

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA TECHNOLOGIE STAVEB**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**VLASTNOSTI PRODUKTŮ PO SPALOVÁNÍ
BIOMASY**

202

PAVEL ČADEK

**VEDOUcí BAKALÁŘSKÉ PRÁCE:
ING. ROSTISLAV ŠULC, PH.D.**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne

.....

Pavel Čadek

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat lidem, kteří mi byli velmi nápomocni při vypracování mé bakalářské práce a to zejména vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Rostislavu Šulcovi, Ph.D., za čas strávený konzultacemi a jeho užitečné rady, a dále Ing. Martině Šídlové Ph.D., Ing. Pavolu Rakovi a Ing. Petru Formáčkovi za trpělivost a častou pomoc i nad rámec jejich povinností.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Čadek	Jméno: Pavel	Osobní číslo: 477487
Zadávající katedra: Katedra technologie staveb		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Příprava, realizace a provoz staveb		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Vlastnosti produktů po spalování biomasy</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Properties of products after biomass combustion</u>	
Pokyny pro vypracování: 1. Rešerše ke vzniku popelovin ze spalování biomasy. 2. Charakterizace produktů vzniklých spaováním biomasy (chemické a fyzikální vlastnosti). 3. Produkty ze spalování biomasy jako příměs k cementovým pojivům. 4. Produkty ze spalování biomasy jako příměs k alkalicky aktivovaným materiálům (úletové popílký, metakaolin). 5. Návrh experimentu k ověření základních mechanických a fyzikálních parametrů výrobků s produkty ze spalování biomasy. 6. Vyhodnocení experimentu.	
Seznam doporučené literatury: 1) Berra, M., De Casa, G., Dell'Orso, M., Galeotti, L., Mangialardi, T., Paolini, A.E., Piga, L. 2011. Chapter 10: Reuse of woody biomass fly ash in cement – based materials: leasing tests. In Recycling of biomass ashes, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 133 – 146. ISBN 978-3-642-19353-8. 2) BENSCHHEIDT, N., R. HELA a Asociace pro využití energetických produktů. Příručka Popílek V Betonu: Příručka: Základy Výroby a Použití. 2.přepřac. vyd. Hostivice: ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP, 2013. 3) FEČKO, Peter. Fly Ash. Ostrava: VŠB, 2005 4) ČSN 72 2071. Popílek pro stavební účely - Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 5) ČSN EN 450-1. Popílek do betonu - Definice, specifikace a kritéria ashody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>3.2.2021</u> Termín odevzdání bakalářské práce: <u>16.5.2021</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<p><i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i></p>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá charakterizací produktů ze spalování a spoluspalování biomasy, vyprodukovaných velkými provozy na území České republiky. Provedením zkoušek, dle platné legislativy, byly zjištěny fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti jak samotných vzorků, tak namíchaných směsí s jejich zastoupením. Díky těmto údajům dokážeme provést základní vyhodnocení možností, jak tyto materiály využít ve stavebním průmyslu a jakému výzkumu v této oblasti se nadále věnovat.

Klíčová slova:

Biomasa, úletový popílek, ložový popel, spalování, spoluspalování, vedlejší energetické produkty, pevnost, konzistence, trvanlivost, směs

Abstract

This bachelor thesis focuses on the characterization of the outputs from firing and co-firing of biomass, which are produced by large plants in the Czech Republic. These products were examined according to the current standards based on the physical, mechanical and chemical properties of the ashes and bounded mixtures. Based on the analysis and test methods, it could be able to perform a to evaluation of the utilization of these materials in the construction industry and show directions of the future development.

Keywords

Biomass, fly ash, bottom ash, firing, co-firing, by-products, strength, flowability, durability, mixture

Obsah

1	Úvod.....	11
1.1	Cíle bakalářské práce.....	11
2	Teoretická část.....	12
2.1	Druhy biomasy.....	12
2.1.1	Přírodní biomasa	12
2.1.2	Reziduální biomasa.....	12
2.1.3	Energetické plodiny	13
2.2	Vlastnosti biomasy	14
2.2.1	Voda v biomase	14
2.2.2	Obsah popela v biomase	15
2.3	Spalování biomasy.....	16
2.3.1	Roštové spalování.....	16
2.3.2	Fluidní spalování.....	16
2.3.3	Práškové spalování	17
2.3.4	Spoluspalování biomasy	18
2.4	Vlastnosti popílku z biomasy.....	18
2.5	Popílek z biomasy v betonu.....	20
2.5.1	Prokázání vhodnosti popílku ze spoluspalování.....	21
2.5.2	Koncepce k-hodnoty pro popílek, křemičitý úlet a mletou granulovanou vysokopecní strusku.....	22
2.6	Požadavky na popílek pro stavební účely.....	23
2.7	Požadavky na chemické vlastnosti popílku	24
2.7.1	Ztráta žíháním.....	24

2.7.2	Chloridy.....	25
2.7.3	Oxid sýrový	25
2.7.4	Volný oxid vápenatý	25
2.7.5	Aktivní oxid vápenatý	25
2.7.6	Aktivní oxid křemičitý	25
2.7.7	Oxid křemičitý (SiO ₂), oxid hlinitý (Al ₂ O ₃) a oxid železitý (Fe ₂ O ₃)	25
2.7.8	Celkový obsah alkálií.....	26
2.7.9	Oxid hořečnatý	26
2.7.10	Rozpustný fosforečnan	26
2.8	Požadavky na fyzikální vlastnosti	26
2.8.1	Jemnost.....	26
2.8.2	Index účinnosti	27
2.8.3	Objemová stálost.....	27
2.8.4	Měrná hmotnost.....	27
2.8.5	Počátek tuhnutí	28
2.8.6	Požadavek na množství vody.....	28
2.9	Jiné požadavky dle ČSN EN 450-1.....	28
2.9.1	Požadavky na trvanlivost.....	28
2.9.2	Uvolňování nebezpečných látek a radioaktivní záření	29
2.10	Dosavadní stav poznání	29
2.10.1	Vliv popílku z biomasy na zpracovatelnost betonu.....	29
2.10.2	Vliv popílku z biomasy na objemovou hmotnost betonu.....	30
2.10.3	Vliv popílku z biomasy na pevnost betonu.....	31

2.10.4	Trvanlivost betonu s příměsí popílku z biomasy	32
2.11	Geopolymery	33
2.11.1	Geopolymerní beton	33
2.11.2	Popílek z biomasy pro použití v geopolymerním betonu	34
3	Praktická část	35
3.1	Vstupní materiály	35
3.1.1	Cement	35
3.1.2	Voda	35
3.1.3	Písek	35
3.1.4	Popílky	35
3.2	Metody laboratorních zkoušek	36
3.2.1	Stanovení chemické analýzy – XRF	36
3.2.2	Stanovení chemické analýzy – XRD	37
3.2.3	Stanovení velikosti částic – granulometrie	37
3.2.4	Stanovení indexu účinnosti	38
3.2.5	Stanovení normální konzistence	41
3.2.6	Stanovení objemové stálosti	42
3.2.7	Stanovení počátku a konce doby tuhnutí	43
3.2.8	Stanovení sypané hmotnosti volně sypané a setřesené	44
3.2.9	Stanovení ztráty žíháním	45
3.2.10	Stanovení měrné hmotnosti	46
3.2.11	Stanovení měrného povrchu	48
3.2.12	Stanovení výluhů vzorků popílků a maltových směsí	50
4	Výsledky a diskuze	52

4.1	Fyzikální a mechanické vlastnosti.....	52
4.1.1	Stanovení velikosti částic.....	52
4.1.2	Stanovení indexu účinnosti	54
4.1.3	Stanovení normální konzistence	56
4.1.4	Stanovení objemové stálosti	57
4.1.5	Stanovení počátku a konce doby tuhnutí.....	57
4.1.6	Stanovení sypné hmotnosti volně sypané a setřesené	58
4.1.7	Stanovení ztráty žiháním	58
4.1.8	Stanovení měrné hmotnosti.....	59
4.1.9	Stanovení měrného povrchu	60
4.2	Chemické vlastnosti.....	61
4.2.1	Stanovení chemického složení	61
4.3	Zdravotní nezávadnost	67
4.3.1	Stanovení výluhů vzorků popílků a maltových směsí.....	67
5	Shrnutí.....	72
6	Závěr	74
	Použitá literatura.....	76
	Seznam tabulek	81
	Seznam grafů.....	82
	Seznam obrázků	82

1 Úvod

Spalování biomasy je nejtradičnější způsob získávání energie. Až do průmyslové revoluce bylo nejtypičtějším palivem dřevo. S příchodem parních strojů a větších energetických nároků společnosti bylo nutné přejít na alternativní palivo, jímž se stalo uhlí. Dnes jsme se dostali do období „návratu ke kořenům“. Energetické nároky společnosti sice neustále stoupají, avšak ještě s větším tempem sílí požadavky na udržitelnou výrobu energie. V současné době ovšem nejsme schopni nahradit veškeré energetické zdroje, čerpající energii ze spalování uhlí, „zelenou energií“ ze slunce, větru či vody. Proto se v současné době ve velkém měřítku přechází na spalování či spoluspalování biomasy. Emise CO₂, vznikající jejím spalováním, jsou zhruba na stejných hodnotách jako CO₂, pohlcené spálenými rostlinami za jejich života. Díky tomu můžeme spalování biomasy označit za emisně neutrální zdroj energie.

Hlavními cíli této práce je zmapovat vlastnosti popílků produkovaných v České republice spalováním a spoluspalováním biomasy a nastínit možnosti jejich využití ve stavebnictví.

1.1 Cíle bakalářské práce

- Rešerše ke vzniku popelovin ze spalování biomasy.
- Charakterizace produktů vzniklých spalováním biomasy (chemické a fyzikální vlastnosti).
- Produkty ze spalování biomasy jako příměs k cementovým pojivům.
- Produkty ze spalování biomasy jako příměs k alkalicky aktivovaným materiálům (úletové popílků, metakaolin).
- Návrh experimentu k ověření základních mechanických a fyzikálních parametrů výrobků s produkty ze spalování biomasy.
- Vyhodnocení experimentu

2 Teoretická část

2.1 *Druhy biomasy*

Biomasa je materiál přírodního původu. Její původ může být živočišný, anebo rostlinný. Jedná se o jeden z nejrozmanitějších zdrojů obnovitelné energie, jenž může být využit na výrobu elektřiny a tepla.

Biomasu pro výrobu energie můžeme rozdělit do tří základních skupin:

- Přírodní biomasa
- Reziduální biomasa
- Energetické plodiny

[5]

2.1.1 *Přírodní biomasa*

Je produkována přirozeně, bez lidského zásahu, v podobně úprav či vylepšování vlastností. Mezi hlavní produkty přírodní biomasy patří zejména odpad vznikající během prořezávání a kácení lesů, palivové dřevo, větve, jehličí nebo listí. [5]

2.1.2 *Reziduální biomasa*

Intenzivní těžba přírodní biomasy není v souladu se snahami o ochranu životního prostředí. Na druhou stranu, během zpracovávání přírodních produktů vzniká velké množství odpadů, pro které je přeměna na jeden z druhů energie dobrým způsobem využití. Využívání odpadů vznikajících lidskou činností je jeden z hlavních kroků k udržitelnosti. Tímto způsobem můžeme zásadně snižovat potřebu skládek a zároveň zvyšovat procento energie získané z obnovitelných zdrojů. [5]

Podle tohoto klíče můžeme reziduální biomasu charakterizovat jako odpad či vedlejší produkty zemědělství, chovu zvířat, zpracovávání potravin a dalších. Obvykle můžeme reziduální biomasu rozdělit do dvou následujících skupin:

- **Suchá reziduální biomasa** – pochází z agroprůmyslu, lesnictví, potravinového průmyslu a zpracování dřeva. Odpad z těchto odvětví je produkován ve formě pevných zbytků jako jsou prach, vylisované zbytky potravin, hobliny nebo sláma. [5]
- **Vlhká reziduální biomasa** – pod tímto názvem najdeme odpad, jenž vzniká například v procesu zpracování odpadních vod, chovu zvířat či průmyslové výroby. [5]

2.1.3 Energetické plodiny

Další varianta biomasy se získává z plodin pěstovaných za účelem získání zdroje energie. Jejich klíčové vlastnosti jsou schopnosti růst i v méně úrodné půdě, odolnost vůči chorobám nebo suchu. Jednou z nejdůležitějších vlastností energetických plodin je předvídatelnost jejich růstu. Díky této vlastnosti jsme schopni plánovat jejich dodávky.

- **Olejnate plodiny** – jedná se o plodiny využívané nejčastěji pro výrobu bionafty, ale v některých případech jsou přímo spalovány pro získávání energie. Například jsou to řepka olejná, konopí, slunečnice a další. [5]
- **Škrobno–cukernaté plodiny** – jejich hlavní účel v průmyslu byl nalezen v produkci bioethanolu, využívaného jako paliva. Zejména se jedná o brambory, cukrovou řepu, obilí (zrno), topinambur, cukrovou třtinu a kukuřici.
- **Lignocelulózové plodiny** – jejich název byl vytvořen podle jejich dvou hlavních součástí, jimiž jsou lignin a celulóza. Dále se dělí na dřeviny (vrba, topol, olše, akát), obiloviny, travní porosty (sloní tráva, chrastice) a ostatní rostliny. Převážně jsou určeny pro spalování a následnou produkci tepla a elektřiny. Druhý způsob využití je výroba biopaliv. [6] [5]

2.2 Vlastnosti biomasy

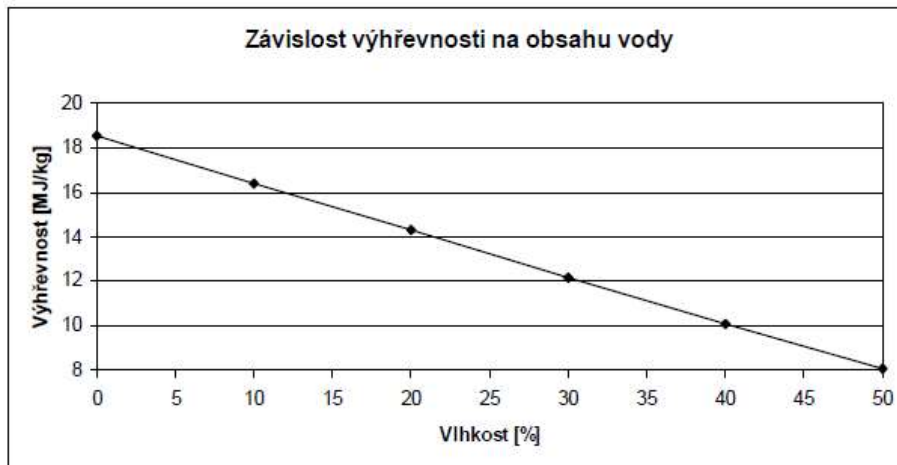
Vlastnosti biomasy jsou klíčové pro její následné použití. Na základě analýzy vlastností jsou navrhovány systémy spalování i navazující systémy pro výrobu energie. Stejně jako u tradičních druhů paliv, tak i u biomasy máme základní ukazatele její kvality. Zejména se mezi ně řadí obsah vody, chemické složení hořlaviny paliva, obsah popela, obsah prchavé hořlaviny a výhřevnost [7]. Složení biomasy není závislé pouze na druhu vegetace, ze které pochází, ale také na půdě a plynech nacházejících se v místě růstu a následném uskladnění biomasy. [9]

Tab.č.1 Průměrné složení biomasy [7]

Složení látek	dřevní štěpky	sláma	nedřevní biomasa
voda	50	12	12
popel	0,4	4	4
uhlík	26	44	43,7
vodík	3	4	4,8
kyslík	20,3	34,7	34,3
dusík	0,05	0,9	0,32
síra	0,25	0,2	0,25
chlór	0	0,2	0,13
výhřevnost [MJ/kg]	8,04	14	18
hustota [kg/m ³]	110	130	150

2.2.1 Voda v biomase

Biomasa má obvykle vysoký a proměnný obsah vlhkosti. Avšak na obsahu vody v palivu je přímo závislá jeho výhřevnost, viz *Graf č.1*, a zároveň vyšší obsah vody negativně ovlivňuje celý spalovací proces. Vzniká zvýšené množství spalin s vlivem na komínovou ztrátu. Vzhledem k výše zmíněným problémům se snažíme pro spalování využívat zdroje s co nejnižším obsahem vody. Vlhkost materiálu je nejvíce ovlivněna jeho původem. Obvykle se vyznačuje vyšší vlhkostí palivo dodané z dřezpracujícího průmyslu, než palivo vzniklé zemědělskou činností. [7] [8]



Graf č.1 Závislost výhřevnosti na obsahu vody v biomase [8]

2.2.2 Obsah popela v biomase

Jedna z nevýhod spalování je vznik vedlejších produktů, jako jsou popel, popílek, případně struska. Tyto produkty ovlivňují proces přeměny paliva na energii snížením účinnosti spalování, zvyšují potřebu čištění a údržby kotle a znemožňují lepší využití biomasy jako paliva pro získávání energie [5]. Popel je podíl paliva, který získáváme jeho dokonalým spálením. Vzniká z minerálních složek obsažených ve spalovaném palivu, které nazýváme popeloviny. Při spalování se popeloviny rozkládají a těkavé látky přecházejí do spalin.

