr jeho hmotnosti a objemu včetně uzavřených a otevřených pórů a dutin.

U jednoho způsobu docílení plného nasáknutí vzorku vodou jsou uloženy předem zvážené vypálené cihelky na rošt do varné nádoby. Musí být zamezeno vzájemného dotýkání vzorků a nesmí být způsoben kontakt se stěnou. Nádoba je naplněna vodou tak, aby byly vzorky zcela ponořeny pod vodou, která je následně do jedné hodiny uvedena do varu s následnou 2 hodinovou výdrží. Musí být dbáno na to, aby byly vzorky při odpařování vody stále ponořeny pod hladinou vody. Po ukončení varu je ponecháno vše na vychladnutí, vzorky jsou vyjmuty, otřeny a zváženy na vzduchu.

Při druhém způsobu jsou vloženy předem zvážené vypálené cihelky do exikátoru tak, aby bylo zamezeno vzájemného dotyku a kontaktu se stěnou nádoby. Po odsání vzduchu vývěvou je vyčkáno 10 minut než je do exikátoru napuštěna voda do poloviny výšky vzorků za stálého udržování podtlaku. Je vyčkáno dalších 10 minut a poté je voda doplněna tak, aby byl nejvyšší vzorek ponořen 2 cm pod hladinou. Po 15 minutách je zrušen podtlak, vzorky jsou vyjmuty, otřeny a zváženy na vzduchu.

Vzorky jsou nakonec zváženy ještě na hydrostatických vahách na zavěšeném vynuťovaném košíčku pod vodou. Z naměřených hodnot je stanovena objemová hmotnost hydrostaticky váženého vzorku vyjádřená v kg/m^3 [46].



Obr. 14 Způsoby úpravy vah ke stanovení objemu zkušebního tělíska
Zdroj: [46]

$$\rho = \frac{m_p}{m_n - m'_n} \cdot 1000 \quad (7)$$

kde je

- m_p hmotnost cihelky po výpalu [g]
- m_n hmotnost nasáklé cihelky vážené na vzduchu [g]
- m'_n hmotnost nasáklé cihelky vážené ve vodě [g]
- ρ objemová hmotnost [kg/m^3]

[46]

3.6.6 Stanovení nasákavosti (ČSN 72 1565-6)

Nasákavost je udávána jako poměr hmotnosti vody, která je nasáknuta vypáleným vzorkem. Postup pro vyhodnocení nasákavosti dle ČSN 72 1565-6 je prováděn totožně jako při stanovení objemové hmotnosti. Z hodnot hmotností cihelky vážené na vzduchu a ve vodě je stanovena nasákavost vzorku vyjádřená v procentech [46].

$$N = \frac{m_n - m_p}{m_p} \cdot 100 \quad (8)$$

kde je

- m_p hmotnost cihelky po výpalu [g]
- m_n hmotnost nasáklé cihelky vážené na vzduchu [g]
- N nasákavost [%]

[46]

3.6.7 Stanovení zdánlivé pórovitosti (ČSN 72 1565-6)

Zdánlivá pórovitost je definována jako poměr objemu otevřených pórů a dutin vzorku k jeho objemu včetně daných pórů a dutin. Postup pro vyhodnocení zdánlivé pórovitosti dle ČSN 72 1565-6 je prováděn totožně jako při stanovení objemové hmotnosti. Z hodnot hmotností cihelky vážené na vzduchu a ve vodě je stanovena zdánlivá pórovitost vzorku vyjádřená v procentech [46].

$$PZ = \frac{m_n - m_p}{m_n - m'_n} \cdot 100 \quad (9)$$

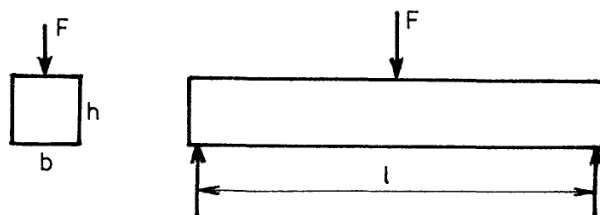
kde je

m_p	hmotnost cihelky po výpalu [g]
m_n	hmotnost nasáklé cihelky vážené na vzduchu [g]
m'_n	hmotnost nasáklé cihelky vážené ve vodě [g]
PZ	zdánlivá pórovitost [%]

[46]

3.6.8 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu (ČSN 72 1565-7)

Pevnost v tahu za ohybu je definována jako napětí, při kterém je dosaženo porušení vypáleného zkušebního tělesa namáhaného tahem za ohybu. Díky této zkoušce je nalezena velikost síly, při které je docíleno u tělesa předepsaného tlaku a rozměrů porušení při rovnoměrném zatěžování tahem za ohybu. Zkušební těleso je uloženo na podpěrných břítech a je rovnoměrně zatěžováno silou kolmo na jeho horní plochu odpovídající 5 % předpokládané konečné síly (tzn. od 50 N za sekundu) do porušení (zlomení) tělesa. Vzdálenost podpěrných bříť je volena na základě délky vzorku. Z hodnoty maximální síly a změřených hodnot je dopočítána pevnost vzorku v tahu za ohybu vyjádřená v MPa [47].



Obr. 15 Schéma zatěžování vzorku při stanovení pevnosti v tahu za ohybu
Zdroj: [47]

$$\sigma_{po} = \frac{3 F \cdot l}{2 b \cdot h^2} \quad (10)$$

kde je

F zatěžovací síla v okamžiku porušení vzorku [N]

l vzdálenost podpěrných břitů (80 mm) [mm]

b šířka průřezu zkušební tělíska [mm]

h výška průřezu zkušební tělíska [mm]

σ_{po} pevnost v tahu za ohybu [MPa]

[47]

3.6.9 Stanovení pevnosti v tlaku (ČSN 72 1565-7)

Pevnost v tlaku je definována jako napětí, při kterém je dosaženo porušení vypáleného zkušební tělesa namáhaného tlakem. Díky této zkoušce je nalezena velikost síly, při které je docíleno u tělesa předepsaného tvaru a rozměrů porušení při rovnoměrném zatěžování tlakem. Zkušební těleso je rovnoměrně zatěžováno silou kolmo na jeho horní plochu odpovídající 5 % předpokládané konečné síly do porušení (zlomení) tělesa. Z hodnoty maximální síly a změřených hodnot je dopočítána pevnost vzorku v tlaku vyjádřená v MPa [48].

$$\sigma_p = \frac{F}{A} \quad (11)$$

kde je

F zatěžovací síla v okamžiku porušení vzorku [N]

A plocha vzorku zatížená působící silou (1600 mm²) [mm²]

σ_p pevnost v tlaku [MPa]

[48]

3.7 Vyhodnocení naměřených výsledků

Tab. 1 Přehled vybraných taviv pro ověření snížení teploty výpalu cihlářského střepu

Název	Označení
Referenční vzorek	RV
10 % kyselina fosforečná	KF
10 % vodní sklo sodné $m = 1,6$	VSS
2 % hexametafosfát sodný	HS
Nasyčený roztok boraxu při 20 °C	NRB
10 % nasycený roztok NaOH	NRHS

Taviva společně s referenčním vzorkem uvedená v Tab. 1 byla použita pro výrobu 6 pracovních směsí, ze kterých bylo následně zhotoveno 7 zkušebních těles. Všechny vzorky byly vysušeny v sušárně na (110 ± 5) °C.

