VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

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

STUDIUM MOŽNOSTÍ AKTIVACE EL. POPÍLKŮ JAKO AKTIVNÍ PŘÍMĚSI DO BETONU
STUDY OF POSSIBILITIES OF ACTIVATION OF POWER PLANT FLY ASH AS AN ACTIVE INGREDIENT IN CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Jiří Máša
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jiří Máša
Název	Studium možností aktivace el. popílků jako aktivní příměsi do betonu
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Databáze internetových vědeckých časopisů Web of science, Scopus a další.
Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých sympozií.
Diplomové a disertační práce publikované na FAST VUT v Brně.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Využívání elektrárenských popílků jako aktivní příměsi do betonů se datuje cca 50 roků. Ovšem, využívají se pouze vysokoteplotní elektrárenské popílky z vysokoteplotního spalování ve stavu, jak jsou získávány z čištění spalin v různých typech odlučovačů. Jejich aktivita je pak dána jejich chemickým složením a granulometrií a morfologií zrn jak vznikají v procesu spalování a typem použitých filtrů. Takto jsou popílky dodávány výrobcům betonů. Takto není jejich vazný potenciál plně využit a možná redukce drahého a environmentálně nevhodného cementu je snížena. Existuje několik možností jak zvýšit vazný potenciál hodnocený tzv. indexem aktivity el. popílků. Jednou z nich je zvýšení jejich měrného povrchu mechanickým domíláním. Takto se dosáhne jednak zjemnění granulometrie a jednak i částečné narušení zrn a zrychlený přístup vody k jejich aktivní složce.
Diplomovou práci rozdělte na část teoretickou, kde shrňte současné poznatky z aplikací mechanického domílání el. popílků, způsobu mletí, optimalizaci jejich granulometrie a hodnot měrného povrchu, případně nákladů na mletí v různých typech mlýnů.
V praktické části vyberte min. 10 typů el. popílků z produkce českých elektráren. Stanovte jejich granulometrii, měrný povrch a indexy aktivity, ověřte jejich vodonáročnost a vliv na reologii v čase do 90 minut od přidání vody. Srovnejte jejich parametry a výsledné indexy účinnosti. Z nejlépe hodnocených vyberte nejzajímavější, které dále mechanicky namelte na různé hodnoty měrných povrchů. Dále opět stanovte jejich indexy účinnosti. Udělejte porovnání pevností po 7 a 28 dnech na cementových maltách o stejných konzistencích.
Rozsah práce min. 80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:
1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Globální produkce betonu stále stoupá, což přináší určitou ekologickou zátěž. Určitým řešením je používání druhotných surovin, které je ve stavebním průmyslu již dlouholetou praxí. Jednou z nejvíce rozšířených druhotných surovin je právě elektrárenský popílek. Nicméně v posledních letech směřují trendy k maximalizaci jejich užitných vlastností. Snahou této práce bylo studium možností aktivace elektrárenských popílků jako aktivní příměsi do betonu. Diplomová práce je rozdělena na dvě části, na teoretickou a praktickou část. Teoretická část detailně popisuje možnosti aktivace elektrárenských popílků pro použití jako aktivní příměsi do betonu. Praktická část práce je zaměřena na mechanickou aktivaci, kde jsou ověřeny poznatky z teoretické části na různých popílcích.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrárenský popílek, aktivace popílku, mletí, cement, příměs, index účinnosti

ABSTRACT

Global concrete production is increasing, which brings some environmental burden. A certain solution is the use of secondary raw materials, which has been a long-standing practice in the construction industry. One of the most widespread secondary raw materials is power fly ash. However, in recent years trends have been directed towards maximizing their utility properties. The aim of this work was to study the possibilities of activation of power plant fly ash as an active admixture in concrete. The thesis is divided into two parts, the theoretical and the practical part. The theoretical part describes in detail the possibilities of power plant fly ash activation for use as an active admixture in concrete. The practical part of the thesis is focused on mechanical activation, where the knowledge of the theoretical part is verified on various fly ash.

KEYWORDS

fly ash, activation of fly ash, grinding, cement, admixture, efficiency factor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jiří Máša *Studium možností aktivace el. popílků jako aktivní příměsi do betonu.* Brno, 2020. 98 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Studium možností aktivace el. popílků jako aktivní příměsi do betonu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 9. 1. 2020

Bc. Jiří Máša

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Studium možností aktivace el. popílků jako aktivní příměsi do betonu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9. 1. 2020

Bc. Jiří Máša

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady. Dále mé poděkování patří Ing. Martinu Ťažkému za odborné konzultace a pomoc při zpracování této diplomové práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval všem pracovníkům výzkumného Centra AdMaS za jejich čas a pomoc při vypracování praktické části práce.

Obsah

ÚVOD ..... **- 11 -**

CÍL PRÁCE ..... **- 12 -**

I. TEORETICKÁ ČÁST ..... **- 13 -**

1 GLOBÁLNÍ PRODUKCE POPÍLKU ..... **- 13 -**

1.1 PRODUKCE POPÍLKU V ČR ..... - 14 -

2 POPÍLEK ..... **- 15 -**

2.1 VYSOKOTEPLOTNÍ POPÍLEK ..... - 15 -

2.2 FLUIDNÍ POPÍLEK ..... - 16 -

3 VLASTNOSTI POPÍLKŮ ..... **- 17 -**

3.1 HLAVNÍ CHEMICKÉ SLOŽKY ..... - 17 -

3.2 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ..... - 19 -

3.3 STRUKTURA POPÍLKU ..... - 20 -

3.4 NORMATIVNÍ POŽADAVKY NA POPÍLEK ..... - 21 -

4 DENITRIFIKACE SPALIN ..... **- 22 -**

4.1 TECHNOLOGIE SNCR ..... - 22 -

4.2 TECHNOLOGIE SCR ..... - 24 -

4.3 KVALITA POPÍLKŮ PO SNCR ..... - 24 -

4.3.1 Dopad na morfologii zrn ..... *- 24 -*

4.3.2 Dopad na reologii cementové pasty ..... *- 25 -*

4.3.3 Dopad na index účinnosti ..... *- 26 -*

5 ZPŮSOBY AKTIVACE POPÍLKŮ ..... **- 26 -**

5.1 MECHANICKÁ AKTIVACE ..... - 27 -

5.1.1 Mletí ..... *- 27 -*

5.1.2 Separace, prosévání ..... *- 31 -*

5.1.3 Velikost částic ..... *- 32 -*

5.1.4 Vliv mechanické aktivace na výsledný cementový kompozit ..... *- 33 -*

5.2 CHEMICKÁ AKTIVACE ..... - 35 -

5.3 TERMÁLNÍ AKTIVACE ..... - 37 -

5.4 KOMBINACE ..... - 38 -

5.4.1 Mechanicko-chemická aktivace (MCA) ..... *- 38 -*

6 POROVNÁNÍ RŮZNÝCH AKTIVACÍ POPÍLKŮ S OHLEDEM NA VÝSLEDNOU PEVNOST ..... - 39 -

II. PRAKTICKÁ ČÁST ..... - 42 -

7 METODIKA PRÁCE ..... - 42 -

8 I. ETAPA – ANALÝZA VSTUPNÍCH SUROVIN ..... - 46 -

8.1 POPÍLEK ..... - 46 -

8.1.1 Výsledky analýz ..... - 46 -

8.1.2 Úprava popílků ..... - 47 -

8.1.2.1 Mísení ..... - 48 -

8.1.2.2 Mletí ..... - 49 -

8.2 CEMENT ..... - 51 -

8.3 KAMENIVO ..... - 51 -

8.4 VODA ..... - 51 -

9 II. ETAPA – MECHANICKÉ PARAMETRY POPÍLKŮ ..... - 51 -

9.1 PROVÁDĚNÉ ZKOUŠKY A POSTUPY ..... - 51 -

9.1.1 Výroba malty ..... - 51 -

9.1.2 Stanovení konzistence čerstvé malty ..... - 52 -

9.1.3 Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu ..... - 53 -

9.1.4 Pevnost v tahu za ohybu ..... - 53 -

9.1.5 Pevnost v tlaku ..... - 53 -

9.1.6 Index účinnosti ..... - 54 -

9.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK ..... - 54 -

9.2.1 Stanovení vodonáročnosti (stejný vodní součinitel dle ČSN EN 450–1) ... - 54 -

9.2.1.1 Konzistence ..... - 54 -

9.2.1.2 Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost ..... - 58 -

9.2.1.3 Pevnost v tlaku ..... - 60 -

9.2.1.4 Index účinnosti ..... - 64 -

9.2.1.5 Účinnost mletí ..... - 65 -

9.2.1.6 Účinnost mísení ..... - 67 -

9.2.2 Výroba na stejnou konzistenci ..... - 68 -

9.2.2.1 Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost ..... - 69 -

9.2.2.2 Pevnost v tlaku ..... - 71 -

9.2.2.3 Index účinnosti ..... - 74 -

9.2.2.4 Účinnost mletí ..... - 76 -

9.2.2.5 Účinnost mísení ..... - 77 -

9.3 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ ..... - 79 -

10 III. ETAPA – VLIV MLETÍ POPÍLKU NA VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI ..... - 81 -

10.1 STANOVENÍ REOLOGIE VYBRANÝCH POPÍLKŮ PŘED A PO ÚPRAVĚ NA ROTAČNÍM VISKOZIMETRU ..... - 81 -

10.2 MORFOLOGIE ZRN VYBRANÝCH POPÍLKŮ PŘED A PO ÚPRAVĚ ..... - 85 -

ZÁVĚR ..... - 87 -

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY ..... - 90 -

SEZNAM OBRÁZKŮ ..... - 93 -

SEZNAM TABULEK ..... - 95 -

SEZNAM GRAFŮ ..... - 97 -

Úvod

V současné době je cementářský průmysl největším producentem oxidu uhličitého (dále „CO_2“). Roční produkce CO_2 z výroby cementu představuje zhruba 8 % celosvětových emisí CO_2. Hlavními zdroji oxidu uhličitého při výrobě cementu je spalování fosilních paliv a kalcinace vápence. Aby se tento dopad snížil, cementárny pracují na alternativních řešeních, například na výrobě cementu s přidáním přísad jako je popílek, který je známý pro snížení emisí CO_2 a minimalizaci výrobních nákladů. [1]

Z důvodů ekologického a udržitelného rozvoje je žádoucí recyklovat. V současné době se relativně malé množství tohoto materiálu recykluje, zatímco zbytek se obvykle ukládá na skládku. Negativní dopad, který má nepřetržitá likvidace obrovského množství popílku, na životní prostředí, je dobře znám a důkladně diskutován. Hlavní environmentální problém pramení z možného vyluhování kovů a organických sloučenin a jejich migrace do podzemních nebo blízkých povrchových vod. Kromě toho může popílek také ovlivňovat lidské zdraví přímým vdechováním vzdušného nebo usazeného popela.

Vlastnosti popílku pro použití závisí na procesu těžby spalovaného uhlí, procesu spalování a separace. Všechny tyto faktory mohou ovlivnit chemické složení, tvarové vlastnosti a jemnost popílku. Mnoho studií ukázalo, že hlavní vliv na výsledné vlastnosti cementového kompozitu s popílkem má jemnost popílku.

Obecně lze říci, že použití popílku ve výrobě cementových kompozitů přináší ekonomické výhody, protože je to obvykle levný materiál a může se použít k nahrazení materiálů s vyššími náklady. Navíc, v některých případech jeho použití v cementových kompozitech představuje technologické výhody, jako je pucolánová aktivita. Používání popílku jako příměsi do betonu je poměrně staré, nicméně tento komponent dnes nabízí mnoho nových možností. Mechanická aktivace je jedním z nich. Jako mechanická aktivace je známo třídění nebo mletí popílku. Aktivace popílku tříděním přináší některé nevýhody, protože nevyužívá veškerou produkci. Mnohem účinnější se jeví možnost mletí popílku. Tato praxe také přichází do České republiky a předkládaná práce shrnuje dosavadní poznatky a výsledky z prvních testů.

Cíl práce

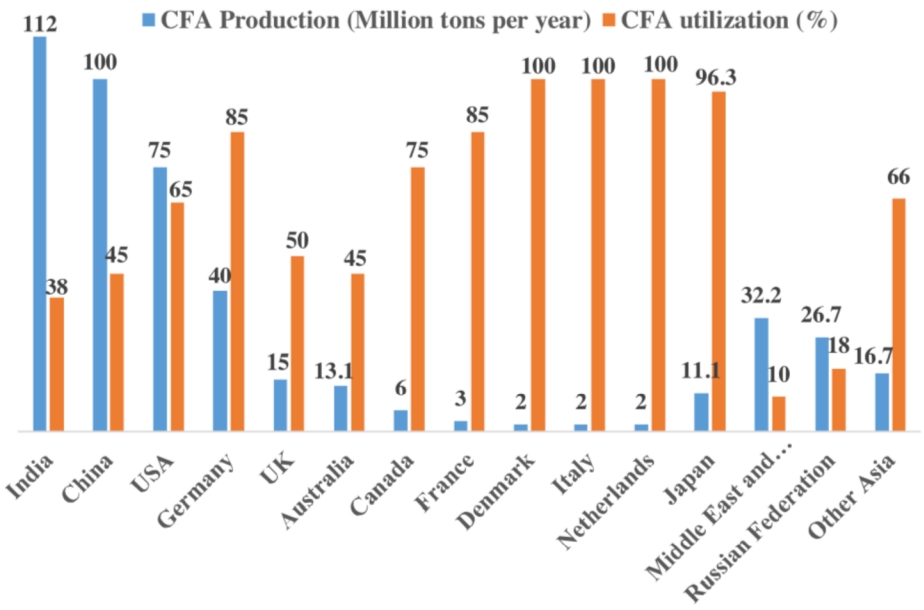
Diplomová práce je zaměřena na modifikaci elektrárenských popílků za účelem zvýšení vazného potenciálu a následného použití jako aktivní příměsi do betonu. Hlavním úkolem v teoretické části této práce je shrnout dosavadní poznatky z aplikací mechanicky aktivovaného elektrárenského popílku. Popsat základní způsoby mletí, optimalizaci jejich granulometrie a hodnoty měrného povrchu, případně ekonomicky zhodnotit náklady na mletí v různých typech mlýnů. Dále je teoretická část obohacena o způsoby denitrifikace spalin, která souvisí s danou problematikou, a další možnosti aktivace elektrárenského popílku.

V praktické části je úkolem vybrat několik typů popílků z různých produkcí. Na těchto popílcích stanovit základní parametry (chemické složení, měrný povrch, měrnou hmotnost, jemnost, ztrátu žíháním) a následně zhodnotit jejich reaktivitu pomocí indexu účinnosti v různých stádiím zrání. V neposlední řadě zhodnotit vliv mechanicky aktivovaného popílku na morfologii zrn a reologii v čase. Poté vybrané popílky domlet či smíchat na určitý měrný povrch nebo jemnost. Na těchto následně stanovit opět indexy účinnosti, morfologii zrn a reologii v čase. V poslední fázi ověřit indexy účinnosti vybraných, především hrubých popílků na cementových maltách o stejné konzistenci. Tyto hodnoty poté vyhodnotit a srovnat s vlastnostmi referenčních vzorků.

I. Teoretická část

1 Globální produkce popílku

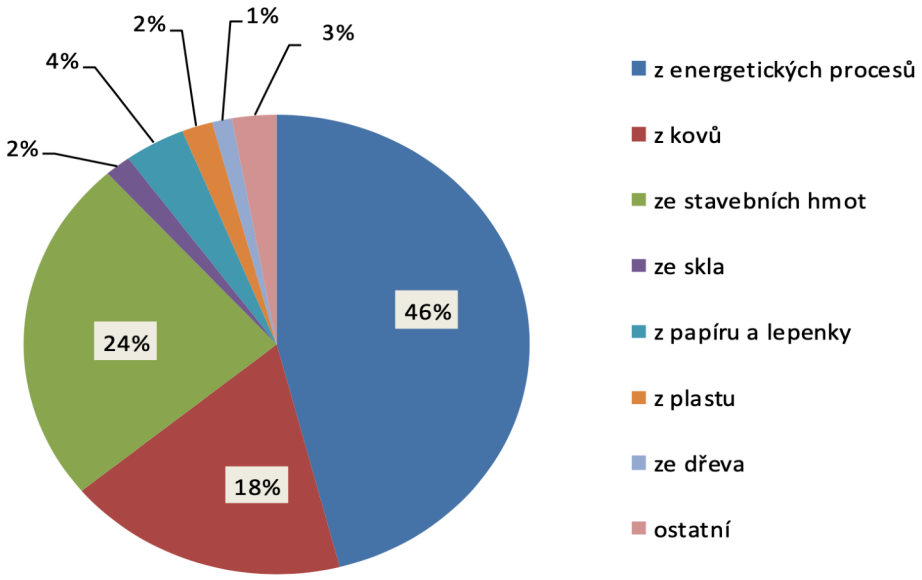
Uhlí se používá jako jeden z hlavních zdrojů energie na celém světě. V roce 2015 se spalováním uhlí po celém světě vyprodukovalo 29 % energie. I přes zvýšení využívání obnovitelných zdrojů se očekává, že do roku 2035 bude podíl uhlí stále 24 %. Předpokládá se, že do roku 2035 vzroste celosvětová spotřeba energie o 30 %, tím se zvýší skutečné množství spotřebovaného uhlí z 3,8 miliard tun na 4,0 miliardy tun. V roce 2015 byla Čína největším spotřebitelem uhlí na světě (50 % světové poptávky) a očekává se, že tomu tak zůstane, což představuje 47 % světové poptávky po uhlí v roce 2035. Očekává se, že spotřeba uhlí v Indii se v letech 2015 až 2035 více než zdvojnásobí, aby zásobovala svůj energetický sektor, i když poptávka Spojených států klesne o polovinu. Obrázek 1 znázorňuje globální produkci uhlí a využití popílku. Využití popílku je pouze ¼ z celkové produkce. Hlavními výrobci jsou Indie a Čína, mají méně než 50% míru využití, zatímco Dánsko, Itálie a Nizozemsko mají 100% míru využití popílku. Opětovné použití popílku může snížit objemy a náklady na likvidaci, a také nahradit neobnovitelné nebo drahé zdroje. [2]



Obrázek 1: Globální produkce a využití popílku z uhlí [2]

1.1 Produkce popílku v ČR

V roce 2018 byla zjištěna produkce druhotných surovin ve výši 22,2 mil. tun. Oproti minulému roku se množství vyprodukovaných druhotných surovin zvýšilo o 2,2 %. Téměř polovina z celkové produkce druhotných surovin připadla na vedlejší energetické produkty (popílky, struska, škvára). Jejich množství činilo v roce 2018 10,2 mil. tun. Významnější nárůst produkce druhotných surovin byl zaznamenán u surovin pocházejících ze stavebních hmot. Jejich produkce činila 5,4 mil. tun, proti předchozímu roku se zvýšila o 12,8 %. Třetí významný tok v této oblasti představují druhotné suroviny z kovů, jejich produkce v absolutním vyjádření dosáhla 4 mil. tun (nárůst oproti roku 2017 o 1,9 %). Mírné zvýšení vyprodukovaných druhotných surovin bylo zaznamenáno i u ostatních komodit. Celkový přehled druhotných surovin dle jednotlivých komodit zobrazuje Obrázek 2 [3]