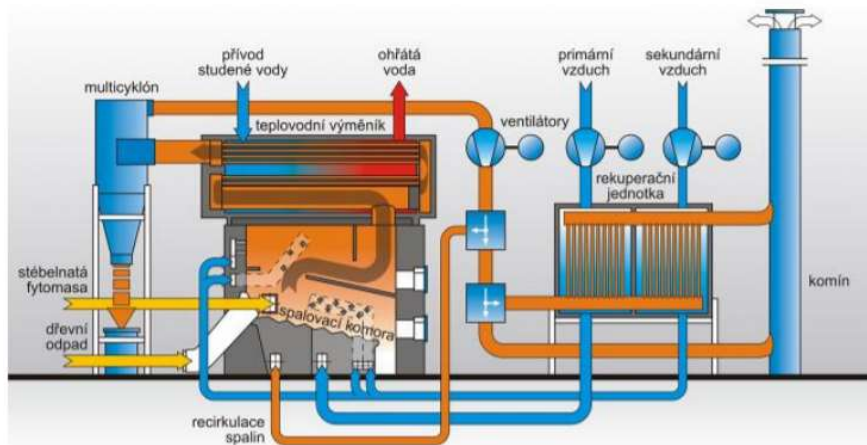
Při spalování je důležité se postarat o to, aby teplota spalování v kotli nebyla vyšší než teplota tavení popelovin. V opačném případě by docházelo k nežádoucímu vzniku strusky a zvyšovala by se potřeba čištění kotle. [8]

Obsah popela v biomase je v porovnání s ostatními palivy nízký (obsah popela v černém uhlí 20–30 %). Obecně můžeme říci, že v případě dřeva se pohybuje mezi 0,6 - 1,6 %, v případě kůry se můžeme dostat na 3 %. Je to zapříčiněno především tím, že kůra pohlcuje nečistoty z ovzduší a následně se do ní dostávají nečistoty i během těžby a zpracování dřeva [7][8].

2.3 Spalování biomasy

2.3.1 Roštové spalování

Spalování na roštu je nejrozšířenější způsob spalování biomasy. Při tomto druhu spalování, pokud je správně navrženo a řízeno, je biomasa homogenně uložena na roštu a materiál se pomalu posouvá kotlem. Díky tomu může vzduch do směsi proudit skrz otvory v roštu rovnoměrně a tím napomáhat lepšímu hoření. V případě nerovnoměrného hoření může docházet ke vzniku nežádoucí strusky, tvorbě vyššího množství úletového popílku a zvýšení potřeby dodávaného vzduchu pro kompletní spálení paliva. Spalování na roštu je vhodné i pro spalování hrubých a částečně nespalitelných částic s vysokým obsahem vlhkosti. Lze při něm spalovat mnoho druhů biomasy, ale není vhodné kombinovat spalování dřeva a slámy, obilovin či trávy, z důvodu jejich odlišného chování během spalování, nízké vlhkosti a nízkého bodu tání popela. Jeho nevýhodou je i nižší účinnost oproti dalším způsobům spalování. [1] [2]

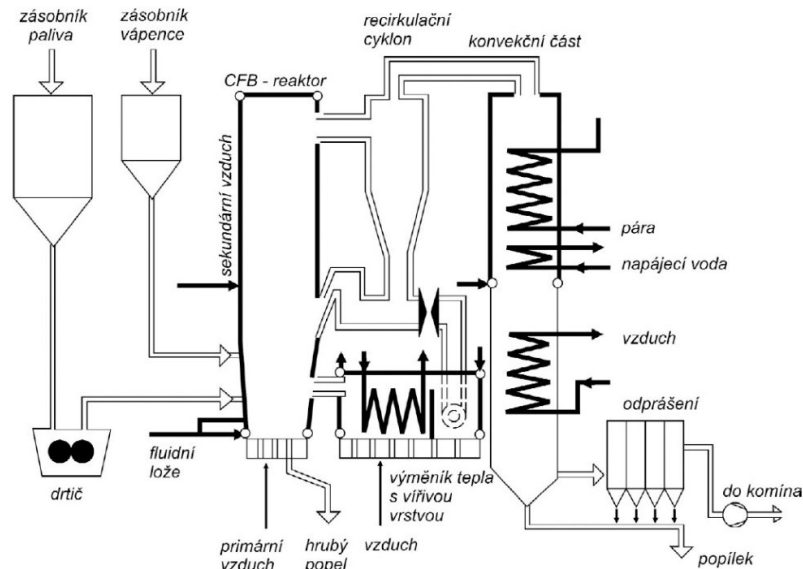


Obr. č.1 Roštové spalování biomasy [3]

2.3.2 Fluidní spalování

Spalování ve fluidním loži je modernější metoda než metoda spalování na roštu. Dosahujeme díky ní vyšší účinnosti při současném snížení ekologické zátěže. Díky spalování při nižší teplotě zároveň dochází ke snížení emisí NO_x a SO_x,

vylučovány během spalování. Biomasa je smíchána s médiem (nejčastěji s pískem) a přiváděným vzduchem. Nižší teplota v loži umožňuje udržení biomasy v částečně plynném skupenství a metoda může díky tomu být použita i pro relativně hrubý a vlhký materiál (v porovnání s práškovým spalováním). Nevýhodu této metody můžeme spatřovat ve složitějším nastavení, jenž je potřebné k udržení směsi ve fluidním stavu. [1]



Obr. č.2 Fluidní kotol s cirkulující vířivou vrstvou a chladičem popílku [4]

2.3.3 Práškové spalování

Práškové metoda je používána převážně pro spalování uhlí. U spalování biomasy se s ní můžeme setkat pouze výjimečně, a to nejčastěji při velkokapacitním spalování.

Jeden ze zásadních problémů spatřujeme v potřebě rozemletí paliva na prášek, což je možné například u uhlí. Avšak produkty složené z rostlinných materiálů, jako dřevo, sláma a jiné, nám tuto možnost nedávají. Pokud se některé provozy dovedou s tímto problémem vypořádat, tak pouze za předpokladu dokonale suché biomasy. Využívání biomasy v práškových kotlích skýtá ještě další problém. Vyšší teplota spalování, okolo 1250 °C [3], způsobuje vznik nežádoucí strusky. I kvůli tomu

je v těchto zařízeních často využito spoluspalování s uhlím, jelikož uhlí svými chemickými vlastnostmi vyvažuje problémy vznikající vysokým obsahem chloridů v biomase. [1]

2.3.4 Spoluspalování biomasy

Spoluspalování biomasy probíhá v tradičních typech kotlů a i díky tomu se při něm nevyskytují zásadní problémy. Napomáhá tomu také udržování poměru spálené biomasy na nízké úrovni. Pokud se však dostaneme přes 10% biomasy v celkovém množství spalovaného paliva, látky obsažené v uhlí ztrácí své schopnosti neutralizovat korozivní sloučeniny a tím bránit nadměrné tvorbě strusky.

Pokud se podíváme na spoluspalování biomasy společně s uhlím z pohledu využitelnosti získaného popílku, tak již 10-20% zastoupení biomasy ve spalované směsi výrazně ovlivňuje jeho možnosti využití ve stavebnictví. Hlavními důvody jsou vyšší obsahy alkalických sloučenin a obsah větších frakcí nespáleného uhlíku.

2.4 Vlastnosti popílku z biomasy

Popel můžeme podle jeho vzniku rozdělit do dvou skupin:

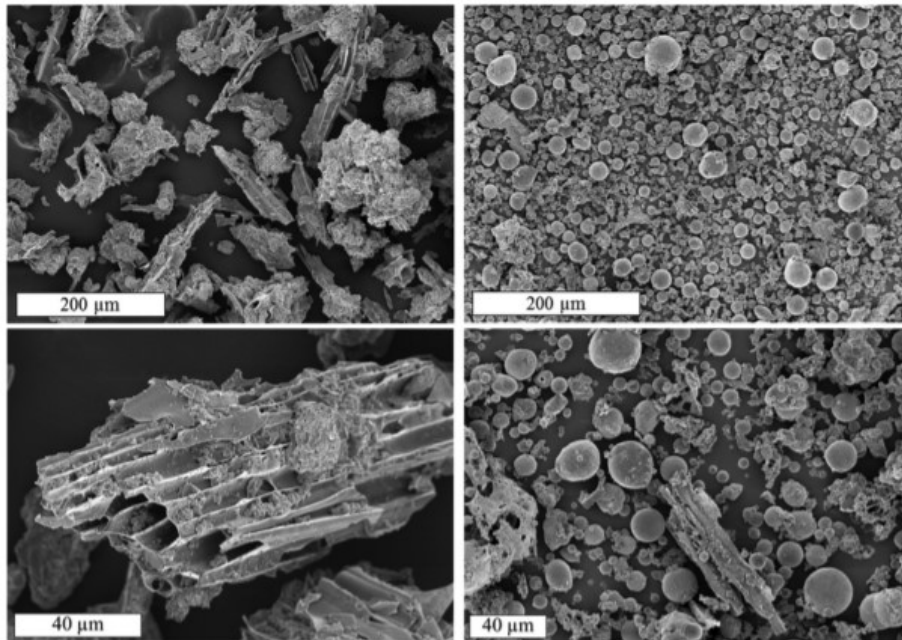
- **Ložový popel (Bottom ash)** – obsahuje i hrubé částice a je složen současně z úplně spáleného paliva a částečně spáleného paliva. Vzniká ve spalovací komoře. Obsahuje písčité částice, převážně složené z křemene, často smíchaného s minerálními částicemi obsaženými v biomase. Ty jsou nejčastějším důvodem tvorby strusky, vzhledem k tomu, že snižují teplotu tání popela. Velkým omezením ve využití popelů je vysoká hodnota pH, způsobená vysokým obsahem alkalických kovů. [5] [18]
- **Úletový popílek (Fly ash)** – je zachycován ze spalin mimo spalovací komoru. Jedná se o nejjemnější částice popelu (popílek). Je odlučován ze spalin pomocí speciálně navržených filtrů (elektrostatických, textilních), díky kterým snižujeme emise vypouštěné do atmosféry. Ve většině případů se v něm vyskytuje větší množství nevázaných těžkých

kovů (Cd a Zn), než v ložovém popelu. Vyšší hodnoty těžkých kovů, zaznamenávají u popílků s původem z dřevní biomasy, jsou často způsobeny nátěry a impregnací, používanými k úpravě dřeva. Druhou příčinou vyššího obsahu těžkých kovů je podle Biedermanna [17] odpaření a následná kondenzace a navázání těžších a těžkých kovů (Cd a Zn) na povrchu částic úletového popela. Tyto faktory způsobují složitější následné využívání úletového popílku. Ve většině případů se setkáváme u úletového popílku původem ze slámy vyššího podílu draslíku. Pokud je jeho původ ze dřeva, můžeme se setkat spíše s vyšším podílem vápníku a hořčíku. Na rozdíl od ložového popílku se v úletovém popílku z velkých zařízení často vyskytuje močovina či amoniak. Je to zapříčiněno používáním technologie katalytické redukce NO_x, které tyto látky využívají jako redukční činidlo. [5] [15] [17]

Množství a kvalita popelu jsou nejvíce ovlivněny vlastnostmi biomasy, způsobem spalování a nakládáním s popelem při dalším zpracování. Dle doposud získaných informací lze vyvozovat následující závěry.

Spalování dřeva produkuje menší množství popela než spalování rostlinné biomasy, odpadu ze zemědělství nebo kůry. [2]

Teplota a způsob spalování má velký vliv na konečné složení úletového i ložového popelu. Zejména ovlivňují množství organických částic. [5]



Obr. č.3 Příklad popílku ze spalování biomasy (vlevo) a spoluspalování s uhlím (vpravo) [22]

2.5 Popílek z biomasy v betonu

Popílek lze do betonové směsi přimíchávat za různým účelem. Při jeho využití jako náhrady kameniva doplňuje nejjemnější frakce a může tak zlepšovat vlastnosti výsledného betonu. Druhá možnost je jeho použití jako náhrady cementu.

Hlavním problémem, který se vyskytuje při využívání popílku z biomasy v betonu, je nestálost jeho složení. I kvůli tomu není jeho využívání v betonu současnou legislativou povoleno. Evropský standard ČSN EN 450-1 dovoluje použití popílku z biomasy jen v případě spoluspalování s uhlím. Minimální procento hmotnosti suchého uhlí nesmí být menší než 60 %, nebo 50 %, když spoluspalované materiály jsou jenom z přírodního dřeva. Maximální poměr popílku ze spoluspalovaných materiálů nesmí být větší než 30 % získaného výpočtem daným normou [10]. Při nesplnění požadavků daných normou ČSN EN 450-1 je možné použití popílku jako příměs druhu II. Dle ČSN EN 206+A1 je příměs druhu II specifikována jako jemně zrnitý anorganický pucolánový nebo latentně hydraulický materiál, který se může přidávat do betonu za účelem zlepšení jeho určitých vlastností nebo docílení

speciálních vlastností [10]. V současné době je zjištěno, že částečná náhrada kameniva či cementu je možná za současného udržení pevnosti, pružnosti a zpracovatelnosti na akceptovatelné hladině, a to za předpokladu pouze částečné náhrady. Abychom překonali problémy, které se vyskytují při zapracovávání popílku z biomasy do betonu, je třeba získat další informace o vlastnostech popílků ze spalování biomasy studiem daných materiálů.

Mezi hlavní problémy se řadí vysoký obsah alkálií a chloridů, které mohou mít v dlouhodobém horizontu vliv na korozi betonu. Maximální možný obsah látek negativně ovlivňující vlastnosti betonu je dán normou ČSN EN 450-1. [10]

2.5.1 Prokázání vhodnosti popílku ze spoluspalování

Vhodnost popílku získaného spalováním uhlí spolu se spoluspalovanými materiály, uvedenými v *Tab.č.2*, musí být prokázána a dokumentována výrobcem. Musí být provedeno počáteční spoluspalování ve spalovacím zařízení s největším zamýšleným množstvím spoluspalovaného materiálu. K prokázání vhodnosti se musí odebrat reprezentativní vzorek popílku z tohoto spoluspalování (viz kapitola 7 v EN 450-1).

Vhodnost popílku získaného spoluspalováním s jedním z materiálů, které jsou uvedeny v *Tab.č.2*, je prokázána, jestliže se docílí shoda s požadavky uvedenými v kapitolách 2.7, 2.8 a 2.9. [10]

1	Rostlinný materiál jako jsou dřevěné třísky, sláma, olivové skořápky a jiná rostlinná vlákna
2	Surové dřevo a vypěstovaná biomasa
3	Masokostní moučka
4	Městské odpadky
5	Papírový odpad
6	Ropný koks
7	Popílek z tekutého a plynného paliva

Tab.č.2 Druhy spoluspalovaných materiálů [10]

2.5.2 Koncepce k-hodnoty pro popílek, křemičitý úlet a mletou granulovanou vysokopecní strusku

Koncepce k-hodnoty je předepsaný postup. Je založen na srovnání posuzování trvanlivosti (nebo, je-li to vhodné, pevnosti jako náhradního kritéria pro trvanlivost) referenčního betonu s cementem „A“ se zkouškami betonu, ve kterém je část cementu „A“ nahrazena příměsí, která se započítává do vodního součinitele.

Koncepce k-hodnoty umožňuje vzít v úvahu příměsi typu II při:

– nahrazení vodního součinitele, tj. poměru voda/cement součinitelem voda/(cement + k × příměs); a

– množství (cement + k × příměs) nesmí být menší než požadavek na minimální obsah cementu podle stupně vlivu prostředí (viz 5.3.2 v ČSN EN 206+A1).

Koncepce k-hodnoty pro popílek podle EN 450-1

(1) Pro beton s cementem CEM I a CEM II/A podle EN 197-1 je povolena k-hodnota 0,4.

(2) Pro beton s cementem CEM I musí maximální množství popílku, které lze započítat, vyhovovat požadavku hmotnostního poměru:

$$\text{popílek/cement} \leq 0,33.$$

(3) Pro beton s cementem CEM II/A musí maximální množství popílku, které lze započítat, vyhovovat požadavku hmotnostního poměru:

$$\text{popílek/cement} \leq 0,25.$$

(4) Jestliže se přidává větší množství popílku, pak se přebývající část nemůže brát v úvahu pro výpočet součinitele voda / (cement + k × popílek) ani pro minimální obsah cementu.

2.6 Požadavky na popílek pro stavební účely

Požadavky na popílky využívané pro stavební účely jsou specifikovány v několika normách. Za hlavní považujeme normu ČSN EN 450-1 Popílek do betonu Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Tato evropská norma stanovuje požadavky na chemické a fyzikální vlastnosti i postupy kontroly jakosti pro křemičitý popílek pro použití jako příměs druhu II pro výrobu betonu, který vyhovuje EN 206-1 [10]. Na tuto norma návazná ČSN EN 450-2 Popílek do betonu – Část 2: Hodnocení shody, řeší shodu popílků s požadavky z normy ČSN EN 450-1. Normou doplňující celkové požadavky na fluidní popílky je norma ČSN 72 2080 Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely – Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení.

V obou částech výše zmíněné normy ČSN EN 450 najdeme odkazy na evropskou nebo národní normu. Tou hlavní je norma ČSN 72 2071 Popílek pro stavební účely – Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení. Tato norma uvádí postupy pro stanovení chemických, fyzikálně-chemických, mineralogických, fyzikálně-mechanických vlastností a postupy a kritéria ekologických vlastností včetně systému kontroly pro popílky pro stavební účely. Norma určuje vlastnosti popílků, které jsou potřebné k hodnocení popílků k různým stavebním účelům a předepisuje jednotlivé metody zkoušení těchto vlastností, které specifikuje soubor norem ČSN 72 2072 [27].