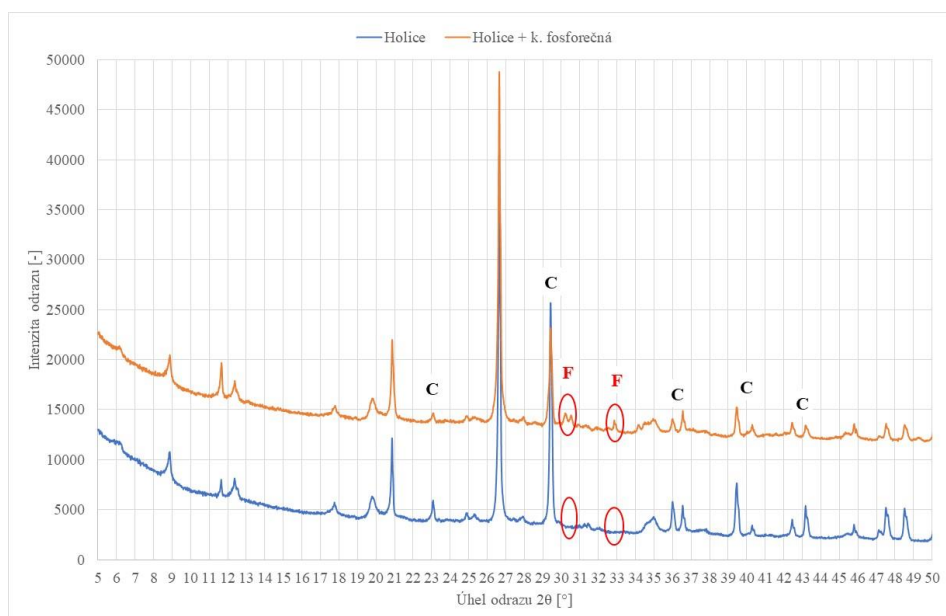
Různé vzorky byly vypáleny na odlišné teploty. Konkrétně vždy jeden vzorek od každé pracovní směsi byl vypálen na 550 °C, 650 °C, 750 °C a ze čtyř směsí na 900 °C. Na vzorkách byla stanovena pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Na úlomcích vzorků z pevnostních zkoušek bylo provedeno nasáknutí vzorečků vodou pomocí vakuové metody a vážení ve vodě proběhlo na hydrostatických vahách.

Ze stanovených hodnot byly následně zhotoveny grafy závislostí jednotlivých vlastností na druhu použitého taviva při dané teplotě výpalu. Z hlediska trvanlivosti konstrukce je především kladen důraz na mechanické pevnosti vzorků, které by měly při porovnání vykazovat podobné nebo lepší hodnoty než u referenčního vzorku vypáleného na 900 °C s pevností v tahu za ohybu 10,3 MPa a v tlaku 29,5 MPa. Vzorek se dá považovat za referenční, vzhledem k situaci, kdy se dnešní výpal cihlářských výrobků pohybuje okolo 850–900 °C. Nicméně vzhledem k nízkému počtu vyhotovených těles slouží hodnoty vlastností vzorků s tavivy spíše jako orientační.

Tab. 2 Stanovené hodnoty deformačních poměrů, skutečných vlhkostí a smrštění zkušebních vzorků

Vzorek	Pfeff d [-]	w [%]	DS [%]	DP [%]	DC [%]
RV 1	0,68	20,6	- 4,7	- 1,6	- 6,2
KF 1	0,43	29,2	- 4,8	- 0,9	- 5,6
VSS 1	0,63	20,7	- 3,6	- 0,5	- 4,1
HS 1	0,60	21,8	- 5,6	- 0,7	- 6,3
NRB 1	0,63	23,4	- 3,9	- 1,7	- 5,5
NRHS 1	0,50	23,4	- 4,0	- 1,0	- 5,0

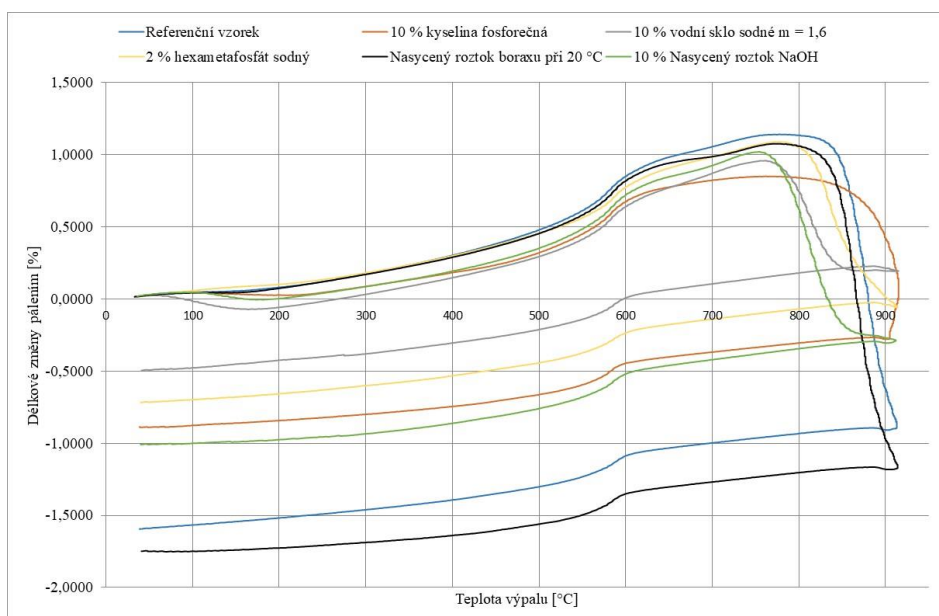
V uvedené Tab. 2 jsou stanovené deformační poměry, skutečné vlhkosti a hodnoty délkových změn sušením, pálením a celkových. Největší vlhkost měl vzorek s kyselinou fosforečnou a to 29,2 %. Této vlhkosti odpovídá i nejmenší hodnota deformačního poměru 0,43. Naopak největší deformační poměr vykazoval referenční vzorek s hodnotou 0,68. Těleso vytvořené z této referenční směsi mělo skutečnou vlhkost 20,6 %. Při tomto stanovení bylo cílem vytvořit pracovní plastické směsi s podobným až stejným deformačním poměrem. Délkové změny pálením byly stanoveny z KDTA analýzy z Obr. 17, která byla vyhodnocena pro jeden vzorek vypálený na 900 °C od každé pracovní směsi. Největší smrštění pálením měl vzorek s nasyceným roztokem boraxu a následně po něm referenční vzorek. Nejvýraznější výchylku měla směs s kyselinou fosforečnou, kde byl váleček zdeformovaný nejvíce. Z hodnot celkových smrštění je očividné, že všechny vzorky s přidáním aditivem až na hexametafosfát sodný vykazovaly menší celkové délkové změny než původní referenční vzorek a ve všech případech došlo ke smrštění vzorku.



Obr. 16 Difraktogram zeminy Holice a zeminy Holice s přidavkem kyseliny fosforečné

Pomocí XRD je umožněno stanovení mineralogického složení zkoumaných vzorků zemin pomocí odrazů (difrakcí) rentgenového záření dopadajícího pod určitým úhlem.

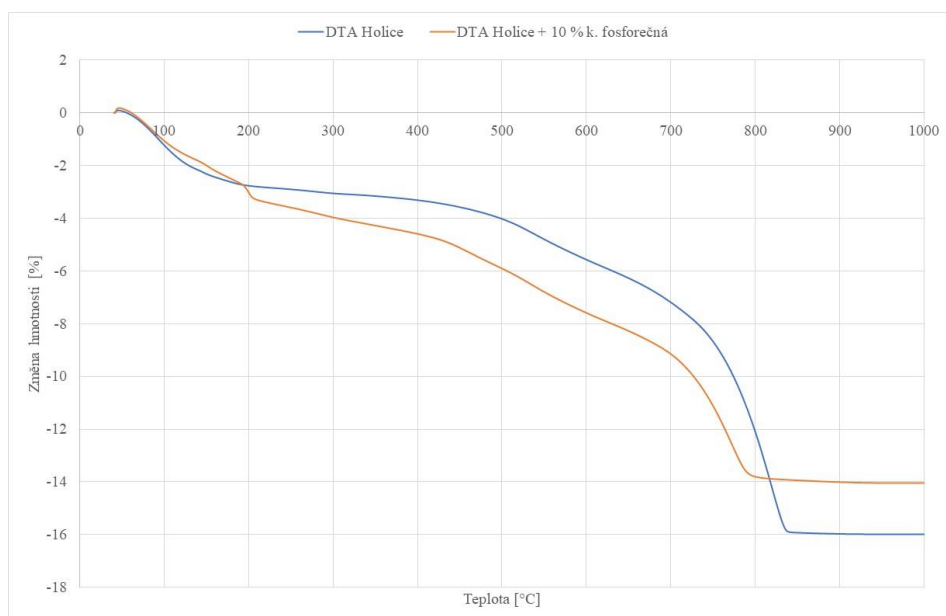
Stanovení XRD analýzy bylo provedeno na čisté zemině Holice a těžce zemině s přidanou kyselinou fosforečnou. Na difraktogramu byly zaznamenány píky, pro které byla nalezena mezimřížková vzdálenost minerálu kalcitu (vápence). Z Obr. 16 je očividné, že k výrazným změnám nedošlo. S přidáním kyseliny fosforečné se zmenšily píky kalcitu. Příčina je pravděpodobně díky rovnici $3\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$, kde již zmíněná kyselina fosforečná reaguje s vápencem a vyvolává jeho rozklad. Vytváří se fosforečnan vápenatý za současného odchodu CO_2 a vody. Tato reakce proběhla právě ještě před výpalem vzorků. U vzorku s přidanou kyselinou fosforečnou se dále vytvořilo pár menších píků, které by mohly odpovídat svou mezimřížkovou vzdáleností použitému fosfátu.