Obrázek 2: Produkce surovin v roce 2018 [3]

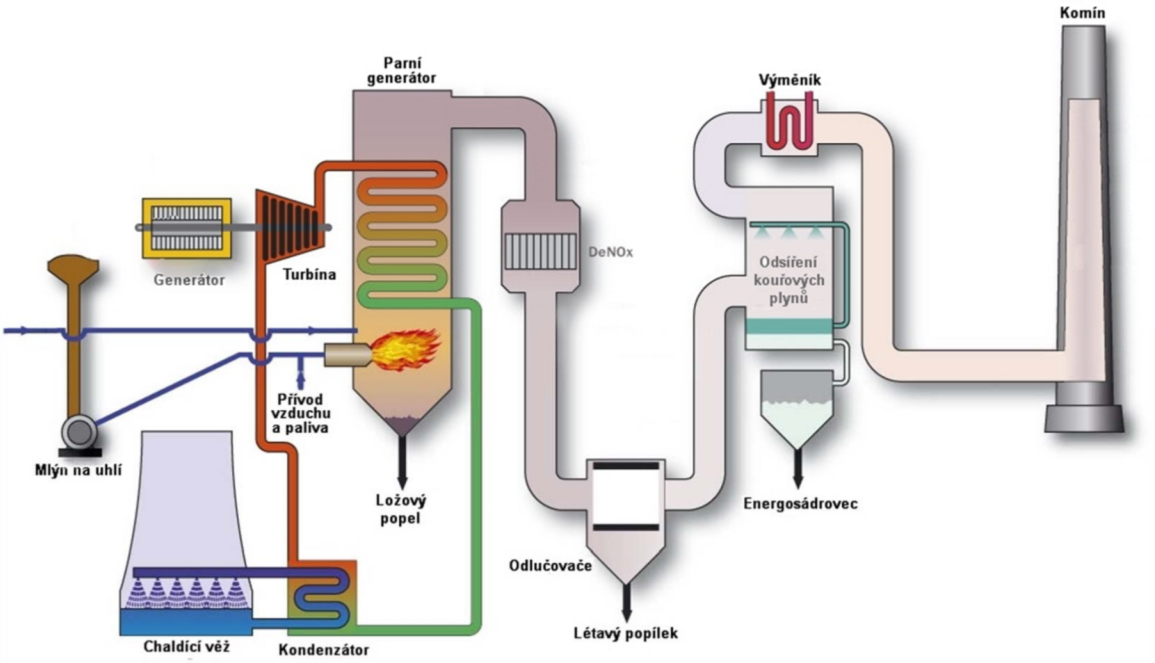
2 Popílek

Popílek se vytváří jako průmyslový odpadový materiál při procesu spalování uhlí v tepelných elektrárnách. Jedná se o tuhý, nerostný zbytek vzniklý po spalování práškového černého či hnědého uhlí. Získává se z kouřových plynů zachycovaných v odlučovačích nebo jako ložový. Podle způsobu spalování dělíme popílky na klasické vzniklé při vysokoteplotní spalování a popílky fluidní. U popílků klasických i fluidních se projevují kolísavé vlastnosti, zejména chemického složení, měrné hmotnosti a ostatních parametrů. Rozdíly jsou způsobeny nestabilitou spalovacího procesu, variabilitou vlastností vstupních komponent (uhlí, odsiřovací činidlo, …) a procesu separace. Popílek z černého uhlí má menší variabilitu vlastností a je tedy vhodnější jako příměs do betonu než popílek z hnědého uhlí. Bohužel v ČR je 80 % popílků z hnědého uhlí. [4] [5]

Popílek má pucolánové vlastnosti a obsahuje typické cementové minerály, jako jsou křemičitany, křemen, hlinitokřemičitany a vápno. Proto má potenciál být použit po vhodných úpravách ve stavebnictví. [6]

2.1 Vysokoteplotní popílek

Tento klasický způsob spalování využívá teplot přibližně 1400–1600 °C. Spalovací proces, při kterém vzniká vysokoteplotní popílek je názorně zobrazen níže na Obrázku 3. Vysokoteplotní popílek je potom možno rozdělit na úletový, který tvoří až 80 % z produkce a popílek ložový. Oba druhy popílku vznikají při stejném spalovacím procesu, nicméně výsledné chemické složení popílků je poměrně odlišné. V současné době je úletový popílek běžnou příměsí do betonů. Problém nastává při zpracování právě ložového popílku, který slouží pouze pro rekultivaci krajiny případně pro zemní práce. Ložový popílek je možno použít na obdobné účely jako popílek úletový, nicméně je třeba provést tzv. aktivaci popílku. Možnosti aktivace těchto popílků jsou detailně popsány v následujících kapitolách.



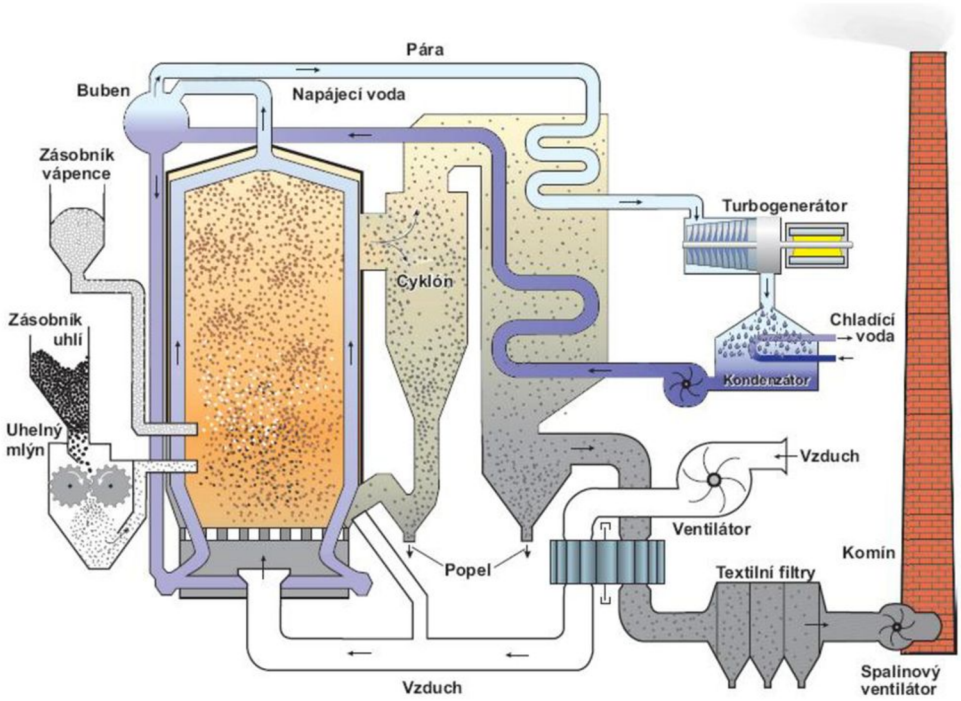
Obrázek 3: Vysokoteplotní způsob spalování [7]

2.2 Fluidní popílek

Technologie fluidního spalování je jedna z nejmodernějších metod spalování uhlí. Rozdíl oproti vysokoteplotnímu je zapříčiněn zejména způsobem spalování. Fluidní popílek vzniká při spalování drceného uhlí společně s vápencem či dolomitem v cirkulující vrstvě při teplotě kolem 850 °C (suchý proces odsiřování spalin). Tato poměrně nízká teplota má za následek vytvoření jemnozrnných krystalických minerálů. Kromě spalování organické části uhlí probíhá v popílku také rozklad uhličitanu vápenatého (dále „$CaCO_3$“) na oxid vápenatý (dále „CaO“). Oxid vápenatý reaguje s oxidem siřičitým (dále „SO_2“), který je obsažen ve spalinách, a to vede ke vzniku síranu vápenatého (dále „$CaSO_4$“). Rovněž dochází k částečnému slinování nehořlavých částí uhlí. [8]

Fluidní popílek se používá v omezeném rozsahu jako stabilizační příměs do půdy. Vytvoření ettringitu náchylného k expanzi během hydratačního procesu je hlavním důvodem omezení aplikace popílku. Tato expanzní reakce brání jejímu použití jako přísady do cementu nebo betonu. [8]

Dle ČSN EN 450-1 fluidní popílek nesplňuje základní definici o charakteristice vzniku popílku. [9] Z tohoto důvodu dle ČSN EN 206+A1 není možno jeho použití do betonu. Nicméně v zahraniční literatuře se již nyní objevují studie, které se snaží o zařazení těchto popílků při výrobě cementových kompozitů.



Obrázek 4: Fluidní způsob spalování [7]

3 Vlastnosti popílků

3.1 Hlavní chemické složky

Vzhledem k tomu, že v popílku je rozpoznáno 316 jednotlivých minerálů a 188 minerálních skupin, je to z hlediska charakteristik jeden z nejsložitějších materiálů. Popílek zahrnuje značné množství oxidu křemičitého (dále „SiO_2“), oxidu hlinitého (dále „Al_2O_3“) a oxidu vápenatého. V závislosti na hodnotě pH a poměru vápník ku síra jsou popílky klasifikovány jako kyselý popílek (pH 1,2 až 7), mírně alkalický popílek (pH 8 až 9) a silně alkalický popel (pH 11 až 13).

Popílek lze rozdělit podle druhu uhlí, ze kterého byl popílek odvozen. V zásadě existují čtyři druhy uhlí:

- antracit (90–95 % uhlíku (dále „C“))
- bituminózní – černé uhlí (80–90 % C)
- sub-bituminózní – hnědé uhlí (70 % C)
- lignin (60 % C)

Čím déle trval proces zuhelňování, tím větší je zastoupení uhlíku v něm. Kvalita uhlí závisí na obsahu hořlaviny, popeloviny a vody. [2], [10]

Fyzikální a chemické vlastnosti popílku závisí nejen na druhu uhlí použitého v procesu spalování, ale také na technikách používaných ke spalování uhlí. Konkrétně vlastnosti popílku závisí na:

- konfiguraci kotle
- stavu spalování a teplotě kotle
- velikosti částic uhlí
- zařízení na čištění plynu. [2]

Popílek je celosvětově klasifikován do dvou chemických typů pro své průmyslové aplikace, zejména v cementářském průmyslu, jmenovitě třídy C (vápenaté) a třídy F (křemičité). Podle normy Americké společnosti pro zkušební materiály ASTM C618, popílek obsahující více než 70 % hm. SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 jsou definovány jako třída F, zatímco popílek s obsahem SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 mezi 50 a 70 % hm. % jsou definovány jako třída C. Jiné chemické a fyzikální požadavky na třídy C a F v klasifikaci ASTM zahrnují obsah SO_3 (5 %), vlhkost (3 %), Na_2O (1,5 %), ztráta žíháním (6 % až 12 % pro třídu F na základě výkonu). [2]

Kromě popílků třídy F a C definuje ASTM C618 třetí třídu minerálních příměsí třídu N. Jsou to surové nebo přírodní pucolány, jako jsou křemeliny, břidlice, sopečný popel a různé další materiály, které vyžadují kalcinaci k vyvolání pucolánových vlastností. [2]

Dle ASTM C618 má popílek třídy C typicky obsah CaO vyšší než popílek třídy F. Popílek třídy C obvykle obsahuje více než 15 % CaO a popílek třídy F obvykle obsahuje méně než 5 % CaO. Obecně se popílek třídy C s vysokým obsahem vápníku vyrábí spalováním hnědého uhlí, zatímco spalování černého uhlí typicky produkuje popílek třídy F. Popílky mají pucolánové vlastnosti, což znamená, že obsahuje sloučeniny oxidu křemičitého, které reagují s hydroxidem vápenatým za vzniku sloučenin, které již mají cementové vlastnosti. Jelikož je množství CaO ve třídě popílku F nízké, je nutné pro vytvoření cementových minerálů přidání aktivátoru. Obsah alkalických kovů a síranů je obecně vyšší v popílcích třídy C. [2]

Tabulka 1: Rozsah oxidů přítomných v popílcích třídy C a F [11]

Element oxides	Class C	Class F
	Percentage	
CaO	15.1–54.8	0.50–14.0
SiO_2	11.8–46.4	37.0–62.1
Al_2O_3	2.6–20.5	16.6–35.6
Fe_2O_3	1.4–15.6	2.6–21.2
MgO	0.1–6.7	0.3–5.2
K_2O	0.3–9.3	0.1–4.1
Na_2O	0.2–2.8	0.1–3.6
SO_3	1.4–12.9	0.02–4.7
P_2O_5	0.2–0.4	0.1–1.7
TiO_2	0.6–1.0	0.5–2.6
MnO	0.03–0.2	0.03–0.1
Loss on Ignition (LOI) (%)	0.3–11.7	0.3–32.8

Dále je popílky možno rozdělit dle používané legislativy ČSN EN 450–1 do několika kategorií. Dělení popílku dle ztráty žíháním a jemnosti je možno pozorovat v Tabulce 3 v kapitolách níže. Další možností je dělení dle chemického složení, které se provádí na základě obsahu aktivního oxidu vápenatého. Na základě tohoto kritéria je potom možno popílky rozdělit do dvou kategorií na popílek vápenatý (W) a popílek křemičitý (V). Křemičité popílky vznikají obvykle při spalování kvalitnějšího černého uhlí a obsah volného CaO musí být do 10 %. Pokud je obsah volného oxidu vápenatého nad 10 % potom se jedná o vápenatý popílek, který vzniká při spalování méně kvalitního uhlí. [4]

3.2 Fyzikální vlastnosti

Příznivé vlastnosti popílku v čerstvém betonu jsou určovány v podstatě tvarem zrn a granulometrickým složením. Popílek se skládá z jemných práškovitých částic převážně kulovitého tvaru, buď pevných nebo dutých (cenosféry). Téměř dokonale zakulacený povrch mají popílky vzniklé při spalování černého uhlí. Naopak při spalování hnědého uhlí nemusí vždy vzniklé částice připomínat tvar ideální koule. Velikost zrn řádově odpovídá velikosti zrn cementu, nicméně zrnitost popílků je závislá na použitých odlučovačích. Z mechanických odlučovačů je popílek hrubší (zrna větší než 0,09 mm, sypná hmotnost je 900–1200 $kg \cdot m^{-3}$), než z elektrostatických (zrna nad 0,09 mm, sypná hmotnost cca 800 $kg \cdot m^{-3}$). Popílek má vysokou specifickou plochu povrchu a nízkou objemovou hmotnost. Množství nespáleného uhlíku a železa ovlivňuje barvu popílku, který se může měnit

od oranžové po tmavě červenou, hnědou, bílou až žlutou. V tabulce níže jsou uvedeny základní fyzikální vlastnosti popílků [2], [4]

Tabulka 2: Fyzikální vlastnosti popílků [12]

Veličina	Jednotka	Rozmezí
Objemová hmotnost	[kg·m^{-3}]	2000–2500
Sypná hmotnost	[kg·m^{-3}]	800–1100
Průměr zrna	[μm]	10–30
Měrný povrch dle Blaina	[cm^{2}·g^{-1}]	2000–5500

3.3 Struktura popílku

Jak již bylo uvedeno výše, popílek vzniká jako vedlejší produkt při spalování uhlí, který má vlastní heterogenní vlastnosti. Popílek obecně obsahuj tři různé typy složek: krystalické minerály, nespálené uhlíkové částice a nekrystalizované hlinitokřemičité sklo, každá s jedinečnou reaktivitou, pokud se použije v betonu jako částečná náhrada cementu. Přítomnost nespáleného uhlíku je u popílku nežádoucí. Studie ukazuje, že proces odstraňování tohoto nespáleného uhlíku pomocí kalcinačního procesu transformuje amorfní fáze přítomné v popílku částečně na krystalické fáze. [11]

S pomocí dostupných pokročilých technik je možno určit, že popílek tvoří odlišné krystalické fáze, jako je křemen, mullit, hematit, feritové spinely, anhydrit, melilit, meritanit, periklasa, hlinitan vápenatý a vápno. Většina popílku je povahy sklovitého materiálu, který má špatně uspořádanou atomovou strukturu (amorfní přirozenost). Polétavý popílek s vyšším obsahem amorfních látek je tedy účinnější při zvyšování pucolánové reakce. [11]

Sakai a kol. popsali vliv amorfního obsahu na pucolánovou reakci popílku v pozdějším věku. Očekává se vyšší stupeň pucolánové reakce s vyšším amorfním obsahem popílku. Dále se uvádí, že v alkalickém prostředí není popílek s nízkým obsahem vápníku nereaktivní kvůli inertní povaze většiny krystalických fází, které jsou v něm přítomny. Vzhledem k tomu, že popílek s vysokým obsahem vápníku je reaktivní díky přítomnosti některých reaktivních krystalických fází. [13]

Reaktivita popílku je obvykle vyjádřena objemem oxidů, jak je stanoveno rentgenovou fluorescenční spektroskopií. Samotná kompozice však nestačí, protože přítomnost krystalických nebo amorfních fází určuje reaktivitu popílku.

Proto je stejně důležité znát množství reaktivních krystalických a amorfních fází pro pochopení reaktivity popílku. [11]

3.4 Normativní požadavky na popílek

Použití popílku jako aktivní příměsi do betonu je možné pouze za předpokladu splnění požadavků dle ČSN EN 450-1 Popílek do betonu. Takto musí být deklarován výrobcem či dodavatelem. Kvalitativní požadavky pro použití popílku jako příměsi do betonu jsou uvedeny v Tabulce 3, která se nachází níže. [9]

Tabulka 3: Normové požadavky dle ČSN EN 450-1 [9]

Vlastnost	**Požadavek**
Ztráta žíháním (horní mezní hodnota)	7,0 % hmotnosti (kategorie A) 9,0 % hmotnosti (kategorie B) 1,0 % hmotnosti (kategorie C)
Jemnost (horní mezní hodnota)	45 % hmotnosti (kategorie N) 13 % hmotnosti (kategorie S)
Variabilita jemnosti (dolní a horní mezní hodnoty)	± 15 procentních bodů z deklarované hodnoty (jen u kategorie N)
Chloridy (horní mezní hodnota)	0,10 % hmotnosti
Volný oxid vápenatý (horní mezní hodnota)	1,6 % hmotnosti
Aktivní oxid vápenatý (horní mezní hodnota)	11,0 % hmotnosti
Oxid sírový (horní mezní hodnota)	3,5 % hmotnosti
Oxid křemičitý + oxid hlinitý + oxid železitý (dolní mezní hodnota)	65 % hmotnosti
Celkový obsah alkálií (horní mezní hodnota)	5,5 % hmotnosti
Oxid hořečnatý (horní mezní hodnota)	5,5 % hmotnosti
Objemová stálost (horní mezní hodnota)	11 mm
Index účinnosti po 28 dnech (dolní mezní hodnota) Index účinnosti po 90 dnech (dolní mezní hodnota)	70 % 80 %
Variabilita měrné hmotnosti (dolní a horní mezní hodnoty)	± 225 $kg \cdot m^{-3}$ od deklarované hodnoty
Počátek tuhnutí (horní mezní hodnota)	2,25krát déle než počátek tuhnutí cementu
Požadavek na množství vody (horní mezní hodnota)	97 % (jen kategorie S)

Do betonu je možno použít i popílky, které nevyhovují požadavkům normy ČSN EN 450-1, nicméně takové popílky není možno považovat jako aktivní příměs, nýbrž pouze jako inertní příměs (filler, …).