Jedny z dalších norem navazujících na normu ČSN EN 450-1 jsou i normy ČSN EN 451-1 Metody zkoušení popílku – Část 1: Stanovení obsahu volného oxidu vápenatého a ČSN EN 451-2 Metody zkoušení popílku – Část 2: Stanovení jemnosti proséváním za mokra.

Existuje značné množství norem, na které se při práci s popílky odkazujeme. Mezi ně patří například normy jako ČSN EN 196-(1-11) Metody zkoušení cementu, ČSN EN 197-1 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití, ČSN EN 197-2 Cement-Část 2: Posuzování a ověřování stálosti vlastností, a v neposlední řadě norma ČSN EN 206+A1 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.

V praktické části této práce bylo vycházeno z požadavků uvedených v normě ČSN EN 450-1 Popílek do betonu-Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody a norem na ní návazných.

2.7 Požadavky na chemické vlastnosti popílku

Chemické složení se vyjadřuje v procentech hmotnosti suchého popílku. Při použití zkušebních metod uvedených v kapitole 13 EN 196-2:2005 se provedou následující úpravy:

a) při rozkladu vzorku peroxidem sodným (13.2 v EN 196-2:2005) se použije teplota v pícce 550 °C a udržuje se po dobu 60 minut. Měření času začíná při dosažení teploty 540 °C;

b) při rozpouštění taveniny (13.2 v EN 196-2:2005), se pokračuje ve zkoušce, i když roztok není zcela čirý;

c) k rozložení zbytku po odkouření (13.7 v EN 196-2:2005) se přidají 2g kyselého síranu draselného místo směsi uhličitanu sodného/chloridu sodného. [10]

2.7.1 Ztráta žiháním

Ztráta žiháním se musí stanovit podle zásad metody uvedené v EN 196-2, s tím, že žihání se provádí po dobu 1 hodiny a výsledek musí být v limitech uvedených níže pro jednotlivé kategorie:

Kategorie A: Ne více než 5,0 % hmotnosti

Kategorie B: Ne více než 7,0 % hmotnosti

Kategorie C: Ne více než 9,0 % hmotnosti

Důvodem tohoto požadavku je limitovat zbytky neshořelého uhlí v popílku. Proto je dostačující přímé měření množství zbytku neshořelého uhlí v popílku a zjistit, zda toto množství je v limitu výše uvedené specifikované kategorie. Obsah neshořelého uhlí se stanoví podle ISO 10694. [10]

2.7.2 Chloridy

Obsah chloridů, vyjádřený jako Cl^- a stanovený podle EN 196-2, nesmí být větší než 0,10% hmotnosti. [10]

2.7.3 Oxid sírový

Obsah oxidu sírového SO_3 , stanovený podle EN 196-2, nesmí být větší než 3,0% hmotnosti.

2.7.4 Volný oxid vápenatý

Volný oxid vápenatý se musí stanovit podle metody uvedené v EN 451-1 a nesmí být větší než 1,5% hmotnosti. Jestliže obsah volného oxidu vápenatého je větší než 1,5%, pak se musí popílek vyzkoušet na shodu s požadavkem na objemovou stálost. [10]

2.7.5 Aktivní oxid vápenatý

Obsah aktivního oxidu vápenatého se musí stanovit podle 3.1 v EN 197-1:2011 a nesmí být větší než 10% hmotnosti. Pokud celkový obsah oxidu vápenatého, stanovený podle 5.2.1 v EN 450-1, není vyšší než 10% hmotnosti, požadavek na aktivní oxid vápenatý lze považovat za splněný. [10]

2.7.6 Aktivní oxid křemičitý

Při počátečních zkouškách typu popílku ze spalování (4.2) obsah aktivního oxidu křemičitého, jak je definován a popsán v EN 197-1, nesmí být menší než 25% hmotnosti. Popílek získaný spalováním jen práškového uhlí lze považovat za vyhovující tomuto požadavku. [10]

2.7.7 Oxid křemičitý (SiO_2), oxid hlinitý (Al_2O_3) a oxid železitý (Fe_2O_3)

Celkový obsah oxidu křemičitého (SiO_2), oxidu hlinitého (Al_2O_3) a oxidu železitého (Fe_2O_3) se musí stanovit podle EN 196-2 s modifikací uvedenou v 5.2.1 v EN 450-1 a nesmí být menší než 70% hmotnosti. Popílek získaný spalováním jen práškového uhlí lze považovat za vyhovující tomuto požadavku. [10]

2.7.8 Celkový obsah alkálií

Celkový obsah alkálií se musí stanovit podle EN 196-2 a přepočtený na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ nesmí být větší než 5,0% hmotnosti. Popílek získaný spalováním jen práškového uhlí lze považovat za vyhovující tomuto požadavku. [10]

2.7.9 Oxid hořečnatý

Při počátečních zkouškách typu popílku ze spoluspalování (4.2) obsah oxidu hořečnatého (MgO) se musí stanovit podle EN 196-2 a nesmí být větší než 4,0% hmotnosti. Popílek získaný spalováním jen práškového uhlí lze považovat za vyhovující tomuto požadavku. [10]

2.7.10 Rozpustný fosforečnan

Obsah rozpustného fosforečnanu, vyjádřený jako oxid fosforečný (P_2O_5) se musí stanovit podle metody uvedené v ISO 29581-2 a nesmí být větší než 5,0% hmotnosti. Popílek získaný spalováním jen práškového uhlí lze považovat za vyhovující tomuto požadavku.

Při počátečních zkouškách typu popílku ze spoluspalování (2.5.1), se obsah rozpustného fosforečnanu musí stanovit podle metody uvedené v příloze C normy ČSN EN 450-1 a nesmí být větší než 100mg/kg. [10]

2.8 Požadavky na fyzikální vlastnosti

2.8.1 Jemnost

Jemnost popílku musí být vyjádřena v % zůstatku popílku při prosévání na síť 0,045 mm. Jemnost se musí stanovit proséváním za mokra podle EN 451-2 nebo proudem vzduchu podle EN 933-10 a musí být v limitech pro příslušné kategorie uvedené dále:

Kategorie N: Jemnost nesmí přesáhnout 40 % hmotnosti a nesmí kolísat o více než $\pm 10\%$ deklarované hodnoty.

Kategorie S: Jemnost nesmí přesáhnout 12% hmotnosti. Požadavek na limit kolísání o více než $\pm 10\%$ se nepoužívá.

Ve sporných případech se musí použít prosévání za mokra podle EN 451-2 jako referenční metoda. [10]

2.8.2 Index účinnosti

Příprava normalizovaných maltových trámečků a stanovení pevnosti v tlaku se provádí podle EN 196-1.

Index účinnosti po 28 dnech a 90 dnech musí být nejméně 75%, resp. 85%. Použitý referenční cement, jak je uvedeno v 3.3 v EN 450-1, vybraný výrobcem popílku, musí vyhovovat svou jemností,

obsahem tricalciumaluminátu a obsahem alkálií následovně:

- jemnost (podle Blaina): nejméně 300m²/kg;
- tricalciumaluminát: 6% hmotnosti až 12% hmotnosti;
- alkálie (Na₂O_{eq}): 0,5% hmotnosti až 1,2% hmotnosti.

Musíme však brát v potaz, že výsledky zkoušky indexu účinnosti nepodávají přímou informaci o vlivu popílku na pevnost betonu ani nelimitují dávkování popílku ve směsi, která je použita. [10]

2.8.3 Objemová stálost

Objemová stálost (roztažnost) se stanoví na cementové kaši zhotovené z 30% popílku a 70% referenčního cementu podle EN196-3 a nesmí být větší než 10mm.

Pokud obsah volného oxidu vápenatého, stanoveného podle 2.7.4, nepřevyšuje 1,5% hmotnosti, lze považovat popílek za vyhovující tomuto požadavku. [10]

2.8.4 Měrná hmotnost

Měrná hmotnost se musí stanovit podle EN 196-6 a nesmí se lišit o více než $\pm 200\text{kg/m}^3$ od hodnoty deklarované výrobcem. [10]

2.8.5 Počátek tuhnutí

Počátek tuhnutí se stanoví na cementové kaši zhotovené z 25% popílku a 75% zkušebnímu cementu podle EN 196-3 a nesmí být více než dvakrát delší v porovnání se začátkem tuhnutí na cementové kaši zhotovené se 100 % (hmotnosti) referenčního cementu. Požadavky na počátek tuhnutí, uvedené v EN 197-1, se musí dosáhnout při zkoušení samotného referenčního cementu. Popílek získaný spalováním jen práškového uhlí lze považovat za vyhovující tomuto požadavku. [10]

2.8.6 Požadavek na množství vody

Požadavek na množství vody pro popílek s jemností kategorie S se musí stanovit metodou uvedenou v příloze B a nesmí být větší než 95 % referenčního cementu samotného.

Pro popílek s jemností kategorie N tento požadavek není uplatňován. [10]

2.9 Jiné požadavky dle ČSN EN 450-1

2.9.1 Požadavky na trvanlivost

Složení a úprava popílku musí být takové, aby bylo možné vyrábět trvanlivý beton (viz EN 206-1) s popílkem. Pokud popílek vyhovuje definici uvedené v 3.2 V EN 450-1 a splňuje požadavky na chemické vlastnosti uvedené v kapitole 2.7 a splňuje požadavky na fyzikální vlastnosti uvedené v kapitole 2.8, lze předpokládat, že vyhovuje požadavkům na trvanlivost.

Při některých aplikacích, zvláště v drsnějších podmínkách prostředí, výběr kategorie popílku může mít vliv na trvanlivost betonu, např. odolnost proti mrazu a proti alkalické reakci. V takových případech výběr kategorie popílku musí splňovat příslušné normy a předpisy platné v místě použití.

2.9.2 Uvolňování nebezpečných látek a radioaktivní záření

Popílek nesmí obsahovat látky, které by po uvolnění z betonu byly nebezpečné pro zdraví, hygienu a životní prostředí (viz příloha A normy ČSN EN 450-1).

Pokud by byly jakékoliv další požadavky na životní prostředí uvedeny v národních zákonech, předpisech a administrativních ustanoveních v místě použití popílku, týkající se

- a) popílku,
- b) vyluhování betonu vyrobeného s popínkem, nebo
- c) spoluspalovaného materiálu,

musí se tyto vzít v úvahu a shoda s příslušnými předpisy se musí, pokud je to požadováno, vyhodnotit před zahájením výroby. [10]

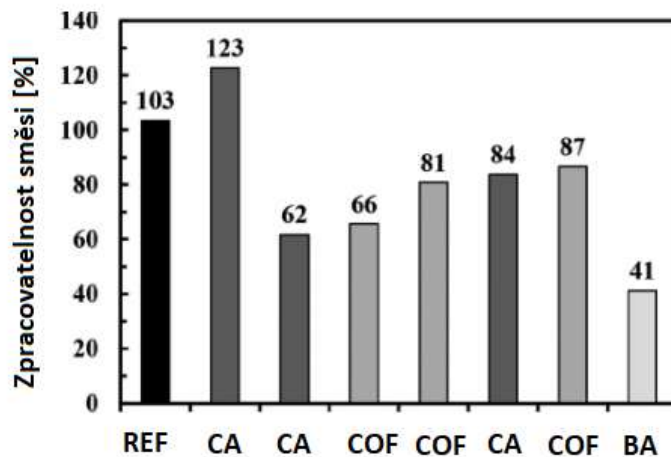
2.10 Dosavadní stav poznání

Využívání popílku ze spalování a spoluspalování jako příměs do betonu je v současné době zkoumáno mnoha vědeckými pracovišti. Základní získané poznatky jsou shrnuty níže.

2.10.1 Vliv popílku z biomasy na zpracovatelnost betonu

Přidání popílku z biomasy do betonu může způsobovat zhoršení zpracovatelnosti betonu, vzhledem k vyšší absorpci vody popínkem. Dalším důvodem pro vyšší potřebu vody je i nesférický tvar částic obsažených v příměsi, jelikož mají větší plochu dotyku [12]. Avšak zvýšené množství vody, za dodržení správného vodního součinitele, může tento problém vyřešit. Doporučený vodní součinitel se pohybuje mezi 0,6-0,65. Další variantou je přidání vhodného superplastifikátoru, jenž dokáže zpracovatelnost zlepšit bez vlivu na vodní součinitel [11]. Problém zpracovatelnosti by mohl být vyřešen i zbavením se porézních částic mletím, anebo částečným předvlhčením. [5]

Shearer [22] při svém pokusu nahrazoval 25% hmotnosti cementu popílkem z uhlí, biomasy a ze spoluspalování těchto dvou materiálů. Při porovnání jejich zpracovatelnosti s referenčním vzorkem zjistil, že vzorek s přidavkem vysoce kvalitního uhelného úletového popílku (CA) zaznamenal nárůst zpracovatelnosti o 23%. Při přidavku klasického ložového uhelného popílku (CA) naopak zaznamenal zhoršení o 40%. V případě přidání popílků ze spoluspalování (COF) bylo dosaženo mírného zlepšení oproti ložovému popílku, avšak proti referenčnímu vzorku stále šlo o výrazné zhoršení zpracovatelnosti. Nejhorší výsledky byly zaznamenány u vzorku s příměsí popílku ze spalování čisté biomasy (BA). Tekutost směsi byla snížena až o 70%. Zároveň byl velmi ovlivněn počátek tuhnutí dané směsi. Směs s příměsí popílku z biomasy začala při měření Vicatovým přístrojem tuhnout o 2,5h dříve než referenční vzorek.



Graf č.2 Vliv popílku ze spalování biomasy na zpracovatelnost cem. směsi [22]

2.10.2 Vliv popílku z biomasy na objemovou hmotnost betonu

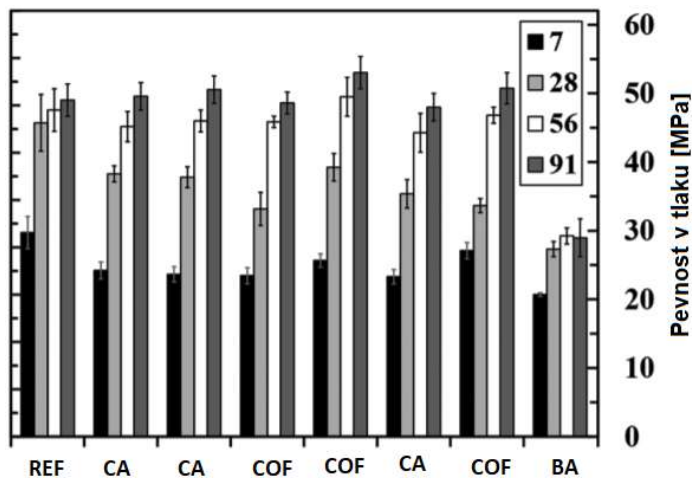
Podle zjištěných poznatků se ukazuje, že objemová hmotnost betonu a malt závisí především na objemových hmotnostech použitých příměsí [12]. Při nahrazování Portlandského cementu popílkem z biomasy o nižší objemové hmotnosti, celková objemová hmotnost betonu klesá. Při poklesu objemové hmotnosti se projevuje

nárůst porozity vzorků. Zároveň se zlepšila vodopropustnost vzorku díky hydratačním produktům a pucolánovým částicím, které zaplnily mezery v cementové směsi [14].

2.10.3 Vliv popílku z biomasy na pevnost betonu

Po analýzách, provedenými mnoha autory, je jasný již dříve zmíněný fakt. Základním faktorem vhodnosti popílku z biomasy do použití v maltách a betonech je jejich složení a typ spalovacího procesu. Tento faktor má významný vliv i na výsledné pevnostní charakteristiky. Bylo zjištěno, že všechny popílky nemají pucolánový charakter, díky němuž je dosahováno vyšších hodnot pevnosti. Nejčastěji se pucolánové vlastnosti, srovnatelné s vlastnostmi uhelného popílku, objevují u úletových popílků z biomasy.

V *Grafu č.3*, vycházejícího z pokusu Shearera [22], můžeme názorně vidět průběžný nárůst pevností u jednotlivých vzorků. U vzorků s příměsí popílků z uhlí (CA), dosahují hodnoty pevností po 7, 28 i 56 dnech nižších hodnot než u referenčního vzorku bez obsahu popílku, avšak po 91 dnech je již viditelné mírné navýšení oproti referenčnímu vzorku. Vzorky s obsahem popílku ze spoluspalování uhlí a biomasy (COF), vykazují dokonce nejvyšší výsledné pevnosti ze všech zkoušených vzorků. Naopak jednoznačně nejhorší výsledky byly zaznamenány u vzorku s obsahem popílku ze spalování biomasy (BA).



Graf č.3 Závislost pevnosti cementové směsi na příměsí popílku z biomasy [22]

2.10.4 Trvanlivost betonu s příměsí popílku z biomasy

Jedna z důležitých otázek ohledně betonů s příměsí vedlejších energetických produktů, je otázka trvanlivosti. Hlavně se jedná o alkalicko-křemičitou reakci. Nazýváme tak reakce mezi reaktivní příměsí a alkáliemi uvolněnými během hydratace cementu a ostatních složek, jako jsou minerální látky nebo další příměsí. ASR (alkalicko-křemičité reakce) vedou k nadměrné roztažnosti, prasklinám i větším poruchám betonových konstrukcí a jsou tak velkým rizikem.