Obr. 17 KDTA diagram délkové změny pálením prvních vzorků v závislosti na teplotě

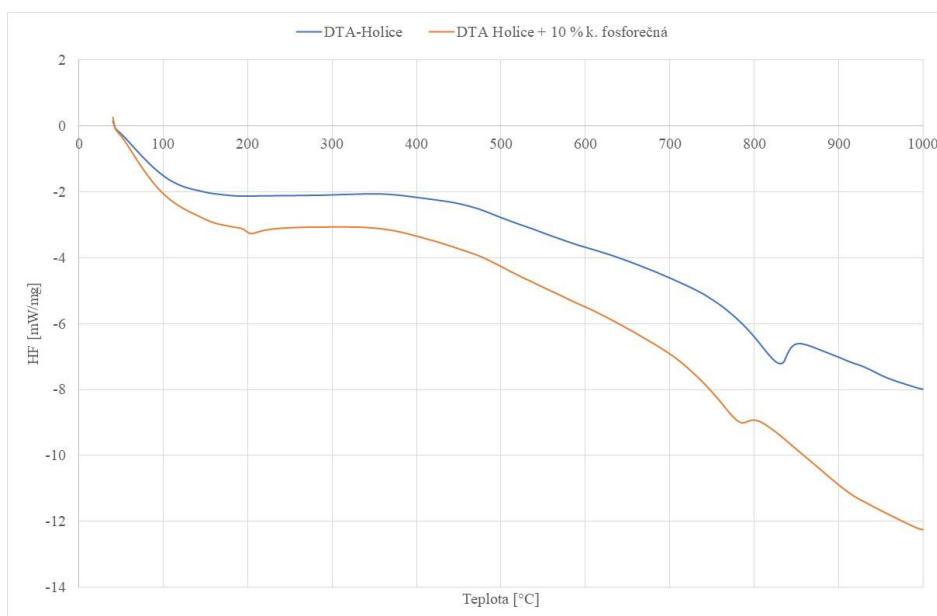
Kontrakčně-dilatační termická analýza nám popisuje chování vzorku při jeho výpalu, respektive dilatometr zaznamenává délkové změny vzorku v průběhu času během pálení. Výsledkem této zkoušky je křivka zobrazující závislost délkové změny na teplotě vyjádřená v procentech.

Tato analýza byla provedena na jedněch vzorcích od každé pracovní směsi. Všechny vzorky byly vypáleny na maximální teplotu 900 °C. Tato hodnota je charakteristická pro dnešní výpal cihlářských výrobků. Proto diagram slouží k porovnání různých délkových změn v konkrétním čase výpalu v závislosti na použitém tavivu. Z Obr. 17 je patrné, že všechny vzorky se při výpalu do 700 °C chovaly podobně. Před dosažením 800 °C se vzorky se sodným vodním sklem a roztokem NaOH začaly smršťovat dřív než ostatní. Největšího rozdílu v délkových změnách vzorků s použitým tavivem bylo tedy zaznamenáno v rozmezí 750–900 °C. Při ochlazení se vzorky chovaly opět podobně. Největší smrštění vykazoval vzorek s nasyceným roztokem boraxu, který také jako jediný měl větší smrštění než referenční vzorek. Naopak nejmenší smrštění pálením měl vzorek se sodným vodním sklem.



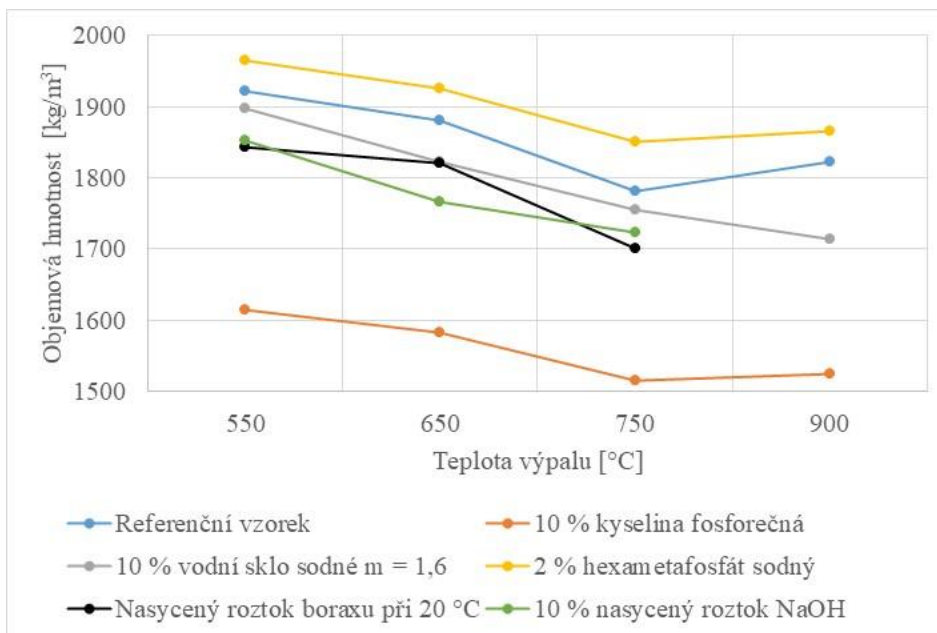
Obr. 18 Křivky DTG zeminy Holice a zeminy Holice s přidavkem kyseliny fosforečné

Křivka DTG interpretovaná v Obr. 18 je vyhotovena zároveň s diferenční termickou analýzou. Při této zkoušce je zjištěna změna hmotnosti z navážky 77,6917 mg u vzorku čisté zeminy a 49,3742 mg u vzorku těže zeminy s kyselinou fosforečnou. Navážený vzorek byl zahříván předepsanou rychlostí a výstupem je znázorněna křivka změny hmotnosti v procentech. Z diagramu je patrné, že čistý vzorek zeminy Holice měl na konci zkoušky menší procentuální hmotnost než vzorek s kyselinou fosforečnou, u kterého byla ztráta hmotnosti nižší. Ztráta hmotnosti představuje v grafu rozklad uhličitánů, kde u čisté zeminy byla výrazně větší. Způsobeno by to mohlo být chemickou reakcí kyseliny fosforečné s vápencem již při smíchání vstupních surovin podle obecně známé rovnice $3\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$. Ještě před výpalem byla schopna kyselina fosforečná rozložit určité množství vápence. Chemická reakce proběhla u vzorku s kyselinou fosforečnou dříve jak u čisté zeminy. Teplotní interval, ve kterém k rozkladu došlo, začal již zhruba o 50 °C dříve než u čisté zeminy Holice.



