



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

VYHOŘÍVÁNÍ LEHČIV VE STŘEPU ŠAMOTOVÝCH ŽÁROMATERIÁLŮ

THE COMBUSTION OF ORGANIC LIGHTWEIGHTING AGENTS IN THE
CHAMOTTE MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Veronika Smékalová

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. RADOMÍR SOKOLÁŘ, Ph.D.

BRNO 2018



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

VYHOŘÍVÁNÍ LEHČIV VE STŘEPU ŠAMOTOVÝCH ŽÁROMATERIÁLŮ

THE COMBUSTION OF ORGANIC LIGHTWEIGHTING AGENTS IN THE
CHAMOTTE MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Veronika Smékalová

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. RADOMÍR SOKOLÁŘ, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Veronika Smékalová
Název	Vyhořívání lehčiv ve střepu šamotových žáromateriálů
Vedoucí práce	doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] Valenta, L. Keramická příručka. Vydavatelství technické literatury. Horní Maršov 1999.
[3] Hanykýř, V, Kutzendorfner. Technologie keramiky. Vega. Hradec Králové 2001.
[4] Pytlík, P., Sokolář, R. Stavební keramika. Technologie, vlastnosti a využití. CERM Brno 2002, ISBN 80-7204-234-3

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V oblasti tepelně izolačních žáromateriálů se jako lehčiva hojně využívají vyhořívající organické látky, jež ve vyšších dávkách mohou způsobovat problémy při regulaci výpalu. Řešení může spočívat v přesné definici teplotního intervalu, v němž dochází k vyhořívání konkrétního lehčiva ve střepech na bázi žárovzdorných jíílů, resp. kaolínu.

Cíle diplomové práce:

- formou literární rešerše shrnout doposud publikované výsledky výzkumu v oblasti vyhořívání organických látek v keramických střepech,
- definovat teplotní intervaly vyhořívání nejběžnějších organických lehčiv (např. piliny-tvrde vs. měkké dřevo, papírenský kal, rašelina, antracit, otruby) při použití různých druhů žárovzdorných jíílů (slínavé, resp. pórovinové) a kaolínu v závislosti na rychlosti nárůstu teploty,
- posoudit vliv těchto vyhořívajících lehčiv na žárové vlastnosti střepech (žárovzdornost, únosnost v žáru) a jeho fyzikálně mechanické vlastnosti (pevnost, pórovitost),
- navrhnout optimální kombinaci organických lehčiv pro možnost maximálního vylečení střepech a bezproblémovou regulaci pálicího procesu.

Doporučený rozsah práce 60 - 70 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Lehčené šamotové výrobky jsou oblíbeným stavebním materiálem. Na trhu se jich vyskytuje velké množství druhů, avšak stále nejvyužívanější možností lehčení je pomocí organických surovin. To přináší určité problémy při výrobě těchto výrobků. Tato práce se zabývá vyhoříváním různých druhů lehčiv ze střepu šamotových žáromateriálů. V teoretické části jsou shrnuty suroviny, které jsou nutné pro výrobu lehčeného šamotu. Dále jsou zde zpracovány doposud publikované výsledky výzkumů v oblasti lehčení výrobků organickými lehčivy.

Praktická část práce se zabývá vlastnostmi výrobků vytvořených z jílu nebo kaolínu při přidání určitého množství lehčiva. Lehčivem zde jsou smrkové piliny, bukové piliny, rašelina, otruby, papírenský kal a antracit. Všechna tato lehčiva jsou přímá. Pro srovnání byly do výzkumu zařazeny i cenosféry, které reprezentují nepřímá lehčiva. U všech vzorků byl definován teplotní interval vyhoření lehčiv ze vzorku, žárovzdornost, klasifikační teplota, objemová hmotnost, součinitel tepelné vodivosti a další vlastnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Šamot, lehčený šamot, lehčivo, piliny smrkové, piliny bukové, rašelina, otruby, antracit, papírenský kal, cenosféry, žárovzdornost, vyhořívání, klasifikační teplota, součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost, smrštění

ABSTRACT

Lightweight chamotte products are popular building material. There are many types of lightweight chamotte on the market, but the most popular lightening options are organic ingredients. This brings some problems to the production of these products. This thesis deals with the burning of various types of lighters from shards of fireclay materials. In the theoretical part are summarized raw materials, which are necessary for production of lightweight chamotte. The results of the published research studies on the topic of lightening of organic lightening products are being described here.

The practical part deals with properties of products made of clay or kaolin with the addition of a certain amount of lighter. These added lighters are spruce sawdust, beech sawdust, peat, bran, paper slurry and anthracite. All these lighters are direct. For comparison, the cenospheres, which represent indirect lightweights, were also included in the research. For all specimens, the temperature interval of burnout of specimens, refractoriness, classification temperature, bulk density, thermal conductivity coefficient and other properties were defined.

KEYWORDS

Chamotte, lighter chamotte, lighter, spruce sawdust, beech sawdust, peat, bran, anthracite, paper slurry, cenosphere, refractoriness, burning, classification temperature, coefficient of thermal conductivity, bulk density, shrinkage

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Veronika Smékalová *Vyhořívání lehčiv ve střepe šamotových žáromateriálů*. Brno, 2018. 108 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2018

Bc. Veronika Smékalová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala doc. Ing. Radomíru Sokolářovi, Ph.D. za odborné vedení, vstřícné jednání a cenné rady při zpracování diplomové práce.

Obsah

1 Úvod	12
2 Cíl práce	13
3 Teoretická část.....	14
3.1 Žárovzdorná keramika.....	14
3.2 Hlinitokřemičité žárovzdorné výrobky.....	14
3.3 Šamotové výrobky	15
3.4 Lehčený šamot.....	16
3.5 Suroviny pro výrobu lehčeného šamotu	17
3.5.1 Pojiva	17
3.5.2 Ostřiva.....	18
3.5.3 Lehčiva.....	19
3.5.4 Další možnosti lehčení	26
3.6 Publikované články v oblasti vylehčování keramických střepů.....	27
3.6.1 Papírenský kal jako lehčivo cihlářského střepu	27
3.6.2 Lehké výrobky vyráběné z jílu a žulových odpadů	30
3.6.3 Předběžná studie o použití kukuřičných klasů jako prostředek pro vytváření pórů v lehčených cihlách – fyzikální a mechanické vlastnosti	36
3.6.4 Vliv přidání odpadu z olivového mlýna na porézni vlastnosti vypálených jílových cihel.....	40
4 Experimentální část.....	43
4.1 Metodika experimentů.....	43
4.1.1 Zkoušení vstupních surovin	44
4.1.2 Zkoušení plastického těsta	44
4.1.3 Zkoušky na vysušeném vzorku	45
4.1.4 Zkoušky na vypáleném vzorku	45
4.2 Etapa 1	49

4.2.1 Příprava surovin a vytváření vzorků	49
4.2.2 Smrštění a objemová hmotnost vzorků	51
4.2.3 Měření teplot ve vzorku během výpalu a diferenčně termická analýza (DTA).....	55
4.2.4 Kontrakčně dilatační termická analýza (DKTA)	63
4.2.5 Žárovzdornost	64
4.2.6 Součinitel tepelné vodivosti	66
4.2.7 Další vlastnosti výrobků	67
4.2.8 Diskuze výsledků k etapě 1	70
4.3 Etapa 2	72
4.3.1 Vytváření vzorků	72
4.3.2 Smrštění a objemová hmotnost vzorků	73
4.3.3 Měření teplot ve vzorku během výpalu a DTA.....	76
4.3.4 Kontrakčně dilatační termická analýza (DKTA)	81
4.3.5 Žárovzdornost	82
4.3.6 Součinitel tepelné vodivosti	83
4.3.7 Další vlastnosti	84
4.3.8 Diskuze výsledků etapy 2	87
4.4 Srovnání vybraných výsledků z etapy 1 a etapy 2.....	89
5 Závěr.....	95

1 Úvod

Šamot patří do skupiny hlinitokřemičitých výrobků, které jsou definovány chemickým složením ($\text{SiO}_2 < 93 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 45 \%$). Jeho výhodou je, že se vyrábí pouze z přírodních surovin. Lehčený šamot je nejčastěji vylehčován organickým lehčivem, které v průběhu výpalu vyhoří a vytvoří pórovitý systém. Vytvořením pórovitého systému dojde ke snížení objemové hmotnosti a k vylepšení tepelně izolačních vlastností. Dnes nepoužívanějším lehčivem jsou smrkové piliny, avšak jejich cena na trhu roste. Proto je čím dál větší snaha využívat i jiné suroviny, nejlépe organické odpady, které jsou jinak obtížně zpracovatelné (například odpad ze zpracování oliv, rýže, kukuřice, atd.). Lehčený šamot se kromě vyhoření organických látek ze vzorku může vytvářet i nepřímým lehčením. Jde o lehčiva, která se vyznačují nízkou objemovou hmotností a tím snižují objemovou hmotnost i výsledného vzorku. Mohou být přírodní (křemelina) nebo odpadní (popílek, cenosféry). [4]

Podrobné popsání chování dalších druhů lehčiv v lehčeném šamotu může vést k nalezení i jiného vhodného a ekonomicky výhodného lehčiva pro sériovou výrobu. Zpracované zahraniční řešerše vypovídají o tom, že se dají vytvářet výrobky s velmi dobrými vlastnostmi, které zároveň pomáhají zpracovávat jinak nevyužitelný organický odpad.

2 Cíl práce

Tato práce se věnuje lehčenému šamotu, konkrétně podrobnému popsání jednotlivých druhů lehčiv, dále jejich chování ve vzorku během celého procesu výroby a výsledných vlastností vzorků. Definováním teplotního intervalu vyhoření jednotlivých druhů lehčiv ze vzorku, může dojít k regulaci výpalu a předcházet tak problémům vzniklých z vyšší dávky lehčiva ve směsi.

Cílem teoretické části práce je zpracovat dosud publikované rešerše z výzkumů v oblasti vyhořívání organických látek z keramického střepu.

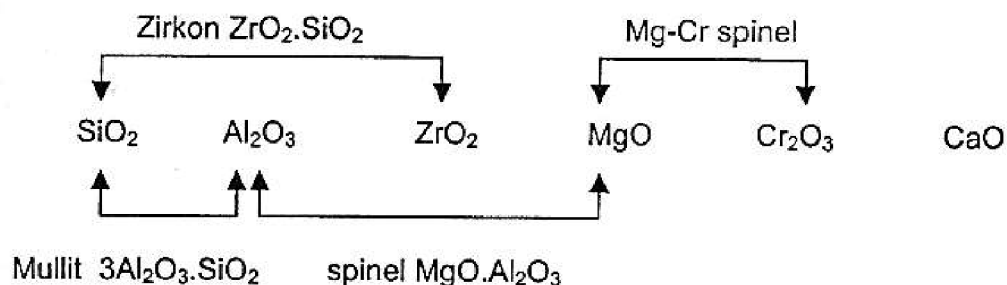
Experimentální část si klade za cíl definovat teplotní intervaly vyhoření nejběžnějších druhů lehčiv při použití různých druhů žárovzdorných jíílů a kaolínů v závislosti na rychlosti nárůstu teploty v peci. Převažovat budou přímá lehčiva (smrkové piliny, bukové piliny, rašelina, otruby, papírenský kal a antracit), ale pro srovnání bylo do výzkumu zařazeno i jedno nepřímé lehčivo – cenosféry. Vytvořené vzorky budou podrobeny zkouškám, které pomohou popsat žárové vlastnosti jednotlivých druhů výrobků (žárovzdornost, klasifikační teplota) a dále fyzikálně mechanické vlastnosti výrobků (objemovou hmotnost, pevnost, pórovitost, nasákavost, atd.) Závěrem je požadováno navrhnout optimální kombinaci organických lehčiv pro maximální vylehčení střepu a bezproblémovou regulaci pálicího procesu.

3 Teoretická část

3.1 Žárovzdorná keramika

V keramice se jako žárovzdorné materiály označují ty, které mají žárovzdornost minimálně 1500 °C. Výrobky z těchto materiálů jsou určeny pro vyzdívky tepelných agregátů (pecí, výměníků, apod.), pálící pomůcky nebo se využívají při výrobě kovů. [2, 3]

Suroviny pro výrobu žárovzdorných výrobků musí kromě žárovzdornosti vyhovovat i dalším požadavkům, jako je například dostupnost a cena. Žárovzdorné materiály se vyrábí převážně na bázi oxidů a jejich sloučenin. Všem zmíněným parametrům vyhovují oxidy, jejichž sloučeniny tvoří minerály jako zirkon, spinel či mullit. [1,2]



Obrázek 1 - Oxidy a jejich sloučeniny vyhovující pro výrobu žárovzdorných materiálů [2]

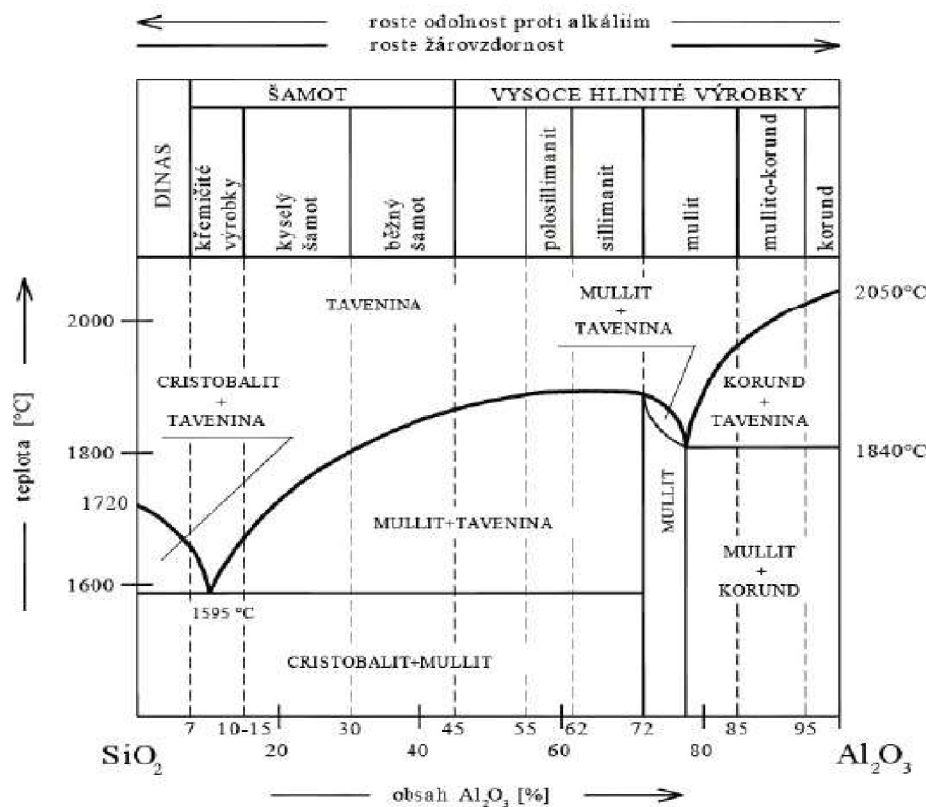
Žárovzdorné materiály rozdělujeme na tvarové (vyzdívka se provádí zděním) a netvarové. Ty se dále dělí na hutné nebo izolační. Další rozdělení je dle obsahu jednotlivých oxidů. [2, 4]

3.2 Hlinitokřemičité žárovzdorné výrobky

Tyto materiály jsou tvořeny převážně oxidy SiO_2 a Al_2O_3 . Na základě poměrů těchto dvou oxidů rozlišujeme různé druhy výrobků: [4]

- Dinas ($SiO_2 \geq 93 \%$)
- Šamot ($SiO_2 \geq 93 \%$, $Al_2O_3 \leq 45 \%$)
- Vysoce hlinité výrobky ($Al_2O_3 \leq 45 \%$)

Toto rozdělení je patrné i z binárního fázového diagramu SiO_2 a Al_2O_3 . Čím je vyšší žárovzdornost, tím je vyšší obsah Al_2O_3 . Čím je vyšší odolnost proti alkáliím, tím je vyšší obsah SiO_2 . [4]



Obrázek 2 - Fázový diagram SiO₂-Al₂O₃ [4]

3.3 Šamotové výrobky

Šamotové výrobky, musí obsahovat méně než 92 % SiO₂ a méně než 45 % Al₂O₃. Vlastnosti šamotů ovlivňuje i obsah nečistot, zejména tavicí oxidy. Mikrostruktura je tvořena převážně mullitem (3Al₂O₃·2SiO₂), který je charakteristický svou stabilitou, vysokým bodem tání, vyšší pevností, vyšším modulem pružnosti a nízkou tepelnou roztažností. V šamotu krom mullitu má své zastoupení skelná fáze, popřípadě cristobalit. Ten je u kvalitnějších šamotů omezen na minimum.[3, 4, 5]

Směs, ze které se vyrábí šamotové výrobky, je tvořena ostřivem (vypálený jíl, lupky nebo výměty z šamotové výroby), pojivem (žárovzdorný jíl, kaolín) a přísadami (lehčivo, tavivo, atd.).[1,4]

Vytváření šamotových výrobků probíhá nejčastěji dvěma technologiemi: [1]

- Lisování z polosuchých směsí – výroba na hydraulických lisech [4]
- Vytváření z plastických hmot – výroba na vakuovém šnekovém lisu, případně dusání elektrickými pechy do dřevěných forem u výrobků se složitým tvarem. [3]

Sušení výrobků závisí především na způsobu vytváření. Základním předpokladem je, aby výrobky měly dostatečnou manipulační pevnost (udává se alespoň 1 MPa). Výrobky z plastického těsta obsahují více vody. Tím je předpokládána delší doba sušení, většinou na podložkách, které umožňují posun při smršťování. Lisované výrobky se často suší přímo na pecních vozech, kdy se jednotlivé vrstvy výrobků prokládají křemičitým pískem, aby při výpalu nedocházelo ke spékání jednotlivých kusů. [3,4]

Výpal probíhá v intervalu teplot od 950 °C do 1400 °C, případně u šamotů s vyšším obsahem Al_2O_3 jsou teploty výpalu až 1480 °C. [2,3]

Šamotové výrobky se používají zejména jako vyzdívky pecí při výrobě mnoha materiálů. Dále se uplatňují jako speciální druhy výrobků, určené pro zpracování rozžhaveného tekutého kovu, např: výlevky. [3,4]

3.4 Lehčený šamot

Lehčený šamot má objemovou hmotnost menší než 1200 kg/m^3 . Se snižující objemovou hmotností se zlepšují tepelně izolační vlastnosti. Výrobky s pórovitostí od 45 % do 75 % se označují jako lehké (L), výrobky mající skutečnou pórovitost vyšší než 75 % jsou pak ultralehké (U). Dále se lehčený šamot rozděluje dle teploty, kdy trvalé délkové změny v žáru za 12 hodin nepřekročí 2 %.[2, 3, 4]

Podstatou tvarových izolačních materiálů je záměrné vytvoření pórů v materiálu. Vytváření pórů se provádí za pomoci lehčiv nebo speciálních technologií. Tyto výrobky jsou poté využívány zejména jako tepelná izolace. Snižují tepelné ztráty vznikající prostupem tepla stěnami pece nebo zabraňují prostupu tepla pod pecními vozy, aby nedocházelo k poškození podvozku vlivem vysokých teplot. [3, 4]

Dle C.V. Gljebova se lehčené šamotové výrobky rozdělují podle využití: [7]

- Výrobky pro izolační vyzdívky, které jsou chráněny jinou vyzdívkou před stykem s plamenem z jedné nebo obou stran [7]
- Vyzdívka přímo přichází do styku s plamenem nebo je v žárovém pásmu [7]

3.5 Suroviny pro výrobu lehčeného šamotu

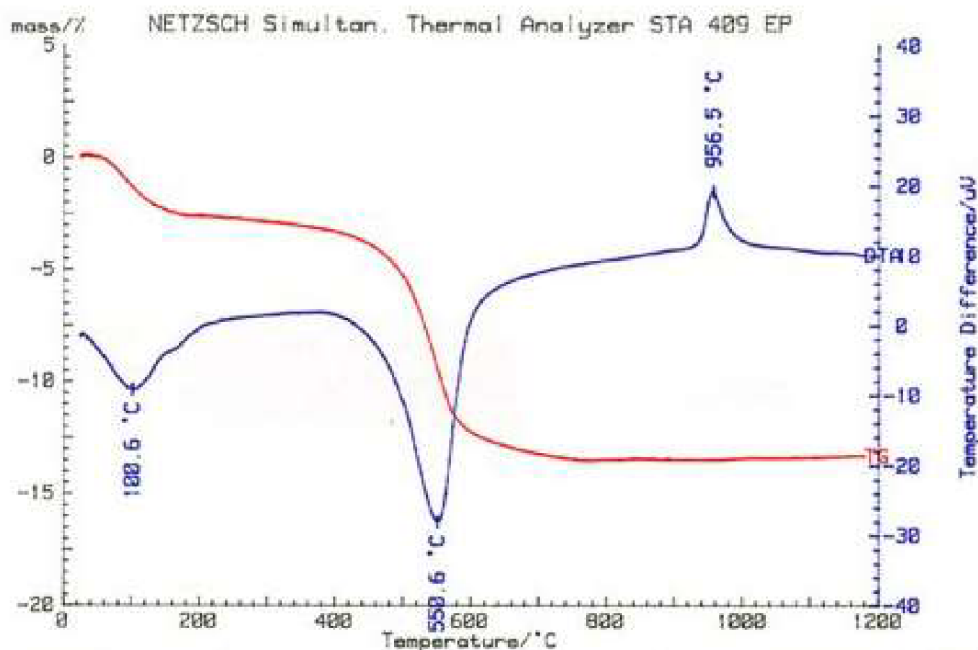
3.5.1 Pojiva

Jsou to takové suroviny, které po smíchání s vodou vytváří plastické těsto. Pojivem pro výrobu lehčeného šamotu mohou být:

- Žárovzdorné jíly - žárovzdornost těchto jílu je alespoň 1580 °C. Hlavním minerálem vyskytujícím se v žárovzdorných jílech je kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Obecně platí, že čím je vyšší obsah kaolinitu, tím je jíl kvalitnější. Naopak nežádoucí je vyšší množství Fe_2O_3 , protože se jedná o tavivo a dochází ke snižování žárovzdornosti. Pro experimentální část byl použit žárovzdorný jíl B1. [2, 4]

Tabulka 1 - Chemické složení žárovzdorného jílu B1 v %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	CaO	MgO
48-52	32-34	2,3-2,7	0,8-1,2	1,5-2,0	0,2-0,4	0,2-0,4



Obrázek 3 - Diferenčně termická analýza jílu B1 [29]

Z diferenčně termické analýzy jsou patrné tři výrazné reakce. První je při 100 °C a charakterizuje odchod fyzikálně vázané vody ze vzorku, což je endotermická reakce. Druhou významnou endotermickou reakcí je dehydroxylace jílových minerálů. Obě reakce jsou provázeny významným hmotnostním úbytkem. Třetí reakce je exotermická a jde o vznik spinelu. [29]

Tabulka 2 - Vybrané vlastnosti žárovzdorného jílu B1

Ztráta žíháním	11-13 %
Žárovzdornost	1700-1730 °C
Vaznost	Min. 70 %
Nasákavost při 1250 °C	Max. 2 %
Teplota slinutí	Max. 1150 °C
Smrštění při 1250 °C	17-20 %
Barva při 1250 °C	Šedozelená

- Kaolíny – surovina obsahující velké množství kaolinitu. Od žárovzdorného jílu se odlišují hlavně čistotou. Kaolín má bílou barvu, což je způsobeno nízkým obsahem znečišťujících látek (např. Fe_2O_3). Kaolín je oproti jílu hrubozrnnější a proto i jeho plastičnost je nižší. Pro experimentální část byl použit kaolin Sedlec 1a. [2, 4]

Tabulka 3 - Chemické složení kaolinu v %

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O	CaO	MgO
46,80	36,60	0,85	0,18	1,20	0,70	0,50

Tabulka 4 - Vybrané vlastnosti kaolinu

Ztráta žíháním	13,20 %
Žárovzdornost	1760 °C
Barva při 1250 °C	Bílá

3.5.2 Ostřiva

Jsou důležitou součástí směsi, ovlivňuje reologické chování a mechanické vlastnosti během celé technologie výroby daného výrobku. Při vytváření negativně ovlivňuje plastičnost směsi, dále pozitivně ovlivňují smrštění sušením i pálením a tím výrobky dosahují přesnějších rozměrů. Ostřivem mohou být pálené jíly a lupky (tzv. šamotová ostřiva). Ty jsou pro šamot typické a kvalita je posuzována podle obsahu mullitu, obsahu nečistot nebo míry zhutnění. Získávají se výpalem na 1000-1400 °C. Tento druh ostřiva je velmi vhodný a ekonomický, protože se využijí všechny výměty z vlastní výroby, které by jinak byly odpadem. [1, 4]

3.5.3 Lehčiva

Šamot se vylehčuje lehčivy, které se rozdělují na přímo a nepřímo působící. Detailněji jsou zde popsána všechna lehčiva, která jsou využívána v experimentální části diplomové práce.

Nepřímo působící – jsou to taková lehčiva, která mají nízkou objemovou hmotnost. Mohou být přírodní (křemelina), upravené (expandovaný perlit) nebo odpady (popílek, cenosféry). [6]

- Cenosféry – jsou to alumino-silikátové částice, které se vyznačují svým velmi přesným kulatým tvarem. Tyto částice mají průměr od 5 μ m do 350 μ m a v mikrostruktuře vytváří uzavřené póry. Vznikají při spalování uhlí a získávají se plavením ze vzniklého popílku. Cenosféry jsou sypký materiál, vyznačující se bílou barvou. [2, 14]

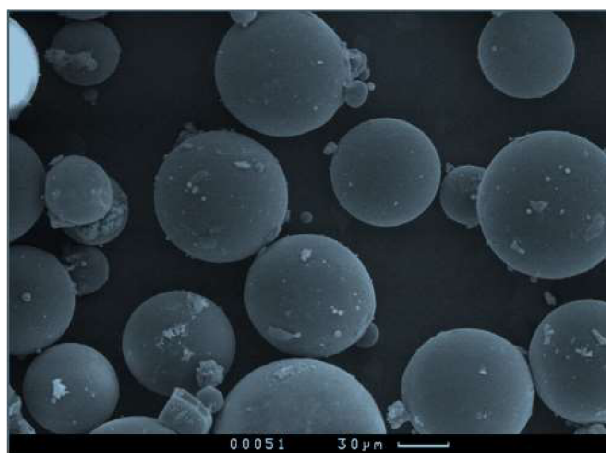
Tabulka 5 - Chemické složení cenosfér v % [14]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
50-65	20-30	1-6	0,2-0,6	1-2	0,2-4	0,3-2

Tabulka 6 - Vybrané vlastnosti cenosfér [14]

Sypná hmotnost	0,37-0,4 g/cm ³
Ztráta žiháním	<2
Bod tání	Cca 1200-1400 °C
Uzavřený plyn CO ₂	70 %
Uzavřený plyn N ₂	30 %

Cenosféry mají své využití kromě keramiky i v jiných oborech. Používají se například jako součást izolačních malt a izolačních prefabrikovaných prvků, popřípadě jako součást tepelně a zvukově izolačních prvků, vyznačujících se vysokou odolností vůči žáru.[14]



Obrázek 4 - Mikroskopický snímek cenosfér [8]

Přímo působící – jsou to suroviny, které při výpalu vyhoří. Chemické složení popela, které vznikne vyhořením daného lehčiva, ovlivňuje výsledné vlastnosti keramického střepeu. Jako přímo působící lehčivo se využívají především různé druhy odpadů jako piliny, korková drť, aj. Nejvíce využívané lehčivo pro vytváření lehčeného šamotu jsou piliny. Avšak jejich cena na trhu se zvyšuje, proto je snahou najít nové možnosti lehčení.[2, 6]

- **Smrkové piliny** – smrk je u nás běžně vyskytující se strom, zaujímá asi 53 % lesní půdy. To je důvodem, proč jsou smrkové piliny nejvyužívanějším lehčivem. Při vyhořování pilin vzniká popel, který obsahuje chemické sloučeniny snižující žárovzdornost. [9]

Tabulka 7 - Chemický rozbor smrkového popela [%hmotnosti] [9]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
8,5	2,66	1,53	43,5	6,68	9,24	0,59	3,53	2,15
TiO	MnO	Cl	Pb	Cd	Cu	Cr	Ni	Hg
0,18	3,780	0,490	0,023	0,001	0,038	0,120	0,780	<0,001

Teplota tání smrkového popela je 1257 °C. Výhřevnost smrkového dřeva je 13,1 MJ/kg (7350 MJ/pm). Cena za 1 m³ je závislá na lokalitě a vlhkosti pilin. Pohybuje se v intervalu 200-350 Kč/m³. [9]

- **Bukové piliny** – buk je považován za kvalitní dřevo s vysokou výhřevností. Výskyt buku u nás je pouze 5,9 %. Proto se lehčivo v podobě buku používá zřídka i přesto, že je dokázané, že výsledné výrobky při použití bukových pilin mají lepší vlastnosti, než při použití smrkových pilin. Chemické složení bukového popela je výrazně odlišné od smrkového. [10]

Tabulka 8 - Chemický rozbor bukového popela [%hmotnosti] [10]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₂
56,3	9,77	9,98	7,92	2,34	6,20	1,38	-	0,12
TiO	MnO	Cl	Pb	Cd	Cu	Cr	Ni	Hg
0,5	0,45	4,28	0,02	<0,0001	-	0,08	0,05	<0,0001

Teplota tání bukového popela se pohybuje okolo 1280 °C. Výhřevnost bukového dřeva je 12,5 MJ/kg (10 830 MJ/pm). Vzhledem k nižší dostupnosti pilin je i cena vyšší, zhruba 350-450 Kč/m³. [10]

- **Antracit** – je jedním z druhů černého uhlí. Vznikal za pomoci vysokého tlaku a tepla. Je specifický tím, že obsahuje malé množství těkavých látek a vysoký obsah uhlíku. Antracit je u nás již vytěžený (nacházel se v pánvích u Brandova v Krušných horách, dále u Českých Budějovic a Vlašimi), proto se dováží ze zahraničí. Nejčastější dovozci jsou z Ukrajiny a Ruska. Antracit se dodává v několika frakcích. [11, 12, 13]

Tabulka 9 - Chemické složení a další vlastnosti antracitu [11, 12]

Chemické složení [%]		Další vlastnosti	
Uhlík	86-98	Prchavé hořlaviny	8-2 %
Kyslík	<2	Obsah vody	>2
Vodík	<3	Výhřevnost	32,6 MJ/kg
Dusík	<1	Zápalná teplota	>500 °C



Obrázek 5 - Natěžený antracit [12]

Antracit může obsahovat i určité množství síry, které jej znehodnocují. Využívá se v domácnostech jako palivo, zplyňuje se do motorů nebo nachází uplatnění v metalurgii. [12, 13]

- **Rašelina** – je to přeměna rostlinného materiálu částečně nebo úplně pod vodou za nedostatku kyslíku. Je prvním stadiem přeměny rostlinného materiálu na uhlí. Rašelina je organickou půdou a od minerálních půd se liší hlavně tmavou barvou, nižší objemovou hmotností a schopností zadržovat vyšší množství vody. Celkově jejich fyzikální, chemické i mechanické vlastnosti jsou značně rozdílné. [15, 16]

Tabulka 10 - Chemické složení a další vlastnosti rašeliny [11]

Chemické složení [%]		Další vlastnosti	
Uhlík	50-60	Prchavé hořlaviny	> 60 %
Kyslík	33-40	Obsah vody	> 75-95
Vodík	4,5-6	Výhřevnost	> 14,7 MJ/kg
Dusík	0,9-3,5	Zápalná teplota	230 °C



Obrázek 6 - Rašelina v přírodě [16]

Rašelina je využívána zejména v zemědělství a zahradnictví, pro svoji mírnou kyselost. V severských zemích, jako je Finsko nebo Švédsko, je využívána i k výrobě elektrické energie. [18]

- **Otruby** – jsou odpadním produktem vznikajícím při zpracování obilí. Podle velikosti částic se dělí na jemné a hrubé, přičemž každá frakce vzniká při jiné fázi zpracování obilí. Obsah vody v obilovinách je klasicky okolo 15 %. Chemické složení popela otrub nebylo zjišťováno. Avšak byla provedena chemická analýza popela obilovin při spalování biomasy. Lze předpokládat, že chemické složení otrub bude obdobné. [17, 22]

Tabulka 11 - Chemické složení popela obilovin [21]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
36,82	1,33	0,68	10,62	4,80	24,55	0,36
P ₂ O ₅	SO ₂	TiO ₂	MnO	Cl	ZnO	BaO
16,23	2,98	0,11	0,16	1,17	0,07	0,03

Otruby jsou využívány zejména pro krmení zvířat. Otruby využívající se v keramickém průmyslu jsou zřejmě nějakým způsobem znehodnoceny, proto neslouží jako potrava pro zvířata [17]

- **Papírenský kal** – je to odpad, který vzniká při výrobě papíru a celulózy. Kal se skládá z organických částí, anorganických částí a vody. Organickou část tvoří hlavně pozůstatky dřeva a kůry. Jde o lignin, hemicelulózu, vlákna celulózy, aj. Anorganické podíly jsou hlavně plniva a pigmenty. Obsah organických látek v sušině je 80-90 %, anorganických 10-20 %. Papírenský kal se vyznačuje tím, že obsahuje opravdu velké množství vody. Sušina tvoří asi jen 20 % z kalu. Kal se vyznačuje zpravidla mírně alkalickým prostředím (pH zhruba 8). [20, 21]

Tabulka 12 - Chemické složení popela papírenského kalu [23]

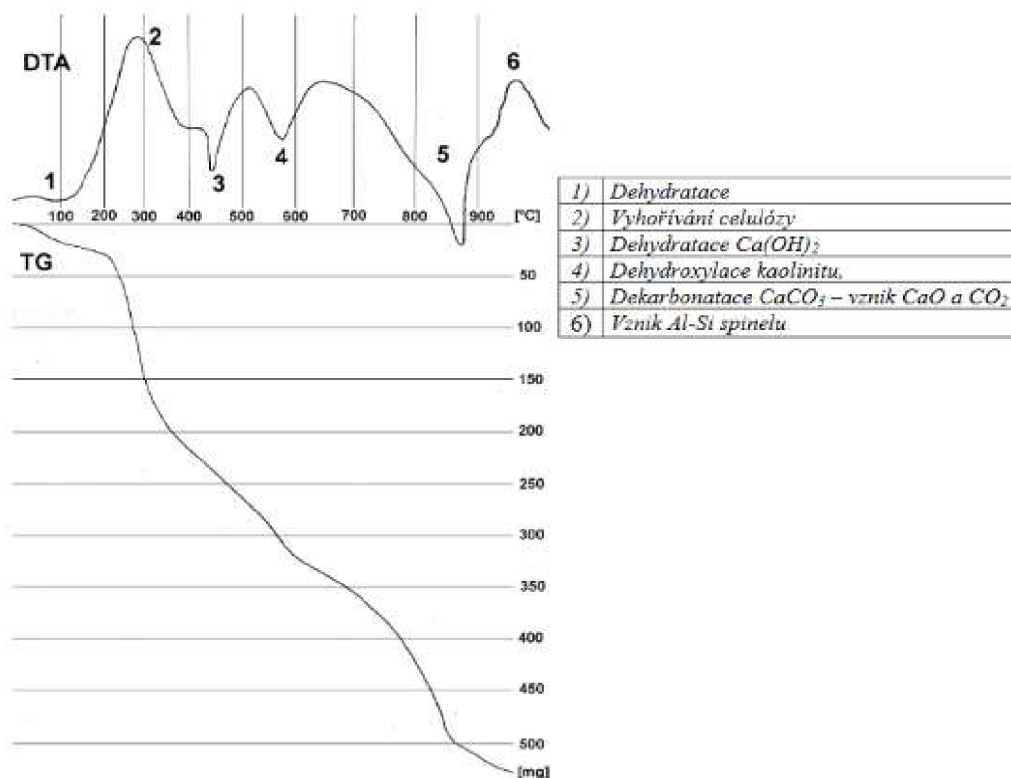
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	Cl
37,04	20,74	0,68	36,79	0,57	0,07
K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	
0,46	0,18	0,74	0,73	0,73	

Papírenský kal se upravuje různými způsoby v závislosti na pozdějším využití. Jde zejména o způsoby odvodnění. Nejčastější jsou dvě možnosti. První je snížení množství vody v kalu pomocí chemikálií, které se přidají do flokulačních nádrží. Druhou možností je odvodňování na principu tlaku, filtrace, odstředování nebo kombinací různých technologií. [19]

Mohou se využívat k výrobě kompostů a rekultivačních substrátů, protože na rozdíl od kalů z ČOV, nejsou papírenské kaly hygienicky závadné. Dále se papírenský kal může spalovat, vracet zpět do výroby, skládkovat, prodávat dál jako materiál (lehčivo do cihlářské výroby), popřípadě ho využít pro tvorbu krajiny, farmářství nebo lesnictví. [19,20]

Pokud jsou papírenské kaly využívány v keramickém průmyslu jako lehčiva, musí se brát ohled na jejich schopnost vázat vysoké množství vody. Na základě této vlastnosti bude potřeba vyšší množství rozdělovací vody, což se odrazí na délkové změně sušením i citlivosti k sušení. Naopak v pozitivním směru ovlivňuje papírenský kal pevnost výsušků. [8]

Papírenský kal obvykle obsahuje vysoký obsah kalcitu (CaCO_3), portlanditu (Ca(OH)_2) a kaolinitu. Diferenční termická analýza papírenského kalu je typická třemi endoprodlevami, které jsou patrné z obrázku 7 (číslo 3, 4, 5). [23]



Obrázek 7 - Termická analýza vzorku papírenských kalů (navážka 1 g) [8]

Ve sledovaných teplotních intervalech jde o tyto procesy:

- 300-390 °C – vyhořívání organických látek. Bývá ukončeno do teploty 400 °C. Výhřevnost papírenského kalu je 3MJ/kg (piliny 17 MJ/kg).
- 390-660 °C – při těchto teplotách dochází k dehydrataci portlanditu a dehydroxylaci kaolinitu, což jsou významné endotermické reakce.
- 660-930 °C – v tomto intervalu teplot dochází k rozkladu vápence. [23]

Všechny tyto reakce se vyznačují vyšší spotřebou tepla. [23]

U všech přímo působících lehčiv se často vyskytuje problém s černými jádry. Ty mohou znehodnocovat výrobky. Optimalizace výpalu je možná pouze tehdy, pokud perfektně dokážeme popsat celý proces vyhořívání lehčiva a také znalostí chemického složení všech surovin. Černá jádra se mohou vytvářet i v hutném keramickém střepu při velmi malé dávce organických látek, pokud nevyhoří během vyhořívacích period.