4 Denitrifikace spalin

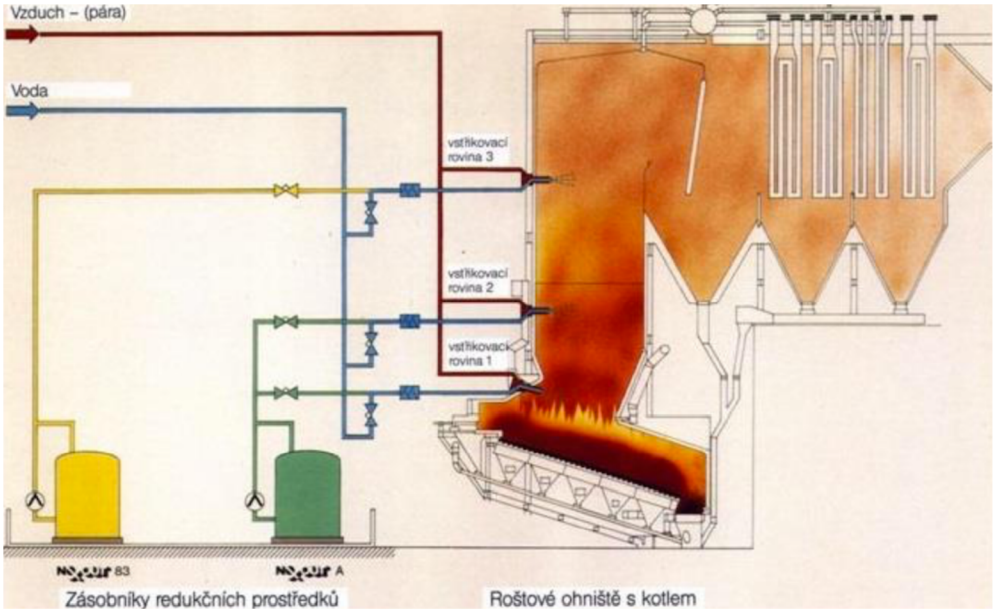
Problematika oxidu dusíku patří mezi hlavní problémy ochrany ovzduší. Denitrifikace je obecný pojem pro omezování emisí oxidu dusíku (dále „NO_x“). Rozeznáváme zde primární a sekundární opatření. Primární opatření jsou ta, která u spalovacích zdrojů vedou k omezení emisí NO_x tím, že omezují samotný vznik. Sekundární jsou následná opatření, která vedou ke snížení již vzniklých NO_x. Legislativa upravující emisní limity produkovaných spalin vstoupila v platnost v roce 2016. [14], [15]

Se zvyšujícími se nároky na kvalitu produkovaných zplodin, jsou výrobci elektrické energie pocházejících z energetických jednotek spalujícího uhlí, stále více nuceni zavádět dodatečné technologie redukující produkované spaliny. Přestože existuje několik ekologicky šetrnějších technologií v rámci zkvalitnění redukce oxidů dusíku, bohužel převážná většina elektráren na území České republiky volí méně nákladné technologie, mezi které patří právě selektivní nekatalytická redukce (dále „SNCR“). [16] [15]

4.1 Technologie SNCR

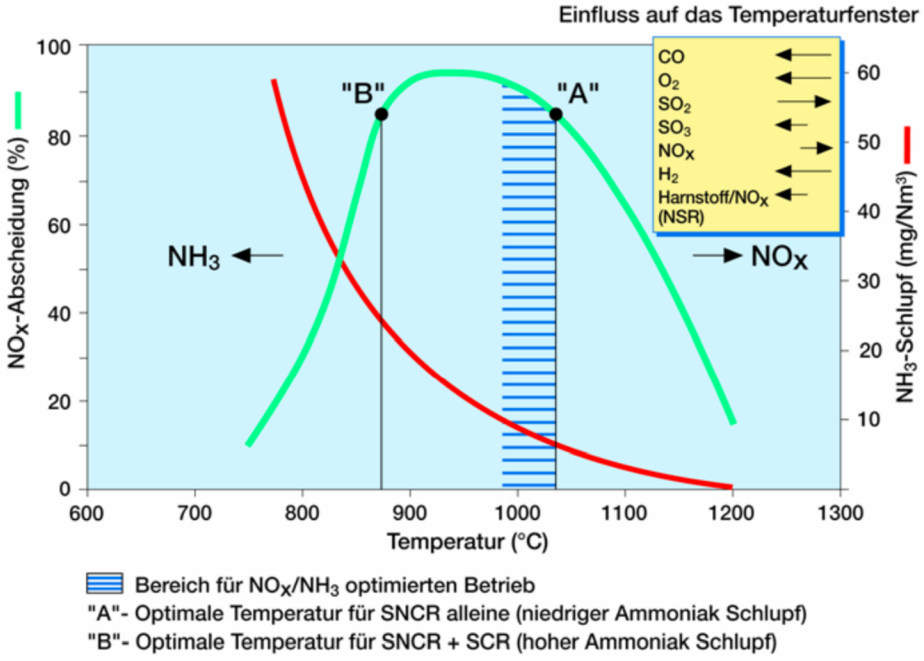
Selektivní nekatalytická redukce (Selective non-catalytic reduction). Díky absenci katalyzátoru odpadají problémy spojené s jeho instalací, výměnou, znečištěním atd. SNCR je atraktivní pro nižší cenovou náročnost, zachování kvality popílku a snadnější změnou v případu modifikace technologie spalování. Nevýhodou je nízká účinnost (30–50 %), vysoké nároky na přesnost měření teplotního profilu kotle a vysoká koncentrace zbytkového amoniaku ve spalinách (snaha o 5 ppm, nicméně většinou 10-20 ppm). [17]

Redukce oxidu dusíku je založena na principu vstřikování redukčního činidla do spalovací komory. V SNCR se jako redukční činidla používá močovina, čpavková voda a kyselina kyanurová. Po nástřiku činidel dochází k velkému množství chemických reakcí redukujících škodlivé NO_x. V samotných chemických reakcích dominují reakce radikálů NH_2^-, OH^-. Amoniak reaguje s hydroxylovým iontem za vzniku NH_2^-, který následnými reakcemi snižuje množství NO_x ve spalinách. Princip SNCR názorně ilustruje obrázek níže. [18]



Obrázek 5: Schéma tepelné elektrárny se systémem SRNC [16]

Metoda SNCR je účinná v rozsahu teplot 900–1100 °C, který se nazývá teplotní okno. Teplotní rozsah je tak úzký, že činidlo se nemůže důkladně míchat se spalinami, reaguje s NO_x neadekvátně, což vede k nízké redukci NO_x. Teplota, doba zdržení a množství redukčního činidla jsou hlavní parametry, které ovlivňují účinnost SNCR procesu. Za účelem zlepšení účinnosti SNCR je možnost přídavku různých přísad. Například alkalické nebo hořlavé látky mohou snížit teplotu, při které probíhá SNCR. Závislost množství odstraněných NO_x v závislosti na teplotě je uvedena na obrázku níže. [17], [16]

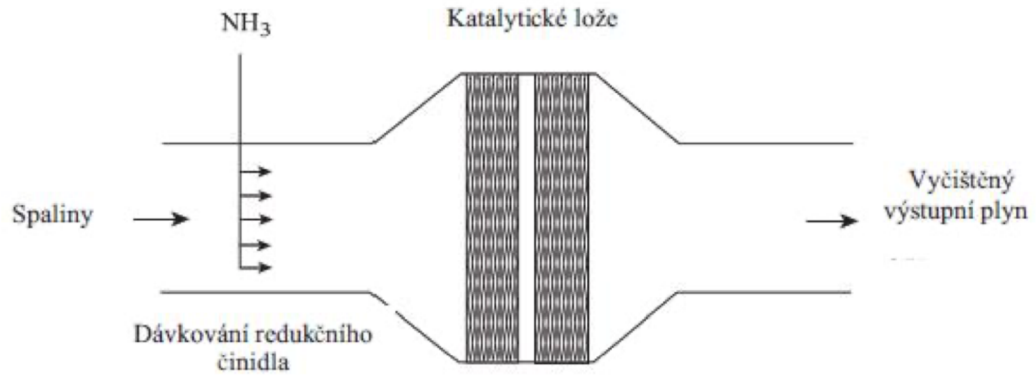


Obrázek 6: Množství odstranění NO_x při SNCR v závislosti na teplotě [17]

4.2 Technologie SCR

Tato denitrifikační metoda, která byla představena v 70. letech v Japonsku, je ve světě nejrozšířenější. Její princip spočívá v redukci oxidů dusíku (resp. NO_2) na N_2 za přítomnosti katalyzátoru. Redukce díky katalyzátoru probíhá v pásmu teplot 250 až 400 °C. Jako redukční činidlo se používá plynný amoniak NH_3, vodný roztok amoniaku NH_4OH, tzv. „čpavková voda“ a vodný roztok močoviny $(NH_2)_2CO$. Jedná se tedy o totožná redukční činidla jako v případě SNCR. [15]

Redukční činidlo se za kotlem vstřikuje s požadovanou teplotou do proudu spalin, které jsou zavedeny do katalyzátorového reaktoru. Oxidy dusíku jsou zde selektivně redukovány, což znamená, že se redukují pouze oxidu dusíku, plynným amoniakem za přítomnosti kyslíku a vhodného katalyzátoru, na dusík a vodní páru. Ke správné redukci, probíhající s nejvyšší účinností, je potřeba nalézt správné teplotní okno. Při správné funkci je pak potřeba jen minimální přebytek redukční látky a redukce dosahuje až 90% účinnosti. Výsledkem redukce tímto způsobem jsou neškodné plynu dusíku a vodní páry. [15]



Obrázek 7: Schéma selektivní katalytické redukce [19]

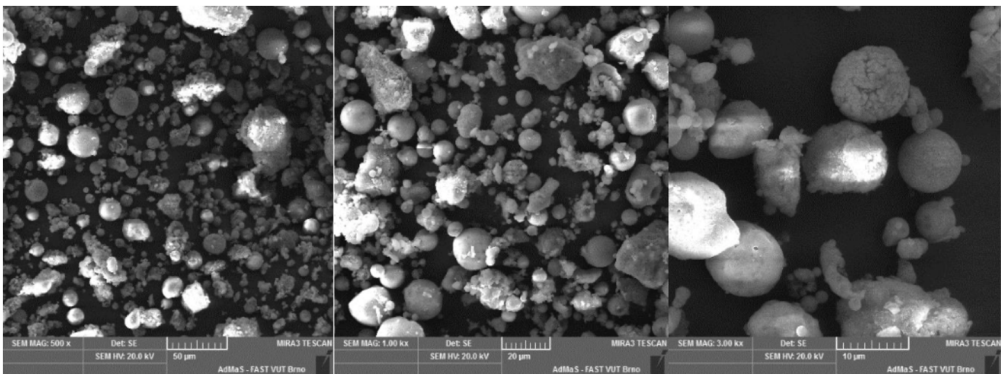
4.3 Kvalita popílků po SNCR

Z pohledu použití popílku jako aktivní příměsi do betonu musí popílek splňovat požadavky normy ČSN EN 450–1. [9]

4.3.1 Dopad na morfologii zrn

Je obecně známo, že úletový popílek má pozitivní vliv na reologii cementové malty. Tato skutečnost úzce souvisí s morfologií zrn, která jsou sklovitého povrchu a kulovitého tvaru. Toto působení se nazývá efekt kuličkového ložiska. [20]

Nicméně pokud je spalování navíc doprovázeno redukcí oxidu dusíku pomocí SNCR metody, je možno očekávat změnu morfologie zrn popílku během spalování.

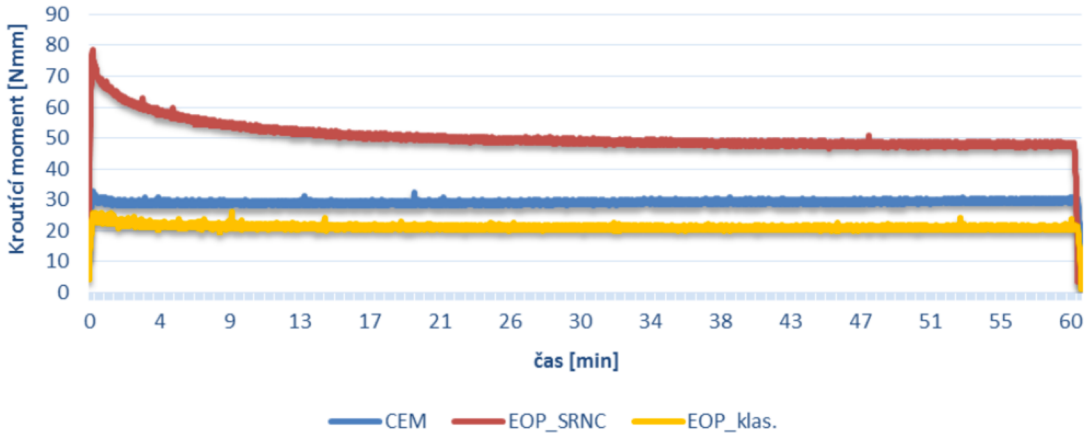


Obrázek 8: Zrna popílku po SNCR (zvětšeno 500, 1000 a 3000×) [16]

Obrázek 8 poukazuje na rozdílnost morfologie zrn popílku oproti zrnům popílku bez aplikace SNCR. Podrobnější analýzou je možno pozorovat, že zrna popílku disponují značně nestejnorodými tvary zrn. Ze snímku jsou patrné drobné úlomky původních zrn, které se poté shlukují a tvoří nová porézní zrna. Na základě této skutečností je možno konstatovat, že denitrifikace spalin pomocí metody SNCR má negativní dopad na morfologii zrn popílku. [16]

4.3.2 Dopad na reologii cementové pasty

Reologie cementové pasty přímo souvisí s morfologií zrn, je tedy možno předpokládat, že aplikace SNCR má negativní dopad na reologii cementové pasty.



Obrázek 9: Reologie analyzovaných popílků [16]

Obrázek 9 názorně zobrazuje průběh kroutícího momentu v závislosti na čase. Výsledky reologie zcela korespondují s předpoklady uvedenými výše. Popílek bez aplikace SNCR vykazuje lepší zpracovatelnost oproti cementové pastě. Naopak popílek s aplikací SNCR reologii pasty značně zhoršuje. Tento výsledek

potvrzuje fakt, že zrna nepravidelného tvaru, případně shluky jsou značně vodonáročnější díky své porozitě. [16]

4.3.3 Dopad na index účinnosti

V poslední části výzkumu byl zkoumán dopad aplikace SNCR na pevnostní parametry. Porovnání bylo zkoumáno na indexu účinnosti dle ČSN EN 450–1. Všechny dosavadní výzkumy se shodují na faktu, že popílky, které jsou denitrifikovány pomocí metody SNCR mají větší obsah amonných solí, které po kontaktu s cementem uvolňují zápach v podobě čpavku. Od smíchání se zápach vytrácí v krátkém časovém intervalu. Je tedy možno očekávat, že reakce amonných solí je natolik rychlá, že je ukončena v řádech několika minut. [16]

Tabulka 4: Indexy účinnosti analyzovaných popílků [16]

Index účinnosti [%]	Popílek bez SNCR	Popílek po SNCR
2denní	46,0	55,7
7denní	57,0	58,8
28denní	83,7	73,2

Popílky vykazovaly vyšší index účinnosti především po 2 a 7 dnech, který pravděpodobně souvisí s morfologií zrn. Díky své narušené struktuře se může rychleji účastnit hydratačních procesů. Popílky kontaminované amonnými solemi vykazují v raných stádiích výrazně vyšší indexy účinnosti, nicméně po 28 dnech tyto směsi již dosahují nižších hodnot indexu účinnosti než popílky bez aplikace SNCR. Index účinnosti po 28 dnech se pohybuje na hranici použitelnosti dle normy ČSN EN 450-1. [16]

5 Způsoby aktivace popílků

Byly vyvinuty různé metody aktivace, aby se překonala nízká počáteční pevnost betonu s popílkem a zvýšila se reaktivita. Existuje několik metod aktivace popílků:

- Mechanická
- Chemická
- Tepelná
- Kombinace [21]

5.1 Mechanická aktivace

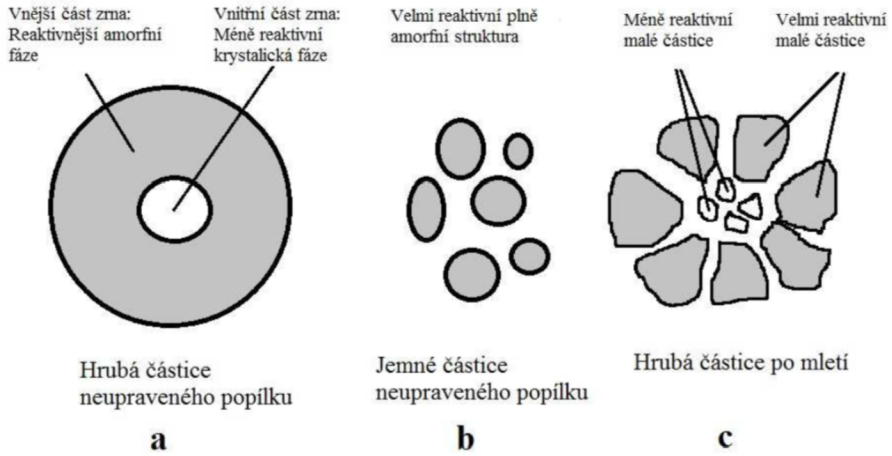
Vazebný potenciál amorfního komponentu popílku lze zvýšit mechanickou aktivací, která rozvíjí nové možnosti využití. Mechanická aktivace je netermická technologie, která čerpá z mechanické energie, aby se zvýšila reaktivita popílku, a tím se usnadnily chemické reakce mezi pevnými látkami. [6]

Mechanickou aktivaci obvykle provádějí vysoce energetická třecí zařízení. Mezi změny indukované v materiálu během procesu mechanické aktivace patří zmenšení velikosti částic, změny morfologie částic, zvýšení měrné plochy povrchu, strukturální defekty, snížení stupně krystality, což znamená strukturální přeskupení. Nejdůležitějším důsledkem transformací, které se vyskytují v materiálu během mechanické aktivace, je jeho zvýšená reaktivita. [22]

Nejdůležitějším výsledkem použití mechanicky aktivovaného popílku je zlepšení mechanických vlastností výsledné matrice. Experimentální parametry se tedy mohou lišit, pokud jde o mechanickou aktivaci popílku záleží na mnoha aspektech (výběr mlecího zařízení, poměr materiálů, doba trvání, atd.). Výběr mlecího zařízení se ukázal jako klíčový parametr pro vývoj vysoké pevnosti. [22]