Praskliny vzniklé během ASR se často objevují v místech vystavených vyššímu vlhkostnímu namáhání, jako například opěrné zdi a další konstrukce vystavené podzemní vodě, nebo přímo konstrukce zrealizované pod vodní hladinou, jako jsou například mostní pilíře.

Reaktivní vedlejší energetické produkty, mezi nimi i popílek z biomasy, často vytvářejí alkalicko-silikátový gel absorbováním vody obsažené v betonu. Tato vlastnost je velmi důležitá, jelikož C-S-H gel (hydrát křemičitanu vápenatého) expanduje a tím vytváří vnitřní pnutí, jenž dále zapříčiňuje poruchy betonu. [19]

Jakmile v maltové nebo betonové směsi použijeme jako jednu ze složek popílek z biomasy, závisí jeho trvanlivost na pucolanitě daného popílku. Je zapotřebí zkoumat strukturu popílku a jeho pucolánovou aktivitu, která zajistí vyšší trvanlivost výsledného produktu.

Propustnost betonu může být dobrým ukazatelem trvanlivosti betonu. Propustný beton umožňuje vnik agresivních látek, jako jsou například chloridy, a tím snižuje jeho schopnost odolávat vnějším vlivům.

Beton sám o sobě je porózní materiál a pokud část cementu nahradíme porózním popílkem z biomasy, zvýšíme tím celkovou porozitu. Těmito póry dále vniká do konstrukce větší množství CO_2 a probíhá silnější reakce (karbonatace) s Ca(OH)_2 . Pro tuto reakci je zásadním parametrem množství obsaženého cementu.

Karbonatace může snížit pH betonu až pod hodnotu 9 a tím se neutralizuje schopnost alkalické reakce. Tento proces následně ovlivňuje vlastnosti jako jsou

pevnost, propustnost, smršťování a odolnost vůči chemickým a fyzikálním účinkům prostředí. [20]

Na základě znalosti výše zmíněného bychom se měli snažit o využívání popílků s obsahem jemných částic. [5]

Dle pokusu provedeného Heedem [21], který podrobil čtyři zkušební vzorky čtrnácti zmrazovacím cyklům, neměl přídavek popílku z biomasy zásadní vliv na odolnost vůči zmrazovacím cyklům. Rozdíly vůči referenčnímu vzorku byly způsobeny vyšší porozitou a menší pevností zkoušeného vzorku.

2.11 Geopolymery

Geopolymery jsou alkalicky aktivované materiály s vlastnostmi srovnatelnými s přírodním kamenem. Vznikají alkalickou aktivací aluminosilikátových látek v silně zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku. Díky svým mechanickým vlastnostem jsou to materiály s velkým potenciálem a širokým rozsahem použití. Vznikají geopolymeračí, která probíhá během chemické reakce aluminosilikátů s křemičitany, uhličitany nebo hydroxidy alkalických kovů. Při tomto procesu se vytváří pevná struktura. Reakce vedoucí ke vzniku této struktury je odlišná od procesů tuhnutí a tvrdnutí cementových pojiv. [22]

2.11.1 Geopolymerní beton

Jedná se o alternativu ke klasickému betonu z Portlandského cementu. Výsledné vlastnosti geopolymerního betonu však v lecčem ten klasický předčí. V proběhlých studiích bylo zjištěno, že tyto betony dosahují vysokých počátečních pevností, zlepšené zpracovatelnosti a propustnosti, zároveň je prodloužena trvanlivost, odolnost vůči kyselým reakcím, vykazují redukci smršťovacích plastických trhlin a výbornou žáruvzdornost. Jako bonus tím získáváme materiál s menší zátěží na životní prostředí, vzhledem k nízké produkci CO₂ během jeho výroby.

Další slibnou vlastností ve spojení s geopolymery, je možné využití vedlejších produktů při jejich výrobě. Těmi mohou být například vedlejší energetické produkty, jako popílky a strusky ze spalování uhlí či biomasy. [5]

2.11.2 Popílek z biomasy pro použití v geopolymerním betonu

Použitím popílku z biomasy při výrobě geopolymerního betonu nebo alkalicky aktivovaných cementových kompozitů, můžeme získat velmi slibný a udržitelný materiál bez použití Portlandského cementu.

Ve většině dosavadních studií bylo zkoušeno částečné nahrazení tradičních složek, jako jsou například uhelný popílek a metakaolin. Nebyl zjištěn zásadní negativní vliv na výsledné vlastnosti geopolymery. Songpyriyaki [24] ve své studii vytvářel geopolymery s využitím popílku z uhlí a spalování rýžových slupek. Následně je míchal v různých poměrech a používal různé aktivátory. Z jeho výsledků je patrné, že pevnosti po přidání popílku ze spalování rýžových slupek začaly růst. Nejspíše to bylo díky vysokému obsahu SiO_2 v tomto popílku.

Tento příklad však ukazuje, že při použití popílku z biomasy s výhodnými vlastnostmi, mohou geopolymery vykazovat dokonce lepší vlastnosti. Zároveň byl zmíněn hlavní problém. Potřeba zajistit stálost vlastností popílku. Jelikož jeho heterogenita by zabraňovala vytvoření homogenního geopolymery.

3 Praktická část

Praktickou částí jsem ověřoval chemické a fyzikální vlastnosti popílků získávaných ze spalování či spoluspalování biomasy. Zkoušky byly prováděny dle norem ČSN EN v laboratoři Ústavu skla a keramiky na VŠCHT.

3.1 Vstupní materiály

Pro laboratorní zkoušky byly použity následující materiály:

3.1.1 Cement

Pro namíchání maltových směsí byl využíván Portlandský cement CEM I 42,5R. Vyráběn je v závodu Mokrý, jenž splňuje veškeré požadavky na složení cementu dané normou ČSN EN 197-1.

3.1.2 Voda

Jako záměsová voda byla při všech zkouškách využita kohoutková voda z vodovodního řadu ustálené pokojové teploty. Dále byla použita destilovaná voda, poskytována VŠCHT, také o ustálené pokojové teplotě.

3.1.3 Písek

Písek byl použit pouze pro výrobu zkušebních vzorků pro ověření indexu účinnosti. Do směsi byly přidány 3 druhy písku s označením podle velikosti zrn PG 1, PG 2 a PG 3. Směs těchto tří druhů písku vytvořila normalizovaný písek CEN.

Tab. č.3 Zrnitost referenčního písku CEN [25]

Síto se čtvercovým okem (mm)	2	1,6	1	0,5	0,16	0,08
Celkový zbytek na síti (%)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

3.1.4 Popílký

V rámci mé práce jsem pracoval s popílký ze spalování a spoluspalování biomasy. Původ těchto vzorků je z elektráren a tepláren na území České republiky, které využívají k výrobě energie biomasu. Provozujícími společnostmi jsou společnost ČEZ a členové společnosti ASVEP (Asociace pro využití energetických produktů).

Tab. č.4 Původ vzorků

Označení	Lokalita	Způsob spalování	Druh popílku
25C	Elektrárna Poříčí	Fluidní spoluspalování biomasy (80% uhlí+20% biomasy)	Ložový popel
24C	Elektrárna Poříčí	Fluidní spoluspalování biomasy (80% uhlí+20% biomasy)	Úletový popílek
1C	Energetické centrum Jindřichův Hradec	Spalování balíků sena a slámy v roštovém kotli	Popílek+struska
26C	Elektrárna Hodonín	Fluidní spoluspalování biomasy (80% uhlí+20% biomasy)	Úletový popílek
27C	Elektrárna Hodonín	Fluidní spoluspalování biomasy (80% uhlí+20% biomasy)	Ložový popel
26A	Lenzing Biocel Paskov a.s.	Spalování v roštovém kotli pro spalování kůry	Ložový popel
27A	Lenzing Biocel Paskov a.s.	Spalování v roštovém kotli pro spalování kůry	Úletový popílek z elektrofiltru
28A	Lenzing Biocel Paskov a.s.	Spalování v roštovém kotli pro spalování kůry	Škvára z mezideponie popelovin
29A	CZT Litoměřice	Spoluspalování dřevní štěpky s nízkosirným hnědým uhlím v roštovém horkovodním kotli	Ložový popel
30A	CZT Mimoň	Spoluspalování dřevní štěpky a pilin s polským hnědým uhlím PGS v roštovém parním kotli	Ložový popel

3.2 Metody laboratorních zkoušek

3.2.1 Stanovení chemické analýzy – XRF

Sekvenční vlnově-disperzní rentgenový spektrometer ARL 9400 XP byl použit na provedení rentgenové fluorescenční analýzy. Je vybaven rentgenovou lampou s Rh anodou typu 4GN s koncovým Be okénkem tloušťky 50 μm . Všechny intenzity spektrálních čar prvků byly měřeny ve vakuu programem WinXRF. Kombinace nastavení generátoru-kolimátoru-krystalů-detektorů byly optimalizovány pro 82 měřených prvků s časem 6s na prvek. Získané intenzity byly zpracovány programem Uniquant 4 bez nutnosti měřit standardy. Analyzované práškové vzorky byly vylisovány do tablet o tloušťce 5mm a průměru 40mm bez použití pojiva (nebo

s použitím Dentakrylu jako pojiva, jestliže B-F jsou důležité) a s nebo bez krycí polypropylenové folie (PP) tloušťky 4 μm . Čas měření jednoho vzorku byl přibližně 15 min. [31]

3.2.2 Stanovení chemické analýzy – XRD

XRD (rentgenová difrakční analýza) byla provedena při pokojové teplotě na θ - θ práškovém difraktometru X'Pert3 Powder firmy PANalytical v Bragg-Brentanově parafokující geometrii s použitím vlnové délky $\text{CuK}\alpha$ záření ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, $U = 40 \text{ kV}$, $I = 30 \text{ mA}$). Data byla skenována ultrarychlým lineárním detektorem PIXCEL v úhlovém rozsahu $15\text{-}78^\circ$ (2θ) s krokem měření 0.013° (2θ) a s časem čítání 180 s krok-1. Při měření byla použita fixní clona. Poté byla provedena kvalitativní i kvantitativní analýza vyhodnocením v programu HighScore Plus 4.0 (PANalytical, Holandsko). Amorfni podíl byl stanoven nepřímou metodou vnitřního standardu. Ke vzorkům bylo přimícháno 7,5% ZnO. [31]

3.2.3 Stanovení velikosti částic – granulometrie

Laserová difrakce je měřicí technologie pro stanovení distribuce velikosti částic. V této metodě je laserový paprsek namířen na soubor částic rozptýlených buď v kapalině, nebo ve vzduchu. Výsledný vzor vychýlení úhlů rozptylu laseru je charakteristický pro velikost částic materiálu a detekován příslušným senzorem. Měřicí technologie je popsána ve standardu ISO 13320 „Analýza velikosti částic-laserové difrakční metody“. Způsob, jakým se výsledky počítají a zobrazují, je popsán v normách ISO 9276-1 a ISO 9276-2 „Reprezentace výsledků analýzy velikosti částic“ část 1 a část 2. Ve většině aplikací se laserová difrakce obvykle používá pro distribuci velikosti částic mezi 30nm-1mm. V případě měření pro tuto práci byly měřeny částice do velikosti 850nm. Měření probíhalo v laboratoři Korund Benátky s.r.o., Česká republika laserovým granulometrem Bettersizer (Dandong Bettersize Instruments Ltd., China). [32]

3.2.4 Stanovení indexu účinnosti

Stanovení indexu účinnosti se provádí dle normy ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. Tato část normy EN 196 určuje metodu pro stanovení pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu cementové malty na zkušebních tělesech tvaru trámečku o rozměrech 40 mm × 40 mm × 160 mm [25]. Dle normy ČSN EN 450-1 se vztahuje i na cementové malty s náhradou cementu popílkem do 25 %.

Pomůcky:

- Míchačka JIP-TECH
- Formy dle požadavků normy
- Zhutňovací stolek BETONSYSTEM
- Zkušební stroj pro stanovení pevnosti v tlaku a tahu WPM
- Váha laboratorní EW4200-2NM s přesností 0,01g
- Časoměrné zařízení
- Odměrný válec
- Olej
- Popisovač lihový
- Lopatka
- Stěrka
- Posuvné měřítko

Postup zkoušky:

Zkušební tělesa se zhotovují z malty obsahující 0,75 hmotnostního dílu cementu, 0,25 hmotnostního dílu popílku, tři hmotnostní díly normalizovaného písku CEN a půl dílu vody ($w/c = 0,50$). Pro referenční zkušební tělesa se jako pojivo používá pouze cement. Před započítím míchání je třeba vysušit do ustáleného stavu popílký při teplotě 40°C. Po vysušení popílku se přistupuje k míchání. Na laboratorní váze bylo naváženo pomocí laboratorní váhy postupně 300g cementu, 100g popílku, 3 díly písku PG1, PG2 a PG3 o celkové hmotnosti 1200g. Pojivo s plnivem bylo míseno po

dobu 90s. Dále bylo odměřeno 200 ml záměsové vody o pokojové teplotě a přidáno do suché směsi (nulový čas). Následně míchání probíhalo 180s s přestávkou na očištění stěn a dna od nepromíchaných zbytků směsi. Směs byla ukládána nejprve do 1/3 výšky formy a následně během vibrování doplňována.



Obr. č.4 Zhutněné vzorky na vibračním stolku

Vzorky byly uloženy při relativní vlhkosti 90%. Po 24h byly odbedněny a uloženy zpět do vlhkostní skříně na následujících 28 dnů. Před započítáním zkoušení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku je třeba vzorky řádně změřit posuvným měřítkem a zvážit. Poté byla na hydraulickém lisu změřena pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku.



Obr. č.5 Zkoušení pevnosti v tlaku

Výpočet:

Pevnost v tahu za ohybu, R_f , v megapascalch se vypočítá ze vztahu:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

kde je

R_f pevnost v tahu za ohybu, v megapascalch;

b strana čtvercového průřezu trámečku, v milimetrech;

F_f zatížení vynaložené na střed trámečku při zlomení, v newtonech;

l vzdálenost mezi podporami, v milimetrech. [25]

Pevnost v tlaku, R_c , v megapascalch se vypočítá ze vztahu:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

kde je

R_c pevnost v tlaku, v megapascalch;

F_c nejvyšší zatížení vynaložené při porušení, v newtonech;

1 600 plocha destiček nebo pomocných destiček (40 mm × 40 mm), v milimetrech čtverečních. [25]

3.2.5 Stanovení normální konzistence

Tuto zkoušku upravuje norma ČSN EN 196-3 Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení doby tuhnutí a objemové stálosti.

Cementová kaše normální konzistence projevuje určitý odpor proti vnikání normalizovaného penetračního válečku. Množství vody, potřebné pro takovou kaši, se stanovuje pokusným vnikáním penetračního válečku do kaši s různým obsahem vody. [26]

Pomůcky:

- Vicatův přístroj-ruční s penetračním válečkem
- Míchačka JIP-TECH
- Váha laboratorní EW4200-2NM s přesností 0,01g
- Časoměrné zařízení
- Odměrný válec
- Lopatka
- Stěrka
- Prstenec
- Ocelová podložka

Postup zkoušky:

Po připravení pomůcek a zkalibrování Vicatova přístroje byl namíchán daný typ směsi. Směs se skládala z 375g cementu, 125g popílku a 150ml vody, při prvním míchání. Po zamíchání byla směs postupně ukládána do předem připravené kónické formy položené na ocelové podložce. Forma se směsí byla poté umístěna do Vicatova

přístroje. Penetrační váleček byl umístěn na úroveň povrchu směsi a zaaretován. Po uvolnění válečku začal váleček vnikat do směsi. Nejdříve 5s po ustálení válečku a nejpozději 30s po uvolnění válečku byla odečtena hodnota vzdálenosti mezi válečkem a ocelovou podložkou. Pokud se váleček neustálil na hodnotě 4 až 8mm, konzistence dané směsi nevyhověla a celý pokus se musel opakovat se směsí o jiném vodním součiniteli. Takto se postupovalo se všemi vzorky.

3.2.6 Stanovení objemové stálosti

Tuto zkoušku upravuje norma ČSN EN 196-3 Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení doby tuhnutí a objemové stálosti.

Objemová stálost se stanoví podle změny objemu cementové kaše normální konzistence. Je dána relativní změnou vzdálenosti mezi hroty dvou tyčinek. [26]

Pomůcky:

- Le Chatelierovy objímky
- Vicatův přístroj-ruční
- Míchačka JIP-TECH
- Váha laboratorní EW4200-2NM s přesností 0,01g
- Časoměrné zařízení
- Odměrný válec
- Lopatka
- Stěrka
- Prstenec
- Ocelová podložka
- Špachtle

Postup zkoušky:

Naolejovaná Le Chatelierova objímka byla postavena na podložní destičku, ručně se naplnila kaší, bez výrazného zhutňování nebo potřásání, a zarovnal se špachtlí. Objímka se směsí se přikryla krycí destičkou a nechala se tuhnout ve vlhkostní skříni po dobu 24 h. Poté byla změřena vzdálenost mezi hroty tyčinek

s přesností 0,5mm. Objímka se pak postupně zahřívá ve vodní lázni po dobu 30 minut až k bodu varu a vaření se udržovalo po dobu 3 hodin. Po ukončení vaření byla změřena vzdálenost mezi hroty tyčinek znovu s přesností 0,5mm.

Při vyhodnocení zkoušky byl porovnán rozdíl vzdáleností tyčinek před a po vaření.

3.2.7 Stanovení počátku a konce doby tuhnutí

Tuto zkoušku upravuje norma ČSN EN 196-3 Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení doby tuhnutí a objemové stálosti.