Obr. 19 Křivky DSC zeminy Holice a zeminy Holice s přidavkem kyseliny fosforečné

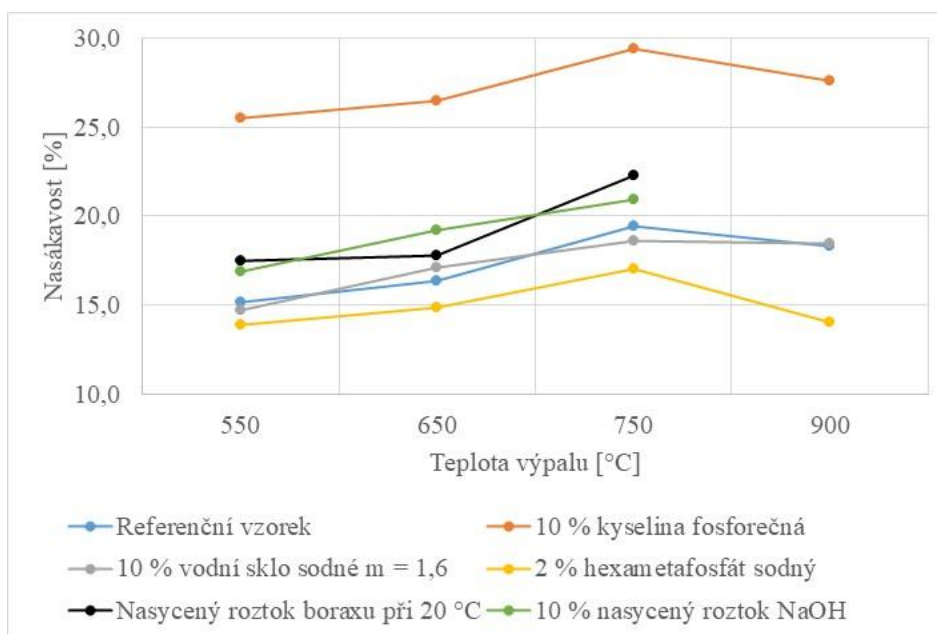
Z uvedených křivek DTG podle Obr. 18 a DSC v Obr. 19 termických analýz dokážeme říct, že u referenčního vzorku čisté zeminy docházelo k rozkladu uhličitánů v rozmezí teplot 770–840 °C, ale s přidáním 10 % kyseliny fosforečné se tento interval posunul na 720–810 °C. Termický rozklad uhličitánů nastal tedy už při nižší teplotě. Z navážky 77,6917 mg pro čistou zeminu a 49,3742 mg pro vzorek téže zeminy s kyselinou fosforečnou, rovnice rozkladu uhličitánů a jejich molekulových hmotností, konkrétně pro CaCO_3 (100 g/mol) \rightarrow CaO (56 g/mol) + CO_2 (44 g/mol), jsme schopni při teplotním intervalu určit množství odstraněného CO_2 ze vzorku. V případě čisté zeminy je odstraněno okolo 4,58 mg CO_2 a v druhém případě s aditivem kyseliny fosforečné okolo 2,07 mg CO_2 , tudíž o 2,51 mg méně. Značilo by to tedy, že při použití kyseliny fosforečné se odstraní při výpalu menší množství CO_2 , které odchází do ovzduší. Docílili bychom menší ekologické náročnosti. Při přepočtu na množství CaCO_3 obsaženého v navážce to činí 10,42 mg (13,41 %) v čisté zemině a 4,71 mg (9,55 %) v téže zemině s kyselinou fosforečnou. Toto stanovení by potvrzovalo skutečnost, že dle obecně známé reakce $3\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ kyselina fosforečná rozkládá vápenec, kterého je ve výsledné navážce méně.



Obr. 20 Graf závislosti objemové hmotnosti na druhu použitého taviva a na teplotě výpalu vzorků

Důležitým parametrem při hodnocení použitého druhu taviva je objemová hmotnost, která nám charakterizuje, jak moc výsledný vzorek slinul a dokázal vytvořit hutnou strukturu. Udává poměr hmotnosti k objemu vzorku včetně uzavřených a otevřených pórů a dutin.

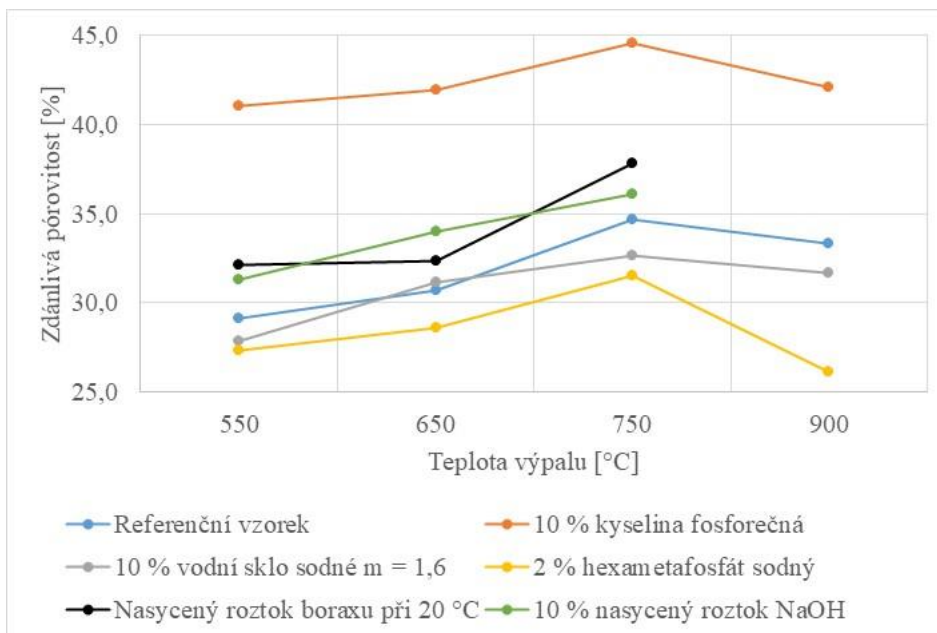
Obr. 20 interpretuje průběh objemové hmotnosti vzorku s daným použitým tavivem v závislosti na teplotě výpalu. Pouze u jednoho případu při přestupu ze 750 °C na 900 °C se snížila objemová hmotnost při zvýšení konečné teploty výpalu. Pokles objemové hmotnosti byl způsoben pravděpodobně z důvodu dehydroxylace chemicky vázané vody. Nárůst je zapříčiněn možným zaplněním pórů vzniklou taveninou. Vzorek s použitou kyselinou fosforečnou měl ve výsledku nejnižší objemové hmotnosti, které vycházely kolem 1600 kg/m³ a nižší. Naopak nejvíce slinutý byl vzorek s hexametafosfátem sodným. Jeho objemová hmotnost vyšla 1960 kg/m³ při výpalu na 550 °C a konečná objemová hmotnost byla stanovena na 1870 kg/m³ při 900 °C. Vzorek s tímto tavivem je očividně zástupce s nejhutnější strukturou.



Obr. 21 Graf závislosti nasákavosti na druhu použitého taviva a na teplotě výpalu vzorků

Podstatným parametrem při zkoumání trvanlivosti konstrukce je nasákavost daného materiálu. Je úzce spjata s pórovitostí vzorku a odvíjí se od ní mrazuvzdornost, kdy voda nasáklá v materiálu při opakovaném zmrazování ve formě ledu zvětšuje objem a vytvoří tak trhlinky a naruší celkovou konstrukci.

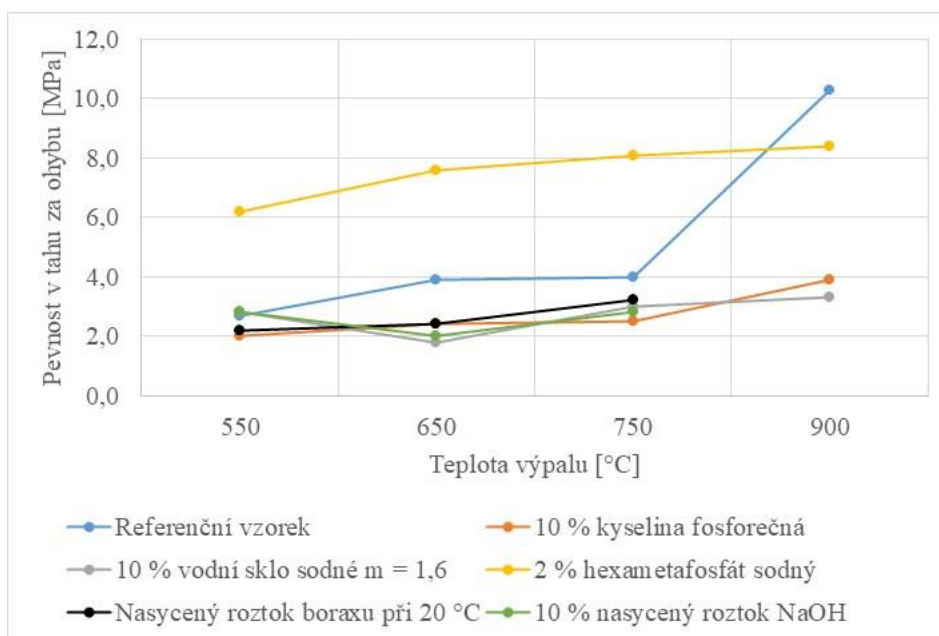
Obr. 21 vykazuje průběh nasákavosti vzorku s daným použitým tavivem v závislosti na teplotě výpalu. Z grafu je patrné, že se vzrůstající teplotou výpalu z 550 °C na 750 °C se nasákavost vzorků vždy zvyšovala. Zapříčiněno je to pravděpodobně z důvodu postupné dehydroxylace jílových minerálů, kdy se vytvoří pórovitější struktura pro prostup vody vzorkem. U vzorků vypálených na 900 °C byla nasákavost nižší než při 750 °C z důvodu slinutější struktury vzorku. Opět měl nejvíce odlišné hodnoty vzorek s kyselinou fosforečnou s největší nasákavostí 29,4 % při výpalu na 750 °C. Nejmenší nasákavost byla u vzorku s tavivem hexametafosfátu sodného, kdy při dané teplotě 750 °C vyšla 17,0 %. Následným výpalem na 900 °C se dále snížila až na 14,0 %. Přívětivé hodnoty nasákavosti měl vzorek s přidavkem taviva sodného vodního skla, které byly podobné jako u vzorku referenčního.