5.1.1 Mletí

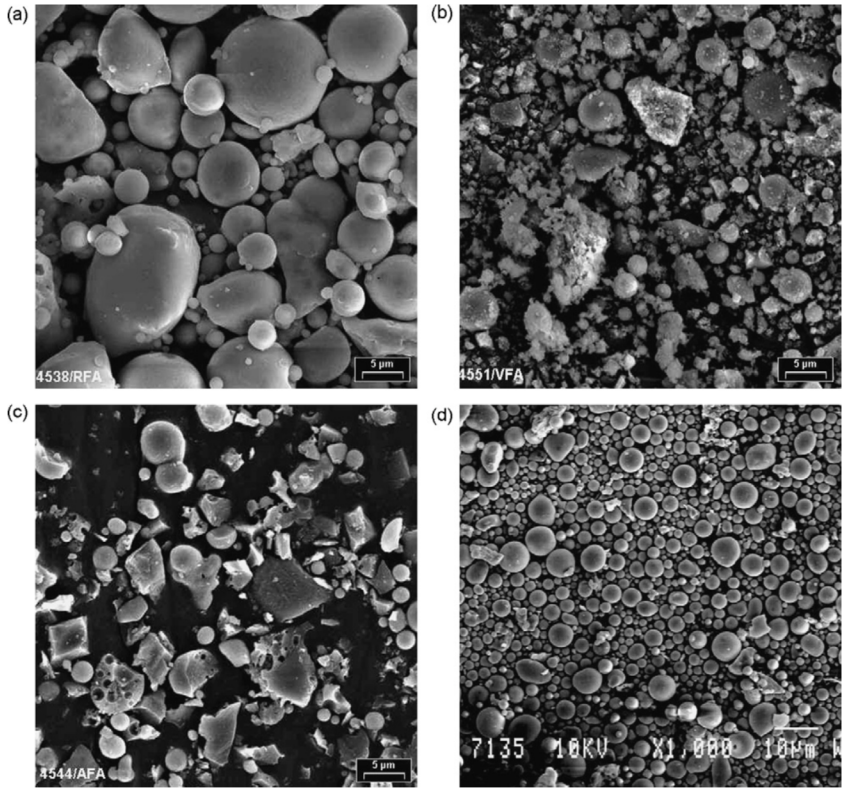
Mletí může být možným řešením pro hrubé zbytky popílku ze separačních procesů. [23] Hlavním účinkem mletí popílku je rozdrcení velkých (hrubých) částic – cenosfér, tím se snižuje podíl porézních částic a drsnost částic. Jak ukazuje Obrázek 10, můžeme získat malé reaktivní částice a menší méně reaktivní částice, které na druhou stranu mohou být dobrým vyplněním mezi cementovými částicemi. Proces mletí zvyšuje měrnou hmotnost a jemnost, to následně vede k vyšší pucolánové reaktivitě popílku. Kromě toho se mechanická aktivace popílku používá za účelem zvýšení adsorpčních vlastností. [22] [24] [25]



Obrázek 10: Princip mechanické aktivace [23]

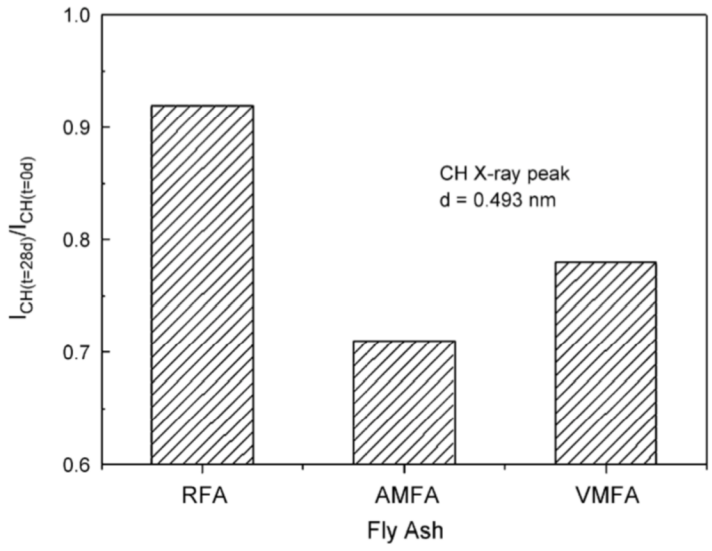
Jak už bylo zmíněno výše, výběr mlecího zařízení pro mechanickou aktivaci značně ovlivňuje reaktivitu popílku. Popílek stejné jemnosti se chová odlišně v závislosti na mlecím zařízení. Vzorek připravený z popílku, který byl mechanicky aktivován ve vibračním mlýnu, vykazoval vynikající mechanické vlastnosti, ve srovnání s jejich alternativními vzorky připravenými z popílku obdobné velikosti částic, ale získaného pomocí jiných mlýnů. [26]

Lze použít několik druhů mlýnů. Nejčastěji se jedná o kulové mlýny. Pro mechanickou aktivaci popílku lze použít i jiné druhy mlýnů, jako je kladivový mlýn, kulový mlýn, tryskový mlýn a vibrační mlýn. Tryskové mletí může snížit riziko kontaminace produktu mlecími médii, protože samotný materiál obsahuje mlecí média. [25]



Obrázek 11: Mikroskopické snímky ukazující morfologii popílku: a) surový popílek (RFA), (b) mechanicky aktivovaný popílek pomocí vibračního mlýna (VMFA), (c) mechanicky aktivovaný popílek pomocí kulového mlýna (AMFA) a (d) tříděný popílek (CFA) [27]

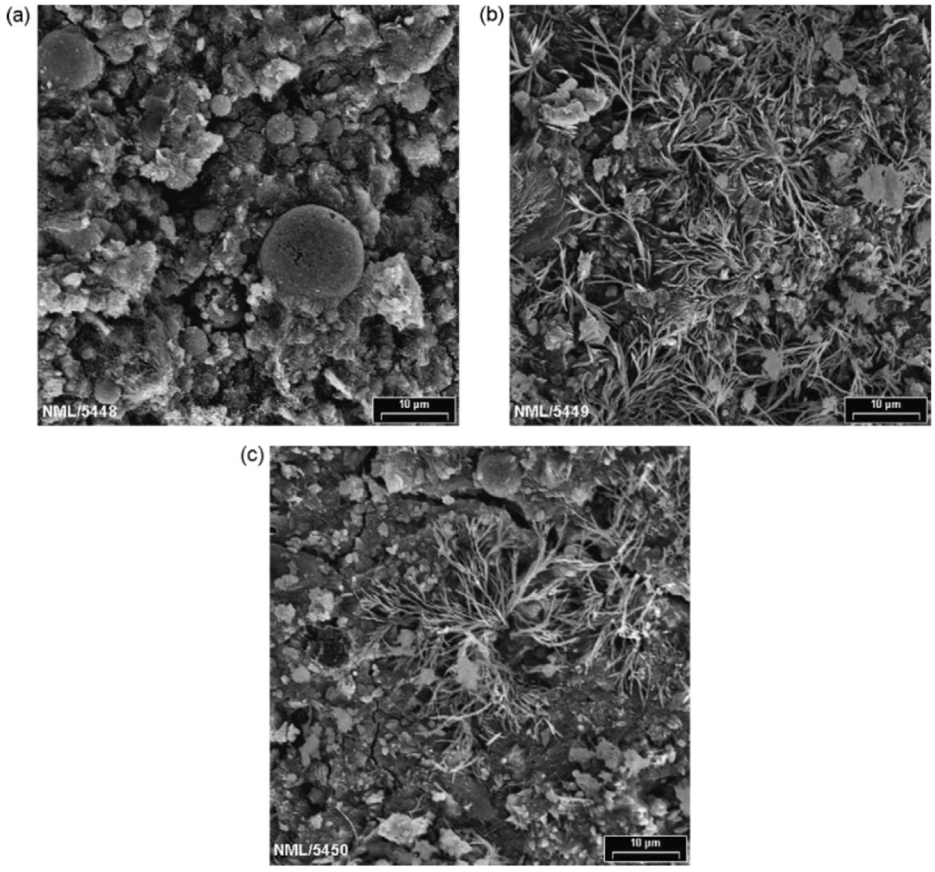
Účinek mechanické aktivace závisí na typu použitého aktivačního zařízení. Obrázek 12 porovnává reaktivitu typického surového popílku s mechanicky aktivovaným popílkem pomocí kulového mlýnu (AMFA) a vibračního mlýnu (VMFA). Vyšší reaktivita mechanicky aktivovaného popílku vůči surovému popílku je zcela evidentní. [27]



Obrázek 12: Vliv mechanické aktivace na reaktivitu (RFA – surový popílek, AMFA – popílek aktivovaný v kulovém mlýnu, VMFA – popílek aktivovaný ve vibračním mlýnu) [27]

Zjistilo se, že 50–60 % mechanicky aktivovaného popílku lze použít jako náhradu za slínek s pevností vyšší nebo srovnatelnou s komerčním cementem. Kromě pevnosti vzorky cementu splňují všechna další kritéria. [26]

Za účelem posouzení úlohy mechanické aktivace byla zkoumána hydratace cementových formulací obsahujících fixované množství slínku (50 %) a různé podíly surového a mechanicky aktivovaného popílku. Studie odhalily, že mechanická aktivace popílku má nepřímý vliv na hydrataci cementových fází, konkrétně na trikalciumsilikát (dále „C_3S“) a trikalciumaluminát (dále „C_3A“). To se odrazilo změnou maximální rychlosti hydratace fází a času, ve kterém nastává maximální rychlost hydratace. [26]

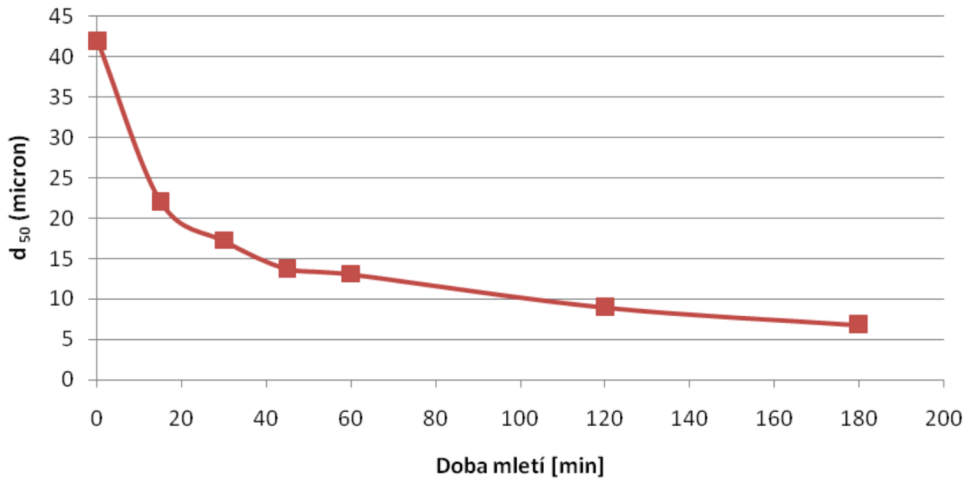


Obrázek 13: Vliv mechanické aktivace na morfologii produktu (po 180 dnech); a) RFA – surový popílek, b) AMFA – popílek aktivovaný v kulovém mlýně, c) VMFA – popílek aktivovaný ve vibračním mlýně [27]

Celkový účinek mechanické aktivace popílku na pevnost cementu může být důsledkem tvorby kompaktní mikrostruktury v důsledku zvýšené reaktivity a jeho vlivu na hydrataci slínkových fází. [26]

Doba mletí má taktéž patřičný vliv na jemnost popílku. Účinnost procesu mletí se v průběhu času snižuje. Například Bouzoubaa a kol. zjistili, že první 2 hodiny

mletí v kladivovém mlýnu byly účinnější při zvyšování jemnosti. Doba mletí, ale silně závisí na druhu mlecího zařízení. [25]



Obrázek 14: Závislost velikosti středního zrna popílku na době mletí v kulovém mlýně [28]

Hlavní problém, který vyžaduje pozornost, je velikost mechanického aktivačního zařízení. Za posledních 15 let se velikost kulového mlýna zvýšila z několika stovek na 10 000 litrů a nyní jsou k dispozici mlýny, které zpracovávají až 50 t / h. Podobně jsou v komerčním provozu vibrační mlýny 10–12 t / h. Očekává se, že v blízké budoucnosti budou dostupná velká aktivační zařízení vhodná pro cementářský průmysl. [26]

5.1.2 Separace, prosévání

Díky procesu separace můžeme získat několik různých frakcí popílku. Tato metoda poskytuje nemodifikované částice, což znamená, že částice zůstávají ve sférickém tvaru a lze zlepšit tekutost cementové pasty. Na druhé straně jsou cenosféry nerozdrceny a pucolánová aktivita se nezlepšuje. [29]

Separační proces lze provést přímo v elektrárnách, kdy popílek z každého separátoru je skladován samostatně. Proces separace v elektrárnách má několik sekcí. První částí je v zásadě gravitační separace (například Ljungström předehřívač vzduchu). Druhou částí mohou být textilní odlučovače a třetí jsou elektrické filtry. Každý proces třídí popílek s různou jemností. Většinou je v procesu jen několik elektro filtrů rozdělených do sekcí. Popílek získaný z elektro filtru má měrnou povrch dle Blaina 2000–3000 $cm^2 \cdot g^{-1}$. [25]

Další separační proces může probíhat prosíváním, flotací nebo tříděním. Pro prosévání se nejčastěji používají síta o velikosti 200 a 325 mm, občas

se používá také síto o velikosti 90 mm. Jako třídič lze použít cyklónový odlučovač. [25]

Novou možnost separačního procesu popsal Páya a kol. Při tomto postupu se původní popílek suspenduje ve vodě a mechanicky promíchá. Za stálého míchání se do suspenze zavede elektromagnet s plastovým krytem. Část popílku přilne (magnetická frakce) na plastový povrch a při vypnutém proudu se obnoví přilnavý popílek. Nemagnetické částice vystupují z roztoku po vysušení. Díky této metodě můžeme získat frakce popílku s různým chemickým složením. Například zkouška na maltách obsahujících magnetické frakce ukázala dobrou zpracovatelnost, navzdory nejnižší specifické měrné ploše. Tento neočekávaný výsledek lze připsat adsorpční reakci vody na povrchu částic. [30]

Problémem aktivace separací je poměrně velký zbytkový hrubý popílek, který musí být zlikvidován. V některý případech může být podíl hrubého zbytku popílku až 60–70 % z celkové hmotnosti. To snižuje nákladovou efektivitu procesu. [23]

5.1.3 Velikost částic

Zlepšení reaktivity je primárně způsobeno zvýšením jemnosti částic. Jemnější částice popílku představují reaktivnější materiál. Je známo, že částice pod 45 μm, získané různými způsoby separace, mají tendenci zlepšovat mechanickou pevnost. [22]

V dané studii byly čtyři různé vzorky popílku (ze čtyř tepelných elektráren) podrobeny mechanické aktivaci v planetárním kulovém mlýnu. Mechanická aktivace byla provedena v planetárním kulovém mlýně (Fritch Pulverisette, Německo). Průměr kuliček z nerezové oceli byl 13 mm. Poměr zrna popílku ku kuličce byl 1:20. Popsané parametry byly stanoveny na základě předchozích zkušeností s konkrétním použitým zařízením. Vzorky byly mechanicky aktivovány ve vzdušné atmosféře po dobu 15, 30, 45 a 60 minut, při maximální rychlosti 380 ot / min. Mlecí schéma bylo stanoveno tak, že pro každou ze specifikovaných časů mletí bylo do mlýna naloženo nové množství materiálu. [22]

Podle analýzy distribuce velikosti částic bylo zjištěno, že k nejvýznamnějším změnám ve velikosti částic došlo pouze po 15 minutách mechanické aktivace. Z hlediska charakteristik a úspor energie by proto optimální doba mechanické aktivace měla být 15 minut. [22]

Tabulka 5: Charakteristické průměry částic [22]

Duration of mechanical activation (min)	FA TENT A			FA TENT B			FA Kolubara			FA Kostolac		
	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)
0	4.16	33.4	140.6	13.26	79.95	252.3	5.97	47.51	230.2	10.96	62.04	299.1
15	0.52	3.15	31.39	0.48	2.30	33.11	0.57	2.88	40.81	0.58	3.08	102.29
30	0.47	2.26	30.65	0.44	1.67	32.72	0.55	2.74	53.78	0.54	2.52	29.96
45	0.46	2.01	33.35	0.45	2.17	50.71	0.51	2.54	51.75	0.53	2.59	32.55
60	0.47	2.51	51.57	0.46	2.41	54.95	0.51	2.38	46.39	0.53	2.71	36.04

Mechanická aktivace popílku vede k výraznému zlepšení mechanických vlastností. Zlepšení pevnosti v tlaku je důsledkem změn fyzikálních a chemických charakteristik ve vzorcích. Výrazné zlepšení mechanické pevnosti značně souvisí s distribucí velikosti částic. Snížení velikosti částic výrazně zvyšuje reaktivitu, která je způsobena zvětšením povrchové plochy. [22]

5.1.4 Vliv mechanické aktivace na výsledný cementový kompozit

Vliv na zpracovatelnost

Přimíchávání popílku do cementu vede ke snížení tekutosti past, přesto další mletí popílku zlepšuje reologické vlastnosti past. Několik studií popisuje vliv jemnosti popílku, tvaru částic nebo distribuce velikosti částic na zpracovatelnost čerstvé pasty. [25]

Cornelissen a kol. uvádí, že použití mletého popílku pro malty a betony nemá žádný negativní vliv na zpracovatelnost. Bouzouba a kol. ve svém experimentu použil kladivový mlýn a kontroloval spotřebu vody popílku jako funkci doby mletí. Po 2 hodinách mletí se spotřeba vody v popílku poněkud snížila, a to především kvůli rozpadu velkých cenosfér. Prodloužení doby mletí z 2 na 4 hodiny neovlivnilo potřebu vody. Další prodloužení doby mletí ze 4 na 10 hodin však zvýšilo potřebu vody kvůli nárůstu částic nepravidelného tvaru. [31]

Grzeszych a kol. tvrdil, že mletí popílku přináší zlepšení reologických vlastností. Účinek je zanedbatelný pro nižší obsah popílku, ale při vyšších hodnotách je významný. [25]

Vliv na pevnost

Předchozí studie ukazují, že mletí rozdrtí cenosféry a velké částice popílku, což má za následek vyšší měrný povrch a jemnost a následně vyšší pucolánovou reaktivitu popílku. Amorfní oxid křemičitý popílku musí být vystaven molekulám vody, aby reagoval s hydroxidem vápenatým (dále „$Ca(OH)_2$“) z hydratovaného cementu, aby mohla probíhat pucolánová reakce. Míra, do které jsou jednotlivé

částice popílku vystaveny, závisí do značné míry na povrchu jednotlivých zrn ve vztahu k povrchu částic, ve kterých jsou obsaženy. A právě tuto reakci lze urychlit mletím. [25]

Kiattikomol a kol. pozorovali 5 popílků třídy F z různých zdrojů a zjistili, že jemnost popílku, nikoli chemické složení, byl hlavním faktorem ovlivňujícím pevnost v tlaku cementových malt. [25]

Aydin a kol. ve svém výzkumu dospěl k závěru, že je výhodný proces mletí. V případě malt ošetřených párou vykazuje až 60 % náhrada popílku vyšší pevnost v tlaku než referenční malta. [24]