Organické látky se zpravidla dle spalování látek dělí na bituminézní, humusové a antracitové. Bituminézní látky se spalují při teplotách 200-400 °C, humínové od 400 do 700 °C a antracitické při teplotách nad 700 °C. [27]

Pokud při výpalu výrobků, u kterých dochází k oxidaci, není splněna podmínka oxidační výdrže a je příliš brzo zvýšena teplota výpalu, může dojít k následujícím jevům: [27]

- Výrobek bude obsahovat černá jádra, která ho znehodnocují po estetické stránce. [27]
- Může dojít ke snížení pevnosti vlivem černých jader, protože jsou často obklopena sítí mikrotrhlinek. [27]
- Při rychlém zvýšení teploty může dojít k rychlému slinutí výrobku, a jelikož procesy spojené s oxidací uhlíku uvnitř vzorku nejsou dokončeny, může dojít až k roztržení výrobku vlivem působení tlaků vzniklých plynných produktů. Tento jev se může objevit, zejména pokud je v materiálu větší množství Fe_2O_3 . I při uzavřeném povrchu střepu se uhlík redukuje až na FeO , který může s ostatními oxidy v silikátových materiálech vytvářet nízko tavitelná eutektika. [27]

3.5.4 Další možnosti lehčení

Výroba izolačního materiálu napěněním vzduchem

Je to druhý nejvyužívanější způsob vylehčování šamotu. Takový výrobek se vytváří odléváním napěněné suspenze žárovzdorného šamotu, jílu a pěnotvorné přísady do kovových forem. Pro stabilizaci vytvořené pěny se využívá truhlářský klih, želatina, agar-agar, sulfitový louh, aj. Stabilizace se provádí i látkami odnímající vodu (sádra, piliny, pórovitý šamot). Tyto látky zároveň usnadňují sušení, což je pro tento typ výrobku žádoucí.

Vlhkost z kovových forem může unikat pouze jednou plochou, to zapříčiňuje dlouhé sušení. Smrštění dosahuje až 50 %, proto je využití této metody značně omezeno. Vypálené výrobky se zpravidla musí opravit na požadující rozměr řezáním a broušením. [1, 2, 3]

Výroba izolačního materiálu vývinem plynných komponent chemickou reakcí

Pórovitá struktura je vytvořena plynem, který vzniká chemickou reakcí látek vyskytujících se ve směsi, případně přidaných látek pro tento účel. Tímto způsobem se póry nejen vytvoří, ale i rozšíří, promíchají a následně stabilizují.

Vytváření plynu při chemické reakci probíhá například mezi uhličitany a kyselinami (uvolňuje se CO_2), zásadami a kyselinami, kovy a kyselinami (uvolňuje se H_2), tepelným rozkladem uhličitánů, peroxidů, apod. [1, 3]

Výroba izolačního materiálu přidavkem těkavých látek

Tyto výrobky se vytváří přidáním organické látky do směsi, které se při stoupající teplotě odpaří nebo sublimují. Často jsou těmito látkami naftalen, parafín nebo pěnový polystyren (nejčastější). Tento typ lehčeného výrobku musí při výpalu používat asanační zařízení, v němž se dodatečně spalují produkty rozkladu, aby nedocházelo ke znečišťování životního prostředí škodlivými plyny. [1, 3]

3.6 Publikované články v oblasti vylehčování keramických střepeů

3.6.1 Papírenský kal jako lehčivo cihlářského střepeu

Pro experiment byly vytvářeny dva typy tepelně izolačních tvarovek typu THERM. První vzorky využívají jako lehčivo piliny (směs C) které se standardně využívají. Druhé vzorky jsou lehčené pilinami ve směsi s papírenským kalem (směs D). [23]

Piliny se kombinují s papírenským kalem z toho důvodu, že společně vytváří požadované vlastnosti výrobku. Piliny snižují objemovou hmotnost tím, že vytváří póry po vyhoření a papírenský kal zvyšuje pevnost výsušku i výpalku. Na vytváření pórů v keramickém střepeu má menší vliv, protože obsahuje až 80 % nespalitelných látek nejčastěji v podobě vápence a kaolinitu. [23]

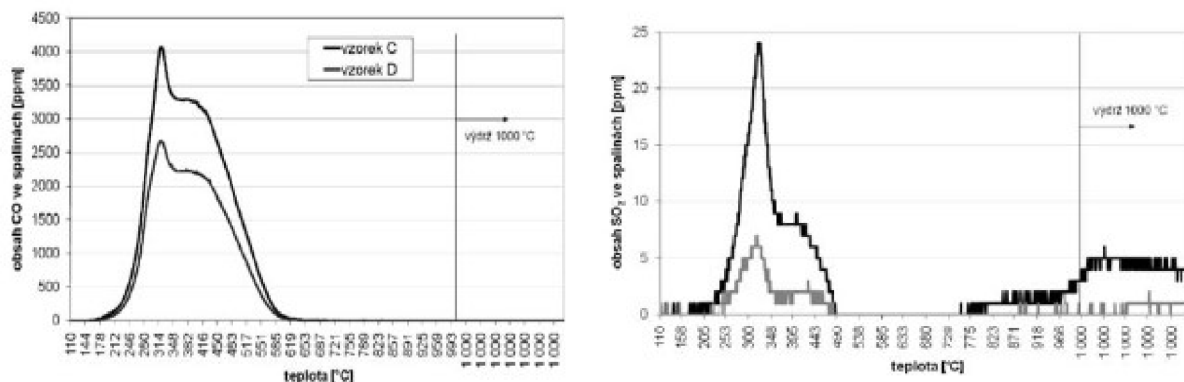
Obě směsi byly vyvářeny průmyslově v cihelně. Vzorky byly odebrány na konci úpravnické linky, před vytvářecím zařízením (šnekový lis). Do směsi D byl použit papírenský kal, který pocházel ze zpracování odpadního papíru technologií deinking. Kaly z tohoto procesu jsou kontaminovány pigmenty, barvivy a chlorovanými sloučeninami. Obsah vody v kalech je okolo 50 %, v suchém vzorku po spálení je asi 15-25 % popela. Mineralogický obsah papírenského kalu je tvořen především kaolinitem a kalcitem, po vyžhání na 930 °C má hlavní zastoupení gehlenit. [23]

Z odebrané směsi byly vytvořeny vzorky stloukáním do kovových forem. Vlastnosti výlisků se liší v závislosti na směsi. Směs D, která obsahuje papírenský kal, potřebuje o 2,3 % vody víc pro dosažení zvolené plasticity (na základě deformačního poměru dle Pfefferkorna). [23]

Sušení probíhalo přirozeně v laboratorních podmínkách (teplota 20 ± 3 °C, relativní vlhkost 50 ± 5 %). Následně se vzorky dosušely v sušárně při teplotě 110 °C do konstantní hmotnosti. Vyšší množství vody ve směsi D, ovlivnilo negativně i citlivost sušení podle Bigota (CSB). Pozitivně jsou ovlivňovány pevností výsušků, které jsou oproti vzorkům vytvořených ze směsi C, vyšší. [23]

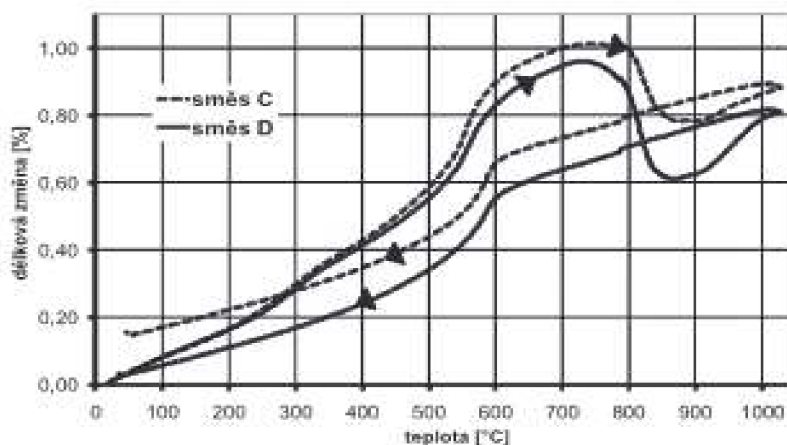
Vzorky byly vypáleny dle propracované palící křivky. Ta se vytvořila tak, aby laboratorní elektrická pec byla srovnatelná s provozní tunelovou pecí. Do 600 °C byl nárůst teploty o 150 °C/hod, poté 30 minut výdrž a následně nárůst na 951 °C při nárůstu 120 °C/hod. [23]

Při vypalování bylo sledováno i množství emisí vzniklých během výpalu z jednotlivých vzorků. U směsi C byl obsah emisí CO₂ i SO₂ výrazně vyšší. Je to dáno tím, že papírenský kal obsahuje oproti pilinám mnohem méně spalitelných látek. [23]



Obrázek 8 - Množství CO₂ a SO₂ vzniklých při výpalu keramického střepe ze směsi C (lehčeno pilinami) a směsi D (lehčeno pilinami a papírenským kalem) [23]

Objemová hmotnost je téměř shodná (liši se pouze o 29 kg/m³), avšak výrazně vyšší je pevnost v tlaku u vzorků s pilinami a kalem (o 6,2 MPa). Tento jev lze vysvětlit nově vzniklou mineralogickou fází, kterou je anortit. Vznik anortitu je provázen nárůstem objemu střepe, který je patrný na křivce DKTA. Nárůst objemu střepe u obou směsí je způsoben použitím vápenaté cihlářské zeminy. U vzorků s papírenským kalem je výraznější, protože obsah CaO je ve střepe vyšší, čímž vzniká více anortitu, který zapříčiňuje vyšší pevnosti v tlaku. [23]



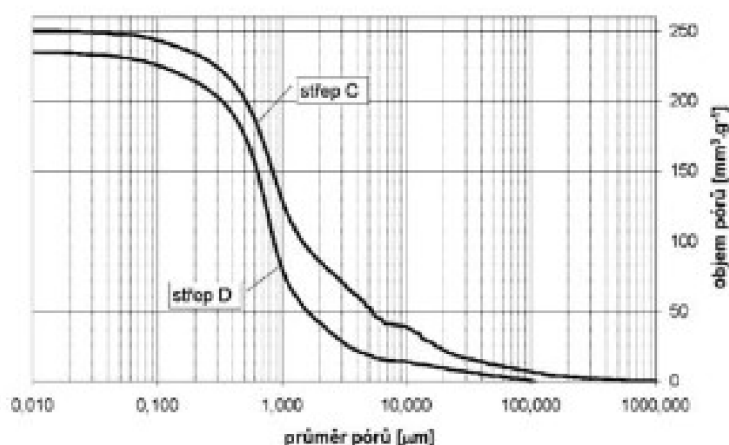
Obrázek 9 - DKTA analýza výrobků vytvořených ze směsi C (lehčivem jsou piliny) a ze směsi D (lehčivem jsou piliny a papírenský kal) [23]

Anortit díky své vysoké objemové hmotnosti zapříčiňuje i zhoršené tepelné izolační vlastnosti vypáleného střepe. V následující tabulce jsou výsledné vlastnosti vypálených keramických střepe. [23]

Tabulka 13- Vlastnosti vypáleného keramického střepe vzniklého ze směsi C a směsi D [23]

Směs	NV [%]	OH [kg/m ³]	PZ [%]	ZH [kg/m ³]	ZP [%]	DP [%]	λ [W/(m ³ ·K)]	σ_p [MPa]	$\sigma_{pop,p}$ [MPa]	E_p [MPa]
C	26,6	1565	41,6	2680	12,7	0,0	0,3982	11,8	5,7	1350
D	25,5	1594	40,6	2680	14,0	-0,1	0,4804	18	6,5	1510

Ve struktuře se vytvářejí různé velikosti pórů v závislosti na použitém lehčivu. V případě směsi s papírenskými kaly lze pozorovat vyšší podíl menších pórů než u směsi s pilinami. To by mohl být důvod, proč mají vzorky vytvořené pouze s pilinami lepší mrazuvzdorné vlastnosti, než vzorky s kalem, při obdobné objemové hmotnosti. [23]



Obrázek 10 - Distribuce velikosti pórů vytvořených ze směsi C (lehčivem jsou piliny) a ze směsi D (lehčivem jsou piliny a papírenský kal) [23]

Závěrem studie je, že papírenský kal může do cihlářského střepe přinášet určitá pozitiva, jako je zvýšená pevnost výsušku i vypáleného střepe či snížený obsah oxidu uhelnatého a siřičitého. Naopak negativně ovlivňuje papírenský kal obsažený ve směsi obsah vody pro vytvoření plastického těsta, citlivost k sušení, zvyšuje energetickou náročnost výpalu a zhoršuje tepelně izolační vlastnosti výsledného keramického střepe. [23]

3.6.2 Lehké výrobky vyráběné z jílu a žulových odpadů

Průmysl zpracovávající ozdobné kameny zahrnuje těžbu, třídění a leštění různých hornin. Přibližně 20-30 % z objemu kamenů se při zpracování promění na velmi jemný prášek. Tento druh odpadu má vysokou cenu za skládkování. Velmi malé částice navíc mohou způsobovat zdravotní problémy lidem při vdechování, případně se mohou dostat do přírodních vodních zdrojů, kde by způsobily nemalé ekologické problémy. [24]

Cílem studie je možnost recyklace nebezpečných odpadů z okrasných kamenů v průmyslové zóně Shaq Al-Thoaban v Egyptě. [24]

V této průmyslové zóně jsou vyráběny ozdobné dlaždice rozřezáním kamenných bloků. Během tohoto řezání se vzniklý prach smíchá s vodou a stane se odpadním kalem nazývaným se "Sahala". Podle převažujícího složení jde o "Sahalu kalcitickou" nebo "Sahalu žulovou". Tento vzniklý produkt je uložen v nádržích. Zkušební vzorky byly vytvořeny z žulového odpadu a jílu (ten se dováží z Národní cementárny v oblasti Helwan, poblíž Shaq Al-Thoaban). Přidáním jílu dojde ke zlepšení soudržnosti a možnosti tvarování vzorků. [24]

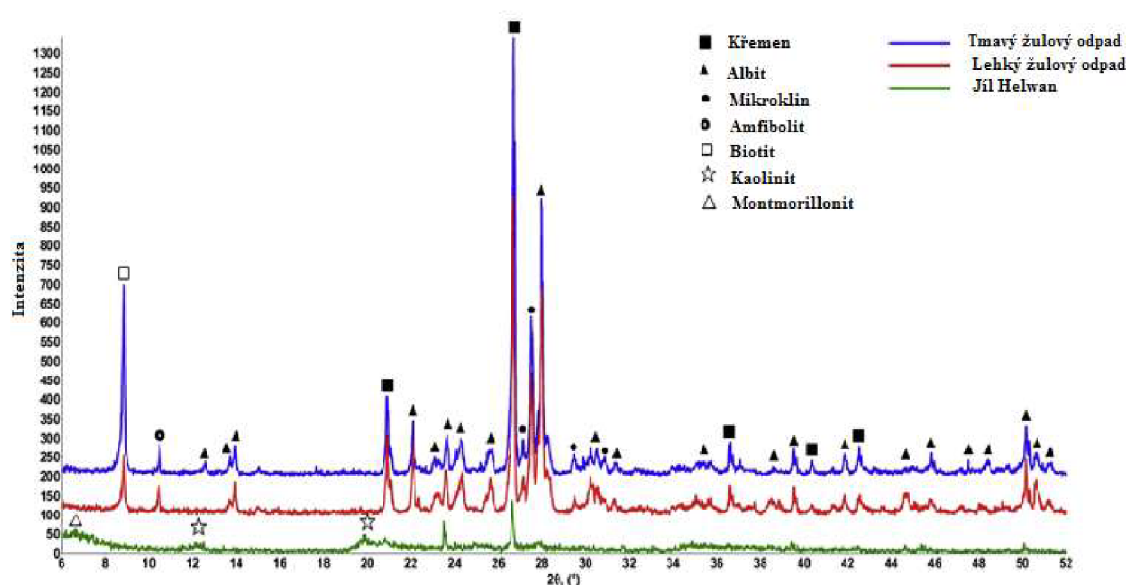


Obrázek 11 - Na fotkách lze vidět, jak vzniká odpad z okrasných kamenů. (a) Řezání bloků pomocí pil a vody, (b) Voda se smíchá s částicemi vytvořených při procesu řezání a pohybuje se v malých kanálech, (c) Produkt uložen v nádržích, (d) Z produktu je lisováním odstraněna voda [24]

Vytvářelo se 6 směsí, přičemž poměr žuly ku jílu byl: 100:0 (B1), 90:10 (B2), 80:20 (B3), 70:30 (B4), 60:40 (B5) a 50:50 (B6) hmotnostně. Do každé směsi se přidalo asi 20 % (hmotnostních) vody, aby bylo usnadněno vytváření. Vytváření probíhalo ručně válcováním.

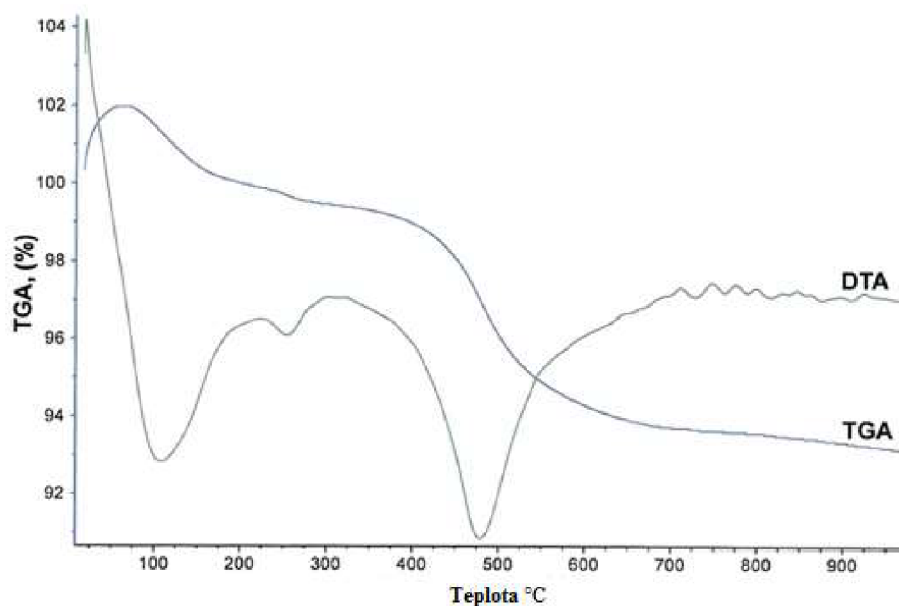
Vzorky se 24 hodin sušily v laboratorních podmínkách a následně přes noc v sušárně při 100 °C. Poté se vzorky vypalovaly na teplotu 1000-1200 °C, kdy nárůst teplot byl 10 °C/min a teplotní výdrž 15 min. Chlazení se provádělo vzduchem až do pokojové teploty. [24]

Tmavé odpady a lehké odpady z žuly se skládají hlavně z křemene (SiO₂), albitu (NaAlSi₃O₈), biotitu ((K (Mg, Fe) 3AlSi₃O₁₀ (OH, F)), mikroklinu (KAlSi₃O₈) a amfibolitu. Tmavý odpad obsahuje trochu více biotitu než lehký žulový odpad, ale to je nepodstatné, protože se odpady smíchají na jednu surovinu. Jíl obsahuje hlavně kaolinit ((Al₂Si₂O₅(OH)₄), malé množství montmorillonitu (Na_{0,2}Ca_{0,1}Al₂Si₄O₁₀(OH)₂(H₂O)₁₀) a nerostné minerály (křemen, albit a malé množství magnezitu). [24]



Obrázek 12 - Rentgenová difrakční analýza surovin pro výrobu vzorků [24]

Suroviny byly podrobeny DTA analýze. Jíl Helwan vykazuje dva endotermické procesy v intervalu teplot 100-230 °C. První reakce je odpaření vody z kaolinitu a montmorillonitu, druhá je odchod vody z mezivrstev montmorillonitu. Tyto procesy doprovází ztráta hmotnosti (2,57 %). Další velký endotermický proces je při 487 °C, kdy dochází k dehydroxylaci kaolinitu. Hmotnostní ztráta je 5,50 %. Další endotermické reakce jsou v teplotním rozmezí 700-800 °C, což je způsobeno úplnou dehydroxylací krystalické vody z montmorillonitu. Hmotnostní ztráta je zde malá – 0,73 %. [24]



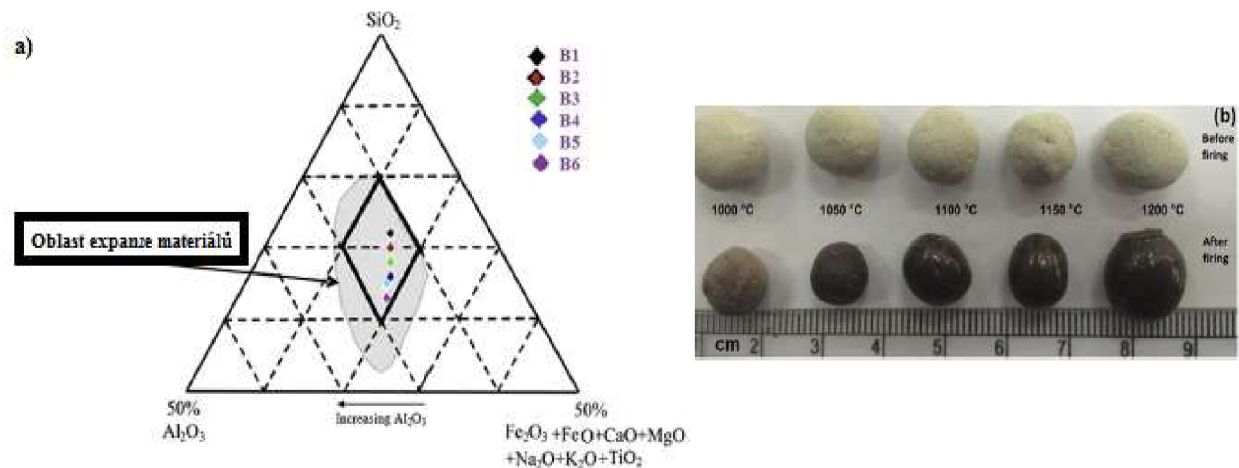
Obrázek 13 - DTA a TG analýza jílu Helwan [24]

Chemické složení jílu Helwan sestává hlavně z SiO_2 a Al_2O_3 (dominance křemenu, živce a jílových minerálů), dále vyšší koncentrace Fe_2O_3 a TiO_2 . Obsah alkálií se vysvětluje přítomností minerálů albitu, mikroklinu a živce. Vyšší ztráta hmotnosti při výpalu je přičítána velkému obsahu krystalické vody v jílu. Dále byla provedena chemická analýza směsí B1-B6, přičemž nejvyšší množství Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO a Cl je v B6 (nejnižší v B1) a SiO_2 a CaO je naopak nejvyšší v B1. Vše je shrnuto v následující tabulce. [24]

Tabulka 14 - Chemické složení surovin a směsí v hmotnostních % [24]

	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Cl
Žulový odpad	70,88	12,95	0,38	4,65	0,73	1,63	2,90	4,90	0,01
Jíl Helwan	46,02	20,93	2,15	12,43	2,49	0,80	2,68	1,23	2,96
B1	71,57	13,08	0,38	4,70	0,74	1,65	2,93	4,95	0,01
B2	69,67	14,01	0,57	5,53	0,92	1,57	2,93	4,49	0,31
B3	67,73	14,95	0,75	6,38	1,11	1,50	2,94	4,03	0,62
B4	65,75	15,91	0,94	7,24	1,30	1,43	2,94	3,56	0,93
B5	63,74	16,89	1,14	8,12	1,50	1,35	2,94	3,08	1,24
B6	61,69	17,88	1,34	9,01	1,70	1,28	2,94	2,59	1,57

Expanze vzorků je závislá na chemickém složení a následně se odráží i na trojitém fázovém diagramu dle Rileyho. Všechny směsi se nachází v oblasti expanze diagramu, což znamená, že všechny směsi jsou schopny expandovat při vypalování do 1300 °C. Čím je vyšší obsah SiO₂, tím je možná větší expanze. Expanzí vzorků je dokázáno, že všechny směsi mohou vytvářet plyny/těkavé látky, které během vypalování vytváří ve střepu pórovitou strukturu.

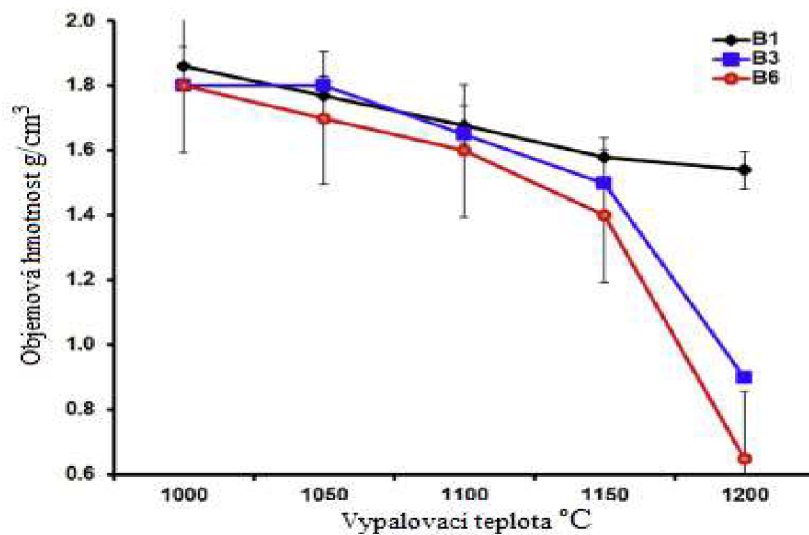


Obrázek 14- a) Všech 6 směsí zaříděno do Rileyho fázového diagramu, b) Fotografie zachycující vysušené a vypálené vzorky ze směsi B6 na různé vypalovací teploty [24]

Vzorky s žulovým odpadem (B1) obsahují minerály jako biotit, amfibolit, případně chlorit, které produkují plyn. Zhruba při 800 °C se začíná z mřížky uvolňovat OH⁻¹. Vodík se uvolňuje jako plyn a kyslík hraje důležitou roli při oxidaci Fe²⁺ na Fe³⁺ z biotitu. Při 1000 °C se Fe³⁺ začne redukovat na magnetit za současného uvolňování kyslíku. Tato dvoustupňová disociační reakce pokračuje dál až do 1200 °C. [24]

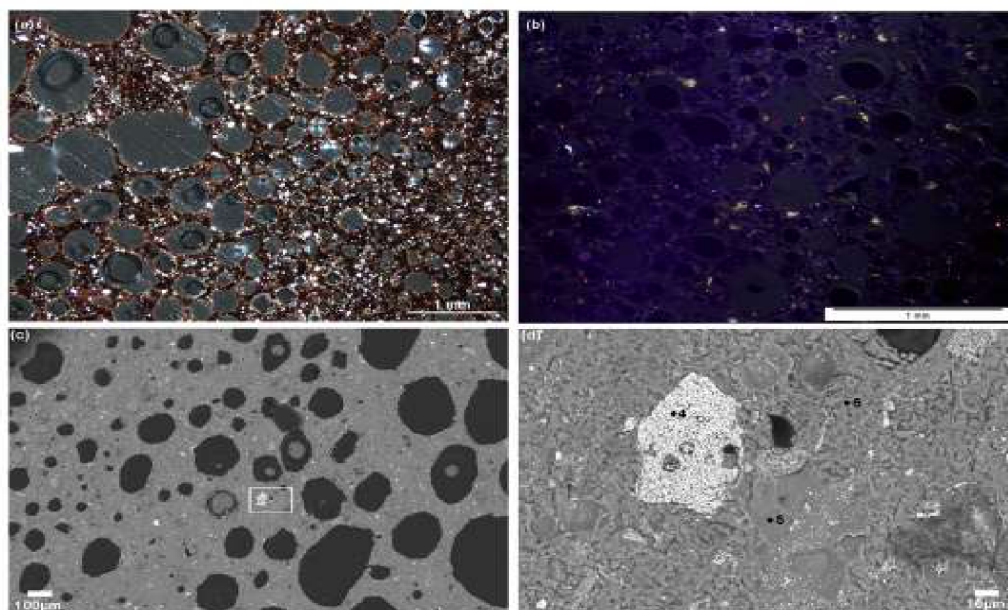
Ve vzorcích B6 se kromě výše popsané reakce uvolňuje další plyn a to z rozkladu jílových minerálů (kaolinit a montmorillonit). Další faktor ovlivňující poróznost materiálu je tvorba viskózní kapalně fáze, která je schopna zachytit vytvořené póry. Vlastnosti vytvořené kapalně fáze jsou v závislosti na chemickém složení směsi. Předpokladem je, že čím bude směs obsahovat vyšší množství tavících oxidů, tím bude vytvořeno více kapalně fáze, zachyceno více plynu a tím vytvořena vyšší pórovitá struktura, která zpřičiňuje nižší objemovou hmotnost. Důležitá je i viskozita kapalně fáze. Viskozita je nejvyšší u směsi B1 a nejnižší u B6, což dokazuje, že čím vyšší je dávka jílu ve směsi, tím je vyšší kapalně fáze, ale nižší viskozita této kapaliny. [24]

Objemová hmotnost se snižuje se zvyšující teplotou výpalu. Lehčené výrobky (objemová hmotnost nižší než 1200 kg/m^3) jsou od přidání nejméně 20 % jílu. Nejnižší objemová hmotnost je u výrobků ze směsi B6, což je důsledkem vytvoření nejvyššího množství kapalné fáze v kombinaci s nejnižší viskozitou ve které se zachycují póry vytvořené chemickými procesy. [24]

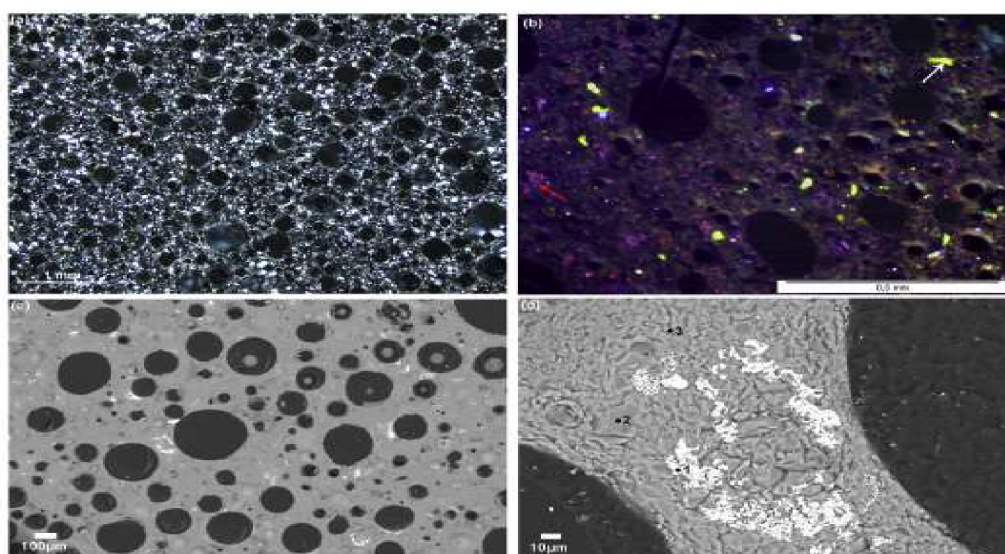


Obrázek 15 - Objemová hmotnost vybraných zkušebních vzorků [24]

Dále byla studována mikrostruktura vzorků B1 a B6 při teplotě výpalu 1200 °C . Ve vzorku B1 jsou izotropní skleněné fáze zahrnující zbytkové krystalické fáze reprezentované náhodně rozptýleným křemenem a albitem. Ve vzorku B6 je sklovitá fáze červeně zbarvená, kvůli převládajícímu oxidu železa. Systém pórů je charakteristický pro každou směs. Póry jsou vytvořeny, jak už bylo řečeno, odpařením vody, rozkladem minerálních fází a tvorbou plynů z chemických reakcí. [24]



Obrázek 16 - Mikrostruktura vzorku B6 po výpalu při 1200 °C. a) Obrázek TLM zobrazující dominantní skelnou fázi poznamenanou oxidy železa, b) Obrázek CL ukazující rozptýlené zbytkové fáze a proměnné póry, c) Obrázek BSE, který ukazuje rozdílné velikosti pórů s rozptýlenými bílými oxidy železa ve sklovině, d) Obrázek BSE zobrazující přiblížení v obdélníkové oblasti [24]



Obrázek 17 - Mikrostruktura vzorku B1 po vypálení na teplotu 1200 °C. a) Obrázek TLM zobrazuje dominantní skelnou fázi, b) Obrázek CL zachycuje rozptýlené zbytkové fáze křemene (červená šipka) a živce (bílá šipka) ve skelné fázi, c) Obrázek BSE ukazuje zaoblené malé póry, d) obrázek BSE zachycuje malé fáze jako jsou oxidy železa [24]

Závěrem tedy je možné říct, že při dávce vyšší než 20 % jílu je možné vytvořit lehčené výrobky s objemovou hmotností nižší než 1200 kg/m^3 . [24]

3.6.3 Předběžná studie o použití kukuřičných klasů jako prostředek pro vytváření pórů v lehčených cihlách – fyzikální a mechanické vlastnosti

Kukuřičný klas je zemědělský odpad, který má potenciál pro to, aby se stal využívaným lehčivem v keramice. Například pokud dojde ke spálení tohoto odpadu, vzniklý popílek se může používat jako příměs pro smíšený cement. Pro některé státy (například Kamerun), je pěstování kukuřice jednou z nejdůležitějších zemědělských aktivit. Vyrábí z ní velké množství produktů, přičemž také vzniká velké množství odpadů. Institut zemědělského výzkumu pro rozvoj Kamerunu (IRAD) produkoval v roce 2009 zhruba 817 milionů tun kukuřice, přičemž asi 10 % (s ohledem na hmotnost zrna a kukuřičných klasů) tj. 81,7 milionů tun je odpadem. [25]

Kukuřičné klasy jsou složeny z 32,5-45,6 % celulózy, 39,8 % z hemicelulózy a 6,7-13,9 % z ligninu. Cílem této studie je zjistit, zda je materiál vhodný využívat jako lehčivo při vytváření lehčených cihel. Vytvořené cihly mají různou dávku lehčiva v podobě kukuřičných klasů a jsou vypáleny na několik teplot. [25]

Kukuřičné klasy byly dovezeny z Balengu v západní oblasti Kamerunu. Materiál má velmi heterogenní makroskopickou strukturu. Klasy byly zdrobněny a poté prosety sítem o velikosti ok 1,25 mm. Ztráta žiháním byla při teplotě 550 °C asi 92 %, což poukázalo na vysoký obsah organických látek. Jíl používaný pro výrobu cihel je také z Kamerunu. Chemické složení jílu a popela vzniklého po vyhoření kukuřičných klasů je v následující tabulce: [25]

Tabulka 15 - Chemické složení popela po shoření kukuřičných klasů a chemické složení jílu v % [25]

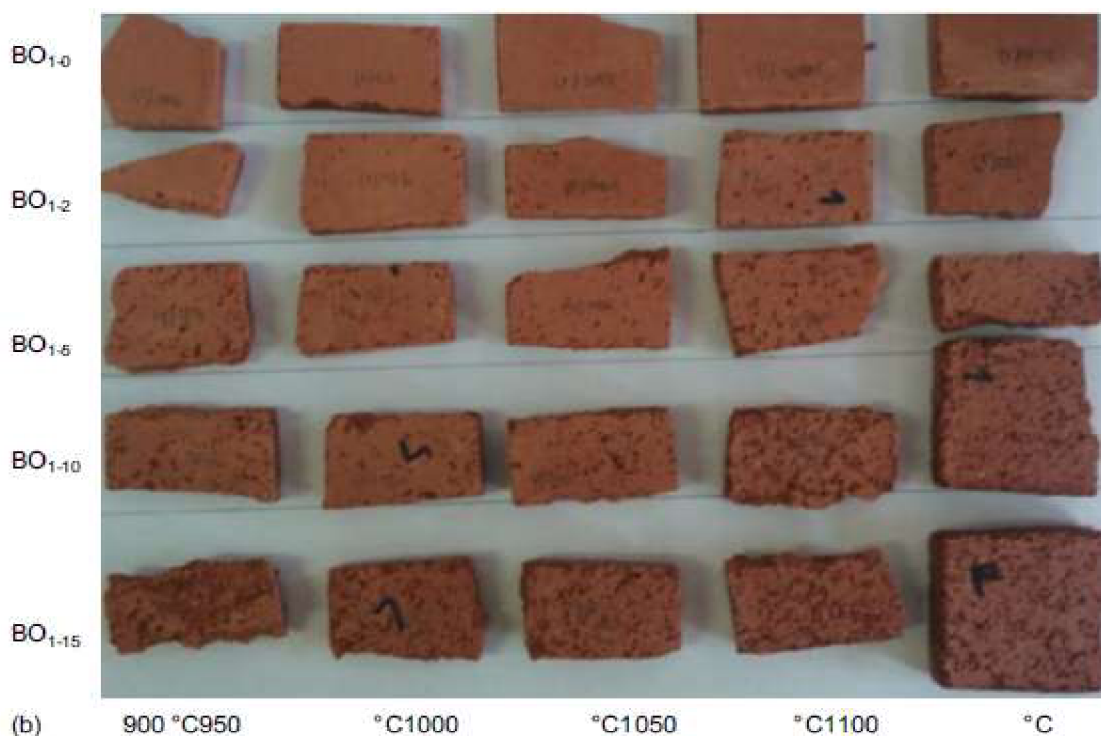
Chemické složení	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	K ₂ O	LOI
Popel vzniklý z kuk. klasů	31,64	1,76	0,20	1,12	2,62	1,25	0,55	31,70	22,71
Jíl	48,01	27,41	2,34	7,34	0,31	0,06	0,12	0,41	13,83

Pozn: LOI = hmotnostní ztráta při výpalu

Co se týče mineralogického složení, tak v jílu převažuje křemen (SiO₂), kaolinit (SiO₂O₅Al₂(OH)₄), illit, goetit a anatas (TiO₂). Chemický rozbor také odhalil velmi nízký obsah alkálií v jílu. [25]

Obsah kukuřičného lehčiva ve vzorcích je 0, 2, 5, 10 a 15 % (vztaženo na sušinu). Vzorky mají označení BO1_x, kde X značí množství lehčiva. Směs se homogenizovala v mísiči, kdy bylo přidáno 20-28 % destilované vody (zvyšující se dávka vody je kvůli zvyšujícímu se

podílu lehčiva). Nakonec se směs lisovala do forem při tlaku 3 MPa. Vytvořené výlisky mají velikost 60x30x(5-17) mm. Zvyšující tloušťka je způsobena zvýšeným objemem směsi při zvyšující se dávce lehčiva ve směsi. Sušení probíhalo 48 hodin v sušárně při teplotě 105 °C. Z každé směsi bylo připraveno 15 vzorků, přičemž každé 3 vzorky byly vypáleny při jiné maximální teplotě (900, 950, 1000, 1050 a 1100 °C). Nárůst teploty v peci byl 5 °C/min a teplotní výdrž při maximální teplotě byla 2 hodiny. Kromě již zmíněných směsí byly připraveny i vzorky referenční, které jsou pouze z jílu. [25]