Tuhnutí se sleduje vnikáním jehly do cementové kaše normální konzistence, až je dosaženo určité předepsané hodnoty [26].

Pomůcky:

- Vicatův přístroj-ruční
- Míchačka JIP-TECH
- Váha laboratorní EW4200-2NM s přesností 0,01g
- Časoměrné zařízení
- Odměrný válec
- Lopatka
- Stěrka
- Prstenec
- Ocelová podložka
- Nádobka s vodou

Postup zkoušky:

Po namíchání směsi normální konzistence (viz kapitola 3.2.5.) a naplnění formy se nádobka na vodu s podložní destičkou a prstencem postavila do Vicatova přístroje s jehlou. Jehla se pak posunula dolů tak, aby byla ve styku s povrchem kaše. Poté se přístroj odaretoval a jehla se nechala vnikat do kaše. Odečet na stupnici se

provedl po ustálení polohy jehly, nebo 30 sekund po uvolnění jehly, podle toho, co nastalo dříve.

Sledovanými parametry byla vzdálenost mezi ocelovou podložkou a jehlou a uplynutý čas od nulového času (čas přidání vody). Doba, která uplynula od nulového času do doby, kdy vzdálenost mezi jehlou a podložní destičkou byla 6 ± 3 mm, byla stanovena jako počátek tuhnutí cementu.

Daný vzorek se ve Vicatově přístroji ponechal pro zjištění konce doby tuhnutí. Sledovanými parametry byly opět vzdálenost mezi ocelovou podložkou a jehlou a uplynutý čas od nulového času. Doba, která uplynula od nulového času do doby, kdy jehla vnikla maximálně 0,5 mm pod povrch kaše, byla stanovena jako počátek tuhnutí cementu.

3.2.8 Stanovení sypané hmotnosti volně sypané a setřesené

Stanovení sypané hmotnosti volně sypané i sypané hmotnosti setřesené se provádí zjištěním hmotnosti popílků v definované objemové jednotce. Obě sypané hmotnosti jsou charakteristickými veličinami daného materiálu a korespondují s objemovou hmotností vyrobené stavební hmoty [27].

Pomůcky:

- Odměrná nádoba na 1 l
- Plechová násypka
- Laboratorní stojan
- Pravitko-plastové
- Váha laboratorní EW4200-2NM s přesností 0,01g
- Gumová palička

Postup zkoušky pro sypanou hmotnost volně sypanou:

Vysušený popílek byl bez otřesů sypan do odměrné nádoby předepsanou plechovou násypkou, upevněnou v držáku stojanu. Vzdálenost násypky (spodní hrany) od odměrné nádoby (horní hrany) byla 20 mm. Přebytečné množství vzorku

bylo seříznuto ocelovým pravítkem. Odměrná nádoba byla zvážena prázdná bez popílku a potom se vzorkem s přesností na 1g. [27]

Postup zkoušky pro sypnou hmotnost setřesenou:

Sestava a začátek zkoušky byl stejný jako u zkoušky pro sypnou hmotnost volně sypanou. Po naplnění 1/3 nádoby byla nádoba poklepána ze strany gumovou paličkou. Stejně se postupovalo po naplnění 2/3 a celé nádoby. Po ustálení objemu popílku v nádobě, byl přebytečný popílek seříznut pravítkem. Odměrná nádoba byla zvážena prázdná bez popílku a potom se vzorkem s přesností na 1g. [27]

3.2.9 Stanovení ztráty žíháním

Tuto zkoušku upravuje norma ČSN 72 0103 Základní postup rozboru silikátů – Stanovení ztráty žíháním.

Vzorek se žihá při teplotě 950 °C do ustálené hmotnosti. Úbytek hmotnosti odpovídá ztrátě žíháním [28].

Pomůcky:

- Porcelánové kelímky
- Vysokoteplotní pec
- Analytická váha HR-200
- Lžička-chemická
- Vakuový exsikátor
- Silikagel

Postup zkoušky:

Do porcelánového kelímku byl navážen 1 g vzorku. Kelímek se vzorkem byl vložen do žihací pece a pozvolna se zvyšovala teplota až na teplotu 950 °C. Po hodinovém žíhání při uvedené teplotě byl kelímek vyjmut a vložen do exsikátoru. Po vychladnutí se zvážil. Žíhání se opakovalo do ustálené hmotnosti. [28]

Výpočet:

Ztráta žíháním, (zž) v procentech, se vypočte podle vzorce:

$$z\check{z} = \frac{m_s - m_{\check{z}}}{m_s}$$

kde m_s je hmotnost navážky vysušeného vzorku, v gramech;

$m_{\check{z}}$ hmotnost vyžíhaného vzorku, v gramech. [28]

3.2.10 Stanovení měrné hmotnosti

Tuto zkoušku upravuje norma ČSN EN 1097-7 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 7: Stanovení měrné hmotnosti fileru – Pyknometrická zkouška a ČSN EN 1097-6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti.

Pyknometrická metoda je způsob stanovení objemu vzorků nepravidelných tvarů, v tomto případě popílků.

Pomůcky:

- Pyknometry
- Časoměrné zařízení
- Analytická váha HR-200
- Lžička-chemická
- Vakuový exsikátor
- Kádinky
- Petrolej o známé hustotě
- Membránová vývěva
- Vodní lázeň

Postup zkoušky:

Čisté a suché pyknometry se známým objemem a hmotností byly naplněny do výše cca 1 cm vzorkem. Poté byly znovu zváženy a vzorek byl zalit petrolejem do cca poloviny jejich objemů. Pomocí membránové vývěvy, při tlaku 15 mm rtuťového sloupce, byly odstraněny ze vzorku vzduchové bubliny. Po dokončení evakuace byl doplněn petrolej po hrdlo pyknometru a 30 minut temperován při 20 °C ve vodní lázni. Následně byla nasazena zátka a případně doplněn vytemperovaný petrolej. Poté byl vzorek naposledy zvážen a dopočítána měrná hmotnost vzorku.



Obr. č.6 Odstraňování vzduchových bublin

Výpočet:

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_l}}$$

kde m_0 je hmotnost prázdného pyknometru se zátkou, v gramech;

m_1 je hmotnost pyknometru se zkušební navážkou fileru, v gramech;

m_2 je hmotnost pyknometru se zkušební navážkou fileru, zalitá kapalinou v gramech;

V je objem pyknometru, v mililitrech;

ρ_l je hustota kapaliny při teplotě 25 °C, v megagramech na krychlový metr;

ρ_f je měrná hmotnost fileru při teplotě 25 °C, v megagramech na krychlový metr.

Vypočte se měrná hmotnost fileru jako průměr hodnot ze tří stanovení a zaokrouhlí se na nejbližších 0,01 Mg/m³. [30]

3.2.11 Stanovení měrného povrchu

Tuto zkoušku upravuje norma ČSN EN 196-6 Metody zkoušení cementu – Část 6: Stanovení jemnosti mletí.

Pro naše využití byla vybrána Permeabilní metoda (Blaine), při které se jemnost mletí vyjadřuje jako měrný povrch vypočtený z času, který je potřebný pro průtok určitého množství vzduchu zhutněným lůžkem zkoušeného materiálu dané velikosti a porozity [29].

Pomůcky:

- Blainův přístroj MATEST
- Časoměrné zařízení
- Analytická váha HR-200
- Lžička-chemická
- Kruhové filtrační papírky
- Mazací tuk

Postup zkoušky:

Po zjištění měrné hmotnosti byla vypočítána potřebná navážka popílku pro zjištění jemnosti mletí permeabilní metodou. Navážka byla navážena s přesností na 0,001g. Do lůžka byl vložen kulatý filtrační papír, poté navážený vzorek a nakonec

zнову filtrační papír. Po stlačení pístem byl uložen do Blainova přístroje a v něm byl třikrát měřen čas, za jak dlouho poklesla kapalina v přístroji mezi dvěma ryskami. Tento postup se pro každý vzorek opakoval třikrát.



Obr. č.7 Blainův přístroj MATEST

Výpočet:

$$S = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10 \times \eta}}$$

kde je

K konstanta přístroje;

e porozita lůžka;

t naměřený čas, v (s);

ρ měrná hmotnost cementu v (g/cm³);

η viskozita vzduchu při teplotě zkoušení v (Pa*s). [29]

3.2.12 Stanovení výluhů vzorků popílků a maltových směsí

Tato zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 12457-4 Charakterizace odpadů – Vyluhování – Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů Část 4: Jednostupňová vsádková zkouška při poměru kapalné a pevné fáze 10 l/kg pro materiály se zrnitostí menší než 10mm (bez zmenšení velikosti částic, nebo s ním).

Zkouška byla provedena na vysušených vzorcích popílků a poté na směsích (připravených viz. 3.2.5.).

Pomůcky:

- Plastové lahve-objem 1 l
- Skleněné lahve-objem 1 l
- Otočný buben
- Váha laboratorní EW4200-2NM s přesností 0,01g
- Odměrný válec
- Filtrační papír

Postup zkoušky:

V případě stanovení výluhů na vzorku popílku bylo naváženo 100g vysušeného vzorku a nasypáno do plastové lahve o objemu 1l. Poté byl vzorek zalit 1l destilované vody. Lahev byla pečlivě uzavřena a umístěna do otočného bubnu. V něm byla upevněna a vzorek se zde nechal 24h louhovat. Po uplynutí časového intervalu byl obsah lahve přefiltrován přes filtrační papír a nalit do skleněné lahve.

Obdobným způsobem se postupovalo i v případě stanovení vyluhovatelnosti ztvrdlé maltové směsi. Byly namíchány směsi normální konzistence o složení viz.

3.2.5. a ponechány 21 dnů ve vlhkém prostředí. Následně byly vzorky rozdrceny a pokračovalo se ve stejném postupu jako v prvním případě.

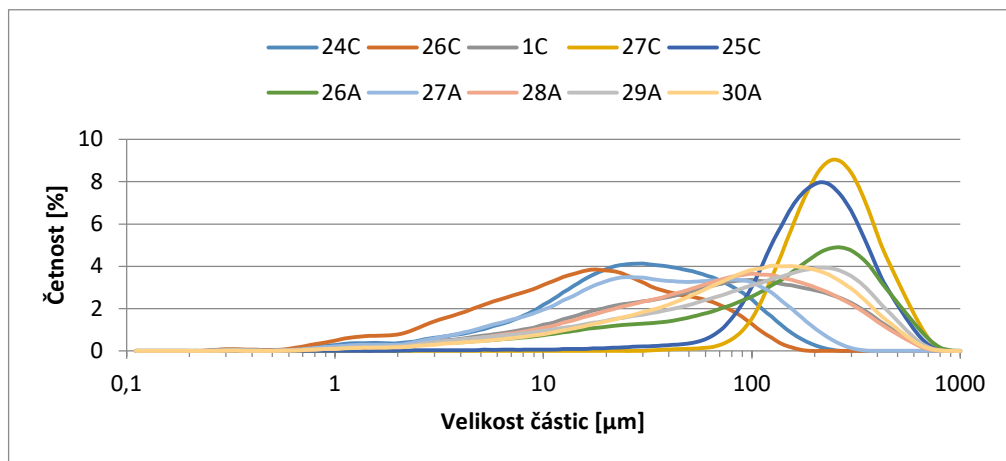
Všechny vzorky byly odeslány na vyhodnocení do laboratoře AQUATEST a.s.

4 Výsledky a diskuze

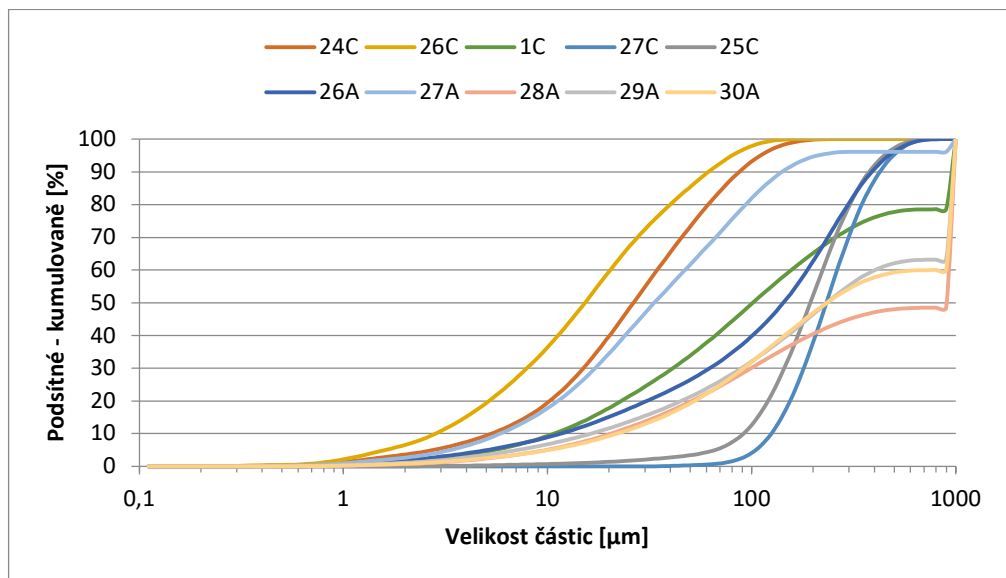
4.1 Fyzikální a mechanické vlastnosti

4.1.1 Stanovení velikosti částic

Pro přehlednost byla četnost v *Grafu č. 4* určena pouze u zrn do 850 μm . Z *Grafu č.4* je patrné, že největší zastoupení hrubých částic se nachází u vzorků 27C a 25C. V obou případech se jedná o ložové popely, což vyššímu podílu větších částic odpovídá. Naopak nejvyšší zastoupení menších částic bylo zjištěno u úletových popílků 24C, 26C a 27A.



Graf č.4 Zastoupení jednotlivých frakcí



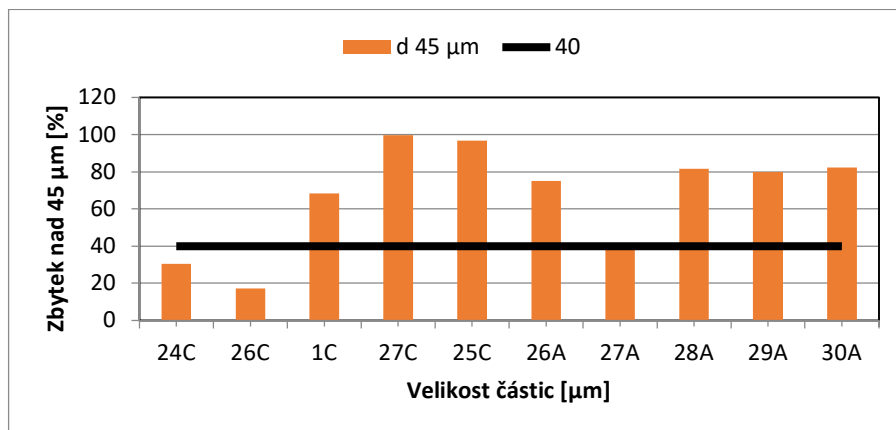
Graf. č.5 Kumulativní křivky velikosti částic

Nepřesnost v podobě „skoku“ na konci *Grafu č.5* je zapříčiněna měřením zrn pouze do 850 μ m.

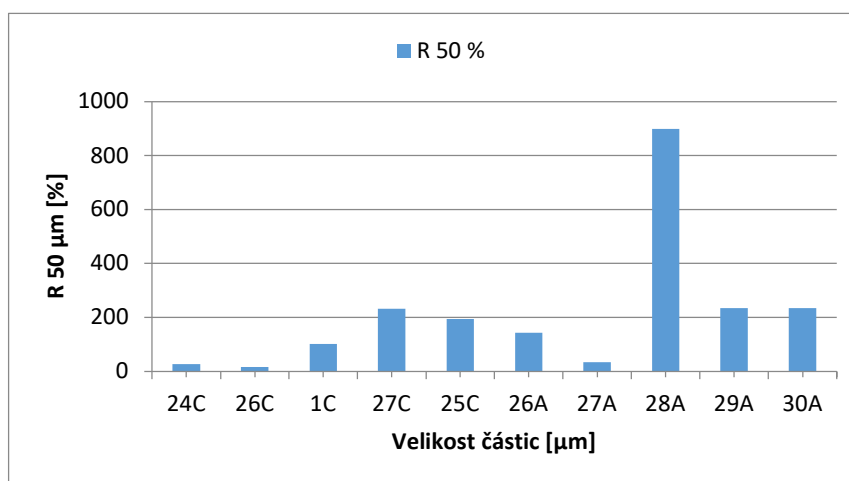
V následujících tabulkách je znázorněn propad zrn na síť 45 μ m. Dle ČSN EN 450-1 nesmí být zbytek na síti 45 μ m větší než 40 % celkové hmotnosti vzorku. Tuto podmínku splnily úletové popílký 24C a 26C. Úletový popílek 27A tuto podmínku nesplnil jen o 1,37%. Hodnota R 50% udává velikost středního zrna.

Tab. č.5 Zbytek na síti 45 μ m a velikost středního zrna R 50 μ m

Vzorek	d 45 μ m	R 50 %
26A	75,08	143,02
27A	41,37	33,37
28A	81,61	899,16
29A	80,04	234,11
30A	82,25	233,87
24C	30,39	26,37
25C	96,90	193,93
26C	17,11	15,24
27C	99,75	232,54
1C	68,25	101,34



Graf. č.6 Zbytek na síť 45 μm



Graf. č.7 Velikost středního zrna R 50 μm

4.1.2 Stanovení indexu účinnosti

Index účinnosti se stanovuje z naměřené hodnoty pevnosti v tlaku po 28 dnech a 90 dnech. V tomto případě byla zkoušena pevnost pouze po 28 dnech. Pro vyhověním požadavkům normy ČSN EN 450-1 musí vzorky po 28 dnech dosáhnout minimálně 75% pevnosti referenčního vzorku.