Felekoglu a kol. ve své studii popisuje nízkou pevnost v tlaku v raném věku a vysvětluje, že zvýšení pevnosti díky jemnosti popílku v důsledku mletí bylo potlačeno zvýšením vodního součinitele pro konstantní zpracování. V pozdějším věku toto omezení oslabuje pucolánová reakce. Nezreagované částice popílku mohou velmi dobře přispívat k vlastnostem cementové malty. To může být způsobeno „mikroagregačním“ efektem. Vždy existuje optimální hodnota jemnosti, která vede k nejvyšší pevnosti v tlaku. Ve studii byla optimální jemnost popílku 480 $m^2 \cdot kg^{-1}$, která maximalizovala hodnoty pevnosti v tlaku. [23]

Vliv na trvanlivost

Menší částice mohou vyplňovat prostor mezi cementovými částicemi a zvyšovat trvanlivost a odolnost vůči vnějším vlivům. [25]

Aydin a kol. Studie ovlivňují proces mletí na odolnost cementových past s popílkem proti alkalicko-křemičité reakci (dále „ASR“). Původní jemnost popílku dle Blaina byla 2900 $cm^2 \cdot g^{-1}$ a byla zvýšena na 9070 $cm^2 \cdot g^{-1}$. Vzorky byly připraveny nahrazením 20, 40 a 60 % hrubým i jemným popílkem. Výsledky ukazují nižší expanzi ASR u vzorků s vyšší dávkou popílku (nad 20 %). Účinek jemnosti na expanzi ASR však nebyl prokázán. [24]

5.2 Chemická aktivace

Metoda chemické aktivace má nejnižší poměr nákladů k pevnosti ve srovnání s ostatními metodami aktivace a je lepší při zlepšování pevností. Mezi nejčastěji používané dva různé způsoby chemické aktivace patří alkalická aktivace a sulfátová aktivace. [21]

Alkalická aktivace pomocí $Ca(OH)_2$ nebo hydroxidu sodného (dále „NaOH“) a aktivace síranová pomocí síranu vápenatého (dále „$CaSO_4 \cdot 2H_2O$“) nebo síranu sodného (dále „Na_2S0_4“) jsou nejčastějšími postupy chemické aktivace. Mezi další techniky aktivace patří chlorid vápenatý (dále „$CaCl_2$“), křemičitan sodný (dále „Na_2SiO_3“) a CaO. Gopalsamy a kol. studovali účinek použití směsi CaO a Na_2SiO_3 v poměru 1: 8 pro aktivaci popílku. Aktivace pomocí Aquis Na_2SiO_3 produkuje silikagel, který se může změnit na gel s pevnými vlastnostmi, když gel postupně ztrácí vodu. Tato želatinace je ve skutečnosti procesem transformace z lineární struktury na retikulární strukturu. Proces želatinace může být vyjádřen následující rovnicí: [21]

$$Na_2SiO_3 + nH_2O \rightarrow 2NaOH + SiO_2 \cdot (n-1)H_2O$$

Saraswathy a kol. experimentálně zkoumal vliv chemické aktivace popílku pomocí chemického ošetření roztokem hydroxidu sodného na pevnost betonu a odolnost proti korozi. Výsledky zkoušek ukázaly, že při použití aktivovaného popílku až do kritické úrovně 20–30 % nahrazení se zvýšila pevnost betonu a odolnost proti korozi. [32]

Tato studie představuje výsledky experimentálního výzkumu s cílem zjistit účinek chemické aktivace popílku třídy F k překonání problému nízké počáteční pevnosti. Poměr náhrady portlandského cementu popílkem byl 40 %. Ve studii byly použity čtyři různé chemické aktivátory: 2,5% Na_2S0_4; 2,5% NaOH; 3,0% (Na_2Si0_3 a CaO) v poměru (1: 8) a 4% Aquis Na_2Si0_3. [21]

Tabulka 6: Receptura [21]

Mix	Cement	Sand	Crushed stone	Fly ash	Water	Admixture	Activator
Control	350	540	1107	–	157.5	7.56	–
UF	210	540	1107	140	157.5	7.56	–
NaOH	210	540	1107	140	157.5	7.56	8.75
Na_2SO_4	210	540	1107	140	157.5	7.56	8.75
Na_2SiO_3	210	540	1107	140	157.5	7.56	14
$CaO + Na_2SiO_3$	210	540	1107	140	157.5	7.56	1.17 + 9.33

Jak je znázorněno v Tabulce 7, všechny aktivátory kromě NaOH zvýšily pevnost betonu v tlaku v raném věku ve srovnání se směsí bez aktivátoru (UF).

Důvod nižší aktivity směsí popílku vyplývá zejména ze skutečnosti, že skleněná povrchová vrstva popílku je hustá a chemicky stabilní. Tato vrstva chrání vnitřní složky, které jsou porézní, houbovité, a tudíž s vyšší aktivitou. Pro zvýšení počáteční pevnosti musí být sklovitý řetězec oxidu křemičitého a hliníku s vysokým obsahem Si a Al porušen. Zvýšení pevnosti je způsobeno vysokou alkalitou prostředí (vysoká hodnota pH), což je pro pucolánovou reakci velmi prospěšné, protože aktivátor rozkládá sklovitý povrch oxidu hlinitého. Hodnota pH potřebná pro rozpuštění aluminy a siliky je asi 13,3 nebo vyšší. Zlepšení pucolánové aktivity popílku vedlo ke zvýšení tvorby CSH gelu a ettringitu. [21]

Tabulka 7: Pevnost v tlaku v $N \cdot mm^{-2}$ [21]

Mix Type	Age (days)					
	3	7	28	56	90	180
Control	14.74	21.00	25.17	25.33	26.09	26.22
UF	7.47	11.62	20.76	27.56	33.62	37.35
NaOH	7.72	13.28	26.56	29.88	34.00	34.20
Na_2SO_4	15.36	17.30	26.31	30.30	34.36	36.52
Aquis Na_2SiO_3	16.88	22.04	26.91	32.00	35.00	37.50
$CaO + Na_2SiO_3$	16.43	18.72	24.41	27.90	33.15	34.01

Ve srovnání s jinými aktivátory je Aquis Na_2SiO_3 vynikající pro zlepšení pevnosti v každém věku. Vysoce zlepšená pevnost v raném věku, kdy byla ve srovnání s UF zvýšena pevnost v tlaku o 126,0 % a 89,6 % ve věku 3 a 7 dnů. V pozdějším věku byla míra zlepšení snížena na 29,6 % ve věku 28 dní a zvýšení síly pozorované po 180 dnech bylo ve srovnání s UF mírné. Celkové zlepšení pevnosti v tlaku bylo však o 180 % vyšší než kontrolní betonová směs po 180 dnech. Důvodem zvýšení pevnosti v tlaku použitím Aquis Na_2SiO_3 je skutečnost, že aktivátor udržuje koncentraci alkálií v roztoku. [21]

Aktivátor $CaO + Na_2SiO_3$ zvyšoval pevnost v tlaku v raném věku. V pozdějším stádiích bylo ve srovnání s UF patrné mírné snížení. Zlepšení pevnosti v tlaku v raném věku je výsledkem úspěšného zničení krystalické struktury skleněných kuliček popílku a zahájení její aktivace. [21]

Účinek aktivátoru Na_2SO_4 při zvyšování pevnosti v tlaku je blíže účinku Aquis Na_2SiO_3. Pevnost v tlaku ve věku 3 a 7 dní pro směs popílku aktivovaného pomocí Na_2S0_4 byla snížena o 9,0 %, respektive 21,5 %, ve srovnání s aktivátorem Aquis Na_2SiO_3. [21]

Přestože směs popílku aktivovaného Na_2S0_4 měla nižší pevnost ve srovnání s Aquis Na_2SiO_3, získala lepší zpracovatelnost a měla nižší náklady. Zvýšení

pevnosti pomocí Na_2SO_4 byl způsoben skutečností, že se zvýšila hodnota pH. V zásadě při přidání aktivátoru budou ionty $S0_4^{-2}$ reagovat s C_3A a po 7 dnech hydratace se ettringit většinou tvoří, což má za následek hutnější matrici a zvýšení pevnosti v tlaku. Reakce je vyjádřena následujícími rovnicemi: [21]

$$Na_2SO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 \cdot xH_2O + 2NaOH$$

$$CaSO_4 \cdot xH_2O + C_3A \rightarrow ettringit$$

Nejnižší hodnoty pro zvýšení pevnosti v tlaku při časný věk byl zaznamenán při použití NaOH aktivátoru. Aktivace popílku pomocí NaOH mohou použité chemické příměsi vést ke strukturální změně, která snižuje pevnost v tlaku v raném věku. [21]

Úspěch podpory pucolánového působení popílku chemickou aktivací pomůže maximalizovat výhody využití popílku v široké škále aplikací v konkrétních průmyslových odvětvích. [21]

5.3 Termální aktivace

Dosavadní poznatky o termální aktivaci popsal Hela. K aktivaci popílku byl použit mletý vápenec v množství 15–30 % a $CaSO_4$ ve formě sádry v množství do 5 %. Zpracování bylo realizováno tak, že homogenní směs ve složení popílek, vápenec a sádra byla smíchána s vodou. Ze směsi zavlhlé konzistence byly vyrobeny sbalky, které byly následně v autoklávu vystaveny hydrotermickému režimu s nástupem teplot na 85 °C během 1 hodiny, následně izotermickému ohřevu po dobu 5 hodin a poté samovolnému chlazení. Po vyjmutí z autoklávu byl vzorek vysušen při teplotě 100 °C do konstantní hmotnosti a následně rozemlet na prášek s maximálním zrnem 0,06 mm (vzorek F1). V druhé variantě byl vzorek vystaven další aktivaci, kdy vzorek připraven dle výše popsaného postupu byl vystaven krátkodobému působení teploty 650 °C (vzorek F2).

Teda metodika termální aktivace byla prováděna na vzorcích popílku z tepelné elektrárny Chvaletice. Všechny vzorky byly podrobeny mineralogickým rozborům rentgenové difrakční analýzy (dále „RTG“), diferenciální termické analýzy (dále „DTA“) a elektronové mikroskopii.

Dle RTG se kvalitativní složení obou vzorků (F1, F2) v podstatě shodují. Obsahují křemen, mullit kalcit. Ve vzorku F2 bylo možno pozorovat větší množství kalcitu a zanedbatelné množství sádrovce.

Dle DTA vykazovaly v oblasti teploty 400 °C dehydratační endotermu, která byla způsobena ztrátou hydrátové vody. V oblasti teplot 600 °C následuje endotermický rozklad vápence ($CaCO_3$) s dvojitým extrémem, první při 700 °C a druhý při 800 °C. Kvantitativním vyhodnocením bylo zjištěno, že vzorek F1 obsahuje 18 % a vzorek F2 obsahuje 9,3 % $CaCO_3$.

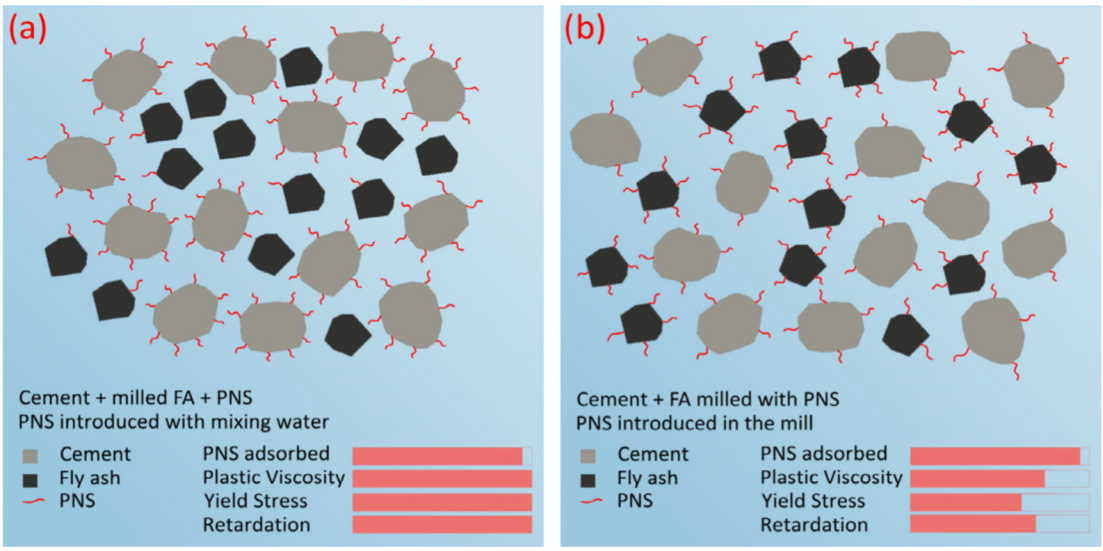
Dle snímků z elektronové mikroskopie bylo patrné, že při hydrotermální aktivaci došlo k výrazné změně povrchu, která byla způsobena adsorbcí $CaCO_3$ a $CaSO_4$ na povrchu.

V poslední fázi byly ze vzorků namíchány malty s různými procentuálními náhradami cementu popílkem. Ze směsi byly vyrobeny vzorky 40 × 40 × 160 mm. Následně byly stanoveny pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu po 3, 7 a 28 dnech zrání. Z výsledků bylo patrné, že vzorky s použitím popílku F1 vykazovaly vyšší pevnost v tlaku a také vyšší pevnost v tahu za ohybu v porovnání s popílkem F2. Závěrem je tedy možno konstatovat, že výhodnější je úprava pouze jednou tepelnou aktivací. [33]

5.4 Kombinace

5.4.1 Mechanicko-chemická aktivace (MCA)

V dané studii byl popílek aktivován mletím ve třech typech mlýnů až do stejné střední velikosti částic ~ 6 μm. Z hlediska dosažení rovnoměrného zvětšení měrné plochy povrchu bez aglomerace částic je planetární kulový mlýn považován za nejúčinnější. Aktivace byla provedena ve dvou režimech: vzájemné mletí popílku a superplastifikátoru na bázi polynaftalen sulfonátu (dále „PNS“) a oddělené mletí popílku. Je prokázáno, že přítomnost PNS v drtícím zařízení nemá významný vliv na zvětšení měrné plochy povrchu a změny morfologie. Nicméně vzájemné mletí popílku a PNS zabraňuje aglomeraci částic. Je zřejmé, že tento výsledek je způsoben skutečností, že popílek adsorbuje PNS během mletí mechanickým nárazem. Aktivace popílku v přítomnosti PNS má za následek změkčení preferenční adsorpce polymeru PNS na částicích cementu. V důsledku toho, bez ohledu na typ mlýnu, pasty připravené z popílku mletého s PNS vykazovaly zmírnění retardace hydratace ztělesněné snížením doby indukce o 30 %, snížením meze kluzu o 35 % a plastické viskozity o 25 % ve srovnání s pastami připravenými s aktivovaným popílkem obsahujícím PNS přidaným do záměsové vody. [34]



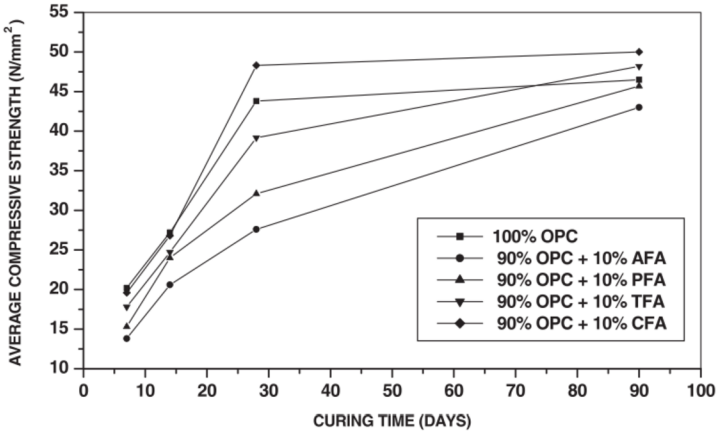
Obrázek 15: Schéma vlivu zaváděcího režimu PNS na reologii past z popílku cementu: a) PNS zavedený se směsnou vodou; b) PNS zavedený do mlýna. Sloupce ukazují normalizované hodnoty, kde 100 % je maximální dosažitelná hodnota pro systém a 0 % minimum [34]

6 Porovnání různých aktivací popílků s ohledem na výslednou pevnost

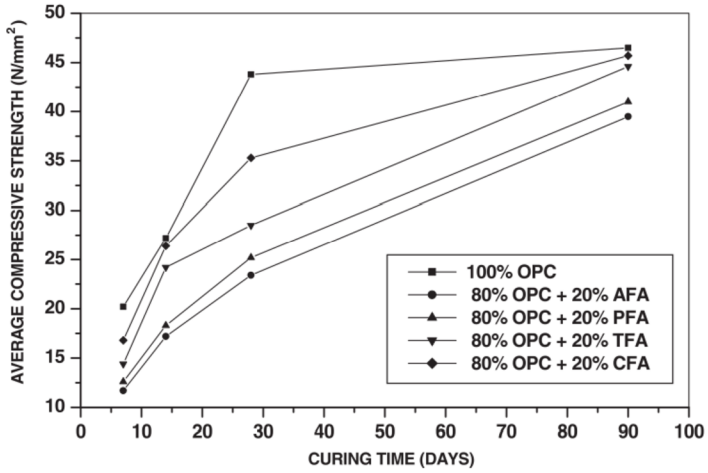
Saraswathy a kol. ve svém výzkumu porovnávali pevnosti v tlaku v závislosti na době zrání. Dále byl porovnáván vliv použité aktivace popílku na výsledné pevnosti. Tabulka níže popisuje jednotlivé směsi a specifikuje použitou aktivaci. [32]

Tabulka 8: Označení jednotlivých receptur [32]

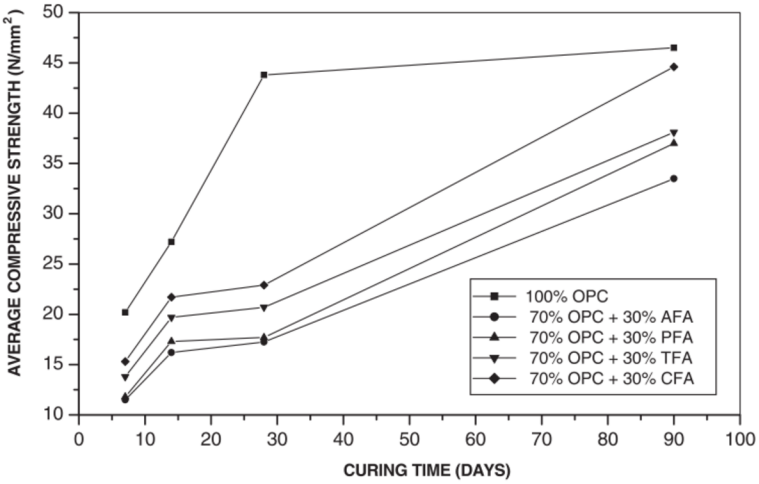
Označení	Specifikace
OPC	Referenční záměs
AFA	Surový (neupravený) popílek
PFA	Mechanicky aktivovaný popílek
TFA	Termálně aktivovaný popílek
CFA	Chemicky aktivovaný popílek