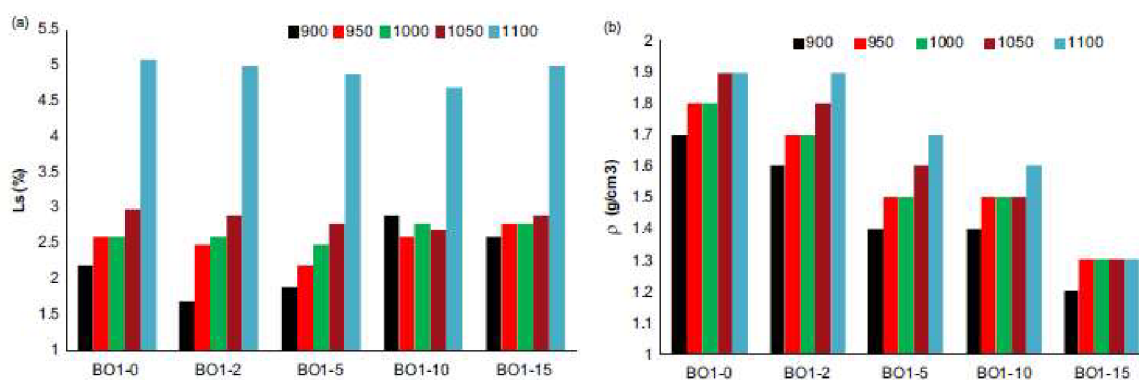


Obrázek 18 - Ve sloupci je označení směsí, ze kterých byly vzorky vyráběny. V řádku pod obrázkem je teplota vypalování. Vzorky pod kterými je °C, jsou nevypálené. [25]

Pórovitost ve výrobku je způsobena vyhořením lehčiva. Při teplotě vypalování 1000 °C a vyšší je pórovitá struktura patrná u všech vzorků s lehčivou (u 2% dávky jen velmi nepatrná). Všechny vzorky mají po vypálení červenou barvu, která je pojena s přechodem goethitu na hematit. Lesklý vzhled výrobků způsobují sklovité fáze z taveniny, která vzniká v důsledku tavících oxidů. Rentgenové vzorky potvrzují přítomnost hematitu. Dále se ve vzorcích vyskytuje křemen, rutil (jedna z modifikačních přeměn TiO_2) a mullit (krystalizuje z kaolinitu při teplotě 950-1000 °C, tzn. větší množství se objevuje při výpalu nad 1000 °C). Illit nebyl ve vzorcích přítomen, což je zřejmě způsobeno tím, že se podílí na vitifikaci při slinování. To má za následek hutnější strukturu vzorků po výpalu. [25]

Lineární smrštění se mírně zvyšuje od teploty 900 °C do 1050 °C. Při vyšších vypalovacích teplotách je smrštění výraznější. Při teplotě 1100 °C je smršťování velmi výrazné, což je způsobeno slinováním vzorku. Jde o rychlou reorganizaci částic a vytvoření kapilárních sítí pro difuzi kapalin ze vzorku. Obecně lze říci, že lehčiva zapříčiňují smršťování vzorků do teploty 950 °C a při vyšších teplotách jde o slinování použitého jílu. [25]

Objemová hmotnost klesá se zvyšujícím podílem kukuřičných klasů. Tento výsledek byl očekáván a je spojen s vytvořením pórovité struktury ve vzorcích. Snížení objemové hmotnosti je patrné od 5% dávky lehčiva ve vzorku. Snížením by mělo dojít k vylepšení tepelně izolačních vlastností. Při konstantní dávce lehčiva se objemová hmotnost někdy zvyšovala se zvyšující se teplotou výpalu. To je způsobeno slinováním vzorku. [25]

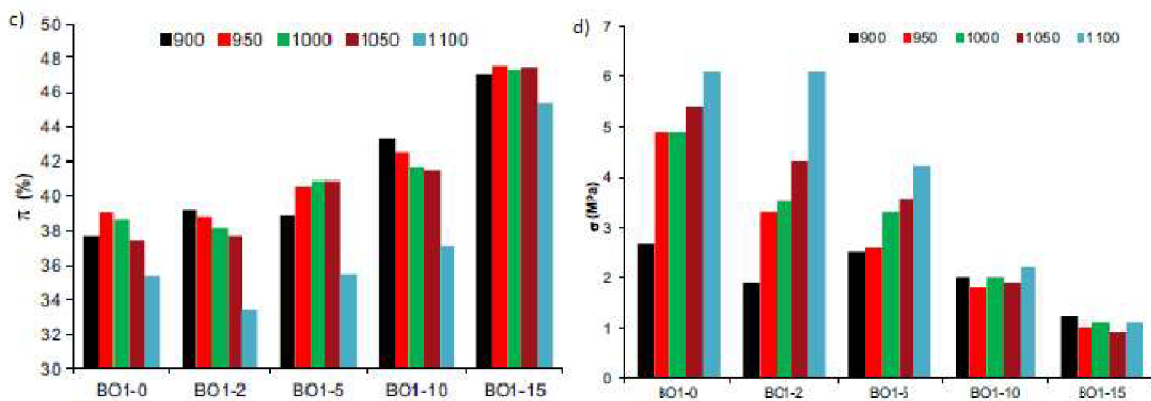


Obrázek 19 - a) Smrštění jednotlivých vzorků při dané teplotě výpalu a dávce lehčiva, b) Objemová hmotnost vzorků při dané teplotě výpalu a dávce lehčiva [25]

Pórovitost se zvyšuje se zvyšujícím obsahem kukuřičných klasů. Vypálený vzorek bez lehčiva má při 1100 °C pórovitost 35,4 %. Pórovitost při použití lehčiv se zvyšuje až k hodnotě 45,4 %. Při konstantní dávce lehčiva dochází opět ke snižování pórovitosti při zvyšující se teplotě výpalu. Je to způsobeno zhušťováním struktury při slinování. Redukce pórů u vzorků s dávkou lehčiva 15 % je menší při zvyšující se teplotě. Je to zřejmě způsobeno tím, že množství pórů vzniklých při spalování kukuřičného klasu je tak velké, že vzniklá tavenina není schopná vyplnit takto vzniklé póry. Obecně jsou póry tím větší, čím je vyšší množství vody ve vytvářecí směsi. [25]

Pevnost v tlaku se snižuje se zvyšující dávkou lehčiva. U vzorků s 5% dávkou lehčiva se pevnost v tlaku zvyšuje se zvyšující teplotou výpalu. Je to dáno slinováním vzorku. U vzorků

s obsahem lehčiva 10 a 15 % teplota výpalu nijak výrazně neovlivňuje pevnost. [25]



Obrázek 20 - c) Pórovitost vzorků při dané teplotě výpalu a dávce lehčiva, d) Pevnost v tlaku při dané teplotě výpalu a dávce lehčiva [25]

Tato předběžná studie ukazuje, že použití kukuřičného klasu jako lehčiva pro výrobu cihel je možné. Obecně dochází se zvyšující dávkou lehčiva ke snížení objemové hmotnosti, zvýšení pórovitosti, ale i ke snížení pevnosti v tlaku a zvýšení množství rozdělovací vody a tím tedy horší podmínky pro sušení. [25]

Závěrem studie je, že ohromné odpady vznikající při zpracovávání kukuřice by mohly mít uplatnění při výrobě cihel. [25]

3.6.4 Vliv přidání odpadu z olivového mlýna na porézní vlastnosti vypálených jílových cihel

Odpady jako popílky, struska nebo popel ze spalování biomasy jsou již zahrnovány do moderního stavebnictví. Nedávno probíhaly studie ohledně využívání odpadů ze zemědělské produkce, například: lusky z rýže, sláma, slunečnicová semínka, olivové pecky, semena z hroznů či pecky z třešní. Ze všech těchto odpadů je snahou vyrábět cihly, které mají díky pórové struktuře lepší tepelně izolační vlastnosti. [26]

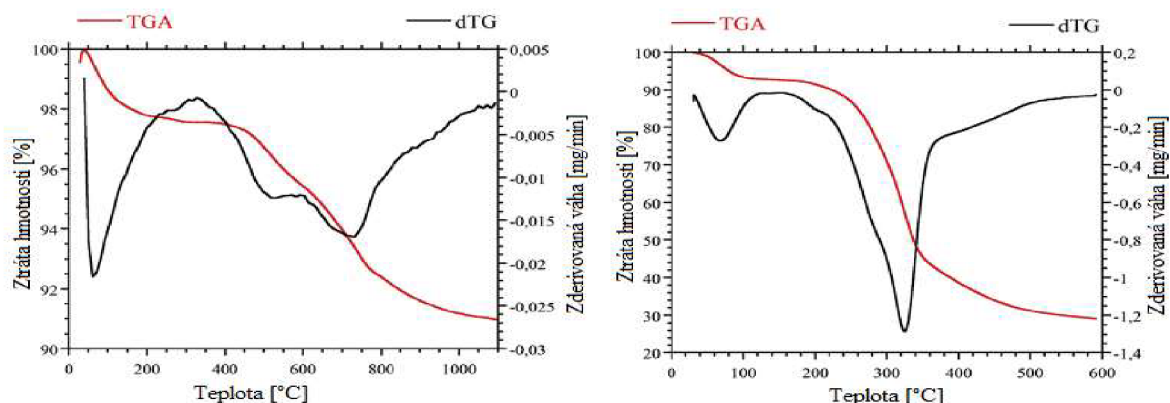
Dalším takovýmto odpadem je olivový odpad, který vzniká v olivovém mlýně – jde o zbytky po vymačkání tekutiny z oliv. Produkce olivového oleje je zejména ve Středomoří v Evropě velmi významná – jde asi o 2,2 milionů tun, což je zhruba 73 % z celkové světové produkce. Zároveň tyto odpady jsou považovány za velké znečišťování životního prostředí, protože z celkové sklizně oliv je 75 % odpadem. [26]

Výzkum se zabýval vytvořením lehčené cihly ze směsi jílu a odpadu z oliv. Odpad z oliv byl získán z továrny na zpracování olivového oleje v Izmiru v Turecku. Jíl byl dodán od výrobce cihel z Manise, taktéž z Turecka. Suroviny se vysušily, rozemlely a prošly přes síto o velikosti ok 100 μm . [26]

Vzorky byly vytvářeny z jílu, odpadu z oliv (0, 5 a 10 % hmotnostně) a vody, kdy se 30 minut homogenizovaly v mechanickém mixéru. Následně se polosuchá směs vtlačovala do forem při tlaku 20 MPa. Vzorky byly sušeny v sušárně při teplotě 40 °C po dobu 12 hodin a poté 24 hodin při 110 °C. Vysušené vzorky se vypalovaly v peci, kdy rychlost zahřívání byla 2,5 °C/min do 600 °C poté se rychlost zahřívání změnila na 10 °C/min až do maximální teploty (850, 950 nebo 1050 °C). Výdrž na maximální teplotě byla 2 hodiny. [26]

Chemické složení jílu bylo stanoveno rentgenovou fluorescenční analýzou. Jíl obsahuje 57,2 % SiO_2 , 15,3 % Al_2O_3 , 1,6 % Na_2O , 5,2 % Fe_2O_3 , 3,1 % MgO , 2,5 % CaO , 2,3 % K_2O a ztráta žiháním je 10,6 %. Mineralogicky jíl obsahuje hlavně křemen, muskovit/ilit a chloritové fáze, což bylo zjištěno rentgenovou difrakční analýzou. [26]

Dále byla prováděna TG analýza. Při teplotě 1100 °C byla ztráta hmotnosti jílu 9 %. První ztráta byla okolo 100 °C, kdy docházelo k odpaření fyzikálně adsorbované vody. Další hmotnostní ztráty byly mezi 150-350 °C a mezi 400-600 °C, což je zřejmě způsobeno spalováním organických částí v hlíně a odchodem chemicky vázané vody. Úbytek hmotnosti při 600-800 °C může být způsoben dehydroxylací muskovitu/ilitu a chloritů. [26]



Obrázek 21 - TG analýza pro jíl (obrázek vlevo) a odpad z oliv (obrázek vpravo)

Tato analýza byla provedena i pro odpad ze zpracovávání oliv. Při teplotě 600 °C byla ztráta hmotnosti 70 %. Snížení hmotnosti o 9 % došlo v rozmezí teplot 25-100 °C. Zde šlo o odpaření fyzikálně vázané vody. Mezi teplotami 200-500 °C došlo k 60% ztrátě hmotnosti, což je způsobeno spalováním organických částí obsažených v tomto odpadu. [26]

Tabulka 16 - Vlastnosti vypáleného keramického střepu s přidavkem různého množství odpadu z oliv [26]

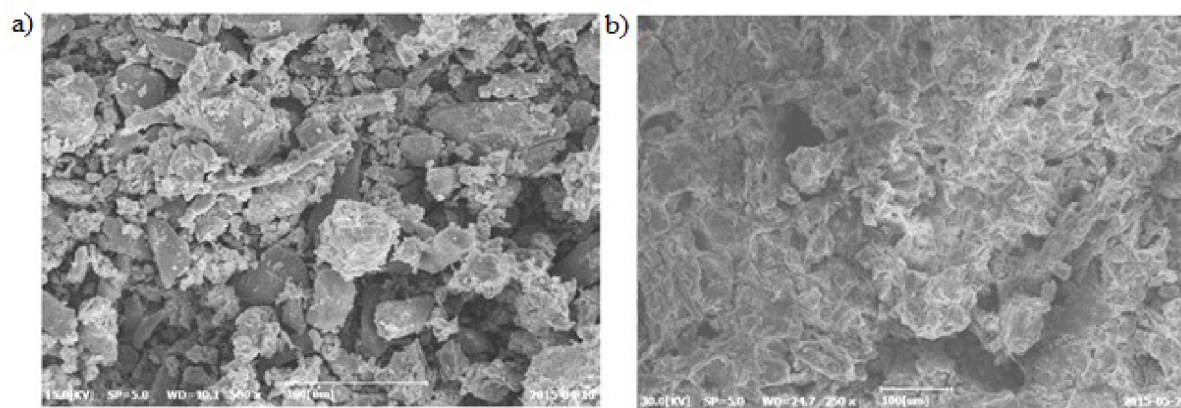
Vlastnost	Vypalovací teplota [°C]	Přídavek odpadu z oliv ve směsi [% hmotnostně]		
		0	5	10
Ztráta žiháním [%]	850	7,2	11,0	15,2
	950	7,3	11,2	15,3
	1050	6,6	10,9	15,1
Zdánlivá pórovitost [%]	850	31,4	40,1	46,7
	950	30,8	40,1	47,0
	1050	27,8	37,2	44,9
Nasákavost [%]	850	17,0	24,7	32,2
	950	16,6	24,7	32,5
	1050	14,5	22,1	30,1
Objemová hmotnost [g/cm ³]	850	1,84	1,62	1,45
	950	1,86	1,63	1,45
	1050	1,92	1,68	1,49
Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]	850	0,595	0,501	0,462
	950	0,638	0,527	0,436
	1050	0,690	0,546	0,477
Pevnost v tlaku [MPa]	850	32,53	16,85	9,03
	950	36,90	20,96	10,26
	1050	55,41	32,59	16,99

Zdánlivá pórovitost se při přidání 10 % odpadů z oliv zvýšila až na 47 %, kdy objemová hmotnost je $1,45 \text{ g/cm}^3$ při teplotě výpalu $950 \text{ }^\circ\text{C}$ (bez odpadu z oliv je pórovitost 30,8 % a objemová hmotnost $1,86 \text{ g/cm}^3$). [26]

Tepelná vodivost klesla u vzorků s 10% podílem lehčiva o 31 % z $0,638 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ na $0,436 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, což je velmi dobré z hlediska hodnocení tepelné izolace budov. [26]

Pevnost v tlaku se samozřejmě snižovala s vyšší množstvím odpadu. Důležité však je, že i při 10% podílu lehčiva splňuje pevnost v tlaku minimální normový požadavek na pevnost cihel, což je 7 MPa. [26]

Pomocí elektronového mikroskopu byla zachycena struktura odpadu z oliv a struktura vypáleného vzorku s 10% podílem odpadu (obrázek 22). Tmavé části na snímku odpadu z oliv jsou pecky z oliv, světlejší části představují zbylé části odpadu z olivového mlýna. Na snímku b jsou patrné póry vzniklé vyhořením olivového odpadu. [26]



Obrázek 22 – a) Snímek odpadu z oliv z elektronového mikroskopu, b) Snímek vypáleného vzorku na $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ s 10 % odpadu z oliv

Závěrem lze konstatovat, že se podařilo vytvořit cihlu, s přídavkem 10 % odpadu z výroby oliv, s lepšími tepelně izolačními vlastnostmi při současném splnění minimální pevnosti. Ideální volbou se zdá být vzorek vypalovaný na teplotu $950 \text{ }^\circ\text{C}$. Tento vzorek má $10,26 \text{ MPa}$ pevnost v tlaku, objemovou hmotnost $1,45 \text{ g/cm}^3$ a součinitel tepelné vodivosti $0,436 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Je předpokladem, že pokud by dávka lehčiva byla vyšší než 10 %, došlo by ke snížení pevnosti pod 7 MPa. Využití takového výrobku by bylo zřejmě na tepelně izolační výrobky. [26]

4 Experimentální část

Experimentální část obsahuje popis metodiky prováděných zkoušek, dále popis všech vytvářených směsí, jejich výsledků a konečné vyhodnocení.

4.1 Metodika experimentů

V praktické části jsou vytvářeny vzorky, kdy základními surovinami jsou pojivo a lehčivo. Jako pojivo slouží jííl B1 nebo kaolín Sedlec Ia. Lehčivem v tomto případě jsou smrkové piliny, bukové piliny, rašelina, otruby, antracit, papírenský kal a cenosféry. Piliny, které se využívají v experimentální části, byly získány přímo ze závodů zpracovávající dřevo. Podobnou surovinou jako piliny je rašelina. Pro experimentální část byla použita klasická rašelina, která se běžně využívá pro zahrádkářské účely. Papírenský kal je získán jako odpadní surovina ze zpracování papíru. Otruby využívající se pro výrobu zkušebních vzorků jsou nějakým způsobem znehodnoceny, což je důvod proč nejsou možné použít jako krmnou směs pro zvířata a hledají své využití jinde. Antracit a cenosféry jsou dodány pro účely výzkumu z výroben, kde se s těmito surovinami taktéž experimentuje. Všechny suroviny jsou podrobněji popsány v teoretické části.

Zkušební vzorky se vytvářely ručně natloukáním do forem o rozměru 100x50x20 mm. Po vytvoření byly vzorky nejdříve sušeny na podložkách v laboratorním prostředí, následně byly umístěny do sušárny, kde se při 110 °C sušily do konstantní hmotnosti. Výpal probíhal dvěma způsoby. První část vzorků byla vypálena tak, že nárůst teplot v peci byl 150 °C/ hodinu a teplotní výdrž 30 minut na maximální teplotě 1000 °C. Druhá část vzorků byla vypálena při nárůstu teploty 10 °C/minutu a teplotní výdrž byla taktéž 30 minut na maximální teplotě 1000 °C. Během celého procesu sušení i pálení se u všech vzorků pozorovalo smrštění a objemová hmotnost. Při výpalu se sledovalo vyhořívání lehčiv, případně chování nepřímého lehčiva. Na vypálených vzorcích se zkoumala žárovzdornost, součinitel tepelné vodivosti, nasákavost, zdánlivá pórovitost, zdánlivá hustota a pevnost v tahu za ohybu. Dále byly vzorky podrobeny diferenčně termické analýze a kontrakčně dilatační termické analýze (orientační určení klasifikační teplota).

4.1.1 Zkoušení vstupních surovin

Stanovení vlhkosti pracovních surovin a výrobní směsi

Jde o stanovení vlhkosti, která je možná odstranit sušením při teplotě 110 °C, jde tedy o vodu fyzikálně vázanou. Vlhkost se stanoví tak, že se provede vážení zkoumaného vzorku. Ten se následně umístí do sušárny při definované teplotě a suší se do konstantní hmotnosti. Nakonec se vysušený vzorek také zváží. Vlhkost se vypočítá: [28]

$$W = \frac{(m_w - m_s)}{m_s} \cdot 100 \text{ [%]}$$

W vlhkost vzorku [%]

m_w hmotnost vlhkého vzorku [g]

m_s hmotnost suchého vzorku [g]

Diferenčně termická analýza a termogravimetrická analýza - ČSN 72 1083

Diferenčně termická analýza (DTA) je založená na měření rozdílů teplot mezi zkoušeným vzorkem a inertním standardem současně zahříváním v peci měřicího přístroje. Zachycuje reakce, kdy se teplo uvolňuje (exotermické reakce), jako například při hoření nebo oxidaci. Dále zaznamenává situace, kdy se teplo spotřebovává (endotermické reakce), jako například při dehydrataci či dehydroxylaci.

Termogravimetrická analýza (TG) zaznamenává během celého procesu hmotnostní úbytek vzorku, což pomáhá charakterizovat reakce dějící se ve vzorku.

4.1.2 Zkoušení plastického těsta

Plastičnost podle Pfefferkorna – ČSN 72 1074

Plastičnost těsta lze stanovit na základě deformačního poměru na Pfefferkornově přístroji. Stanovuje se na válečku (průměr $33 \pm 0,5$ mm, výška $40 \pm 0,1$ mm) vytvořeného ze zkušebního těsta o určité vlhkosti. Tento váleček se umístí na vyznačenou plochu do Pfefferkornova přístroje a uvolní se na něj závaží z definované výšky 185 mm o hmotnosti 1200 g. Po dopadu závaží na vzorek se změří výška válečku. Podělíme-li výšku válečku po deformaci výškou válečku před deformací, dostáváme požadovaný deformační poměr. [2]

$$d = \frac{h_n}{h_o} \text{ [-]}$$

d deformační poměr [-]

h_n výška válečku po deformaci [mm]

h_o výška válečku před deformací [mm]

4.1.3 Zkoušky na vysušeném vzorku

Délková změna sušením – ČSN 72 1565-5

Během sušení dochází k odpařování vody z výlisku, což má za následek přibližování částic ve struktuře a dochází ke smrštění. Velikost smrštění je ovlivněno zejména množstvím rozdělovací vody a obsahem částic s průměrem menším než 2 μm . Čím více vody a částic o velikosti zrn menší než 2 μm bude vzorek obsahovat, tím bude smrštění vyšší. Aby bylo možné smrštění určit, je nutné změřit zkoušený vzorek těsně po odformování a následně po vysušení. Smrštění sušením se vypočítá: [28]

$$DS = \left(\frac{l_s - l_z}{l_z} \right) * 100 [\%]$$

DS délková změna sušením [%]
l_z délka po odformování [mm]
l_s délka po vysušení [mm]

4.1.4 Zkoušky na vypáleném vzorku

Délková změna pálením – ČSN 72 1565-5

Výpal je doprovázen spoustou dějů (například slinování jílu), které mají za následek další přibližování částic, které jsou obsaženy ve směsi.

Délková změna pálením se určí z rozměrů vysušeného a vypáleného vzorku. Celková délková změna se zjistí z rozměrů výlisku a rozměrů vypáleného vzorku.

$$DP = \left(\frac{l_p - l_s}{l_s} \right) * 100 [\%]$$

DP délková změna pálením [%]
 $DC = \left(\frac{l_p - l_z}{l_z} \right) * 100 [\%]$ DC délková změna celková [%]
l_p délka po vypálení [mm]

Objemová hmotnost – ČSN 72 1565-6

Objemová hmotnost je hmotnost objemové jednotky vzorku včetně otevřených i uzavřených pórů. Může být stanovena několika způsoby. Jedním z nich je pomocí vážení a měření rozměrů vzorků. Druhou možností je pomocí hydrostatického vážení. Vysušený vzorek se zváží a následně umístí do exsikátoru, kde proběhne jeho nasycení vodou. Dále se provede hydrostatické vážení vzorku a nakonec zvážení nasáklého vzorku. Podrobný průběh zkoušky bude popsán u zdánlivé pórovitosti. Výpočet objemové hmotnosti:

$$OH = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

m hmotnost vzorku [kg]
V objem vzorku [m³]

$$OH = \left(\frac{m_s}{m_n - m_{nv}} \right) * \rho_v \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

m_{nv} hmotnost vzorku váženého hydrostaticky [kg]
m_s hmotnost suchého vzorku [kg]
m_n hmotnost nasáklého vzorku [kg]
ρ_v hustota vody [kg/m³]
OH objemová hmotnost [kg/m³]

Zdánlivá pórovitost – ČSN 72 1565-6

Pórovitost je velmi důležitou vlastností lehčených šamotových výrobků. Čím je pórovitost vyšší, tím se předpokládají lepší tepelně izolační vlastnosti výrobku.

Vzorky se suší v sušárně do ustálené hmotnosti, poté se váží a následně umísťují do exsikátoru. Pomocí vodní vývěvy se z exsikátoru odčerpá vzduch, aby se vytvořil podtlak a tak se vzorky ponechají 15 minut. Poté se vzorky zalijí vodou a nechají se 30 minut odstát. Vzorky se postupně hydrostaticky zvaží (z vody se vydělávají jen na nezbytně nutnou manipulační dobu). Poté se vzorky postupně vyjímají z vody a váží se na vzduchu. Před zvážením musí být každý vzorek osušen vlhkou tkaninou, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků. Výpočet pórovitosti:

$$PZ = \frac{(m_n - m_s)}{(m_n - m_{nv})} \cdot 100 \text{ [%]}$$

PZ zdánlivá pórovitost [%]
m_{nv} hmotnost vzorku váženého hydrostaticky [kg]
m_s hmotnost suchého vzorku [kg]
m_n hmotnost nasáklého vzorku [kg]
ρ_v hustota vody [kg/m³]
OH objemová hmotnost [kg/m³]

Stejným způsobem byly vzorky nasyceny i pro stanovení objemové hmotnosti hydrostaticky, nasákavosti a zdánlivé hustoty.

Nasákavost – ČSN 72 1565-6

Nasákavost je další důležitou vlastností, která může definovat vlastnosti keramického střepe. Stanovením nasákavosti se charakterizuje mikrostruktura střepe, konkrétně jeho pórovitost. Čím je nasákavost vyšší, tím je zkoušený vzorek více pórovitý.

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} [\%]$$

NV nasákavost [%]

m_s hmotnost suchého vzorku [kg]

m_n hmotnost nasáklého vzorku [kg]

Zdánlivá hustota – ČSN 72 1565-6

Jde o hmotnost vysušeného vzorku na jednotku objemu včetně uzavřených pórů, ale bez otevřených pórů. Zdánlivá hustota se vypočítá:

$$ZH = \frac{m_s}{m_s - m_{nv}} \cdot 1000$$

ZH zdánlivá hustota [kg/m³]

m_s hmotnost suchého vzorku [kg]

m_{nv} hmotnost vzorku váženého hydrostaticky [kg]

Součinitel tepelné vodivosti – ČSN EN ISO 8894-1

Určuje tepelně izolační vlastnosti vzorků, což je velmi podstatná vlastnost pro lehčené šamotové výrobky. Jde o množství tepla, které projde materiálem o dané tloušťce za jednotku času, aby se teplota změnila právě o 1 teplotní stupeň. V případě tohoto typu materiálů by hodnota měla být co nejnižší. Tepelná vodivost je závislá na objemové hmotnosti.

Součinitel tepelné vodivosti se určuje metodou topného drátu pomocí speciálního přístroje. Tento přístroj obsahuje sondu, která se přikládá přímo na vzorek, provede měření a následně vyhodnotí součinitel tepelné vodivosti, který se označuje λ [W/(m·K)]. [2]

Kontrakčně dilatační termická analýza (DKTA) – ČSN 72 1083

DKTA analýza slouží pro stanovení objemových změn vzorků v závislosti na teplotě. Tato metoda může být použita pro sledování lineárních změn vzorku, což může sloužit jako podklad pro vytvoření pálicí křivky keramických výrobků. Fungovalo by to tak, že v místě významných délkových změn by se upravila pálicí křivka tak, aby nedocházelo k porušení

výrobků vlivem vzniklého napětí. Dále se tato analýza může využívat k orientačnímu stanovení klasifikační teploty lehčených šamotových výrobků. [28]

Žárovzdornost – ČSN EN 993-12

Žárovzdorný materiál dokáže odolávat vysokým teplotám. Žárovzdornost se určuje tak, že se ze zkoušené směsi vytvoří žároměrky se stejným rozměrem a tvarem jako referenční žároměrky. Každé referenční žároměrce odpovídá referenční teplota. Označení žároměrky je např. 150, což znamená, že teplota žárovzdornosti této žároměrky je 1500 °C. Dle předpokládané žárovzdornosti se zvolí referenční žároměrky, které se všechny pomocí tmele připevní na žárovzdornou podložku v přesně definovaném pořadí. Takto se umístí do pece, kde se začne zvyšovat teplot tak, aby za 1,5-2,0 hodiny byla teplota v peci zhruba o 200 °C nižší než je předpokládaná žárovzdornost a následně by teplota měla stoupat o 2,5 °C za minutu. Žárovzdornost je stanovena tehdy, když se zkušební i referenční žároměrky ohnou tak, aby se svým vrcholem dotýkaly podložky. [2]

Dnes se žárovzdornost se určuje tak, že se vytvořené žároměrky umístí do pece s možností pozorování.

Pevnost v tahu za ohybu

Zkoušený vzorek je podepřen dvěma podporami, které jsou ve vzdálenosti l od sebe. Mezi těmito podporami je vzorek zatěžován silou F až do porušení. Pevnost v tahu za ohybu se vypočítá z následujícího vztahu:

$$R_t = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \text{ [MPa]}$$

F síla při porušení [N]

l vzdálenost mezi podporami [mm]

b šířka zk. vzorku [mm]

h výška zk. vzorku [mm]

4.2 Etapa 1

V první etapě dochází k vytváření vzorků z jílu B1 v kombinaci s jednotlivými druhy lehčiv.

4.2.1 Příprava surovin a vytváření vzorků

Prvním krokem byla příprava lehčiv. Bylo nutné, aby všechna lehčiva měla stejné maximální zrno. U antracitu, cenosfér a otrub nebyl problém, protože lehčivo mělo vyhovující granulometrii, tedy maximální zrno směsi bylo do velikosti o průměru 1 mm. Smrkové piliny, bukové piliny a rašelinu bylo nutné prosít přes síto o velikosti otvorů 1 mm. Speciálním případem byl papírenský kal, který díky své vysoké vlhkosti není v sypkém stavu a zapracovává se až přímo do plastického těsta. Dalším krokem bylo stanovení počáteční vlhkosti lehčiva.



Obrázek 23 - Suroviny sloužící jako lehčiva pro výrobu lehčeného šamotu

Tabulka 17 - Počáteční vlhkost lehčiv

Vzorek	Smrk	Buk	Rašelina	Otruby	Antracit	Pap. kal	Cenosféry
Vlhkost [%]	17,79	6,72	23,92	7,30	0,20	119,94	1,01

Je nutné si uvědomit, že vlhkost lehčiv se mění v dané lokalitě, s daným dodavatelem i současnými podmínkami. Proto vlhkost nelze obecně definovat u daného druhu lehčiva.

Navážka jednotlivých druhů lehčiva je provedena tak, aby objemová hmotnost vypáleného vzorku byla okolo 1000 kg/m³. Pro stanovení hmotnostní dávky lehčiva bylo nutné zjistit jeho sypnou hmotnost.

Po zjištění sypné hmotnosti a vlhkosti lehčiv došlo k vytváření vzorků. Pojivem u všech vzorků v první etapě je jíl B1. Jeho sypná hmotnost je 950 g/l. Množství vody přidané k jednotlivým směsím bylo nadávkováno tak, aby plastické těsto bylo ručně dobře zpracovatelné. Zpravidla byl poměr na Pfefferkornově přístroji 0,43.

Tabulka 18- Dávkování surovin pro vytvoření plastické směsi

Surovina	Sypná hmotnost [g/l]	Hmotnostní dávka [%]	Objemová dávka [%]	Množství rozdělovací vody na 1 kg suché směsi [l]
Smrk	177,5	20,0	58	0,37
Buk	281,0	19,0	44	0,37
Rašelina	184,4	20,5	57	0,39
Otruby	445,9	20,0	35	0,65
Antracit	1077,0	65,0	62	0,19
Pap. kal	1124,0	-	-	-
Cenosféry	432,0	35,0	55	0,28

Vzorky z jílu B1 a papírenského kalu musely být vyřazeny, protože i při vysokých dávkách papírenského kalu nedocházelo u vypálených vzorků ke snížení objemové hmotnosti na 1000 kg/m³ (nejnižší dosažená objemová hmotnost byla 1140 kg/m³ při maximální teplotě výpalu 800 °C). Je to zřejmě způsobeno tím, že popel vzniklý po vyhoření papírenského kalu obsahuje velké množství taviva, díky kterému dochází k dřívějšímu slinování vzorku a tedy zvyšování objemové hmotnosti.

Vzorky z jílu B1 a antracitu také překročily objemovou hmotnost 1000 kg/m³, ale vzhledem k tomu, že tento výzkum měl potenciál, tak se v něm pokračovalo i přes nesplnění první podmínky. Tyto vzorky byly vypalovány pouze na jeden režim.

Všechny popisované výsledky jsou z prvního vypalovacího režimu (nárůst teploty 150 °C/hodinu). Výsledky vzorků z druhého vypalovacího režimu jsou prezentovány, pokud se stejné vlastnosti vzorků lehčených stejným lehčivem budou lišit.

4.2.2 Smrštění a objemová hmotnost vzorků

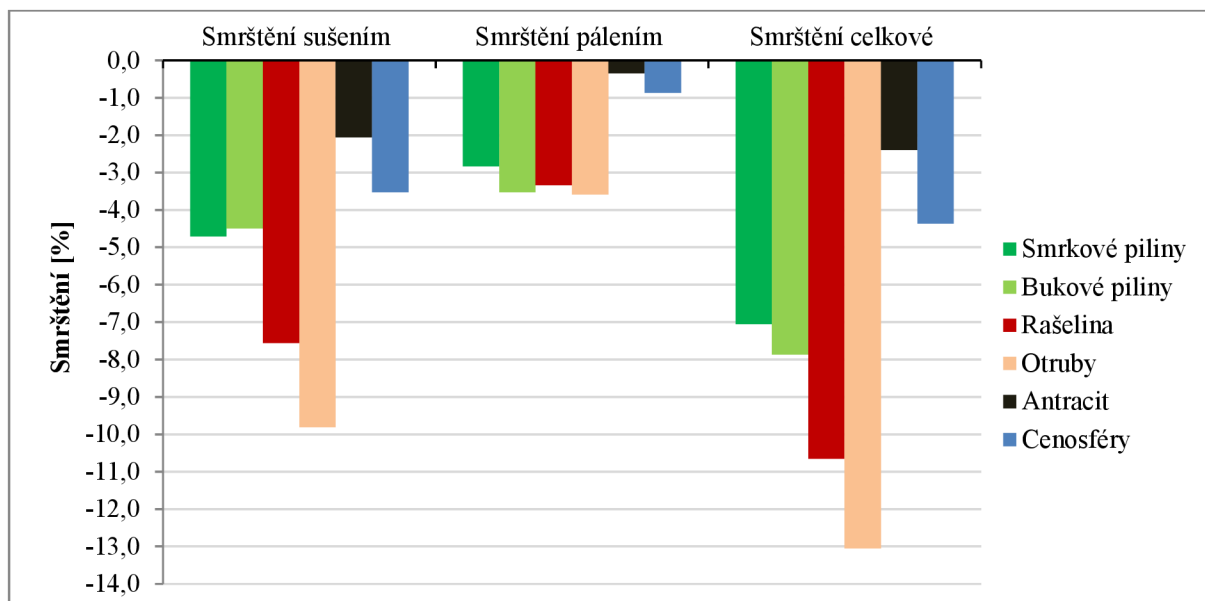
U všech vytvářených vzorků se stanovovalo smrštění sušením, pálením i celkové. Všechny hodnoty jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 19 - Smrštění vzorků

Lehčivo ve vzorku	Smrštění sušením [%]	Smrštění pálením [%]	Smrštění celkové [%]	Smrštění pálením při rychlém výpalu [%]	Smrštění celkové při rychlém výpalu [%]
Smrk	-4,7	-2,8	-7,1	-4,4	-8,8
Buk	-4,5	-3,5	-7,9	-4,5	-8,3
Rašelina	-7,6	-3,3	-10,7	-5,0	-11,9
Otruby	-9,8	-3,6	-13,1	-11,2	-19,6
Antracit	-2,1	-0,4	-2,4	-	-
Cenosféry	-3,5	-0,9	-4,4	-1,7	-5,3

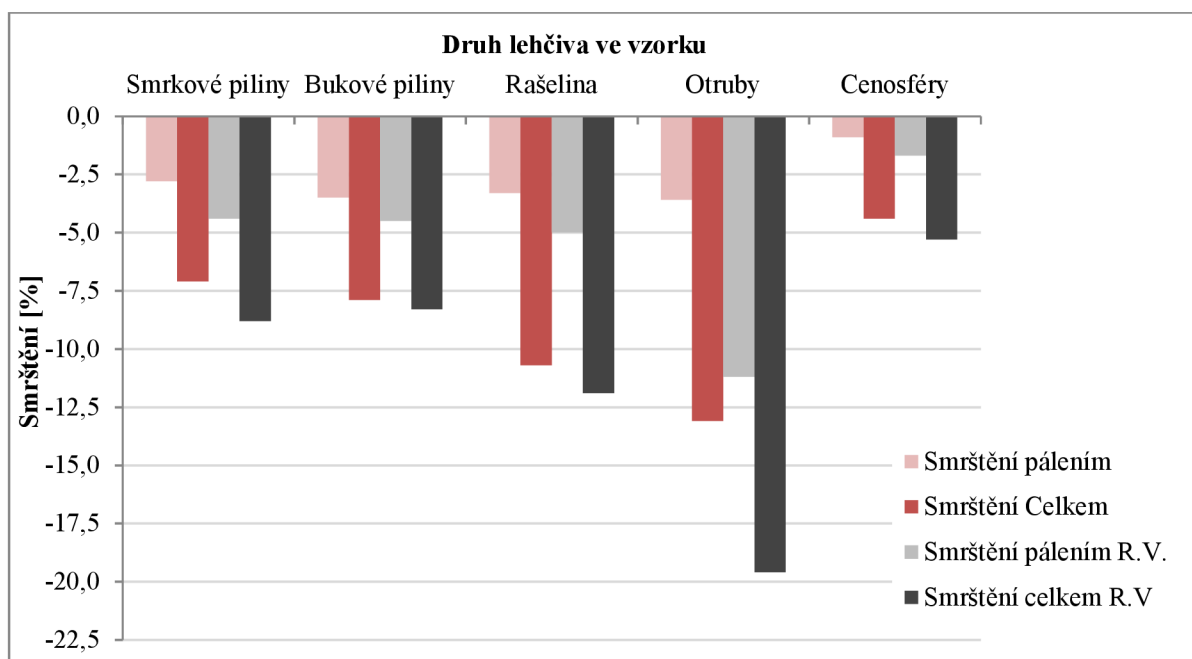
Smrštění sušením je ovlivněno zejména vlhkostí lehčiva a množstvím rozdělovací vody, přidané ke směsi. To je patrné například u otrub, které potřebují pro vytvoření plastického těsta mnohem více vody než u vzorků s jiným druhem lehčiv. Smrštění pálením u vzorků lehčených bukovými pilinami, smrkovými pilinami, rašelinou a otrubami se neliší od sebe navzájem o více než 1 %. U všech těchto vzorků dochází k vytvoření pórové struktury vyhořením lehčiva. Čím rychleji lehčivo vyhoří, tím dříve dojde ke slinování vzorku, tedy ke zmenšování vytvořených pórů a tím je smrštění vyšší. Tím je zároveň vysvětleno, proč je smrštění pálením u vzorku lehčeného antracitem tak malé. Antracit má teplotu vyhořívání velmi vysokou a zřejmě potřebuje i určitou teplotní výdrž a vhodné podmínky, aby došlo k jeho vyhoření.

