

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ  
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

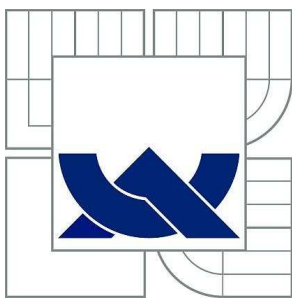
MOŽNOSTI VYUŽITÍ TUHÝCH ZBYTKŮ Z FLUIDNÍHO SPALOVÁNÍ  
PRO PŘÍPRAVU SMĚSNÝCH PORTLANDSKÝCH CEMENTŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

DENISA HANISKOVÁ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ  
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

## MOŽNOSTI VYUŽITÍ TUHÝCH ZBYTKŮ Z FLUIDNÍHO SPALOVÁNÍ PRO PŘÍPRAVU SMĚSNÝCH PORTLANDSKÝCH CEMENTŮ

POSSIBILITIES OF UTILIZATION OF SOLID RESIDUES FROM FLUIDIZED BED COMBUSTION  
FOR PREPARATION OF COMPOSITE PORTLAND CEMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DENISA HANISKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ OPRAVIL, Ph.D.

BRNO 2013



Vysoké učení technické v Brně  
**Fakulta chemická**  
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

## Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce:	<b>FCH-BAK0750/2012</b>	Akademický rok: <b>2012/2013</b>
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	<b>Denisa Hanisková</b>	
Studijní program:	Chemie a chemické technologie (B2801)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808R016)	
Vedoucí práce	<b>Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.</b>	
Konzultanti:		

### Název bakalářské práce:

Možnosti využití tuhých zbytků z fluidního spalování pro přípravu směsných portlandských cementů

### Zadání bakalářské práce:

Literární rešerše.

Svoz a analýza fluidních popílků z vybraných lokalit v ČR.

Návrhy receptur směsných cementů a testy těchto pojivových systémů dle ČSN 197-1.

Vyhodnocení experimentů, vyvození závěrů, zpracování závěrečné práce.

### Termín odevzdání bakalářské práce: 10.5.2013

Bakalářská práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

-----  
Denisa Hanisková  
Student(ka)

-----  
Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.  
Vedoucí práce

-----  
prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.  
Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2013

-----  
prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalárska práca sa zaoberá možnosťami využitia tuhých zbytkov z fluidného spaľovania uhlia – lôžkových a filtrových popolčiekov – pri výrobe zmesných portlandských cementov. Skúmaných bolo celkovo šesť popolčiekov, tri lôžkové (jemne mleté) a tri filtrové, z elektrární Ledvice, Tisová a Poříčí. Bolo stanovené chemické zloženie použitých popolčiekov a bol sledovaný priebeh ich hydratačnej reakcie. Po vyhodnotení boli pripravené zmesi s portlandským slinkom, na ktorých boli skúmané pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku, priebeh hydratačnej reakcie a zloženie produktov hydratačnej reakcie. Nakoniec boli výsledky vybraných zmesí overené na pripravených normových maltách.

## **ABSTRAKT**

Bakalárska práce sa zaoberá možnosťami využitia tuhých zbytků z fluidního spalování uhlí – ložovým a filtrovým popílčkem – při výrobě směsných portlandských cementů. Zkoumaných bylo celkově šest popílčků, tři ložové (jemně mleté) a tři filtrové, z elektráren Ledvice, Tisová a Poříčí K8. Bylo stanoveno chemické složení použitých popílčků a byl sledován průběh jejich hydratační reakce. Po vyhodnocení byly připraveny směsi s portlandským slínkem, na kterých byly zkoumány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, průběh hydratační reakce a složení produktů hydratační reakce. Nakonec byly výsledky vybraných směsí ověřeny na připravených normových maltách.

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with possibilities of utilization of solid residues from fluidized bed combustion of coal, bed and filter ash, to be used in the production of composite Portland cements. 6 ash types were investigated, of which 3 were bed ash (finely ground) and 3 were filter ash collected from Ledvice, Tisová and Poříčí K8 power plants. The chemical composition of the ash collected was determined and the progress of a hydration reaction monitored, and then samples mixed with Portland clinker were prepared. Their respective compressive strength and flexural strength were then analysed and observations made on the hydration and composition of products of the hydration reaction. Finally the results of selected mixtures were verified with prepared standardized mortars.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Portlandský cement, portlandský slinok, fluidný popolček, pevnosť v tlaku, pevnosť v ťahu za ohybu, hydratačná reakcia.

## **KEYWORDS**

Portland cement, Portland clinker, fluidized bed combustion ash, compressive strength, flexural strength, reaction of hydration.

HANISKOVÁ, D. *Možnosti využití tuhých zbytků z fluidního spalování pro přípravu směsných portlandských cementů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2013. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D..

## PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracovala samostatne a že všetky použité literárne zdroje som správne a úplne citovala. Bakalárska práca je z hľadiska obsahu majetkom Fakulty chemickej VUT v Brně a môže byť použitá ku komerčným účelom len so súhlasom vedúceho bakalárskej práce a dekana FCH VUT v Brně.

.....

Denisa Hanisková

## Pod'akovanie

*Na tomto mieste by som veľmi rada poďakovala vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Tomášovi Opravilovi, Ph.D. za pomoc, trpezlivosť a cenné odborné rady, Ing. Jiřímu Másilkovi, Ph.D. za ústretovosť a inštrumentálnu pomoc pri XRD analýze a Ing. Pavlovi Šilerovi, Ph.D. za pomoc a ochotu pri kalorimetrickom meraní. Ďalej by som rada poďakovala projektu Centra materiálového výzkumu na FCH VUT v Brně, CZ.1.05/2.1.00/01.0012, s podporou ktorého táto bakalárska práca vznikla.*

## Obsah:

<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČASŤ</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1 SPAĽOVANIE UHLIA</b> .....	<b>8</b>
2.1.1 VÝTAVNÉ KOTLY .....	8
2.1.2 GRANULAČNÉ KOTLY .....	8
2.1.3 FLUIDNÉ KOTLY .....	9
2.1.3.1 Atmosférické fluidné kotle so stacionárnou fluidnou vrstvou (AFB) .....	10
2.1.3.2 Atmosférické fluidné kotle s cirkulujúcou fluidnou vrstvou (ACFB).....	10
<b>2.2 POPOLČEKY</b> .....	<b>11</b>
2.2.1 VLASTNOSTI POPOLČEKOV .....	11
2.2.1.1 Fyzikálne vlastnosti .....	11
2.2.1.2 Chemické vlastnosti.....	11
2.2.1.3 Mineralogické vlastnosti.....	11
2.2.2 TYPY POPOLČEKOV .....	11
2.2.2.1 Kremičitý popolček (V).....	11
2.2.2.2 Vápenatý popolček (W).....	12
2.2.2.3 Fluidné popolčky .....	12
2.2.2.4 Vysokoteplotné popolčky .....	12
2.2.3 PUZOLÁNY .....	13
<b>2.3 CEMENT</b> .....	<b>13</b>
2.3.1 HISTÓRIA CEMENTU .....	14
2.3.2 SUROVINY .....	14
2.3.2.1 Zloženie surovinovej zmesi .....	14
2.3.3 VÝROBA CEMENTU .....	16
2.3.3.1 Ťažba a drvenie suroviny.....	16
2.3.3.2 Príprava surovinovej zmesi .....	16
2.3.3.3 Výpal slinku.....	17
2.3.3.4 Mletie slinku .....	18
2.3.4 ZLOŽENIE SLINKU .....	19
2.3.5 TRIEDY CEMENTU .....	19
2.3.6 MECHANICKÉ, FYZIKÁLNE A CHEMICKÉ VLASTNOSTI.....	21
2.3.6.1 Mechanické vlastnosti .....	21
2.3.6.2 Fyzikálne vlastnosti .....	21
2.3.6.3 Chemické vlastnosti.....	22
<b>3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ</b> .....	<b>23</b>
<b>3.1 STANOVENIE OBSAHU VOĽNÉHO VÁPNA V POPOLČEKOCH</b> .....	<b>23</b>
<b>3.2 PRÍPRAVA TESTOVACÍCH TELIESOK PRE MERANIE PEVNOSTÍ</b> .....	<b>23</b>
<b>3.3 STANOVENIE PEVNOSTI V ŤAHU ZA OHYBU A V TLAKU</b> .....	<b>24</b>
<b>3.4 IZOPERIBOLICKÁ KALORIMETRIA</b> .....	<b>25</b>
<b>3.5 RÖNTGENOVÁ FLUORESCENČNÁ SPEKTROMETRIA</b> .....	<b>26</b>
<b>3.6 RÖNTGENOVÁ DIFRAKČNÁ ANALÝZA</b> .....	<b>26</b>

<b>4 VÝSLEDKY A DISKUSIE</b> .....	<b>28</b>
<b>4.1 POUŽITÉ SUROVINY</b> .....	<b>28</b>
<b>4.2 CHEMICKÉ ZLOŽENIE POPOLČEKOV</b> .....	<b>28</b>
<b>4.3 FLUIDNÝ LÔŽKOVÝ POPOLČEK Z ELEKTRÁRNE LEDVICE AKO DONOR SÍRANOV V P-SLINKU</b> ..	<b>31</b>
<b>4.4 FLUIDNÝ LÔŽKOVÝ POPOLČEK Z ELEKTRÁRNE TISOVÁ AKO DONOR SÍRANOV V P-SLINKU</b> ....	<b>36</b>
<b>4.5 FLUIDNÝ LÔŽKOVÝ POPOLČEK Z ELEKTRÁRNE POŘÍČÍ K8 AKO DONOR SÍRANOV V P-SLINKU</b> .....	<b>41</b>
<b>4.6 FLUIDNÝ FILTROVÝ POPOLČEK Z ELEKTRÁRNE TISOVÁ AKO DONOR SÍRANOV V P-SLINKU</b> ....	<b>46</b>
<b>4.7 FLUIDNÝ FILTROVÝ POPOLČEK Z ELEKTRÁRNE POŘÍČÍ K8 AKO DONOR SÍRANOV V P-SLINKU</b> .....	<b>51</b>
<b>5 ZÁVER</b> .....	<b>54</b>
<b>6 POUŽITÁ LITERATÚRA</b> .....	<b>55</b>
<b>7 PRÍLOHY</b> .....	<b>58</b>

# 1 ÚVOD

Pri výrobe elektrickej energie v tepelných elektrárnach vzniká veľké množstvo tuhých zbytkov. Vo väčšine prípadov sú tieto vedľajšie produkty považované za odpad, ktorý je potrebné zlikvidovať alebo uložiť na skládkach. Popolčky však môžu byť perspektívnou surovinou pre ďalšiu výrobu, najmä stavebných hmôt.

Základným stavebným materiálom pri stavbe budov, cestných komunikácií a iných objektov je cement. Jeho hlavnou zložkou je slinok. Pri výpale slinku sa do ovzdušia uvoľňuje veľké množstvo oxidu uhličitého, tzv. skleníkového plynu. Nahradením slinku vedľajšími produktmi, či odpadmi z iných výrob sa môže značne znížiť záťaž na životné prostredie. Obmedzilo by sa množstvo plynov, ktoré sa dostávajú do ovzdušia pri výpale slinku, zmenšilo by sa množstvo odpadov, ktoré je potrebné skladovať, či likvidovať a v neposlednej rade by sa znížila potreba ťažby surovín. Nezanedbateľnou výhodou využitia druhotných surovín pri výrobe stavebných hmôt je aj ekonomické hľadisko.

Táto bakalárska práca je zameraná na možnosti využitia tuhých zbytkov z fluidného spaľovania uhlia v tepelných elektrárnach. Zaoberá sa hodnotením vlastností lôžkových a filtrových popolčiek z fluidného spaľovania uhlia z troch rôznych elektrární v Českej republike a skúma ich vhodnosť zužitkovania pri výrobe zmesných portlandských cementov ako donorov síranov.



## 2 TEORETICKÁ ČASŤ

### 2.1 Spaľovanie uhlia

Uhlie je najvýznamnejšie zo všetkých fosílnych palív. V dnešnej dobe je hlavným zdrojom pri výrobe elektrickej energie, pary pre teplárne a elektrárne alebo pre vysoké pece. Spaľovací proces využíva ako zdroj tepla reakciu uhlíka s kyslíkom. Vzhľadom k heterogenite uhlia prebieha spaľovanie uhoľných častíc vo viacerých stupňoch, ktoré sa čiastočne prekrývajú. Závisia na plynnom médiu, vlastnostiach uhlia, konečnej teplote a dobe styku. Tieto stupne sú:

- ohrev uhoľnej častice,
- uvoľnenie prchavých látok,
- spaľovanie prchavých látok,
- spaľovanie polokoksu. [1], [2]

Pri spaľovaní uhlia vzniká okrem energie aj veľké množstvo tuhých zbytkov. Tieto zbytky tvoria popolčeky, škvara, troska a iné produkty spaľovania. Práve elektrárenské popolčeky tvoria najväčší podiel priemyselných odpadov. [1]

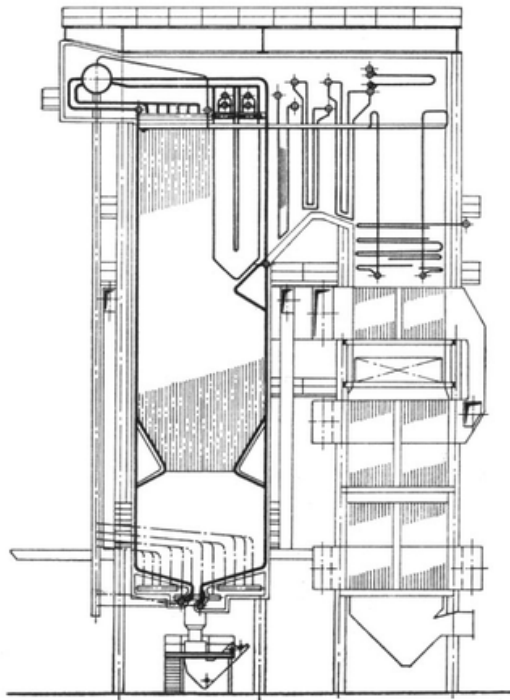
V tepelných elektrárňach sú využívané prevažne tri druhy spaľovacích zariadení: výtavné kotly (spaľovanie čierneho uhlia), granulačné kotly (spaľovanie čierneho a hnedého uhlia) a fluidné kotly (spaľovanie čierneho a hnedého uhlia). [3]

#### 2.1.1 Výtavné kotly

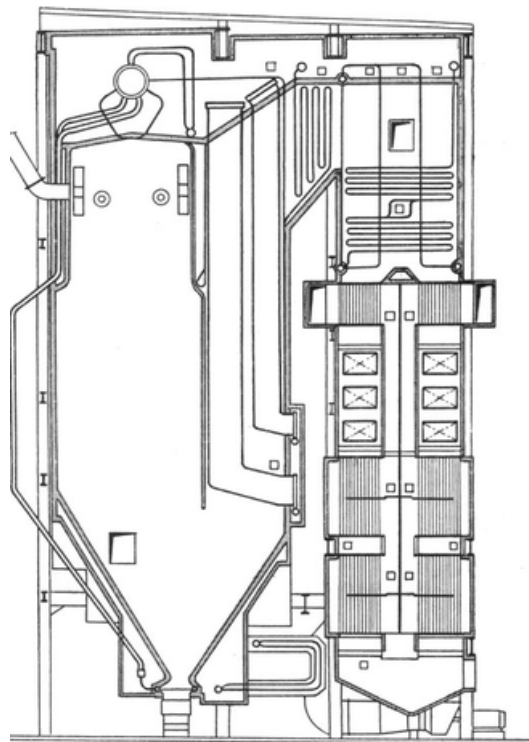
V týchto kotloch je čierne uhlie spaľované pri teplotách 1 400 – 1 600 °C. Všetky zložky tuhého paliva môžu počas doby pôsobenia vysokých teplôt prechádzať oxidačným alebo redukčným prostredím. Spaľované častice sú vysokej teplote vystavené len veľmi krátku dobu (1 – 3 sekundy), počas ktorej dochádza k ich roztaveniu a reakciám v tekutej fáze alebo len v povrchovej časti. Dôsledkom toho je, že popolčeky obsahujú okrem minerálnych zvyškov aj zvyšky pôvodného alebo tepelným procesom do rôzneho stupňa premeneného uhlia. [4] Schéma výtavného kotla je na obr. 1.

#### 2.1.2 Granulačné kotly

V tomto type kotlov je hnedé uhlie spaľované pri teplotách 1 100 – 1 300 °C. Častice popola sú pórovité, s prevládajúcou komôrkovou stavbou, a zachovávajú si obrisy pôvodného uhoľného zrna, ktoré je však v dôsledku natavenia zaoblené. Gul'ový tvar sa vyskytuje iba u častíc mikrometrových rozmerov. S teplotou horenia súvisí polykomponentnosť popolov, ktoré sa počas spaľovania natavujú až roztavujú, a jednotlivé častice navzájom zlepujú až spekajú. [3] Schéma granulačného kotla je na obr. 2.



**Obrázok 1**  
Dvojpriestorový výtavný kotol [5]



**Obrázok 2**  
Trojťahový granulačný kotol s horákmi v hornej časti spaľovacej komory [5]

### 2.1.3 Fluidné kotly

Fluidizácia sa využíva pri rôznych fyzikálnych a chemických procesoch, kde je potrebné zabezpečiť kontakt medzi tuhou a tekutou (plynnou alebo kvapalnou) látkou. Súbor pevných látok je prúdom kvapaliny udržiavaný vo vznose. Okrem spaľovania uhlia je tento proces využívaný aj pri katalytických reakciách, sušení, adsorpčných a mnohých iných procesoch. Fluidná vrstva je disperzný systém, ktorý sa vytvára prietokom plynu vrstvou častíc nasýpaných na pórovité dno – tzv. fluidný rošt. Náplň fluidnej vrstvy v kotle tvorí palivo, odsírovacie aditívum (väčšinou vápenec) a aditívum pre stabilitu fluidnej vrstvy (inertný materiál – napr. piesok). [5], [6]

Teplota spaľovania je oproti predchádzajúcim typom výrazne nižšia (800 – 850 °C), no pre absorpciu oxidu siričitého vznikajúcim vápnom optimálna. Tuhé zbytky spaľovania sú teda zmesou minerálnych podielov paliva s produktom odsírenia, a prebytku sorbentu vypáleného na voľné vápno. [7]

Výhody fluidného spaľovania:

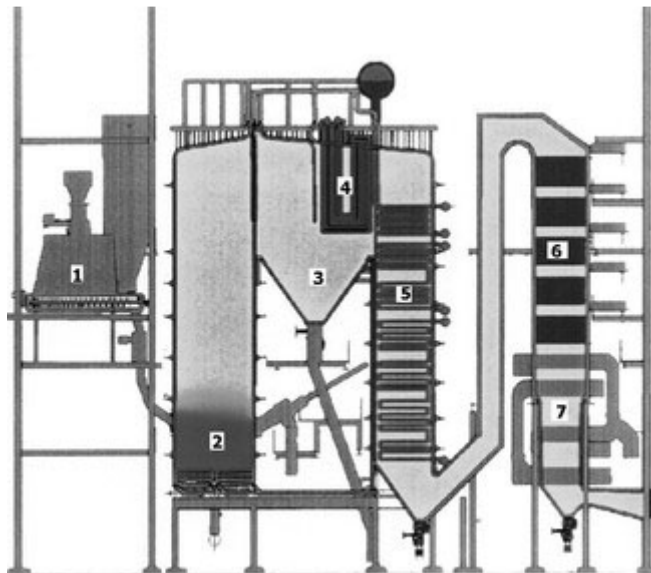
- možnosť dávkovania vápenca za účelom čiastočného odsírenia spalín (účinnosť odsírenia je 40 – 95 % podľa typu kotla, kvality premiesenia paliva s aditívom a množstva dávkovaného vápenca), nie je teda potrebné budovanie odsírovacieho zariadenia za kotlom,
- nízke teploty vo fluidnej vrstve a odstupňovaný prívod vzduchu do ohniska majú priaznivý dopad na redukciu  $\text{NO}_x$  v spalinách,
- možnosť spaľovania aj menejhodnotného paliva, či odpadov s veľmi nízkou výhrevnosťou (v iných typoch kotlov nespáliteľné),

- o spaľovanie prebieha s vyšším zaťažením roštovej plochy oproti klasickým roštovým kotlom, rozmery roštu preto vychádzajú nižšie,
- o majú nižšiu komínovú stratu, pretože odsírené spaliny na konci kotla môžu mať v dôsledku nižšieho rosného bodu nižšiu teplotu. Účinnosť kotlov býva 92 – 94 %. [5], [8], [9]

Nevýhodou fluidného spaľovania je zvýšená citlivosť na granulometriu paliva. [5]

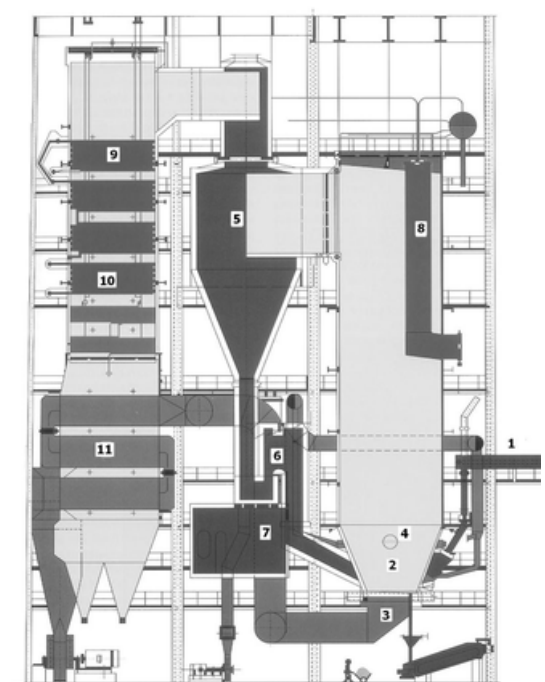
### 2.1.3.1 Atmosférické fluidné kotle so stacionárnou fluidnou vrstvou (AFB)

V ohnisku so stacionárnou fluidnou vrstvou sa po dosiahnutí prahovej rýchlosti fluidizácie vytvorí fluidná vrstva s určitou výškou, ktorá sa výrazne nemení. Fluidná vrstva sa chová ako kvapalina a vyhorené ľahšie častice sú ako popol z hladiny vynášané, zatiaľ čo uhlie je dodávané pod hladinou. Vo vrstve je neustály transport jednotlivých častíc, takže prenos tepla a hmoty je výrazne intenzifikovaný. Pri spaľovaní v stacionárnej fluidnej vrstve nesmie byť dosiahnutá teplota mäknutia popolovín, aby sa predišlo zlepovaniu častíc. [2] Schéma kotla je uvedená na obr. 3.



**Obrázok 3**

*Kotol so stacionárnou fluidnou vrstvou [5]*



**Obrázok 4**

*Kotol s cirkulujúcou fluidnou vrstvou [5]*

### 2.1.3.2 Atmosférické fluidné kotle s cirkulujúcou fluidnou vrstvou (ACFB)

Princípom spaľovania v tomto type kotlov je cirkulácia častíc (paliva a aditíva) fluidnej vrstvy, ktorých optimálna veľkosť je 0,73 – 1,03 mm, medzi spaľovacou komorou a cyklónom, z ktorého sú vračané späť do fluidného ohniska. Uvádza sa, že priemerne veľká častica paliva cirkuluje 10 – 15 krát, než dôjde k jej vyhoreniu. Výhodou je dlhší pobyt častíc v spaľovacom priestore, ktorý vedie k lepšiemu odsíreniu a vyhoreniu uhlíka (zníženie strát mechanickým nedopalom). Efektívita spaľovania rastie so zvyšujúcim sa prebytkom vzduchu a teplotou. S rastúcou veľkosťou častíc efektívita naopak klesá. Vo všeobecnosti môžeme

konštatovať, že fluidné kotle s cirkulujúcou vrstvou majú oproti tým so stacionárnou rovnomernejšie teplotné profily a vyššiu efektívnosť spaľovania. [5], [10]

Základná schéma ACFB je na obr. 4.

## 2.2 Popolčky

### 2.2.1 Vlastnosti popolčkov

Vlastnosti popolčkov závisia na vlastnostiach uhlia, z ktorého vznikli. V závislosti na dĺžke trvania karbonizácie a tým aj na množstve obsahu uhlíka môžeme uhlie rozdeliť na:

- Najstaršie - antracit 90–95 % C.
- Mladšie - čierne uhlie 80-90 % C.
- Najmladšie – hnedé uhlie 70 % C, lignit 60 % C, rašelina 50 % C. [7]

#### 2.2.1.1 Fyzikálne vlastnosti

Fyzikálne vlastnosti popolčkov sú podstatne ovplyvnené vlastnosťami uhlia, ktorého spaľovaním vznikajú. K nim patrí: zrnitosť zloženie, veľkosť povrchu, tvar častíc, hustota, merná, objemová a sypná hmotnosť, pórovitosť, tvrdosť, optické elektrické a magnetické vlastnosti, tepelná vodivosť, namŕzavosť, zhutniteľnosť a tavitelnosť. [3], [11]

#### 2.2.1.2 Chemické vlastnosti

Chemické zloženie popolčkov, okrem zloženia uhlia, ovplyvňujú aj chemické reakcie prebiehajúce počas horenia. Na ne má vplyv prítomnosť vody, vodnej pary, dostatok kyslíka, obsah síry, konštrukcia horeniska a riadenie procesu horenia. Rozdielna teplota počas spaľovania zapríčiňuje vznik rozdielnych minerálnych novotvarov a to aj v prípade spaľovania rovnakého druhu uhlia. [3]

Priemerné chemické zloženie popolčkov sa pohybuje v medziach: SiO<sub>2</sub> 40 – 50 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 19 – 30 %, CaO 5 – 30 %, MgO 0,3 – 3 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5 – 16 %, SO<sub>3</sub> 0,1 – 5,9 %. [11], [12]

#### 2.2.1.3 Mineralogické vlastnosti

Pôsobením vysokej teploty vznikajú v popoloch minerálne novotvary, ktorých vlastnosti sú blízke prírodným minerálom. Popoly obsahujú tieto hlavné skupiny minerálnych látok: silikáty, aluminosilikáty, minerály železa (novotvary s chemickým zložením v škále FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> až po kovové Fe), karbonátové skupiny (napr. kalcit (CaCO<sub>3</sub>), siderit (FeCO<sub>3</sub>)), akcesorické minerály (napr. kremeň a cristobalit (SiO<sub>2</sub>), apatit (Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F)), zvyšky nespáleného uhlia (vitrit a klarit) v čiernouhoľnom popole. [3]

### 2.2.2 Typy popolčkov

Podľa ČSN EN 197-1 sa popolček získava elektrostatickým alebo mechanickým odlučovaním prachových častíc z dymových plynov ohnísk vykurovaných práškovým uhlím. Popolček získaný iným spôsobom, nesmie byť v cementoch podľa tejto normy použitý. [13]

#### 2.2.2.1 Kremičitý popolček (V)

Kremičitý popolček je jemný prášok prevažne pozostávajúci z guľovitých častíc s puzolánovými vlastnosťami. Jeho hlavnými zložkami sú aktívny oxid kremičitý (SiO<sub>2</sub>) a oxid hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). V zbytku je potom obsiahnutý oxid železitý (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a iné zlúčeniny.