Obr. 22 Graf závislosti zdánlivé pórovitosti na druhu použitého taviva a na teplotě výpalu vzorků

Zdánlivá pórovitost je velmi úzce spjata s nasákavostí a též i s objemovou hmotností, kdy se zvyšující se pórovitostí narůstá nasákavost a snižuje se objemová hmotnost vzorku. Udává poměr objemu otevřených pórů a dutin k celkovému objemu vzorku.

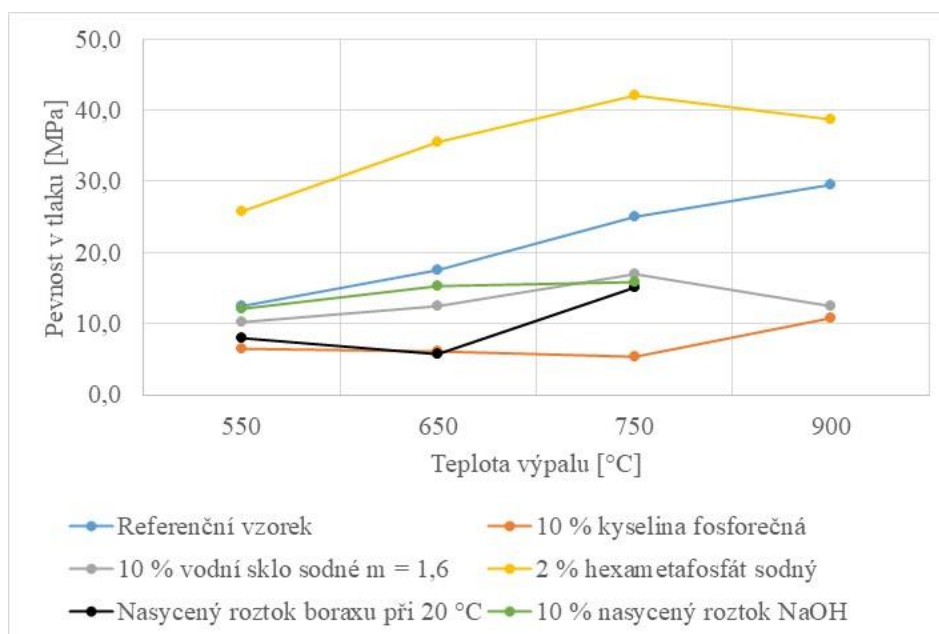
Obr. 22 ukazuje průběh zdánlivé pórovitosti vzorku s daným použitým tavivem v závislosti na teplotě výpalu. Podle předpokladů je vývoj pórovitosti velice podobný jako u nasákavosti. Se vzrůstající pórovitostí vznikla ve vzorku místa pro zaplnění vodou, tudíž se i zvýšila právě jeho nasákavost. Očekávaným důsledkem zvýšení pórovitosti bylo již zmíněné snížení objemové hmotnosti. Zde, stejně jako u nasákavosti, měl vzorek s kyselinou fosforečnou největší hodnoty, kdy při 750 °C vyšla největší pórovitost 44,6 %. Vzorek s hexametafosfátem sodným vykazoval ze vzorků vypálených na 900 °C nejmenší pórovitost, konkrétně 26,1 % při výpalu na 900 °C. Pórovitost 32,6 % na 750 °C měl vzorek se sodným vodním sklem, u kterého vyšly obstojné hodnoty srovnatelné se vzorkem referenčním.



Obr. 23 Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na druhu použitého taviva a na teplotě výpalu vzorků

Jedním stěžejním parametrem pro použitelnost daného zdiva v konstrukci je mechanická pevnost, konkrétně v tomto případě pevnost v tahu za ohybu. Při posuzování pevností se snažíme docílit podobných, ne-li lepších výsledných hodnot.

Obr. 23 reprezentuje průběh pevnosti v tahu za ohybu vzorku s daným použitým tavivem v závislosti na teplotě výpalu. U referenčního vzorku je vidět, jak byly pevnosti v tahu za ohybu při menších teplotách výpalu docela nízké. Jakmile se vzorek vypálil na 900 °C, vyšla pevnost 10,3 MPa z důvodu slinování materiálu a vytváření keramické vazby. Nejnižší pevnosti ze vzorků vypálených na 900 °C měl vzorek se sodným vodním sklem, konkrétně 3,3 MPa. Vesměs se skoro všechny vzorky vyznačovaly nízkými pevnostmi. Jediný vzorek s přísadkou hexametafosfátu sodného měl už při 550 °C dvakrát větší pevnosti než všechny ostatní vzorky. Při konečné teplotě výpalu 900 °C vyšla jeho pevnost na 8,4 MPa.



Obr. 24 Graf závislosti pevnosti v tlaku na druhu použitého taviva a na teplotě výpalu vzorků

Druhým stěžejním parametrem pro použitelnost daného zdiva v konstrukci je mechanická pevnost, konkrétně v tomto případě pevnost v tlaku. Při posuzování pevností se zde opět snažíme docílit podobných, ne-li lepších výsledných hodnot.

Obr. 24 značí průběh pevnosti v tlaku vzorku s daným použitým tavivem v závislosti na teplotě výpalu. U referenčního vzorku je patrné, že vývin pevností je skoro lineární a vychází 29,5 MPa při výpalu na 900 °C. Vzorek s tavivem kyseliny fosforečné měl nejnižší výsledné pevnosti a to pouhých 5,3 MPa na 750 °C. Při konečné teplotě výpalu 900 °C měl vzorek s přísadkou sodného vodního skla o 1,7 MPa větší pevnost než předšlý vzorek s kyselinou fosforečnou. Vzorek s tavivem hexametafosfátu sodného se zde osvědčil jako nejlepším tavivem, kdy veškeré hodnoty převyšovaly pevnosti referenčního vzorku a největší pevnosti vyšly při 750 °C a to 42,0 MPa.

4 Diskuze a shrnutí dosažených výsledků

Cílem experimentální části bakalářské práce bylo navržení cihlářské směsi s přídavkem vhodného taviva pro dosažení přínosných fyzikálně-mechanických vlastností v porovnání k referenčnímu vzorku za současného snížení konečné teploty výpalu. Ve třech etapách byl popsán kompletní výzkum pro dosažení daných cílů.

Etapa I zahrnovala popis hlavních a vedlejších vstupních surovin pracovních směsí.

Etapa II byla zaměřena na vytvoření stanovených směsí, výrobků z nich zhotovených a na zkoušky plastického těsta a vstupní suroviny, konkrétně metody XRD. V rámci porovnávání vzorků s přidávanými tavivy bylo vytvořeno 6 pracovních směsí, z toho jedna byla referenční, ze kterých bylo následně vytvarováno 7 zkušebních těles. Na všech plastických těstech bylo provedeno stanovení plastičnosti dle Pfefferkorna a stanovení skutečné vlhkosti, kdy se hodnoty pohybovaly v rozmezí 20–30 %.

Etapa III popisovala zkoušky, které byly provedeny na vysušených vzorcích, mezi které patřilo stanovení délkových změn sušením, a na vypálených vzorcích, kdy tělesa byla vypálena na různou teplotu. Mezi zkoušky patřila metoda KDTA, DTA, GTA, stanovení smrštění pálením a celkové délkové změny. Vzorky byly podrobeny mechanickému zatížení jak v tahu za ohybu, tak v tlaku. Vzniklé úlomky byly váženy suché a vakuově nasycené vodou na vzduchu a ve vodě na hydrostatických vahách. Z hmotností byly stanoveny výsledné objemové hmotnosti, nasákavosti a zdánlivé pórovitosti.

Při porovnávání stěžejních vlastností, které byly pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, vykazoval vzorek s tavivem hexametafosfátu sodného největších pevností ze všech použitých taviv a to 42,0 MPa u pevnosti v tlaku při 750 °C a 8,4 MPa při 900 °C u pevnosti v tahu za ohybu. Naopak nejnižší pevnosti v tlaku měl vzorek s kyselinou fosforečnou, u kterého vyšla pevnost v tlaku 5,3 MPa při výpalu na 750 °C.