Smrštění u vzorků lehčeného cenosférami je také velmi malé. Cenoféry jsou lehčivem nepřímým a principem lehčení není jejich vyhoření ze vzorku při výpalu, ale jejich nízká objemová hmotnost. To znamená, že ve vzorku nevznikají při výpalu žádné póry a tedy jíl se slinuje minimálně oproti ostatním vzorkům.



Graf 1 - Smrštění vzorků sušením, pálením i celkové (lehčivo daného vzorku je uvedeno v legendě grafu)

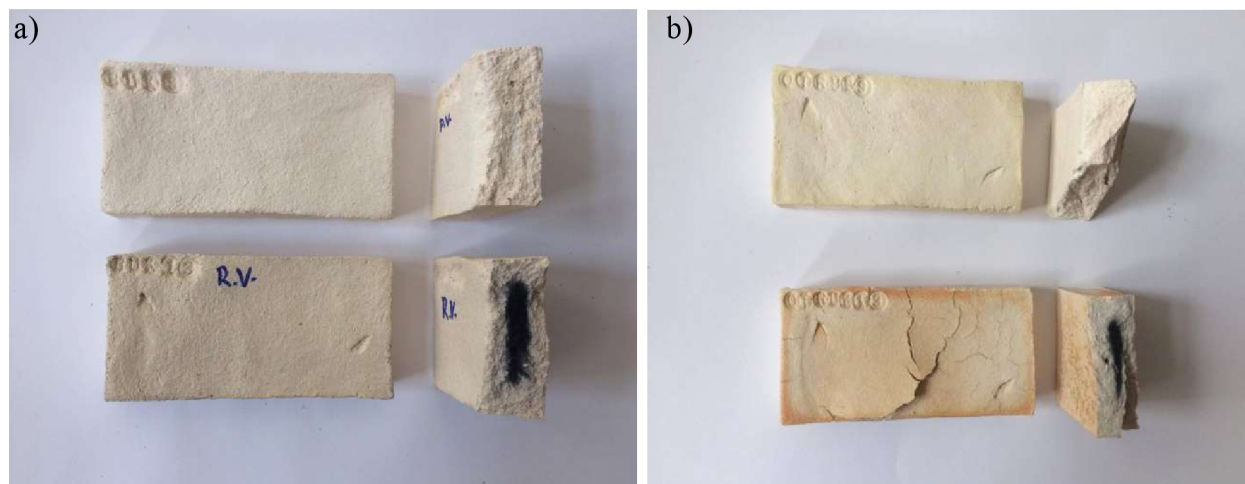
Smrštění se obecně zvyšovalo s rychlostí výpalu. Nelze jednoznačně říct proč je smrštění při výpalu na více teplotních režimů rozdílné. Obecně může jít o druh a množství lehčiva, druh pojiva, chemické složení popela, který vznikne po vyhoření lehčiva, atd.



Graf 2 - Srovnání smrštění při pomalém výpalu (nárůst 150°C/hodinu) a při rychlém výpalu (nárůst 10 °C/minutu)

Z grafu 2 je patrné, že čím je rychlost vypalování vyšší, tím dochází k většímu smrštění vzorku. Zároveň vzorky vykazují mnohem častější výskyt černého jádra. To je zřejmě způsobeno tím, že organické látky ve střepu nevyhoří do počátku dehydroxylace jílových

minerálů a vodní páry odcházející ze vzorku zabrání přístupu vzduchu do keramického střepe, díky čemuž organické látky karbonizují na teplotně odolné formy uhlíku (grafit).



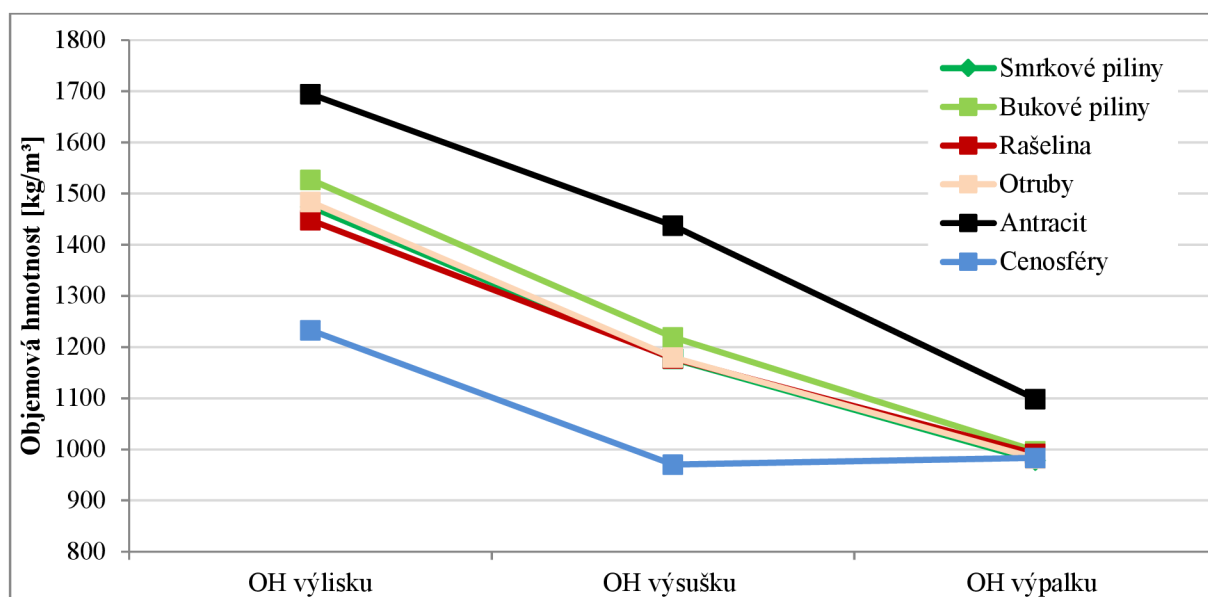
Obrázek 24 - Ukázka vzorků vypálených při pomalém výpalu (vzorky nahoře) a při rychlém výpalu (vzorky dole), přičemž na obrázku a) jde o vzorky lehčené bukovými pilinami b) jde o vzorky lehčené otrubami

Objemová hmotnost je závislá na smršťení. Čím je smršťení vyšší, tím je objemová hmotnost vyšší, což je u tohoto typu výrobků nežádoucí.

Tabulka 20 – Objemová hmotnost vylisků, výsušků a výpalků lehčených vzorků

Lehčivo ve vzorku	OH vylisku [kg/m ³]	OH vysušeného vzorku [kg/m ³]	OH vypáleného vzorku [kg/m ³]	OH vypáleného vzorku při rychlém výpalu [kg/m ³]
Smrkové piliny	1474	1177	978	1070
Bukové piliny	1527	1219	997	913
Rašelina	1448	1178	991	1046
Otruby	1484	1180	982	1044
Antracit	1694	1437	1098	-
Cenosféry	1233	970	983	963

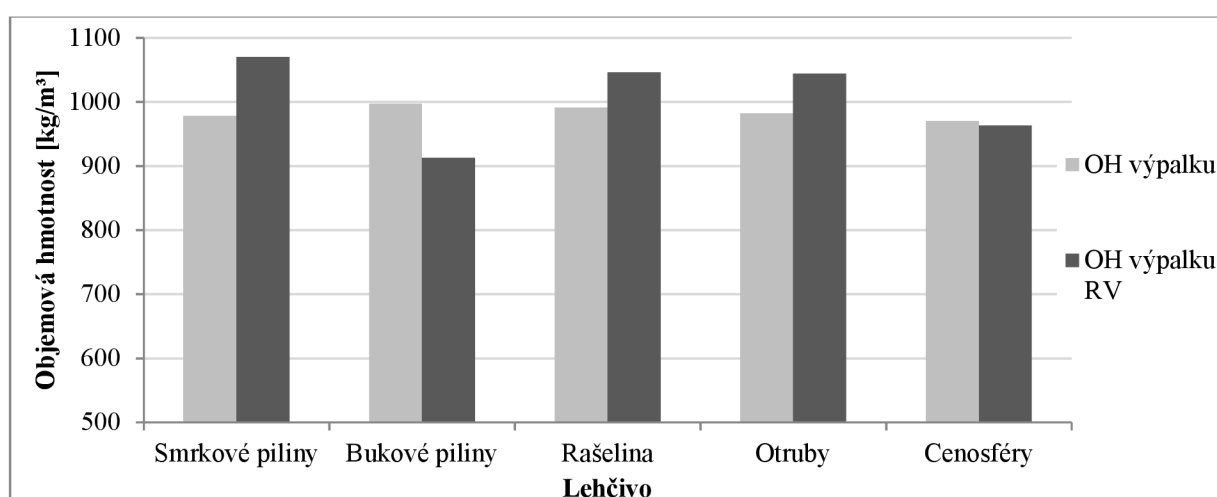
Snahou bylo, aby všechny vzorky měly objemovou hmotnost zhruba 1000 kg/m³. Kromě vzorků lehčených antracitem, bylo této hodnoty dosaženo u všech receptur.



Graf 3- Objemová hmotnost výlisků, výsušků a výpalků lehčených vzorků při pomalém výpalu

Vzorky lehčené smrkovými pilinami, bukovými pilinami, rašelinou a otrubami, mají velmi obdobný průběh objemových hmotností od vytvoření až po vypálení. Vzorky s obsahem antracitu nevykazovaly požadovanou objemovou hmotnost, protože antracit při pomalém výpalu na 1000 °C nebyl schopný vyhořet. Vzorky lehčené cenospférami naopak dosahují požadovaných objemových hmotností již u vysušeného vzorku.

Při rychlém výpalu objemová hmotnost stoupla u vzorků se smrkovými pilinami, rašelinou a otrubami. Může to být ovlivněno tím, že lehčivo vyhoří ve velmi krátkém intervalu a poté dochází k rychlejšímu slinování vzorků.



Graf 4 - Rozdíly objemové hmotnosti mezi vzorky vypálenými na pomalý výpal a na rychlý výpal

U vzorku s bukovými pilinami došlo naopak ke snížení objemové hmotnosti vypálených vzorků. Tento jev se může vysvětlovat delším časem hoření bukových pilin, než ostatních vyhořívajících lehčiv a tedy zkracování možného intervalu slinování jílu. Vzorky lehčené cenosférami nebyly nijak výrazně ovlivněny rychlostí výpalu.

4.2.3 Měření teplot ve vzorku během výpalu a diferenčně termická analýza (DTA)

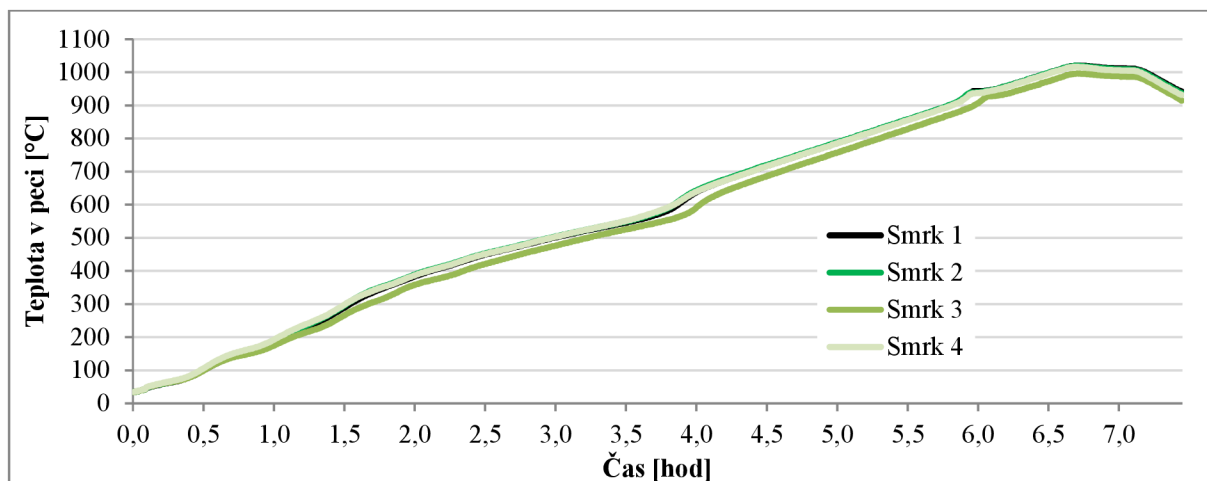
Diferenční termická analýza a měření teplot ve vzorku mělo za cíl definovat vyhořívání, případně jiné chování, jednotlivých druhů lehčiv.

Měření teplot v peci se provádělo pomocí termočlánků, které se zabudovaly do vzorku při vytváření zkušebních vzorků. Při výpalu se termočlánek napojil na přístroj, který zaznamenával vyvíjející se teploty ve vzorku. Ty se následně převedly do počítačového programu. Takto byla změřena teplota ve všech vzorcích a nakonec i ve vzorku vytvořeného pouze z jílu B1. Následně se provedl rozdíl teplot ve vzorku z jílu B1 s lehčivem a samotného jílu B1, což vedlo k vytvoření přibližné DTA křivky lehčiv ve vzorcích.



Obrázek 25 – Měření teplot ve vzorku během výpalu. Obrázek a) Měření teplot ve vzorcích a současně vykreslování křivky v PC programu, obrázek b) Umístění měřícího termočlánku do vzorku

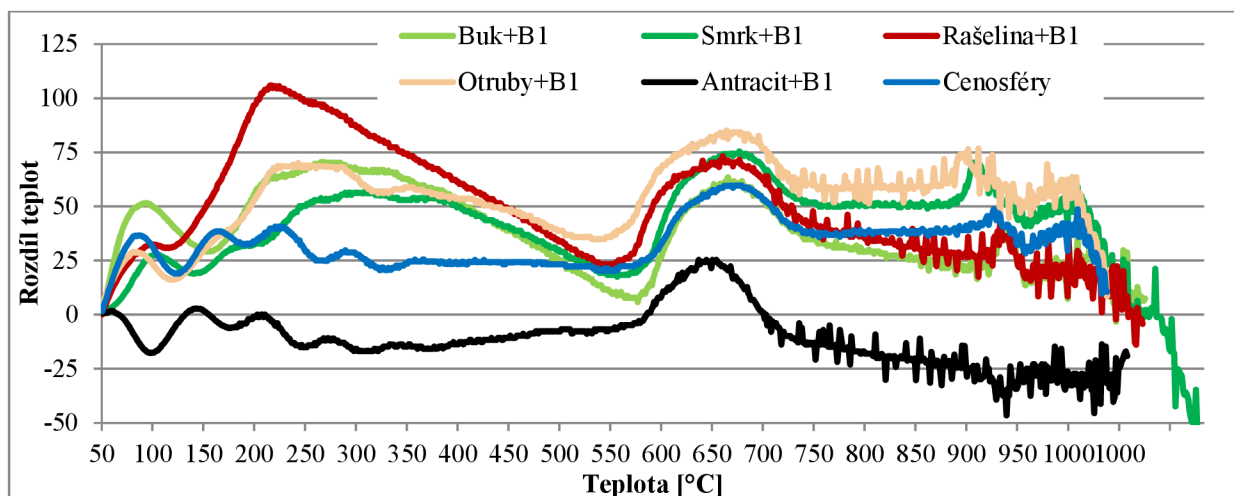
Vzorky lehčené smrkovými pilinami byly vytvářeny jako první. Proto byl na těchto vzorcích proveden test, zda pec peče ve všech místech rovnoměrně. Ukázalo se, že tomu tak není.



Graf 5 - Teploty ve vzorcích se smrkovými pilinami během výpalu na určitých pozicích v peci

Aby byly výsledky měření teplot ve vzorcích co nejméně ovlivněny polohou v peci, byly vzorky s termočlánkem vždy umísťovány na stejnou pozici.

Při měření teplot ve vzorku během výpalu se potvrdilo, že smrkové piliny, bukové piliny, rašelina a otruby se ve vzorku chovají obdobně. Rozdílem je že každé z uvedených lehčiv má jinou výhřevnost a jiné intervaly vyhořívání ze vzorku.



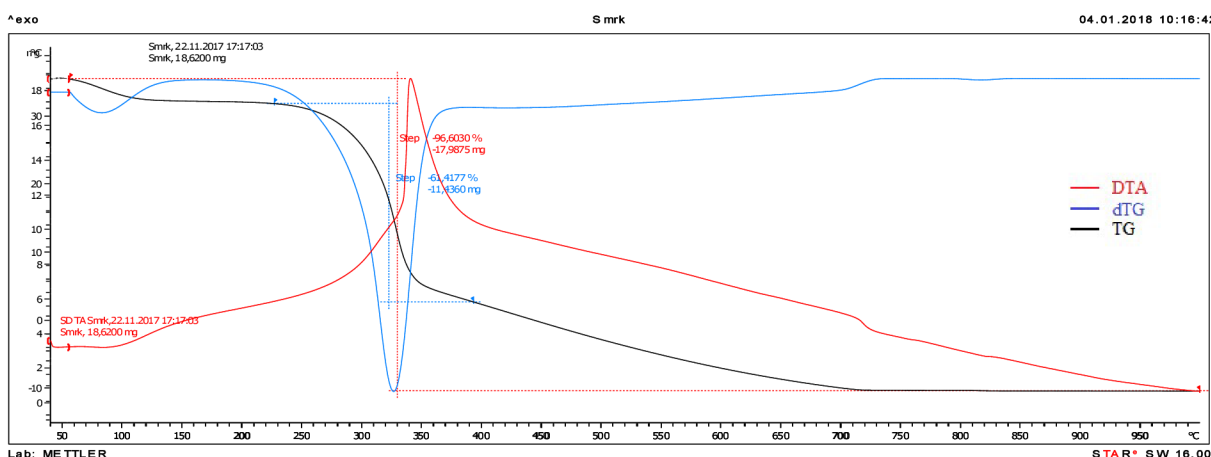
Graf 6 - Měření teplot ve vzorcích s jednotlivými druhy lehčiv

Nejdříve vyhoří lehčivo ze vzorků obsahujících otruby a rašelinu. Je to zhruba v intervalu teplot 175-350 °C. Rašelina má mnohem vyšší výhřevnost, proto i teploty ve vzorcích během vyhořívání lehčiva stouply mnohem výš. Bukové a smrkové piliny mají interval vyhořívání stejný. Je to zhruba od 225 °C do 400 °C. Zvýšení teploty ve vzorcích od 600 °C může být způsobeno například částečným vyhořením černých jader.

U vzorku lehčeného antracitem je viditelný úplně jiný průběh. Lehčivo ze vzorku není schopné vyhořet v celém objemu při daném režimu výpalu. Částečné vyhořívání je zaznamenáno až od teploty 600 °C.

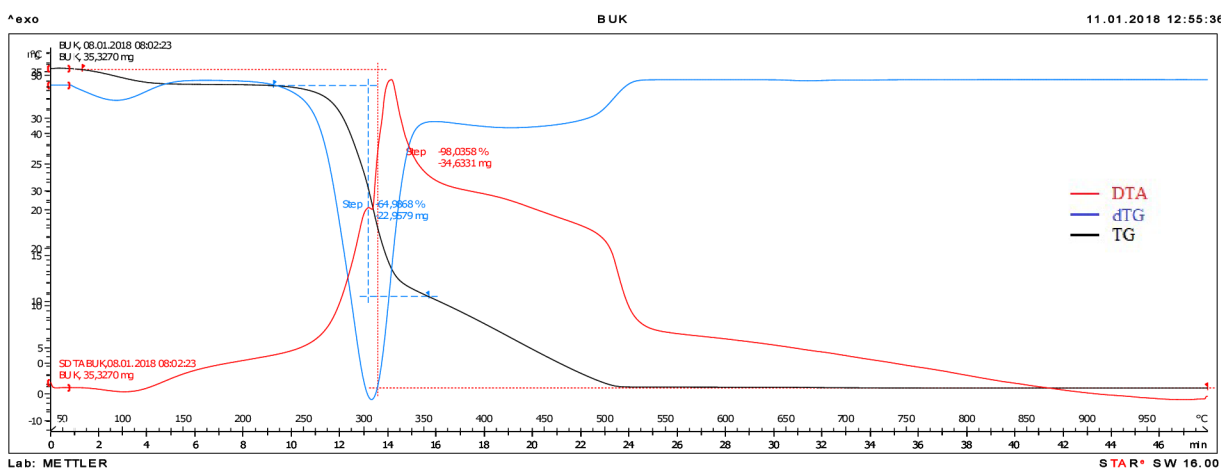
Diferenční termická analýza jednotlivých lehčiv

Aby bylo možné odlišit reakce probíhající v lehčivu a reakce vznikající ve směsi lehčiva a jílu, byla nejprve provedena DTA jednotlivých lehčiv. Červená křivka znázorňuje exotermické a endotermické reakce (DTA), černá křivka vyjadřuje hmotnostní úbytek (TG) a modrá křivka je derivací gravimetrie (dTG).



Obrázek 26 - DTA smrkových pilin

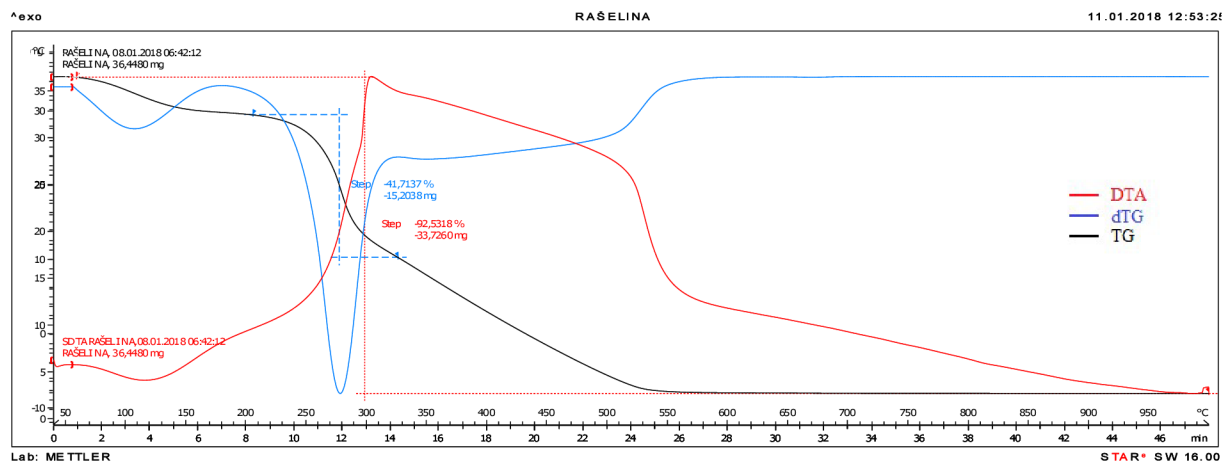
Diferenční termická analýza smrkových pilin odhalila jednu exotermickou reakci. Jde o silnou reakci charakterizující vyhořívání pilin, které je doprovázeno významným hmotnostním úbytkem. Celkový hmotnostní úbytek do teploty 1000 °C je 96,6 %.



Obrázek 27 – DTA bukových pilin

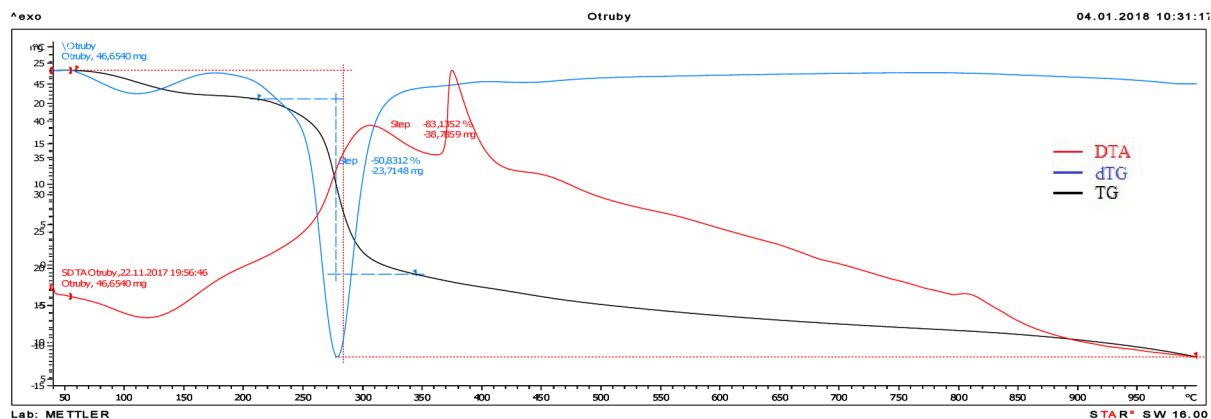
Bukové piliny reagují při zvyšující se teplotě jinak než smrkové piliny. Na rozdíl od nich, bukové piliny vyhořívají ve dvou etapách, což je k vidění v křivce DTA (vykresluje se to jako mírný odskok v hlavním píku). Je to zřejmě postupné vyhořívání spalitelných látek (celulózy,

hemicelulózy, případně ligninu). Zhruba od teploty 350 °C dochází k výraznému klesání DTA křivky u obou druhů pilin. Poté křivka u smrkových pilin klesá mírněji, avšak u bukových pilin je klesání ještě mnohem mírnější a zhruba při 525 °C klesne náhle (do této teploty je také ukončen hmotnostní úbytek). Tento rozdíl mezi jednotlivými druhy pilin se vysvětluje vyšší výhřevností, tedy delším časem hoření, bukových pilin.



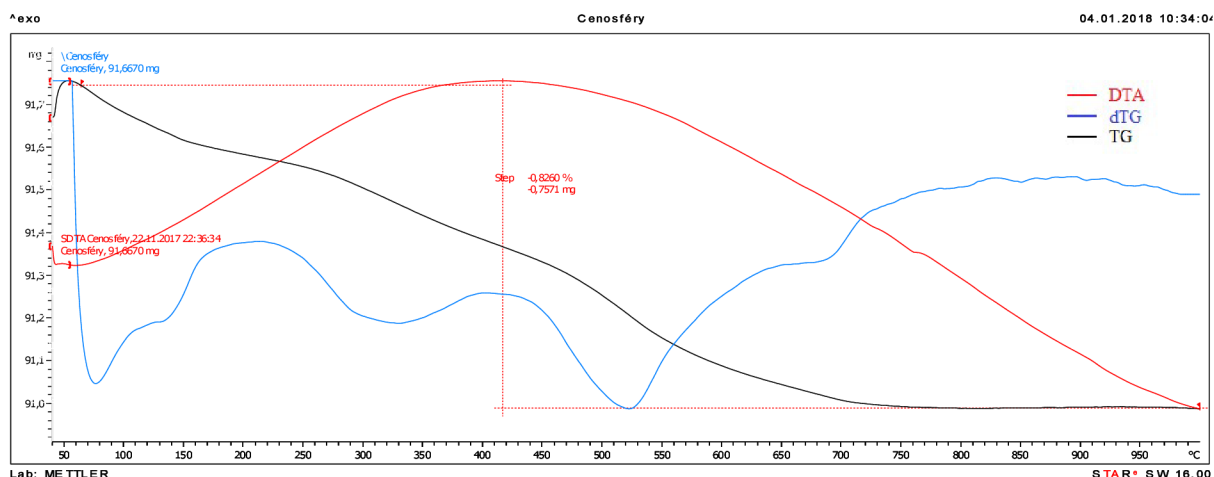
Obrázek 28 – DTA rašeliny

Rašelina se vyznačuje exotermickou i endotermickou reakcí. Středně silná endotermická reakce nastává okolo 100 °C a jde o uvolňování fyzikálně vázané vody. Velmi silná exotermická reakce charakterizuje vyhořívání spalitelných látek z rašeliny, což je provázeno významným hmotnostním úbytkem. Rašelina má vysokou výhřevnost o čemž vypovídá i mírné klesání DTA křivky od dosažení nejvyššího bodu.



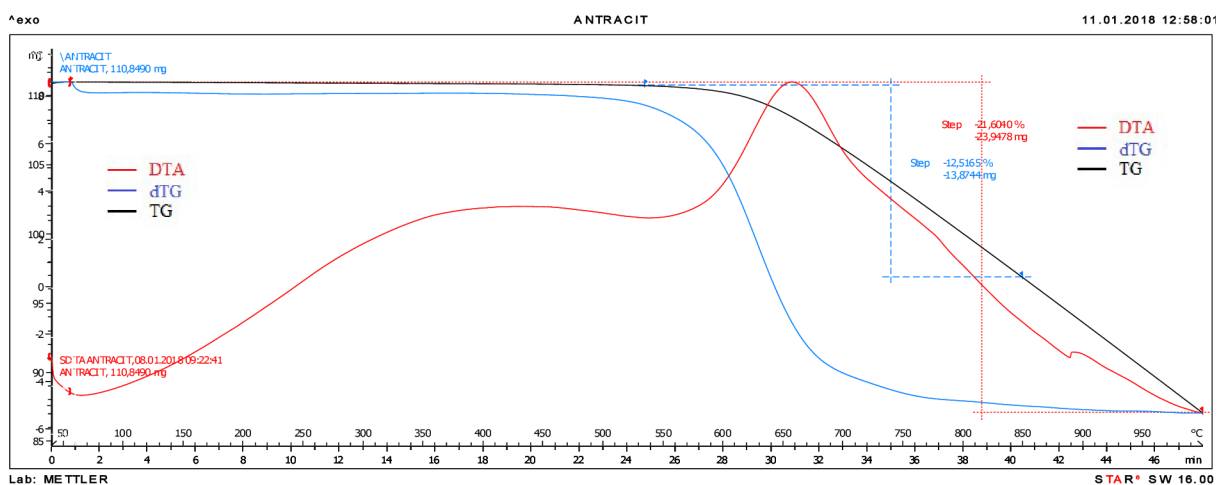
Obrázek 29 - DTA otrub

U otrub probíhá vyhořívání spalitelných látek ve dvou etapách, což ukazuje DTA křivka na obrázku 29. Jde o obdobný případ jako u vyhořívání bukových pilin, kdy je vidět postupné vyhoření spalitelných látek ze vzorku. Do teploty 1000 °C dojde k hmotnostnímu úbytku 83,2 %. To je důkaz, že otruby oproti pilinám obsahují méně spalitelných látek.



Obrázek 30 – DTA cenofér

Cenoféry během celé zkoušené teplotní škály nevykazují žádné endotermické ani exotermické reakce. Hmotnostní úbytek při zatěžovací teplotě 1000 °C není ani 1 %, to znamená, že cenoféry bez problému této teplotě odolávají. Křivky v grafu vypadají výrazně zejména kvůli měřítku na ose y.

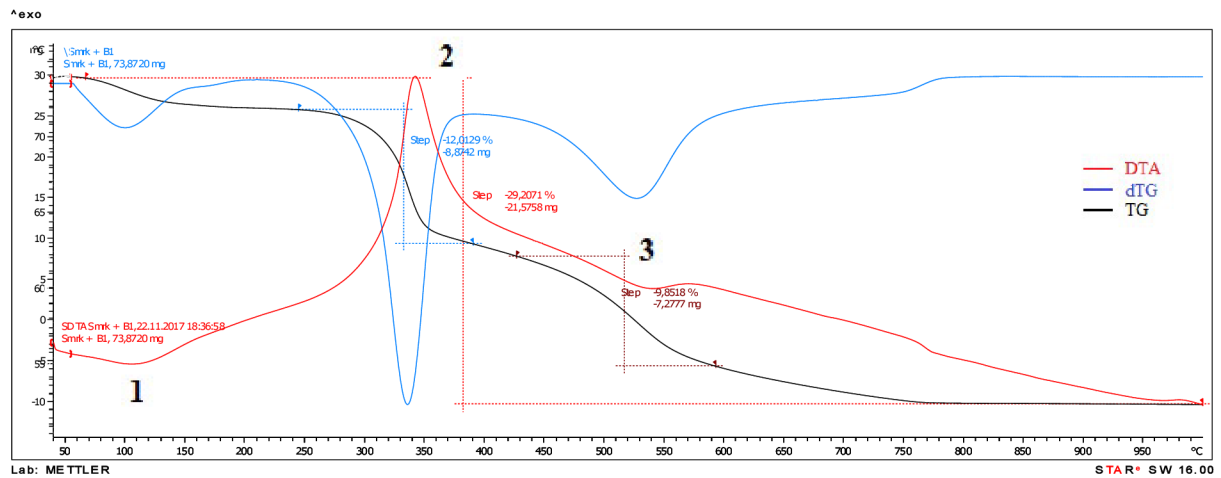


Obrázek 31 - DTA antracitu

Antracit začíná mírně reagovat od 350 °C, kdy je patrný první malý hmotnostní úbytek. Výrazné vyhořívání spalitelných látek z antracitu začíná od 500 °C. Dle TG křivky je patrný stálý hmotnostní úbytek až do 1000 °C. Antracit do této teploty vyhoří pouze z části svého objemu. Aby se docílilo vyhoření všech spalitelných látek ze vzorku, musela by být teplotní výdrž delší (antracit má velmi vysokou výhřevnost, takže dlouho hoří), případně by teploty zatěžování musely být vyšší.

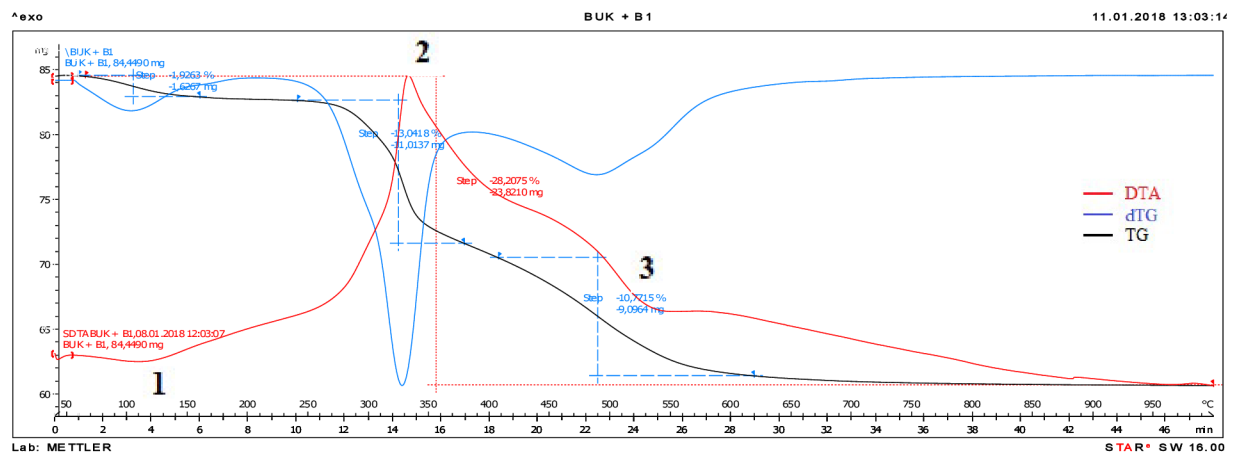
DTA směsí vytvořených z jílů B1 a lehčiv

Suroviny jsou připravené pro tuto analýzu v takovém poměru, v jakém byly připravovány směsi, ze kterých se vytvářely zkušební vzorky s objemovou hmotností 1000 kg/m³.



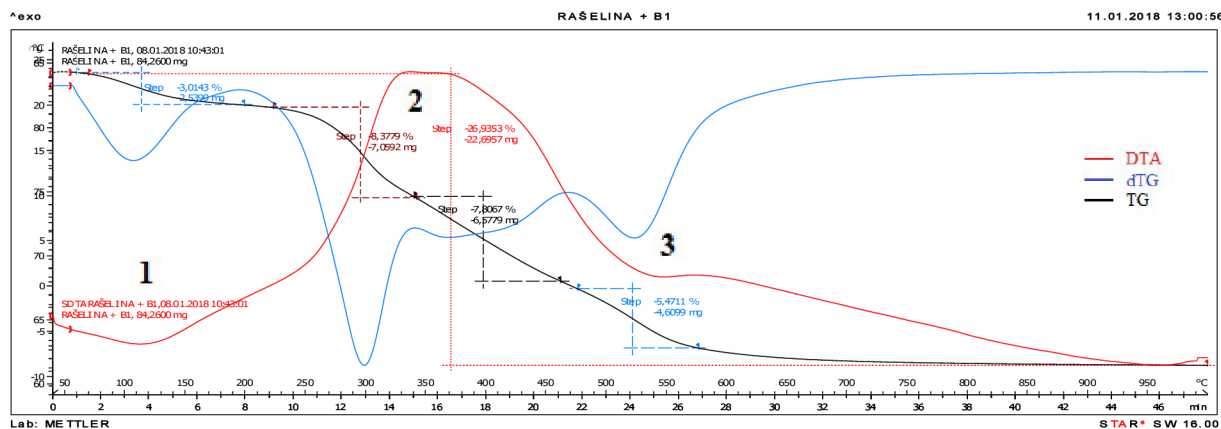
Obrázek 32 - DTA ze směsi smrkových pilin a jílu B1

Smrkové piliny s jílem B1 vykazují tři reakce. První je slabší endotermická reakce (1) a jde o dehydrataci vzorku. Dále nastává velmi silná exotermická reakce (2), která charakterizuje vyhořívání pilin. Poslední významnou reakcí je dehydroxylace jílových minerálů, což je endotermická reakce (3). Hmotnostní úbytek je nejvýznamnější u vyhořívání pilin a dehydroxylace jílových minerálů.



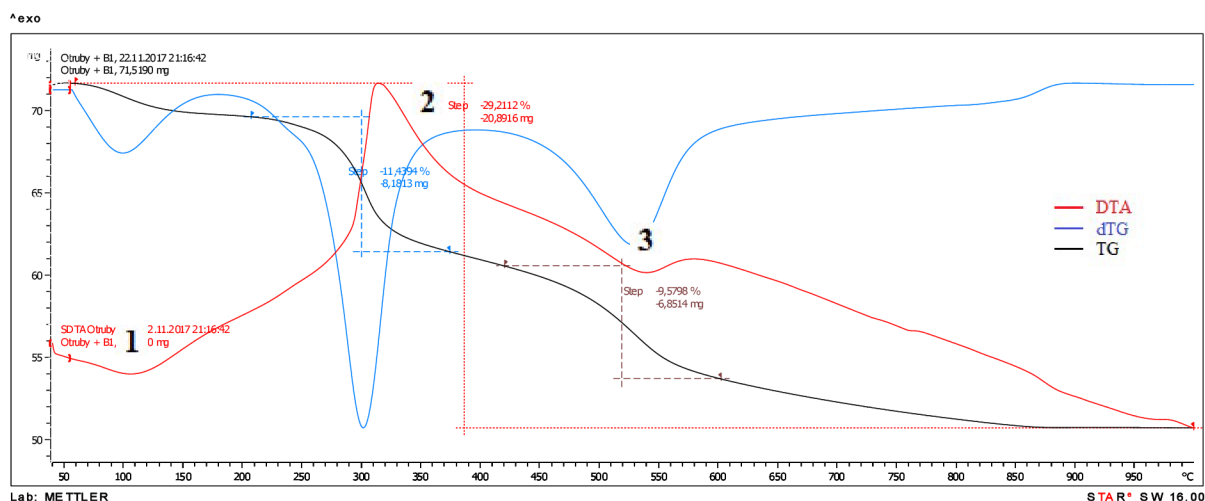
Obrázek 33 - DTA ze směsi bukových pilin a jílu B1

Podle DTA bukových pilin bylo předpokládáno, že lehčivo ze směsi bude také vyhořívát ve dvou etapách, avšak dle DTA směsi bukových pilin s jílem B1 tomu tak není. V první fázi dochází k dehydrataci směsi (1), což je endotermická reakce. Druhá reakce je exotermická a charakterizuje vyhořívání pilin ze směsi (2). Třetí reakce je endotermická a jde o dehydroxylaci jílových minerálů (3).