Obsah aktívneho oxidu vápenatého musí byť nižší než 10,0 % hmotnosti, obsah oxidu vápenatého nesmie byť vyšší než 1,0 % hmotnosti. Obsah aktívneho oxidu kremičitého nesmie byť menší než 25,0 % hmotnosti. [13]

### 2.2.2.2 Vápenatý popolček (W)

Vápenatý popolček je jemný prášok, ktorý má hydraulické a/alebo puzolánové vlastnosti. Pozostáva hlavne z aktívneho oxidu vápenatého (CaO), aktívneho oxidu kremičitého (SiO<sub>2</sub>) a oxidu hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Zbytok je tvorený oxidom železitým (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a inými zlúčeninami. Obsah aktívneho oxidu vápenatého nesmie byť menší než 10,0 % hmotnosti. Vápenatý popolček obsahujúci aktívny oxid vápenatý v rozmedzí 10,0 % až 15,0 % hmotnosti, musí obsahovať najmenej 25,0 % hmotnosti aktívneho oxidu kremičitého. [13]

### 2.2.2.3 Fluidné popolčky

Tuhé zbytky fluidného spaľovania sú zmesou minerálneho podielu paliva s produktom odsírenia a prebytkom sorbentu vypáleného na voľné vápno. Najjemnejšou frakciou zbytku zo spaľovania uhlia je úletový popolček so zrnitosťou 0 – 1 mm, ktorý je zachytávaný v odlučovačoch. [7]

Fluidné popolčky obsahujú hlinito-kremičitú fázu, kremeň, nerozpustný anhydrid, voľné CaO, eventuálne CaCO<sub>3</sub> nepremený počas tepelného procesu. Zo zloženia vyplýva, že fluidné popolčky majú vďaka vápenatým iónom okrem puzolánových aj hydraulické vlastnosti. Po rozmiešaní s vodou dochádza k vzniku ettringitu, ako ranného hydratačného produktu. [14]

Fluidné popolčky sú charakteristické nízkym obsahom amorfnej fázy. Kryštalickú fázu tvoria minerálne novotvary: anhydrid (CaSO<sub>4</sub>), hannebachit (CaSO<sub>4</sub>), kalcit (CaCO<sub>3</sub>), kremeň (SiO<sub>2</sub>), hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Vo fluidných popoloch absentuje mullit (2SiO<sub>2</sub>·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ktorý sa vytvára až pri teplotách 1 050 – 1 200, resp. 1 400 °C. [3], [15]

Výskyt sklenej fázy je v porovnaní s čiernouhoľným a hnedouhoľným popolom z výtavných a granuláčnych kotlov výrazne nižší a závisí od prítomnosti nízkotavitelných zložiek v popole, ktorých bod tavenia je v rozsahu teplôt fluidného kotla, t.j. 800 – 850 °C. [3]

Podľa spôsobu zachytávania vznikajú dva druhy značne odlišných popolčekov:

- Lôžkový popolček je v podstate troskopopolček z lôžkovej časti páneniska so zrnitosťou 0,3 – 5,6 mm. Obvykle tvorí 30 – 60 %.
- Úletový popolček tvorí popolček z cyklónov alebo elektrofiltrov zachytávaný v rôznych etapách odprašovania plynov spalín o zrnitosti 1 – 300 μm. Obvykle tvorí 40 – 70 %. [12]

### 2.2.2.4 Vysokoteplotné popolčky

Chemicko-mineralogické zloženie sa od fluidných popolčekov značne odlišuje. Základnými fázami vysokoteplotných popolčekov sú mullit a amorfná sklenená fáza tvorená predovšetkým amorfným SiO<sub>2</sub>. Časť môže byť tvorená kryštalickými formami SiO<sub>2</sub> (cristobalit a tridimit). Z toho vyplýva, že tento druh popolčekov vykazuje výhradne puzolanitu. [14]

### 2.2.3 Puzolány

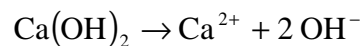
Puzolány sú prírodné kremičité alebo hlinitokremičité látky. Obsahujú prevažne aktívny oxid kremičitý v amorfnej forme, oxid hlinitý, v malej miere oxid železitý a iné oxidy. Po zmiešaní s vodou samy netvrdnú. Avšak ak sú jemne pomleté, reagujú v prítomnosti vody za normálnej teploty s rozpusteným hydroxidom vápenatým. Vznikajú tak zlúčeniny hydratovaných kremičitanov a hlinitanov vápenatých, ktoré sú stále na vzduchu aj pod vodou, a sú nositeľmi narastajúcej pevnosti. Vzniknuté zlúčeniny sú podobné tým, ktoré vznikajú pri tvrdnutí hydraulických látok. [13], [16]

Prírodné puzolány sú obvykle látky vulkanického pôvodu alebo sedimentárne horniny vhodného chemického zloženia, napr. tufy, diatomitová zemina a niektoré druhy spongilitov. Prírodné kalcinované puzolány sú látky vulkanického pôvodu, hliny, bridlice alebo sedimentárne horniny aktivované tepelnou úpravou. Ako technogénne puzolány sa využívajú rôzne druhy vedľajších produktov, napr. popolčeky, kremičité úlety a popoly zo spaľovania biomasy. [13], [16]

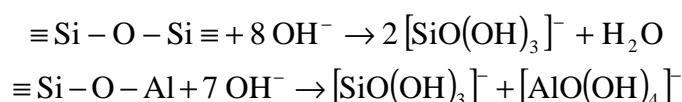
Použitie puzolánov v zmesných cementoch má za následok nižšie hydratačné teplo, vyššiu konečnú pevnosť, nízku priepustnosť, vysokú síranovzdornosť. V porovnaní s portlandským cementom zlepšujú stabilitu a v neposlednom rade aj znižujú cenu. Ich nevýhodou je predĺženie času tuhnutia a nižšie počiatkové pevnosti, preto je potrebné prírodné puzolány aktivovať a tým zvýšiť ich reaktivitu. [17], [18]

Rozhodujúcou vlastnosťou pre použitie puzolánov je puzolánová aktivita, teda schopnosť puzolánov reagovať v prítomnosti vody za normálnej teploty s hydroxidom vápenatým za vzniku viacerých hydratačných produktov. Určovaná je množstvom oxidu vápenatého, s ktorým sú puzolánovo aktívne látky schopné reagovať, a taktiež kinetikou tejto reakcie. [16]

Hydroxid vápenatý je silný hydroxid a vo vodnom prostredí je teda úplne disociovaný na ióny:



Pri 25 °C má nasýtený roztok hydroxidu vápenatého hodnotu pH = 12,45. Vysoká koncentrácia OH<sup>-</sup> iónov spôsobuje štiepenie väzieb v kremičitanoch, hlinitokremičitanoch a SiO<sub>2</sub> za vzniku jednoduchých iónov:



Pri kontakte vzniknutých kremičitanových a hlinitanových iónov s vápenatými kationmi dôjde k tvorbe hydratovaných kremičitanov (CSH gél) a hlinitanov vápenatých (CAH gél). [16]

## 2.3 Cement

Definícia cementu podľa ČSN EN 197-1: Cement je hydraulické spojivo, tj. jemne mletá anorganická látka, ktorá po zmiešaní s vodou vytvára kašu, ktorá tuhne a tvrdne v dôsledku hydratačných reakcií a procesov. Po zatvrdnutí zachováva svoju pevnosť a stálosť taktiež vo vode.

Cement podľa tejto normy, označovaný ako cement CEM, musí pri zodpovedajúcom dávkovaní a zmiešaní s kamenivom a vodou umožniť výrobu betónu alebo malty zachovávajúcu počas dostatočne dlhej doby vhodnú spracovateľnosť. Po predpísanej dobe musí mať predpísanú pevnosť a dlhodobú objemovú stálosť. [13]

### 2.3.1 História cementu

Označenie „cement“ pochádza z latinského *caedere* - tĺcť. Rimania tak označovali prirodzený lomový kameň na stavbu. [19]

Cement nie je dielom jediného vynálezcu, ale vznikal postupným vývojom po celé generácie, zhromažďovaním poznatkov o hydraulickom tuhnutí a tvrdnutí. Jednoliate stavivo, dalo by sa povedať betón, bolo známe už v staroveku. Bolo zhotovované zo zmesi bieleho vápna a sopečného popola, alebo drtených tehál. John Smeaton (Anglicko) v roku 1756 vyvrátil dlhotrvajúci názor, že najvhodnejšie je vápno vypálené z najčistejšieho vápenca. Vyrobil maltovinu z nečistých a nevzhľadných vápencov (podľa jeho názoru najlepších) a postavil z nej maják v Eddysone pri Plymouth na Cornwallskom pobreží. [19]

V roku 1824 bol Johnovi Aspdinovi udelený patent na výrobu portlandského cementu. Názov dostal na základe toho, že betón z neho pripravený sa vzhľadom podobal sivozelenému pieskovcu z blízkosti mesta Portland. Tento cement sa však od dnešného značne líšil. K výrobkom dnešného druhu sa dospelo až v polovici 19. storočia ostrým pálením a stálym zlepšovaním technológie. [19]

Prvé znalosti o hydraulických maltovinách v Čechách pochádzajú zo spisov českého alchymistu Bavora ml. Rodovského z Hustiřan (1576 – 1591), ktorý uvádza predpisy na rôzne malty a podlahy z tehlového betónu. [19]

### 2.3.2 Suroviny

Suroviny na výrobu cementu sa delia na hlavné a pomocné. Medzi hlavné suroviny patrí vápenec, hydraulické zložky (bridlice, íly, hliny) a niektoré prísady (železná ruda a kýzové výpalky). Prísady sú pridávané len v malých množstvách, ale zúčastňujú sa tiež tvorby slinku. Pomocné suroviny slinok netvorí, ale buď uľahčujú jeho vývin – mineralizátory (napr. kazivec), usmerňujú niektoré vlastnosti cementu – usmerňovače (napr. sadrovec, chlorid vápenatý) alebo uľahčujú mletie, či znižujú spotrebu paliva. [19]

Slinok nesmie obsahovať viac ako 6 % MgO. Jeho prítomnosť zapríčiňuje rozpínanie cementu po stuhnutí čím znižuje pevnosť. Škodí aj prítomnosť  $P_2O_5$ , PbO, ZnO, BaO, HgO, a vo väčšom množstve aj alkalické oxidy a sírany. [19], [20]

#### 2.3.2.1 Zloženie surovinovej zmesi

Pre výrobu cementu sú najvhodnejšie vápence s obsahom  $CaCO_3$  76 – 78 %. Výhoda spočíva v tom, že nie je potrebné pridávať ďalšie zložky obsahujúce  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  či  $Fe_2O_3$ . V prírode však ideálnu surovinu nenájdeme, a preto sa obsah jednotlivých zložiek vždy upravuje. Ak tvorí základnú zložku vysokopercentný vápenec, korekcia sa uskutočňuje prídavkom rôznych druhov ílov, slieňov, bridlíc či hlín. Naopak, ak v hlavnej surovine prevládajú ílové zložky, surovina sa koriguje prídavkom vysokopercentného vápenca. [21], [22]

Základné suroviny spravidla neobsahujú potrebné množstvo  $Fe_2O_3$ , prípadne ďalšie zložky. Surovinu je preto potrebné doplniť vhodnými komponentmi tak, aby vykazovala žiadané chemické zloženie. Nedostatok  $Fe_2O_3$  sa rieši prídavkom kýzových výpalkov alebo železných rúd. Nízky obsah  $Al_2O_3$  sa koriguje väčšinou prídavkom bauxitu. Nedostatočné množstvo  $SiO_2$ , ktoré nie je veľmi časté, sa upravuje prídavkom kremičitého piesku alebo kremeliny. [21]

Chemické zloženie, teda hlavne pomer základných zložiek CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, má primárny význam. Vlastnosti výsledného cementu závisia aj na spôsobe tepelného spracovania, mletí slinku a prídavku ďalších látok do cementu. [20]

Cieľom je, aby všetok CaO zreagoval na zlúčeniny schopné hydraulického tuhnutia. Celý proces výroby, od zostavovania zmesi, cez výpal až po chladnutie je vedený tak, aby vznikali žiadané suroviny. Táto skutočnosť sa pôvodne vyjadrovala pomocou tzv. modulov, ktoré charakterizovali pomer zložiek (v hmotnostných %) v zmesi surovín, resp. v slinku. [20]

### Hydraulický modul

$$M_H = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Optimálna hodnota je od 1,7 do 2,4. Cementy s vyšším  $M_H$  je nutné vypaľovať pri vyššej teplote, majú vyššie počiatkové pevnosti a vyššie hydratačné teplo.  $M_H$  menšie než 1,7 spôsobuje malú pevnosť, nad 2,4 nižšiu objemovú stálosť. [20]

### Silikátový modul

$$M_S = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Jeho hodnota obvykle leží v medziach od 1,7 do 2,7. Čím vyššia je hodnota  $M_S$ , tým je nutná vyššia teplota výpalu, produkt tuhne pomalšie, ale zlepšuje sa jeho chemická odolnosť. [20]

### Hlinitanový modul

$$M_A = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Zvyčajne nadobúda hodnoty od 1,5 do 2,5. U bielych cementov je jeho hodnota podstatne vyššia. [20]

Teoretický podklad pre moduly poskytuje úvaha o stechiometrii príslušných reakcií a zlúčenín. Na základe hmotnostných pomerov zastúpených zložiek v slinkových mineráloch (uvedených v kapitole 2.3.4) je množstvo CaO potrebné k vytvoreniu hydraulických minerálov dané vzťahom:

$$\text{CaO} = 2,80 \cdot \text{SiO}_2 + 1,65 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,35 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Podľa praktických poznatkov však lepšie vyhovuje vzťah:

$$\text{CaO} = 2,80 \cdot \text{SiO}_2 + 1,10 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,70 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

To je množstvo CaO, ktoré práve stačí na úplné zreagovanie zmesi na požadované hydraulické zlúčeniny. [20]

### Stupeň sýtenia vápnom

Pomer skutočne prítomného CaO (v surovinovej zmesi alebo slinku) k teoretickému množstvu potrebnému k úplnému zreagovaniu s SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sa udáva ako stupeň sýtenia vápnom:

$$S_s = \frac{100C}{2,80S + 1,65A + 0,35F}$$



Pre prax sa doporučuje používať tzv. štandard vápna:

$$S_{SK} = \frac{100C}{2,8S + 1,1A + 0,7F} \quad [20]$$

## 2.3.3 Výroba cementu

### 2.3.3.1 Ťažba a drvenie suroviny

Najdôležitejšími surovinami pre výrobu portlandského cementu sú vápence, tufy, bridlice a iné horniny. Materiály sa ťažia v lomoch buď odstrelom alebo pomocou ťažkej techniky. Veľké kamene vyťaženej suroviny sú rozdrvené zhruba na veľkosť cestného štrku. [23]

### 2.3.3.2 Príprava surovinovej zmesi

Zvolené suroviny je potrebné rozomlieť, pretriediť a vo vypočítanom pomere zmiešať tak, aby vznikla zmes dávajúca v peci dobrý slinok. [19]

### Mokrý spôsob

Postupom za mokra, tj. zo surovinového kalu, je výhodné spracovávať mäkké, ľahko rozplaviteľné suroviny, hlavne s vysokým obsahom vlhkosti. Surovina môže byť upravovaná tromi spôsobmi:

- Riedky kal – 70 až 80 % vody.
- Hustý kal – 30 až 50 % vody.
- Odvodnený kal – 20 až 30 % vody.

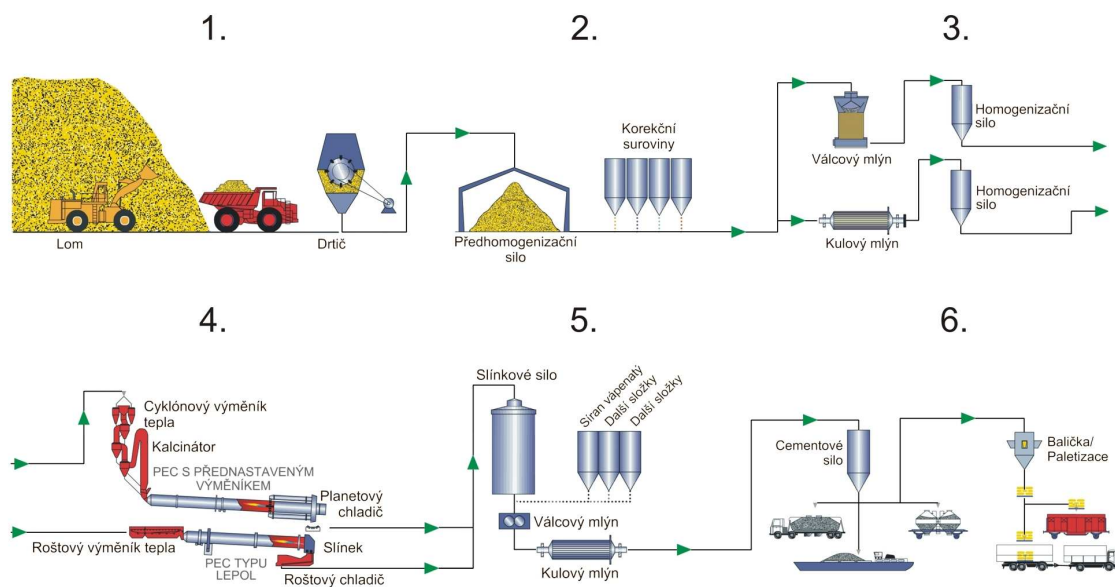
Kal sa ukladá v zásobníkoch, kde sa homogenizuje neustálym miešaním. Potom sa preváža do menších zásobníkov, odtiaľ ide do pece, kde sa najprv vysušuje a následne vypaľuje do slinutia. [19], [24]

Medzi výhody tohto postupu patrí to, že vstupné suroviny nie je potrebné sušiť, ľahšie sa rozpojujú a spracovávajú, čo znižuje spotrebu energie. Obdržanie rovnorodého slinku aj pri kolísavých surovinách, uľahčenie prípravy, zlepšenie homogenity a zníženie prašnosti je taktiež výhodou. Veľkou nevýhodou je spotreba vody a následne tepla potrebného na vysušenie kalu pred výpalom. Z ekonomických dôvodov bola posledná mokrá rotačná pec zastavená k 1.1.1998. [19], [24]

### Suchý spôsob

Tento spôsob je uprednostňovaný pri spracovávaní tvrdších surovín s malou vstupnou vlhkosťou a menej kolísavým chemickým zložením. Suroviny sa drvia, sušia a následne melú na múčku. Tá sa skladuje v zásobníkoch, kde dochádza k jej homogenizácii. Práškovitá zmes (spravidla po predhriatí spalinami) je potom dopravovaná do pece. [19], [24]

Výhodami tohto procesu sú vysoká výkonnosť výroby, vysoká tepelná účinnosť spaľovacieho procesu, nižšia spotreba tepla a energie, jednoduchšia kontrola a ľahšie ovplyvňovanie surovinovej múčky. Za nevýhodu by mohlo byť považované do istej miery zložitejšie zariadenie a teda väčšie investície. [19], [24]



**Obrázok 5**  
Zjednodušená technická schéma výroby cementu [24]

### 2.3.3.3 Výpal slinku

Výpal slinku je najdôležitejší úsek technologického postupu výroby cementu. Uplatňuje sa pri ňom mineralogická a fyzikálna povaha suroviny, druh paliva a priebeh krivky pálenia a chladnutia, teda druh pece a spôsob jej prevádzky. [19], [24]

S rastúcou teplotou v peci sa surovina najprv suší, potom dochádza k reakciám v pevnom skupenstve a následne vzniká tavenina, ktorá priebeh reakcií urýchľuje. Niektoré zložky sú čiastočne prchavé, takže surovina stráca na pôvodnej váhe. Pohlcuje a uvoľňuje sa teplo, no v celkovom dôsledku vznikajú fázy energeticky bohatšie a teda reaktívnejšie. Nakoniec vzniká heterogénna sústava zložená z rozličných slinkových nerastov (rôznej disperzie a orientácie) a sklených fáz – slínok. [19]

Slinkok sa vypaľuje v cementárskych peciach, ktoré je možné rozdeliť na:

- Rotačné – vysoký výkon, kvalitný výpal slinku, použiteľnosť pre mokrý i suchý spôsob výroby cementu. Najčastejšie používaný typ.
- Šachtové – malý výkon, obtiažne riadenie výpalu, slínok horšej kvality.
- Ostatné – napr. sliňovacie rošty, pece pre výpal vo vznose, ... [24]

Rotačná pec (obr. 6) je v podstate veľký oceľový valec, ktorý je mierne naklonený a z vnútra obložený žiaruvzdornou výmurovkou. Pri suchom spôsobe výroby je dĺžka pecí 60 až 100 m, maximálne 130 m, pri mokrom spôsobe 100 až 180 m, maximálne 230 m. Priemer pecí je 3 až 7 m, sklon 3 až 7 ° a otáčajú sa okolo osy s frekvenciou 1 až 2 otáčky za minútu. Výkony týchto pecí za deň sú 500 až 4 000 ton slinku. [24]



### **Obrázok 6**

*Rotačná pec v cementárni Mokrá*

Počas výpalu materiál prechádza celou dĺžkou pece a postupuje cez rôzne teplotné pásma:

- sušiace (do 200 °C),
- predhrievacie (200 až 800 °C),
- kalcinačné (dekarbonatizačné) (800 až 1 200 °C),
- exotermické (1 300 °C),
- sliňovacie (1 400 až 1 450 °C s poklesom na 1 300 °C)
- chladiace (1 100 až 1 000 °C). [24], [25]

#### **2.3.3.4 Mletie slinku**

Napriek tomu, že slinku sa melie v mlynoch rovnakého typu ako surovina, požiadavky na výsledok mletia sú rozdielne. Surovina sa melie čo najjemnejšie, pre uľahčenie reakcií v tuhej fáze. Častice cementu by mali mať rôznu zrnitosť, nemal by byť nadbytok tých najjemnejších. [19]

Slinku sa melie spolu s regulátorom tuhnutia (síranom vápenatým) na jemný prášok. V priebehu mletia môžu byť v závislosti na požadovanom druhu cementu pridávané aj ďalšie zložky (napr. vysokopecná troska, popolček, vápenec, ...). [23]

Mletie slinku môže byť jednostupňové (trúbové mlyny s otvoreným alebo uzavretým okruhom) alebo dvojstupňové (krátky mlyn na hrubé mletie a väčší mlyn na jemné mletie). Minimálna jemnosť mletia portlandského cementu je  $225 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ . [24]

### 2.3.4 Zloženie slinku

V slinku sa nachádza okolo 20 slinkových minerálov. Prakticky významné sú 4: trikalciúmsilikát ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ , alit), dikalciúmsilikát ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ , belit), trikalciúmaluminát ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ , celit) a tetrakalciúmaluminátferit ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ , brown-millerit). Tvoria asi 90 % hmoty slinku a vo výraznej miere určujú vlastnosti cementu z neho vyrobeného. [26]

Každá zložka vnáša do cementu svoje charakteristické vlastnosti:

- Trikalciúmsilikát nadobúda pevnosť do 28 dní. Jeho vyšší obsah je žiaduci pre rýchle dosiahnutie pevností umožňujúcich naviazanie ďalšej operácie.
- Dikalciúmsilikát sa z väčšej časti vytvrdzuje až po 28 dňoch. Belitový cement sa využíva pri betonáži extrémne masívnych konštrukcií (napr. priehradné hrádze, základové dosky jadrových elektrární, ...), kde je potrebný dlhší čas k postupnému odvodu tepla vyvinutého pri hydratácii.
- Trikalciúmaluminát hydratuje tak rýchlo, že by sťažoval spracovanie čerstvého betónu. Preto sa do cementu primiešava sadrovec, ktorý rýchlosť hydratácie  $\text{C}_3\text{A}$  spomaľuje. [26]

### 2.3.5 Triedy cementu

Podľa normy ČSN 197-1 sa výrobky súboru cementov pre všeobecné použitie rozdeľujú do piatich hlavných tried:

- CEM I Portlandský cement
- CEM II Portlandský cement zmesný
- CEM III Vysokopečný cement
- CEM IV Puzolánový cement
- CEM V Zmesný cement

Zloženie každého z výrobkov v súbore cementov pre všeobecné použitie musí byť v súlade s Tabuľkou 1. [13]

**Tabuľka 1**

27 výrobkov skupiny cementov pre všeobecné použitie podľa ČSN EN 197-1 [13]

Hlavné druhy	Označenie 27 výrobkov (druhy pre všeobecné použitie)		Zloženie (pomery zložiek podľa % hmotnosti <sup>a</sup> )			
			Hlavné zložky			Doplňujúce zložky
			Slinok			
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100			0-5
CEM II	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	Vysokopecná troska (S)	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35		0-5
	Portlandský cement s kremičitým úletom	CEM II/A-D	90-94	6-10	Kremičitý úlet (D) <sup>b</sup>	0-5
	Portlandský puzolánový cement	CEM II/A-P	80-94	6-20	Prírodný puzolán (P)	0-5
		CEM II/B-P	65-79	21-35		0-5
		CEM II/A-Q	80-94	6-20	Prírodný kalcinovaný puzolán (Q)	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	21-35		0-5
	Portlandský popolčekový cement	CEM II/A-V	80-94	6-20	Kremičitý popolček (V)	0-5
		CEM II/B-V	65-79	21-35		0-5
		CEM II/A-W	80-94	6-20	Vápenatý popolček (W)	0-5
		CEM II/B-W	65-79	21-35		0-5
	Portlandský cement s kalcinovanou bridlicou	CEM II/A-T	80-94	6-20	Kalcinovaná bridlica (T)	0-5
		CEM II/B-T	65-79	21-35		0-5
	Portlandský cement s vápencom	CEM II/A-L	80-94	6-20	Vápenec (L)	0-5
		CEM II/B-L	65-79	21-35		0-5
		CEM II/A-LL	80-94	6-20	Vápenec (LL)	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	21-35		0-5
	Portlandský zmesný cement <sup>c</sup>	CEM II/A-M	80-88	12-20	S+D+P+Q+V+ +W+T+L+LL	0-5
CEM II/B-M		65-79	21-35	0-5		
CEM III	Vysokopecný cement	CEM III/A	35-64	36-65	Vysokopecná troska (S)	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80		0-5
		CEM III/C	5-19	81-95		0-5
CEM IV	Puzolánový cement <sup>c</sup>	CEM IV/A	65-89	11-35	D+P+Q+ +V+W	0-5
		CEM IV/B	45-64	36-55		0-5
CEM V	Zmesný cement <sup>c</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	S+(P+Q+V) <sup>d</sup>	0-5
		CEM V/B	20-38	31-49		0-5

<sup>a</sup> Hodnoty v tabuľke sa vzťahujú k súčtu hlavných a doplňujúcich zložiek.

- <sup>b</sup> Obsah kremičitého úletu je obmedzený do 10%.
- <sup>c</sup> Hlavné zložky v portlandských zmesných cementoch CEM II/A-M a CEM II/B-M, puzolánových cementoch CEM IV/A a CEM IV/B a v zmesných cementoch CEM V/A a CEM V/B mimo slinku musia byť deklarované v označení cementu.
- <sup>d</sup> Zmesný cement obsahuje 18-30 resp. 31 - 49 % S + 18 - 30 resp. 31 - 49 % P+Q+V.

## 2.3.6 Mechanické, fyzikálne a chemické vlastnosti

### 2.3.6.1 Mechanické vlastnosti

Normalizovaná pevnosť – pevnosť v tlaku stanovená podľa EN 196-1 po 28 dňoch, musí zodpovedať požiadavkám v Tabuľke 2. Rozoznávajú sa tri triedy normalizovanej pevnosti: trieda 32,5, trieda 42,5 a trieda 52,5.

Počiatočná pevnosť – pevnosť v tlaku stanovená podľa EN 196-1 po 2 alebo 7 dňoch, musí zodpovedať požiadavkám v Tabuľke 2.