Nejhutnější vzorek byl s hexametafosfátem sodným, kdy po dehydroxylaci chemicky vázané vody při 750 °C vykazoval objemovou hmotnost 1850 kg/m³. U vzorku se sodným vodním sklem vyšly podobné hodnoty jako u referenčního vzorku. Při 750 °C výpalu měl vzorek objemovou hmotnost 1760 kg/m³, tudíž jen o 20 kg/m³ méně než u referenčního vzorku. Vzorek s kyselinou fosforečnou vykazoval nejnižší hodnoty objemových pevností, od kterých se následně odvíjely mechanické pevnosti. Při konečném výpalu na 900 °C vyšla objemová hmotnost 1520 kg/m³. Tento jev bychom mohli popsat obecně

známou rovnicí $3\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$. V této rovnici spolu reaguje vápenec obsažený v silně vápnité zemině s kyselinou fosforečnou za vzniku fosforečnanu vápenatého, oxidu uhličitého a vody. Je to velice agresivní reakce, při které se kyselina fosforečná spotřebovává na rozklad vápence, proto pravděpodobně z tohoto důvodu dochází k oslabení účinků tohoto taviva. Kyselina fosforečná se běžně spíše používá jako pojivo v oblasti žárobetonů a vzniklý fosforečnan vápenatý má významný vliv jako tavivo při výrobě porcelánu při vyšších teplotách výpalu. Z uvedené rovnice odchází ještě při výpalu vázaná voda, kdy dojde k zvětšení pórovitosti. Na základě této úvahy by se dalo vysvětlit, proč měl výsledný vzorek s použitou kyselinou fosforečnou tak nízké objemové hmotnosti.

Parametry nasákavostí a zdánlivých pórovitostí byly spolu úzce spjaty. Grafy závislostí vypadaly téměř totožně z důvodu provázanosti těchto dvou vlastností. Vždy se vzrůstající zdánlivou pórovitostí se zvýšila i nasákavost a naopak. Díky nejhutnější struktuře materiálu měl vzorek s hexametafosfátem sodným při 750 °C nasákavost pouhých 17,0 % s odpovídajícími 31,5 % zdánlivé pórovitosti. Zato na druhé straně u vzorku kyseliny fosforečné vyšla nasákavost 29,4 % se 44,6 % pórovitosti za totožné teploty. Proto měl tento vzorek i nejnižší objemové hmotnosti. Při hodnocení těchto parametrů by obstál i vzorek se sodným vodním sklem, u kterého vycházely podobné hodnoty jako u referenčního vzorku.

Oproti očekávání, kterého se docílilo z vypracované teoretické části, nebyl přírůstek sodného vodního skla jako taviva do cihlářské směsi zcela efektivní. Výsledky byly srovnatelné, ne-li horší, a to i při zvolení modulu vodního skla $m = 1,6$. Pro případné ověření by mohl být proveden výzkum použití různých druhů vodních skel v závislosti na vypalovací teplotě a na druhu cihlářské zeminy.

5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navržení cihlářské receptury s přidavkem různých taviv pro prozkoumání jejich vlivu na vlastnosti cihlářského střepeu při odlišných teplotách výpalu. V teoretické části byl popsán průzkum jednotlivých výzkumů zabývajících se snížením teploty výpalu, možnostmi redukce paliva a oxidu uhličitého. V neposlední řadě byly vyneseny studie zkoumající přímé vylehčení cihlářského střepeu. Některá prozkoumaná taviva byla dále použita v experimentální části do plastické cihlářské směsi.

U XRD analýzy došlo ke snížení píků kalcitu vlivem přidání kyseliny fosforečné do směsi. Zároveň se vytvořily malé píky, které by mohly být charakteristické pro daný použitý fosfát. Z DSC a DTG analýzy byl vypočtený rozklad vápence ve směsi s příměsí kyseliny fosforečné v rozmezí teplot okolo 720–810 °C, kde rozklad začal při nižších teplotách než vzorek s čistou zeminou s rozkladem okolo 770–840 °C. U vzorku s kyselinou fosforečnou došlo ke snížení CO₂ o 2,51 mg na danou navážku. CO₂ bylo před výpalem dodatečně odstraněno rozkladem uhličitánů při reakci s kyselinou fosforečnou. Takto odstraněné CO₂ před konečným výpalem je velice podstatné z hlediska ekonomického snížení při výdajích na emisních povolenkách.

Hlavním zkoumaným parametrem byla pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku zkoušená na normových cihelkách s rozměry 100 mm × 50 mm × 20 mm. Dalšími zkoumanými parametry byla objemová hmotnost, nasákavost a zdánlivá pórovitost. Mezi vybraná taviva patřila kyselina fosforečná, sodné vodní sklo, hexametafosfát sodný, nasycený roztok boraxu a nasycený roztok NaOH, která byla porovnána s referenčním vzorkem bez přidaného taviva.

Klíčovou hodnotou vzorků s tavivy bylo dosažení minimální pevnosti 10,3 MPa v tahu za ohybu a 29,3 MPa v tlaku u referenčního vzorku vypáleného na 900 °C. K tomuto cíli se nejvíce přiblížil vzorek s hexametafosfátem sodným, který dosahoval pevností 8,1 MPa v tahu za ohybu a 42,0 MPa v tlaku při snížené teplotě na 750 °C. Jeho nasákavost a zdánlivá pórovitost vykazovala nejnižší hodnoty z důvodu největší objemové hmotnosti díky hutnější struktuře.

Naopak na druhé straně vzorek s kyselinou fosforečnou vykazoval nejmenší mechanické pevnosti z důvodu nejnižší objemové hmotnosti a s tím související největší nasákavosti a pórovitosti.

Ve výsledku se kyselina fosforečná jevila jako nejhorší možnost, nicméně by mohla najít uplatnění v lehčených cihlách, s možnými dobrými tepelně-izolačními vlastnostmi, které by tolik nezatěžovaly konstrukci. Kyselina fosforečná v experimentu reagovala s vápencem a ten byl obsažený v jílu Holice, který je převážně vápenitý. Zde se naskytá otázka pro případný budoucí výzkum. Jak by fungoval přídavek kyseliny fosforečné na fyzikálně-mechanické vlastnosti cihlářského střepe s použitím nevápnité zeminy?

Nakonec pro snížení potřebné teploty výpalu cihlářského střepe vyšel jako přívětivý vzorek s použitým tavivem hexametafosfátu sodného. Vzorek vykazoval pevnosti výrazně větší než byla hranice referenčního vzorku.

Nutno podotknout, že hodnoty vycházely vždy z jednoho vzorku vypáleného na danou teplotu, tudíž experiment sloužil jako orientační a budoucí výzkum by se mohl zaměřit na prozkoumání této problematiky více podrobněji. Buď by se mohl výzkum zabývat rozšířením poznatků o již zmíněném případném vlivu kyseliny fosforečné na nevápnité zeminy, vlivu různého vodního skla na cihlářské zeminy, nebo vypracováním podrobné analýzy účinků hexametafosfátu sodného. Například ověření vlastností při různém dávkování, stanovení minimální dávky příměsi, která by byla pro cihlářskou směs relevantní, zakomponování vyhořívajících lehčiv do cihlářské směsi, nebo navržení různých alternativ fosfátů, které by mohly být účinnější a nebo levnější než samotný hexametafosfát sodný.