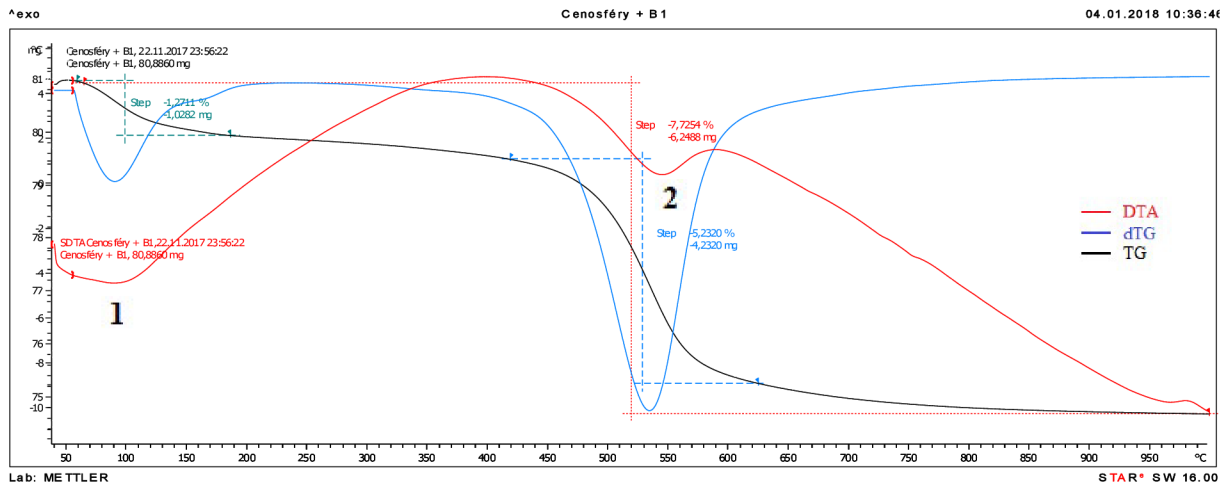
Obrázek 34 - DTA ze směsi rašeliny a jílu B1

Směs rašeliny s jílem B1 se od předchozích směsí liší tím, že má výraznější endotermickou reakci (1) od 100 °C. Je to tím, že rašelina proti ostatním lehčivům obsahuje více fyzikálně vázané vody, která se při této teplotě vypařuje. Dále nastává exotermická reakce, což je vyhořívání spalitelných látek z rašeliny (2). Nakonec je patrná endotermická reakce charakterizující dehydroxylaci jílových minerálů (3).



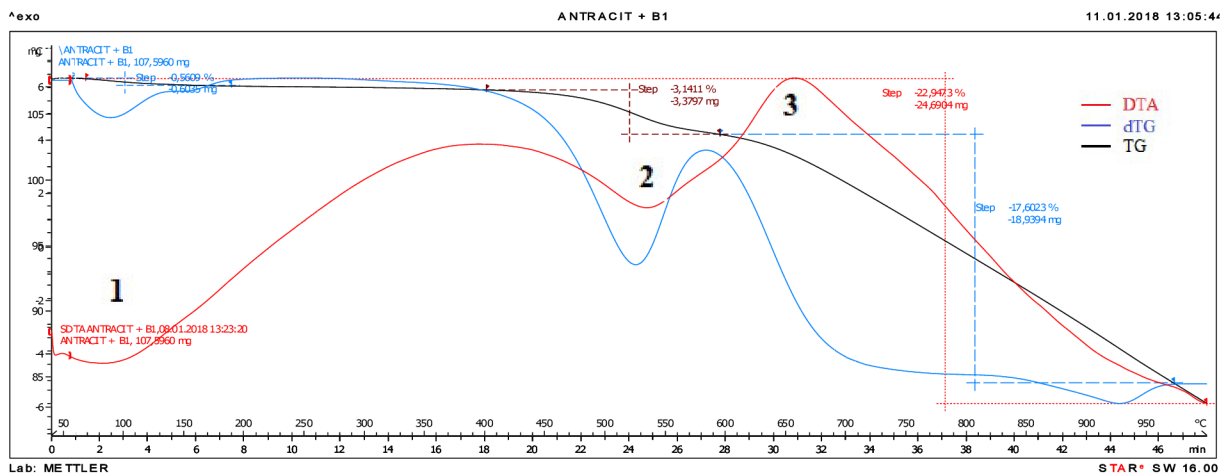
Obrázek 35 – DTA ze směsi otrub a jílu B1

Směs otrub s jílem B1 vykazuje slabší endotermickou reakci (1) okolo 100 °C, kdy dochází k uvolňování fyzikálně vázané vody. Velká exotermická reakce (2) reprezentuje vyhořívání spalitelných látek z lehčiva. Od teploty 500 °C vzniká endotermická reakce (3), kdy dochází k dehydroxylaci jílových minerálů. Reakce 2 a 3 jsou provázeny významným hmotnostním úbytkem.



Obrázek 36 - DTA ze směsi cenofér a jílu B1

Tato křivka téměř kopíruje křivku DTA jílu B1. Je to z toho důvodu, že cenoféry se alespoň do teploty 1000 °C chovají inertně. To znamená, nijak nereagují na zvyšující se teplotu. První endotermická reakce okolo 100 °C je dehydratace směsi (1). Druhou významnou endotermickou reakcí je dehydroxylace jílových minerálů (2). Tyto reakce provází jediné hmotnostní úbytky během celé analýzy.

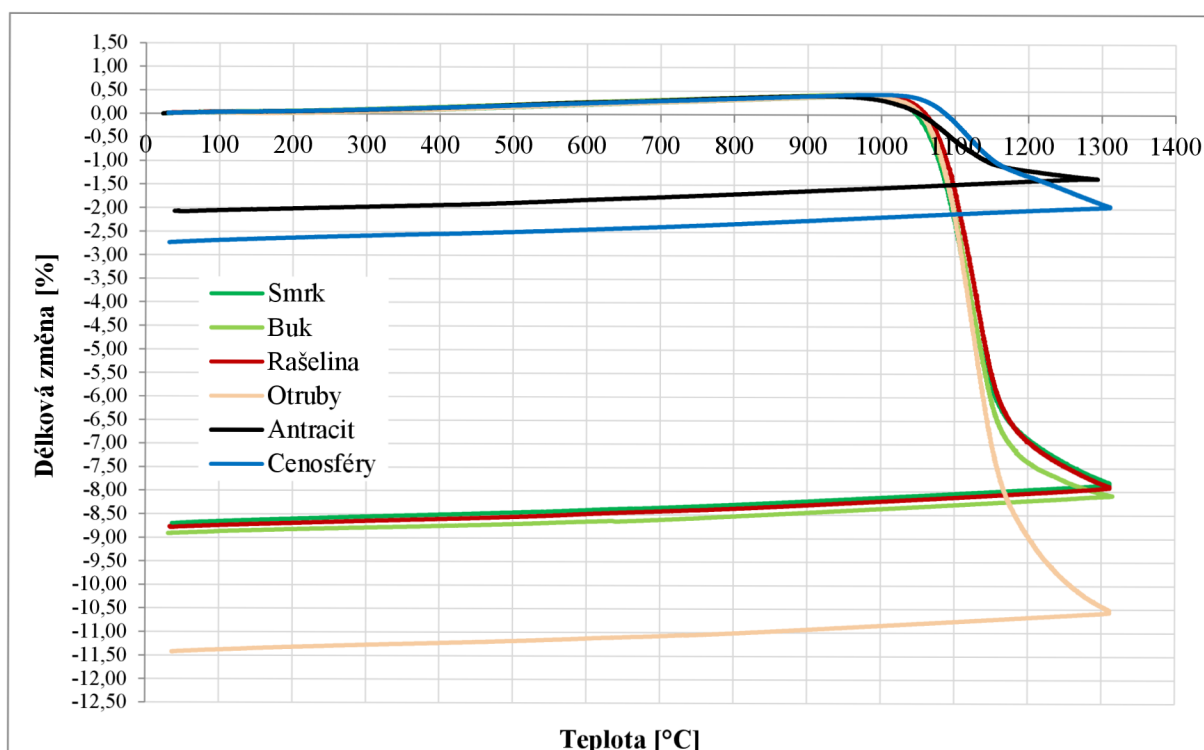


Obrázek 37 - DTA ze směsi antracitu a jílu B1

Antracit je speciálním případem vyhořívajícího lehčiva ze směsi. První reakcí je odchod fyzikálně vázané vody ze směsi (1). Okolo 500 °C dochází k počátku dehydroxylace jílových minerálů, což je endotermická reakce (2) provázena hmotnostním úbytkem. Antracit z této směsi začíná vyhořívát až při teplotách od 600 °C (3). Že antracit ve směsi nevyhoří v celém objemu do teploty 1000 °C, dokazuje i hmotnostní úbytek, který se do této teploty nezastaví.

4.2.4 Kontrakčně dilatační termická analýza (DKTA)

DKTA se provádí na již vypálených vzorcích. Zkušební vzorek se musí oříznout tak, aby se mohla umístit do dilatometru přístroje. Speciální přístroj zaznamenává délkové změny v závislosti na zvyšující se teplotě. Výsledkem je křivka, která vykresluje délkové změny s měnící se teplotou v čase. Touto křivkou se dá orientačně odhadnout klasifikační teplota. Pro použití výrobků v praxi je to taková teplota, při níž nejsou délkové změny větší než 2 %.



Graf 7- DKTA křivky vzorků s jednotlivými druhy lehčiv

Tabulka 21 - Orientační klasifikační teplota vzorků

Lehčivo ve vzorku	Smrkové piliny	Bukové piliny	Rašelina	Otruby	Cenoféry	Antracit
Klasifikační teplota [°C]	1090	1150	1105	1090	1300	>1300

Klasifikační teplota u všech těchto typů izolačních výrobků je relativně vysoká. Zkušební vzorky se smrkovými pilinami, bukovými pilinami, rašelinou a otrubami mají teplotu použitelnosti zhruba 1100 °C. Je však nepřijatelné tuto teplotu překročit, protože křivky klesají velmi strmě. Například pokud by teplota použitelnosti byla překročena o 50 °C, tak délkové změny u vzorků lehčených bukem by byly 3,75 %, avšak všechny ostatní vzorky

(lehčené smrkovými pilinami, rašelinou a otrubami) by vykazovaly délkové změny větší než 5,5 %.

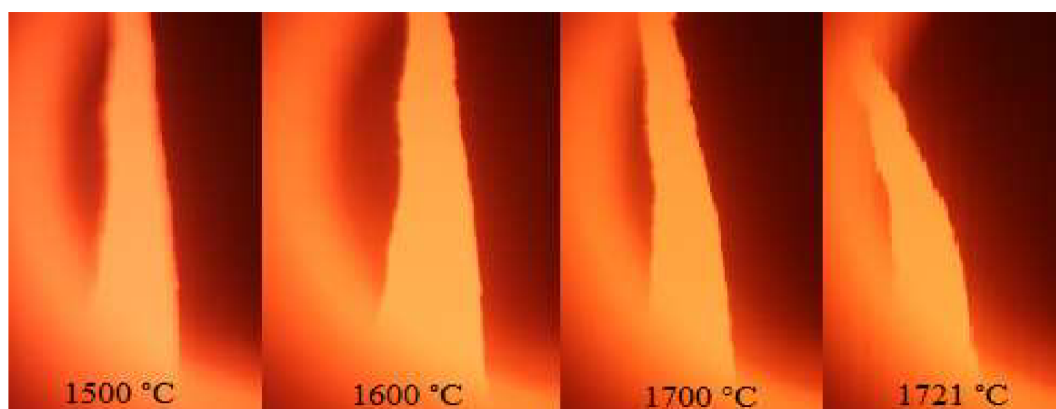
Výborné výsledky vykazují vzorky s antracitem a cenosférami. U vzorků lehčených cenosférami by mohla být teplota použitelnosti až 1300 °C.

U vzorků lehčených antracitem při teplotě 1300 °C nedošlo k délkovým změnám větší než 2 %. Naopak podle dalších prováděných zkoušek došlo ke snížení objemové hmotnosti k požadované hranici 1000 kg/m³. To dokazuje, že antracit, který nevyhořel při výpalu, vyhořival dál při další zvyšující se teplotě.

4.2.5 Žárovzdornost

Je to schopnost odolávat vysokým teplotám a stanovuje se pomocí žároměrek. Hodnota žárovzdornosti je základním popisem žárovzdorného výrobku. V praxi je tato hodnota méně podstatná, protože u lehčených šamotových výrobků je teplota žárovzdornosti velmi vzdálená klasifikační teplotě.

Žároměrky byly vytvořeny při vytváření vzorků z jednotlivých směsí. Zkouška byla provedena ve výzkumném centru AdMas, kde se nachází pec vybavena kukátkem pro pozorování, případně focení vzorků.



Obrázek 38 - Žároměrka vytvořená z jílu B1 a smrkových pilin a její deformace v peci při zvyšující se teplotě

Žárovzdornost výrobků se obecně pohybovala velmi vysoko. Ve většině případů se pohybovala mírně pod hranicí žárovzdornosti samotného jílu B1 (1730 °C).

Tabulka 22 - Žárovzdornost vzorků

Lehčivo ve vzorku	Smrkové piliny	Bukové piliny	Rašelina	Otruby	Cenosféry	Antracit
Žárovzdornost [°C]	1700	1725	1650	1650	1725	1665

Žároměrky, které byly vytvořeny z organických lehčiv a jílu B1 byly oproti žároměrkám lehčených cenosférami velmi slinuté. Cenoféry zabraňovaly tomuto enormnímu slinování i při velmi vysokých teplotách.



Obrázek 39 - Žároměrky při teplotě 1680 °C (pod každou žároměrkou je uvedeno jaké lehčivo vzorek obsahuje)

Žároměrky ovlivňuje nejen lehčivo samotné, ale i jeho množství ve výrobkách. Avšak v těchto konkrétních případech je patrné, že chemické složení popela, který ve vzorku vznikne po vyhoření lehčiv, ovlivňuje výslednou žárovzdornost minimálně.

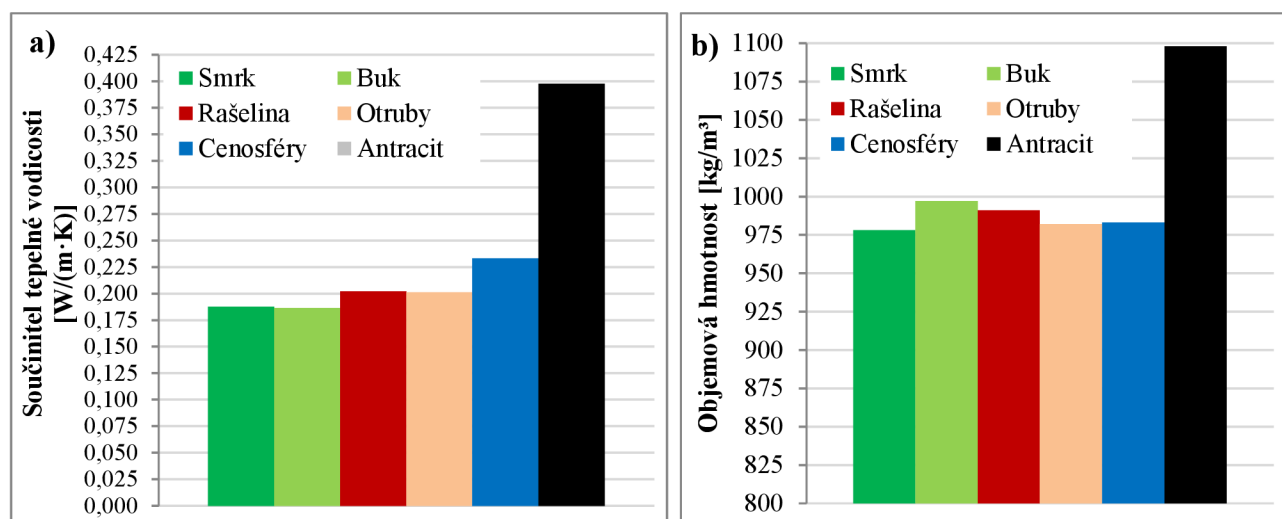
4.2.6 Součinitel tepelné vodivosti

Tato vlastnost je u lehčených šamotových prvků bedlivě sledována a to z toho důvodu, že se tento typ výrobků využívá zejména jako izolant. Vzorky se před samotným zkoušením musely obrousit, aby sonda celou plochou spočívala na vzorku. I tak mohou být výsledky lehce zkresleny, protože v některých případech byly vzorky více slinuté a tím se zmenšila možná plocha pro měření λ .

Součinitel tepelné vodivosti λ je závislý na pórovitosti systému. Obecně platí, že čím je struktura materiálu více pórovitá, tím je nižší objemová hmotnost i součinitel tepelné vodivosti.

Tabulka 23- Součinitel tepelné vodivosti u jednotlivých vzorků

Lehčivo ve vzorku	Výpal	Smrk. piliny	Buk. piliny	Rašelina	Otruby	Cenosféry	Antracit
Souč. tepelné vodivosti [W/(m·K)]	Pomalý	0,1874	0,1862	0,2019	0,2010	0,2329	0,3976
	Rychlý	0,1943	0,1634	0,1965	-	-	-



Graf 8 – Zhodnocení závislosti součinitele tepelné vodivosti (graf a) na objemové hmotnosti při pomalém výpalu (graf b)

Částečné zkreslení může být mezi vzorky, které jsou lehčeny bukovými pilinami, smrkovými pilinami, rašelinou a otrubami. Tyto výrobky vykazovaly relativně velké celkové smrštění a tedy i plocha pro sondu, která měří součinitel tepelné vodivosti, byla malá. Další zvláštní hodnotou je nižší λ u vzorků lehčených rašelinou při rychlém výpalu, přičemž objemová hmotnost těchto vzorků je vyšší.

4.2.7 Další vlastnosti výrobků

Vzorky byly podrobeny dalšímu zkoušení, aby bylo možné stanovit vlastnosti jako nasákavost, zdánlivá pórovitost, zdánlivá hustota, stanovení objemové hmotnosti pomocí hydrostatického vážení nebo pevnosti v tahu za ohybu. Zaznamenané hodnoty jsou shrnuty v následující tabulce.

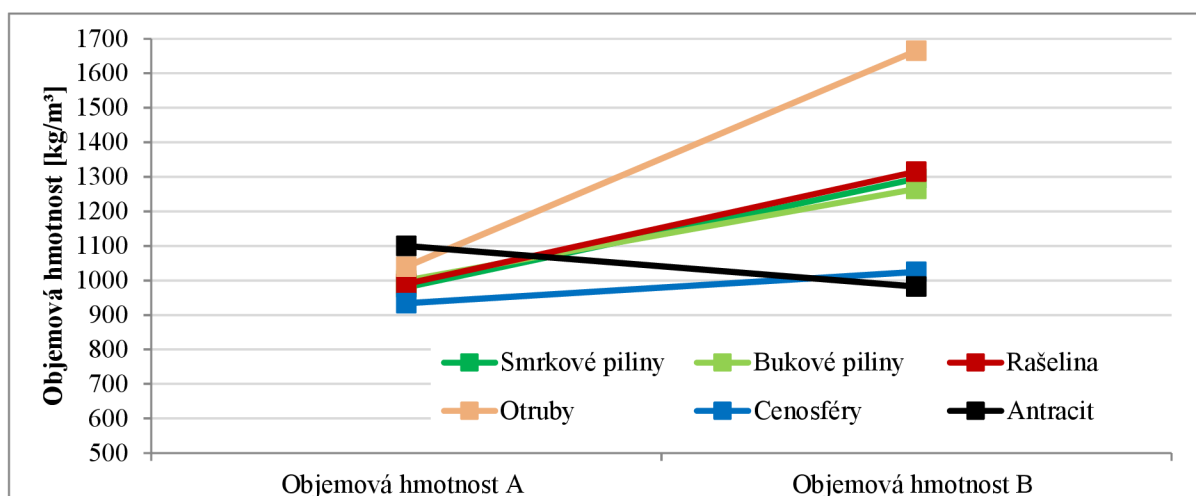
Tabulka 24 - Vlastnosti vypáleného keramického střepu

Vzorek		Objemová hmotnost [kg/m ³]	Nasákavost [%]	Objemová hmotnost hydrostaticky [kg/m ³]	Zdánlivá pórovitost [%]	Zdánlivá hustota [kg/m ³]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
Smrkové piliny	A	977	58,5	1012	59,2	2479	5,5
	B	1295	33,1	1332	44,1	2384	-
	C	1070	51,2	1098	56,3	2511	-
Bukové piliny	A	990	59,4	1029	61,1	2647	4,4
	B	1267	32,9	1347	44,3	2421	-
	C	913	59,3	1019	60,4	2571	-
Rašelina	A	996	58,9	1029	60,7	2617	5,1
	B	1312	34,5	1349	46,5	2519	-
	C	1046	50,9	1073	54,6	2367	-
Otruby	A	1047	51,7	1103	57,0	2568	7,2
	B	1663	20,4	1617	33,0	2414	-
	C	1044	46,8	1095	51,3	2250	-
Cenosféry	A	934	43,8	922	40,4	1546	9,1
	B	1025	27,7	1000	27,6	1381	-
	C	963	36,5	978	35,7	1521	-
Antracit	A	1172	37,3	1154	43,1	2026	2,0
	B	982	51,9	1002	52,0	2088	-

Pozn: Vzorek A vyjadřuje vlastnosti keramického střepu po výpalu, vzorek B vyjadřuje vlastnosti keramického střepu po výpalu a po DKTA analýze, kdy byl zatížen teplotou 1300 °C, vzorek C vyjadřuje vlastnosti keramického střepu po rychlém výpalu

Objemová hmotnost skoro všech vzorků se po DKTA při maximální teplotě 1300 °C zvýšila. Je to zapříčiněno slinováním jílu. Jediná výjimka je u vzorku, který je lehčen antracitem, kde se objemová hmotnost naopak snížila. Tento jev je vysvětlován tím, že při výpalu na 1000 °C antracit nevyhořel ze vzorku v celém objemu, ale pouze část. Při zvyšující se teplotě v peci došlo k vyhoření další části lehčiva.

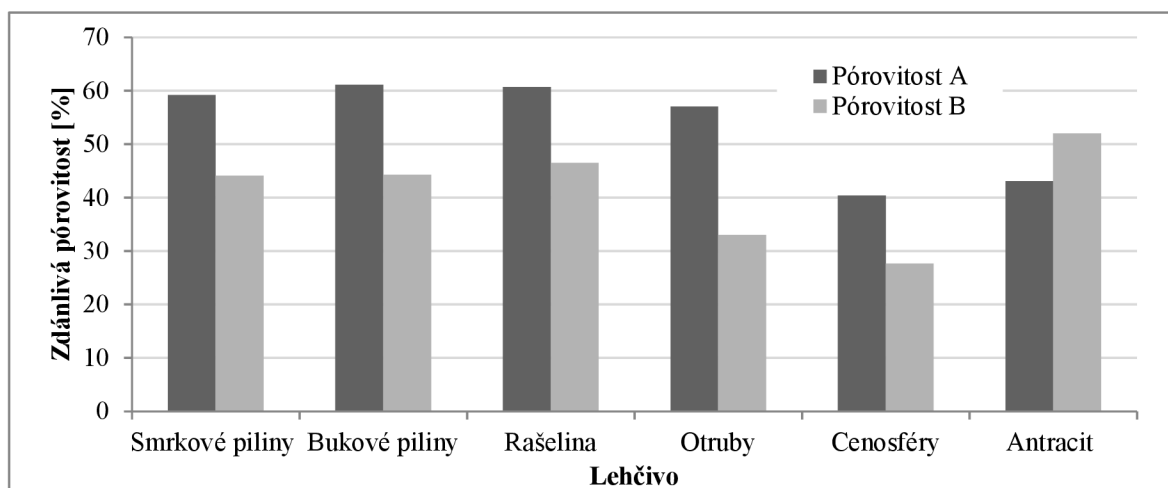
Pouze malé zvýšení objemové hmotnosti po DKTA je zaznamenáno u vzorků lehčených cenosférami.



Graf 9 - Objemová hmotnost vzorků po pomalém výpalu na 1000 °C (vzorky A) a objemová hmotnost po DKTA při maximální teplotě 1300 °C (vzorky B)

Nasákavost klesá se stoupající vypalovací teplotou u všech vzorků, kromě vzorku lehčeného antracitem. Opět je to ovlivněno tím, že antracit vyhořívá při vysokých teplotách, při kterém vzniká pórovitý systém snižující objemovou hmotnost a zvyšující nasákavost a pórovitost. Vzorky lehčené cenoférami mají významně nižší nasákavosti jak u vzorků vypálených na teplotu 1000 °C, tak u vzorků vypálených na teplotu 1300 °C.

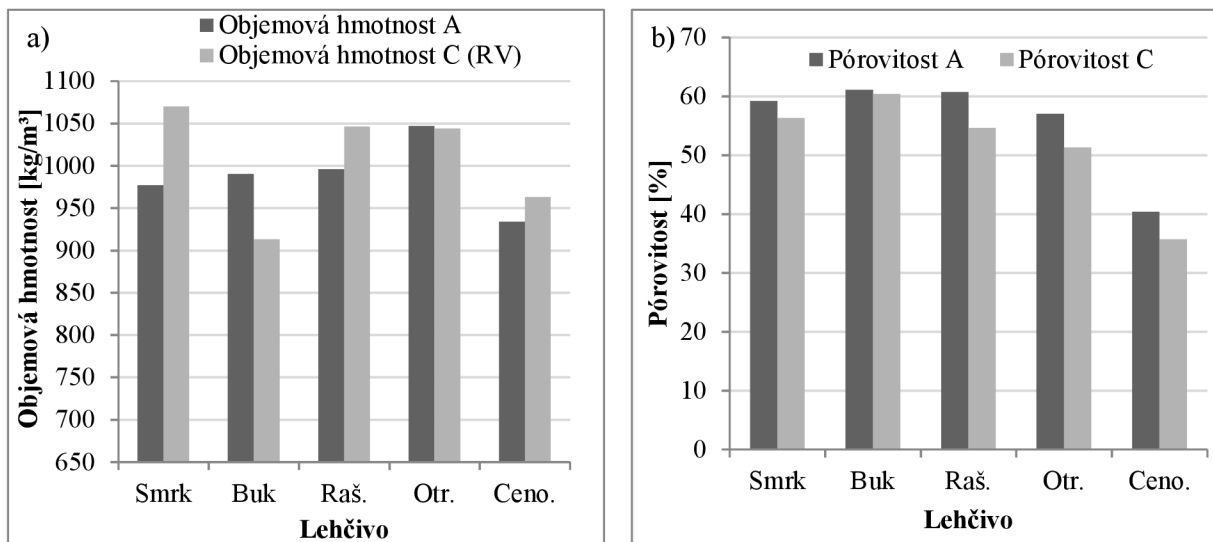
Zdánlivá pórovitost významně ovlivňuje objemovou hmotnost. Čím více je systém pórovitý, tím menší je objemová hmotnost.



Graf 10 - Pórovitost systému vzorků vypálených na teplotu 1000 °C (pórovitost A) a vzorky vypálené na 1300°C (pórovitost B)

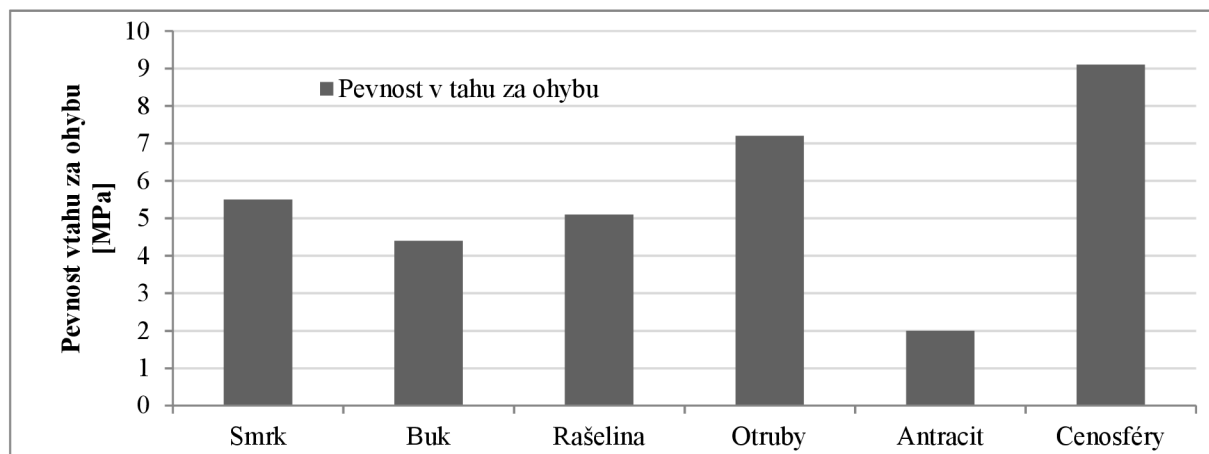
Vzorky lehčené antracitem mají oproti ostatním vzorkům vyšší pórovitost při vyšší teplotě výpalu, což bylo vytušeno již z předchozího zkoušení.

Nasákavost a zdánlivá pórovitost vzorků C (vzorky vypálené při rychlém režimu výpalu) se od vzorků A lehce liší. Je zde patrná závislost objemové hmotnosti na pórovitosti a nasákavosti. Čím mají vzorky vyšší OH, tím je jejich pórovitost a nasákavost nižší.



Graf 11 - Srovnání objemové hmotnosti (obrázek a) s pórovitostí vzorků (obrázek b) vypálených na dva režimy výpalu (označení RV v legendě značí rychlý výpal)

Pevnost v tahu za ohybu byla pro tento typ výrobků vyhovující.



Graf 12 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků A

Nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu disponují vzorky lehčené cenosférami. Je to ovlivněno vlastnostmi slinutého jílu a nepřímého lehčiva. Dále pevnost závisí na množství pórů, které vzorek obsahuje. Čím je pórovitost vyšší, tím nižší jsou pevnosti. Jediný vzorek, u kterého neplatí toto tvrzení, je vzorek lehčený antracitem. Zde jsou pevnosti tak nízké zejména kvůli nevyhoření lehčiva ze vzorku.

4.2.8 Diskuze výsledků k etapě 1

Byly vytvářeny vzorky z jílu B1 a lehčiv. Směsi byly připraveny tak, aby objemová hmotnost vypálených vzorků byla zhruba 1000 kg/m^3 . Vzorky připravené z papírenského kalu a jílu B1 i po několika vyzkoušených variantách nevykazovaly požadované vlastnosti a proto tyto vzorky nebyly dále zařazeny do výzkumu. Vzorky lehčené antracitem sice také požadované hodnoty neměly, ale jejich vlastnosti byly oproti všem ostatním přímým lehčivům úplně jiné a proto byly ve výzkumu ponechány. Vzorky byly vypáleny ve dvou pálících režimech. Šlo o pomalý výpal, kdy nárůst teploty byl $150 \text{ }^\circ\text{C/hod.}$ a rychlý výpal, kdy nárůst teploty byl $10 \text{ }^\circ\text{C/min.}$

Při výpalu byla sledována teplota vyvíjející se ve vzorcích. Na základě těchto údajů a DTA křivek byly definovány intervaly vyhoření jednotlivých lehčiv ze vzorků. Nejdříve vyhoří ze vzorku otruby (interval vyhoření $175\text{-}350 \text{ }^\circ\text{C}$) a hmotnostní úbytek do $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ činí $83,1 \%$. Je předpokladem, že popel vzniklý po vyhoření otrub obsahuje taviva, protože vzorky vykazovaly největší celkové smrštění ($13,1 \%$). Vzorky lehčené rašelinou vyhořívají v podobném intervalu teplot jako otruby. Hmotnostní úbytek do $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ je $92,5 \%$. Protože rašelina vykazovala velké celkové smrštění ($10,7 \%$), je předpokladem, že popel vzniklý po vyhoření lehčiva také obsahuje taviva. Vzorky vytvořené z jílu B1 a smrkových nebo bukových pilin vykazovaly obdobné celkové smrštění a to $7\text{-}8 \%$, přičemž interval vyhořívání pilin je od $225 \text{ }^\circ\text{C}$ do $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Hmotnostní úbytek pilin do $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ je větší než $96,5 \%$. Vzorky lehčené antracitem začínají vyhořívat až zhruba při $600 \text{ }^\circ\text{C}$ a do teploty $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ zdaleka nevyhoří všechno lehčivo. Celkové smrštění takového vzorku je velmi malé ($2,4 \%$). Dá se tedy říct, že můžeme nalézt určité propojení mezi slinutím vzorku a intervalem vyhoření lehčiva případně hmotnostní ztrátou lehčiva.

Interval vyhoření lehčiva ze vzorku ovlivňuje i objemovou hmotnost. Čím dříve lehčivo vyhoří, tím víc se vzorek může slinovat, což zapříčiní vyšší smrštění a vyšší objemové hmotnosti. Avšak pokud lehčivo ze vzorku nevyhoří, nejsou vytvořeny póry a objemová hmotnost také stoupá (např. vzorky lehčené antracitem). Dále objemovou hmotnost ovlivňuje dávka lehčiva. Nejnížší objemovou hmotnost při nejnižší dávce lehčiva vykazovaly vzorky lehčené bukovými pilinami. Při dávce 19% pilin došlo k vytvoření vzorků o objemové hmotnosti 997 kg/m^3 . Většina vzorků vypálených rychlým výpalem vykazovaly mnohem vyšší slinutí než vzorky vypálené při pomalém výpalu. Pouze vzorky lehčené bukovými pilinami naopak vykazovaly snížení objemové hmotnosti a to na 913 kg/m^3 . Zřejmě to

ovlivňuje interval vyhoření lehčiva, výhřevnost lehčiva a dále rychlost slinování jílu, která se liší v závislosti na rychlosti výpalu.

Při kontrakčně dilatační termické analýze, která se prováděla do teploty 1300 °C, bylo zjištěno, že spalitelné látky z antracitu dále vyhořívají a objemová hmotnost vzorku klesne až na požadovanou hodnotu 1000 kg/m³. Vzhledem k tomu, že pórovitost systému je vyšší, předpokládá se, že i součinitel tepelné vodivosti by byl příznivější. Navíc smrštění při 1300°C bylo menší než 2 %, což napovídá, že klasifikační teplota toho výrobku by byla vyšší než 1300 °C. Vzorky lehčené cenosférami také vykazovaly na izolační výrobek velmi příznivý výsledek. Orientační klasifikační teplota byla stanovena až na 1300 °C. Všechny ostatní vzorky měly délkové změny menší než 2 % zhruba do teploty 1100 °C.

Žárovzdornost všech vzorků se blížila k žárovzdornosti jílu B1 (1730 °C). Tím je dokázáno, že popel vzniklý vyhořením jednotlivých lehčiv ovlivňuje žárovzdornost jen v malé míře.

Součinitel tepelné vodivosti je ovlivněn pórovitým systémem vzorků, míře vyhoření lehčiva, míře smrštění vzorku a objemové hmotnosti. Proto nejnižší součinitel tepelné vodivosti byl stanoven u vzorků lehčených smrkovými či bukovými pilinami. Velmi dobré výsledky byly naměřeny u vzorků lehčených cenosférami. Zde je to ovlivněno vlastnostmi cenosfér. Nejméně příznivé tepelně izolační vlastnosti vykazovaly vzorky lehčené antracitem, což je ovlivněno zejména mírou vyhoření lehčiva.

Pevnost těchto typů vzorků je na tepelně izolační výrobek relativně vysoká. Nejvyšší hodnoty vykazovaly vzorky lehčené cenosférami (9,1 MPa), což je značně ovlivněno vlastnostmi nepřímého lehčiva. Vysoké pevnosti vykazovaly i vzorky lehčené otrubami, ale to je ovlivněno zejména tím, že vzorek je po výpalu více slinutý a tedy obsahuje méně pórů, než ostatní. Vzorky lehčené rašelinou, smrkovými pilinami a bukovými pilinami mají pevnosti v tahu za ohybu obdobné (hodnoty se pohybují v intervalu 4,4-5,5 MPa). Nejhorší výsledky byly zjištěny u vzorků s antracitem, které vykazovaly nejnižší pevnosti v tahu za ohybu.

4.3 Etapa 2

V druhé etapě dochází k vytváření vzorků z kaolínu Sedlec Ia a jednotlivých druhů lehčiv. Vytváření vzorků, výpal a prováděné zkoušky jsou analogické s etapou 1, nebudou proto zde znovu popisovány.

4.3.1 Vytváření vzorků

Vzorky měly být vytvářeny stejným způsobem jako vzorky vytvořené v první etapě. Problémem byla velmi rozdílná sypná hmotnost jílu B1 a kaolínu Sedlec Ia. Sypná hmotnost kaolínu Sedlec Ia je 385 g/l a jílu B1 950 g/l. Proto byly vzorky vytvořeny tak, aby objemové množství lehčiva ve vzorku bylo stejné, jako u vzorků vytvářených ze směsi lehčiv a jílu B1. Při vytváření byla znát menší plastičnost kaolínu, směsi se zpracovávaly obtížněji.

Tabulka 25 - Složení směsí

Surovina	Sypná hmotnost [g/l]	Hmotnostní dávka [%]	Objemová dávka [%]	Množství rozdělovací vody na 1 kg suché směsi [l]
Smrk	177,5	39	58	0,63
Buk	281,0	37	44	0,63
Rašelina	184,4	39	57	0,59
Otruby	445,9	39	35	0,75
Antracit	1077,0	82	62	0,30
Pap. kal	1124,0	35	16	0,22
Cenosféry	432,0	35	55	0,28



Obrázek 40 - Ukázka vytváření vzorků (na fotce vzorky lehčené bukovými pilinami)

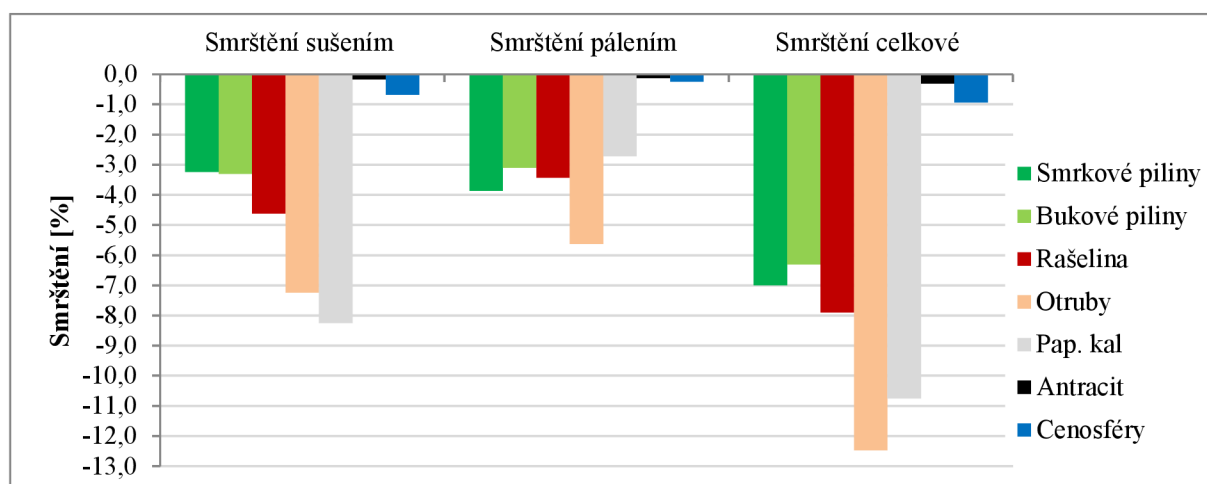
4.3.2 Smrštění a objemová hmotnost vzorků

U všech vzorků bylo stanovováno smrštění sušením, pálením i celkové. Pro zajímavost zde byly ponechány i hodnoty vzorků lehčených papírenským kalem.