Tab. č.6 Index účinnosti

Vzorek	Pevnost vzorku [Mpa]		Percentil pevnosti [%]		Splnění požadavku z ČSN EN 450-1
	7 dní	28 dní	7dní	28 dní	
REF	48,4	54,2	1,0	1,0	-
1C	31,5	38,8	0,7	0,7	NE
24C	26,7	37,5	0,6	0,7	NE
25C	25,9	37,7	0,5	0,7	NE
26C	26,4	31,6	0,5	0,6	NE
27C	27,3	35,4	0,6	0,7	NE
26A	21,3	27,4	0,4	0,5	NE
27A	29,5	37,5	0,6	0,7	NE
28A	26,3	33,4	0,5	0,6	NE
29A	24,3	34,1	0,5	0,6	NE
30A	28,2	33,1	0,6	0,6	NE

V Tab. č. 6 je patrné, že požadavek normy se žádnému ze vzorků splnit nepodařilo. Nejlepší výsledky měly vzorky 1C, 24C, 25C a 27A. Jedná se převážně o popílky s vyšší jemností, které slouží lépe jako mikroplnivo, což pozitivně ovlivňuje výslednou pevnost. Zároveň je patrný vyšší nárůst pevnosti mezi 7 dny a 28 dny. Tento jev mohly způsobit lepší pucolánové vlastnosti těchto materiálů.

Shearer [22] ve své práci míchal směsi se stejným poměrem cementu ku popílku, jako byl použit v mé práci, tj. 75:25. Při porovnání jeho výsledků s mými zjistíme, že se velmi podobají. Pevnosti po 7 dnech se pohybují mezi 20 až 30MPa. Pokud se podíváme na hodnoty pevnosti vzorků po 28 dnech, tak u vzorků s přídatkem popílku ze spoluspalování zaznamenal Shearer vyšší hodnoty (mezi 40 a 50MPa) zhruba o 10MPa. Naopak v případě směsi s obsahem popílku ze spalování čisté biomasy zaznamenal hodnotu nižší (cca 28MPa) o zhruba 10MPa.

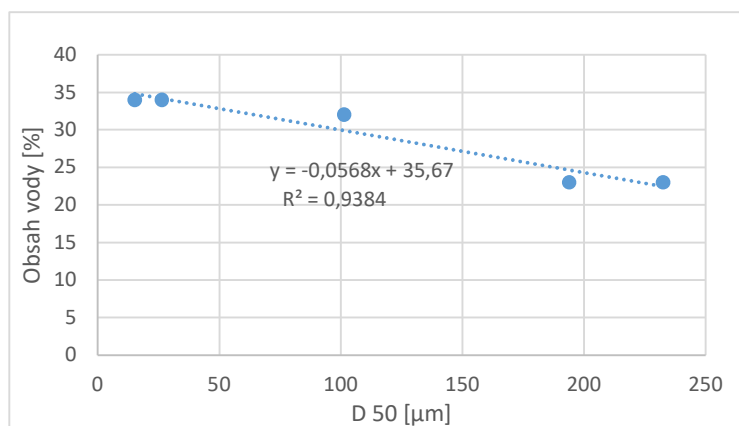
I díky tomuto srovnání, lze u mnou připravených vzorků předpokládat nárůst pevností v delším časovém horizontu. Ve zmiňované práci dokonce vykazaly vzorky, s obsahem popílku ze spoluspalování uhlí a biomasy, vyšší pevnosti v tlaku po 90 dnech, než referenční vzorek.

4.1.3 Stanovení normální konzistence

Tab. č.7 udává množství vody potřebné pro namíchání směsi normální konzistence v případě náhrady 25 % cementu popílkem.

Tab. č.7 Normální konzistence

Vzorek	Obsah vody [ml]	Obsah vody [%]
25C	115	23
26C	170	34
27C	115	23
1C	160	32
24C	170	34
REF	150	30



Graf. č.8 Závislost potřeby vody na jemnosti částic

V Grafu č. 8 můžeme pozorovat závislost mezi potřebou vody a jemností částic popílku danou hodnotou D 50. Čím jemnější byl použit vzorek, tím větší množství vody bylo třeba pro namíchání směsi normální konzistence.

Tyto výsledky jsou dobře verifikovatelné díky práci Shearera [22] (viz. 2.9.1). Jeho i mnou míchané směsi byly připravovány s 25% náhradou cementu popílkem. Mezi jinými zmiňovanými faktory, které mohou ovlivnit zpracovatelnost, se objevuje i vliv jemnosti částic daného vzorku. Potvrzuje mnou zjištěnou závislost mezi velikostí částic a zpracovatelností směsi.

4.1.4 Stanovení objemové stálosti

Objemová stálost byla stanovena pomocí Le Chatelierových objímek. Tuto zkoušku upravuje norma ČSN EN 450-1. Dle požadavku, v ní stanoveného, může být maximální rozdíl hrotů tyčinek před měřením a po něm 10 mm

Tab. č.8 Objemová stálost

Vzorek	Rozdíl naměřených hodnot [mm]	Splnění požadavku z ČSN EN 450-1
25C	2	ANO
24C	1	ANO
1C	1	ANO
27C	1	ANO
26C	1	ANO
REF	2	ANO

V Tab. č. 8 můžeme vidět, že naměřené rozdíly splnily požadavek s velkou rezervou.

4.1.5 Stanovení počátku a konce doby tuhnutí

Počátek a konec doby tuhnutí byl zjišťován pomocí Vicatova přístroje. V normě ČSN EN 450-1 je stanoven na cementové kaše požadavek na počátek tuhnutí. Počátek doby tuhnutí u kaše s příměsí popílku nesmí být více jak dvakrát delší než počátek doby tuhnutí u referenční směsi složené ze 100 % z cementu.

Tab. č.9 Objemová stálost

Vzorek	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]	Splnění požadavku z ČSN EN 450-1
1C	210	540	ANO
24C	260	470	ANO
25C	220	430	ANO
26C	240	590	ANO
27C	260	420	ANO
REF	255	420	-

Dle tabulky můžeme konstatovat, že požadavek na počátek doby tuhnutí splnily všechny kaše. Největší odchylky byly zaznamenány u konce doby tuhnutí

vzorků 1C a 26C. Ostatní hodnoty všech kaší byly srovnatelné s hodnotami referenční kaše.

4.1.6 Stanovení sypné hmotnosti volně sypané a setřesené

Tab. č.10 Volně sypaná a setřesená hmotnost

Vzorek	Volně sypaná hmotnost [kg/m ³]	Setřesená hmotnost [kg/m ³]
27C	1437	1618
25C	1570	1718
24C	704	978
1C	576	649
26C	578	646

V Tab. č.10 je patrné, že nejvyšších hmotností bylo dosaženo u vzorků ložových popílků 25C a 27C, což je způsobeno obsahem hrubých částic.

4.1.7 Stanovení ztráty žiháním

Dle ČSN EN 450-1 se ztráta hmotnosti žiháním dělí následovně:

Kategorie A: Ne více než 5,0 % hmotnosti

Kategorie B: Ne více než 7,0 % hmotnosti

Kategorie C: Ne více než 9,0 % hmotnosti

Tab. č.11 Ztráta žiháním

Vzorek	Ztráta hmotnosti žiháním [%]
26A	0,39
27A	1,07
28A	2,26
29A	0,72
30A	1,51
24C	0,20
25C	0,02
26C	0,41
1C	1,22
27C	0,00

Ve výběru mnou testovaných vzorků spadají všechny vzorky do kategorie A. Nejvyšší ztráta žiháním byla zaznamenána u vzorku 28A (2,26 %). Jedná se o škváru ze spalování kůry.

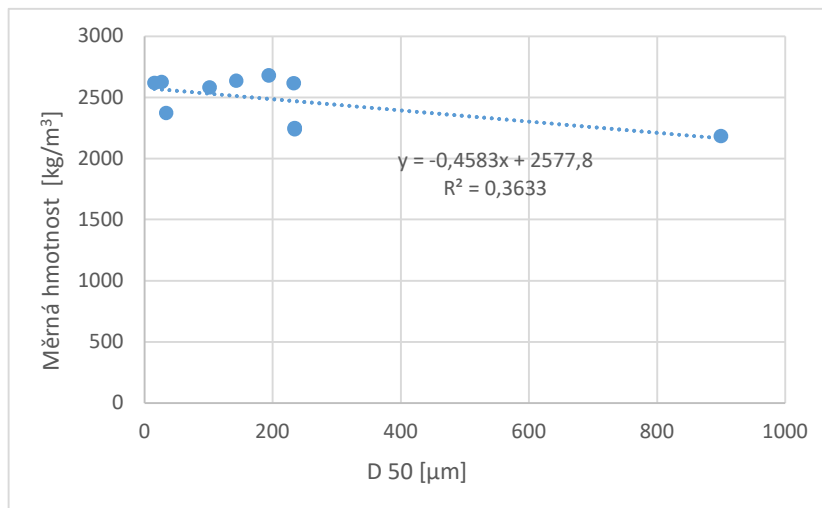
Naopak téměř nulová ztráta žíháním byla zaznamenána u vzorku 25C, kde se jedná o popílek z fluidního spoluspalování uhlí a biomasy.

4.1.8 Stanovení měrné hmotnosti

Měrné hmotnosti vzorků byly určeny pyknometrickou metodou. V příložené tabulce je patrné, že měrná hmotnost všech vzorků je v intervalu od 2183,22 kg/m³, což je nejmenší naměřená měrná hmotnost u vzorku 28A, do 2680,15 kg/m³.

Tab. č.12 Měrná hmotnost

Vzorek	Měrná hmotnost [kg/m ³]
26A	2635,19
27A	2373,67
28A	2183,22
29A	2250,91
30A	2239,12
24C	2627,43
25C	2680,15
26C	2620,23
27C	2616,32
1C	2583,00



Graf. č.8 Měrná hmotnost popílku v závislosti na velikosti zrna

Z Grafu č.8 je patrné, že vzorek 28A vykazuje vysokou hrubost. To je způsobeno původem vzorku, jedná se totiž o škváru, narozdíl od ostatních vzorků,

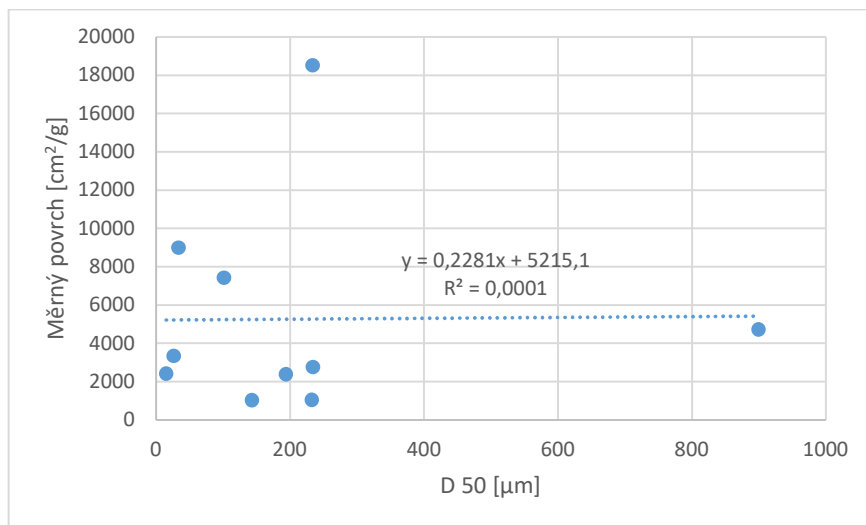
kde se jedná o popílky. Přímou souvislost mezi velikostí zrna a měrnou hmotností se najít nepodařilo. Hlavním důvodem bude fakt, že do vzniku popílků vstupuje příliš mnoho faktorů, které měrnou hmotnost mohou ovlivnit.

4.1.9 Stanovení měrného povrchu

Měrný povrch vzorků byl určen Permeabilní metodou na Blainově přístroji. V *Tab. č. 13* můžeme pozorovat, že jednotlivé hodnoty měrných povrchů se značně liší. Bylo potvrzeno, že úletové popílky dosahují vyšších hodnot měrného povrchu než popílky ložové, pokud pochází ze stejného zdroje. Například si toho můžeme všimnout u vzorků 25C a 24C z elektrárny v Poříčí nebo 26C a 27C z elektrárny v Hodoníně.

Tab. č.13 Měrný povrch

Vzorek	Měrný povrch [cm²/g]
26A	1026,58
27A	8994,55
28A	4728,34
29A	2753,24
30A	18513,93
24C	3337,78
25C	2386,35
26C	2421,39
27C	1051,09
1C	7419,60



Graf. č.9 Měrný povrch popílku v závislosti na velikosti zrna

V Grafu č.9 se kromě již zmíněné vysoké hrubosti vzorku 28A projevil vysoký měrný povrch vzorku 30A. Pro zjištění příčiny tak vysoké hodnoty, bychom museli získat detailní informace o vzniku daného vzorku nebo pořídit mikrosnímky pro poznání jeho mikrostruktury.

4.2 Chemické vlastnosti

4.2.1 Stanovení chemického složení

Prvkové složení

Díky analýze XRF byl získán obsah chemických složek v jednotlivých vzorcích, který by měl splňovat požadavky na procentní zastoupení dle ČSN EN 450-1. Zejména se jedná o následující požadavky:

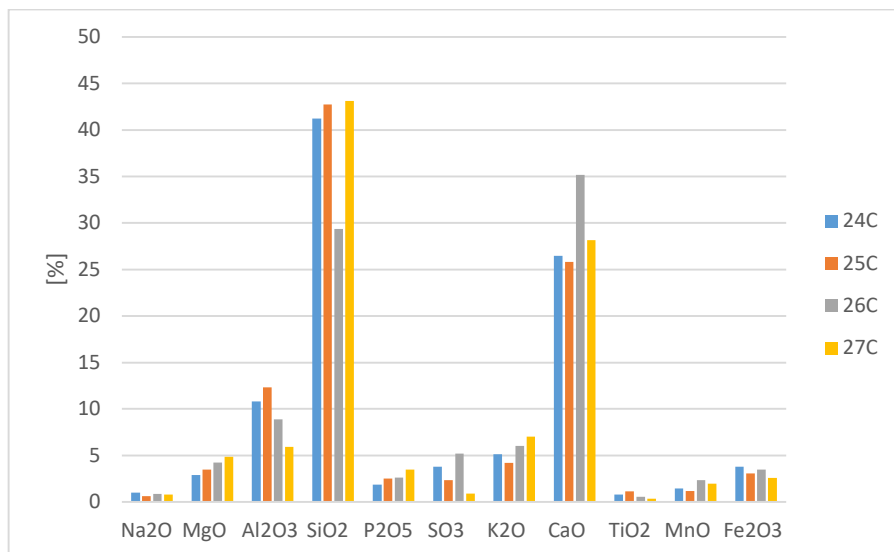
- Chloridy (Cl) < 0,10 % hmotnosti
- Oxid sýrový (SO₃) < 3 % hmotnosti
- Oxid vápenatý (CaO) < 10 % hmotnosti
- Oxid křemičitý (SiO₂) > 25 % hmotnosti
- Oxid křemičitý (SiO₂) + oxid hlinitý (Al₂O₃) + oxid železitý (Fe₂O₃) > 70 % hmotnosti

- Alkálie $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} < 5 \%$ hmotnosti
- Oxid hořečnatý $\text{MgO} < 4 \%$ hmotnosti
- Oxid fosforečný $\text{P}_2\text{O}_5 < 5 \%$ hmotnosti

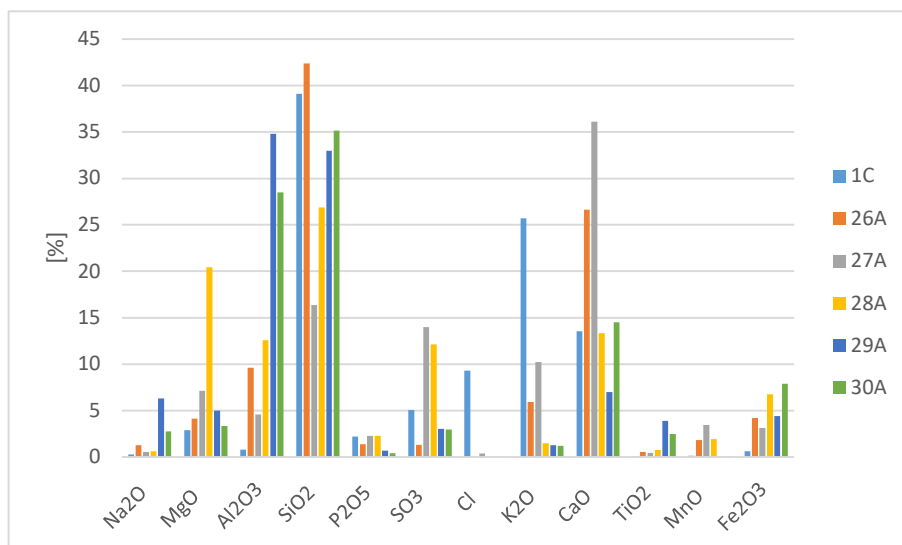
Tab. č.13 Obsah chemických složek v popílcích

Vzorek	Průměr	1 C	24 C	25 C	26 A	26 C	27 A	27 C	28 A	29 A	30 A
Na_2O	1,52	0,31	1,01	0,65	1,32	0,88	0,55	0,80	0,62	6,33	2,77
MgO	5,85	2,89	2,91	3,47	4,17	4,25	7,14	4,87	20,44	4,98	3,34
Al_2O_3	11,89	0,82	0,82	12,35	9,64	8,88	4,60	5,93	12,58	34,80	28,51
SiO_2	30,93	39,10	1,22	42,75	42,37	29,36	16,36	43,13	26,87	32,96	35,13
P_2O_5	1,98	2,20	1,88	2,51	1,40	2,65	2,29	3,49	2,29	0,69	0,44
SO_3	5,08	5,05	3,79	2,34	1,34	5,20	14,01	0,90	12,14	3,05	2,99
Cl	1,35	9,31	0,30	-	0,05	0,63	0,41	-	0,06	0,02	0,02
K_2O	6,83	25,72	5,14	4,21	5,92	6,04	10,23	7,04	1,50	1,28	1,21
CaO	20,68	13,53	6,46	25,84	26,63	35,16	36,11	28,17	13,35	7,00	14,52
TiO_2	1,12	0,09	0,80	1,14	0,57	0,58	0,47	0,36	0,79	3,90	2,50
MnO	1,45	0,14	1,49	1,17	1,83	2,35	3,47	1,99	1,96	0,05	0,08
Fe_2O_3	4,01	0,64	3,80	3,10	4,22	3,49	3,16	2,61	6,77	4,41	7,90

V Tab. č. 13 jsou zvýrazněny hodnoty obsahu chemických složek, které nevyhověly požadavkům ČSN EN 450-1. Největší problémy byly s vysokými obsahy CaO , Cl, SO_3 a MgO . Hrubý odhad množství volného CaO byl zjištěn fázovou analýzou XRD, přesnější hodnotu by bylo nutné stanovit titračně. Hranice 1,5% byla překročena u vzorků 24C, 26C a 27A.