Pre každú triedu normalizovanej pevnosti sa rozoznávajú tri triedy počiatočnej pevnosti:

- N – trieda s normálnymi počiatočnými vlastnosťami,
- R – trieda s vysokými počiatočnými pevnosťami,
- L – trieda s nízkymi počiatočnými pevnosťami (používa sa výhradne pre cementy CEM III) [13]

### 2.3.6.2 Fyzikálne vlastnosti

Začiatok tuhnutia stanovený podľa EN 196-3 musí zodpovedať údajom v Tabuľke 2.

Objemová stálosť stanovená podľa EN 196-3 musí zodpovedať údajom v Tabuľke 2.

Hydratačné teplo cementov pre všeobecné použitie s nízkym hydratačným teplom nesmie byť väčšie než 270 J/g pri stanovení podľa EN 196-8 po 7 dňoch alebo podľa EN 196-9 po 41 hodinách. Cementy s nízkym hydratačným teplom sa musia označiť „LH“. [13]

### Tabuľka 2

Požiadavky na mechanické a fyzikálne vlastnosti uvedené ako charakteristické hodnoty podľa ČSN EN 197-1 [13]

Pevnostná trieda	Pevnosť v tlaku v MPa			Začiatok tuhnutia [min]	Objemová stálosť [mm]
	Počiatočná pevnosť		Normalizovaná pevnosť		
	2 dni	7 dní	28 dní		
32,5 L	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
32,5 N	-	≥ 16,0			
32,5 R	≥ 10,0	-			
42,5 L	-	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60
42,5 N	≥ 10,0	-			
42,5 R	≥ 20,0	-			
52,5 L	≥ 10,0	-	≥ 52,2	-	≥ 45
52,5 N	≥ 20,0	-			
52,5 R	≥ 30,0	-			

### 2.3.6.3 Chemické vlastnosti

Vlastnosti cementov musia zodpovedať požiadavkám uvedeným v Tabuľke 3. [13]

#### Tabuľka 3

Požiadavky na chemické vlastnosti uvedené ako charakteristické hodnoty podľa ČSN EN 197-1 [13]

Vlastnosť	Metóda skúšania	Druh cementu	Pevnostná trieda	Požiadavky <sup>a</sup>
Strata žiháním	EN 196-2	CEM I	všetky	≤ 5,0 %
		CEM III		
Nerozpustný zbytok	EN 196-2 <sup>b</sup>	CEM I	všetky	≤ 5,0 %
		CEM III		
Obsah síranov (ako SO <sub>3</sub> )	EN 196-2	CEM I	32,5 N	≤ 3,5 %
			32,5 R	
		CEM II <sup>c</sup>	42,5 N	≤ 4,0 %
			42,5 R	
		CEM V	52,2 N	
			52,5 R	
CEM III <sup>d</sup>	všetky			
Obsah chloridov	EN 196-2	všetky <sup>e</sup>	všetky	≤ 0,10 % <sup>f</sup>
Puzolanita	EN 196-5	CEM IV	všetky	musí vyhovieť <sup>g</sup>

<sup>a</sup> Požiadavky sú uvedené v % hmotnosti v hotovom cemente.

<sup>b</sup> Stanovenie nerozpustného zbytku v kyseline chlorovodíkovej a v uhličitanе sodnom.

<sup>c</sup> Cementy druhu CEM II/B-T a CEM II/B-M s obsahom T > 20 % môžu vo všetkých pevnostných triedach obsahovať až 4,5 % síranov.

<sup>d</sup> Cement druhu CEM III/C môže obsahovať až 4,5 % síranov.

<sup>e</sup> Cement druhu CEM III môže obsahovať viac ako 0,10 % chloridov, ale ich obsah musí byť uvedený na obale a/alebo v sprievodnej dokumentácii.

<sup>f</sup> Cementy pre predpínané prvky môžu byť vyrábané s nižšou požadovanou hodnotou, ktorá musí byť uvedená v sprievodnej dokumentácii.

## 3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

### 3.1 Stanovenie obsahu voľného vápna v popolčkoch

Obsah voľného vápna bol stanovený sacharátovou metódou. Bol použitý roztok HCl, ktorého presná koncentrácia bola stanovená na navážku vysušeného Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Ako indikátor bodu ekvivalencie bola použitá metyloranž. CO<sub>2</sub> bol odstránený varom a roztok bol dotitrovaný. Následne bola vypočítaná presná koncentrácia odmerného roztoku HCl.

Postup:

- Navážka vzorky jemne mletého popolčeka bola kvantitatívne prevedená do Erlenmayerovej banky, ktorá obsahovala 50 ml destilovanej vody.
- Do banky bolo pridaných 5 g sacharózy p.a..
- Zmes bola 15 minút trepaná na trepačke a následne bola prefiltrovaná za zníženého tlaku na Büchnerovom lieviku.
- Filtrát bol titrovaný roztokom HCl s presne známou koncentráciou, pre indikáciu bodu ekvivalencie bol použitý indikátor fenolftaleín (zmena sfarbenia roztoku z fialového na bezfarebný).
- Obsah voľného vápna bol na základe spotreby odmerného roztoku HCl vypočítaný použitím vzťahu:

$$\% \text{ CaO} = \frac{c \cdot V \cdot M}{m \cdot v} \cdot 100 \%$$

c – koncentrácia odmerného roztoku HCl [mol·dm<sup>-3</sup>]

V – objem odmerného roztoku HCl [dm<sup>-3</sup>]

M – molárna hmotnosť CaO [g·mol<sup>-1</sup>]

m – hmotnosť navážky vzorky [g]

v – stechiometrický koeficient reakcie

### 3.2 Príprava testovacích teliesok pre meranie pevností

Testovacie telieska s rozmermi 20 x 20 x 100 mm boli vyrábané z cementovej pasty. Tá bola pripravená sypaním zmesi slinku a popolčeka v presne určenom pomere do vody.

Pre porovnanie boli vyrobené testovacie telesá s rozmermi 40 x 40 x 160 mm zo samotného jemne mletého portlandského slinku a vody. Telesá rovnakej veľkosti boli vyrobené aj z pripravených mált. Pomer spojiva ku kamenivu bol 25:75. Ako spojivo bola použitá zmes portlandského slinku a fluidného popolčeka v určenom pomere, a ako kamenivo hrubý, stredný a jemný piesok v hmotnostnom pomere 1:1:1.

Pripravené zmesi boli vpravované do normovaných foriem (obr. 7 a 8), ktoré boli pre jednoduchšie odformovanie vopred vymazané prípravkom CHRYSO Dem Oleo 50. Horná strana trámčekov bola upravená špachtľou do roviny. Telieska boli odformované po 24 hodinách a následne boli ponechané zreniu vo vlhkom prostredí pri laboratórnej teplote.





**Obrázok 7**

*Forma na výrobu skúšobných telies s rozmermi 20 x 20 x 100 mm*



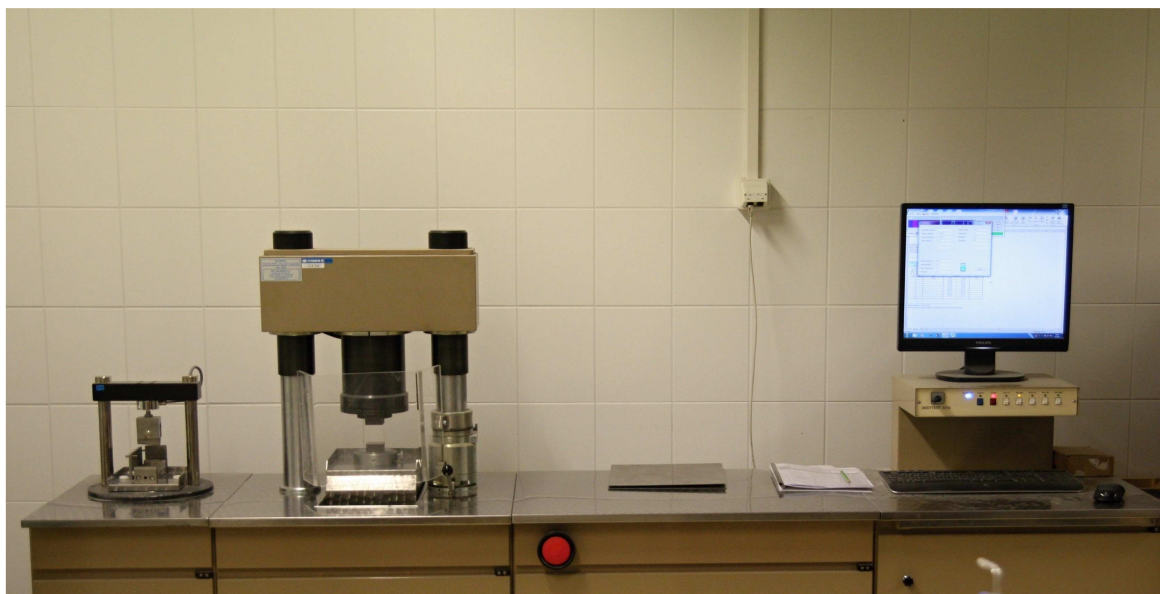
**Obrázok 8**

*Forma na výrobu skúšobných telies s rozmermi 40 x 40 x 160 mm*

### **3.3 Stanovenie pevnosti v ťahu za ohybu a v tlaku**

Pre stanovenie pevnosti v ťahu za ohybu a v tlaku bolo použité komplexné zariadenie pre pevnostné skúšky v oblasti stavebných hmôt DESTTEST 3310 (obr. 9). Pre meranie pevností v ťahu za ohybu bola použitá lámačka BS-10 a pre pevnosti v tlaku lis BS-300.

Na každom skúšobnom telese bola najprv stanovená pevnosť v ťahu za ohybu, následne bola na oboch častiach telesa, ktoré vznikli po tejto skúške, stanovená pevnosť v tlaku. Hodnota pevnosti v tlaku bola teda určená ako priemer oboch hodnôt získaných meraním.



**Obrázok 9**

*Komplexné zariadenie pre pevnostné skúšky v oblasti stavebných hmôt DESTTEST 3310*



**Obrázok 10**

Skúšobné teleso s rozmermi 20 x 20 x100 mm pred skúškou pevnosti v ťahu za ohybu



**Obrázok 11**

Skúšobné teleso s rozmermi 20 x 20 x100 mm po skúške pevnosti v ťahu za ohybu



**Obrázok 12**

Skúšobné teleso s rozmermi 20 x 20 x100 mm po skúške pevnosti v tlaku



**Obrázok 13**

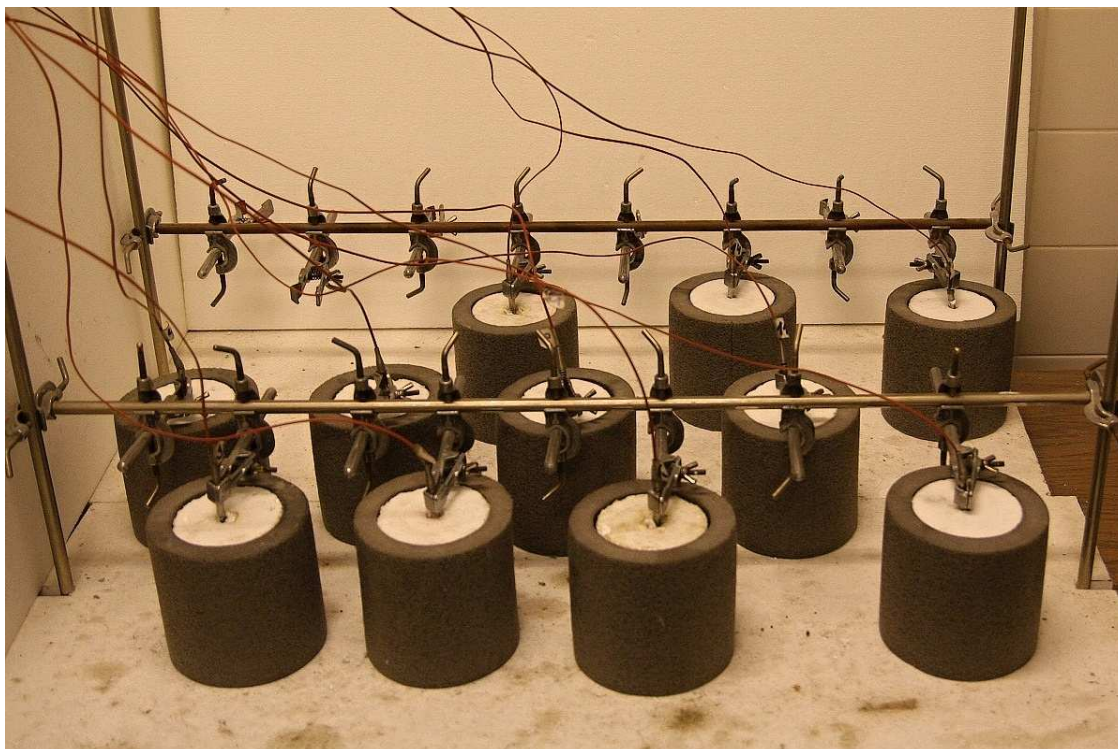
Skúšobné teleso s rozmermi 20 x 20 x100 mm po skúške pevnosti v tlaku - detail

### 3.4 Izoperibolická kalorimetria

Izoperibolický kalorimeter (obr. 14) umožňuje sledovať teplotné zmeny v závislosti na čase, ku ktorým dochádza väčšinou vplyvom chemických reakcií. V prípade tejto práce šlo konkrétne o priebeh hydratácie pripravených cementových pást. Zariadenie má až 16 sond, takže je možné porovnávať jednotlivé merané vzorky už počas priebehu reakcie.

Do polystyrénového pohárka bolo navážených 300 g pripravenej pasty (u vzoriek, kde bol miešaný len popolček s vodou to bolo z dôvodu malého objemu pohárka len 250 g) a zhutnených poklepom. Pohárik bol vložený do ochranného obalu z polyuretánovej peny, zakrytý polystyrénovým viečkom a do zmesi bola zasunutá sonda pripojená k počítaču. Meranie prebiehalo do ukončenia hydratačnej reakcie pripravených zmesí.





**Obrázok 14**

*Izoperibolický kalorimeter*

### **3.5 Röntgenová fluorescenčná spektrometria**

Röntgenová fluorescenčná spektrometria je jednoduchá metóda, ktorá slúži na určovanie prvkového zloženia skúmaných vzoriek. Na vzduchu je schopná identifikovať prvky v rozsahu Al – U, vo vákuu až Be. [29]

Röntgenové žiarenie emitované röntgenkou interaguje so vzorkou, pričom dochádza k vyrazeniu elektrónu z vnútorných vrstiev skúmanej látky. Pri následnom presune elektrónu z vyšších energetických hladín dôjde k vyžiareniu sekundárneho röntgenového žiarenia, charakteristického pre všetky prvky. Detektor detekuje práve toto sekundárne žiarenie. [27]

Fluorescenčné spektrometre sa delia na dva základné typy: vlnovo disperzné (k separácii röntgenového žiarenia na kryštáli dochádza na základe rôznych vlnových dĺžok) a energiovo disperzné (obr. 16) (k detekcii dochádza na základe rôznych energií fotónov sekundárneho röntgenového žiarenia). [27]

### **3.6 Röntgenová difrakčná analýza**

Röntgenová difrakčná analýza (XRD) je experimentálne jednoduchá a informačne bohatá metóda, ktorá slúži k určovaniu štruktúry pevných látok. Každá kryštalická látka je jedinečná a dá sa identifikovať na základe svojho difraktogramu. Podstatou tejto metódy je interakcia röntgenového žiarenia s elektrónmi atómov spočívajúca v pružnom rozptyle. Usporiadanie atómov v kryštálovej mriežke je pravidelné a periodické, vďaka čomu dochádza po rozptyle a následnej interferencii röntgenového žiarenia k vzniku difrakčných maxím. Intenzita, tvar a poloha maxím závisí na druhu atómov a ich usporiadaní v priestore. [28]

Táto metóda je vhodná pre kvantitatívne charakteristiky, pretože poskytuje globálne parametre skúmaného materiálu. Pomocou XRD je možné skúmať práškové materiály, ale aj tenké vrstvy kompaktných polykryštalických materiálov. [28]

Aby nastala konštruktívna interferencia, musí byť dráhový rozdiel medzi vlnami rozptýlených atómami susedných mriežkových rovín (hkl) s medzirovinnou vzdialenosťou  $d_{hkl}$  rovný celočíselnému násobku vlnovej dĺžky použitého röntgenového žiarenia. Platí teda Braggov zákon:  $n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$ , kde  $n$  je celé číslo (rád difrakcie),  $\lambda$  je vlnová dĺžka röntgenového žiarenia, a  $\theta$  je uhol dopadu röntgenového zväzku. [29]

#### Tabuľka 4

Nastavenie prístroja počas merania

Materiál anódy	Cu
K- $\alpha$ 1 vlnová dĺžka [Å]	1,540598
K- $\alpha$ 2 vlnová dĺžka [Å]	1,544426
Urýchľovacie napätie [kV]	40
Osa skenovania	gonio
Rozsah [stupne $2\theta$ ]	5 – 90,00545
Veľkosť kroku [stupne]	0,01313
Doba na krok [s]	95,88



**Obrázok 15**  
Röntgenový difraktometer Empyrean od firmy Panalytical



**Obrázok 16**  
Röntgenový fluorescenčný spektrometer EX6600 Xenometrix

## 4 VÝSLEDKY A DISKUSIE

### 4.1 Použité suroviny

Portlandský slinok jemne mletý z cementárne Mokrá

Fluidné popolčeky lôžkové (jemne mleté) z elektrární:

- Ledvice
- Tisová
- Poříčí K8

Fluidné popolčeky filtrové z elektrární:

- Ledvice
- Tisová
- Poříčí K8

Piesok EN 196-1

- Hrubý PG 3
- Stredný PG 2
- Jemný PG 1

Destilovaná voda

### 4.2 Chemické zloženie popolčekov

Chemické zloženie použitých popolčekov bolo určené fluorescenčnou prvkovou analýzou. Následne bol sacharátovou metódou stanovený obsah voľného vápna. Zistený percentuálny obsah voľného vápna v popolčekoch uvádza Tabuľka 5, chemické zloženie je uvedené v Tabuľke 6. U použitých popolčekov bol skúmaný aj priebeh hydratačnej reakcie. Grafický záznam z izoperibolickej kalorimetrie je uvedený na obr. 17.

#### Tabuľka 5

Obsah voľného vápna v jednotlivých popolčekoch

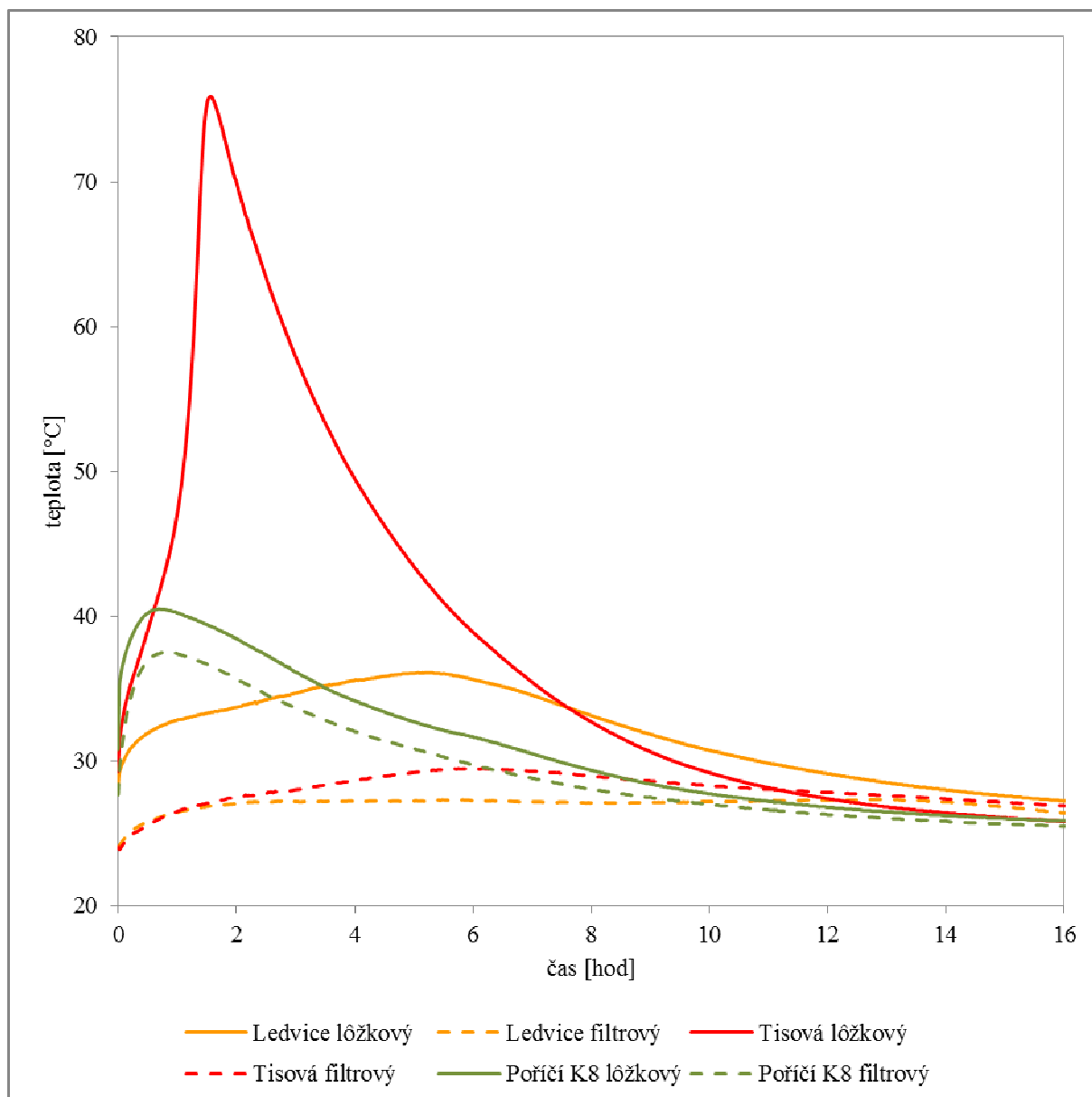
Elektrárň	Ledvice		Tisová		Poříčí K8	
Typ	lôžkový	filtrový	lôžkový	filtrový	lôžkový	filtrový
Obsah voľného CaO [%]	12,91	4,55	22,94	9,68	9,57	13,54

Obsah voľného vápna stanovený vo fluidnom filtrovom popolčeku z elektrárne Ledvice bol príliš nízky, a preto bol tento popolček vyradený z experimentov.

**Tabuľka 6**

Chemické zloženie použitých popolčekov

Hlavné oxidy [%]	Ledvice		Tisová		Poříčí K8	
	lôžkový	filtrový	lôžkový	filtrový	lôžkový	filtrový
SiO <sub>2</sub>	31,8	30,6	31,1	33,9	30,0	31,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,2	18,3	21,7	22,4	15,1	16,5
CaO	26,2	24,1	28,1	22,8	29,1	31,2
Na <sub>2</sub> O	0,17	0,55	0,34	0,66	0,26	0,4
K <sub>2</sub> O	0,65	0,91	0,81	0,67	1,48	1,38
MgO	0,65	0,88	0,47	0,85	0,82	0,9
SO <sub>3</sub>	8,09	7,1	7,77	5,19	16,1	8,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,31	7,36	3,46	7,17	5,41	7,48
TiO <sub>2</sub>	2,44	3,32	5,45	5,41	1,21	1,53
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,22	0,26	0,31	0,14	0,19
Vedľajšie oxidy [%]						
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03
MnO	0,08	0,06	0,04	0,07	0,13	0,1
NiO	0,02	0,03	-	0,01	0,01	0,01
CuO	0,02	0,02	0,02	0,04	0,01	0,02
ZnO	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,05	0,02	0,01	0,08	0,06
ZrO <sub>2</sub>	0,04	0,08	0,07	0,09	0,03	0,03
SrO	0,04	0,12	0,07	0,09	0,04	0,06
CeO <sub>2</sub>	-	-	0,04	-	0,08	-
CeO <sub>2</sub>	-	-	-	-	0,03	-
BaO	-	-	0,11	0,15	-	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,03	0,08	-	-	0,05
Rb <sub>2</sub> O	-	0,01	-	-	0,01	0,01
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0,01	-	0,01
WO <sub>3</sub>	-	-	-	0,01	-	-



**Obrázok 17**

*Kalorimetrická krivka použitých popolčekov*

Z grafu (obr. 17) je patrné, že najvyššiu teplotu počas hydratačnej reakcie dosiahol fluidný lôžkový popolček z elektrárne Tisová, ktorý mal najväčší obsah voľného vápna. Naopak najnižšiu teplotu počas hydratácie dosiahol fluidný filtrový popolček z elektrárne Ledvice, ktorý obsahoval najmenej voľného vápna zo všetkých skúmaných popolčekov. Z uvedeného vyplýva, že priebeh kalorimetrickej krivky jednotlivých popolčekov je výrazne ovplyvnený obsahom voľného vápna. Môžeme tiež pozorovať, že najrýchlejšie začali hydratovať oba popolčeky z elektrárne Poříčí K8.

### 4.3 Fluidný lôžkový popolček z elektrárne Ledvice ako donor síranov v p-slinku

Táto kapitola popisuje experimenty, v ktorých bol ako donor síranov v alternatívnych portlandských cementoch použitý fluidný lôžkový popolček z elektrárne Ledvice. Kapitola popisuje testy na pastách bez prídavku kameniva. Pre overenie použiteľnosti týchto alternatívnych spojív (cementov) boli na vybraných zmesiach urobené tiež normové testy na maltách. Zloženie jednotlivých testovaných pást a mált je uvedené v tabuľkách 7 a 8, kde vodný súčiniteľ w/c je podiel vody a celkového množstva spojiva, teda p-slinku a popolčeka. Množstvo vody bolo volené tak, aby konzistencia pripravovaných zmesí bola vždy rovnaká. Táto skutočnosť bola overená na striasacom stolíku (minicone). Dosiahnuté výsledky sú spracované graficky a uvedené na obr. 20 - 23. Fázové zloženie zmesí po 28 dňoch bolo stanovené röntgenovou difrakčnou analýzou. Grafický záznam analýzy je uvedený na obr. 24.