6 Zdroje

- [1] HANYKÝŘ, VLADIMÍR A JAROSLAV KUTZENDÖRFER. *Technologie keramiky*. Praha: Silikátový svaz, 2008. ISBN 978-80-86821-48-1.
- [2] VALENTA, LADISLAV. *Keramická příručka*. 2., v Silikátovém svazu 1., dopl. a upr. vyd. [Praha]: Silikátový svaz, 2007. ISBN 978-80-86821-46-7.
- [3] MOREIRA, J.M.S., J.P.V.T. MANHÃES A J.N.F. HOLANDA. *Processing of red ceramic using ornamental rock powder waste*. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2008, **196**(1), 88-93. ISSN 0924-0136 [cit. 2023-05-23]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.008>
- [4] VIEIRA, C.M.F, T.M SOARES, R SÁNCHEZ A S.N MONTEIRO. *Incorporation of granite waste in red ceramics*. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2004, **373**(1), 115-121. ISSN 0921-5093 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.12.038>
- [5] MONTEIRO, S.N., L.A. PEÇANHA A C.M.F. VIEIRA. *Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operations*. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2004, **24**(8), 2349-2356. ISSN 0955-2219 [cit. 2023-05-23]. doi:[https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00638-1](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00638-1)
- [6] SOKOLAR, RADOMIR A LENKA SMETANOVA. *Dry pressed ceramic tiles based on fly ash–clay body: Influence of fly ash granulometry and pentasodium triphosphate addition: Influence of fly ash granulometry and pentasodium triphosphate addition*. *Ceramics International* [online]. 2010, **36**(1), 215-221. ISSN 0272-8842 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.07.009>
- [7] SENA DA FONSECA, B., C. GALHANO A D. SEIXAS. *Technical feasibility of reusing coal combustion by-products from a thermoelectric power plant in the manufacture of fired clay bricks*. *Applied Clay Science* [online]. 2015, **104**, 189-195. ISSN 0169-1317 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.030>
- [8] SOUZA, A.E., S.R. TEIXEIRA, G.T.A. SANTOS, F.B. COSTA A E. LONGO. *Re-use of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials*. *Journal of Environmental Management* [online]. 2011, **92**(10), 2774-2780. ISSN 0301-4797 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.020>
- [9] KAZMI, SYED M.S., SAFEER ABBAS, MUHAMMAD A. SALEEM, MUHAMMAD J. MUNIR A ANWAR KHITAB. *Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes*. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, **120**, 29-41. ISSN 0950-0618 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.084>
- [10] KAZMI, SYED MINHAI SALEEM, SAFEER ABBAS, MUHAMMAD JUNAID MUNIR A ANWAR KHITAB. *Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks*. *Journal of Building Engineering* [online]. 2016, **7**, 372-378. ISSN 2352-7102 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobee.2016.08.001>

- [11] SULTANA, M. S., M. I. HOSSAIN, M. A. RAHMAN A M. H. KHAN. *Influence of Rice Husk Ash and Fly Ash on Properties of Red Clay* [online]. 2014, **6**(3), 421-430 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.3329/jsr.v6i3.15343>
- [12] AGBEDE, O. I. A M. JOEL. *Effect of rice husk ash (RHA) on the properties of Ibaji burnt clay bricks* [online]. 2011, **2**(4), 674-677 [cit. 2023-05-23]. doi:[10.5251/ajsir.2011.2.4.674.677](https://doi.org/10.5251/ajsir.2011.2.4.674.677)
- [13] ELICHE-QUESADA, D., M.A. FELIPE-SESÉ, J.A. LÓPEZ-PÉREZ A A. INFANTES-MOLINA. *Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks. Ceramics International* [online]. 2017, **43**(1, Part A), 463-475 [cit. 2023-05-23]. ISSN 0272-8842. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.181>
- [14] SUTAS, J., A. MANA A L. PITAK. *Effect of Rice Husk and Rice Husk Ash to Properties of Bricks. Procedia Engineering* [online]. 2012, **32**, 1061-1067. ISSN 1877-7058 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.02.055>
- [15] DEMIR, ISMAIL. *Reuse of waste glass in building brick production* [online]. 2009, **27**, 572–577 [cit. 2023-05-23]. doi:[10.1177/0734242X08096528](https://doi.org/10.1177/0734242X08096528)
- [16] PHONPHUAK, NONTHAPHONG, SIWADOL KANYAKAM A PRINYA CHINDAPRASIRT. *Utilization of waste glass to enhance physical–mechanical properties of fired clay brick. Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, **112**, 3057-3062. ISSN 0959-6526 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.084>
- [17] SAHNOUN, RYM DHOUB A JAMEL BOUAZIZ. *Sintering characteristics of kaolin in the presence of phosphoric acid binder. Ceramics International* [online]. 2012, **38**(1), 1-7. ISSN 0272-8842 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.06.058>
- [18] BOGAHAWATTA, V.T.L. A A.B. POOLE. *The influence of phosphate on the properties of clay bricks. Applied Clay Science* [online]. 1996, **10**(6), 461-475. ISSN 0169-1317 [cit. 2023-05-23]. doi:[https://doi.org/10.1016/0169-1317\(95\)00042-9](https://doi.org/10.1016/0169-1317(95)00042-9)
- [19] LEE, WEI-HAO, YI-CHE HSIEH, YUNGCHIN DING A HSIN-WEN WANG. *Fabrication of Low-Temperature Sintering Building Bricks Using Drilling Cutting and Geopolymeric Technology* [online]. 2021, **14**(20), 5940 [cit. 2023-05-23]. doi:[10.3390/ma14205940](https://doi.org/10.3390/ma14205940)
- [20] SIRIPHAISARNTAVEE, KANYAPAK, CHARUSPORN MONGKOLKACHIT, MATTEKUL JIARAWATTANANON, KARN SERIVALSATIT A THANAKORN WASANAPIARNPONG. *Effects of sodium silicate as liquid phase sintering additives on properties of alumina ceramics* [online]. 2020, **30**(2), 105-109 [cit. 2023-05-23]. doi:[10.14456/jmmm.2020.26](https://doi.org/10.14456/jmmm.2020.26)
- [21] SMIRNOV, V. V., S. V. SMIRNOV, T. O. OBOLKINA, O. S. ANTONOVA, M. A. GOL'DBERG, D. R. KHAIRUTDINOVA, O. A. OVCHINNIKOVA A S. M. BARINOV. *Effect of Sodium Silicate on the Sintering and Properties of Zirconia Ceramics* [online]. 2019, **488**, 239–241 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1134/S0012500819090015>
- [22] USLU, T. A A.I. AROL. *Use of boron waste as an additive in red bricks. Waste Management* [online]. 2004, **24**(2), 217-220. ISSN 0956-053X [cit. 2023-05-23]. doi:[https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(03\)00031-X](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00031-X)

- [23] ÇİMEN, SELÇUK, HAKAN ÇAĞLAR, ARZU ÇAĞLAR A ÖMER CAN. *Effect of Boron Wastes on the Engineering Properties of Perlite Based Brick* [online]. 2020, **9**(2), 50-56 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.46810/tdfd.731005>
- [24] BRUNO, AGOSTINO WALTER, DOMENICO GALLIPOLI, CÉLINE PERLOT A JOAO MENDES. *Optimization of bricks production by earth hypercompaction prior to firing*. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **214**, 475-482. ISSN 0959-6526 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.302>
- [25] GONZÁLEZ, I., E. GALÁN, A. MIRAS A M.A. VÁZQUEZ. *CO2 emissions derived from raw materials used in brick factories. Applications to Andalusia (Southern Spain)*. *Applied Clay Science* [online]. 2011, **52**(3), 193-198. ISSN 0169-1317 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.003>
- [26] PENG, JUNXIA, YUBO ZHAO, LIHUA JIAO, WEIMIN ZHENG A LU ZENG. *CO2 Emission Calculation and Reduction Options in Ceramic Tile Manufacture-The Foshan Case*. *Energy Procedia* [online]. 2012, **16**, 467-476. ISSN 1876-6102 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.076>
- [27] WANG, YALI, HAIDONG YANG A KANGKANG XU. *Thermal Performance Combined with Cooling System Parameters Study for a Roller Kiln Based on Energy-Exergy Analysis* [online]. 2020, **13**(15), 3922 [cit. 2023-05-23]. doi:[10.3390/en13153922](https://doi.org/10.3390/en13153922)
- [28] GONZÁLEZ, I., C. BARBA-BRIOSO, P. CAMPOS, A. ROMERO A E. GALÁN. *Reduction of CO2 diffuse emissions from the traditional ceramic industry by the addition of Si-Al raw material*. *Journal of Environmental Management* [online]. 2016, **180**, 190-196. ISSN 0301-4797 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.039>
- [29] JOUHARA, H., A. CHAUHAN, T. NANNOU, S. ALMAHMOUD, B. DELPECH A L.C. WROBEL. *Heat pipe based systems - Advances and applications*. *Energy* [online]. 2017, **128**, 729-754. ISSN 0360-5442 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.028>
- [30] DELPECH, BERTRAND, MASSIMO MILANI, LUCA MONTORSI, DAVIDE BOSCARDIN, AMISHA CHAUHAN, SULAIMAN ALMAHMOUD, BRIAN AXCELL A HUSSAM JOUHARA. *Energy efficiency enhancement and waste heat recovery in industrial processes by means of the heat pipe technology: Case of the ceramic industry: Case of the ceramic industry*. *Energy* [online]. 2018, **158**, 656-665. ISSN 0360-5442 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.041>
- [31] MEZQUITA, ANA, JUAN BOIX, ELISEO MONFORT A GUSTAVO MALLOL. *Energy saving in ceramic tile kilns: Cooling gas heat recovery: Cooling gas heat recovery*. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2014, **65**(1), 102-110. ISSN 1359-4311 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaling.2014.01.002>
- [32] MONEDERO, ESPERANZA, JUAN JOSÉ HERNÁNDEZ, ROCÍO COLLADO, AMPARO PAZO, MÓNICA AINETO A ANSELMO ACOSTA. *Evaluation of ashes from agro-industrial biomass as a component for producing construction materials*. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2021, **318**, 128517. ISSN 0959-6526 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128517>