Graf. č.10 Chemické složení fluidních popílků



Graf. č.11 Chemické složení roštových popílků

Tab. č.14 Obsah SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃

	1C	24C	25C	26A	26C	27A	27C	28A	29A	30A
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	40,56	55,84	58,20	56,23	41,73	24,12	51,67	46,22	72,17	71,54

V Tab. č. 14 je znázorněno procentuální hmotnostní zastoupení oxidu křemičitého (SiO₂) + oxidu hlinitého (Al₂O₃) + oxidu železitého (Fe₂O₃). Požadavek normy splnily pouze vzorky 29A a 30A, zároveň se jedná o jediné dva vzorky z roštového spalování uhlí a biomasy ve výběru zkoumaných vzorků. Nejhorší výsledek byl zaznamenán u vzorku 27A.

Tab. č.15 Obsah alkálií

	1C	24C	25C	26A	26C	27A	27C	28A	29A	30A
Na₂O_{eq}	17,23	4,39	3,42	5,22	4,85	7,28	5,43	1,60	7,17	3,57

Z Tab. č. 15 vyplývá, že obsah alkálií, který je nebezpečný například z hlediska trvanlivosti betonu, je nejvyšší u vzorku 1C s původem z roštového spalování balíků sena a slámy. Nejmenší množství alkálií obsahoval vzorek 28A, kde se jedná o škváru z kúrového kotle.

Po vyhodnocení požadavků, daných normou ČSN EN 450-1, bylo zjištěno, že z hlediska chemického složení nevyhověl žádný ze vzorků. Splnění požadavků se přiblížily pouze některé ze vzorků ze spalování uhlí a biomasy. Nejlepší výsledek zaznamenal vzorek 30A, který nevyhověl pouze vyšším obsahem CaO.

Pro porovnání výsledků můžeme použít práci Xiang [35], ze všech jím analyzovaných vzorků, Tab. č.16, byly vybrány popílký ze spalování pelet (mixed forestry pellets), sena (wheat straw) a štěpky (chipped wood). Tyto výsledky ukazují, že nadměrné zastoupení CaO a MgO nebyly problémem pouze mnou zkoumaných vzorků. Pokud budeme uvažovat faktory ovlivňující složení popílků, jako způsob spalování nebo původ biomasy, tak jsou výsledky obou rozborů srovnatelné.

Tab. č.16 Chemické složení popílků z literatury [35]

Biomass	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
Mixed forestry pellets	2.310	4.275	4.476	26.446	1.847	6.422	21.244	0.684	2.080	2.786
Wheat straw	0.270	1.021	0.232	46.639	2.207	11.746	10.149	0.471	0.129	0.239
Chipped wood	1.481	2.751	2.782	19.322	2.786	5.678	26.269	0.656	4.062	2.485

Fázové složení

V následujících tabulkách je uvedeno procentuální zastoupení jednotlivých fází ve vzorcích popílků.

Tab. č.17 Fázové složení dodaných vzorků pomocí XRD analýzy 1.část

Vzorek	Amorfní fáze	Křemen	Kalcit	Volné vápno	Anhydrit	Sádrovec	Periklas	Portlandit
-	-	SiO ₂	CaCO ₃	CaO	CaSO ₄	CaSO ₄ ·2H ₂ O	MgO	Ca(OH) ₂
25C	38,5	47	-	1,5	1	-	-	-
24C	43	33	4	7	3	-	-	-
1C	74,5	2,5	1	-	-	-	-	-
26C	56	15	10	3	4,5	-	-	-
27C	57	33	-	-	-	-	-	-
26A	75,5	14,5	4,5	-	-	-	-	-
27A	61	11,5	4,5	7	5,5	-	3	3
28A	79,5	10	2,5	-	-	6,5	-	-
29A	76,5	4	2	-	-	-	-	-
30A	75	6	8,5	-	-	1,5	-	-

Analýza fázového složení ukázala, že ve všech vzorcích je majoritně obsažena amorfní fáze, a to v širokém rozmezí hodnot 38,5 % - 79,5 %. Nejvíce zastoupenou krystalickou fází je u většiny vzorků křemen (SiO₂). Další fáze obsažené ve vzorcích jsou dosti proměnné, což je dáno nejen vstupním spalovaným materiálem, ale současně i způsobem spalování.

Tab. č.18 Fázové složení dodaných vzorků pomocí XRD analýzy 2.část

Vzorek	Magnetit	Mullit	Muskovit	Albit	Ortoklas	Akermanit	Sylvín	Arkanit	Hercynit	Nefelín
-	Fe ₃ O ₄	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	KAl ₂ (OH,F) ₂ AlSi ₃ O ₁₀	NaAlSi ₃ O ₈	KAlSi ₃ O ₈	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	KCl	K ₂ SO ₄	FeAl ₂ O ₄	(Na, K)AlSiO ₄
-	-	-	stopy	6	1	3	-	-	-	-
24C	0,5	-	stopy	4,5	2,5	1	-	-	-	-
1C	-	-	-	-	-	-	11,5	6,5	-	-
26C	0,5	-	stopy	4	2,5	2	-	-	-	-
27C	-	-	-	-	6	2,5	-	-	-	-
26A	0,5	-	stopy	2,5	stopy	2	-	-	-	-
27A	-	-	-	0,5	stopy	-	-	3,5	-	-
28A	-	-	-	1	0,5	-	-	-	-	-
29A	-	6,5	-	-	-	-	-	-	2,5	6
30A	-	5	-	-	-	-	-	-	0,5	2

Úletové popílky z biomasy po spoluspalování uhlí ve fluidních kotlech 24C a 26C obsahují fáze typické pro fluidní spalování hnědého uhlí s vápencem, a to anhydrit a volné vápno. Ložový popel z těchto kotlů 25C a 27C tyto fáze neobsahují, popř. obsahují výrazně nižší podíl, naproti tomu obsahují vyšší podíl křemene. Ve vzorcích jsou dále obsaženy sodné a draselné živce – albit a ortoklas. V procentuálním zastoupení 1,5 – 4 % byl ve vzorcích identifikován akermanit (Ca₂MgSi₂O₇). Získané fázové složení koresponduje s prvkovým složením z XRF analýz.

Ložový popel z CZT Litoměřice 29A a CZT Mimoň 30A obsahuje vedle velkého podílu amorfní fáze i fázi mullitu (Al₆Si₂O₁₃), která vzniká nad teplotou 1100°C a poukazuje na vysokoteplotní spalování tohoto paliva. Ve vzorcích byly dále identifikovány křemen, kalcit (CaCO₃), nefelín ((Na, K) AlSiO₄), hercynit (FeAl₂O₄) a sádrovec (CaSO₄·2H₂O).

Popíky a škvára z lokality Paskov obsahují vedle majoritních fází – amorfní fáze a křemene navíc kalcit v rozmezí 3-4,5 %. Vzhledem k tomu, že popílek 27A obsahuje anhydrit (CaSO₄), arkanit (K₂SO₄) a škvára 28A obsahuje sádrovec (CaSO₄·2H₂O), lze se domnívat, že je do kotle při spalování kůry dávkován navíc vápenec za účelem odsiřování.

Popílek a struska z Energetického centra Jindřichův Hradec 1C obsahuje vedle amorfni fáze, křemene a kalcitu i vyšší podíl sylvínu (KCl) 13,3 % a arkanitu (K_2SO_4) 7,6%. To koresponduje s prvkovou analýzou, kde byl zaznamenán velmi vysoký obsah K_2O a chloridových iontů.

Fázová analýza všech dodaných vzorků koresponduje s prvkovou analýzou získanou pomocí XRF.

4.3 Zdravotní nezávadnost

4.3.1 Stanovení výluhů vzorků popílků a maltových směsí

V následující *Tab. č. 19* jsou uvedeny limitní hodnoty výluhů dle různých předpisů. Asociace ASVEP ve svých technických podmínkách uvádí limitní hodnoty koncentrací škodlivin ve výluhu pro území nepostižená antropogenní činností. Ministerstvo dopravy udává v TP 93 Limitní výluhy. Poslední uvažovaná vyhláška 294/2005Sb. byla vydána Ministerstvem životního prostředí. Pro vyhodnocení v mé práci byl vždy uvažován nejpřísnější z těchto parametrů.

Tab. č.19 Limity výluhů [33] [34]

		Limitní hodnoty TP ASVEP	Limitní hodnoty TP 93	Limitní hodnot-vody VYHLÁŠKA 294/2005Sb.	
				TŘÍDA I	TŘÍDA IIa
pH		6-9	-		≥6
Vodivost	mS/m	125	-		
RL 105 oC	mg/l	-	-	400	8000
RAS	mg/l				
DOC	mg/l	10	-	50	80
Chloridy	mg/l	-	-	80	1500
Fluoridy	mg/l	-	-	1	30
Sírany	mg/l	-	-	100	3000
Antimon	mg/l	0,005	-	0,006	0,5
Arsen	mg/l	0,01	0,1	0,05	2,5
Baryum	mg/l	0,05	1	2	30
Beryllium	mg/l		0,005		
Bór	mg/l	0,3	-		
Cín	mg/l	0,025	1		
Hliník	mg/l	0,2	-		
Kadmium	mg/l	0,0005	0,005	0,004	0,5
Chrom	mg/l	0,05	0,1	0,05	7
Kobalt	mg/l	0,003	0,1		
Olovo	mg/l	0,005	0,1	0,05	5
Měď	mg/l	0,014	1	0,2	10
Molybden	mg/l	0,005	-	0,05	3
Nikl	mg/l	0,02	0,1	0,04	4
Rtuť	mg/l	0,0002	0,005	0,001	0,2
Selen	mg/l	0,01	0,05	0,01	0,7
Stříbro	mg/l		0,1		
Vanad	mg/l	0,018	0,2		
Zinek	mg/l	0,05	3	0,4	20

Tab. č.20 Vyhodnocení výluhů vzorků popílků

		CEM	1C	24C	25C	26C	27C
pH	pH	12,95	9,58	12,51	12,59	12,59	11,93
Konduktivita	Kn	1280	4100	1070	1060	1200	190
RL 105°C	RL 105°C	3430	29800	4500	3580	5390	508
RAS	RAS	3410	29500	3960	3490	5070	<100
DOC	DOC	10,50	12,3	6	5,43	7,77	5,53
Chloridy	Cl	23,8	9110	167	<5,00	356	<5,00
Fluoridy	F	<1,00	<1,00	1,23	<1,00	1,52	<1,00
Sířany	S	364	7530	1400	894	1730	33,1
Antimon	Sb	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Arsen	As	<0,0050	0,0366	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Baryum	Ba	1,210	0,582	0,213	0,376	0,233	0,275
Beryllium	Be	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010
Bor	B	<0,050	0,054	<0,050	<0,050	0,058	0,069
Cín	Sn	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010
Hliník	Al	<0,0250	0,0303	<0,0250	<0,0250	0,0347	1,03
Kadmium	Cd	<0,00050	<0,00050	<0,00050	<0,00050	<0,00050	<0,00050
Chrom	Cr	1,05	<0,0050	0,122	<0,0050	0,0852	<0,0050
Kobalt	Co	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Olovo	Pb	<0,0050	<0,0050	0,0118	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Měď	Cu	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Molybden	Mo	0,0573	0,213	0,0894	0,0771	0,107	0,0099
Nikl	Ni	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Rtuť	Hg	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,0004	<0,0003	<0,0003
Selen	Se	<0,010	0,030	0,011	<0,010	0,015	<0,010
Stříbro	Ag	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Vanad	V	<0,0050	0,0084	<0,0050	<0,0050	<0,0050	0,0090
Zinek	Zn	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050

V porovnání s referenčním cementem i ostatními vzorky byla zaznamenána několikanásobně vyšší hodnota při stanovení rozpuštěných látek sušených při 105 °C (RL 105°C), chloridů a síranů u vzorku 1C, pocházejícího ze spalování sena a slámy, což může být důvodem takto vysokých hodnot. Při srovnání všech vzorků s referenčním cementem byl zjištěn rozdíl překročení limitů zejména u chloridů, fluoridů a selenu. Naopak obsah chromu byl u vzorků nižší.

Tab. č.21 Vyhodnocení výluhů vzorků maltových směsí

		1C	24C	25C	26C	27C
pH	pH	12,67	12,66	12,70	12,66	12,70
Konduktivita	Kn	1370	1100	1070	1100	1070
RL 105°C	RL 105°C	4560	2690	2530	2720	2500
RAS	RAS	4090	2270	2370	2280	2110
DOC	DOC	8,43	8,83	7,13	11,5	7,96
Chloridy	Cl	571	35,2	16,7	52,3	17,6
Fluoridy	F	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00
Sírany	S	103	9,25	12,5	8,08	12,7
Antimon	Sb	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Arsen	As	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Baryum	Ba	0,447	1,85	0,934	2,37	0,959
Beryllium	Be	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010
Bor	B	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050
Cín	Sn	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010
Hliník	Al	0,0744	0,0311	0,0265	0,0299	0,0398
Kadmium	Cd	<0,00050	<0,00050	<0,00050	<0,00050	<0,00050
Chrom	Cr	0,520	0,0913	0,0493	0,107	0,0733
Kobalt	Co	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Olovo	Pb	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Měď	Cu	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Molybden	Mo	0,0263	0,0063	0,0057	0,0062	<0,0050
Nikl	Ni	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Rtuť	Hg	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Selen	Se	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010
Stříbro	Ag	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Vanad	V	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Zinek	Zn	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050

Tab. č. 21 obsahuje hodnoty výluhů vzorků maltových směsí. V porovnání s Tab. č. 20 byl ve většině parametrů zaznamenán pokles vyluhovatelnosti. U vzorku 1C byl tento rozdíl nejzřetelnější. Hodnota vyluhovaných chloridů se u tohoto vzorku snížila téměř šestnáctkrát. Hodnota vyluhovaných síranů dokonce pětasedmdesátkrát. I přesto, že maltová směs obsahovala pouze 25% popílku a 75% cementu, jsou tyto rozdíly v naměřených hodnotách velké. Opačný vliv měl cement například na vyluhovatelnost barya.

Veškeré hodnoty vyluhovatelnosti byly posuzovány podle nejpřísnějšího ze tří vybraných parametrů limitních hodnot. Limitní hodnoty dané v TP ASVEP však nejsou závazné. Pokud bychom tento předpis vyřadily z výběru, vyhodnocení výluhů by se u některých látek proměnilo. Například hodnoty barya by nevyhověly pouze v případě referenčního cementu.

5 Shrnutí

Po provedení granulometrického rozboru bylo zjištěno, že podmínku normy ČSN EN 450-1 splnily pouze úletové popílky 24C a 26C. Zbýlých 8 vzorků nesplnilo požadovanou limitní hodnotu.

Při zkoušce indexu účinnosti nesplnil požadovanou hodnotu žádný ze vzorků. Nejvyšší naměřené hodnoty se dostaly na percentil 0,7.

Zkouška normální konzistence nám ukázala závislost mezi velikostí částic materiálu a potřebou vody. Nejvíce vody pro namíchání směsi normální konzistence bylo třeba u nejjemnějších vzorků a to 170ml u vzorků 24C a 26C.

Podmínky objemové stálosti splnily všechny vzorky. Maximální rozdíl byl naměřen u vzorku 25C (2mm).

Po získání hodnot počátků a konců tuhnutí jednotlivých vzorků bylo zjištěno, že vzorky 1C, 25C a 26C začaly tuhnout dříve než referenční cementová kaše a zbylé dva vzorky začaly tuhnout v podobném čase jako referenční vzorek. Celkově požadavkům normy vyhověly všechny vzorky.