#### Tabuľka 7

Zloženie pripravených pást s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Ledvice

Označenie	Popol [g]	Slinok [g]	Voda [ml]	w/c
SL	0	1650	580	0,35
ALL	30	270	105	0,35
BLL	60	240	105	0,35
CLL	90	210	110	0,37
DLL	120	180	115	0,38
ELL	150	150	115	0,39
FLL	180	120	120	0,40
GLL	210	90	120	0,41
HLL	240	60	125	0,42
ILL	270	30	130	0,43

#### Tabuľka 8

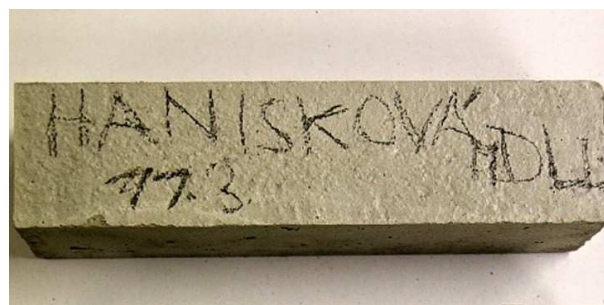
Zloženie pripravených mált s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Ledvice

Označenie	Piesok jemný [g]	Piesok stredný [g]	Piesok hrubý [g]	Slinok [g]	Popol [g]	Voda [ml]	w/c
MDLL	400	400	400	240	160	280	0,70
MELL	400	400	400	200	200	280	0,70
MFL	400	400	400	160	240	280	0,70



**Obrázok 18**

Skúšobné telieska (20 x 20 x 100 mm) pre pevnostné skúšky pripravené z pást s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Ledvice



**Obrázok 19**

Skúšobné teleso (40 x 40 x 160 mm) pre pevnostné skúšky pripravené z malty s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Ledvice



**Tabuľka 9**

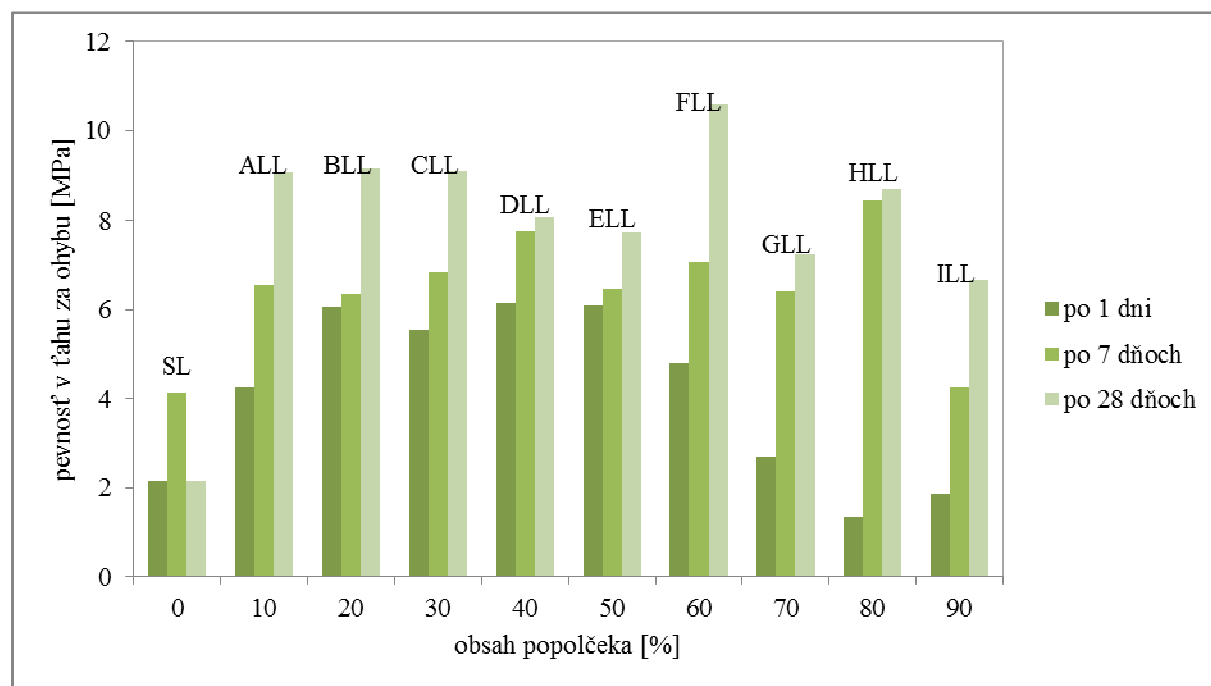
Vývoj pevností v ťahu za ohybu a v tlaku pre pasty s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Ledvice

Označenie	Pevnosť po 1 dni		Pevnosť po 7 dňoch		Pevnosť po 28 dňoch	
	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku
SL	2,2	13,9	4,1	34,8	2,1	40,0
ALL	4,2	22,6	6,6	55,5	9,1	67,2
BLL	6,1	35,2	6,4	68,7	9,1	83,2
CLL	5,5	35,9	6,8	67,2	9,1	90,0
DLL	6,2	32,7	7,8	69,2	8,1	88,7
ELL	6,1	29,3	6,5	71,3	7,8	84,3
FLL	4,8	20,9	7,1	75,9	10,6	94,6
GLL	2,7	10,1	6,4	53,0	7,3	69,5
HLL	1,3	5,0	8,5	47,4	8,7	61,7
ILL	1,9	0,0	4,3	27,3	6,7	50,1

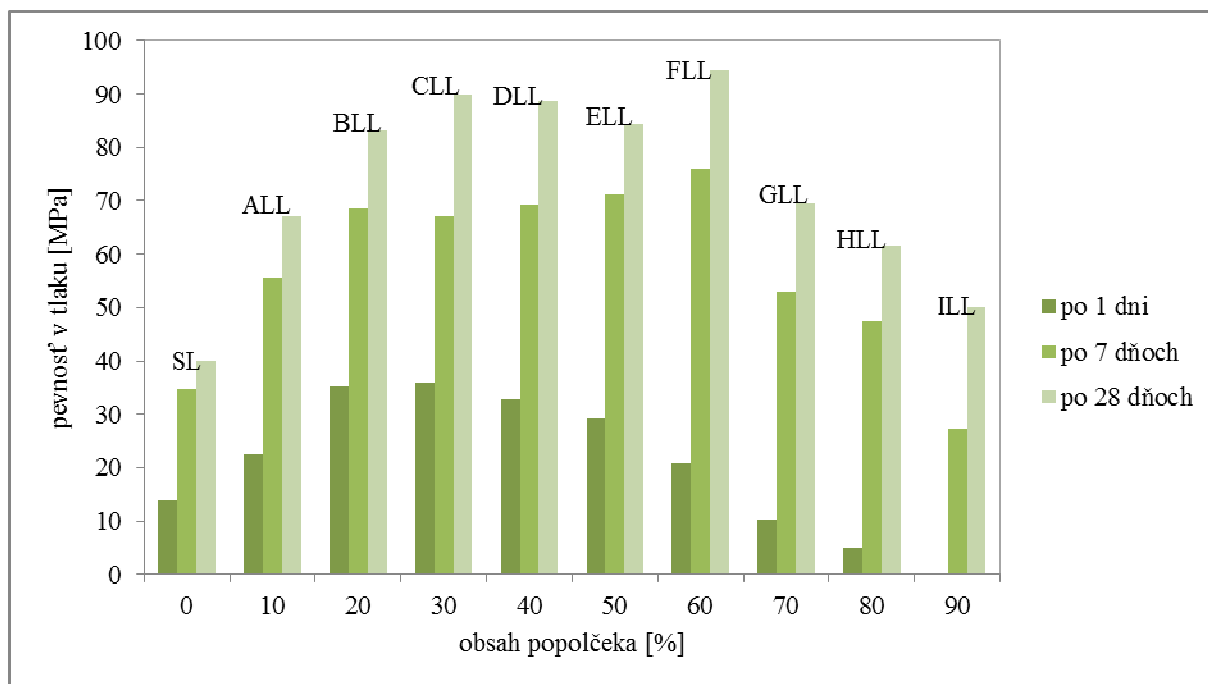
**Tabuľka 10**

Vývoj pevností v ťahu za ohybu a v tlaku pre malty s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Ledvice

Označenie	Pevnosť po 1 dni		Pevnosť po 7 dňoch		Pevnosť po 28 dňoch	
	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku
MDLL	2,3	7,9	2,6	13,4	4,3	32,7
MELL	1,9	8,3	4,1	23,9	4,5	33,8
MFL	0,8	3,2	3,5	18,2	3,1	24,4

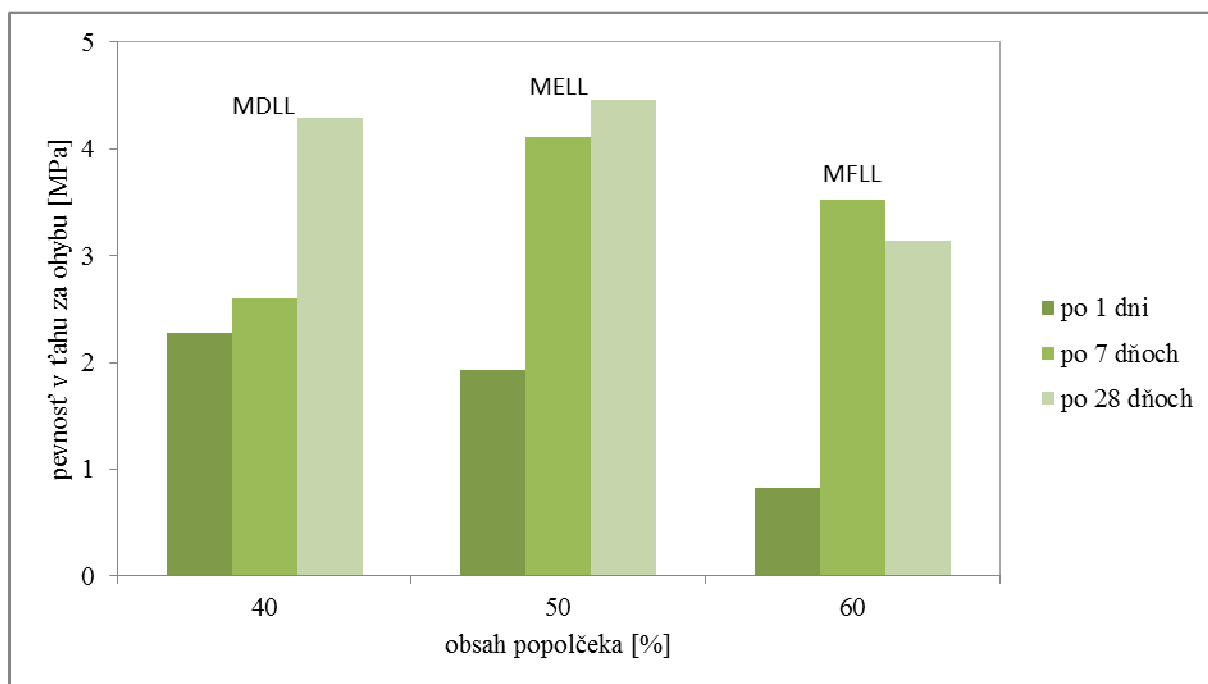
**Obrázok 20**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti pást v ťahu za ohybu na obsahu fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Ledvice



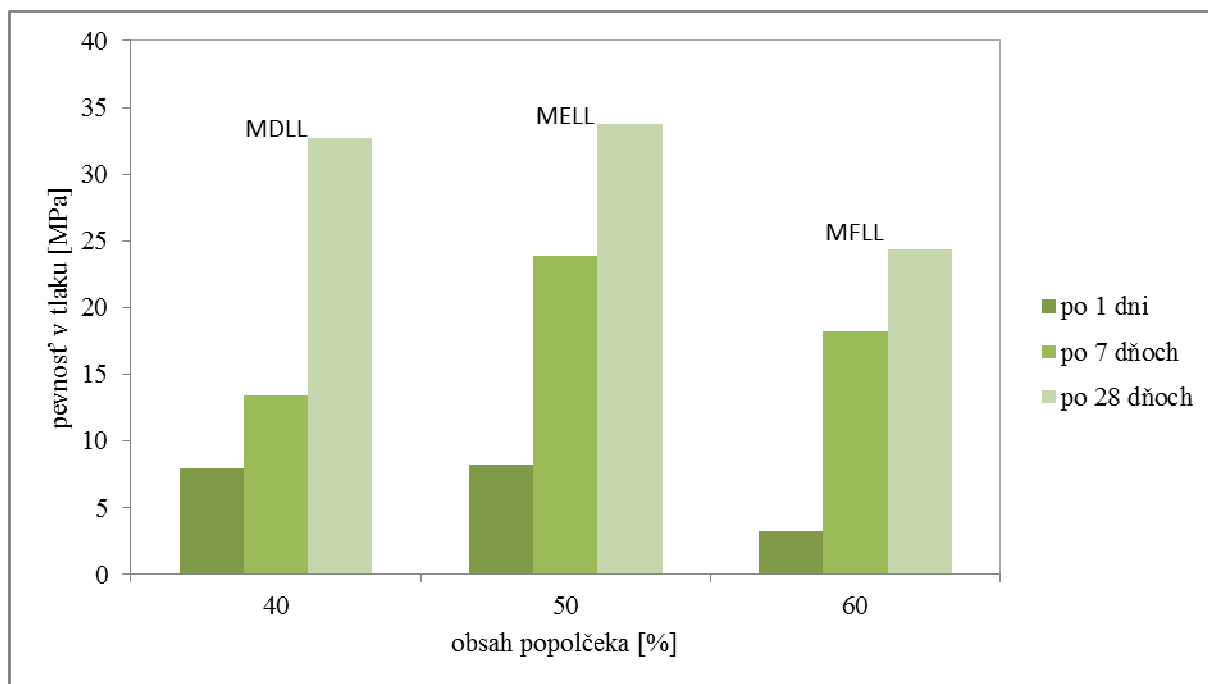
**Obrázok 21**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti pást v tlaku na obsahu fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Ledvice



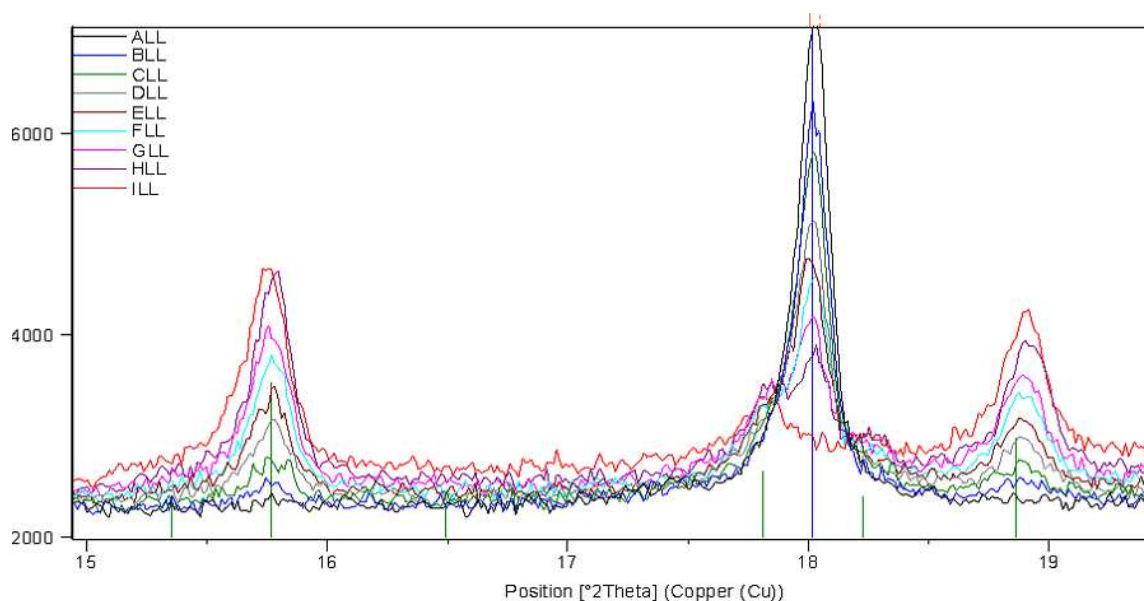
**Obrázok 22**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti mált v ťahu za ohybu na obsahu fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Ledvice



**Obrázok 23**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti mált v tlaku na obsahu fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Ledvice



Peak List	
Ca (OH) <sub>2</sub> ; Calcium Hydroxide; Portlandite, syn; SQ: 28 [%]; Hexagonal; P-3m1	
Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>26</sub> ; Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate; Ettringite, syn; SQ: 21 [%]; Hexagonal; P31c	

**Obrázok 24**

Detail záznamu röntgenovej práškovej difrakcie – porovnanie tvorby ettringitu a portlanditu v pastách s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Ledvice

## Zhodnotenie

Z Tabuľky 9 a grafu (obr. 20) vyplýva, že najväčšiu pevnosť v ťahu za ohybu dosahovali zmesi po 28 dňoch. U čistého slinku je hodnota po 28 dňoch nižšia než po 7 dňoch, čo mohlo byť spôsobené absenciou  $\text{SO}_4^{2-}$ . Najvyššiu hodnotu pevnosti v ťahu za ohybu dosiahla zmes FLL.

Najvyššie hodnoty pevnosti v tlaku po 1 dni vykazovali zmesi BLL, CLL a DLL, ako vyplýva z Tabuľky 9 a grafu (obr. 21). Hodnoty pevností v tlaku týchto zmesí po 7 dňoch sú opäť vzájomne porovnateľné. Pozorujeme značný nárast pevnosti zmesi FLL, ktorá dosahuje aj po 28 dňoch najvyššiu pevnosť. Pevnosť samotného slinku po 1 dni je vyššia ako pevnosť zmesi s obsahom popolčeka vyšším než 70 %. Po 7 aj 28 dňoch už všetky zmesi výrazne prevyšujú samotný slinok, čo spôsobuje prítomnosť puzolánov z popolčeka. Pre skúšky na maltách boli vybrané zmesi dosahujúce najvyšších pevností v tlaku, teda DLL, ELL a FLL.

Z Tabuľky 10 a grafu (obr. 22) vyplýva, že zmesi MDLL a MELL dosahovali najvyššie pevnosti v ťahu za ohybu po 28 dňoch, zmes MFLL po 7 dňoch. Nižšia pevnosť v ťahu za ohybu zmesi MFLL po 28 dňoch, v porovnaní s pevnosťou po 7 dňoch, bola zrejme spôsobená prítomnosťou dutiny v mieste zlomu.

Najvyššie hodnoty pevností v tlaku dosahovali všetky pripravené malty po 28 dňoch, čo dokazuje Tabuľka 10 i graf (obr. 23). Najvyššiu pevnosť mala malta s označením MELL, čo nezodpovedá pevnostiam cementových pást, u ktorých bola najvyššia pevnosť po 28 dňoch nameraná u zmesi FLL.

Na obr. 24 môžeme vidieť detail difraktogramu zmesí ALL – ILL po 28 dňoch zrenia. S rastúcim obsahom popolčeka v zmesi pozorujeme nárast množstva vzniknutého ettringitu, s difrakciou približne na  $16^\circ$  a  $19^\circ$ , čo je funkciou prítomnosti vyššieho obsahu zložiek potrebných k jeho tvorbe. So znižovaním obsahu portlandského slinku pozorujeme pokles množstva obsiahnutého portlanditu, s difrakciou na  $18^\circ$ , ktorý je z prevažnej časti tvorený zhydratovaným CaO. Zbytok je tvorený reakciou CSH gélu po hydratácii p-slinku. Kompletné difraktogramy zmesí sú uvedené v prílohe na obr. 49 - 58. So zvyšujúcim sa obsahom popolčeka sa na difraktogramoch začínajú objavovať nereaktívne zložky ako  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  či gehlenit, ktoré sa nachádzajú vo fluidnom lôžkovom popolčeku. Pri nízkom obsahu popolčeka v zmesi bolo množstvo týchto fáz tak malé, že ich prístroj pri meraní nezachytil (boli pod detekčným limitom prístroja).

## 4.4 Fluidný lôžkový popolček z elektrárne Tisová ako donor síranov v p-slinku

Táto kapitola popisuje experimenty, v ktorých bol ako donor síranov v alternatívnych portlandských cementoch použitý fluidný lôžkový popolček z elektrárne Tisová. Kapitola popisuje testy na pastách bez prídavku kameniva. Pre overenie použiteľnosti týchto alternatívnych spojív (cementov) boli na vybraných zmesiach urobené tiež normové testy na maltách. Zloženie jednotlivých testovaných pást a mált je uvedené v tabuľkách 11 a 12, kde vodný súčiniteľ w/c je podiel vody a celkového množstva spojiva, teda p-slinku a popolčeka. Množstvo vody bolo volené tak, aby konzistencia pripravovaných zmesí bola vždy rovnaká. Táto skutočnosť bola overená na striasacom stolíku (minicone). Dosiagnuté výsledky pevností v ťahu za ohybu a v tlaku sú spracované graficky a uvedené na obr. 27 - 30. Jedným z testov bolo aj kalorimetrické sledovanie vývoja hydratačného tepla. Záznam tejto analýzy je uvedený na obr. 30.

### Tabuľka 11

Zloženie pripravených pást s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Tisová

Označenie	Popol [g]	Slinok [g]	Voda [ml]	w/c
SL	0	1650	580	0,35
ATL	30	270	110	0,37
BTL	60	240	110	0,37
CTL	90	210	115	0,38
DTL	120	180	120	0,40
ETL	150	150	120	0,41
FTL	180	120	125	0,42
GTL	210	90	125	0,43
HTL	240	60	130	0,43
ITL	270	30	130	0,44

### Tabuľka 12

Zloženie pripravených mált s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Tisová

Označenie	Piesok jemný [g]	Piesok stredný [g]	Piesok hrubý [g]	Slinok [g]	Popol [g]	Voda [ml]	w/c
METL	400	400	400	200	200	240	0,60
MFTL	400	400	400	160	240	240	0,60
MGTL	400	400	400	120	280	240	0,60



**Obrázok 25**

Skúšobné telieska (20x20x100 mm) pre pevnostné skúšky pripravené z pást s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Tisová



**Obrázok 26**

Skúšobné teleso (40x40x160 mm) pre pevnostné skúšky pripravené z malty s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Tisová

**Tabuľka 13**

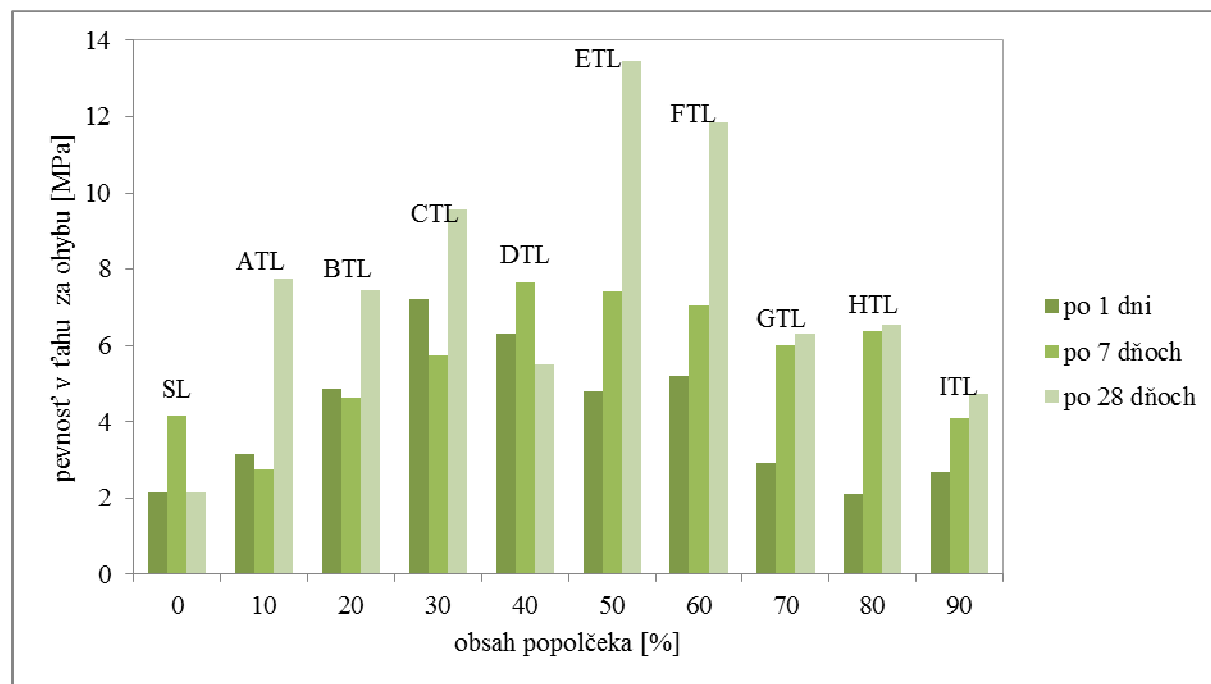
Vývoj pevností v ťahu za ohybu a v tlaku pre pasty s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Tisová

Označenie	Pevnosť po 1 dni		Pevnosť po 7 dňoch		Pevnosť po 28 dňoch	
	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku
SL	2,2	13,9	4,1	34,8	2,1	40,0
ATL	3,2	42,5	2,8	64,0	7,8	71,6
BTL	4,9	41,1	4,6	79,5	7,5	71,3
CTL	7,2	44,1	5,7	78,2	9,5	87,1
DTL	6,3	35,5	7,7	79,1	5,5	92,8
ETL	4,8	26,1	7,4	68,5	13,5	77,6
FTL	5,2	22,0	7,1	59,4	11,8	76,7
GTL	2,9	13,1	6,0	44,9	6,3	55,5
HTL	2,1	9,8	6,4	25,0	6,5	57,0
ITL	2,7	0,0	4,3	27,3	6,7	50,1

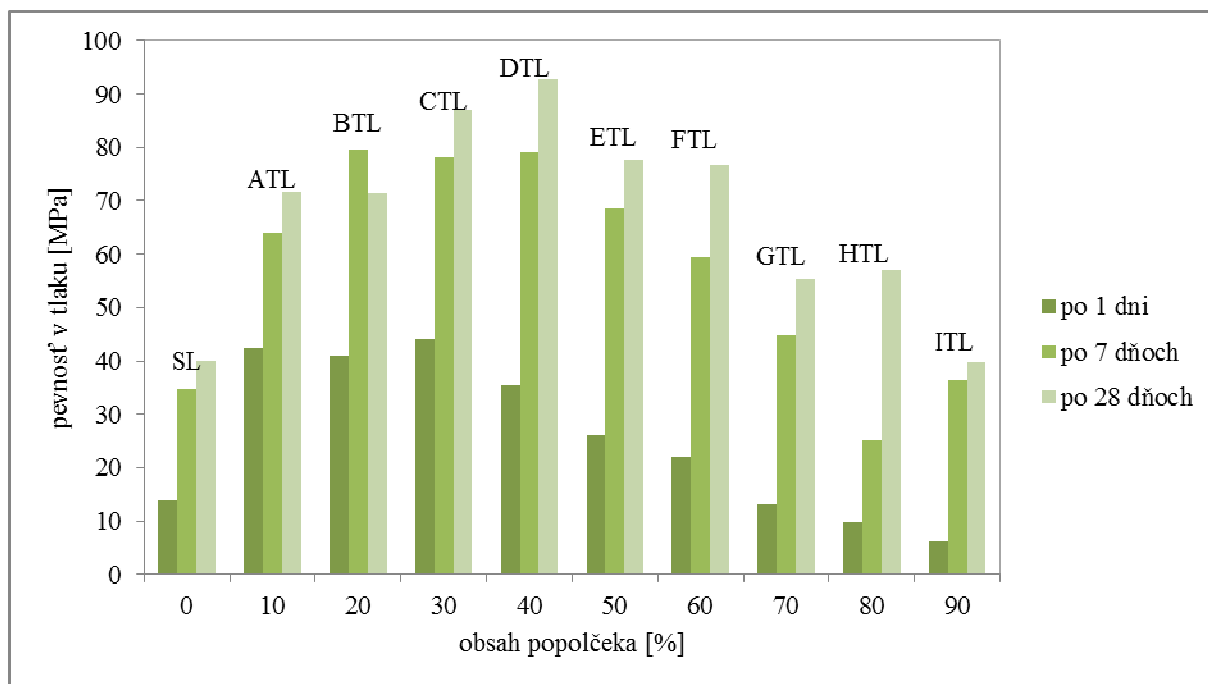
**Tabuľka 14**

Vývoj pevností v ťahu za ohybu a v tlaku pre malty s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Tisová

Označenie	Pevnosť po 1 dni		Pevnosť po 7 dňoch		Pevnosť po 28 dňoch	
	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku
METL	1,4	6,9	5,6	30,9	5,0	42,2
MFTL	1,1	5,5	3,7	22,7	4,2	39,7
MGTL	0,8	3,5	3,4	18,7	3,5	30,8