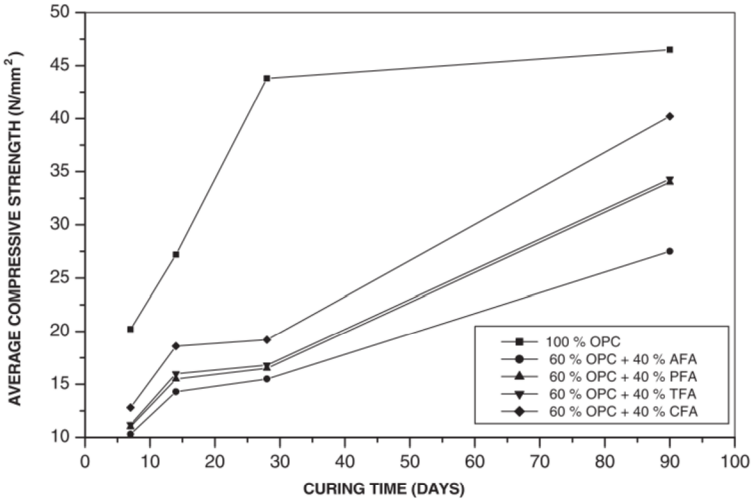
Obrázek 16: Závislost pevnosti v tlaku na době zrání při 10% nahrazením cementu popílkem [32]



Obrázek 17: Závislost pevnosti v tlaku na době zrání při 20% nahrazením cementu popílkem [32]



Obrázek 18: Závislost pevnosti v tlaku na době zrání při 30% nahrazením cementu popílkem [32]



Obrázek 19: Závislost pevnosti v tlaku na době zrání při 40% nahrazením cementu popílkem [32]

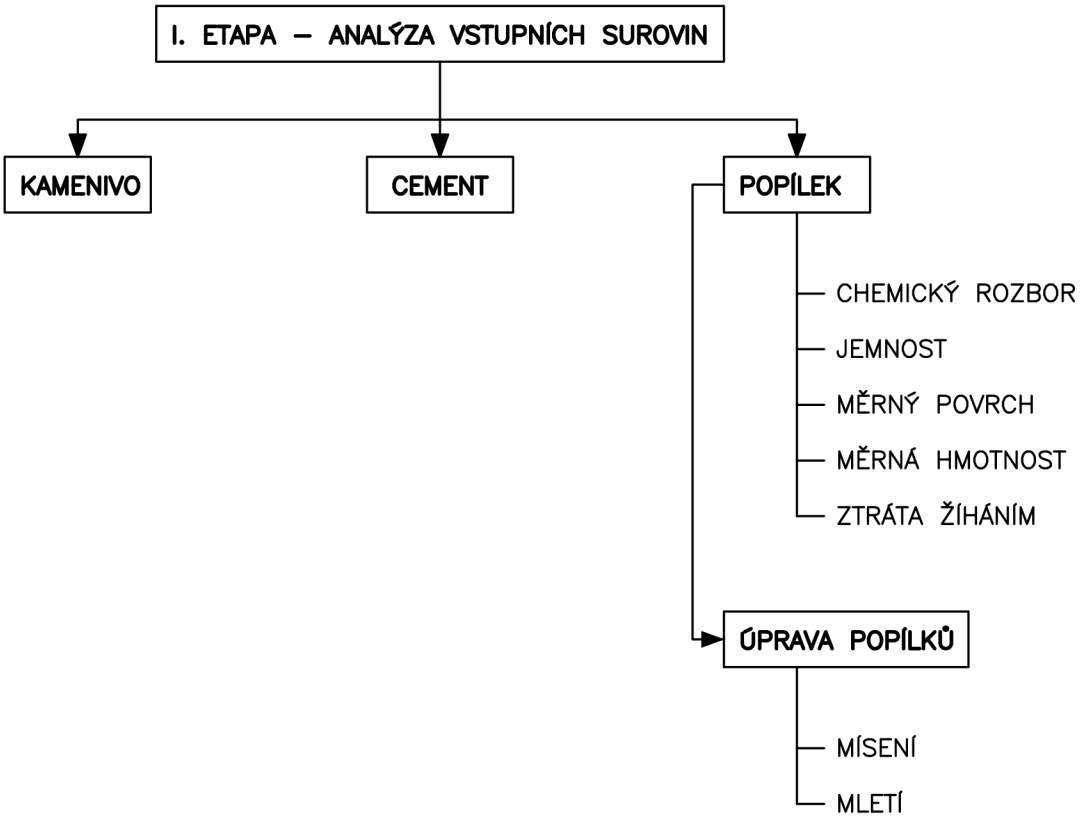
Průměrná hodnota pevnosti v tlaku v závislosti na době zrání je graficky znázorněna na Obrázek 16–19. V těchto výstupech je možno pozorovat předpokládaný nárůst pevností v tlaku v závislosti na době zrání. Stejný trend byl pozorován i v popílkových betonech bez ohledu na množství nahrazeného popílku nicméně vždy s odlišnou směrnicí. V případě 10% náhrady cementu chemicky aktivovaný popílek dosahuje vyšších pevností již po 14 dnech zrání vůči referenčnímu vzorku. Termálně a mechanicky aktivovaný popílek dosahuje obdobných pevností jako referenční směs až po 90 dnech. Ve variantě 20% náhrady popílku je možno pozorovat obdobný trend, nicméně cemento-popílkové kompozity obecně dosahují nižších pevností tlaku. Po 90 dnech zrání se hodnotám referenční směsi přibližuje pouze chemicky a termálně aktivovaný popílek. Nejnižších hodnot dosahuje neupravený popílek, který dosahuje cca 60 % účinnosti. Zde je možno konstatovat, že se zvyšující náhradou cementu popílkem klesá pevnost v tlaku. Z grafického znázornění pro 30 a 40% náhradu cementu popílkem je možno pozorovat, že cemento-popílkové kompozity dosahují nízkých hodnot a jejich využitelnost z pohledu aktivní příměsi do betonu je omezena. Závěrem je možno konstatovat, že jako nejefektivnější metoda se jeví chemická aktivace, nicméně i termální a mechanická aktivace přináší určitý nárůst vůči maltě s neupraveným popílkem. [32]

II. Praktická část

Cílem praktické části je vybrat několik druhů popílku z různých produkcí. Následně na těchto popílcích stanovit základní parametry a zjistit jejich reaktivitu pomocí indexu účinnosti, který bude stanoven dle ČSN EN 450–1. Vybrané popílky pomlet nebo smíchat v určitém poměru na danou jemnost či měrný povrch a opět ověřit jejich index účinnosti. Poté u vybraných popílků ověřit reologii v čase a morfologii zrn. V poslední části ověřit index účinnosti na cementových maltách o stejné konzistenci.

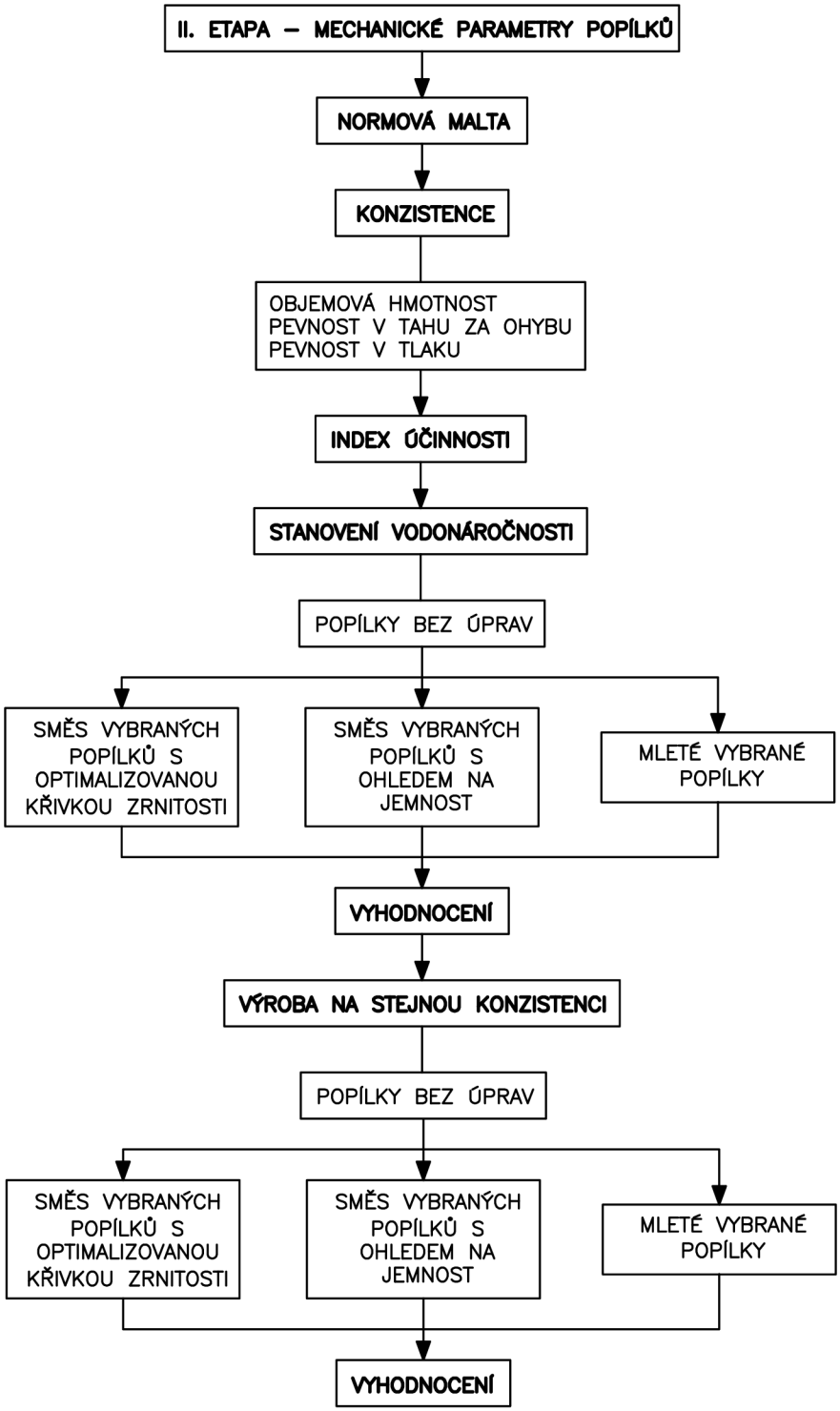
7 Metodika práce

Metodiku práce je možno rozdělit celkem do 3 etap. V první etapě bylo hlavním úkolem zvolit vhodné suroviny. Důraz byl kladen především na popílky, které tvoří hlavní část této práce. Popílky byly vybrány z různých elektráren na území České republiky, Slovenské republiky a Polska. Taktéž byly vybrány popílky z různých typů paliv. Z každé lokality byl zvolen vždy úletový a ložový popílek z důvodu porovnání vlastností a možnosti další úpravy. Na těchto vybraných surovinách byl následně proveden chemický rozbor, jemnost, měrný povrch, měrná hmotnost a ztráta žíháním. Následovala mechanická aktivace popílků, kdy popílek byl modifikován dvěma způsoby, a to konkrétně mísením a mletím. Mísení bylo prováděno celkem ve dvou různých režimech. První režim mísení byl s ohledem na výslednou křivku zrnitosti a druhý režim mísení byl s ohledem na výslednou jemnost. Mletí bylo prováděno obdobných způsobem, kdy v prvním případě byl popílek mlet na určitý měrný povrch a v druhém případě na určitou jemnost. Schéma etapy je názorně zobrazeno na obrázku níže.



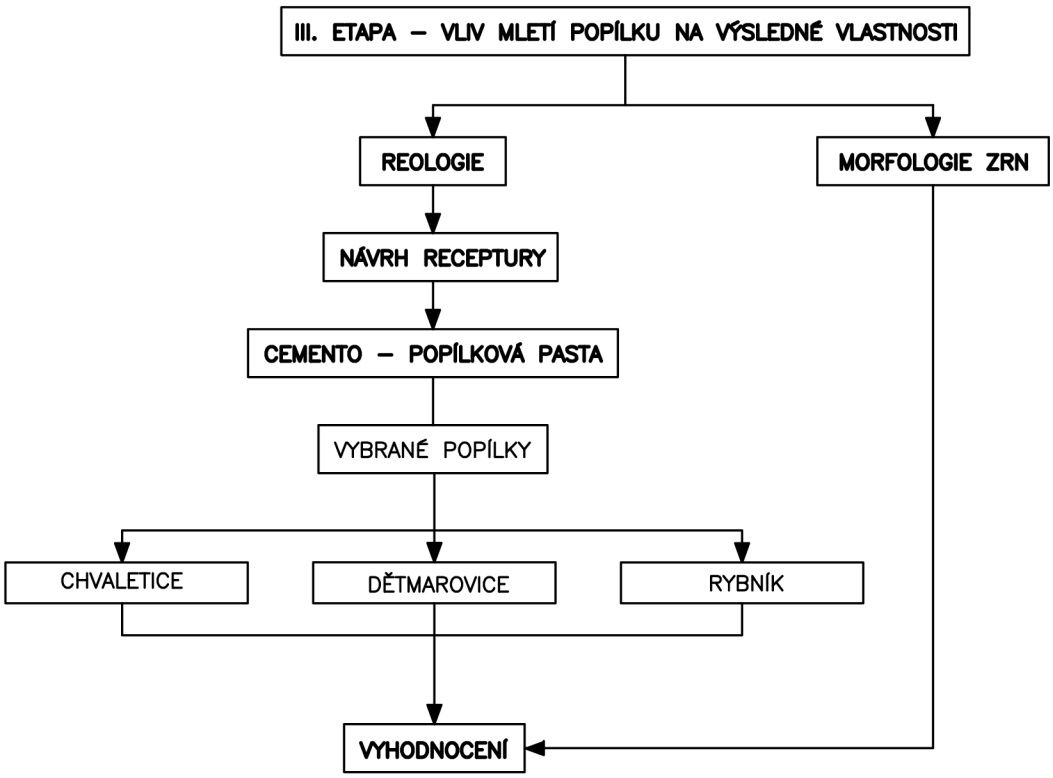
Obrázek 20: Schématické znázornění I. Etapy praktické části DP

V další etapě byly testovány mechanické parametry popílků. Všechny popílky byly testovány na normové maltě v poměru složek, jeden díl pojiva, tři díly písku a půl dílu vody. Při zkoušení jednotlivých popílků bylo 25 % cementu nahrazeno popílkem. Na maltě byla testována konzistence pomocí střásacího stolku. Následně byly vyrobeny zkušební tělesa a v zatvrdlém stavu byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Následně z těchto výsledků byl stanoven index účinnosti. Tuto metodiku je možno dále rozdělit na další 2 části, kdy v první části byly popílky a jejich modifikace testovány z hlediska stejného obsahu vody dle ČSN EN 450-1. Ve druhé části byly popílky a jejich modifikace testovány z hlediska stejné konzistence. Následně byly všechny výsledky vyhodnoceny a porovnány.



Obrázek 21: Schématické znázornění II. Etapy praktické části DP

V poslední etapě této práce byl ověřen vliv modifikace popílku na výsledné vlastnosti. Ověření vlastností proběhlo na dvou různých úrovních. Chování systému popílek-cement z hlediska reologie byl ověřen na cemento-popílkových pastách. Byly testovány popílky z celkem 3 lokalit, kdy byl vždy testován úletový popílek, ložový popílek a upravený popílek, v tomto konkrétním případě se jednalo o mletý popílek. Dále byl ověřen vliv aktivace popílku na morfologii zrn, kde byla porovnána zrna v jednotlivých stádiích. Schéma poslední etapy je zobrazeno na obrázku níže.



Obrázek 22: Schématické znázornění III. Etapy praktické části DP

8 I. ETAPA – Analýza vstupních surovin

8.1 Popílek

Pro výrobu cementových malt byly použity popílky z různých tepelných elektráren. Konkrétně byl použit hnědouhelný popílek z tepelné elektrárny Chvaletice, která se nachází v Pardubickém kraji. Dále se jednalo o černouhelný popílek z tepelné elektrárny Dětmarovice, která se nachází v Moravskoslezském kraji. Další černouhelný popílek byl z tepelné elektrárny Rybnik, která se nachází na území Polska nedaleko českých hranic. Poslední byl použit hnědouhelný popílek a škváro-popílková směs z tepelné elektrárny Nováky na území Slovenska. Označení výše uvedených popílku je znázorněno v tabulce níže.

Tabulka 9: Označení popílků

Označení popílku	Lokalita	Palivo	Specifikace
CHH	Chvaletice	Hnědé uhlí	Hrubý
CHJ			Jemný
DĚH	Dětmarovice	Černé uhlí	Hrubý
DĚJ			Jemný
RYJ	Rybnik	Černé uhlí	Jemný
RYH			Hrubý
NOŠ	Nováky	Hnědé uhlí	Škváro-popílková směs
NOJ			jemný

8.1.1 Výsledky analýz

Na vybraných popílcích byly stanoveny následující vlastnosti:

- Chemický rozbor
- Jemnost
- Měrná hmotnost
- Měrný povrch
- Ztráta žíháním

Chemický rozbor vstupních surovin byl proveden akreditovanou chemickou laboratoří Labtech, s.r.o. Zastoupení složek je přehledně zaznamenáno do tabulky níže.

Tabulka 10: Chemické složení popílků

Ozn.	SiO_2 [%]	Al_2O_3 [%]	Fe_2O_3 [%]	CaO [%]	CaO volné [%]
CHH	54,5	29,7	8,97	1,39	0,10
CHJ	55,2	27,9	7,05	1,35	0,01
DĚH	62,9	20,1	6,98	2,40	0,17
DĚJ	53,9	25,2	7,13	2,79	0,13
RYJ	54,0	27,7	6,72	3,21	0,01
RYH	53,6	22,1	7,51	2,76	0,02
NOŠ	51,3	17,2	9,43	5,65	0,03
NOJ	48,3	16,3	9,55	6,29	0,01

Výsledky stanovení měrné hmotnosti, měrného povrchu, jemnosti a ztráty žíhání jsou uvedeny v tabulce níže. Z výsledků je možno pozorovat, že hrubé popílky nevyhovují požadavkům normy ČSN EN 450–1 na výslednou jemnost, která činí pro kategorii N maximálně 40 % hmotnosti a pro kategorii S maximálně 12 % hmotnosti. Z pohledu ztráty žíháním, hrubý popílek z produkce Rybnik nesplňuje požadavky normy ČSN EN 450–1. [9]

Tabulka 11: Fyzikální vlastnosti popílků

Ozn.	Měrná hmotnost [$g \cdot cm^{-3}$]	Měrný povrch [$cm^2 \cdot g^{-1}$]	Jemnost [%]	Ztráta žíháním [%]
CHH	2,07	1273	82,5	1,2
CHJ	2,22	5565	19,1	1,6
DĚH	2,07	520	97,5	0,6
DĚJ	2,23	3205	43,5	2,0
RYJ	2,26	3080	44,0	2,9
RYH	2,10	685	90,5	27,1
NOŠ	2,09	7935	15,0	7,4
NOJ	2,13	6525	29,7	5,3

8.1.2 Úprava popílků

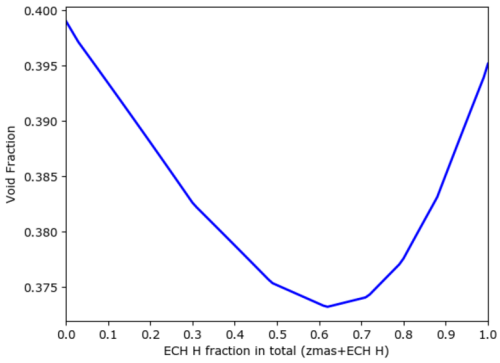
V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé aktivace popílků. Upravovány byly především ložové (hrubé) popílky z elektráren Chvaletice, Dětmarovice a Rybnik. Zlepšení reaktivity popílku bylo prováděno mechanickou aktivací, a to konkrétně mísením a mletím.