Volně sypaná i setřesená hmotnost byla naměřena nejvyšší u vzorku 25C (1570kg/m^3 ; 1718kg/m^3), naopak nejnižší hodnoty vykazaly vzorky 1C a 26C, u obou se hodnoty volně sypané hmotnosti pohybovaly okolo 580kg/m^3 a setřesené okolo 650kg/m^3 .

Naměřené ztráty žiháním byly nízké. Nejvyšší naměřená ztráta hmotnosti byla 2,26%.

Po pyknometrické zkoušce byly spočítány jednotlivé hodnoty měrné hmotnosti a získané hodnoty neukázaly žádnou výraznější odchylku. Hodnoty se pohybovaly od $2183,22\text{kg/m}^3$ do $2680,15\text{kg/m}^3$.

Na rozdíl od měrných hmotností, měrné povrchy se v některých případech výrazně lišily. Nejnižší měrný povrch vykazaly vzorky 26A ($1026,58\text{cm}^2/\text{g}$) a 27C

(1051,09cm²/g). Naopak nejvyšší měrný povrch byl změřen u vzorku 30A (18513,93cm²/g).

Všem požadavkům na chemické složení nevyhověl žádný ze vzorků. Největší problémy byly s vysokými obsahy CaO, Cl⁻, SO₃ a MgO. Nelepší výsledky zaznamenal vzorek 30A, který nevyhověl pouze vyšším obsahem CaO.

Hodnoty výluhů byly dle předpokladu nižší u směsí než samotných vzorků. V některých hodnotách byly popílky dokonce úspěšnější než referenční cement. Hlavním problémem u většiny vzorků byl obsah chloridů a síranů.

6 Závěr

V mé bakalářské práci jsem se zabýval problematikou fyzikálních, chemických a mechanických vlastností popílků a popelů, ze spalování a spoluspalování biomasy. Jejich vlastnosti jsem zkoumal s cílem určit, zda je v budoucnu možné jejich použití ve stavebnictví. Všechny zkoušky byly prováděny v souladu se současnou legislativou pro využívání odpadů a vedlejších energetických odpadů ve stavebnictví.

V úvodní části jsem popsal základní problematiku spojenou s potřebou využívání vedlejších energetických produktů (VEP) a stanovil základní cíle mé práce.

Teoretická část obsahuje základní rešerši k druhům biomasy a k jejím vlastnostem. Dále jsem se v rešeršní části věnoval nejrozšířenějším druhům spalování biomasy a druhům vznikajících vedlejších energetických produktů. Popsal jsem základní výhody a nevýhody jednotlivých druhů spalování a od nich se odvíjející využití. Při popisu vznikajících vedlejších energetických produktů byly zmíněny základní vlastnosti popelů a popílků, nejvíce relevantních pro stavební účely, v závislosti na jejich původu a způsobu spalování. Poté se již má teoretická část začíná věnovat využití popelů a popílků jako součástí maltových a betonových směsí. V úvodu jsou popsány hlavní úskalí jejich využití, jako je nedostatečně přizpůsobená legislativa, nestálost jejich vlastností nebo přítomnost velkého množství látek, negativně ovlivňujících výsledné vlastnosti daných materiálů. Na tuto kapitolu navazuje popis jednotlivých vlastností, požadovaných současnou legislativou. Jedná se zejména o normu ČSN EN 450-1 a dokumenty na ní navazující. V poslední části, věnující se této problematice, jsem se věnoval dosavadnímu stavu poznání v oblasti vlastností maltových a betonových směsí se zastoupením různého množství a různých druhů popílků ze spalování a spoluspalování biomasy. Zjistil jsem, že v zahraničí probíhá intenzivní výzkum této problematiky a zmínil některé z provedených experimentů, jejichž výsledky se dotýkají i mé práce. V závěrečné části teoretické části jsem se krátce zmínil o geopolymerním betonu a geopolymerech celkově. K tomu mě vedla myšlenka na možnost budoucího využití VEP, ze spalování a

spoluspalování biomasy, při výrobě alkalicky aktivovaných materiálů. Tato problematika ovšem potřebuje podrobit hlubšímu bádání a v mé praktické části již pro ni nebyl prostor.

Má praktická část se sestává ze základní identifikace vstupních materiálů. Tzn. popis základních vlastností látek použitých během laboratorních zkoušek. V této části se nachází i tabulka s popisem původu všech popelů, popílků a jednoho vzorku škváry. Po této kapitole následuje popis všech prováděných zkoušek, včetně popsání postupu pro vyhodnocení zkoušek. Většina zkoušek byla prováděna v laboratořích Ústavu skla a keramiky na VŠCHT, případně byly některé ze vzorků odeslány společně s spolupracujícím s VŠCHT, pro provedení specifických měření.

V části Výsledky a diskuze jsem se zabýval vyhodnocením provedených zkoušek. Zkoušky byly rozděleny do skupin fyzikální a mechanické vlastnosti, chemické vlastnosti a zdravotní nezávadnost. Ve většině laboratorních zkoušek se projevila všeobecně známá charakteristika produktů ze spalování biomasy, a tou je proměnlivost výsledků. Původ spalované biomasy a způsob spalování mají zásadní vliv na vlastnosti VEP. Nejvyšší konzistence výsledků bylo dosaženo při zkouškách indexu účinnosti a objemové stálosti. Při zkoušce indexu účinnosti sice žádný ze zkušebních vzorků nevyhověl požadavkům normy, ale většina získaných hodnot pevnosti v tlaku se vzájemně lišila řádově o jednotky procent. Vývoj pevnosti v tlaku bude zajímavý i z hlediska dlouhodobějšího růstu pevnosti, což je dokumentováno experimentem provedeným v zahraničí.

Poté, co byly vzorky podrobeny charakterizaci, lze konstatovat, že VEP ze spalování a spoluspalování biomasy mají svou budoucnost pro využití ve stavebnictví, ale pouze v případě zajištění stálých vlastností produktů spalování. Vzorky zkoumané v této práci by měly zásadní vliv na výsledné vlastnosti materiálů, ať již z pohledu trvanlivosti či jiných fyzikálních a mechanických vlastností. Proto je třeba pokračovat ve výzkumu a posunout hranice našeho poznání v této problematice.

Použitá literatura

- [1] ROSENDAHL, Lasse. *Biomass combustion, technology and engineering* [online]. Oxford: Woodhead Publishing, 2013 [cit. 2021-04-04]. Woodhead publishing series in energy. ISBN 978-0-85709-743-9.
- [2] LOO, Sjaak van a Jaap KOPPEJAN, ed. *Handbook of biomass combustion and co-firing*. Enschede: Twente University Press, c2002. ISBN 90-365-1773-7
- [3] CHMELÍČEK, Jiří. *Kotle na biomasu velkých výkonů*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ing. MAREK BALÁŠ, Ph.D.
- [4] ŠŤASTNÝ, Vítězslav. Kotle na biomasu. In: *Energetikainfo.cz* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 2010 [cit.2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.energetikainfo.cz/33/kotle-na-biomasu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EIDzobldhBp5sZK7GBTI9atPpA5B5rrwHw/>
- [5] DE BRITO, Jorge, AGRELA, Francisco, ed. *New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete* [online]. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering Ser. San Diego: Elsevier Science & Technology, 2018 [cit. 2021-04-05]. ISBN9780081024812. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=5602434>
- [6] Přehled energetických plodin, jejich vlastnosti a přepočty jednotek. *Tzb-info.cz* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/98-prehled-energetickyh-plodin-jejich-vlastnosti-a-prepocety-jednotek>
- [7] IBLER, Zbyněk a Zbyněk IBLER. *Možnosti rozvoje výroby tepla a elektřiny využitím biomasy v regionech a městech ČR* [online], květen 2003 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.mpoefekt.cz/cz/programypodpory/efekt/publikace/988>
- [8] ZÁRYBNICKÁ, Michaela. *BIOMASA-OBNOVITELNÝ ZDROJ ENERGIE* [online]. [cit.20210411]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/13/IUT/063_Biomasa-Obnovitelny_zdroj_energie_-_Zarybnicka_-

_P1.pdf.Výukový materiál. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra energetických strojů a zařízení.

[9] Michalik, M., Wilczynska-Michalik, W., Mineral and chemical composition of biomass[online],2012 [cit. 2021-04-11], Conference: European Mineralogical Conference, Frankfurt, Germany

[10] ČSN EN 450-1: Popílek do betonu – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

[11] BELTRÁN, Manuel G., Francisco AGRELA, Auxi BARBUDA, Jesús AYUSO a Antonio RAMÍREZ. Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates. In: C. FORDE, Michael, ed. *Construction and Building Materials* [online]. 29 září 2014, 72, 231-238 [cit. 2021-04-12].ISSN09500618.Dostupné:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814010344>

[12] MATIAS, D., J. DE BRITO, A. ROSA a D. PEDRO. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. In: C. FORDE, Michael, ed. *Construction and Building Materials* [online]. 72. 9 duben 2013, s. 101-109 [cit. 2021-04-12]. ISSN 0950-0618.

Dostupné:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813002146>

[13] ROSALES, Julia, Manuel CABRERA, Manuel G. BELTRÁN, Martín LÓPEZ a Francisco AGRAELA. Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars. In: C. FORDE, Michael, ed. *Journal of Cleaner Production* [online]. 72. Córdoba: Elsevier, 2017, 5 duben 2017, s. 424-435 [cit. 2021-04-12]Dostupné:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617307230>

- [14] WONGKEO, Watcharapong, Arnon CHAIPANICH a Pailyn THONGSANITGARN. Compressive strength and drying shrinkage of fly ash-bottom ash-silica fume multi-blended cement mortars. In: C. FORDE, Michael, ed. *Materials and Design* [online]. 36. Chiang Mai: Elsevier, 2012, 26 listopad 2011, s. 655-662 [cit. 2021-04-12]. Dostupnéz: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026130691100803X>
- [15] LANZERSTORFER, Christof. Chemical composition and physical properties of filter fly ashes from eight grate-fired biomass combustion plants. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES* [online]. Elsevier, 2015, 31 Leden 2015, (30), 191-197 [cit.2021-04-18].Dostupnéz: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100107421500025X>
- [16] TLUSTOŠ, Pavel. *Monitoring kvality popelů ze spalování biomasy: certifikovaná metodika*. Praha-Suchdol: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012. ISBN 978-80-213-2327-8 [cit.2021-04-22].
- [17] Biedermann, F., Obernberger, I. 2005. Ash-related problems during biomass combustion and possibilities for a sustainable ash utilisation [online]. 11. října2005[cit.2021-04-22]. Dostupnéz<http://www.biosbioenergy.at/uploads/media/Paper-Biedermann-AshRelated-2005-10-11.pdf>.
- [18] Kuba, T., Tschöll, A., Partl, C., Meyer, K., Insam, H. 2008. Wood ash admixture to organic wastes improves compost and its performance. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 127 (1-2), 43-49
- [19] Lindgaard, J., Andic, C., Akir, O., Fernandes, I., Rønning, T.F., Thomas, M.D., 2012. Alkali-silica reactions (ASR): literature review on parameters influencing laboratory performance testing. *Cem. Concr. Res.* 42 (2), 223_243
- [20] NEWMAN, John a Ba Seng CHOO. *Advanced concrete technology: Constituent materials*. Oxford: Elsevier Science & Technology, 2003. ISBN 0750651032.

- [21] Heede, P. V., Ringoot, N., Beirnaert, A., VanBrecht, A., Brande, E. V., Schutter, G. D., & Belie, N. D. (2016). Sustainable high quality recycling of aggregates from waste-to-energy, treated in a wet bottom ash processing installation, for use in concrete products. *Materials*, 9(1), 9.
doi:<http://dx.doi.org.ezproxy.techlib.cz/10.3390/ma9010009>
- [22] Shearer, C. R., & Kurtis, K. E. (2015). Use of biomass and co-fired fly ash in concrete. *ACI Materials Journal*, 112(2), 209-218.
doi:<http://dx.doi.org.ezproxy.techlib.cz/10.14359/51686827>
- [23] ŘEZNÍK, Bohuslav a Pavla ROVNANIKOVÁ. Alkalická aktivace mletého keramického střepe. In: *Stavební obzor* [online]. Praha, 2014, s. 161-165 [cit. 2021-4-26]. ISSN 1805-2576. Dostupné z:
http://www.civilengineeringjournal.cz/archive/issues/2014/so_9-10/so_05_14_reznik.pdf
- [24] SONGPIRIYAKIJ, Smith, Teinsak KUBPRASIT, Chai JATURAPITAKKUL a Prinya CHINDAPRASIRT. Compressive strength and degree of reaction of biomass- and fly ash-based geopolymer. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2010, 9 October 2009n. l., (24), 236-240 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809003109?via%3Dihub>
- [25] ČSN EN 196-1: *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [26] ČSN EN 196-3: *Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [27] ČSN 72 2071: *Popílek pro stavební účely – Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [28] ČSN 72 0103: *Základní postup rozboru silikátů – Stanovení ztráty žiháním*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [29] ČSN EN 196-6: *Metody zkoušení cementu – Část 6: Stanovení jemnosti mletí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [30] ČSN EN 1097-7: *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 7: Stanovení měrné hmotnosti fileru – Pyknometrická zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.

[31] PRCHAL, Jan. Laboratoř rentgenové difraktometrie a spektrometrie. *Centrální laboratoře VŠCHT PRAHA* [online]. Praha, 29.5.2018 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://clab.vscht.cz/rtg/rtg-mereni>

[32] LASEROVÁ DIFRAKCE: pro charakterizaci částic až do nano rozsahu. *Microtrac MRB* [online]. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.microtrac.cz/cz/produkty/analyza-velikosti-a-tvaru-castic/laserova-difrakce/>

[33] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška o podmínkách ukládání odpadů na skládky jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. In: Sbíрка zákonů. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2005, ročník 2005, Částka 105, 294/2005 Sb. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=294&r=2005>

[34] Technické podmínky. In: Asociace pro využití energetických produktů, 2012. Dostupné také z:

http://www.asvep.cz/prilohy/TP_ASVEP_r2012_FV_se_zmenami.pdf

[35] XING, P., P.E. MASON, S. CHILTON, S. LLOYD, J.M. JONES, A. WILLIAMS, W. NIMMO a M. POURKASHANIAN. A comparative assessment of biomass ash preparation methods using X-ray fluorescence and wet chemical analysis. *Fuel* [online]. London: Elsevier, 2016, 27 May 2014, (182), 161-165 [cit. 2021-5-12]. ISSN0016-2361. Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116303969>

Seznam tabulek

Tab. č.1 Průměrné složení biomasy	14
Tab. č.2 Druhy spoluspalovaných materiálů	21
Tab. č.3 Zrnitost referenčního písku CEN	35
Tab. č.4 Původ vzorků.....	36
Tab. č.5 Zbytek na síť 45 μm a velikost středního zrna R 50 μm.....	53
Tab. č.6 Index účinnosti.....	55
Tab. č.7 Normální konzistence	56
Tab. č.8 Objemová stálost	57
Tab. č.9 Objemová stálost	57
Tab. č.10 Volně sypaná a setřesená hmotnost	58
Tab. č.11 Ztráta žíháním	58
Tab. č.12 Měrná hmotnost.....	59
Tab. č.13 Měrný povrch.....	60
Tab. č.13 Obsah chemických složek v popílcích	62
Tab. č.14 Obsah SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	63
Tab. č.15 Obsah alkálií.....	64
Tab. č.16 Chemické složení popílků z literatury	64
Tab. č.17 Fázové složení dodaných vzorků pomocí XRD analýzy 1.část.....	65
Tab. č.18 Fázové složení dodaných vzorků pomocí XRD analýzy 2.část.....	66
Tab. č.19 Limity výluhů.....	68
Tab. č.20 Vyhodnocení výluhů vzorků popílků.....	69
Tab. č.21 Vyhodnocení výluhů vzorků maltových směsí.....	70

Seznam grafů

Graf č.1 Závislost výhřevnosti na obsahu vody v biomase	15
Graf č.2 Vliv popílku ze spalování biomasy na zpracovatelnost cem. směsi	30
Graf č.3 Závislost pevnosti cementové směsi na příměsi popílku z biomasy	31
Graf č.4 Zastoupení jednotlivých frakcí.....	52
Graf č.5 Kumulativní křivky velikosti částic	53
Graf č.6 Zbytek na síť 45 μm	54
Graf č.7 Velikost středního zrna R 50 μm	54
Graf č.8 Závislost potřeby vody na jemnosti částic.....	56
Graf č.8 Měrná hmotnost popílku v závislosti na velikosti zrna	59
Graf č.9 Měrný povrch popílku v závislosti na velikosti zrna	61
Graf č.10 Chemické složení fluidních popílků	63
Graf č.11 Chemické složení roštových popílků.....	63

Seznam obrázků

Obr. č.1 Roštové spalování biomasy	16
Obr. č.2 Fluidní kotel s cirkulující vířivou vrstvou a chladičem popílku	17
Obr. č.3 Příklad popílku ze spalování biomasy (vlevo) a spoluspalování s uhlím (vpravo)	20
Obr. č.4 Zhutněné vzorky na vibračním stolku.....	39
Obr. č.5 Zkoušení pevnosti v tlaku	40
Obr. č.6 Odstraňování vzduchových bublin	47
Obr. č.7 Blainův přístroj MATEST	49