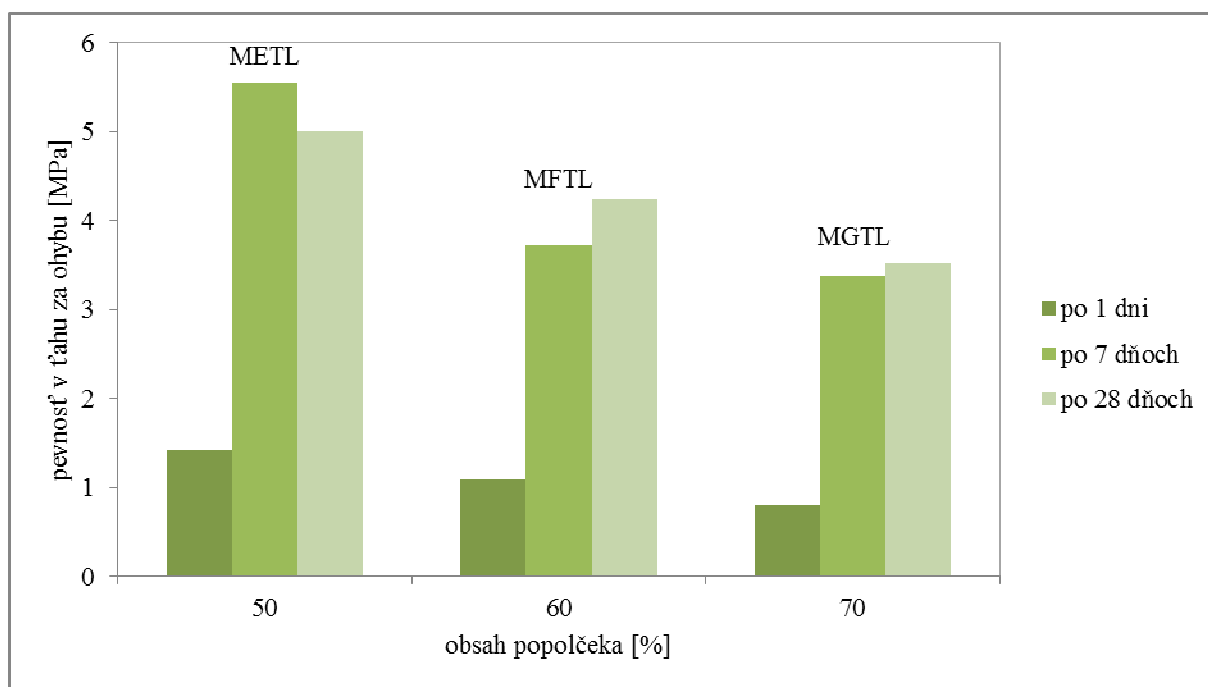
**Obrázok 27**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti pást v ťahu za ohybu na obsahu fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Tisová



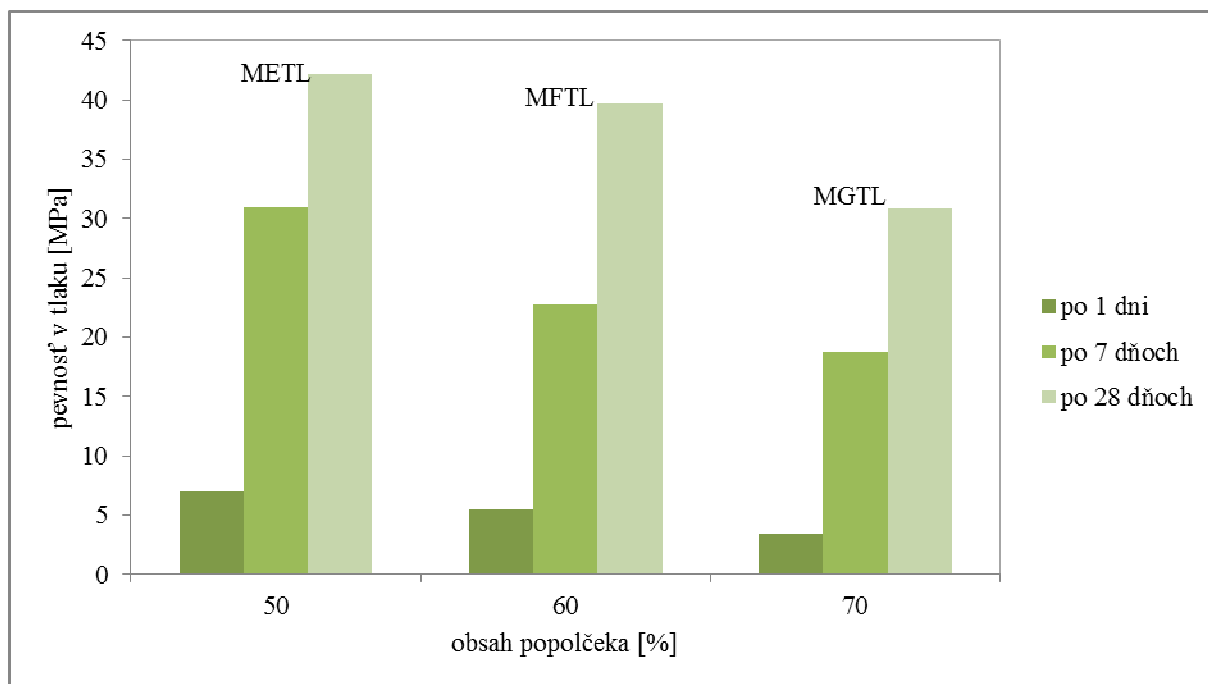
**Obrázok 28**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti pást v tlaku na obsahu fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Tisová



**Obrázok 29**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti mált v ťahu za ohybu na obsahu fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Tisová



**Obrázok 30**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti mált v tlaku na obsahu fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Tisová

### Zhodnotenie

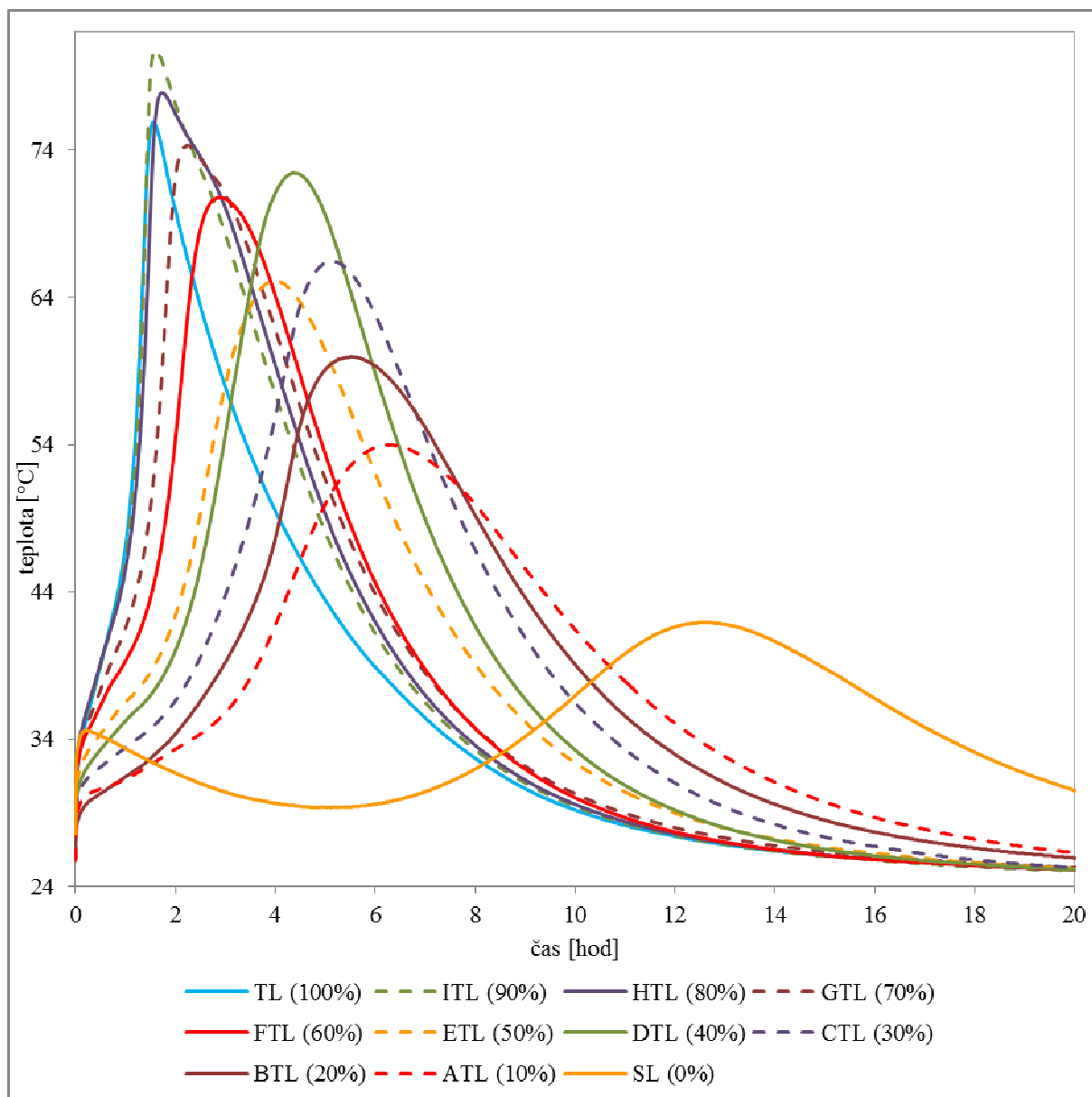
Z Tabuľky 13 a grafu (obr. 27) je zrejmé, že najvyššie pevnosti v ťahu za ohybu dosahovala väčšina zmesí po 28 dňoch. U zmesi DTL prevyšuje hodnota pevnosti v ťahu za ohybu po 7 dňoch, hodnotu po 28 dňoch, čo bolo pravdepodobne spôsobené kavitou v mieste zlomu. Pevnosti po 28 dňoch všetkých zmesí s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Tisová sú vyššie než pevnosť v ťahu za ohybu samotného slinku, čo je spôsobené absenciou síranových iónov.

Tabuľka 13 a graf (obr. 28) ukazuje, že najvyššie pevnosti v tlaku dosahovali zmesi po 28 dňoch. Najvyššie hodnoty pevností v tlaku dosahovali pasty CTL a DTL. Z dôvodu absencie  $\text{SO}_4^{2-}$  iónov je pevnosť v tlaku portlandského slinku nižšia než pevnosť zmesí pripravených z portlandského slinku s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Tisová. Pre skúšky na maltách boli vybrané zmesi s obsahom popolčeka 50, 60 a 70 %. Tieto pasty aj napriek vysokému obsahu popolčeka dosahovali vysoké pevnosti.

Z Tabuľky 14 a grafu (obr. 29) vyplýva, že najvyššie hodnoty pevnosti v ťahu za ohybu dosahuje zmes METL a najnižšie zmes MGTL, čo zodpovedá trendu pozorovanému na pripravených pastách. Nižšia hodnota pevnosti po 28 dňoch než po 7 dňoch u zmesi METL, bola pravdepodobne spôsobená dutinou v mieste zlomu.

Tabuľka 14 a graf (obr. 30) ukazujú, že najvyššie pevnosti v tlaku dosahovali malty po 28 dňoch. Najvyššiu pevnosť dosiahla malta METL, najnižšie pevnosti zmes MGTL, čo kopíruje trend pást.





**Obrázok 31**

*Kalorimetrická krivka zmesí slinku a fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Tisová (v zátvorkách je uvedený percentuálny obsah popolčeka)*

Na obr. 31 môžeme pozorovať, že kalorimetrické krivky zmesí s obsahom fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Tisová 10 – 40 % sa podobajú kalorimetrickej krivke samotného portlandského slinku. Priebeh hydratačnej reakcie zmesí s obsahom popolčeka vyšším než 50 % je podobný priebehu hydratačnej reakcie samotného fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Tisová. Z uvedených údajov vyplýva, že so zvyšujúcim sa obsahom popolčeka v zmesiach majú maximá kalorimetrických kriviek rastúcu tendenciu.

Nakoľko hydratačná reakcia samotného popolčeka prebehla rýchlejšie ako hydratácia p-slinku, zvyšovanie obsahu popolčeka v skúmaných zmesiach malo za následok urýchlenie hydratačnej reakcie týchto zmesí. Ďalším faktorom, ktorý urýchlil priebeh reakcie, bola teplota, ktorá sa so zvyšujúcim obsahom popolčeka tiež zvyšovala.

## 4.5 Fluidný lôžkový popolček z elektrárne Poříčí K8 ako donor síranov v p-slinku

Táto kapitola popisuje experimenty, v ktorých bol ako donor síranov v alternatívnych portlandských cementoch použitý fluidný lôžkový popolček z elektrárne Poříčí K8. Kapitola popisuje testy na pastách bez prídavku kameniva. Pre overenie použiteľnosti týchto alternatívnych spojív (cementov) boli na vybraných zmesiach urobené tiež normové testy na maltách. Zloženie jednotlivých testovaných pást a mált je uvedené v tabuľkách 15 a 16, kde vodný súčiniteľ w/c je podiel vody a celkového množstva spojiva, teda p-slinku a popolčeka. Množstvo vody bolo volené tak, aby konzistencia pripravovaných zmesí bola vždy rovnaká. Táto skutočnosť bola overená na striasacom stolíku (minicone). Dosiagnuté výsledky pevností v ťahu za ohybu a v tlaku sú spracované graficky a uvedené na obr. 34 - 37. Jedným z testov bolo aj kalorimetrické sledovanie vývoja hydratačného tepla. Záznam tejto analýzy je uvedený na obr. 37.

### Tabuľka 15

Zloženie pripravených pást s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Poříčí K8

Označenie	Popol [g]	Slinok [g]	Voda [ml]	w/c
SL	0	1650	580	0,35
APL	30	270	115	0,38
BPL	60	240	120	0,39
CPL	90	210	120	0,40
DPL	120	180	125	0,42
EPL	150	150	125	0,42
FPL	180	120	130	0,43
GPL	210	90	130	0,43
HPL	240	60	130	0,44
IPL	270	30	130	0,45

### Tabuľka 16

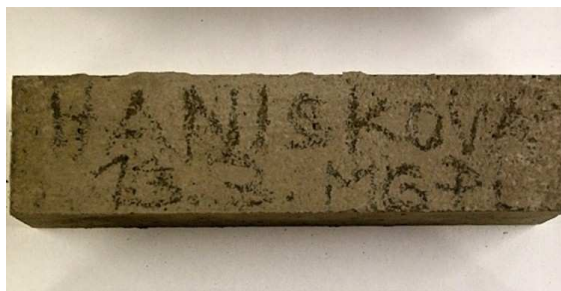
Zloženie pripravených mált s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Poříčí K8

Označenie	Piesok jemný [g]	Piesok stredný [g]	Piesok hrubý [g]	Slinok [g]	Popol [g]	Voda [ml]	w/c
MFPL	400	400	400	160	240	220	0,55
MGPL	400	400	400	120	280	220	0,55
MHPL	400	400	400	80	320	220	0,55



**Obrázok 32**

Skúšobné telieska (20 x 20 x 100 mm) pre pevnostné skúšky pripravené z pást s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Poříčí K8



**Obrázok 33**

Skúšobné teleso (40 x 40 x 160 mm) pre pevnostné skúšky pripravené z malty s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Poříčí K8

**Tabuľka 17**

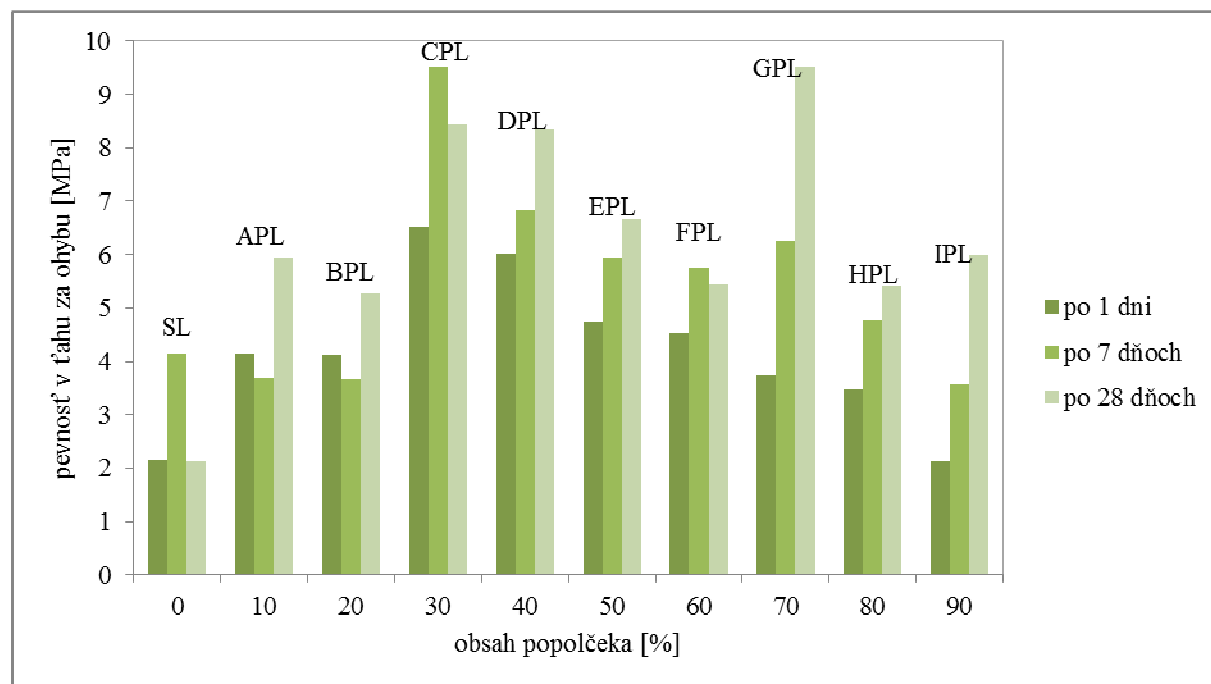
Vývoj pevností v ťahu za ohybu a v tlaku pre pasty s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Poříčí K8

Označenie	Pevnosť po 1 dni		Pevnosť po 7 dňoch		Pevnosť po 28 dňoch	
	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku
SL	2,2	13,9	4,1	34,8	2,1	40,0
APL	4,2	38,3	3,7	76,0	6,0	88,3
BPL	4,1	39,6	3,7	83,8	5,3	100,3
CPL	6,5	42,9	9,5	86,8	8,4	112,6
DPL	6,0	31,0	6,8	59,5	8,3	80,3
EPL	4,7	28,1	5,9	62,5	6,7	73,2
FPL	4,5	22,7	5,7	58,4	5,4	83,4
GPL	3,7	19,3	6,3	57,8	9,5	64,9
HPL	3,5	14,7	4,8	50,1	5,4	65,5
IPL	2,1	11,6	3,6	46,1	6,0	63,6

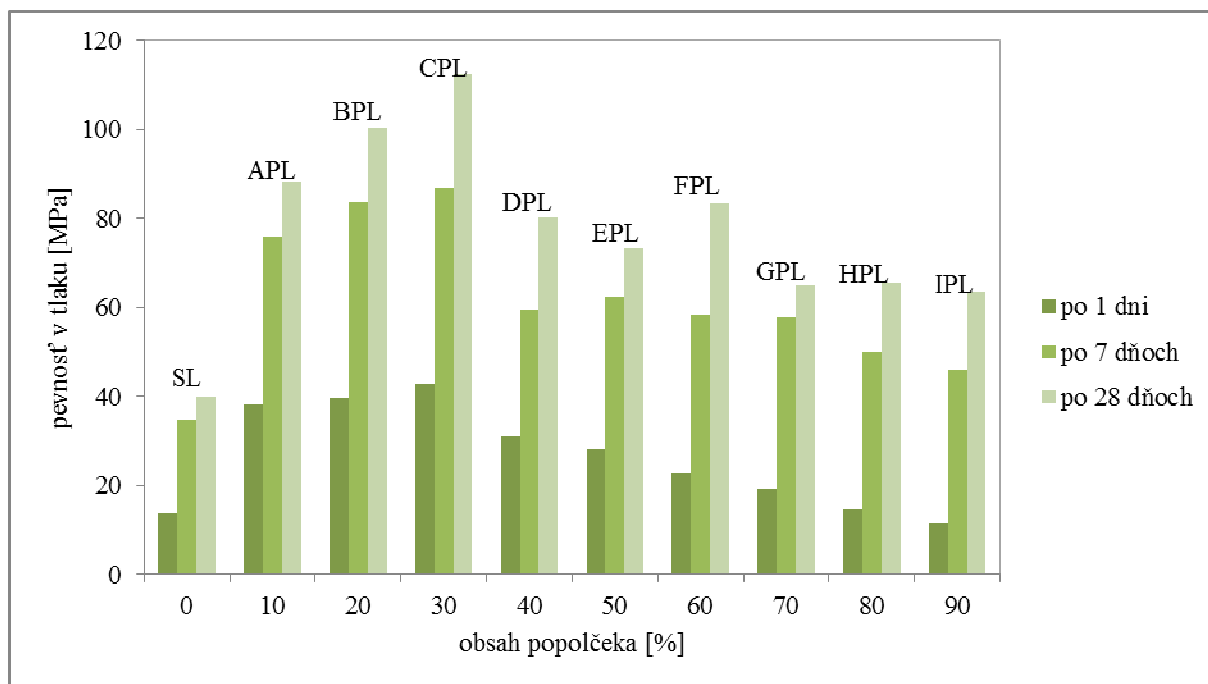
**Tabuľka 18**

Vývoj pevností v ťahu za ohybu a v tlaku pre malty s fluidným lôžkovým popolčekom z elektrárne Poříčí K8

Označenie	Pevnosť po 1 dni		Pevnosť po 7 dňoch		Pevnosť po 28 dňoch	
	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku
MFPL	1,6	6,8	3,3	21,6	7,2	35,8
MGPL	1,4	5,6	3,8	22,3	7,3	38,5
MHPL	0,8	3,5	3,3	19,9	7,5	32,3

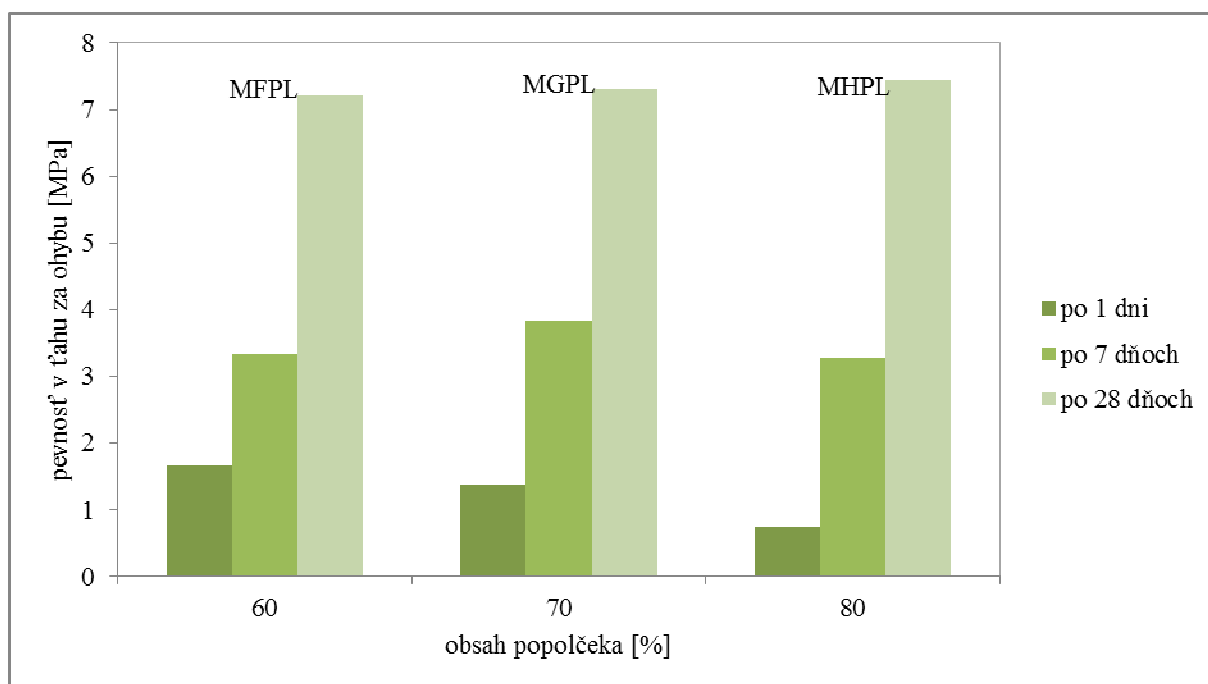
**Obrázok 34**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti pást v ťahu za ohybu na obsahu fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Poříčí K8



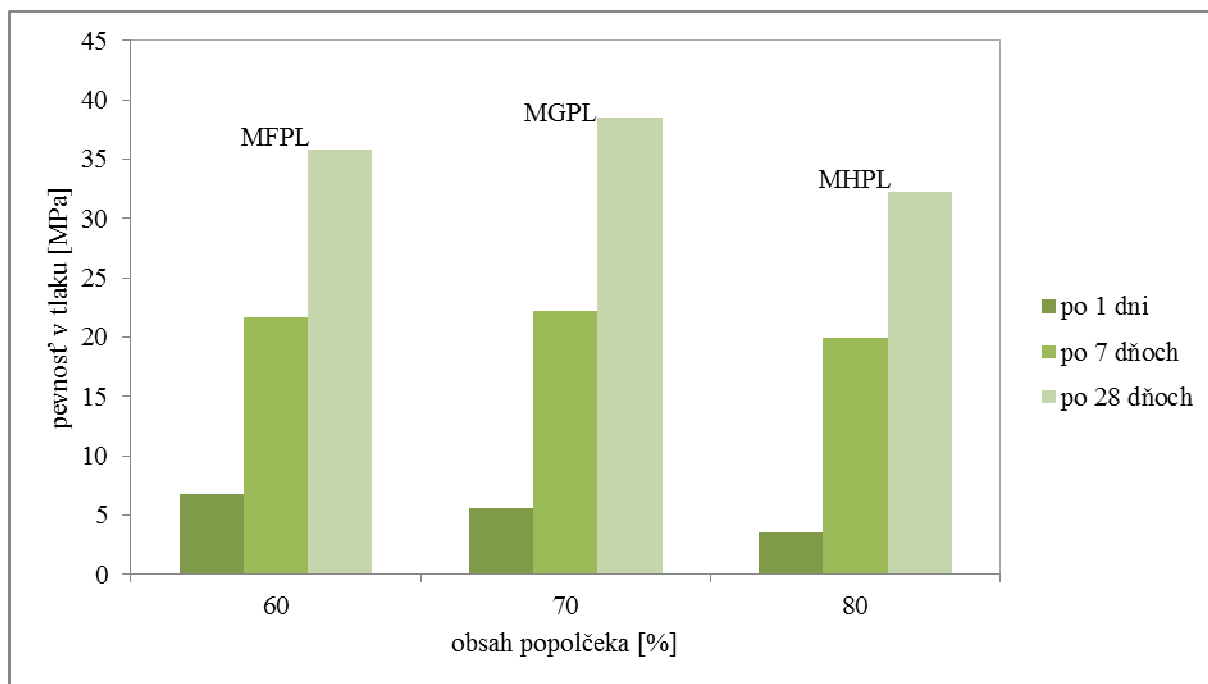
**Obrázok 35**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti pást v tlaku na obsahu fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Poříčí K8



**Obrázok 36**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti mált v ťahu za ohybu na obsahu fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Poříčí K8