- [33] ALABDULJABBAR, HISHAM, OMRANE BENJEDDOU, CHOKRI SOUSSI, MOHAMED AMINE KHADIMALLAH A RAYED ALYOUSEF. *Effects of incorporating wood sawdust on the firing program and the physical and mechanical properties of fired clay bricks*. *Journal of Building Engineering* [online]. 2021, **35**, 102106. ISSN 2352-7102 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102106>
- [34] BEAL, BETTY, AUDRIANA SELBY, COLIN ATWATER, CHRISTINA JAMES, CHRISTOPHER VIENS A CATHERINE ALMQUIST. *A Comparison of Thermal and Mechanical Properties of Clay Bricks Prepared with Three Different Pore-Forming Additives: Vermiculite, Wood Ash, and Sawdust* [online]. 2009 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1002/ep.13150>
- [35] OKUNADE, EMMANUEL A. *The Effect of Wood Ash and Sawdust Admixtures on the Engineering Properties of a Burnt Laterite-Clay Brick* [online]. 2008, 1042-1048 [cit. 2023-05-23]. doi:10.3923/jas.2008.1042.1048
- [36] NJEUMEN NKAYEM, D.E., J.A. MBEY, B.B. KENNE DIFFO A D. NJOPWOUO. *Preliminary study on the use of corn cob as pore forming agent in lightweight clay bricks: Physical and mechanical features: Physical and mechanical features*. *Journal of Building Engineering* [online]. 2016, **5**, 254-259. ISSN 2352-7102 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.01.006>
- [37] PHONPHUAK, NONTHAPHONG, CHIAWCHAN SAENGTHONG A ANUWAT SRI-SUWAN. *Physical and mechanical properties of fired clay bricks with rice husk waste addition as construction materials*. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2019, **17**, 1668-1674. ISSN 2214-7853 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.197>
- [38] BORIES, CECILE, LAILA AOUBA, EMELINE VEDRENNE A GERARD VILAREM. *Fired clay bricks using agricultural biomass wastes: Study and characterization: Study and characterization*. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, **91**, 158-163. ISSN 0950-0618 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.006>
- [39] GHORBANI, MONA, BEHNAZ DAHRAZMA, SEYED FAZLOLAH SAGHRAVANI A GHAZALEH YOUSOFIZINSAZ. *A comparative study on physicochemical properties of environmentally-friendly lightweight bricks having potato peel powder and sour orange leaf*. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **276**, 121937. ISSN 0950-0618 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121937>
- [40] WU, KAI, YUAN HU, LINGLIN XU, XIONG ZHANG, YUFENG SU A ZHENGHONG YANG. *Recycling of sewage sludge in clay-free thermal insulation brick: assessment of microstructure, performance, and environment impact*. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2022, **29**, 89184–89197 [cit. 2023-05-23]. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-022-22003-1>
- [41] ČSN 72 1565-4. *Vytváření, sušení a výpal zkušebních tělísek*. Praha: Český normalizační institut, 1986.
- [42] DUFKA, A. *Laboratorní experimentální metody*, Brno: VUT Brno, 2008.
- [43] ČSN 72 1074. *Stanovení optimální a pracovní vlhkosti keramických těst Pfefferkornovým přístrojem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015

- [44] ČSN 72 1565-5. *Stanovení délkových změn sušením a pálením*. Praha: Český normalizační institut, 1986
- [45] ČSN 72 1083. *Termické rozborý keramických surovin*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015
- [46] ČSN 72 1565-6. *Stanovení ztráty hmotnosti pálením, nasákavosti, zdánlivé pórovitosti a objemové hmotnosti*. Praha: Český normalizační institut, 1986
- [47] ČSN 72 1565-7. *Stanovení pevnosti v ohybu*. Praha: Český normalizační institut, 1986
- [48] ČSN 72 1565-8. *Stanovení pevnosti v tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 1986

7 Seznam tabulek

Tab. 1	Přehled vybraných taviv pro ověření snížení teploty výpalu cihlářského střepu	50
Tab. 2	Stanovené hodnoty deformačních poměrů, skutečných vlhkostí a smrštění zkušebních vzorků.....	51

8 Seznam obrázků

Obr. 1	Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na množství přidané příměsi u vzorků s aditivem odpadního prachu z okrasného kamene žuly (GW) Zdroj: [4].....	16
Obr. 2	Graf závislosti pevnosti v tlaku na množství a druhu přidané příměsi u vzorků s aditivem popílku z rýžových slupek (RHA) a cukrové třtiny (SBA) Zdroj: [9].....	18
Obr. 3	Graf závislosti pevnosti v tlaku na množství a druhu přidané příměsi a na teplotě výpalu u vzorků s aditivem popílku z rýžových slupek (RHA) a dřeva (WA) Zdroj: [13].....	19
Obr. 4	Graf závislosti pevnosti v tlaku na množství přidané příměsi a na teplotě výpalu u vzorků s aditivem odpadního skla (GW) Zdroj: [16].....	21
Obr. 5	Graf závislosti pevnosti v tlaku na modulu příměsi $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ u vzorků s tímto aditivem Zdroj: [19].....	22
Obr. 6	Graf závislosti pevnosti v tlaku na druhu procesu úpravy zeminy před použitím do vzorku a na teplotě výpalu daných vzorků Zdroj: [24].....	25
Obr. 7	Graf závislosti energetické efektivity a úspory paliva na době výdrže chladícího vzduchu působícího na vypálené výrobky Zdroj: [27].....	29
Obr. 8	Graf závislosti objemové hmotnosti na množství přidaného lehčiva u vzorků s aditivem dřevěných pilin (SD) Zdroj: [33].....	34
Obr. 9	Graf závislosti objemové hmotnosti na množství přidaného lehčiva a na teplotě výpalu u vzorků s aditivem popílku z rýžových slupek (RHA) a dřeva (WA) Zdroj: [13].....	35
Obr. 10	Graf závislosti objemové hmotnosti na množství přidaného lehčiva a na teplotě výpalu u vzorků s aditivem kukuřičných klasů (CC) Zdroj: [36]....	36
Obr. 11	Graf závislosti objemové hmotnosti na množství přidaného lehčiva a na teplotě výpalu u vzorků s aditivem rýžových slupek (RH) Zdroj: [37].....	37
Obr. 12	Graf závislosti zdánlivé hustoty na množství přidaného lehčiva u vzorků s aditivem prachu z bramborových slupek (PPP) Zdroj: [39].....	38
Obr. 13	Schéma Pfefferkornova přístroje Zdroj: [43].....	42
Obr. 14	Způsoby úpravy vah ke stanovení objemu zkušebního tělíska Zdroj: [47].	47
Obr. 15	Schéma zatěžování vzorku při stanovení pevnosti v tahu za ohybu Zdroj: [48].....	48
Obr. 16	Difraktogram zeminy Holice a zeminy Holice s přidavkem kyseliny fosforečné.....	52
Obr. 17	KDTA diagram délkové změny pálením prvních vzorků v závislosti na teplotě.....	53
Obr. 18	Křivky DTG zeminy Holice a zeminy Holice s přidavkem kyseliny fosforečné.....	54

Obr. 19	Křivky DSC zeminy Holice a zeminy Holice s přídavkem kyseliny fosforečné	55
Obr. 20	Graf závislosti objemové hmotnosti na druhu použitého taviva a na teplotě výpalu vzorků	56
Obr. 21	Graf závislosti nasákavosti na druhu použitého taviva a na teplotě výpalu vzorků	57
Obr. 22	Graf závislosti zdánlivé pórovitosti na druhu použitého taviva a na teplotě výpalu vzorků	58
Obr. 23	Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na druhu použitého taviva a na teplotě výpalu vzorků	59
Obr. 24	Graf závislosti pevnosti v tlaku na druhu použitého taviva a na teplotě výpalu vzorků	60