Tabulka 26 - Smrštění vzorků

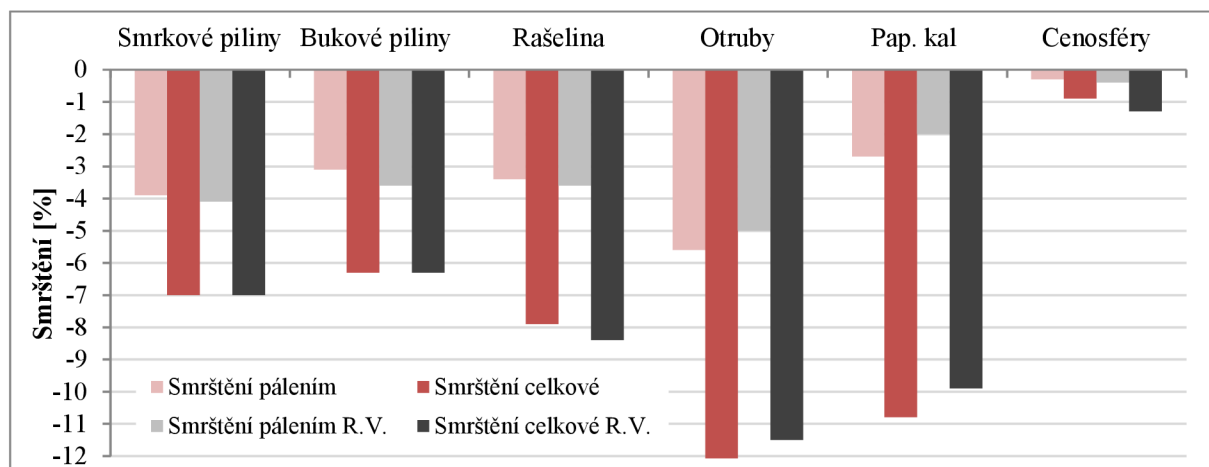
Lehčivo ve vzorku	Smrštění sušením [%]	Smrštění pálením [%]	Smrštění celkové [%]	Smrštění pálením při rychlém výpalu [%]	Smrštění celkové při rychlém výpalu [%]
Smrk	-2,8	-4,6	-7,3	-4,1	-7,0
Buk	-3,3	-3,1	-6,3	-3,6	-6,3
Rašelina	-4,6	-3,4	-7,9	-3,6	-8,4
Otruby	-7,3	-5,6	-12,5	-5,0	-11,5
Pap. kal	-8,3	-2,7	-10,8	-2,0	-9,9
Antracit	-0,18	-0,14	-0,31	-	-
Cenosféry	-0,7	-0,3	-0,9	-0,4	-1,3

Smrštění sušením je závislé zejména na množství rozdělovací vody a vlhkosti lehčiva. Smrštění pálením ovlivňuje celá řada dějů, například vypalovací teplota, rychlost výpalu, slínavost jílu, množství a druh lehčiva, chemický obsah popela vzniklého po vyhoření lehčiva, atd. Největší smrštění vykazují vzorky lehčené otrubami. Velmi vysokých hodnot smrštění (zejména sušením) nabývají i vzorky lehčené papírenským kalem. Je to způsobené vysokým obsahem vody v lehčivu. Naopak malé smrštění mají vzorky lehčené antracitem a vzorky lehčené cenosférami.



Graf 13 - Smrštění sušení, pálením i celkové jednotlivých vzorků (lehčivo daného vzorku je uvedeno v legendě grafu)

I tyto vzorky byly vypáleny na dva teplotní režimy. Srovnání smršťení pálením a celkové při pomalém a rychlém výpalu je zobrazeno v následujícím grafu.



Graf 14 – Srovnání smršťení při pomalém výpalu a při rychlém výpalu (nárůst 10 °C/minutu)

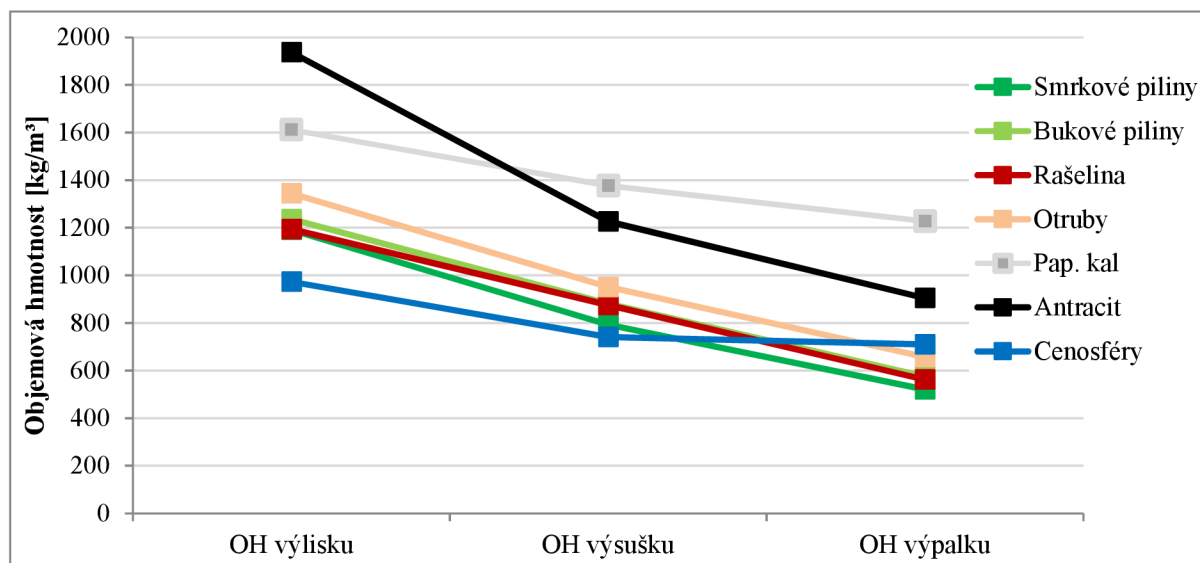
Smršťení vzorků při pomalém a rychlém výpalu se mírně liší. Zkoušení je zatíženo určitou chybou, proto by bylo vhodné provést měření na větším počtu vzorků. Dá se však předpokládat, že u vzorků s kaolínem rychlost výpalu ovlivňuje smršťení minimálně nebo vůbec.

Objemová hmotnost je u těchto typů vzorků velmi nízká. Je to způsobeno výběrem pojiva, tedy kaolínem Sedlec Ia. Kaolín sám o sobě má nižší objemovou hmotnost po výpalu (okolo 1305 kg/m³). Jde o žárovzdorný jííl, ale vzhledem k vlastnostem ho můžeme označit i jako pórovinový jííl. Při výpalu dochází k vytvoření výborných podmínek pro vyhoření lehčiva ze vzorků. Vzorky po výpalu nevykazují žádná černá jádra a to ani při rychlém typu výpalu.

Tabulka 27- Objemová hmotnost vzorků

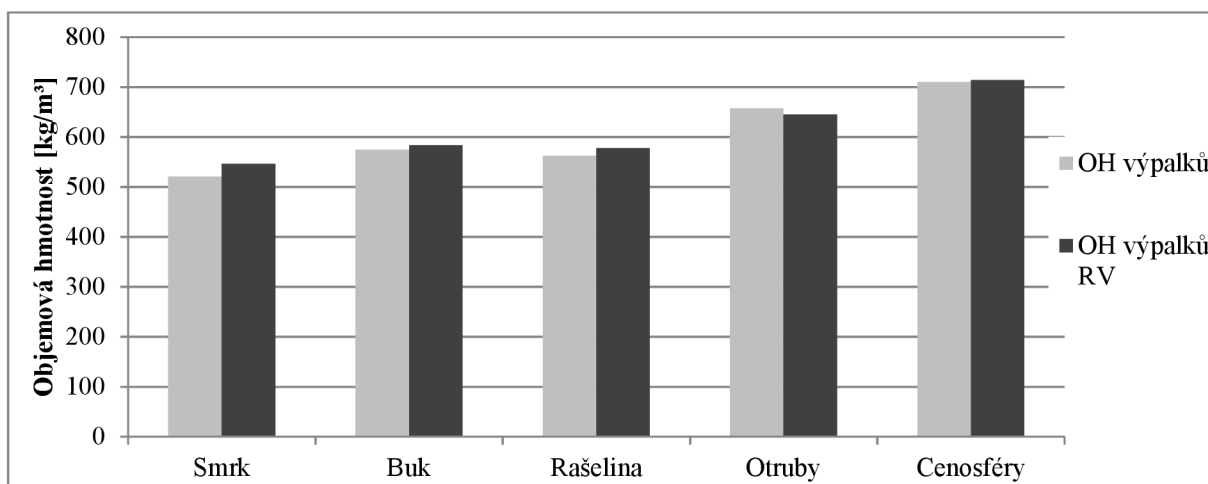
Lehčivo ve vzorku	OH výlisku [kg/m ³]	OH vysušeného vzorku [kg/m ³]	OH vypáleného vzorku [kg/m ³]	OH vypáleného vzorku při rychlém výpalu [kg/m ³]
Smrk	1190	790	520	545
Buk	1235	880	574	583
Rašelina	1195	875	560	580
Otruby	1345	950	660	645
Pap. kal	1610	1375	1225	1240
Antracit	1935	1225	905	-
Cenoféry	975	740	710	715

Vzorky lehčené smrkovými pilinami, bukovými pilinami a rašelinou vykazují obdobné objemové hmotnosti vypáleného keramického střepu. Jejich objemová hmotnost klesá k hodnotám okolo 550 kg/m³, což je pro tento typ výrobků velmi nízká hodnota. Vzorky lehčené otrubami mají objemovou hmotnost mírně vyšší, což může být způsobeno rychlým vyhořením otrub ze vzorků a tedy delším časem slinování keramického střepu, případně chemickým složením popela po vyhoření otrub (může obsahovat taviva). Vzorky lehčené antracitem také vykazují výrazné snížení objemové hmotnosti výpalku oproti výlisku.



Graf 16 - Objemová hmotnost výlisků, výsušků a výpalků lehčených vzorků při pomalém výpalu

Výsledky vzorků lehčených papírenským kalem nejsou nijak zajímavé. Objemová hmotnost klesá jen velmi mírně a nijak výrazně se neliší od objemové hmotnosti samotného vypáleného kaolínu. Tyto vzorky nebudou dále srovnány v grafu objemových hmotností v závislosti na režimu výpalu, protože jejich hodnoty jsou výrazně jiné, než u všech ostatních vzorků.

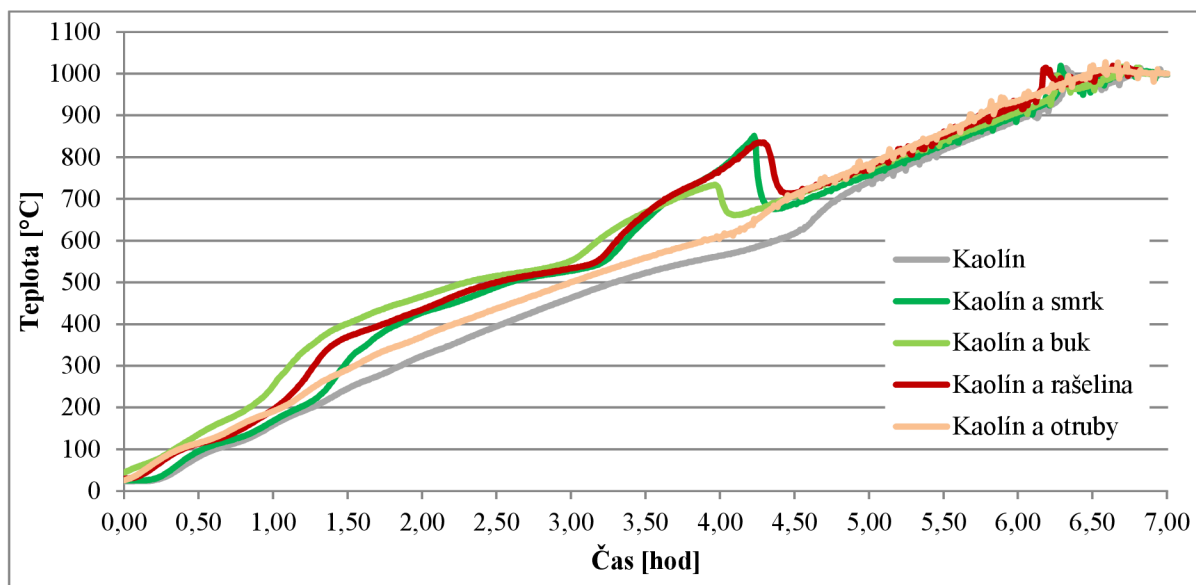


Graf 15 - Rozdíly objemové hmotnosti mezi vzorky vypálenými na pomalý výpal a na rychlý výpal

Jednotlivé režimy výpalu téměř neovlivnily výsledné objemové hmotnosti vzorků. Rozdíly jsou velmi malé a mohou být způsobeny i nepřesnostmi při měření rozměrů.

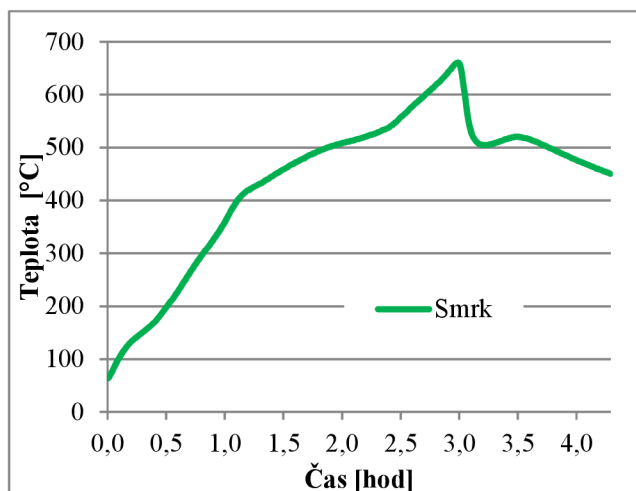
4.3.3 Měření teplot ve vzorku během výpalu a DTA

Měření teplot ve vzorku ukázalo zajímavý děj. U vzorků lehčených smrkovými pilinami, bukovými pilinami a rašelinou docházelo k výraznému zvýšení teploty ve vzorcích s lehčivou oproti vzorku vytvořeného pouze z kaolínu.



Graf 17 - Měření teplot ve vybraných vzorcích

Od teploty 550 °C dochází k náhlému rapidnímu zvýšení teploty. Možnou příčinou tohoto jevu mohlo být vyhořívání vzniklého černého jádra. Aby byla tato teorie potvrzena, byl vypálen další vzorek na teplotu pouze 500 °C při nárůstu teploty 150 °C/hodinu.



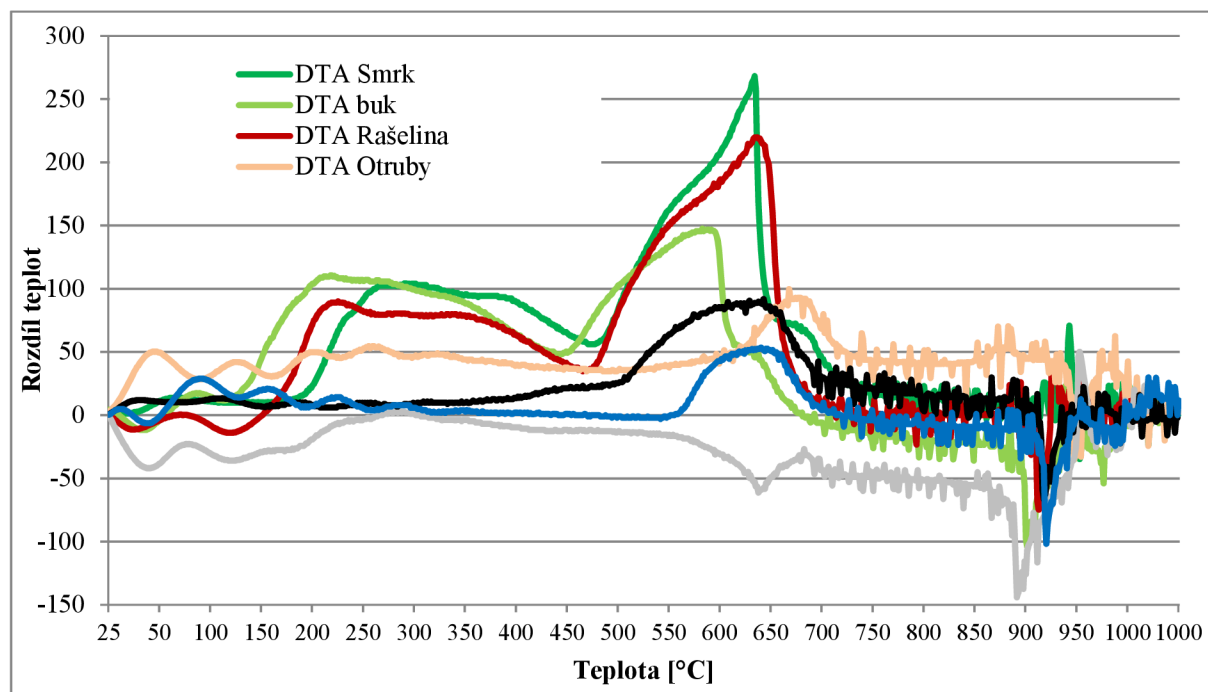
Graf 18 - Teploty ve vzorku lehčeného smrkovými pilinami při maximální teplotě výpalu 500 °C



Obrázek 41 - Výskyt černého jádra při teplotě výpalu a) 500 °C b) 1000 °C

Experiment prokázal, že za náhlý nárůst teploty v několika vzorcích opravdu může vyhořívání černého jádra. Kaolín Sedlec Ia vytváří díky svým vlastnostem podmínky pro vyhoření vzniklého černého jádra. Na obrázku 41 je patrné, že vnitřní část černého jádra je již částečně vyhořelé, což vysvětluje zvýšení teploty až k 650 °C i přes to, že výpal byl pouze na 500 °C.

Měření teploty ve vzorcích a následné odečtení vývoje teplot pouze v kaolínu došlo k vytvoření orientační křivky DTA lehčiv ve vzorcích.

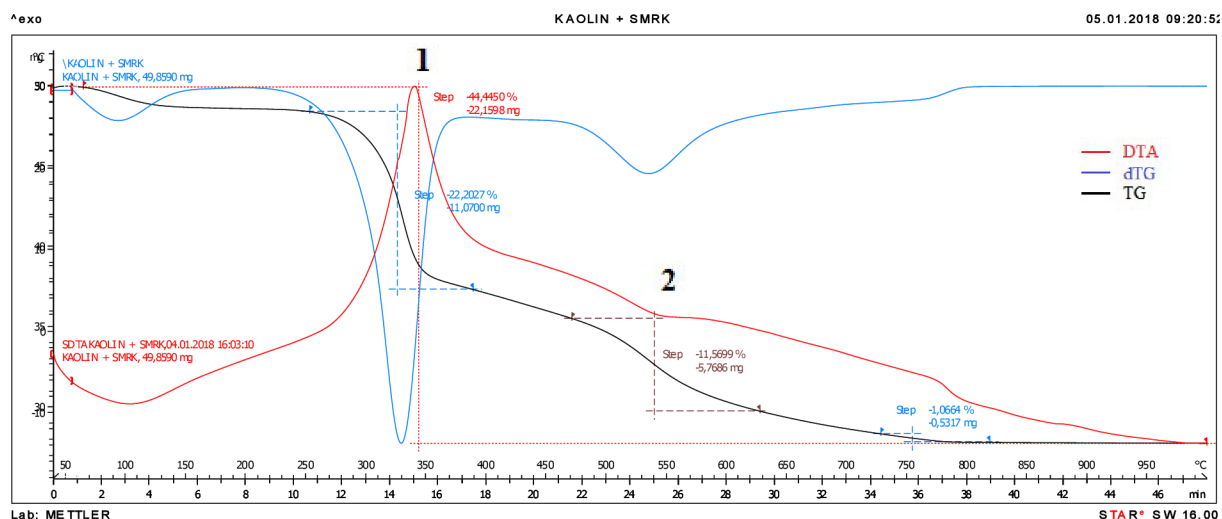


Graf 19 - Křivky DTA lehčiv stanovené z měření teplot ve vzorku

V první fázi výpalu dochází zejména k vyhořívání lehčiv ze vzorku. Vyhořívání je ukončeno do teploty 400 °C. Od 500 °C dochází u některých vzorků s přímými lehčivou k další silné exotermické reakci. Ta je vysvětlena vyhoříváním černých jader ze vzorků. Antracit ze vzorků začíná vyhořívat až při teplotě, kdy z jiných vzorků vyhořívají černá jádra. Mírná exotermická reakce je i u cenosfér. U papírenského kalu nastává menší endotermická reakce při 640 °C. V intervalu teplot 850-950 °C dochází postupně u všech vzorků k endotermické reakci. Tyto křivky lehčiv mohou být velmi zkresleny jakoukoliv špatně zaznamenanou hodnotou, proto jejich význam je pouze orientační.

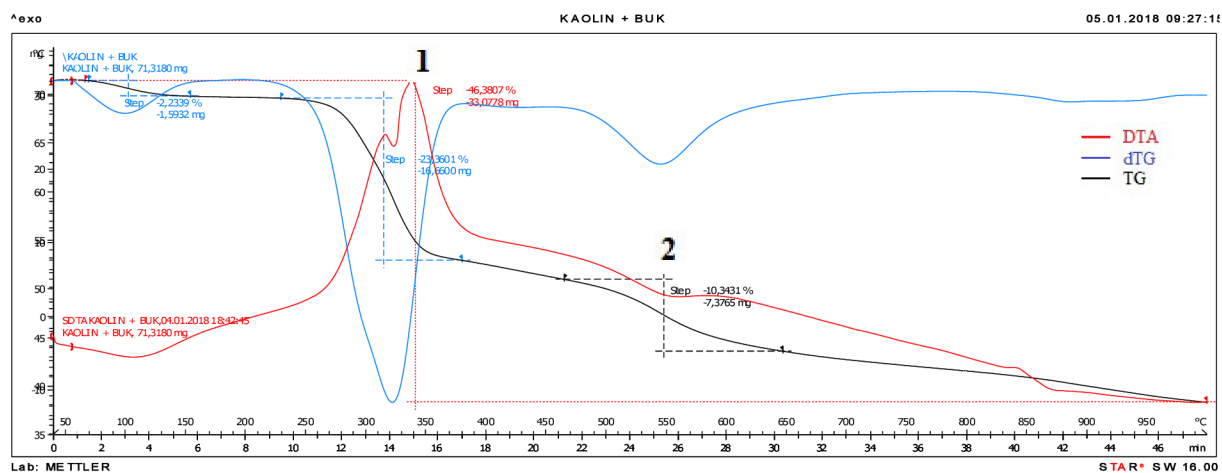
Diferenčně termická analýza

Analýza byla prováděna na směsích kaolínu s lehčivý. Směsi byly namíchány tak, aby poměr kaolínu a lehčiva byl stejný jako ve zkušebních vzorcích.



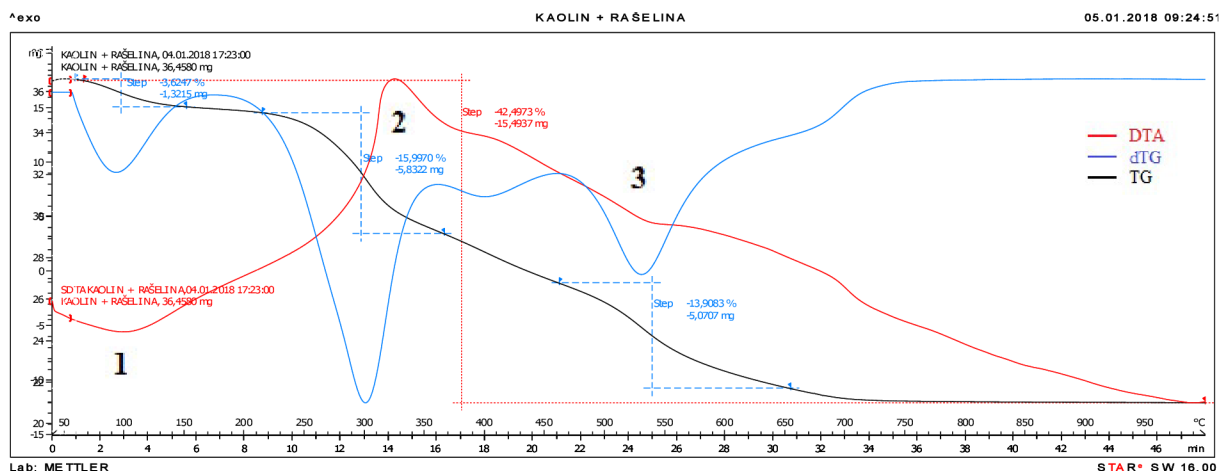
Obrázek 42 - DTA směsi z kaolínu Sedlec Ia a smrkových pilin

Analýzou byly prokázány dvě významné reakce. První je silná exotermická reakce, která charakterizuje vyhořívání smrkových pilin (1). Dále dochází k dehydroxylaci minerálů obsažených v kaolínu (2), což je provázeno endotermickou reakcí. Obě reakce jsou charakteristické významným hmotnostním úbytkem.



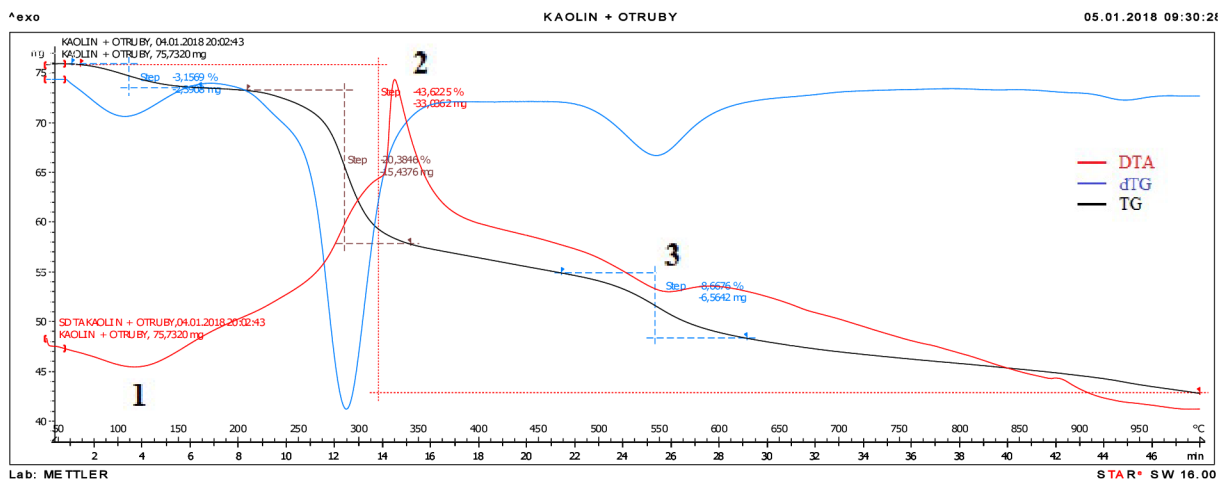
Obrázek 43 - DTA směsi z kaolínu Sedlec Ia a bukových pilin

Směs z kaolínu a bukových pilin má oproti vzorku ze směsi smrkových pilin a kaolínu jeden významný rozdíl. DTA křivka vykresluje vyhořívání bukových pilin ve dvou etapách (1). Zřejmě jde o postupné vyhořívání spalitelných látek (celulózy, hemicelulózy případně ligninu). Tato reakce se váže s nejvyšším hmotnostním úbytkem. Co se týče endotermické reakce okolo 550 °C, jde převážně o dehydroxylaci kaolinitu. (2)



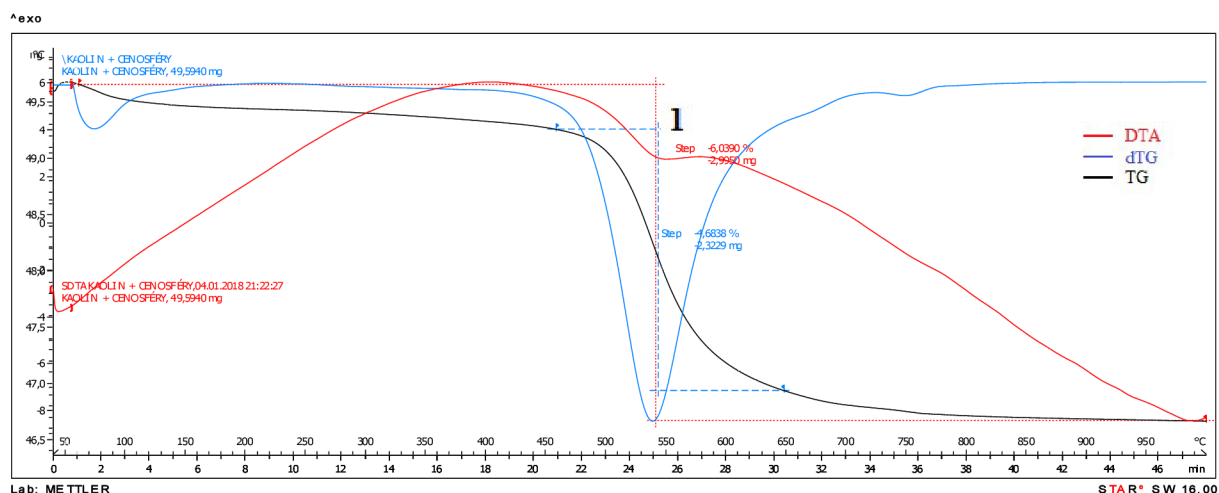
Obrázek 44 - DTA směsi z kaolínu Sedlec Ia a rašeliny

Na rozdíl od předchozích směsí je výrazná endotermická reakce okolo 100 °C (1). Jde o dehydrataci, tedy uvolňování fyzikálně vázané vody ze směsi. Je to ovlivněno zejména počáteční vlhkostí lehčiva. Dále je zde silná exotermická reakce, což charakterizuje vyhořívání spalitelných látek z lehčiva (2). Třetí reakce je na DTA křivce sotva patrná, ale díky derivaci hmotnostního úbytku (dTG křivka) je jasně vidět, že jde o endotermickou reakci, která je přiřazována dehydroxylaci kaolinitu.



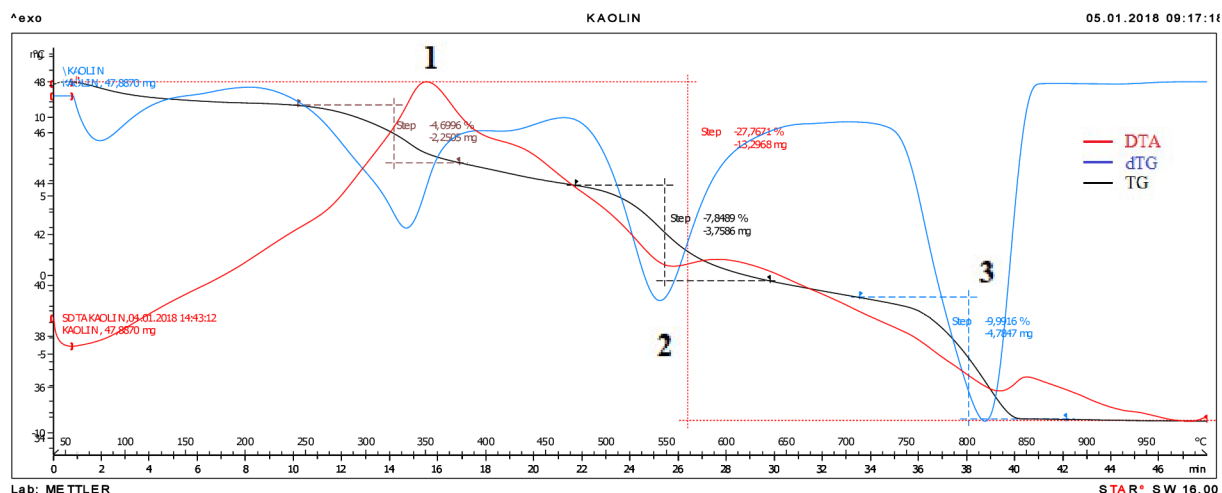
Obrázek 45 - DTA směsi z kaolínu Sedlec Ia a otrub

Směs z kaolínu a otrub se taktéž vyznačuje třemi významnými reakcemi. První a třetí jsou stejné endotermické reakce jako u směsi kaolínu s rašelinou. Druhá reakce je exotermická a jde o vyhořívání lehčiva ze směsi. Opět je patrné rozdělení vyhořívání ve dvou etapách (postupné vyhořívání spalitelných látek).



Obrázek 46 - DTA směsi z kaolínu Sedlec Ia a cenosfér

Vzhledem k tomu, že cenosféry jsou nepřímé lehčivo, ve směsi je zaznamenána pouze jedna endotermická reakce, která charakterizuje uvolňování chemicky vázané vody z kaolínových minerálů (převážně kaolinitu).

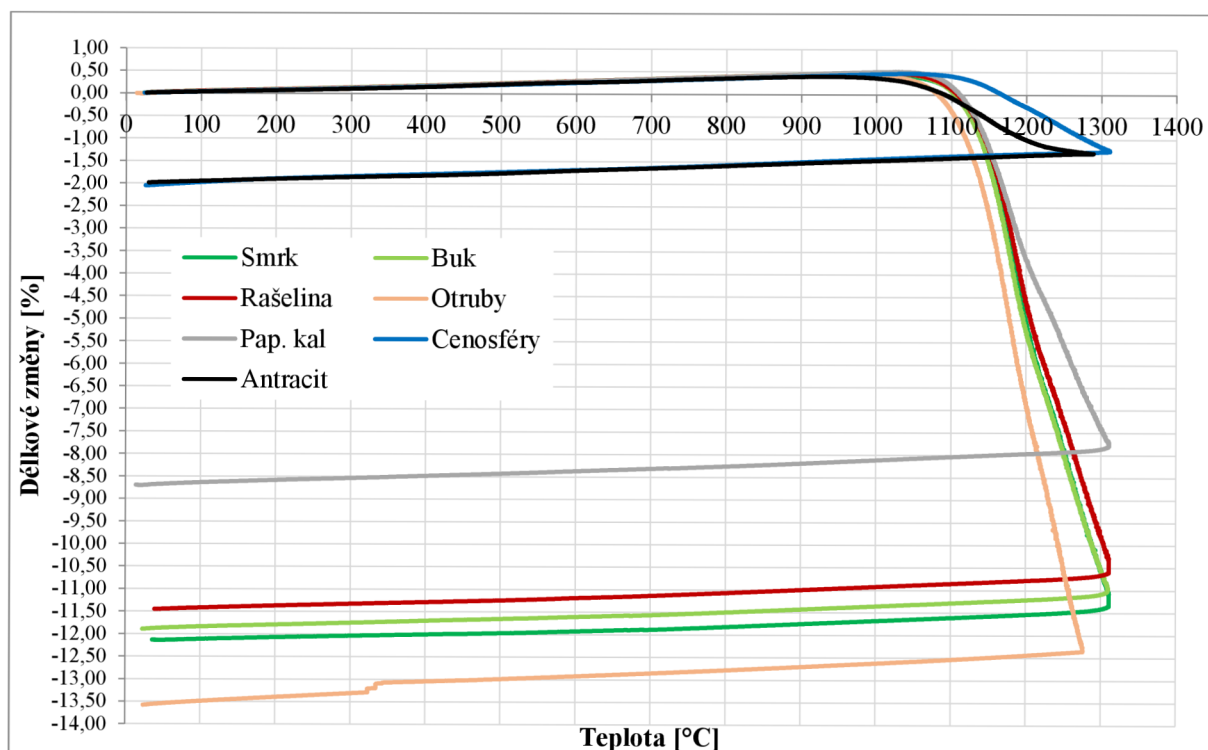


Obrázek 47 - DTA směsi z kaolínu Sedlec Ia a antracitu

Směs antracitu s kaolínem se oproti předchozím směsím chová výrazně jinak. Při teplotě, kdy vyhořívají všechna přímá lehčiva, vyhořívá jen velmi malá část spalitelných látek z antracitu. Tato exotermická reakce (1) však není plně vysvětlena, protože při DTA antracitu byla zaznamenána reakce při této teplotě mnohonásobně menší (porovnání na základě hmotnostního úbytku). Druhou reakcí je klasicky dehydroxylace minerálů (2), která nastává u všech vzorků. O vyhořívání antracitu při vysokých teplotách vypovídá náhlý výrazný úbytek hmotnosti od 700 °C do zhruba 850 °C. Zde jde o exotermickou reakci, charakterizující vyhořívání spalitelných látek z antracitu (3).

4.3.4 Kontrakčně dilatační termická analýza (DKTA)

Analýza je prováděna na již vypálených vzorcích. Její význam je především ve stanovení orientační klasifikační teploty.



Graf 20 – DKTA vzorků s jednotlivými druhy lehčiv (označeno v legendě)

Tabulka 28 - Orientační klasifikační teplota vzorků

Lehčivo ve vzorku	Smrkové piliny	Bukové piliny	Rašelina	Otruby	Pap. kal	Cenoféry	Antracit
Klasifikační teplota [°C]	1155	1160	1165	1140	1170	>1300	>1300

Vzorky lehčené smrkovými pilinami, bukovými pilinami, rašelinou, otrubami a papírenským kalem mají obdobnou klasifikační teplotu. Co se týče vzorku s papírenským kalem, tak zde je ta hodnota tak vysoká, protože k většímu slnutí vzorku došlo již během výpalu.