**Obrázok 37**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti mált v tlaku na obsahu fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Poříčí K8

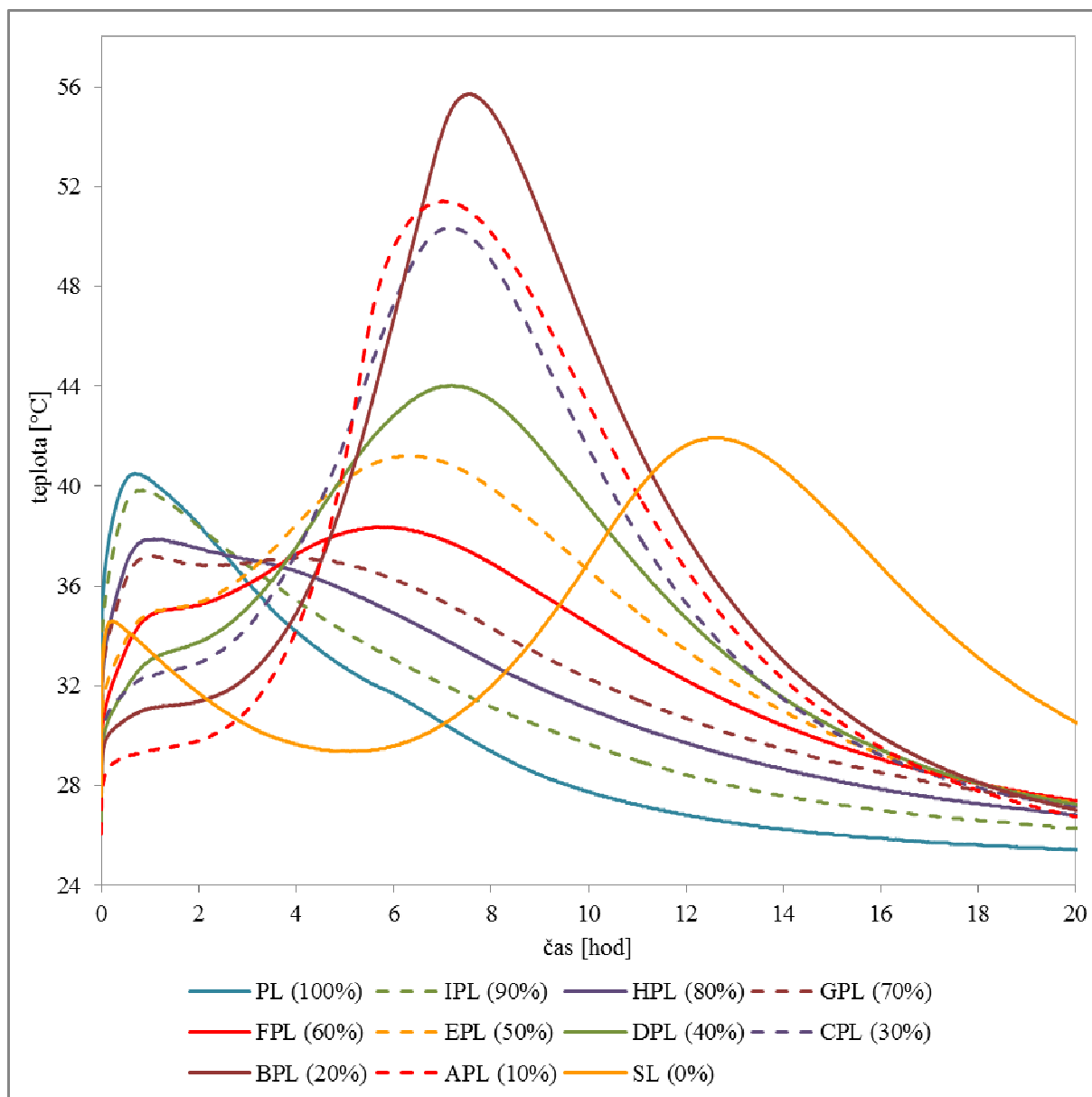
### Zhodnotenie

Tabuľka 17 a graf (obr. 34) ukazujú, že okrem zmesí CPL a FPL dosahovali najvyššie pevnosti v ťahu za ohybu pasty po 28 dňoch. Zníženie pevností u zmesí CPL a FPL mohlo byť spôsobené prítomnosťou dutiny v mieste zlomu. Najvyššie pevnosti v ťahu za ohybu dosiahli zmesi CPL, DPL a GPL.

V Tabuľke 17 a grafe (obr. 35) môžeme vidieť, že najvyššie hodnoty pevností v tlaku dosahovali všetky pripravené zmesi po 28 dňoch. Taktiež môžeme pozorovať, že absencia síranových iónov v portlandskom slinku spôsobila, že samotný slinok má výrazne nižšie pevnosti než pasty pripravené zo zmesi portlandského slinku a fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Poříčí K8. Hoci najvyššie pevnosti dosahovali zmesi APL, BPL a CPL, pre overenie na maltách boli vybrané zmesi FPL, GPL a HPL, ktoré aj napriek nízkemu obsahu slinku dosahovali vysoké pevnosti v tlaku.

Pevnosti v ťahu za ohybu porovnávaných mált uvedené v Tabuľke 18 a grafe (obr. 36) sú takmer rovnaké. Najvyššie pevnosti dosiahli malty po 28 dňoch.

Hodnoty pevností v tlaku uvedené v Tabuľke 18 a grafe (obr. 37) sú u všetkých mált porovnateľné, no najvyššiu hodnotu dosiahla malta MGPL po 28 dňoch. Tento trend nezodpovedá trendu pripravených pást, kde najvyššiu hodnotu pevnosti v tlaku dosiahla zmes FPL.



**Obrázok 38**

Kalorimetrická krivka zmesí slinku a fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Poříčí K8 (v zátvorkách je uvedený percentuálny obsah popolčeka)

Z obrázku 38 vyplýva, že najvyššiu teplotu počas hydratačnej reakcie dosiahla zmes BPL. Najvyššia dosiahnutá teplota samotného fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Poříčí K8 bola nižšia než slinku. Od zmesi CPL môžeme s rastúcim obsahom popolčeka v pastách pozorovať klesajúci trend kalorimetrickej krivky. Tvar kriviek zmesí s obsahom popolčeka 10 – 40 % sa podobá tvaru kalorimetrickej krivky samotného portlandského slinku. Priebeh hydratačnej reakcie pást s obsahom popolčeka vyšším než 50 % sa podobá priebehu hydratačnej reakcie samotného fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Poříčí K8. Hydratačná reakcia popolčeka prebehla rýchlejšie než p-slinku. Táto skutočnosť mala za následok, že so zvyšujúcim sa obsahom popolčeka došlo k urýchleniu začiatku hydratačnej reakcie.

## 4.6 Fluidný filtrový popolček z elektrárne Tisová ako donor síranov v p-slinku

Táto kapitola popisuje experimenty, v ktorých bol ako donor síranov v alternatívnych portlandských cementoch použitý fluidný filtrový popolček z elektrárne Tisová. Kapitola popisuje testy na pastách bez prídavku kameniva. Pre overenie použiteľnosti týchto alternatívnych spojív (cementov) boli na najlepších zmesiach urobené tiež normové testy na maltách. Zloženie jednotlivých testovaných pást a mált je uvedené v tabuľkách 19 a 20, kde vodný súčiniteľ w/c je podiel vody a celkového množstva spojiva, teda p-slinku a popolčeka. Množstvo vody bolo volené tak, aby konzistencia pripravovaných zmesí bola vždy rovnaká. Táto skutočnosť bola overená na striasacom stolíku (minicone). Dosiahnuté výsledky pevností v ťahu za ohybu a v tlaku sú spracované graficky a uvedené na obr. 41 - 44. Jedným z testov bolo aj kalorimetrické sledovanie vývoja hydratačného tepla. Záznam tejto analýzy je uvedený na obr. 44.

### Tabuľka 19

Zloženie pripravených pást s fluidným filtrovým popolčekom z elektrárne Tisová

Označenie	Popol [g]	Slinkok [g]	Voda [ml]	w/c
SL	0	1650	580	0,35
ATF	30	270	150	0,50
BTF	60	240	155	0,52
CTF	90	210	160	0,53
DTF	120	180	160	0,54
ETF	150	150	165	0,56
FTF	180	120	170	0,58
GTF	210	90	175	0,59
HTF	240	60	180	0,61
ITF	270	30	190	0,63

### Tabuľka 20

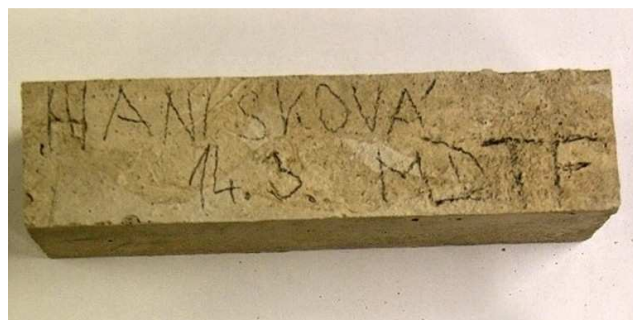
Zloženie pripravených mált s fluidným filtrovým popolčekom z elektrárne Tisová

Označenie	Piesok jemný [g]	Piesok stredný [g]	Piesok hrubý [g]	Slinkok [g]	Popol [g]	Voda [ml]	w/c
MDTF	400	400	400	240	160	285	0,71
METF	400	400	400	200	200	295	0,74



**Obrázok 39**

Skúšobné telieska (20 x 20 x 100 mm) pre pevnostné skúšky pripravené z pást s fluidným filtrovým popolčekom z elektrárne Tisová



**Obrázok 40**

Skúšobné teleso (40 x 40 x 160 mm) pre pevnostné skúšky pripravené z malty s fluidným filtrovým popolčekom z elektrárne Tisová

**Tabuľka 21**

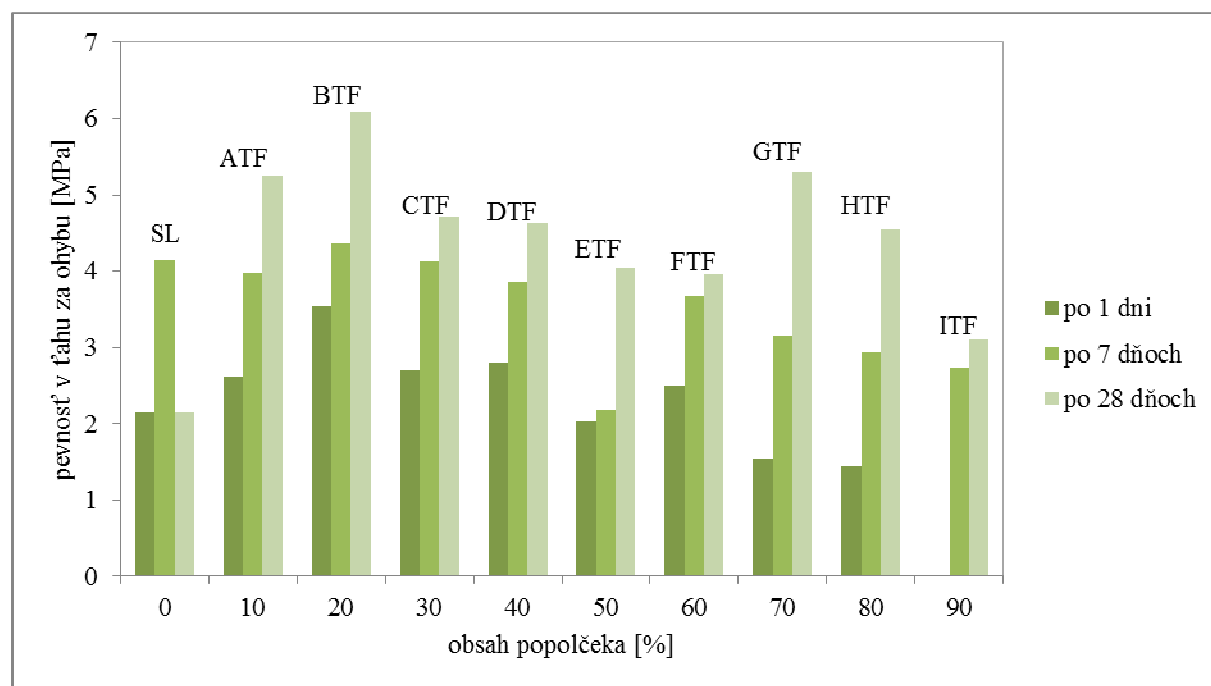
Vývoj pevností v ťahu za ohybu a v tlaku pre pasty s fluidným filtrovým popolčekom z elektrárne Tisová

Označenie	Pevnosť po 1 dni		Pevnosť po 7 dňoch		Pevnosť po 28 dňoch	
	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku
SL	2,2	13,9	4,1	34,8	2,1	40,0
ATF	2,6	10,4	4,0	38,7	5,3	57,5
BTF	3,5	13,8	4,4	50,3	6,1	62,2
CTF	2,7	9,3	4,1	42,0	4,7	53,5
DTF	2,8	9,8	3,9	45,2	4,6	50,8
ETF	2,0	6,9	2,2	36,0	4,0	36,5
FTF	2,5	7,3	3,7	34,3	4,0	41,3
GTF	1,5	2,9	3,2	25,9	5,3	35,9
HTF	1,4	0,0	2,9	20,1	4,5	25,9
ITF	0,0	0,0	2,7	17,1	3,	21,3

**Tabuľka 22**

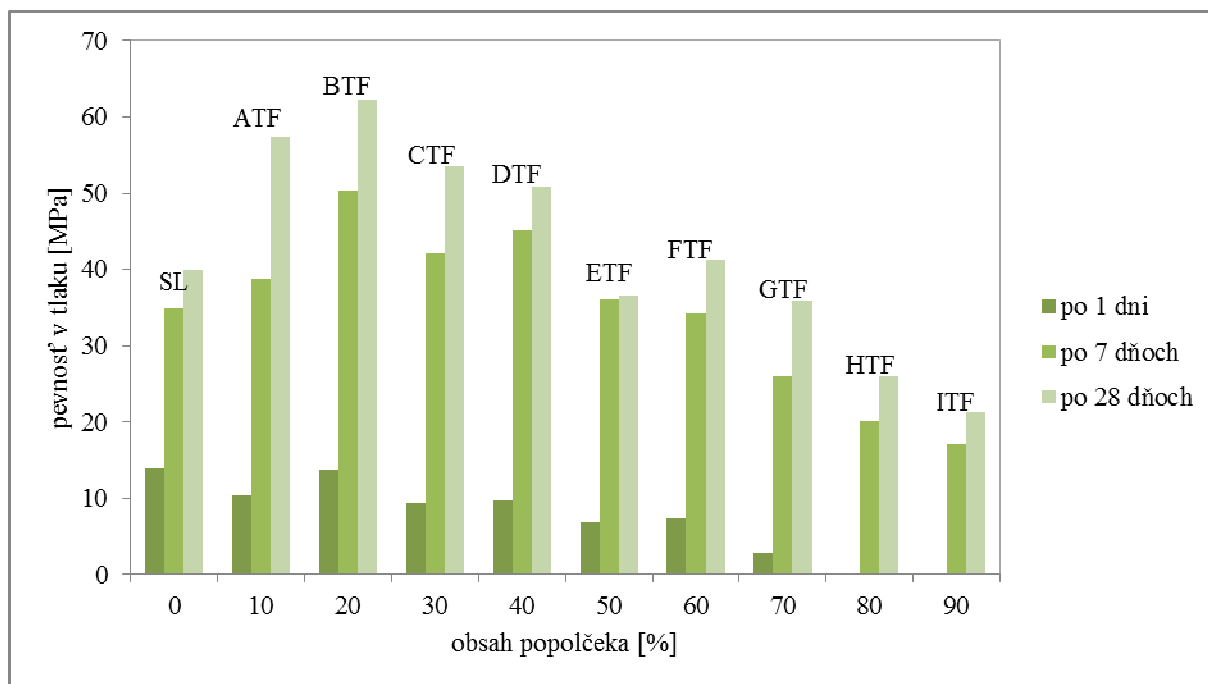
Vývoj pevností v ťahu za ohybu a v tlaku pre malty s fluidným filtrovým popolčekom z elektrárne Tisová

Označenie	Pevnosť po 1 dni		Pevnosť po 7 dňoch		Pevnosť po 28 dňoch	
	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku
MDTF	1,6	5,9	4,2	23,4	5,7	27,6
METF	1,3	4,5	3,2	19,7	4,0	24,3

**Obrázok 41**

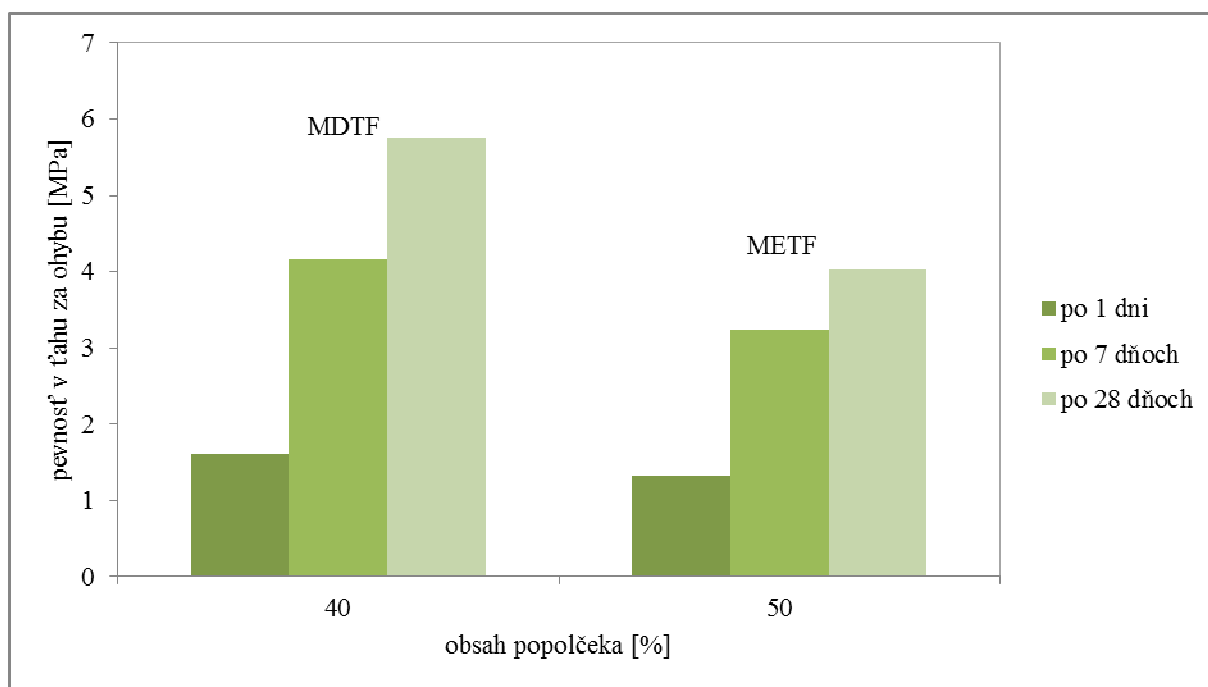
Grafické znázornenie závislosti pevnosti pást v ťahu za ohybu na obsahu fluidného filtrového popolčeka z elektrárne Tisová





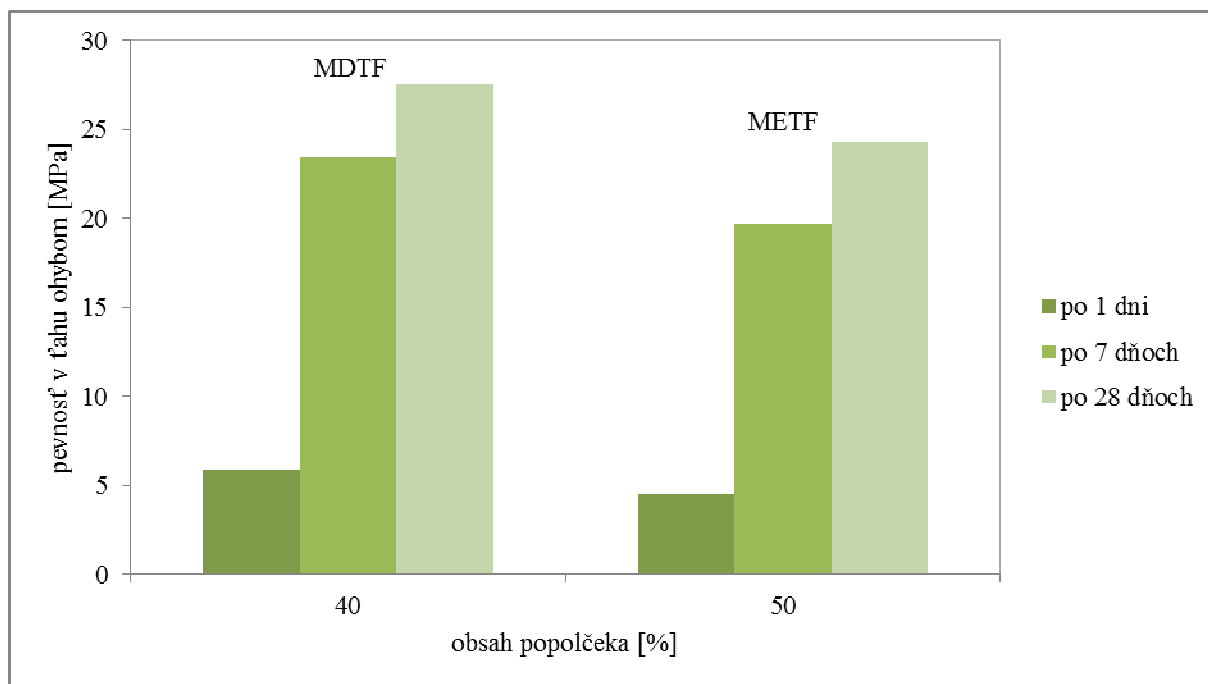
**Obrázok 42**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti pást v tlaku na obsahu fluidného filtrového popolčeka z elektrárne Tisová



**Obrázok 43**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti mált v ťahu za ohybu na obsahu fluidného filtrového popolčeka z elektrárne Tisová



#### Obrázok 44

Grafické znázornenie závislosti pevnosti mált v tlaku na obsahu fluidného filtrového popolčeka z elektrárne Tisová

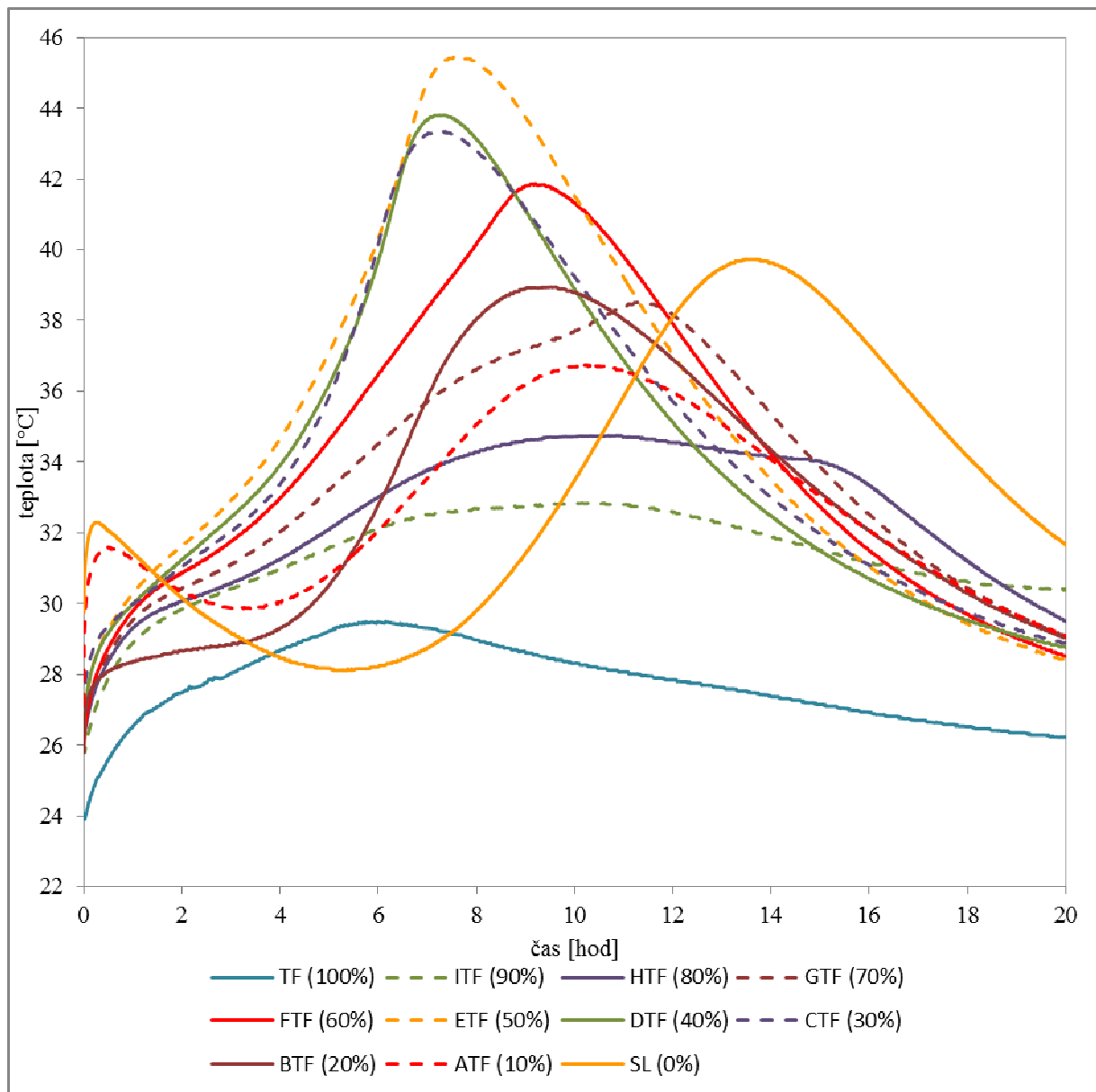
#### Zhodnotenie

Z Tabuľky 21 a grafu (obr. 41) je zrejmé, že pevnosti v ťahu za ohybu u všetkých pást pripravených z portlandského slinku a fluidného filtrového popolčeka Tisová sú najvyššie po 28 dňoch. Najvyššie pevnosti dosahovali zmesi ATF, BTF, GTF a HTF.

Tabuľka 21 a graf (obr. 42) ukazujú, že najvyššie pevnosti v tlaku dosiahli všetky zmesi po 28 dňoch. Najvyššie hodnoty pevnosti majú zmesi ATF, BTF, CTF a DTF. Aj napriek tomu, bola pre skúšky na maltách vybraná okrem zmesi DTF aj zmes ETF, pretože dosahovala dostatočne vysoké pevnosti.

Hodnoty v Tabuľke 22 a grafe (obr. 43) ukazujú, že pripravené malty dosiahli najvyššie pevnosti v ťahu za ohybu po 28 dňoch. Malta MDTF dosiahla vyššie pevnosti než malta METF, čím sa potvrdil trend pozorovaný u pripravených pást.

Tabuľka 22 a graf (obr. 44) ukazujú, že malta MDTF dosiahla vyššie pevnosti v tlaku než malta METF, čo zodpovedá hodnotám pevností pripravených pást. Najvyššie pevnosti v tlaku dosiahli obe malty po 28 dňoch.