8.1.2.1 Mísení

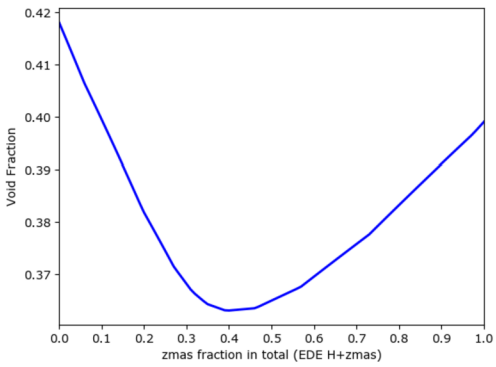
Jednou z možností zvýšení vazného potenciálu popílku bez dalších úprav je mísení. Pro výrobu směsi byly vybrány ložové (hrubé) popílky z elektrárny Chvaletice, Dětmarovice a Rybnik. Všechny tyto popílky byly míseny v různých poměrech s popílkem Nováky, přičemž tento popílek je velice jemnozrnný. Byly použity dva rozdílné postupy mísení. První postup mísení byl navržen s optimalizovanou křivku zrnitosti, tedy minimální mezerovitostí v suchém stavu. Druhý postup mísení byl navržen s ohledem na vyhovující jemnost (cca 40 až 45 %), kterou požaduje norma ČSN EN 450–1. Konkrétní poměry mísení a výsledné parametry směsí jsou názorně uvedeny v tabulkách níže.

- **Směs vybraných popílků s ohledem na optimalizovanou křivku zrnitosti**

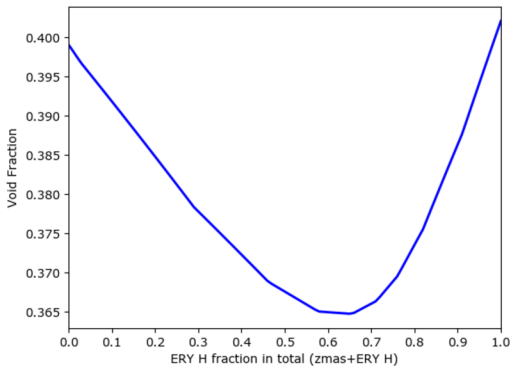
  Stanovení optimálního mísícího poměru pomocí softwaru.



Obrázek 23: Směs popílku CHH + NOŠ



Obrázek 24: Směs popílku DĚH + NOŠ



Obrázek 25: Směs popílku RYH + NOŠ

Tabulka 12: Optimalizace kombinace hrubých a jemných popílků bez předešlých úprav s ohledem na minimální mezerovitost směsí

Ozn.	Specifikace	Poměr míchání – objemově		Teoretická porozita [%]	Jemnost [%]	Měrný povrch [$cm^2 \cdot g^{-1}$]
		% (hrubý)	% (směs)			
CHH+NOŠ	Chvaletice HRUBÝ + Nováky směs	62	38	37,32	62,4	4580
DĚH+NOŠ	Dětmarovice HRUBÝ + Nováky směs	60	40	36,31	71,4	4220
RYH+NOŠ	Rybnik HRUBÝ+ Nováky směs	65	35	36,47	73,7	4520

Pozn. Navržené směsi nevyhovují na jemnost dle ČSN EN 450–1

- **Směs vybraných popílků s ohledem na vyhovující výslednou jemnost dle ČSN EN 450-1**

Tabulka 13: Optimalizace kombinace hrubých a jemných popílků bez předešlých úprav s ohledem na vyhovující jemnost

Ozn.	Specifikace	Poměr míchání – objemově		Jemnost [%]	Měrný povrch [$cm^2 \cdot g^{-1}$]
		% (hrubý)	% (směs)		
(CHH+NOŠ) _1	Chvaletice HRUBÝ + Nováky směs	40	60	44,1	6440
(DĚH+NOŠ) _1	Dětmarovice HRUBÝ + Nováky směs	30	70	42,4	6480
(RYH+NOŠ) _1	Rybnik HRUBÝ+ Nováky směs	30	70	43,7	6780

8.1.2.2 Mletí

Další možností zvýšení reaktivity hrubých popílků je mletí, které je podrobně popsáno v teoretické částí této práce. V tomto konkrétním případě bylo mletí provedeno za pomoci planetárního kulového mlýna PULVERISETTE 6 od firmy FRITSCH.

Obrázek 26: Planetární kulový mlýn

Obrázek 27: Mlecí médium

Pro aktivaci mletím byl zvolen popílek Chvaletice, Dětmarovice a Rybnik. Mletí bylo prováděno ve dvou režimech, kdy první mletí bylo s ohledem na výsledný měrný povrch, který byl stanoven na cca 3500 až 4000 $cm^2 \cdot kg^{-1}$. Druhé mletí bylo prováděnou s ohledem na výslednou jemnost, která byla stanovena na 40 %. Navážka popílku pro jednotlivé doby mletí byla 60 g. Na základě těchto požadavků byl stanoven čas mletí a otáčky. Veškeré parametry jsou názorně zobrazeny v tabulkách níže.

- **Mleté popílky s ohledem na výsledný měrný povrch**

Tabulka 14: Parametry mletí popílku s ohledem na výsledný měrný povrch

Označení	Specifikace	Mletí		Měrný povrch [$cm^2 \cdot g^{-1}$]	Jemnost [%]
		Doba [min]	Otáčky [min]		
CHH_1	Chvaletice	2	300	3830	37,5
DĚH_1	Dětmarovice	2	500	3800	20,7
RYH_1	Rybnik	2	420	3560	25,2

- **Mleté popílky s ohledem na výslednou jemnost**

Tabulka 15: Parametry mletí popílku s ohledem na výslednou jemnost

Označení	Specifikace	Mletí		Měrný povrch [$cm^2 \cdot g^{-1}$]	Jemnost [%]
		Doba [min]	Otáčky [min]		
CHH_1	Chvaletice	2	300	3830	37,5
DĚH_2	Dětmarovice	2,5	300	2420	41,5
RYH_2	Rybnik	2,5	300	2880	40,4

8.2 Cement

Pro výrobu zkušebních těles byl použit balený portlandský cement s označením CEM I 42,5 R dle ČSN EN 197–1. Výrobcem je Českomoravský cement, a.s., Závod Mokrá.

8.3 Kamenivo

Pro výrobu zkušebních těles bylo použito těžené kamenivo z lomu Žabčice frakce 0-4 mm. Dle normy ČSN EN 196–1 by mělo být použito normované křemičité kamenivo, nicméně bylo zvoleno jemné kamenivo odpovídající normě ČSN EN 12 620, tedy kamenivo použitelné pro výrobu betonu.

8.4 Voda

Pro výrobu zkušebních těles byla použita voda z vodovodního řádu výzkumného Centra AdMaS.

9 II. ETAPA – Mechanické parametry popílků

9.1 Prováděné zkoušky a postupy

9.1.1 Výroba malty

Zkušební tělesa byla vyrobena dle normy ČSN EN 196–1. Poměr jednotlivých složek dle hmotnosti byl následující: jeden díl cementu, tři díly písku a půl dílu vody. Ve variantě zkušební malty je vždy 25 % cementu nahrazeno příslušným popílkem. Konkrétní dávky jednotlivých složek jsou uvedeny v Tabulce 16. Jedná se o dávku surovin pro výrobu malty na jednu zkušební formu, tj. pro 3 zkušební tělesa tvaru hranolu. Postup dávkování je názorně zobrazen v Tabulce 17.

Tabulka 16: Složení malty pro výrobu jedné zkušební formy

Surovina	Referenční malta	Zkušební malta
Cement	450 g	337,5 g
Popílek	-	112,5 g
Písek	1350 g	1350 g
Voda	225 g	225 g

Tabulka 17: Metodika výroby zkušebních těles

Pracovní úkon	Celkový čas [s]
Vnesení vody a cementu do míchačky a její zapnutí	0–10
Míchání nízkou rychlostí	0–30
Vnesení písku	30–60
Míchání vysokou rychlostí	60–90
Odpočívání směsi a setření malty z lopatek	90–180
Míchání vysokou rychlostí	180–240

Ihned po přípravě byla malta přesunuta do formy pro výrobu tří zkušebních těles o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Formy byly plněny ve dvou vrstvách a následně hutněny na vibračním stole. Poté byly formy přikryty fólií a uloženy na příslušené místo. Zkušební tělesa byla vyjmuta z formy po 24 hodinách od výroby, následně byla označena a uložena do vodního prostředí. Od každé záměsi byly vždy zhotoveny celkem 4 formy, tj. 12 zkušebních těles pro další zkoušení.

9.1.2 Stanovení konzistence čerstvé malty

Zkouška konzistence čerstvé malty byla provedena dle ČSN EN 1015–3. Podstatou zkoušky je hodnota rozlití malty, která se stanoví změřením průměru rozlitého vzorku čerstvé malty umístěné na předepsané desce střásacího stolku pomocí předepsaného kovového kužele po předepsaném počtu svislých pádů, při nichž se deska střásacího stolku zvedá a pak volně padá z předepsané výšky. [35]

Obrázek 28: Střásací stolek

9.1.3 Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu

Stanovení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu bylo stanoveno dle postupu uvedeného níže. Na základě hmotnosti a rozměrů zkušebního tělesa byla zjištěna objemová hmotnost dle výpočtového vztahu uvedeného níže.

$$D = \frac{m}{V}$$

D… objemová hmotnost [kg·m^{-3}]

m… hmotnost [kg]

V… objem [m^3]

Objemová hmotnost byla vyjádřena s přesností na 10 kg·m^{-3}.

9.1.4 Pevnost v tahu za ohybu

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu bylo prováděno dle ČSN EN 196–1. Zkouška byla prováděla na normalizovaných zkušebních tělesech o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Výsledná pevnost v tahu za ohybu byla vypočtena dle vztahu uvedeného níže.

$$R_t = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2}$$

R_t … pevnost v tahu ohybem [N·mm^{-2}]

F … maximální zatížení [N]

l … vzdálenost podpor [mm]

b … šířka tělesa [mm]

h … výška tělesa [mm]

Pevnost v tahu ohybem se vyjádří s přesností na 0,1 N·mm^{-2}. [36]

9.1.5 Pevnost v tlaku

Stanovení pevnosti v tlaku bylo prováděno dle ČSN EN 196–1. Zkouška se provádí na polovinách trámečků zlomených při stanovení pevnosti v tahu za ohybu. Pevnost v tlaku i v tahu za ohybu byla stanovena ve stáří 2, 7, 28, 56 a 90 dní. Výsledná pevnost v tlaku byla vypočtena dle vztahu uvedeného níže.

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

R_c … pevnost tlaku [N·mm^{-2}]

F_c … maximální zatížení [N]

1600 … plocha destiček (40 mm × 40 mm), pokud výška tělesa b>40, potom se uvažuje (40 mm × b)

Pevnost v tlaku se vyjádří s přesností na 0,1 N·mm^{-2}. [36]

9.1.6 Index účinnosti

Reaktivita popílků byla stanovena dle indexu účinnosti, který je definován v normě ČSN EN 450–1. Stanovení indexu účinnosti se provádí na zkušebních tělesech, které jsou tvaru hranolu o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Výroba probíhá dle postupu uvedeného výše s tím, že 25 % z cementu se nahradí popílkem. Referenční malta je vyrobena pouze z cementu. Popílek je v souladu s normou, dosáhne-li pevnost v tlaku po 28 dnech minimálně 75 % pevnosti v tlaku referenční malty a po 90 dnech minimálně 85 % pevnosti v tlaku referenční malty. [9]

V 2. části II. Etapy diplomové práce byla zkušební tělesa vyrobena na stejnou konzistenci – obsah vody není konstantní. Nejedná se již o normovou maltu a nevyhovuje tedy normě ČSN EN 450–1, nicméně postup stanovení a vyhodnocení byl zachován z důvodu porovnání výsledků.

9.2 Vyhodnocení výsledků zkoušek

9.2.1 Stanovení vodonáročnosti (stejný vodní součinitel dle ČSN EN 450–1)

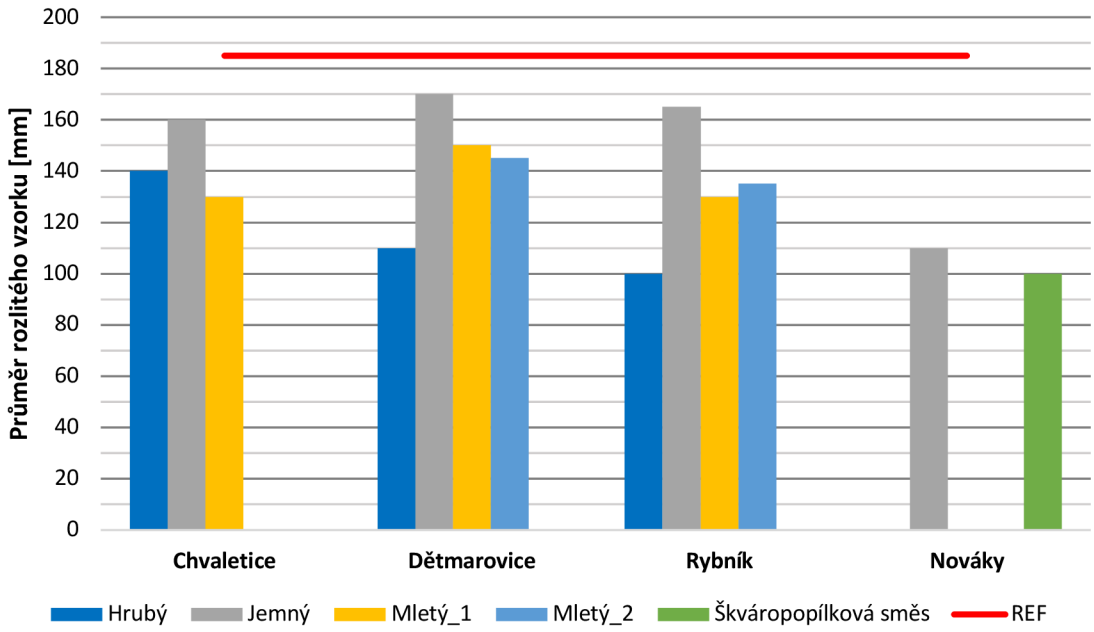
9.2.1.1 Konzistence

Tabulka 18: Konzistence – vybrané popílky bez úprav

Označení	Lokalita	Konzistence [mm]	w [-]
REF	-	185	0,5
CHH	Chvaletice	140	0,5
CHJ		160	0,5
DĚH	Dětmarovice	110	0,5
DĚJ		170	0,5
RYJ	Rybnik	165	0,5
RYH		100	0,5
NOŠ	Nováky	100	0,5
NOJ		110	0,5

Tabulka 19: Konzistence – mleté popílky

Označení	Lokalita	Konzistence [mm]	w [-]
CHH _1	Chvaletice	130	0,5
DĚH _1	Dětmarovice	150	0,5
RYH _1	Rybnik	130	0,5
DĚH _2	Dětmarovice	145	0,5
RYH _2	Rybnik	135	0,5



Graf 1: Grafické znázornění průměru rozlití neupravených a upravených popílků (stejný vodní součinitel)

Z grafického znázornění je patrné, že popílky obecně zhoršují zpracovatelnost čerstvých malt. Jemné popílky zhoršují zpracovatelnost pouze mírně. Konkrétní hodnota poklesu vůči referenčnímu vzorku je u popílku Chvaletice 25 mm, u popílku Dětmarovice 15 mm a u popílku Rybnik 20 mm, jejich použití z pohledu zpracovatelnosti je tedy bezproblémové. Nicméně u jemného popílku Nováky bylo dosaženo hodnot rozlití pouze 110 mm. Tento výsledek mohl být zapříčiněný vysokou jemností daného popílku. Hrubé popílky, konkrétně Dětmarovice (110 mm) a Rybnik (100 mm), zhoršují zpracovatelnost natolik, že se směs stává prakticky nezpracovatelnou z pohledu běžného využití. Nízká míra rozlití u hrubého popílku z produkce Rybnik je způsobena morfologii zrn, kdy zrna tohoto popílku nejsou ideálního kulovitého tvaru (viz. III. Etapa – Morfologie zrn). V případě hrubého popílku Chvaletice hodnota rozlití byla 140 mm. Z pohledu mletí popílku byl zjištěn negativní vliv na zpracovatelnost, která se snížila o 10 mm.

Naopak mleté popílky z Dětmarovic a Rybniku dosahovaly lepší zpracovatelnosti, konkrétní zlepšení bylo v rozmezí 30–40 mm. Tento výsledek zcela koresponduje s poznatky z teoretické části. Obecně nejhorší zpracovatelnost je možné pozorovat u škváro-popílkové směsi Nováky, kdy rozlití zkušebního tělesa bylo takřka nulové. Tento výsledek je pravděpodobně zapříčiněn jemností popílku, kdy se jedná o velmi jemný popílek a k omočení veškerých zrn je potřeba větší množství vody. Působení na rozhraní cement – popílek je detailně rozebráno v III. Etapě této práce (Reologie).