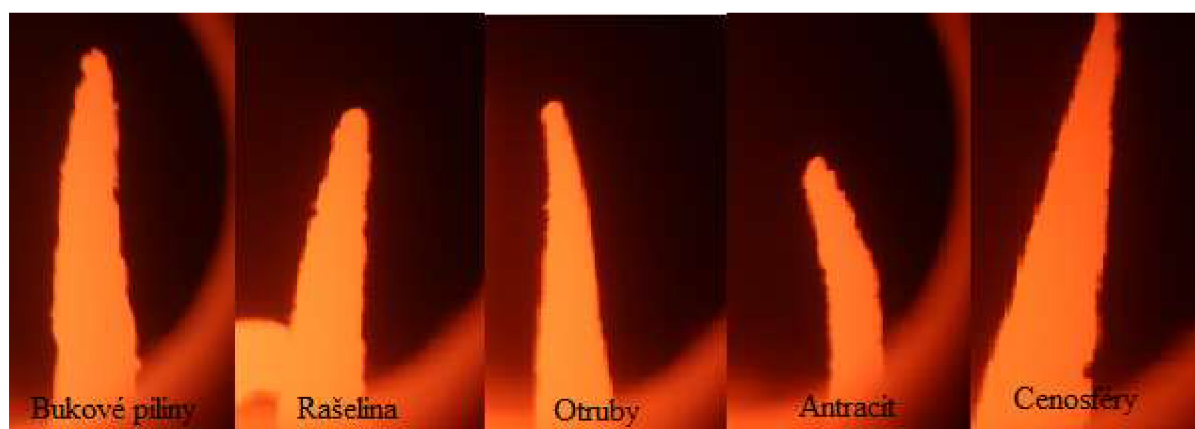
Vzorky lehčené antracitem a cenosférami při zatěžování teplotou 1300 °C nedosáhnou délkových změn 2 %. Jejich klasifikační teplota je vyšší.

4.3.5 Žárovzdornost

Kaolín Sedlec Ia má sám o sobě velmi vysokou žárovzdornost (1760 °C), proto i žároměrky vytvořené z kaolínu a jednotlivých druhů lehčiv dosahovaly vysokých hodnot.

Tabulka 29 - Žárovzdornost jednotlivých vzorků

Lehčivo ve vzorku	Smrk	Buk	Rašelina	Otruby	Cenosféry	Antracit
Žárovzdornost [°C]	>1640	1745	1745	1700	1720	1695



Obrázek 48 - Žároměrky deformující se na hranici žárovzdornosti (pod každou žároměrkou je uvedeno lehčivo ve vzorku)

Žárovzdornost u vzorků lehčených smrkem nebylo možné přesně stanovit, protože během převozu do výzkumného centra AdMas došlo k poškození žároměrky. Do teploty 1640 °C byla její část patrná v objektivu fotoaparátu, načež následně došlo ke slinování žároměrky a ztratila se z hledáčku přístroje. Avšak dle ostatních zaznamenaných výsledků se předpokládá, že žárovzdornost vzorku lehčeného smrkovými pilinami by byla obdobná, jako u vzorků lehčených bukovými pilinami, rašelinou či otrubami, tzn. někde v intervalu 1700-1745 °C.

Všechny žároměrky vykazují velmi solidní výsledky. Opět výsledné hodnoty může ovlivňovat druh, případně dávka lehčiva v daném vzorku. Z výsledků je však patrné, že popel vzniklý po vyhoření lehčiv ovlivňuje žárovzdornost jen v malé míře.

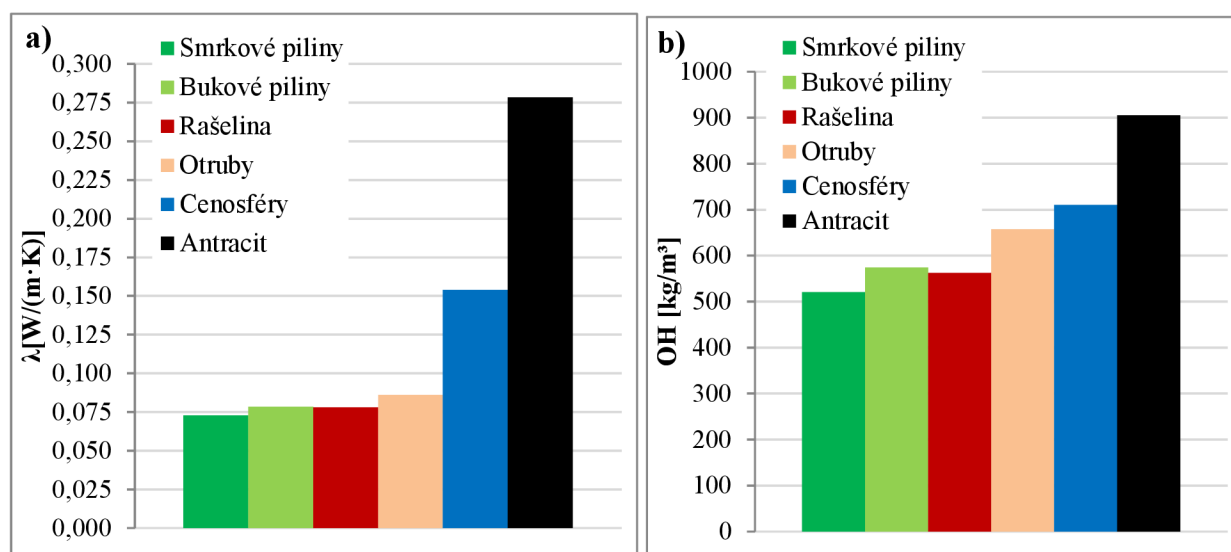
4.3.6 Součinitel tepelné vodivosti

Tato vlastnost je pro tepelně izolační výrobky nedílnou součástí jejich popisu. Vzhledem k velmi nízké objemové hmotnosti je předpoklad, že by tento typ výrobků měl mít velmi nízký součinitel tepelné vodivosti.

Tabulka 30 - Součinitel tepelné vodivosti v jednotlivých vzorcích

Lehčivo ve vzorku	Smrkové piliny	Bukové piliny	Rašelina	Otruby	Cenosféry	Antracit
Souč. tepelné vodivosti [W/(m·K)]	0,0727	0,0784	0,0780	0,0861	0,1538	0,2783

Výsledné hodnoty jsou závislé na objemové hmotnosti, čím je objemová hmotnost nižší, tím je λ nižší.



Graf 21 - Porovnání součinitele tepelné vodivosti (graf a) s objemovou hmotností jednotlivých vzorků (graf b)

Výrazně vyšší hodnota součinitele tepelné vodivosti u vzorku lehčeného antracitem je zapříčiněna neúplným vyhořením antracitu ze vzorku. Vzorky lehčené cenoférami jsou ovlivněny vlastnostmi cenofér.

Vzorky vytvořené z kaolínu a smrkových pilin, bukových pilin a rašeliny vykazují mimořádně výborné tepelně izolační vlastnosti. Velmi dobře na tom jsou i vzorky lehčené otrubami. Je zde patrná závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti vzorků.

4.3.7 Další vlastnosti

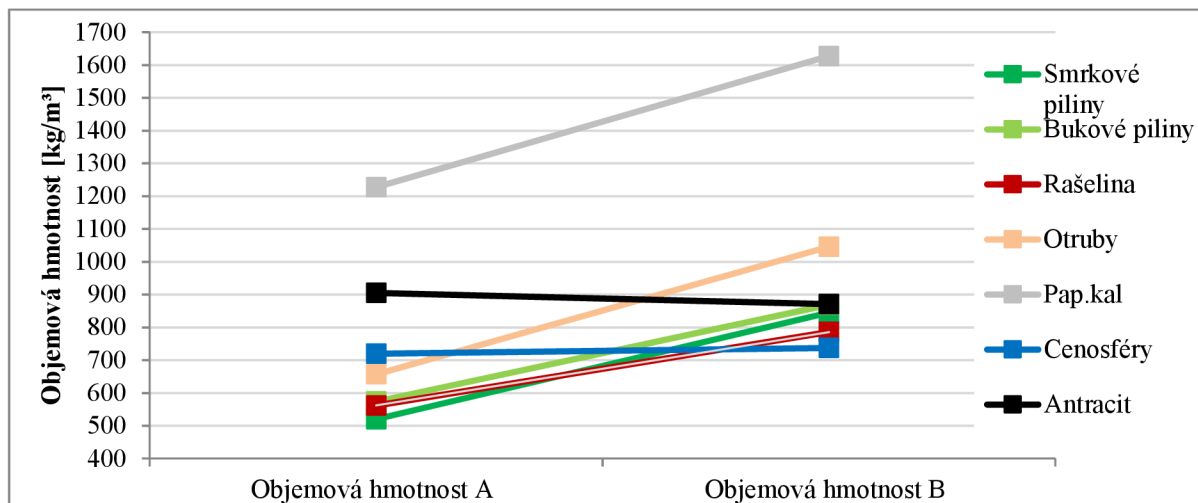
Aby vzorky byly co nejpodrobněji popsány, byla provedena měření, díky kterým bylo možné vypočítat nasákavost, zdánlivou pórovitost, zdánlivou hustotu a pevnost v tahu za ohybu.

Tabulka 31- Vybrané vlastnosti vzorků

Vzorek		Objemová hmotnost	Nasákavost	Objemová hmotnost hydrostaticky	Zdánlivá pórovitost	Zdánlivá hustota	Pevnost v tlaku
Smrk	A	520	122,4	600	73,4	2251	0,3
	B	834	78,8	842	66,3	2497	-
	C	546	127,4	546	69,6	1796	-
Buk	A	574	125,2	606	75,8	2506	0,5
	B	820	76,2	869	66,2	2574	-
	C	583	125,6	608	76,3	2570	-
Rašelina	A	562	133,2	580	77,3	2556	0,4
	B	782	88,0	786	69,1	2545	-
	C	578	132,1	588	77,8	2645	-
Otruby	A	657	107,5	683	73,4	2572	0,9
	B	1019	56,2	1046	58,8	2542	-
	C	645	105,6	695	73,4	2609	-
Pap.kal	A	1227	37,5	1292	48,4	2504	-
	B	1645	11,2	1627	18,3	1990	-
Cenosféry	A	720	60,8	695	42,2	1203	2,0
	B	784	52,3	780	40,8	1318	-
	C	714	61,1	698	42,6	1216	-
Antracit	A	905	53,0	942	49,9	1881	0,3
	B	814	62,8	871	54,7	1925	-

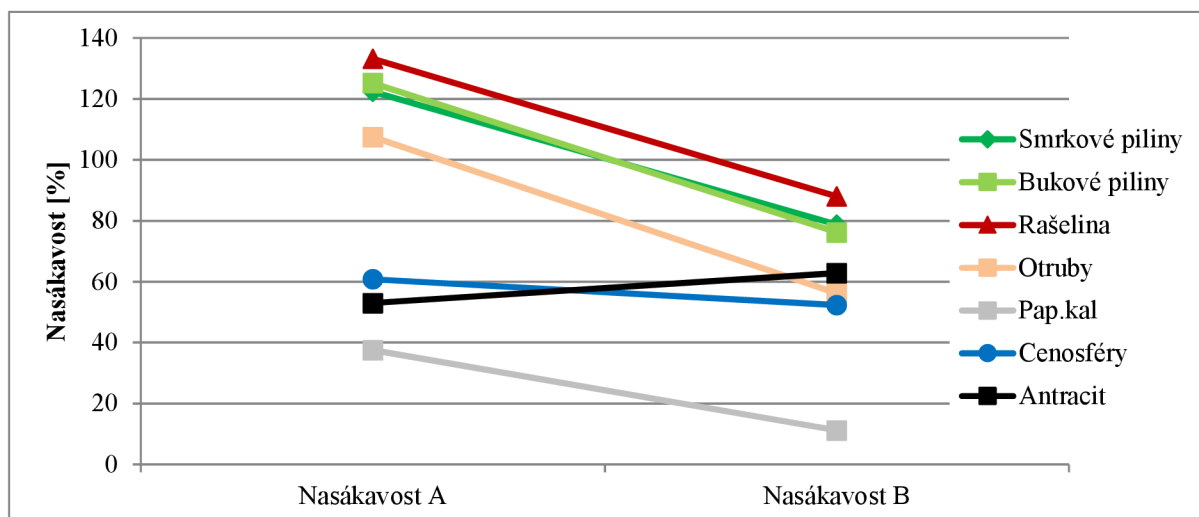
Pozn: Vzorek A vyjadřuje vlastnosti keramického střepu po výpalu, vzorek B vyjadřuje vlastnosti keramického střepu po výpalu a po DKTA analýze, kdy byl zatížen teplotou 1300 °C, vzorek C vyjadřuje vlastnosti keramického střepu po rychlém výpalu

Objemová hmotnost stoupá se zvyšující se teplotou výpalu. Dochází k zmenšování vytvořených pórů vzniklých vyhořením lehčiva. Toto tvrzení neplatí pouze u vzorků lehčených antracitem. U vzorku s cenosférami je objemová hmotnost, nasákavost i pórovitost velmi obdobná při teplotě výpalu 1000 °C i 1300 °C.



Graf 22- Objemová hmotnost vzorků po pomalém výpalu na 1000 °C (vzorky A) a objemová hmotnost po DKTA (vzorky B) při maximální teplotě 1300 °C

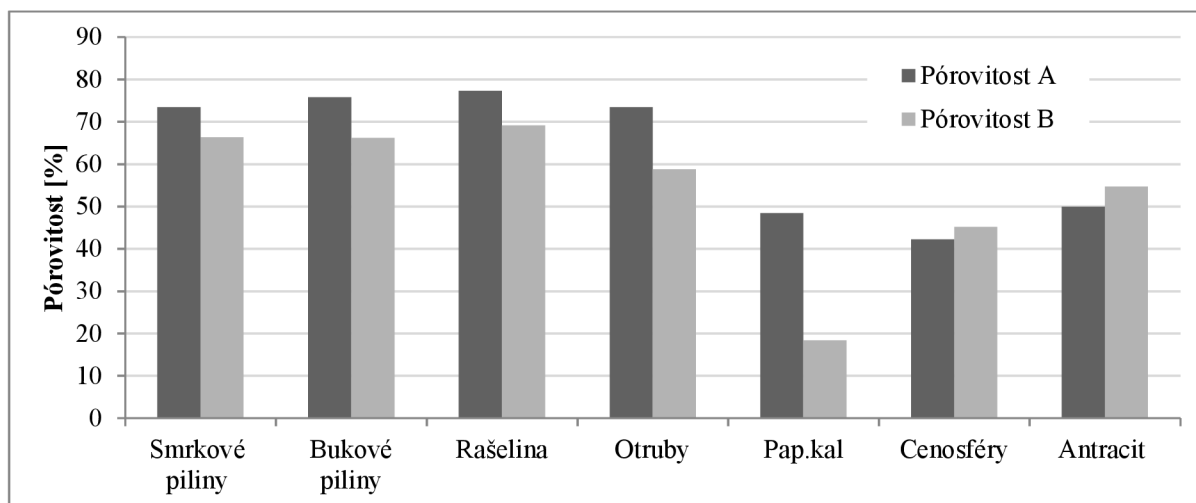
Nasákavost vzorků vypálených při pomalém i rychlém výpalu je velmi vysoká (vzorky A a C). Kromě vzorků lehčených antracitem a cenoférami u všech ostatních dochází se zvyšující se teplotou výpalu (vzorky podrobeny DKTA) k výraznému snížení nasákavosti. U vzorků, kde je přímé lehčivo již vyhořeno dochází ke slinování jílu. U vzorku s antracitem dochází při těchto teplotách k dalšímu vyhoření a tedy vytvoření dalších pórů. To je důvodem, proč nasákavost a pórovitost u těchto vzorků stoupá.



Graf 23 - Nasákavost jednotlivých vzorků vypálených na teplotu 1000 °C (vzorky A) a na teplotu 1300 °C (vzorky B)

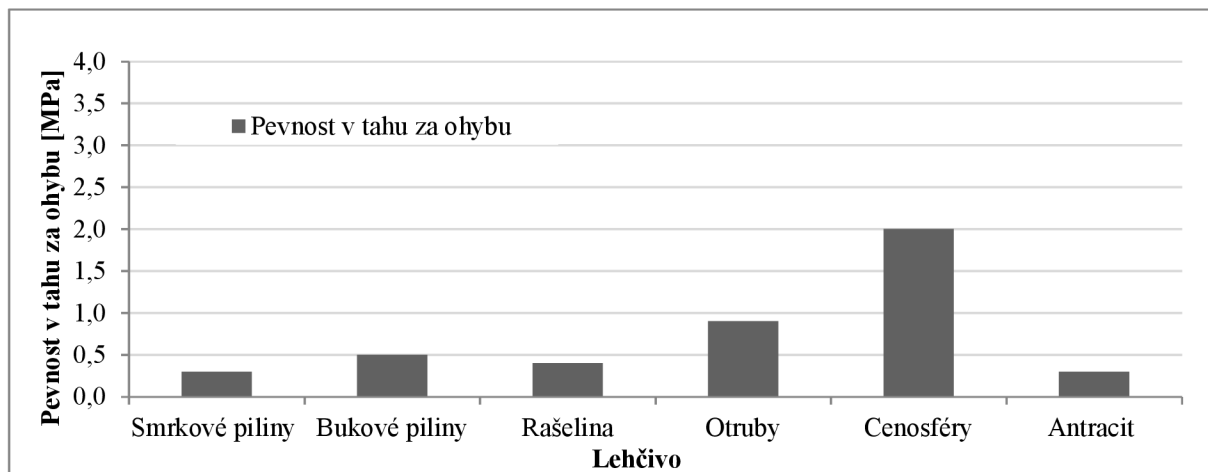
Není zde vykazován rozdíl nasákavosti (pórovitosti) mezi vzorky vypálenými při pomalém režimu výpalu a při rychlém režimu výpalu.

Zdánlivá pórovitost ovlivňuje nasákavost i objemovou hmotnost. Čím je pórovitost vyšší, tím je nižší objemová hmotnost a vyšší nasákavost.



Graf 25 - Pórovitost systému vzorků vypálených na teplotu 1000 °C (pórovitost A) a vzorky vypálené na 1300°C (pórovitost B)

Pevnost v tahu za ohybu je u všech vzorků velmi nízká. Čím je vyšší pórovitost a nižší objemová hmotnost, tím více klesá pevnost. Vzhledem k tomu, že tyto typy vzorků mají objemovou hmotnost velmi nízkou, tak i pevnosti v tahu za ohybu jsou malé.



Graf 24 - Pevnosti v tahu za ohybu vzorků A

Nejnižší OH vykazuje vzorek lehčený smrkovými pilinami a jeho pevnost v tahu za ohybu je také nejmenší (0,3 MPa). To dokazuje závislost mezi objemovou hmotností a pevností v tahu za ohybu. Jedinou výjimkou jsou vzorky s antracitem, kdy pevnosti jsou tak nízké zejména kvůli nevyhoření lehčiva v celém objemu ze vzorku.

4.3.8 Diskuze výsledků etapy 2

Vzorky byly vytvořeny tak, aby objemová dávka lehčiv byla stejná jako v první etapě. Celkové smrštění vzorků můžeme rozdělit do tří kategorií. První kategorie je velké smrštění, kdy zkušební vzorky lehčené otrubami vykazovaly smrštění 12,5 % a vzorky lehčené papírenským kalem 10,8 %. Mnohem menší smrštění vykazují vzorky lehčené smrkovými pilinami (7,3 %), bukovými pilinami (6,3 %) a rašelinou (7,9 %). Naprosto fantastické hodnoty celkového smrštění vykazují vzorky lehčené cenosférami (0,9 %) a antracitem (0,3 %). Objemová hmotnost tohoto typu vzorků je velmi nízká. U skupiny vzorků lehčených smrkovými pilinami, bukovými pilinami a rašelinou došlo ke snížení objemové hmotnosti pod 600 kg/m³. Tyto výrobky vykazují perfektní tepelně izolační vlastnosti. Vzorky lehčené otrubami mají objemovou hmotnost mírně vyšší (660 kg/m³), což může být zapříčiněno delším intervalem slinování, díky rychlejšímu vyhoření lehčiva ze vzorku a dále chemickým složením popela vzniklého po vyhoření lehčiva (může obsahovat více tavících oxidů). Vzorky lehčené cenosférami mají objemovou hmotnost 710 kg/m³, přičemž zásadně tuto hodnotu ovlivňují vlastnosti cenosfér. Dalším zkoumaným lehčivem ve vzorku je antracit. Objemové hmotnosti těchto výpalků jsou 905 kg/m³. Vyšší hodnoty jsou zapříčiněny nedostatečným vyhořením lehčiva ze vzorku. Vzorky lehčené papírenským kalem mají po výpalu objemovou hmotnost 1225 kg/m³. Papírenský kal tedy není úplně vhodný jako lehčivo pro vytváření žárovzdorných tepelně izolačních výrobků.

Metodou měření vyvíjející se teploty ve vzorcích bylo zjištěno, že lehčiva ve vzorku vyhořívají ve dvou krocích. V první fázi jde o vyhořívání spalitelných látek z lehčiva, které obecně začíná při teplotě 200 °C a končí do 400 °C. V druhé fázi (zhruba od teploty 500 °C) začínají vyhořívát vzniklá černá jádra. V kaolínové matici jsou vytvořeny vhodné podmínky pro vyhořívání černého jádra. Na základě DTA analýz je patrné, že otruby a rašelina vyhořívají ze vzorků dříve než piliny. Antracit oproti všem ostatním přímým lehčivům pořádně vyhořívá ze směsi s kaolínem až od teploty 700 °C. U vzorku s cenosférami na zvyšující se teplotu do 1000 °C reaguje pouze kaolín.

Klasifikační teplota byla orientačně stanovena z DKTA diagramů. Obecně lze konstatovat, že klasifikační teplota je vysoká při tak nízkých objemových hmotnostech vzorků. Délkové změny do 2 % mají vzorky lehčené smrkovými pilinami, bukovými pilinami, rašelinou, otrubami a papírenským kalem zhruba do teploty 1150 °C. Délkové změny vyšší než 2 % nebyly u vzorků lehčených antracitem a cenosférami dosaženy do teploty 1300 °C. Jejich klasifikační teplota se tedy předpokládá vyšší.

Žároměrky vytvořené přesně ze směsí, z jakých byly vytvářeny zkušební vzorky, vykazovaly výborné hodnoty. Je to zapříčiněno kvalitním kaolínem, který byl použit jako pojivo daných vzorků. Obecně se teplota žárovzdornosti pohybovala od 1700 °C, přičemž žárovzdornost kaolínu je 1760 °C.

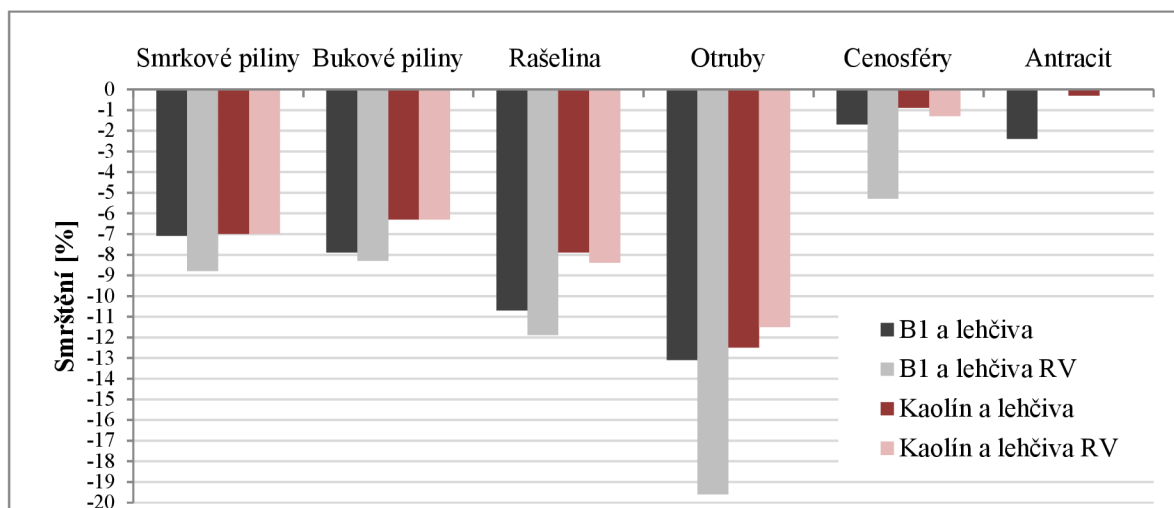
Součinitel tepelné vodivosti klesá se zvyšující se pórovitostí a snižující se objemovou hmotností. Nejlepší tepelně izolační vlastnosti vykazují vzorky lehčené smrkovými pilinami, kdy hodnota klesla až na 0,0727 W/(m·K). Obdobně jsou na tom vzorky s bukovými pilinami a rašelinou. I pórovitost těchto tří typů vzorků je podobná (okolo 75 %). Dobré tepelně izolační vlastnosti vykazují i vzorky lehčené otrubami. Vzorky s cenosférami jsou ovlivněny vlastnostmi nepřímého lehčiva. Vůbec nejvyšší hodnoty λ u těchto typu vzorků vykazují vzorky s antracitem (0,2783 W/(m·K)). Je to tím, že vzorek obsahuje velkou část nevyhořelého antracitu, který zvyšuje součinitel tepelné vodivosti. Dokazuje to i pórovitost, která je ze všech vzorků s přímým lehčivem nejnižší (49,9 %)

Pevnosti v tahu za ohybu jsou velmi malé, protože jsou závislé na objemové hmotnosti a pórovitosti systému. U všech vzorků s přímým lehčivem byla pevnost v tahu za ohybu menší než 1 MPa. Velmi nízká pevnost výrobků by mohla komplikovat některé procesy, jako například převoz výrobků z výroben. Naopak vzorky s nepřímým lehčivem vykazují zvýšení pevnosti v tahu za ohybu na dvakrát vyšší hodnotu, tedy na 2,0 MPa.

4.4 Srovnání vybraných výsledků z etapy 1 a etapy 2

Rozdíly byly patrné již při vytváření vzorků. Směsi s kaolínem vykazovaly mnohem horší plastičnost, což znamená náročnější zpracování těsta. Obecně došlo i k navýšení rozdělovací vody pro vytvoření plastického těsta.

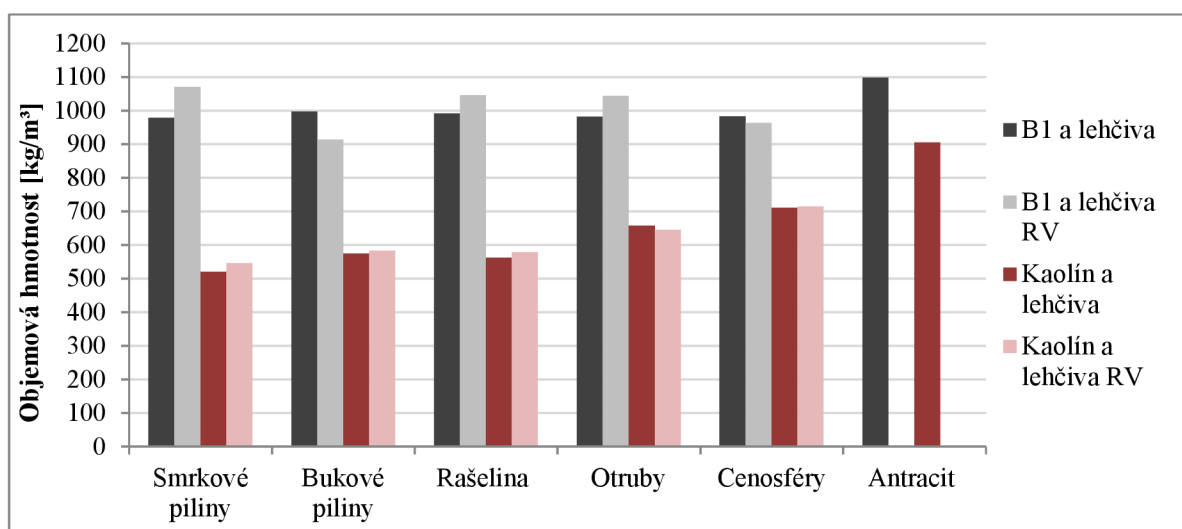
Hodnoty smrštění byly výrazně nižší u vzorků s kaolínem. Kaolín ve směsi částečně působí jako ostřívo, které omezuje smrštění.



Graf 26 - Srovnání celkového smrštění všech vzorků

Na rozdíl od vzorků vytvořených s kaolínem, zkušební vzorky vytvořené s jílem B1 mají rozdílné smršťování při různé rychlosti vypalování. Při rychlém výpalu docházelo u vzorků s jílem B1 k rychlejšímu slinování a tedy vyššímu smrštění

Objemová hmotnost při stejné objemové dávce lehčiva ve směsích byla opravdu výrazně odlišná. To je způsobeno rozdílnými vlastnostmi jílu B1 a kaolínu.



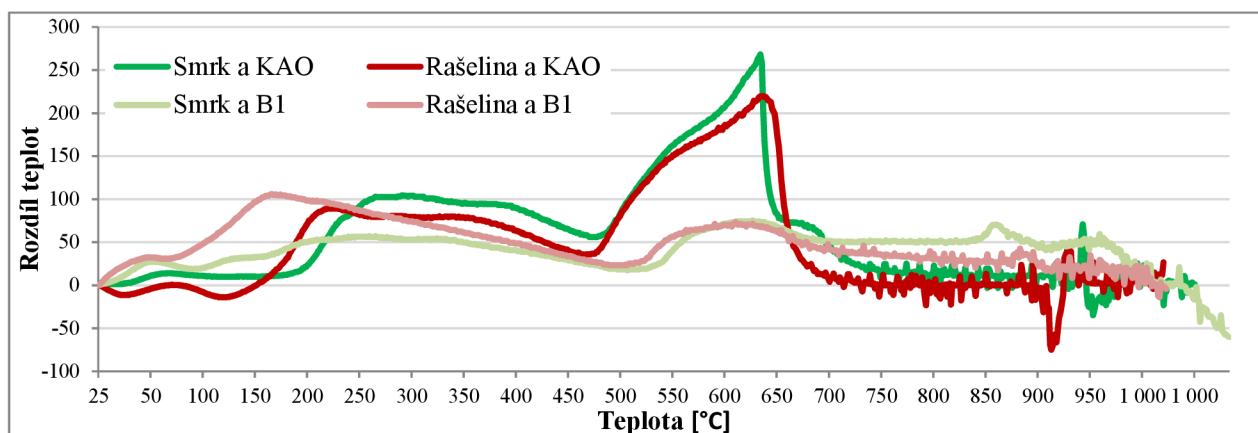
Graf 27 - Srovnání objemové hmotnosti vzorků

Kaolín vytváří příznivé podmínky ve struktuře vzorku během výpalu, které zapříčiní, že ve vzorcích dojde k vyhoření veškerého lehčiva, včetně černých jader. Černá jádra určitou částí zvyšují objemovou hmotnost vzorku, protože obsahují grafit, který se vyznačuje vyšší objemovou hmotností.



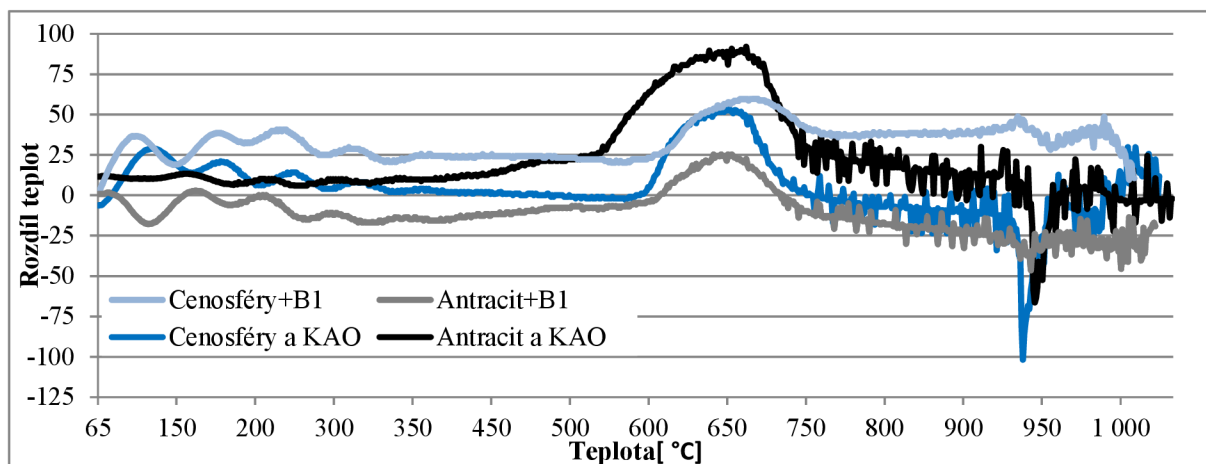
Obrázek 49 - Černá jádra vzorků. Na každém obrázku jsou zobrazeny vzorky s jílem B1 (barva béžová) a vzorky s kaolínem (barva narůžovělá), kdy u každého je zobrazen řez vzorku (levá strana je vzorek z pomalého výpalu, pravá strana je vzorek z rychlého výpalu). Lehčivem je a) smrk, b) buk, c) otruby, d) rašelina

Rozdílem teplot měřených ve vzorcích s lehčivem a v samotném jílu (kaolínu) byl vytvořen průběh exotermických, případně endotermických reakcí probíhajících v lehčivu. V kaolínu lehčivo vyhořelo v celém svém objemu, nevytvářela se černá jádra a to ani při rychlém výpalu. Naproti tomu ve vzorcích vytvořených z jílu B1 a lehčiv, docházelo k vytváření černých jader u všech organických lehčiv.



Graf 28 - Srovnání rozdílů teplot mezi jílem B1 s lehčivem a kaolínem s lehčivem

Z grafů je patrné, že lehčiva mají příznivější podmínky pro vyhoření v kaolínové matrici. Je to způsobeno tím, že kaolín Sedlec Ia má vlastnosti pórovinného jílu, kdežto jíl B1 je spíše slínavý. Černé jádro vzniká, pokud nedojde k vyhoření lehčiva do počátku dehydroxylace jílových minerálů, následně ale u vzorků s kaolínem dochází vlivem pórovité struktury k vytvoření vhodných podmínek pro vyhoření černého jádra. Vzorky s jílem B1 mají nižší pórovitost díky vyššímu slinování jílu B1 a tak černé jádro vyhořívá jen částečně. Při experimentu bylo zjištěno, že čím rychleji se vzorky s jílem B1 a lehčivem vypalují, tím je slinování jílu rychlejší a černá jádra jsou výraznější.



Graf 29 - Srovnání rozdílů teplot mezi jílem B1 s lehčivem a kaolínem s lehčivem

I antracit má ve vzorku s kaolínem lepší podmínky pro vyhořívání. Reakce ve vzorcích s cenoférami jsou ovlivněny vlastnostmi cenofér.

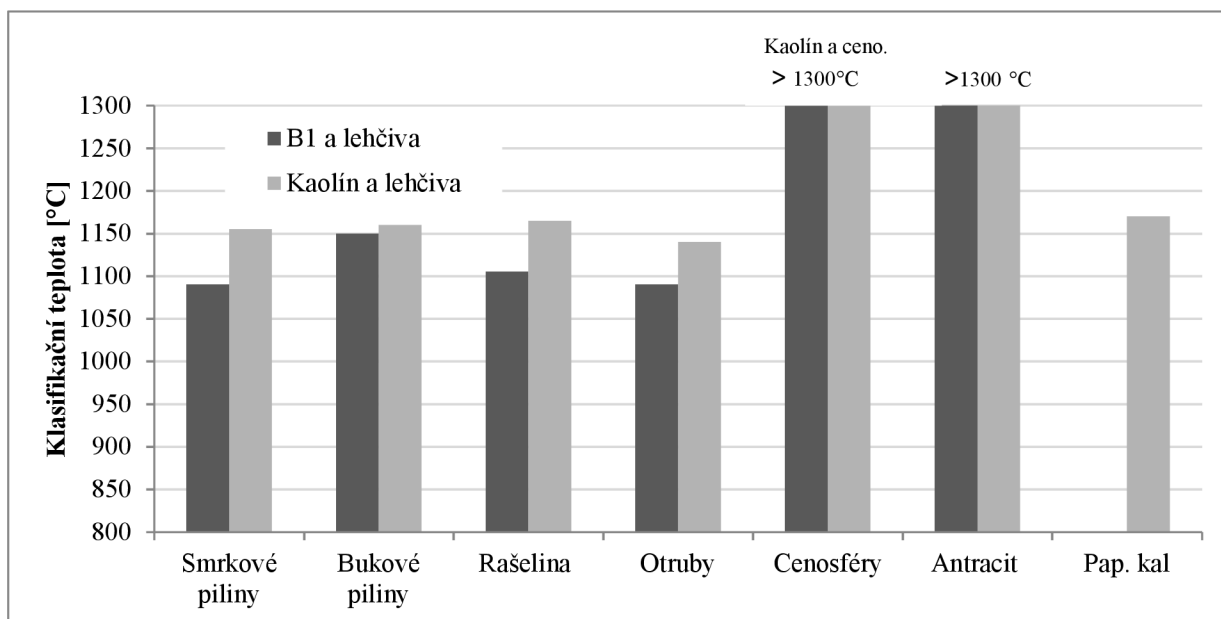
Definováním přesného intervalu vyhořívání jednotlivých lehčiv ze vzorků může vést k snazšímu vysvětlení vlastností vypálených vzorků.

Tabulka 32 - Interval vyhoření a hmotnostní úbytek lehčiv do teploty 1000 °C

Vzorek	Interval vyhoření [°C]	Hmotnostní úbytek lehčiva do teploty 1000 °C [%]
Smrkové piliny	240 - 400	96,6
Bukové piliny	225 - 400	98,0
Rašelina	200 - 325	92,5
Otruby	210 - 340	83,1
Antracit	530 - >1000	21,6
Cenosféry	-	0,8

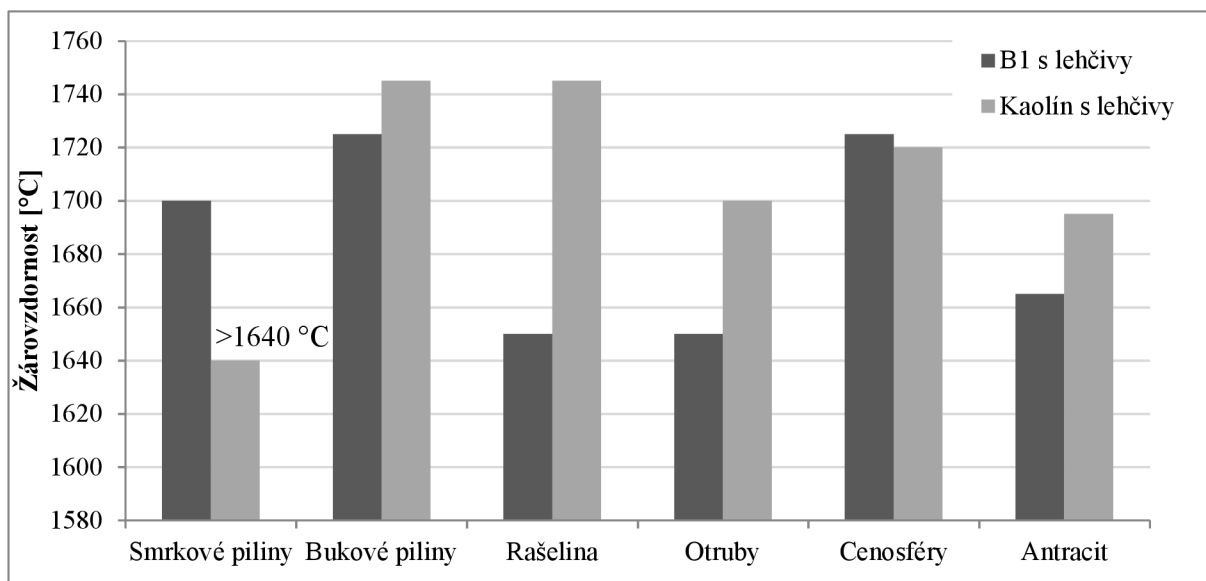
Výsledky jasně ukazují návaznost mezi intervalem vyhořívání jednotlivých lehčiv a objemovou hmotností (případně smrštěním) vypálených vzorků. Čím později lehčivo vyhoří, tím dojde k menšímu smrštění a tedy výsledná objemová hmotnost je také nižší. Dále je možné, že čím menší je hmotnostní úbytek lehčiva do 1000 °C (za předpokladu, že lehčivo vyhořelo), tím více popel vzniklý po vyhoření lehčiva ovlivňuje výsledné vzorky (např. smrštění otrub, či rašeliny).