**Obrázok 45**

*Kalorimetrická krivka zmesi portlandského slinku a fluidného filtrového popolčeka z elektrárne Tisová (v zátvorkách je uvedený percentuálny obsah popolčeka)*

Z obr. 45 môžeme konštatovať, že najvyššiu teplotu počas hydratačnej reakcie dosiahla pasta s pomerom portlandského slinku a fluidného filtrového popolčeka z elektrárne Tisová 1:1. Samotný popolček dosiahol výrazne nižšiu teplotu než samotný slinok. U zmesi ATF – ETF môžeme s rastúcim obsahom popolčeka sledovať zvyšovanie maximálnych dosiahnutých teplôt. U pást s obsahom popolčeka vyšším než 60 % pozorujeme opačný trend. Priebeh kalorimetrických kriviek väčšiny pást sa podobá priebehu kalorimetrickej krivky samotného portlandského slinku. Ku kalorimetrickej krivke samotného fluidného filtrového popolčeka z elektrárne Tisová sa približujú len kalorimetrické krivky zmesi HTF a ITF. Zmes APL, s 90 % slinku, kopíruje kalorimetrickú krivku samotného portlandského slinku. Hydratácia popolčeka začala skôr ako p-slinku, čo malo za následok urýchľovanie začiatku hydratačnej reakcie zmesi so zvyšujúcim sa obsahom popolčeka.

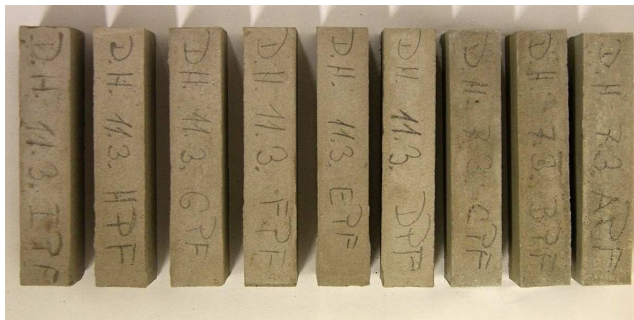
## 4.7 Fluidný filtrový popolček z elektrárne Poříčí K8 ako donor síranov v p-slinku

Táto kapitola popisuje experimenty, v ktorých bol ako donor síranov v alternatívnych portlandských cementoch použitý fluidný filtrový popolček z elektrárne Tisová. Kapitola popisuje testy na pastách bez prídavku kameniva. Zloženie jednotlivých testovaných pást je uvedené v Tabuľke 23, kde vodný súčiniteľ w/c je podiel vody a celkového množstva spojiva, teda p-slinku a popolčeka. Množstvo vody bolo volené tak, aby konzistencia pripravovaných zmesí bola vždy rovnaká. Táto skutočnosť bola overená na striasacom stolíku (minicone). Dosiagnuté výsledky pevností v ťahu za ohybu a v tlaku sú spracované graficky a uvedené na obr. 47 a 48.

### Tabuľka 23

Zloženie pripravených pást s fluidným filtrovým popolčekom z elektrárne Poříčí K8

Označenie	Popol [g]	Slinok [g]	Voda [ml]	w/c
SL	0	1650	580	0,35
APF	30	270	180	0,60
BPF	60	240	185	0,62
CPF	90	210	190	0,63
DPF	120	180	195	0,65
EPF	150	150	205	0,68
FPF	180	120	215	0,73
GPF	210	90	220	0,75
HPF	240	60	225	0,76
IPF	270	30	230	0,77



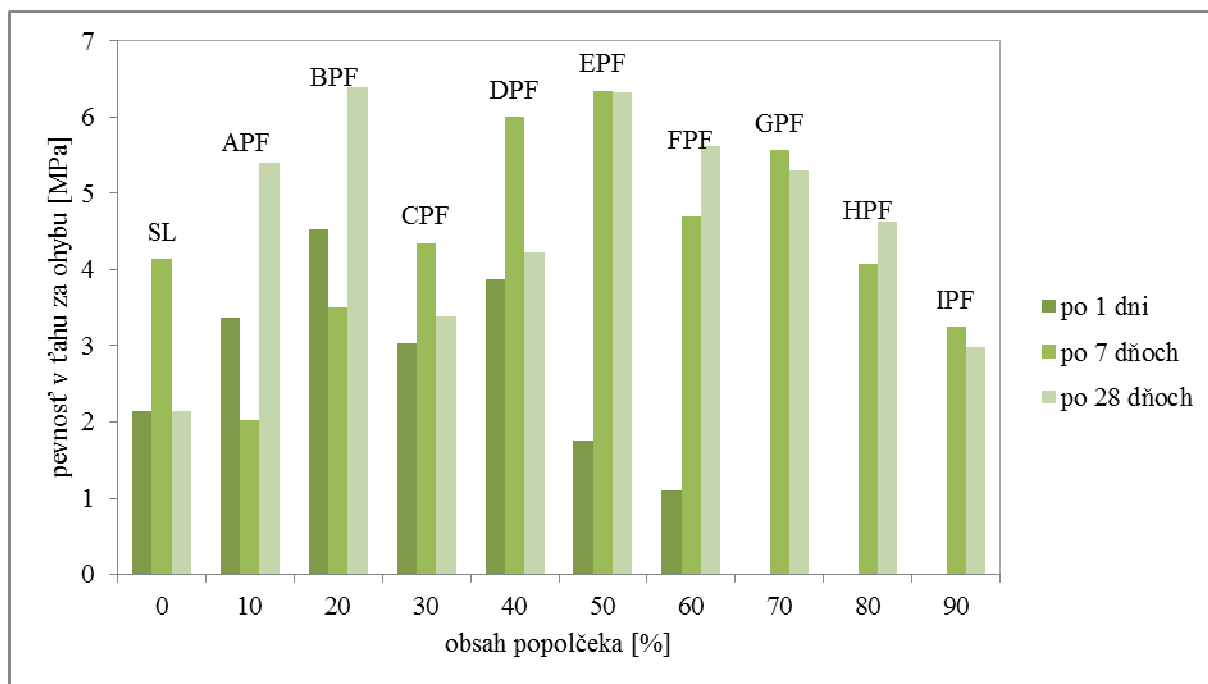
### Obrázok 46

Skúšobné telieska (20 x 20 x 100 mm) pre pevnostné skúšky pripravené z pást s fluidným filtrovým popolčekom z elektrárne Poříčí K8

## Tabuľka 24

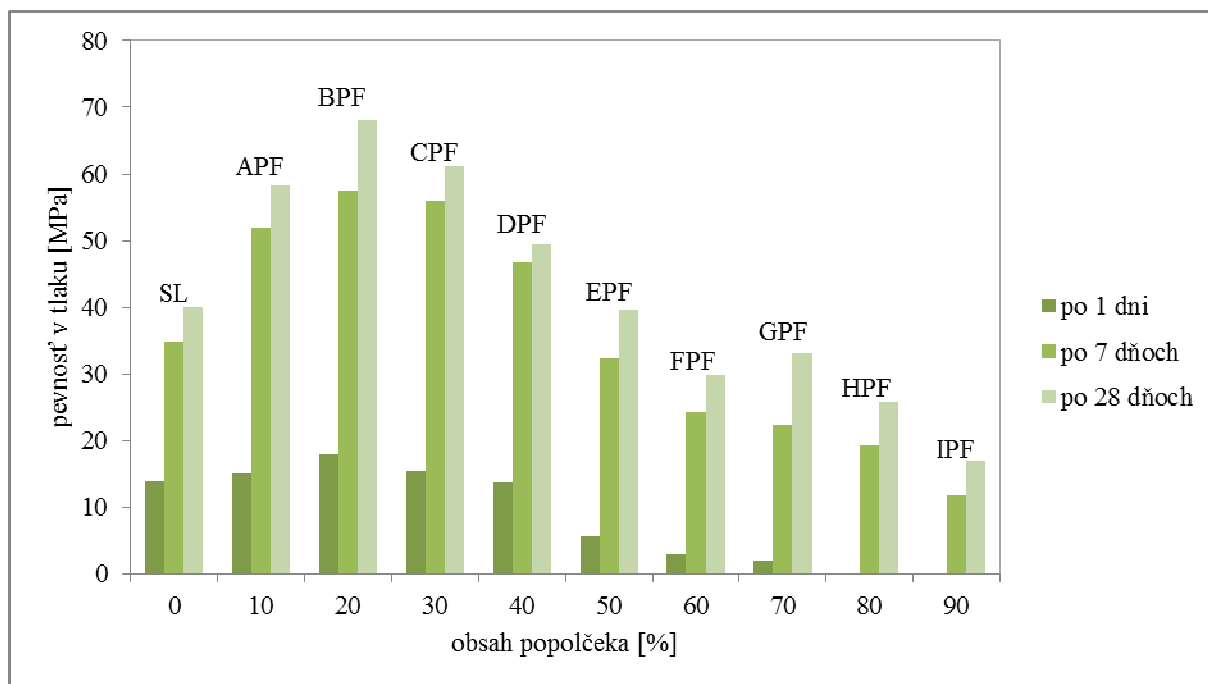
Vývoj pevností v ťahu za ohybu a v tlaku pre pasty s fluidným filtrovým popolčekom z elektrárne Poříčí K8

Označenie	Pevnosť po 1 dni		Pevnosť po 7 dňoch		Pevnosť po 28 dňoch	
	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku	v ťahu za ohybu	v tlaku
SL	2,2	13,9	4,1	34,8	2,1	40,0
APF	3,4	15,2	2,0	52,0	5,4	58,3
BPF	4,5	18,0	3,5	57,5	6,4	68,0
CPF	3,0	15,4	4,4	56,0	3,4	61,1
DPF	3,9	13,7	6,0	46,7	4,2	49,4
EPF	1,8	5,6	6,4	32,4	6,3	39,6
FPF	1,1	2,9	4,7	24,3	5,6	29,9
GPF	0,0	2,0	5,6	22,4	5,3	33,0
HPF	0,0	0,0	4,1	19,2	4,6	25,9
IPF	0,0	0,0	3,3	11,8	3,0	17,0



## Obrázok 47

Grafické znázornenie závislosti pevnosti pást v ťahu za ohybu na obsahu fluidného filtrového popolčeka z elektrárne Poříčí K8



**Obrázok 48**

Grafické znázornenie závislosti pevnosti pást v tlaku na obsahu fluidného filtrového popolčeka z elektrárne Poříčí K8

### Zhodnotenie

Z Tabuľky 24 a grafu (obr. 47) vyplýva, že pripravené pasty, okrem zmesí CPF a FPF, dosiahli najvyššie pevnosti po 28 dňoch. Zníženie pevností oproti hodnotám po 7 dňoch u pást CPF a FPF bolo zrejme spôsobené prítomnosťou dutiny v mieste zlomu.

Tabuľka 24 a graf (obr. 48) ukazujú, že všetky pripravené zmesi dosiahli najvyššie pevnosti po 28 dňoch. Najvyššie pevnosti dosiahli malty APF, BPF a CPF. Overenie na maltách u zmesí s fluidným filtrovým popolčekom z elektrárne Poříčí K8 nebolo robené, z dôvodu predpokladu rovnakých záverov ako pri použití fluidného filtrového popolčeka z elektrárne Tisová.

## 5 ZÁVER

V bakalárskej práci sme sa zaoberali analýzou fluidných lôžkových a filtrových popolčiekov z troch rôznych elektrární a možnosťami ich využitia pri príprave alternatívnych spojív. Použili sme popolčky z elektrární Ledvice, Tisová a Poříčí K8, ktoré využívajú technológiu fluidného spaľovania uhlia.

U použitých fluidných popolčiekov sme najprv röntgenovou fluorescenčnou spektroskopiou stanovili ich chemické zloženie a následne sme v každom z nich sacharátovou metódou určili obsah voľného vápna. Priebeh hydratačnej reakcie sme sledovali metódou izoperibolickej kalorimetrie. Zo získaných kalorimetrických kriviek nám vyplynulo, že priebeh hydratačnej reakcie popolčiekov závisí na stanovenom obsahu voľného vápna.

Pre následné skúšky, ktoré spočívali v príprave cementových pást, sme použili už len 5 popolčiekov. Fluidný filtrový popolček z elektrárne Ledvice sme pre veľmi nízky obsah voľného vápna z ďalších experimentov vyradili. Cementové pasty sme pripravovali z jemne mletého portlandského slinku z cementárne Mokrá a z fluidných popolčiekov. Pripravili sme si 5 sérii cementových pást, ktoré sa líšili druhom použitého popolčeka. Každá séria obsahovala 9 rôznych zmesí s presne určeným hmotnostným pomerom slinku a popolčeka, a to od 10 až po 90 % hmot. popolčeka.

Pri pokusoch s fluidnými lôžkovými popolčkami sme namerali najvyššie hodnoty pevnosti v tlaku u zmesí s obsahom popolčeka 20 – 60 %. Nezanedbateľne vysoké hodnoty pevnosti dosahovali aj zmesi s vyšším obsahom popolčeka. Skúmaním fluidných filtrových popolčiekov sme najvyššie pevnosti dosiahli u zmesí s obsahom popolčeka 20 – 40 %. Z nameraných výsledkov môžeme konštatovať, že pevnosti zmesí s použitím fluidných filtrových popolčiekov boli v porovnaní s lôžkovými popolčkami nižšie. Nevýhodou filtrových popolčiekov je aj ich väčší povrch, ktorý bol dôvodom potreby väčšieho množstva vody pri výrobe pást.

Pevnosti v tlaku, ktoré sme dosiahli testovaním, mali hodnoty prevyšujúce 60 MPa, a to i u vzoriek s 80% obsahom pridaného lôžkového popolčeka. Pevnosti v ťahu za ohybu sa u vzoriek obsahujúcich 60 % lôžkového popolčeka pohybovali okolo 4 – 5 MPa. U zmesi s 30% obsahom fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Poříčí K8 sme po 28 dňoch namerali najvyššiu pevnosť v tlaku 112 MPa, čo môže byť podnetom pre širšie skúmanie a následné ekonomické využitie.

So spojivami na báze fluidného popolčeka sme v ďalšej fáze robili testy na maltách, ktoré obsahovali vždy 75 % piesku (podľa ČSN 1:1:1) a 25 % spojiva. Pri obsahu 80 % hmot. lôžkového popolčeka v spojivovom podiele a 20 % hmot. p-slinku dosahovali pevnosti v tlaku po 28 dňoch normálneho zrenia vo vlhkom prostredí hodnôt vyšších ako 30 MPa. U filtrových popolčiekov sme pri obsahu 50 % hmot. popolčeka v 25% podiele spojiva dosiahli pevností až 25 MPa.

Touto prácou sme dospeli k záveru, že využívanie fluidných popolčiekov v alternatívnych spojivách má perspektívu z environmentálneho i ekonomického hľadiska a má zmysel sa touto problematikou zaoberať. Vytvára sa tu priestor recyklácie popolčiekov a výrazného znižovania odpadov z elektrární. Potvrdzujú nám to aj dosiahnuté pevnosti v tlaku niektorých zmesí, prevyšujúce 100 MPa. Pre ďalšie experimenty doporučujeme skúmať objemovú stálosť a tiež vplyv použitia superplastifikátorov v kontexte vylepšenia mechanických vlastností týchto spojivových systémov.

## 6 POUŽITÁ LITERATÚRA

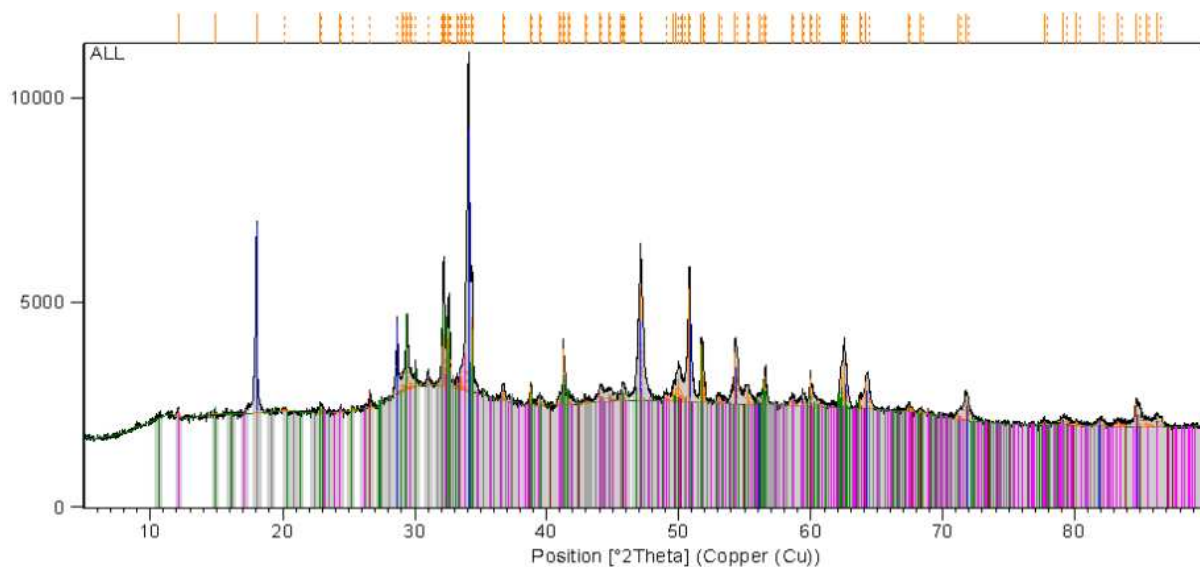
- [1] ZELENÁKOVÁ, Edita. Technologicko-ekonomická optimalizácia výstavby cementobetónových vozoviek. In: *Juniorstav*[online]. 2011 [cit. 2013-02-18]. Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/1.5/Zelenakova\\_Edita\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/1.5/Zelenakova_Edita_CL.pdf)
- [2] ROUBÍČEK, Václav. *Chemie uhlí a jeho využití*. 1. vyd. Ostrava: VŠB, 1996, 216 s. ISBN 80-7078-406-7.
- [3] MICHALÍKOVÁ, Františka, Jiří ŠKVARLA, Beáta STEHLÍKOVÁ a Martin SISOL. Zhodnocovanie tuhých odpadov zo spaľovania uhlia v tepelných elektrárnach. In: *Odpadové fórum* [online]. 2011 [cit. 2013-02-18]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/OF2011/dokumenty/prispevky/077.pdf>
- [4] MICHALÍKOVÁ, Františka, Vladimír JACKO, Martin SISOL a Ivana KOZÁKOVÁ. Úpravnícké technológie získavania užitočných zložiek z tuhých odpadov zo spaľovania uhlia v elektrárnach. *Acta Montanistica Slovaca* [online]. 2005, roč. 10, č. 1, s. 49-55 [cit. 2013-01-28]. ISSN 1335-1788. Dostupné z: <http://actamont.tuke.sk/pdf/2005/n5/10michalikova.pdf>
- [5] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. Kotle – 2. část. In: *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2013-01-28]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/zdroje-tepla/8438-kotle-2-cast>
- [6] LASZUK, A., A. PABIS a M. G. BERENGARTEN. Fluidization of fine materials. *Chemical and Petroleum Engineering* [online]. 2008, roč. 44, 9-10, s. 494-498 [cit. 2013-02-18]. ISSN 0009-2355. DOI: 10.1007/s10556-008-9089-4. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s10556-008-9089-4>
- [7] BENEŠ, Dalibor. Zhodnocení stability fluidního popílku z elektrárny Hodonín. In: *Juniorstav* [online]. 2008. Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008\\_sekce/pdf/4\\_2/Benes\\_Dalibor\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_2/Benes_Dalibor_CL.pdf)
- [8] KOORNNEEF, J, M JUNGINGER a A FAAIJ. Development of fluidized bed combustion - An overview of trends, performance and cost. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2007, roč. 33, č. 1, s. 19-55 [cit. 2013-04-14]. ISSN 03601285. DOI: 10.1016/j.pecs.2006.07.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128506000335>
- [9] BABA, Alper, Gulbin GURDAL a Fatma SENGUNALP. Leaching characteristics of fly ash from fluidized bed combustion thermal power plant: Case study. *Fuel Processing Technology* [online]. 2010, roč. 91, č. 9, s. 1073-1080 [cit. 2013-04-14]. ISSN 03783820. DOI: 10.1016/j.fuproc.2010.03.015. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382010000871>
- [10] LEE, Geun Seong, Gui Young HAN a Sang Done KIM. Coal combustion characteristics in a circulating fast fluidized bed. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 1984, roč. 1, č. 1, s. 71-76.



- [11] AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2010, roč. 36, č. 3, s. 327-363 [cit. 2013-04-14]. ISSN 03601285. DOI: 10.1016/j.pecs.2009.11.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128509000604>
- [12] Druhotné suroviny. SIČÁKOVÁ, Alena. *Stavebné materiály - Vybrané kapitoly* [online]. prvé. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Stavebná fakulta, 2010, s. 32-40 [cit. 2013-01-28]. ISBN 978-80-553-0492-2.
- [13] ČSN EN 197-1 (72 2101). *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2. vyd. 2012.
- [14] VEHOVSKÁ, Ludmila. Fluidní popílek pro přípravu směsného cementu. In: *Juniorstav* [online]. 2007 [cit. 2013-01-28]. Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/pdf/Sekce\\_4.2/Vehovska\\_Ludmila\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/pdf/Sekce_4.2/Vehovska_Ludmila_CL.pdf)
- [15] FONT, O., N. MORENO, X. QUEROL, M. IZQUIERDO, E. ALVAREZ, S. DIEZ, J. ELVIRA, D. ANTENUCCI, H. NUGTEREN, F. PLANA, A. LÓPEZ, P. COCA a F.G. PEÑA. X-ray powder diffraction-based method for the determination of the glass content and mineralogy of coal (co)-combustion fly ashes. *Fuel* [online]. roč. 89, č. 10, s. 2971-2976 [cit. 2013-04-13]. ISSN 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.11.024. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001623610900533X>
- [16] NAVRÁTILOVÁ, Eva. Metody stanovení pucolánové aktivity. In: *Studentská vědecká konference Přírodovědecké fakulty Ostravské univerzity v Ostravě* [online]. 2012 [cit. 2013-01-28]. Dostupné z: <http://konference.osu.cz/svk/sbornik2012/pdf/budoucnost/chemie/navratilova.pdf>
- [17] BONDAR, Dali, C.J. LYNSDALE, Neil B. MILESTONE, N. HASSANI a A.A. RAMEZANIANPOUR. Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans. *Cement and Concrete Composites*. 2011, roč. 33, č. 2, s. 251-260. ISSN 09589465. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.10.021. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946510001885>
- [18] TURANLI, L., B. UZAL a F. BEKTAS. Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans. *Cement and Concrete Research* [online]. roč. 34, č. 12, s. 2277-2282 [cit. 2013-04-13]. ISSN 00088846. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.04.011. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884604001668>
- [19] BÁRTA, Rudolf. *Chemie a technologie cementu*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [20] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. 2. , upravené vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-816-88.
- [21] ŠAUMAN, Zdeněk. *Maltoviny I*. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1993, 198 s. ISBN 80-214-0509-0.

- [22] ARANDA USÓN, Alfonso, Ana M. LÓPEZ-SABIRÓN, Germán FERREIRA a Eva LLERA SASTRESA. Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. roč. 23, s. 242-260 [cit. 2013-04-14]. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2013.02.024. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113001263>
- [23] Jak se vyrábí cement?. *Českomoravský cement* [online]. 2012 [cit. 2013-01-28]. Dostupné z: [http://heidelbergcement.com/cz/cs/country/produkty/cement/vyroba\\_cementu.htm](http://heidelbergcement.com/cz/cs/country/produkty/cement/vyroba_cementu.htm)
- [24] JIRÁSEK, J., VAVRO, M.: Nerostné suroviny a jejich využití. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3
- [25] STADLER, Konrad S., Jan POLAND a Eduardo GALLESTEY. Model predictive control of a rotary cement kiln. *Control Engineering Practice* [online]. 2011, roč. 19, č. 1, s. 1-9 [cit. 2013-04-14]. ISSN 09670661. DOI: 10.1016/j.conengprac.2010.08.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967066110001851>
- [26] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [27] KOPLÍK, Jan. Rentgenová fluorescenční spektrometrie. *Chempoint* [online]. 2011 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://chempoint.cz/rentgenova-fluorescencni-spektrometrie>
- [28] MÁŠILKO. Rentgenová difrakční analýza na práškových vzorcích. *Chempoint* [online]. 2011 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/rentgenova-difrakcni-analyza-na-praskovych-vzorcich>
- [29] Metody výzkumu struktur minerálů. *Multimediální studijní texty z mineralogie pro bakalářské studium* [online]. [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: [http://mineralogie.sci.muni.cz/kap\\_5\\_2\\_metody\\_strukt/kap\\_5\\_2\\_metody\\_strukt.htm#5.2.2.2](http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_5_2_metody_strukt/kap_5_2_metody_strukt.htm#5.2.2.2)

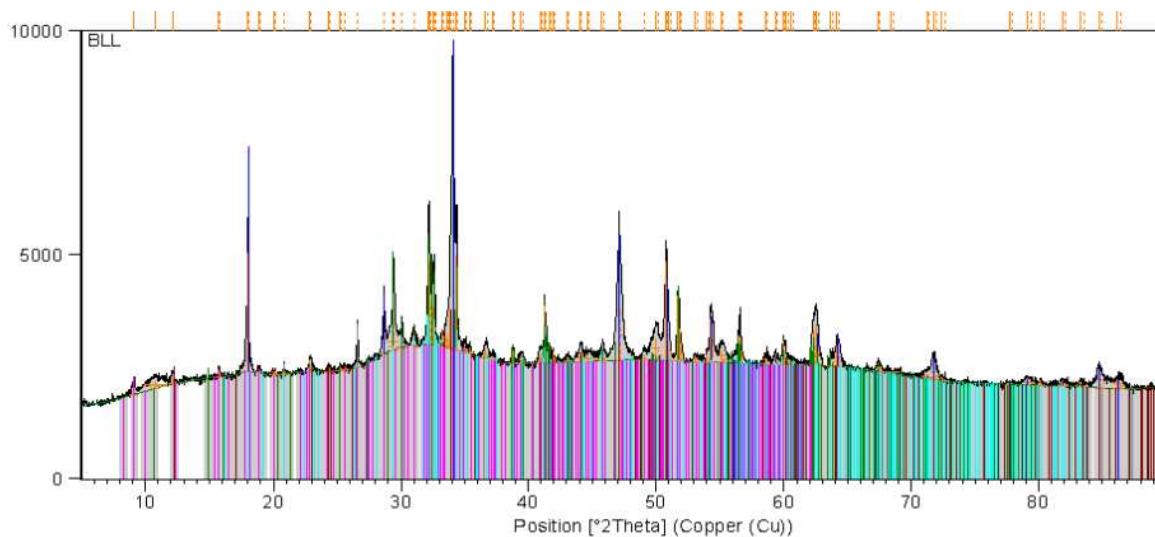
## 7 PRÍLOHY



Peak List
Ca (OH) <sub>2</sub> ; Calcium Hydroxide; Portlandite, syn; SQ: 36 [%]; Hexagonal; P-3m1
Ca <sub>3</sub> Si O <sub>5</sub> ; Calcium Silicon Oxide; Hatrurite, syn; SQ: 35 [%]; Monoclinic; Cm
Si O <sub>2</sub> ; Silicon Oxide; Quartz, syn; SQ: 2 [%]; Hexagonal; P3221
Ca <sub>2</sub> Si O <sub>4</sub> ; Calcium Silicate; Larnite, SQ: 22 [%]; Monoclinic; P21/n
Ca <sub>2</sub> (Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ); Calcium Iron Oxide; Brownmillerite, syn; SQ: 5 [%]; Orthorhombic; Pnma

### Obrázok 49

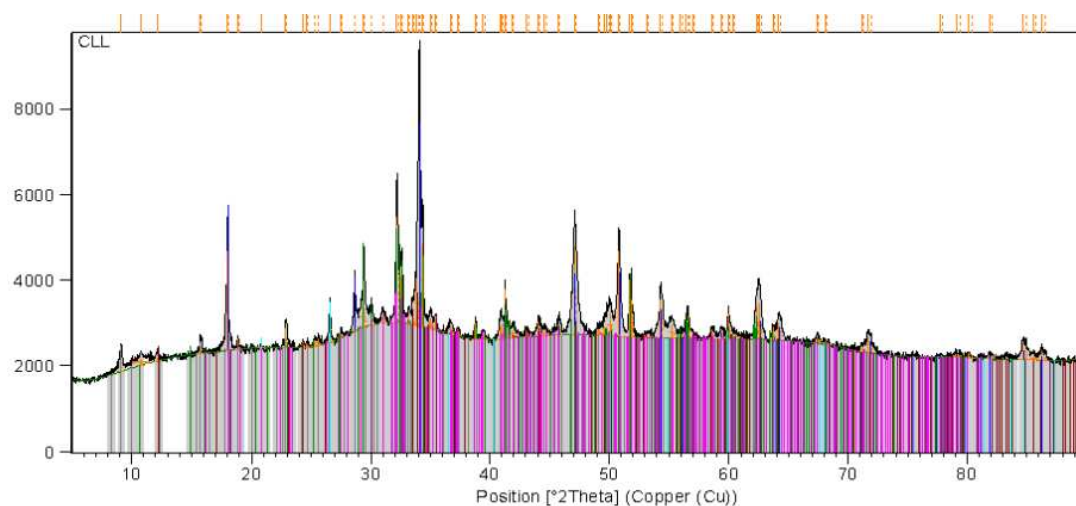
XRD záznam zmesi ALL



Peak List
Ca (OH) <sub>2</sub> ; Calcium Hydroxide; Portlandite, syn; SQ: 30 [%]; Hexagonal; P-3m1
Ca <sub>3</sub> Si O <sub>5</sub> ; Calcium Silicon Oxide; Hatrurite, syn; SQ: 40 [%]; Monoclinic; Cm
Si O <sub>2</sub> ; Silicon Oxide; Quartz; SQ: 5 [%]; Hexagonal; P3121
Ca <sub>2</sub> (Fe Al) O <sub>5</sub> ; Calcium Aluminum Iron Oxide; Brownmillerite, syn; Brownmillerite ferrian, syn; SQ: 6 [%]; Orthorhombic; Ibm2
Ca <sub>2</sub> (Si O <sub>4</sub> ); Calcium Silicate; Larnite, syn; SQ: 14 [%]; Monoclinic; P21/n
Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>26</sub> ; Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate; Ettringite, syn; SQ: 4 [%]; Hexagonal; P31c

### Obrázok 50

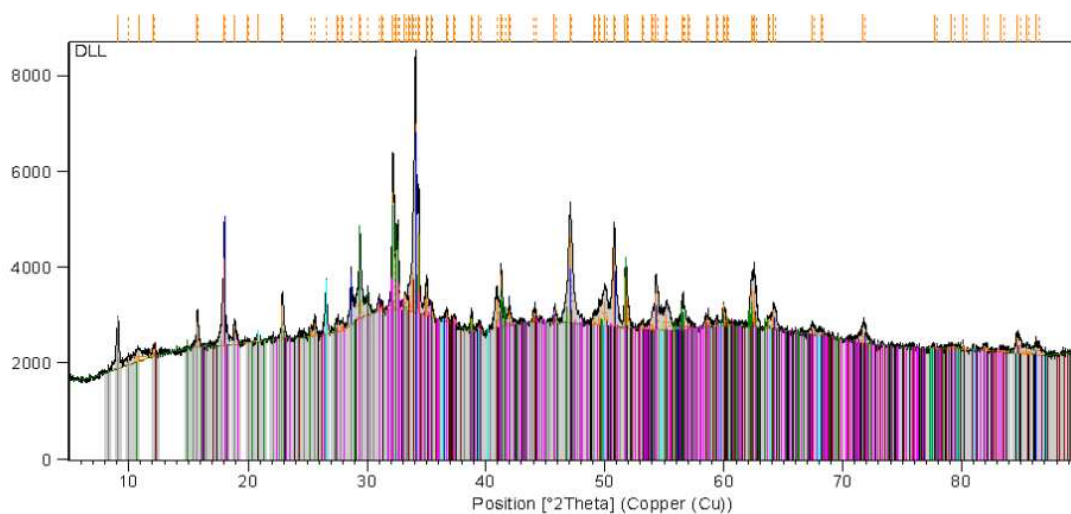
XRD záznam zmesi BLL



Peak List
Ca (OH) <sub>2</sub> ; Calcium Hydroxide; Portlandite, syn, SQ: 28 [%], Hexagonal, P-3m1
Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> ; Calcium Silicon Oxide; Hartite, syn, SQ: 38 [%], Monoclinic, Cm
Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>26</sub> ; Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate; Ettringite, syn, SQ: 6 [%], Hexagonal, P31c
Ca <sub>2</sub> Fe <sub>0.95</sub> Al <sub>0.95</sub> Mg <sub>0.05</sub> Si <sub>0.05</sub> O <sub>5</sub> ; Calcium Iron Aluminum Magnesium Silicon Oxide; Brownmillerite, syn, SQ: 6 [%], Orthorhombic, Ibm2
SiO <sub>2</sub> ; Silicon Oxide; Quartz low, syn, SQ: 4 [%], Hexagonal, P6322
Ca <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ); Calcium Silicate; Larnite, syn, SQ: 17 [%], Monoclinic, P21/n
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; Iron Oxide; Magnetite, syn, SQ: 1 [%], Cubic, Fd-3m

### Obrázok 51

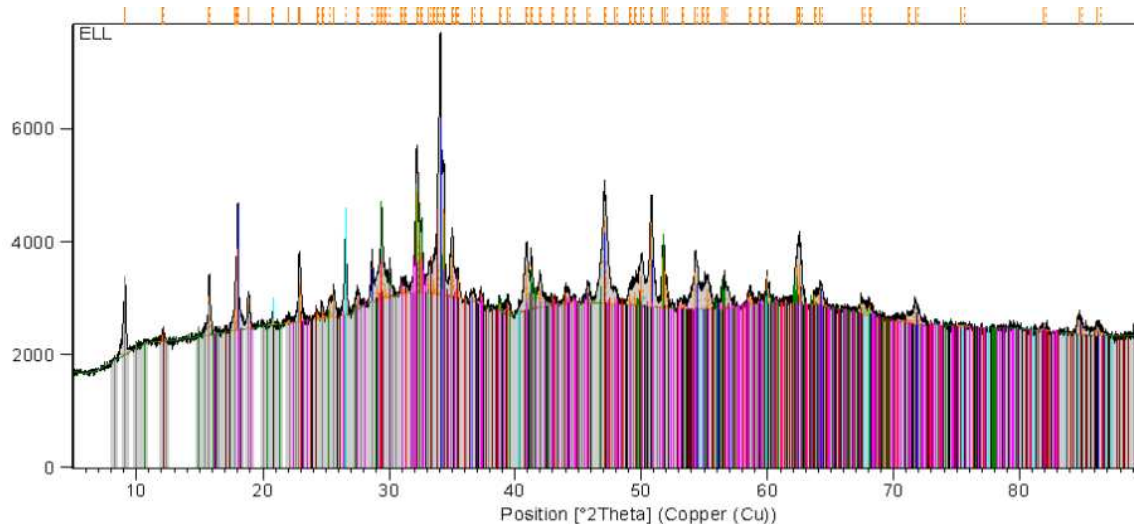
XRD záznam zmesi CLL



Peak List
Ca (OH) <sub>2</sub> ; Calcium Hydroxide; Portlandite, syn, SQ: 22 [%], Hexagonal, P-3m1
Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> ; Calcium Silicon Oxide; Hartite, syn, SQ: 38 [%], Monoclinic, Cm
Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>26</sub> ; Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate; Ettringite, syn, SQ: 11 [%], Hexagonal, P31c
Ca <sub>2</sub> Fe <sub>0.95</sub> Al <sub>0.95</sub> Mg <sub>0.05</sub> Si <sub>0.05</sub> O <sub>5</sub> ; Calcium Iron Aluminum Magnesium Silicon Oxide; Brownmillerite, syn, SQ: 5 [%], Orthorhombic, Ibm2
SiO <sub>2</sub> ; Silicon Oxide; SQ: 6 [%], Hexagonal, P3221
Ca <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ); Calcium Silicate; Larnite, syn, SQ: 15 [%], Monoclinic, P21/n
Fe <sub>2.897</sub> O <sub>4</sub> ; Iron Oxide; Magnetite; SQ: 1 [%], Cubic, Fd-3m
Ca <sub>2</sub> (Al(AlSi)O <sub>7</sub> ); Calcium Aluminum Silicate; Gehlenite, syn, SQ: 1 [%], Tetragonal, P-421m

### Obrázok 52

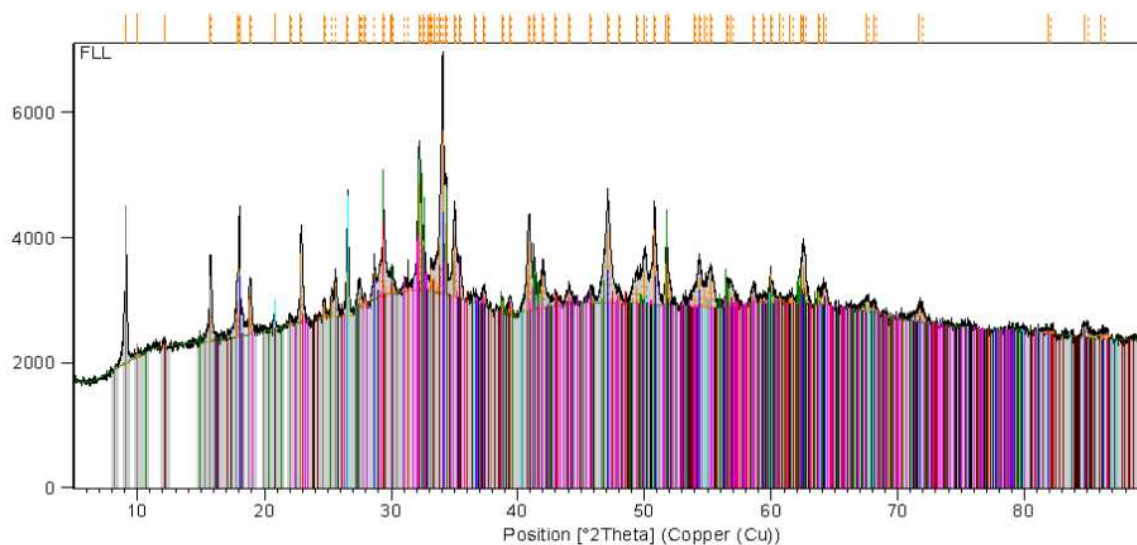
XRD záznam zmesi DLL



Peak List
Ca (OH) <sub>2</sub> ; Calcium Hydroxide; Portlandite, syn, SQ: 14 [%]; Hexagonal; P-3m1
Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; Calcium Silicon Oxide; Hatrinite, syn, SQ: 32 [%]; Monoclinic; Cm
Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>26</sub> ; Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate; Ettringite, syn, SQ: 13 [%]; Hexagonal; P31c
Ca <sub>2</sub> (Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ); Calcium Iron Oxide; Brownillerite, syn, SQ: 9 [%]; Orthorhombic; Pnma
SiO <sub>2</sub> ; Silicon Oxide; Quartz low, syn, SQ: 8 [%]; Hexagonal; P6222
Ca <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ); Calcium Silicate; Larnite, syn, SQ: 15 [%]; Monoclinic; P21/n
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; Iron Oxide; Magnetite, syn, SQ: 2 [%]; Cubic; Fd-3m
Ca <sub>2</sub> (Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> ); Calcium Aluminum Silicate; Gehlenite, syn, SQ: 2 [%]; Tetragonal; P-421m
CaCO <sub>3</sub> ; Calcium Carbonate; Calcite, syn, SQ: 6 [%]; Rhombohedral; R-3c

### Obrázok 53

XRD záznam zmesi ELL

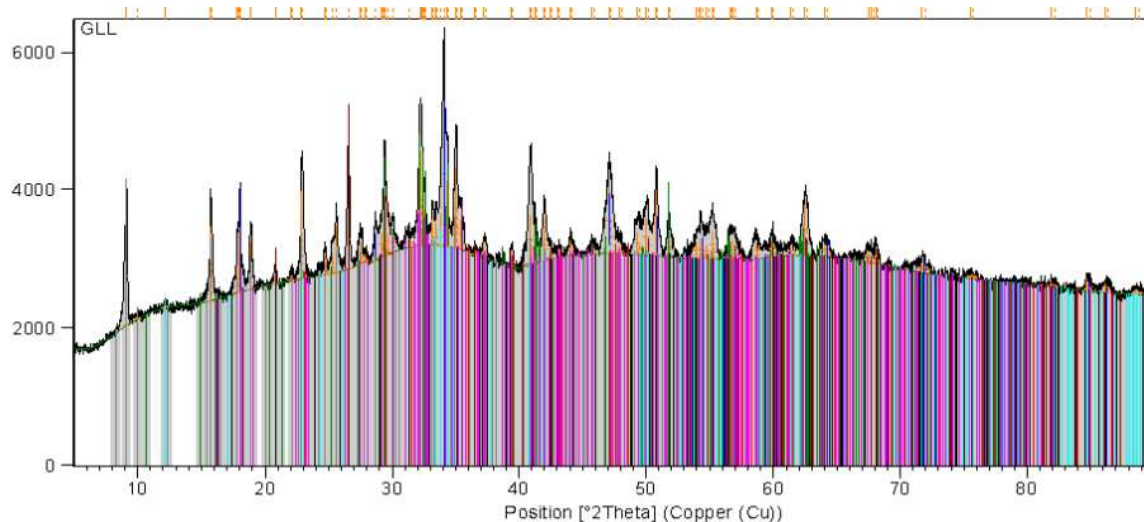


Peak List
Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; Calcium Silicon Oxide; Hatrinite, syn, SQ: 31 [%]; Monoclinic; Cm
Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>26</sub> ; Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate; Ettringite, syn, SQ: 20 [%]; Hexagonal; P31c
Ca <sub>2</sub> (Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ); Calcium Iron Oxide; Brownillerite, syn, SQ: 2 [%]; Orthorhombic; Pnma
SiO <sub>2</sub> ; Silicon Oxide; Quartz low, syn, SQ: 6 [%]; Hexagonal; P6222
Ca <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ); Calcium Silicate; Larnite, syn, SQ: 16 [%]; Monoclinic; P21/n
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; Iron Oxide; Magnetite; SQ: 2 [%]; Cubic; Fd-3m
Ca <sub>2</sub> (Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> ); Calcium Aluminum Silicate; Gehlenite, syn, Gehlenite; SQ: 3 [%]; Tetragonal; P-421m
CaCO <sub>3</sub> ; Calcium Carbonate; Calcite, syn, SQ: 8 [%]; Rhombohedral; R-3c
Ca(OH) <sub>2</sub> ; Calcium Hydroxide; Portlandite, syn, SQ: 12 [%]; Hexagonal; P-3m1

### Obrázok 54

XRD záznam zmesi FLL

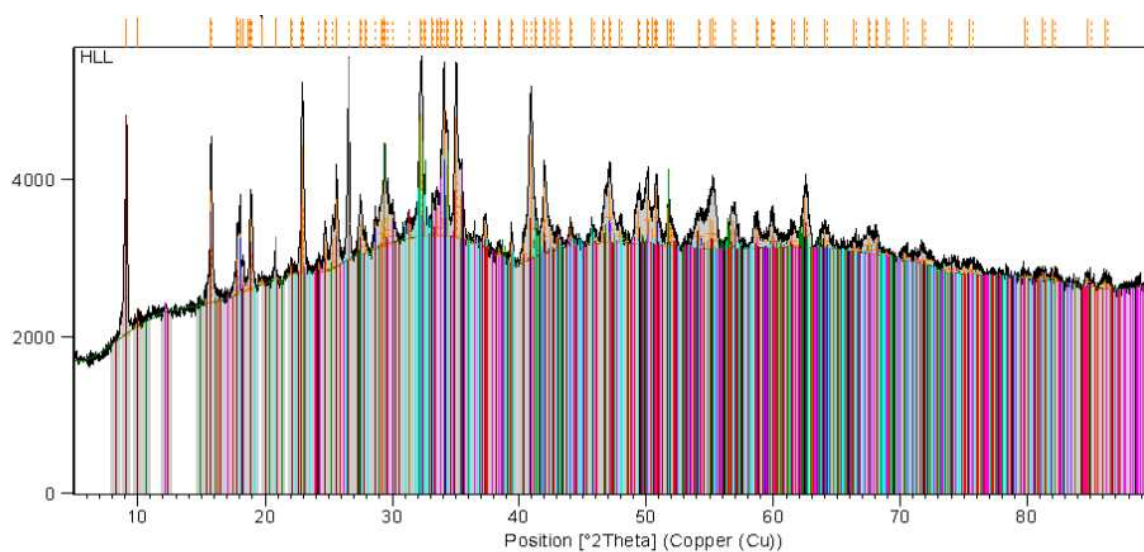




Phase	Chemical Formula	Phase Name	SQ (%)	Crystal System	Space Group
Ca (OH) <sub>2</sub>	Calcium Hydroxide	Portlandite, syn.	10	Hexagonal	P-3m1
Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Calcium Silicon Oxide	Hatrujita, syn.	29	Monoclinic	Cm
Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>26</sub>	Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate	Ettringite, syn.	22	Hexagonal	P31c
SiO <sub>2</sub>	Silicon Oxide	Quartz	14	Hexagonal	P3121
Ca <sub>2</sub> (Fe <sub>0.9</sub> Mg <sub>0.1</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Calcium Magnesium Aluminum Iron Oxide	Brownmillerite, syn.	2	Orthorhombic	Ibm2
Ca <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )	Calcium Silicate	Lamite, syn.	12	Monoclinic	P21/n
Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Iron Oxide	Magnetite	3	Cubic	Fd-3m
Ca <sub>2</sub> (Al <sub>2</sub> (AlSi)O <sub>7</sub> )	Calcium Aluminum Silicate	Gehlenite, syn.	2	Tetragonal	P-421m
CaCO <sub>3</sub>	Calcium Carbonate	Calcite, syn.	5	Rhombohedral	R-3c

**Obrázok 55**

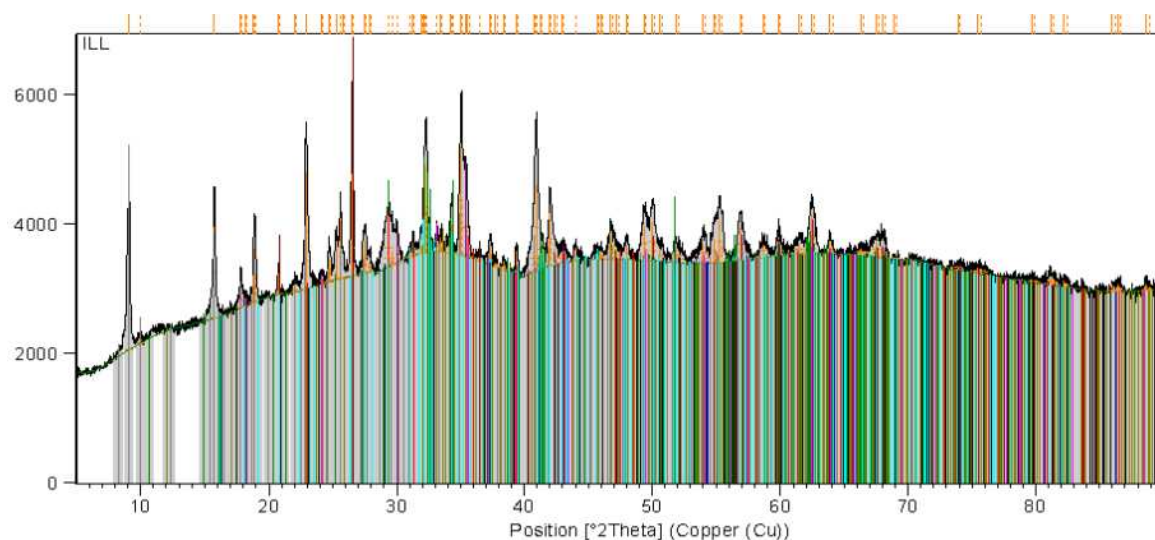
XRD záznam zmesi GLL



Phase	Chemical Formula	Phase Name	SQ (%)	Crystal System	Space Group
Ca (OH) <sub>2</sub>	Calcium Hydroxide	Portlandite, syn.	5	Hexagonal	P-3m1
Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Calcium Silicon Oxide	Hatrujita, syn.	24	Monoclinic	Cm
SiO <sub>2</sub>	Silicon Oxide	Quartz	13	Hexagonal	P3221
Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>26</sub>	Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate	Ettringite, syn.	26	Hexagonal	P31c
Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Calcium Silicate	Lamite, syn.	13	Monoclinic	P21/n
Ca <sub>2</sub> (Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Calcium Iron Oxide	Brownmillerite, syn.	4	Orthorhombic	Prma
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Iron Oxide	Magnetite	3	Cubic	Fd-3m
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Iron Oxide	Hematite	3	Rhombohedral	R-3c
Ca <sub>2</sub> (Al <sub>2</sub> (AlSi)O <sub>7</sub> )	Calcium Aluminum Silicate	Gehlenite, syn.	2	Tetragonal	P-421m
CaCO <sub>3</sub>	Calcium Carbonate	Calcite, syn.	6	Rhombohedral	R-3c

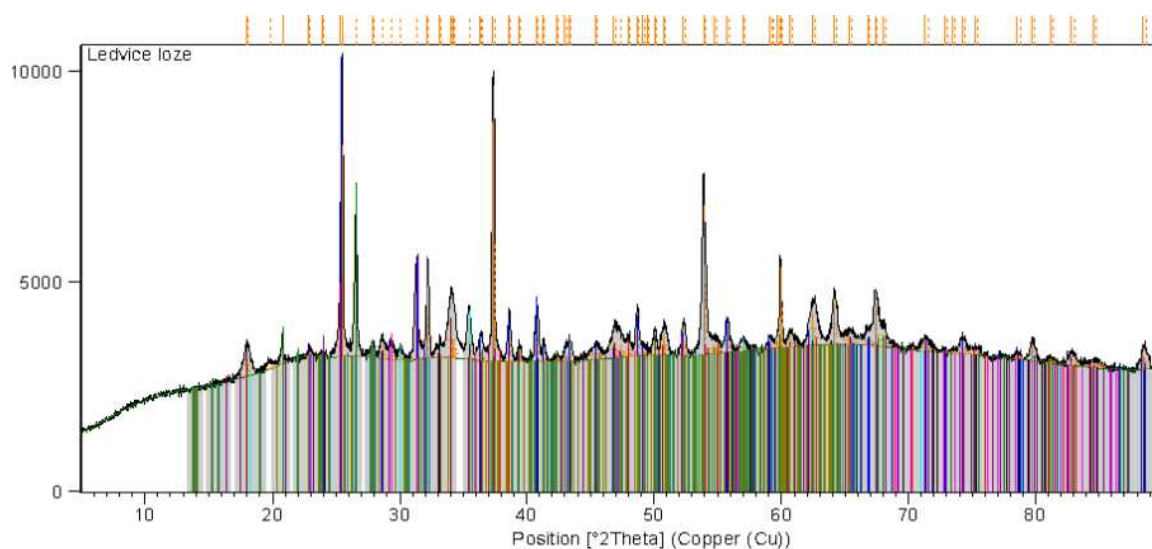
**Obrázok 56**

XRD záznam zmesi HLL



Phase Name	Formula	Weight %	Crystal System	Space Group
Ca(OH) <sub>2</sub> : Calcium Hydroxide, Portlandite, syn.	Ca(OH) <sub>2</sub>	1 [%]	Hexagonal	P-3m1
Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> : Calcium Silicon Oxide, Hatrinite, syn.	Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	25 [%]	Monoclinic	Cm
Ca <sub>6</sub> (Al <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>25</sub> ·7H <sub>2</sub> O: Calcium Aluminum Hydroxide Sulfate Hydrate, Ettringite, syn.	Ca <sub>6</sub> (Al <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>25</sub> ·7H <sub>2</sub> O	30 [%]	Hexagonal	P31c
SiO <sub>2</sub> : Silicon Oxide, Quartz low, syn.	SiO <sub>2</sub>	15 [%]	Hexagonal	P6222
Ca <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ): Calcium Silicate, Larnite, syn.	Ca <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	11 [%]	Monoclinic	P21/n
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : Iron Oxide, Hematite, syn.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 [%]	Rhombohedral	R-3c
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> : Iron Oxide, Magnetite, syn.	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5 [%]	Cubic	Fd-3m
Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ): Calcium Aluminum Silicate, Gehlenite, syn.	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	3 [%]	Tetragonal	P-421m
CaCO <sub>3</sub> : Calcium Carbonate, Calcite, syn.	CaCO <sub>3</sub>	6 [%]	Rhombohedral	R-3c
Ca <sub>2</sub> (Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ): Calcium Iron Oxide, Brownmillerite, syn.	Ca <sub>2</sub> (Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2 [%]	Orthorhombic	Prma

**Obrázok 57**  
XRD záznam zmesi ILL



Phase Name	Formula	Weight %	Crystal System	Space Group
Ca(SO <sub>4</sub> ): Calcium Sulfate, Anhydrite, syn.	Ca(SO <sub>4</sub> )	38 [%]	Orthorhombic	Amma
SiO <sub>2</sub> : Silicon Oxide, Quartz, syn.	SiO <sub>2</sub>	12 [%]	Hexagonal	P3121
CaO: Calcium Oxide, Lime, syn.	CaO	14 [%]	Cubic	Fm-3m
Ca(OH) <sub>2</sub> : Calcium Hydroxide, syn.	Ca(OH) <sub>2</sub>	3 [%]	Hexagonal	P-3m1
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> : Iron Oxide, Magnetite, syn.	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	2 [%]	Cubic	Fd-3m
CaCO <sub>3</sub> : Calcium Carbonate, Calcite, syn.	CaCO <sub>3</sub>	2 [%]	Rhombohedral	R-3c
Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )·8H <sub>2</sub> O: Calcium Aluminum Silicate Hydroxide, Gehlenite, syn.	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )·8H <sub>2</sub> O	12 [%]	Tetragonal	P-421m
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : Iron Oxide, Hematite, syn.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7 [%]	Rhombohedral	R-3c
Na <sub>10</sub> B <sub>8</sub> Si <sub>2</sub> Ca <sub>10</sub> Al <sub>12</sub> Si <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>48</sub> : Sodium Calcium Aluminum Silicate, Albite, calcian, syn.	Na <sub>10</sub> B <sub>8</sub> Si <sub>2</sub> Ca <sub>10</sub> Al <sub>12</sub> Si <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>48</sub>	7 [%]	Anorthic	C-1
Na <sub>10</sub> Al <sub>12</sub> Si <sub>2</sub> Ca <sub>10</sub> Al <sub>12</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>48</sub> : Sodium Calcium Aluminum Silicate, Anorthite, sodian, syn.	Na <sub>10</sub> Al <sub>12</sub> Si <sub>2</sub> Ca <sub>10</sub> Al <sub>12</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>48</sub>	6 [%]	Anorthic	C1
TiO <sub>2</sub> : Titanium Oxide, Anatase, syn.	TiO <sub>2</sub>	3 [%]	Tetragonal	I41/amd

**Obrázok 58**  
XRD záznam fluidného lôžkového popolčeka z elektrárne Ledvice