I přes to, že výrobky s kaolínem mají výrazně nižší objemovou hmotnost, tak jejich klasifikační teplota je mírně vyšší.



Graf 30 – Srovnání klasifikační teploty mezi jilem B1 s lehčivou a kaolínem Sedlec Ia s lehčivou

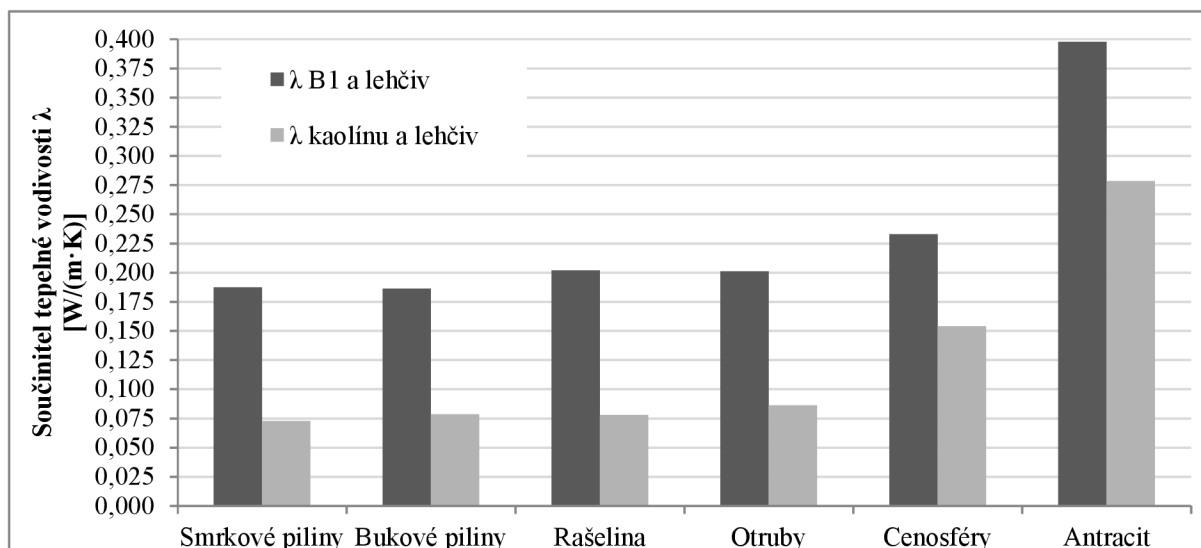
To je zapříčiněno tím, že kaolín má vyšší žárovzdornost a menší slínavost při vypalování.



Graf 31 - Srovnávání žárovzdornosti mezi jilem B1 s lehčivý a kaolínem Sedlec Ia s lehčivý

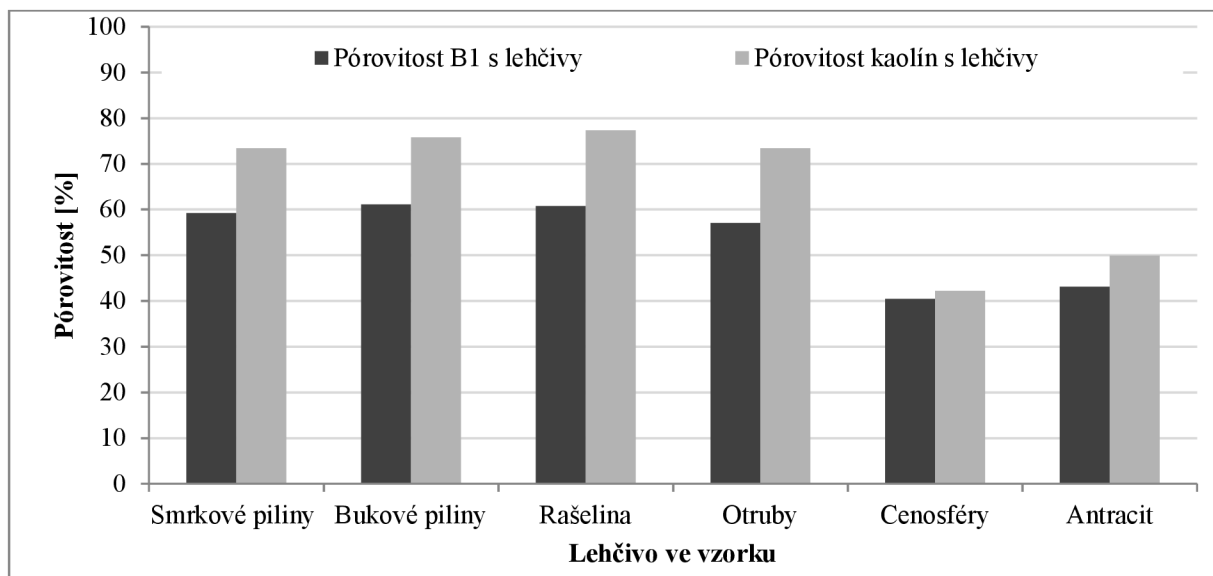
Žárovzdornost kaolínu lehčeného smrkovými pilinami je vyšší než 1640 °C. Vysvětlení proč není uvedena přesná hodnota je v kapitole etapa2, žárovzdornost.

Součinitel tepelné vodivosti klesá s klesající objemovou hmotností a stoupající pórovitostí, proto vzorky s kaolínem a lehčivý vykazují lepší tepelně izolační vlastnosti než vzorky s jilem B1 a lehčivý.

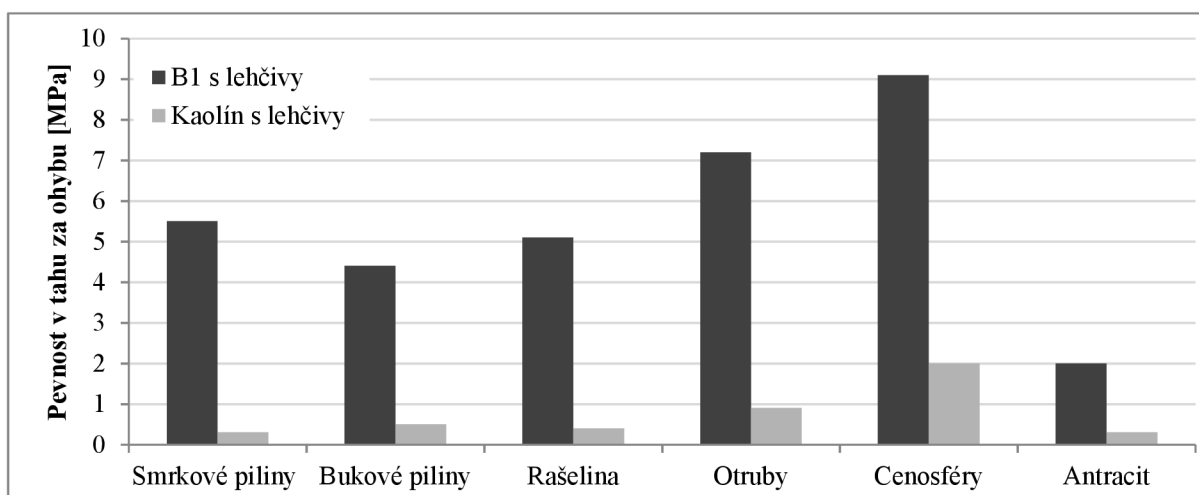


Graf 32 - Srovnání součinitele tepelné vodivosti u vzorků jílů B1 s lehčivý a kaolínem Sedlec Ia s lehčivý

Součinitel tepelné vodivosti je výrazně nižší u vzorků kaolínu s lehčivý, proto i pórovitost u těchto vzorků musí být vyšší než u vzorků s jilem B1 a lehčivý.



Velmi nízká objemová hmotnost a vysoká pórovitost ve vzorcích vytvořených z kaolínu a lehčiv s sebou přináší i jedno velké negativum. Pevnosti v tahu za ohybu klesají na velmi nízké hodnoty a celkově se vzorek stává křehkým.



Graf 33 - Srovnání pevnosti v tahu za ohybu vzorků z jílu B1 s lehčivý a kaolínu Sedlec Ia s lehčivý

Srovnáním všech zkoumaných vlastností je dokázáno, že lehčený šamot se může vyskytovat v mnoha podobách s různými vlastnostmi.

5 Závěr

Po srovnání všech podstatných vlastností žárovzdorného lehčeného šamotu vytvořeného z různých receptur je patrné, že každá přináší své výhody i nevýhody. Vzhledem k velkému množství druhů lehčeného šamotu, by pro vytvoření optimálního výrobku bylo nutné definovat požadované vlastnosti a na základě toho navrhnout nejvhodnější recepturu.

V teoretické části jsou zpracovány odborné články zabývající se lehčením keramického střepu. Dále jsou zde popsány suroviny, které měly později využití v experimentální části. Praktická část práce je rozdělena na dvě etapy. V první jsou vytvářeny vzorky z jílu B1 a lehčiv (smrkové piliny, bukové piliny, rašelina, otruby, papírenský kal, antracit a cenosféry). V druhé části je pojivem kaolín Sedlec Ia, přičemž druhy lehčiv jsou stejné.

Vzorky se vytvářely ručně, poté byly sušeny na podložkách a následně v sušárně při 110 °C. Výpal probíhal dvojím způsobem. Prvním typem byl pomalý výpal, kdy nárůst teplot byl 150°C/hod na 1000 °C s třiceti minutovou výdrží na maximální teplotě. Druhým typem byl rychlý výpal, kdy nárůst teplot byl 10 °C/min až na 1000 °C s třiceti minutovou výdrží na maximální teplotě.

V první fázi byly vytvářeny vzorky s jílem B1 a lehčiv (papírenský kal byl z této etapy vyřazen). Cílem bylo vytvořit vzorky s objemovou hmotností okolo 1000 kg/m³. To se podařilo u všech kromě vzorků lehčených antracitem. Zde byla objemová hmotnost vyšší díky tomu, že během výpalu nedošlo k vyhoření celého objemu lehčiva ze vzorku. Oproti tomu tyto vzorky vykazovaly vynikající výsledky u celkového smrštění, které činilo pouze 2,4 %. Celkové smrštění vzorků bylo ovlivněno množstvím rozdělovací vody a dále vlhkostí, množstvím a intervalem vyhoření lehčiv ze vzorků. Interval vyhořívání otrub a rašeliny byl 200-350 °C, vyhořívání pilin probíhalo v o něco vyšších teplotách (225-400 °C) a vyhořívání antracitu začínalo až při teplotách 500 °C. Čím dříve lehčivo vyhořelo, tím bylo smrštění vyšší. U organických lehčiv obecně docházelo ke zvýšení smrštění i při rychlejším typu výpalu. Výpal ovlivňoval i výskyt černých jader. Čím byl výpal rychlejší, tím patrnější černá jádra byla. Černá jádra ve vzorcích navíc způsobují silnou exotermickou reakci od 500 °C, kdy začínají vyhořívát.

Nevyhoření celého objemu antracitu ze vzorku bylo dokázáno i při kontrakčně dilatační termické analýze, kdy již vypálené vzorky byly zahřívány na teplotu 1300 °C. Tyto vzorky vykazovaly nižší objemovou hmotnost než vzorky vypálené na teplotu 1000 °C. Při zvyšující

se teplotě došlo k vyhoření další části antracitu. Zároveň mají i velmi vysokou klasifikační teplotu, protože při 1300 °C nedošlo k délkovým změnám, které by byly větší než 2 %. Ostatní vzorky s přímými lehčivými měly klasifikační teplotu zhruba 1100 °C. Vzorky s cenosférami vykazovaly velmi příznivý výsledek, kdy délkové změny do 2 % byly stanoveny na 1300 °C. Žárovzdornost všech vzorků se blížila žárovzdornosti jílu B1 (1730 °C), což dokazuje, že popel vzniklý po vyhoření lehčiva ji ovlivňuje jen minimálně.

Součinitel tepelné vodivosti je závislý na objemové hmotnosti a pórovitosti. Nejlepším tepelným izolantem se jeví vzorky lehčené pilinami, kdy λ je $0,1868 \pm 0,0006 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Kromě vzorků lehčených antracitem však všechny vzorky vykazují velmi dobré tepelně izolační vlastnosti.

Tento typ vzorků má na tepelně izolační žárovzdorné výrobky relativně vysoké pevnosti v tahu za ohybu. Nejvyšší mají vzorky lehčené cenosférami (9,1 MPa), což je ovlivněno vlastnostmi cenosfér. Dále jsou hodnoty ovlivněny smrštěním vzorků a tedy slinutím jílu B1. Čím více je jíl slinutý, tím jsou pevnosti vyšší.

V druhé etapě docházelo k vytváření stejného typu vzorků, avšak jíl B1 byl nahrazen kaolínem Sedlec Ia. Receptury byly vytvořeny tak, aby objemový podíl lehčiva byl stejný v jílu B1 i kaolínu Sedlec Ia (jíl a kaolín měly velmi rozdílné sypné hmotnosti). Objemové hmotnosti vzorků se dostaly na nízké hodnoty. Vzorky lehčené smrkovými pilinami vykazovaly objemovou hmotnost nejnižší a to 520 kg/m³, při celkovém smrštění 7,3 %. Mírně vyšších hodnot objemové hmotnosti dosahovaly vzorky lehčené bukovými pilinami, rašelinou a otrubami. Vlastnosti cenosfér ovlivňují výslednou objemovou hmotnost vzorků, která činí 710 kg/m³. Vzorky s antracitem dosahují hodnot 905 kg/m³, což jsou hodnoty výrazně vyšší oproti jiným přímým lehčivům, ale jejich celkové smrštění je pouze 0,3 %. Obdobné smrštění vykazují i vzorky s cenosférami (0,4 %). V druhé etapě nebylo zaznamenáno vyšší smršťování při vyšší rychlosti výpalu.

Měřením teplot ve vzorku bylo zjištěno výrazné zvýšení teploty ve vzorcích lehčených rašelinou a pilinami oproti vzorkům bez lehčiva od teploty 500 °C. Takto silná reakce je způsobena vyhoříváním černého jádra ze vzorku. Matrice z kaolínu Sedlec Ia je více pórovitá a jsou v ní vytvořeny příznivé podmínky pro vyhoření černého jádra. Černá jádra se nevyskytují ani u vzorků vypálených při rychlém výpalu.

Klasifikační teplota vzorků je na tepelně izolační žárovzdorný výrobek s tak nízkou objemovou hmotností velmi příznivá. Přímá lehčiva (krom antracitu) se pohybují okolo hodnoty 1150 °C při délkové změně do 2 %. Vzorky s antracitem a cenosférami dokonce překračují hodnotu 1300 °C.

Žároměrky vytvořené ze stejných směsí jako zkoumané vzorky dosahovaly hodnot blízkých k žárovzdornosti samotného kaolínu Sedlec Ia. Popel vzniklý po výpalu jednotlivých lehčiv ovlivňoval výslednou žárovzdornost minimálně.

Součinitel tepelné vodivosti klesl na velmi nízké hodnoty. Je to ovlivněno velkou pórovitostí struktury. Nejnižších hodnot dosahovaly vzorky lehčené smrkovými pilinami, kdy se λ dostala na hodnotu 0,0727 W/(m·K). Vzorky s antracitem měly λ nejvyšší (0,2783 W/(m·K)). I přes to jsou tyto naměřené hodnoty u všech výrobků mimořádně dobré.

Naopak velkým negativem jsou pevnosti v tahu za ohybu, které jsou velmi nízké. Nejnižší hodnoty vykazují vzorky lehčené smrkovými pilinami a antracitem (0,3 MPa). Nejvyšší hodnoty mají vzorky lehčené cenosférami, které jsou ovlivněny vlastnostmi lehčiva.

Srovnáním výsledků z obou etap bylo zjištěno, že vzorky s jílem B1 mají výrazně vyšší objemovou hmotnost, nižší zdánlivou pórovitost, vyšší součinitel tepelné vodivosti a vyšší pevnosti v tahu za ohybu než vzorky s kaolínem Sedlec Ia. Vzorky také byly více náchylné k tvorbě černých jader a tedy i pálicí křivka u tohoto typu vzorků musí být mnohem propracovanější, aby černá jádra nevznikala. U vzorků s jílem B1 obecně platí, že čím je výpal pomalejší, tím je výskyt černých jader menší.

Pro vytváření vzorků s co nejnížší objemovou hmotností a snadnou regulací výpalu (aby se nevyskytovala černá jádra) jsou dvě možnosti. První je, využít jako pojivo kaolín. V této situaci není nutné nijak zvláště regulovat pálicí křivku, protože pokud se černá jádra vytvoří, tak při teplotě nad 500 °C vznikají v kaolínové matici vhodné podmínky pro jeho vyhoření. Zároveň mají výrobky velmi nízkou objemovou hmotnost a výborné tepelně izolační vlastnosti. Dávka lehčiva zde z hlediska regulace výpalu také není limitována, ale problémem by mohlo být velké snížení pevností. Druhou možností je využít jako pojivo jíl B1, ale zde by bylo nutné provádět výpal déle s ohledem na vyhoření přímého lehčiva ze vzorku bez tvorby černých jader.

Zdroje

- [1] HANYKÝŘ, Vladimír a Jaroslav KUTZENDORFER. *Technologie keramiky*. Hradec Králové: Vega, 2000, 287 s., [10] s. barevných obrazových příloh. ISBN 80-900-8606-3.
- [2] PYTLÍK, Petr a Radomír SOKOLÁŘ. *Stavební keramika: technologie, vlastnosti a využití*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002, 287 s. ISBN 80-720-4234-3.
- [3] HERAINOVÁ, Marcela. *Žárovzdorné materiály*. Praha: Silikátový svaz, 2003, 46 s., [5] s. barev. obr. příl. Učebnice pro střední odborné školy (Silikátový svaz). ISBN 80-903-1134-
- [4] NEVŘIVOVÁ, Lenka. *Speciální keramika: Žárovzdorné materiály, Modul BJ14-M04*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 68 s.
- [5] LANG, Karel. *Žárovzdorné materiály*. Vyd. 1. Praha: ČSVTS - Silikátová společnost České republiky, 2010. ISBN 978-80-02-02244-2.
- [6] SOKOLÁŘ, R. *Keramika, Modul BJ01-M01*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, 176 s.
- [7] BUDNIKOV, Petro Petrovyč a kol. *Technologie keramiky a žárovzdorného zboží*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960, 597 s
- [8] SOKOLÁŘ, Radomír. *Možnosti využití vybraných odpadních látek při tvorbě keramického střepu: Utilization of choice waste materials for the ceramic body formation : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTIMUM, 2008. ISBN 978-80-214-3571-1.
- [28] SOKOLÁŘ, Radomír a Lenka SMETANOVÁ. *Keramika – laboratoře, Modul BJ02-M01*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, 120 s.

Webové zdroje

- [9] *Podpora lokálního vytápění biomasou: Smrk (Picea)* [<http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/buk.pdf>]. VŠB - Technická univerzita Ostrava: Výzkumné energetické centrum, 2011 [cit. 2016-04-22].
- [10] *Podpora lokálního vytápění biomasou: Buk lesní (Fagus sylvatica)* [<http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/buk.pdf>]. VŠB - Technická univerzita Ostrava: Výzkumné energetické centrum, 2011 [cit. 2016-04-22].

[11] Jirásek, J., Vavro, M.: Nerostné suroviny a jejich využití. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3

[12] Antracit. *SH STREAM - Velkoobchod tuhými palivy* [online]. web, 2017 [cit. 2017-09-06]. Dostupné z: <http://www.shstream.cz/antracit>

[13] Rozdělení uhlí. *Těžba a využití černého uhlí* [online]. web, 2011 [cit. 2017-09-06]. Dostupné z: <http://tezba-a-vyuziti-cerneho-uhli.webnode.cz/uhli/rozdeleni/>

[14] BYDŽOVSKÝ, Jiří, Tomáš MELICHAR, Lenka BODNÁROVÁ, Vít ČERNÝ, Šárka KEPRDOVÁ a David PROCHÁZKA. *BJ56 – VYBRANÉ STATĚ Z TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT: Studijní text pro cvičení* [online]. 1. Brno, 2011 [cit. 2017-09-06]. Dostupné z: <http://thd.fce.vutbr.cz/>

[15] Rašelina. *Geologická encyklopedie online* [online]. Česká geologická služba, 2007 [cit. 2017-09-06]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?raselina>

[16] *Rašeliny, jejich využití a ochrana zdrojů*. Brno, 2007. Dostupné také z: <http://ldf.mendelu.cz/ugp/wp-content/ugp-files/attachment/raseliny.pdf>. Studijní materiál. MENDELOVA ZEMĚDĚLSKÁ A LESNICKÁ UNIVERZITA V BRNĚ LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA.

[17] Otruby. https://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavn%C3%AD_strana [online]. web, 2017 [cit. 2017-09-06]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Otruby>

Akademické práce

[18] ERTEL, Tomáš. *Fosilní paliva v ČR*. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUT, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Marek Baláš.

[19] ZEMANOVÁ, Kateřina. *Možnosti zpracování kalu z výroby papíru a celulózy*. Brno, 2008. Diplomová práce. VUT, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jaroslav Boráň.

[27] STOKLASA, Jaroslav. *Kinetika vyhořívání organických látek z keramického materiálu*. Fakulta chemické technologie, 2008. Disertační práce. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Vedoucí práce Jaroslav Kutzendörfer.

Články

[20] SLEJŠKA, Antonín. *Posouzení vhodnosti papírenských kalů k výrobě kompostů a rekultivačních substrátů* [online]. In: . [cit. 2017-09-08]. Dostupné z: <http://biom.cz/data/posudek3.pdf>

[21] HORÁK, Jiří, Zuzana JANKOVSKÁ, Michal BRANC, František STRAKA, Petr BURYAN, Petr KUBESA, František HOPAN a Kamil KRPEC. PROBLEMATIKA STANOVENÍ CHARAKTERISTICKÝCH TEPLŮ TAVITELNOSTI POPELA BIOMASY. *Chemické listy* [online]. **2013**, 502-509 [cit. 2017-09-06]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2013_06_502-509.pdf

[22] MARTÍNEK, Václav a Pavel FILIP. *Skladování a příprava surovin: Mlynářská technologie, svazek 2* [online]. Mlynářské noviny, 2012 [cit. 2017-09-06]. Dostupné z: http://www.svazmlynucr.cz/wp-content/uploads/2014/05/MLYNARSKA-TECHNOLOGIE-2_2014.pdf

[23] SOKOLÁŘ, Radomír. Papírenský kal jako lehčivo cihlářského střepu. *Stavební obzor* [online]. **2010**(10), 299-302 [cit. 2017-09-08]. Dostupné z: <http://www.profesis.cz/files//dokumpdf/sobzor/so102010.pdf>

[24] ABDEL MONEM MOHAMED, Soltan, Kahl WOLF-ACHIM, EL-Raof FAWZIA ABD, El-Kaliouby BAHER ABDEL-HAMID, Mohamed ABDEL-KADER SERRY a Noha ALI ABDEL-KADER. *Journal of Cleaner Production*. : *Lightweight aggregates from mixtures of granite wastes with clay* [online]. , 139-149 [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616000354>

[25] 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. *Journal of Building Engineering* [online]. 2016, **2016**(5), 254-259 [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710216300067>

[26] SUTCU, Mucahit, Savas OZTURK, Emre YALAMAC a Osman GENCEL. Effect of olive mill waste addition on the properties of porous fi red clay bricks using Taguchi method. *Journal of Environmental Management* [online]. 2016, **2016**(181), 185-192 [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479716303620>

[29] ČERNÝ, Radek. *Vliv mineralogického složení jílu Chebské pánve na keramické vlastnosti* [online]. In: . [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://www.silika.cz/index.php/cs/aaa/2-2012/43-vliv-mineralogickeho-slozeni-jilu-chebske-panve-na-keramicke-vlastnosti>

Normy

ČSN 72 1083 (721083) – Termické rozbory keramických surovin

ČSN 72 1074 (721074) – Stanovení optimální a pracovní vlhkosti keramických těst Pfefferkornovým přístrojem

ČSN 72 1565-5 (721565) – Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení délkových změn sušením a pálením

ČSN 72 1565-6 (721565) – Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení ztráty hmotnosti pálením, nasákavosti, zdánlivé pórovitosti a objemové hmotnost

ČSN EN ISO 8894-1 (726047) – Žárovzdorné materiály - Stanovení tepelné vodivosti - Část 1: Metoda topného drátu (křížové uspořádání a uspořádání s odporovým teploměrem)

ČSN EN 993-12 (726020) – Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 12: Stanovení žárovzdornosti

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Význam
RV	Rychlý výpal
DTA	Diferenční termická analýza
DSC	Entalpická termická analýza
TG	Termogravimetrická analýza
DKTA	Kontrakčně dilatační termická analýza
OH	Objemová hmotnost [kg/m ³]
λ	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
W	Vlhkost [%]
d	Deformační poměr [-]
DS	Délková změna sušením [%]
DP	Délková změna pálením [%]
DC	Délková změna celková [%]
PZ	Zdánlivá pórovitost [%]
NV	Nasákavost [%]
ZH	Zdánlivá hustota [%]
R _t	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]

Seznam použitých obrázků, tabulek a grafů

Tabulky

Tabulka 1 - Chemické složení žárovzdorného jílu B1 v %.....	17
Tabulka 2 - Vybrané vlastnosti žárovzdorného jílu B1.....	18
Tabulka 3 - Chemické složení kaolinu v %.....	18
Tabulka 4 - Vybrané vlastnosti kaolinu	18
Tabulka 5 - Chemické složení cenosfér v % [14]	19
Tabulka 6 - Vybrané vlastnosti cenosfér [14]	19
Tabulka 7 - Chemický rozbor smrkového popela [% _{hmotnostní}] [9].....	20
Tabulka 8 - Chemický rozbor bukového popela [% _{hmotnostní}] [10].....	20
Tabulka 9 - Chemické složení a další vlastnosti antracitu [11, 12].....	21
Tabulka 10 - Chemické složení a další vlastnosti rašeliny [11].....	22
Tabulka 11 - Chemické složení popela obilovin [21]	23
Tabulka 12 - Chemické složení popela papírenského kalu [23]	23
Tabulka 13- Vlastnosti vypáleného keramického střepu vzniklého ze směsi C a směsi D [23]	29
Tabulka 14 - Chemické složení surovin a směsí v hmotnostních % [24]	32
Tabulka 15 - Chemické složení popela po shoření kukuřičných klasů a chemické složení jílu v % [25].....	36
Tabulka 16 - Vlastnosti vypáleného keramického střepu s přidavkem různého množství odpadu z oliv [26]	41
Tabulka 17 - Počáteční vlhkost lehčiv	49
Tabulka 18- Dávkování surovin pro vytvoření plastické směsi	50
Tabulka 19 - Smrštění vzorků	51
Tabulka 20 – Objemová hmotnost výlisků, výsušků a výpalků lehčených vzorků	53
Tabulka 21 - Orientační klasifikační teplota vzorků	63
Tabulka 22 - Žárovzdornost vzorků	65
Tabulka 23- Součinitel tepelné vodivosti u jednotlivých vzorků.....	66
Tabulka 24 - Vlastnosti vypáleného keramického střepu	67
Tabulka 25 - Složení směsí	72
Tabulka 26 - Smrštění vzorků	73
Tabulka 27- Objemová hmotnost vzorků.....	74
Tabulka 28 - Orientační klasifikační teplota vzorků.....	81

Tabulka 29 - Žárovzdornost jednotlivých vzorků	82
Tabulka 30 - Součinitel tepelné vodivosti v jednotlivých vzorcích	83
Tabulka 31- Vybrané vlastnosti vzorků	84
Tabulka 32 - Interval vyhoření a hmotnostní úbytek lehčiv do teploty 1000 °C	92

Obrázky

Obrázek 1 - Oxidy a jejich sloučeniny vyhovující pro výrobu žárovzorných materiálů [2]	14
Obrázek 2 - Fázový diagram $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ [4]	15
Obrázek 3 - Diferenčně termická analýza jílu B1 [29].....	17
Obrázek 4 - Mikroskopický snímek cenosfér [8]	19
Obrázek 5 - Natěžený antracit [12]	21
Obrázek 6 - Rašelina v přírodě [16]	22
Obrázek 7 - Termická analýza vzorku papírenských kalů (navážka 1 g) [8]	24
Obrázek 8 - Množství CO_2 a SO_2 vzniklých při výpalu keramického střepu ze směsi C (lehčeno pilinami) a směsi D (lehčeno pilinami a papírenským kalem) [23]	28
Obrázek 9 - DKTA analýza výrobků vytvořených ze směsi C (lehčivem jsou piliny) a ze směsi D (lehčivem jsou piliny a papírenský kal) [23].....	28
Obrázek 10 - Distribuce velikosti pórů vytvořených ze směsi C (lehčivem jsou piliny) a ze směsi D (lehčivem jsou piliny a papírenský kal) [23].....	29
Obrázek 11 - Na fotkách lze vidět, jak vzniká odpad z okrasných kamenů. (a) Řezání bloků pomocí pil a vody, (b) Voda se smíchá s částicemi vytvořených při procesu řezání a pohybuje se v malých kanálech, (c) Produkt uložený v nádržích, (d) Z produktu je lisováním odstraněna voda [24].....	30
Obrázek 12 - Rentgenová difrakční analýza surovin pro výrobu vzorků [24]	31
Obrázek 13 - DTA a TG analýza jílu Helwan [24]	32
Obrázek 14- a) Všechny 6 směsí zaříděno do Rileyho fázového diagramu, b) Fotografie zachycující vysušené a vypálené vzorky ze směsi B6 na různé vypalovací teploty [24].....	33
Obrázek 15 - Objemová hmotnost vybraných zkušebních vzorků [24]	34
Obrázek 16 - Mikrostruktura vzorku B6 po výpalu při 1200 °C. a) Obrázek TLM zobrazující dominantní skelnou fázi poznamenanou oxidy železa, b) Obrázek CL ukazující rozptýlené zbytkové fáze a proměnné póry, c) Obrázek BSE, který ukazuje rozdílné velikosti pórů s rozptýlenými bílými oxidy železa ve sklovině, d) Obrázek BSE zobrazující přiblížení v obdélníkové oblasti [24].....	35
Obrázek 17 - Mikrostruktura vzorku B1 po vypálení na teplotu 1200 °C. a) Obrázek TLM zobrazuje dominantní skelnou fázi, b) Obrázek CL zachycuje rozptýlené zbytkové fáze křemene (červená šipka) a živce (bílá šipka) ve skelné fázi, c) Obrázek BSE ukazuje zaoblené malé póry, d) obrázek BSE zachycuje malé fáze jako jsou oxidy železa [24]	35
Obrázek 18 - Ve sloupci je označení směsí, ze kterých byly vzorky vyráběny. V řádku pod obrázkem je teplota vypalování. Vzorky pod kterými je °C, jsou nevypálené. [25].....	37
Obrázek 19 - a) Smrštění jednotlivých vzorků při dané teplotě výpalu a dávce lehčiva, b) Objemová hmotnost vzorků při dané teplotě výpalu a dávce lehčiva [25]	38
Obrázek 20 - c) Pórovitost vzorků při dané teplotě výpalu a dávce lehčiva, d) Pevnost v tlaku při dané teplotě výpalu a dávce lehčiva [25].....	39
Obrázek 21 - TG analýza pro jíl (obrázek vlevo) a odpad z oliv (obrázek vpravo)	41
Obrázek 22 – a) Snímek odpadu z oliv z elektronového mikroskopu, b) Snímek vypáleného vzorku na 1050 °C s 10 % odpadu z oliv	42
Obrázek 23 - Suroviny sloužící jako lehčiva pro výrobu lehčeného šamotu.....	49

Obrázek 24 - Ukázka vzorků vypálených při pomalém výpalu (vzorky nahoře) a při rychlém výpalu (vzorky dole), přičemž na obrázku a) jde o vzorky lehčené bukovými pilinami b) jde o vzorky lehčené otrubami .	53
Obrázek 25 – Měření teplot ve vzorku během výpalu. Obrázek a) Měření teplot ve vzorcích a současně vykreslování křivky v PC programu, obrázek b) Umístění měřícího termočlánku do vzorku	55
Obrázek 27 - DTA smrkových pilin.....	57
Obrázek 26 – DTA bukových pilin	57
Obrázek 28 – DTA rašeliny	58
Obrázek 29 - DTA otrub	58
Obrázek 30 – DTA cenosfér	59
Obrázek 31 - DTA antracitu.....	59
Obrázek 32 - DTA ze směsi smrkových pilin a jílu B1	60
Obrázek 33 - DTA ze směsi bukových pilin a jílu B1	60
Obrázek 34 - DTA ze směsi rašeliny a jílu B1.....	61
Obrázek 35 – DTA ze směsi otrub a jílu B1	61
Obrázek 36 - DTA ze směsi cenosfér a jílu B1.....	62
Obrázek 37 - DTA ze směsi antracitu a jílu B1.....	62
Obrázek 38 - Žároměrka vytvořená z jílu B1 a smrkových pilin a její deformace v peci při zvyšující se teplotě	64
Obrázek 39 - Žároměrky při teplotě 1680 °C (pod každou žároměrkou je uvedeno jaké lehčivo vzorek obsahuje)	65
Obrázek 40 - Ukázka vytváření vzorků (na fotce vzorky lehčené bukovými pilinami).....	72
Obrázek 41 - Výskyt černého jádra při teplotě výpalu a) 500 °C b) 1000 °C.....	76
Obrázek 42 - DTA směsi z kaolínu Sedlec Ia a smrkových pilin.....	78
Obrázek 43 - DTA směsi z kaolínu Sedlec Ia a bukových pilin.....	78
Obrázek 44 - DTA směsi z kaolínu Sedlec Ia a rašeliny	79
Obrázek 45 - DTA směsi z kaolínu Sedlec Ia a otrub	79
Obrázek 46 - DTA směsi z kaolínu Sedlec Ia a cenosfér	80
Obrázek 47 - DTA směsi z kaolínu Sedlec Ia a antracitu.....	80
Obrázek 48 - Žároměrky deformující se na hranici žárovzdornosti (pod každou žároměrkou je uvedeno lehčivo ve vzorku).....	82
Obrázek 49 - Černá jádra vzorků. Na každém obrázku jsou zobrazeny vzorky s jílem B1 (barva béžová) a vzorky s kaolínem (barva narůžovělá), kdy u každého je zobrazen řez vzorku (levá strana je vzorek z pomalého výpalu, pravá strana je vzorek z rychlého výpalu). Lehčivem je a) smrk, b) buk, c) otruby, d) rašelina	90

Grafy

Graf 1 - Smrštění vzorků sušením, pálením i celkové (lehčivo daného vzorku je uvedeno v legendě grafu)	52
Graf 2 - Srovnání smrštění při pomalém výpalu (nárůst 150°C/hodinu) a při rychlém výpalu (nárůst 10 °C/minutu)	52
Graf 3- Objemová hmotnost výlisků, výsušků a výpalků lehčených vzorků při pomalém výpalu.....	54
Graf 4 - Rozdíly objemové hmotnosti mezi vzorky vypálenými na pomalý výpal a na rychlý výpal.....	54
Graf 5 - Teploty ve vzorcích se smrčkovými pilinami během výpalu na určitých pozicích v peci	56
Graf 6 - Měření teplot ve vzorcích s jednotlivými druhy lehčiv	56
Graf 7- DKTA křivky vzorků s jednotlivými druhy lehčiv	63
Graf 8 – Zhodnocení závislosti součinitele tepelné vodivosti (graf a) na objemové hmotnosti při pomalém výpalu (graf b)	66
Graf 9 - Objemová hmotnost vzorků po pomalém výpalu na 1000 °C (vzorky A) a objemová hmotnost po DKTA při maximální teplotě 1300 °C (vzorky B)	68

Graf 11 - Pórovitost systému vzorků vypálených na teplotu 1000 °C (pórovitost A) a vzorky vypálené na 1300°C (pórovitost B).....	68
Graf 12 - Srovnání objemové hmotnosti (obrázek a) s pórovitostí vzorků (obrázek b) vypálených na dva režimy výpalu (označení RV v legendě značí rychlý výpal)	69
Graf 13 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků A	69
Graf 14 - Smrštění sušení, pálením i celkové jednotlivých vzorků (lehčivo daného vzorku je uvedeno v legendě grafu).....	73
Graf 15 – Srovnání smrštění při pomalém výpalu a při rychlém výpalu (nárůst 10 °C/minutu)	74
Graf 17 - Rozdíly objemové hmotnosti mezi vzorky vypálenými na pomalý výpal a na rychlý výpal.....	75
Graf 16 - Objemová hmotnost výlisků, výsušků a výpalků lehčených vzorků při pomalém výpalu.....	75
Graf 18 - Měření teplot ve vybraných vzorcích	76
Graf 19 - Teploty ve vzorku lehčeného smrkovými pilinami při maximální teplotě výpalu 500 °C	76
Graf 20 - Křivky DTA lehčiv stanovené z měření teplot ve vzorku	77
Graf 21 – DKTA vzorků s jednotlivými druhy lehčiv (označeno v legendě).....	81
Graf 22 - Porovnání součinitele tepelné vodivosti (graf a) s objemovou hmotnostní jednotlivých vzorků (graf b)	83
Graf 23- Objemová hmotnost vzorků po pomalém výpalu na 1000 °C (vzorky A) a objemová hmotnost po DKTA (vzorky B) při maximální teplotě 1300 °C	85
Graf 24 - Nasákavost jednotlivých vzorků vypálených na teplotu 1000 °C (vzorky A) a na teplotu 1300 °C (vzorky B).....	85
Graf 25 - Pevnosti v tahu za ohybu vzorků A	86
Graf 26 - Pórovitost systému vzorků vypálených na teplotu 1000 °C (pórovitost A) a vzorky vypálené na 1300°C (pórovitost B).....	86
Graf 27 - Srovnání celkového smrštění všech vzorků.....	89
Graf 28 - Srovnání objemové hmotnosti vzorků.....	89
Graf 29 - Srovnání rozdílů teplot mezi jílem B1 s lehčivou a kaolínem s lehčivou	91
Graf 30 - Srovnání rozdílů teplot mezi jílem B1 s lehčivou a kaolínem s lehčivou	91
Graf 31 – Srovnání klasifikační teploty mezi jílem B1 s lehčivou a kaolínem Sedlec Ia s lehčivou.....	92

Graf 32 - Srovnávání žárovzdornosti mezi jílem B1 s lehčivou a kaolínem Sedlec Ia s lehčivou	93
Graf 33 - Srovnání součinitele tepelné vodivosti u vzorků jílu B1 s lehčivou a kaolínem Sedlec Ia s lehčivou	93
Graf 34 - Srovnání pevnosti v tahu za ohybu vzorků z jílu B1 s lehčivou a kaolínu Sedlec Ia s lehčivou	94