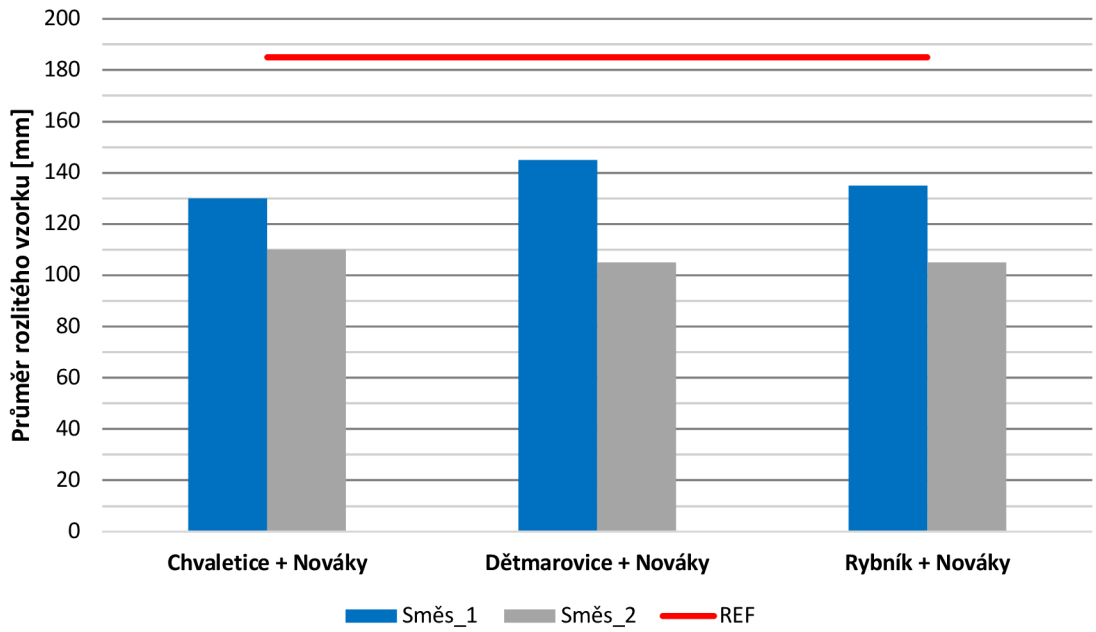
Obrázek 29: Fotodokumentace zkoušky stanovení konzistence

Tabulka 20: Konzistence – směs vybraných popílků bez úprav s optimalizovanou křivkou zrnitosti

Označení	Lokalita	Konzistence [mm]	w [-]
CHH+NOŠ	Chvaletice + Nováky	130	0,5
DĚH+NOŠ	Dětmarovice + Nováky	145	0,5
RYH+NOŠ	Rybnik + Nováky	135	0,5

Tabulka 21: Konzistence – směs vybraných popílků bez úprav s ohledem na vyhovující výslednou jemnost

Označení	Lokalita	Konzistence [mm]	w [-]
(CHH+NOŠ) _1	Chvaletice + Nováky	110	0,5
(DĚH+NOŠ) _1	Dětmarovice + Nováky	105	0,5
(RYH+NOŠ) _1	Rybnik + Nováky	105	0,5



Graf 2: Grafické znázornění průměru rozlití u míchaných popílků

*Směs_1 - směs popílků s optimalizovanou křivkou zrnitosti, Směs_2 - směs popílku s ohledem na výslednou jemnost

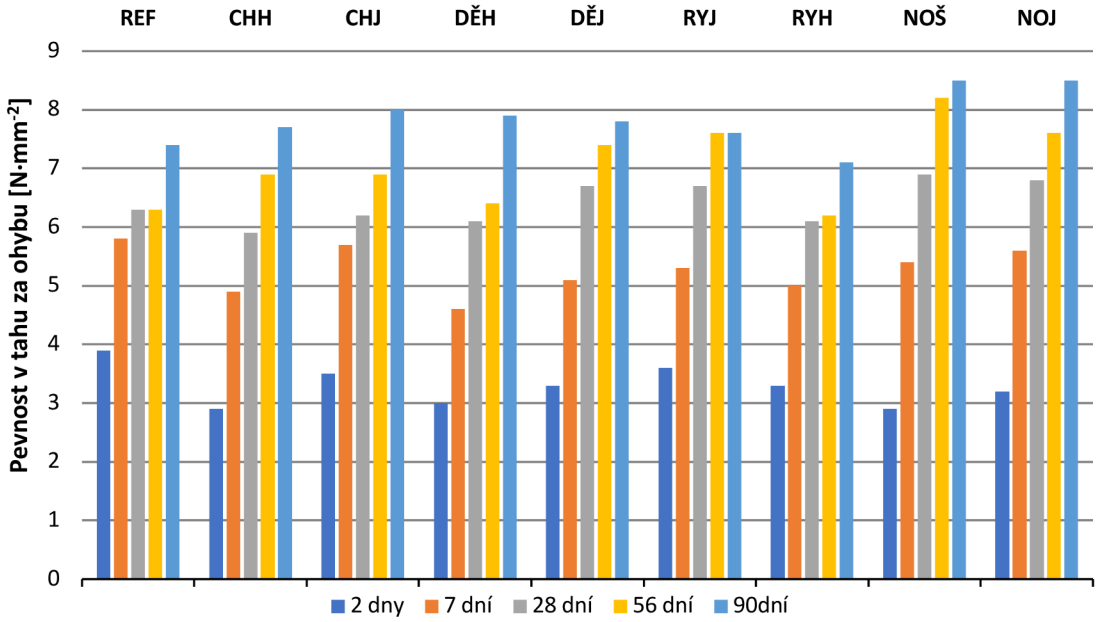
V případě směsi popílků s optimalizovanou křivkou zrnitostí u popílku Dětmarovice a Rybnik se zpracovatelnost zlepšila o cca 35 mm vůči neupravenému popílku. Naopak u popílku Chvaletice se hodnota rozlití zkušebního vzorku snížila o 10 mm. Možnou příčinou tohoto výsledku je smíchání neupravených popílků s ohledem na optimalizovanou křivkou zrnitostí, kde jsou doplněny chybějící frakce popílku a tím pádem se zlepšuje tekutost malty.

Ve variantě směsných popílků s ohledem na výslednou jemnost je zpracovatelnost na hodnotách blížící se rozlití 100 mm. U popílku Chvaletice je pokles vůči popílku bez úprav o cca 30 mm. U popílku Dětmarovice a Rybnik zůstává na obdobných hodnotách. S ohledem na vyhodnocení vybraných neupravených popílků tento výsledek bylo možné předpokládat, jelikož dominantní část této směsi tvoří škváro-popílková směs z elektrárny Nováky.

9.2.1.2 Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost

Tabulka 22: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – vybrané popílky

Označení	Objemová hmotnost [kg·m^{-3}]	Pevnost v tahu za ohybu [N·mm^{-2}]				
		2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
REF	2230	3,9	5,8	6,3	6,3	7,4
CHH	2180	2,9	4,9	5,9	6,9	7,7
CHJ	2230	3,5	5,7	6,2	6,9	8,0
DĚH	2130	3,0	4,6	6,1	6,4	7,9
DĚJ	2230	3,3	5,1	6,7	7,4	7,8
RYJ	2240	3,6	5,3	6,7	7,6	7,6
RYH	2160	3,3	5,0	6,1	6,2	7,1
NOŠ	2190	2,9	5,4	6,9	8,2	8,5
NOJ	2210	3,2	5,6	6,8	7,6	8,5



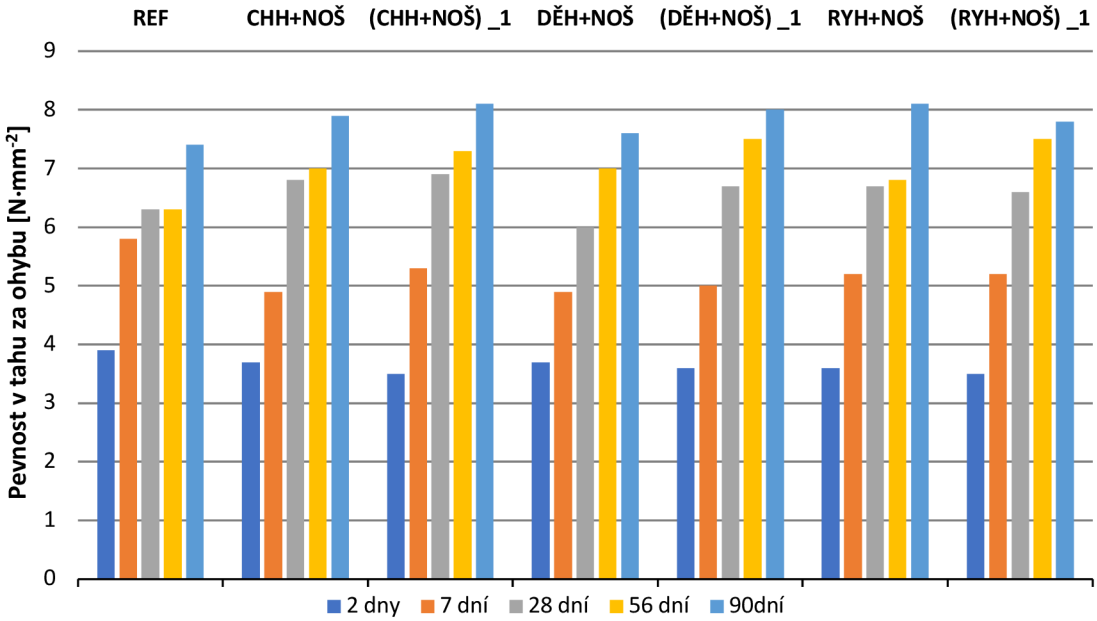
Graf 3: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu – vybrané popílky

Tabulka 23: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – směs vybraných popílků bez úprav s optimalizovanou křivkou zrnitosti

Označení	Objemová hmotnost [kg·m^{-3}]	Pevnost v tahu za ohybu [N·mm^{-2}]				
		2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
CHH+NOŠ	2180	3,7	4,9	6,8	7,0	7,9
DĚH+NOŠ	2180	3,7	4,9	6,0	7,0	7,6
RYH+NOŠ	2190	3,6	5,2	6,7	6,8	8,1

Tabulka 24:Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – směs vybraných popílků bez úprav s ohledem na vyhovující výslednou jemnost

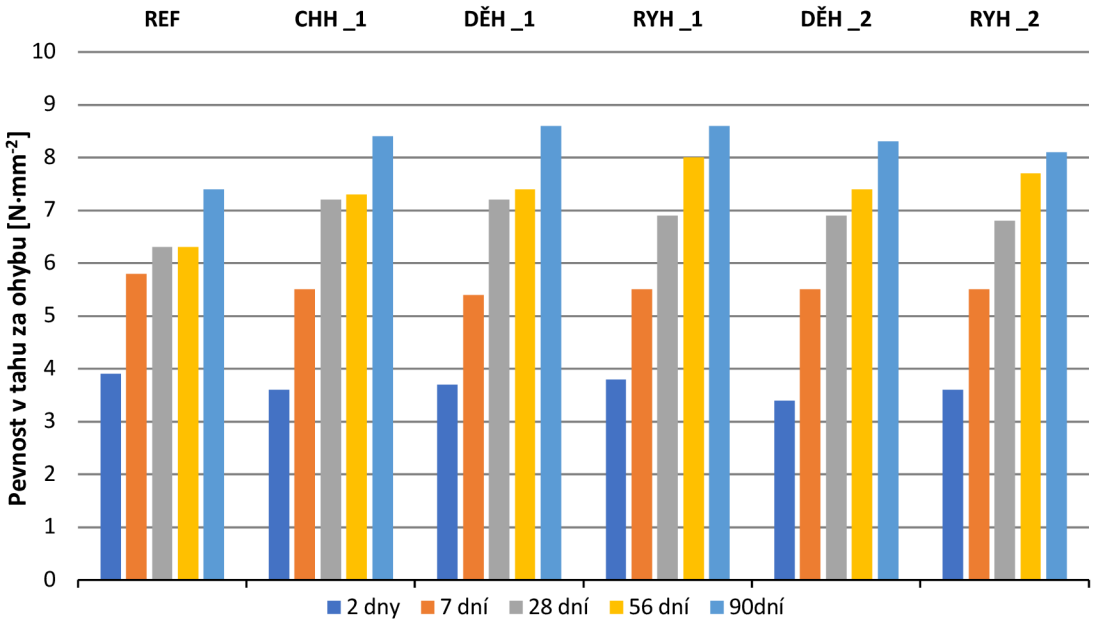
Označení	Objemová hmotnost [kg·m^{-3}]	Pevnost v tahu za ohybu [N·mm^{-2}]				
		2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
(CHH+NOŠ) _1	2200	3,5	5,3	6,9	7,3	8,1
(DĚH+NOŠ) _1	2180	3,6	5,0	6,7	7,5	8,0
(RYH+NOŠ) _1	2180	3,5	5,2	6,6	7,5	7,8



Graf 4: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu – míchané popílky

Tabulka 25: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – mleté popílky

Označení	Objemová hmotnost [kg·m^{-3}]	Pevnost v tahu za ohybu [N·mm^{-2}]				
		2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
CHH _1	2240	3,6	5,5	7,2	7,3	8,4
DĚH _1	2240	3,7	5,4	7,2	7,4	8,6
RYH _1	2250	3,8	5,5	6,9	8,0	8,6
DĚH _2	2230	3,4	5,5	6,9	7,4	8,3
RYH _2	2240	3,6	5,5	6,8	7,7	8,1

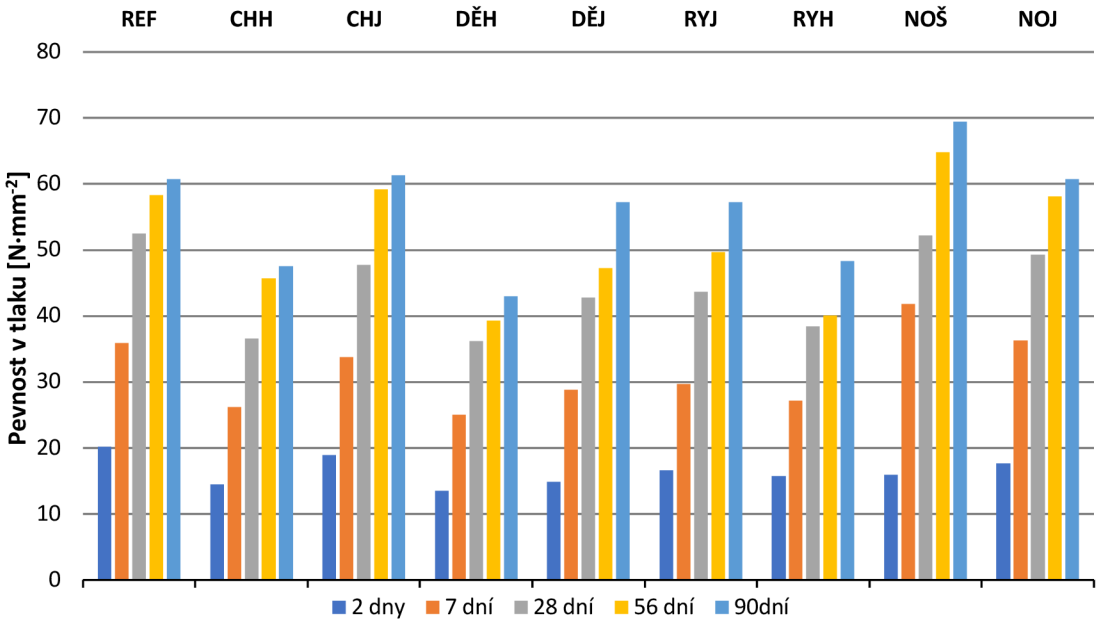


Graf 5: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu – mleté popílky

9.2.1.3 Pevnost v tlaku

Tabulka 26: Pevnost v tlaku – vybrané popílky bez úprav

Označení	Pevnost v tlaku [N·mm^{-2}]				
	2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
REF	20,2	35,9	52,5	58,3	60,7
CHH	14,5	26,2	36,6	45,7	47,5
CHJ	18,9	33,8	47,7	59,2	61,3
DĚH	13,5	25,0	36,2	39,3	43,0
DĚJ	14,9	28,8	42,8	47,2	57,2
RYJ	16,6	29,7	43,7	49,7	57,2
RYH	15,7	27,2	38,4	40,1	48,3
NOŠ	15,9	41,8	52,2	64,8	69,5
NOJ	17,7	36,3	49,3	58,1	60,7



Graf 6: Grafické znázornění pevnosti v tlaku – vybrané popílky

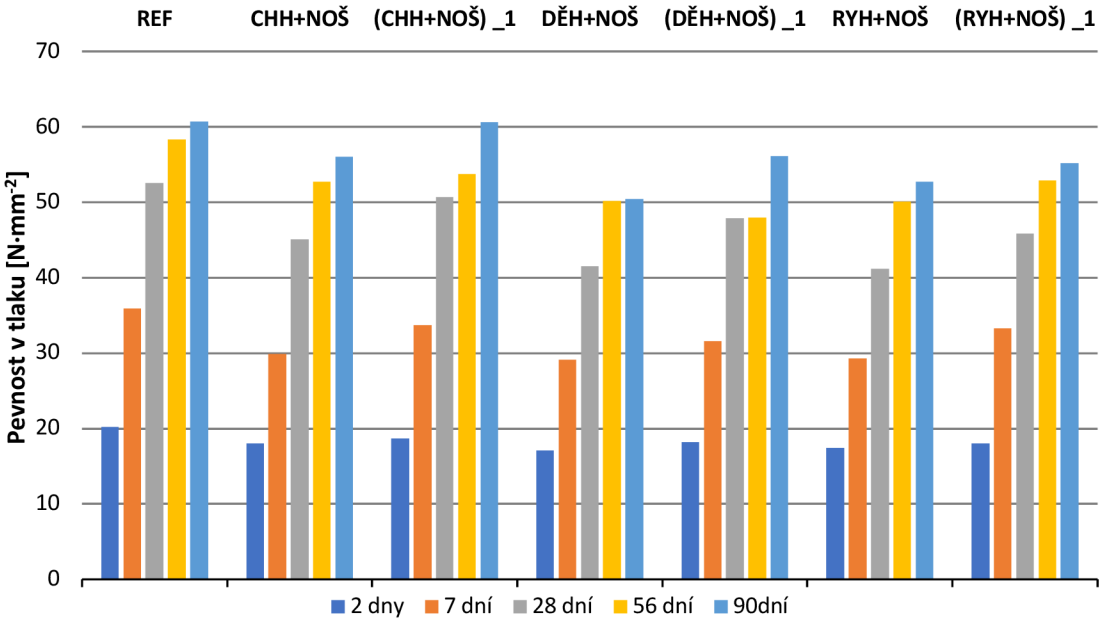
Z grafického znázornění je patrné, že na rozdíl od referenční malty narůstají tlakové pevnosti malt s popílky pomaleji. U referenční malty je možno pozorovat největší nárůst pevnosti od 2 do 28 dní zrání, následně rostou pevnosti už pomaleji. Tyto výsledky potvrzují předpokládané chování malt s popílky, které je způsobeno pucolánovou aktivitou. Výsledky uvedené výše je možno rozdělit na hrubé popílky a jemné. Hrubé popílky obecně dosahují nižších pevností než popílky jemné. Naopak nejvyšších pevností dosahuje popílek z elektrárny Nováky, kde se jedná o velmi jemné a reaktivní popílky. Konkrétní hodnoty je možno pozorovat v tabulce uvedené výše. Porovnání jednotlivých popílků vůči referenční maltě zcela jasně demonstruje index účinnosti, který je uveden a komentován v kapitolách níže.

Tabulka 27: Pevnost v tlaku – směs vybraných popílků bez úprav s optimalizovanou křivkou zrnitosti

Označení	Pevnost v tlaku [N·mm^{-2}]				
	2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
CHH+NOŠ	18,0	29,9	45,1	52,7	56,0
DĚH+NOŠ	17,1	29,1	41,5	50,2	50,4
RYH+NOŠ	17,4	29,3	41,2	50,1	52,7

Tabulka 28: Pevnost v tlaku – směs vybraných popílků bez úprav s ohledem na vyhovující výslednou jemnost

Označení	Pevnost v tlaku [N·mm^{-2}]				
	2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
(CHH+NOŠ) _1	18,7	33,7	50,7	53,7	60,6
(DĚH+NOŠ) _1	18,2	31,6	47,9	48,0	56,1
(RYH+NOŠ) _1	18,0	33,3	45,8	52,9	55,2

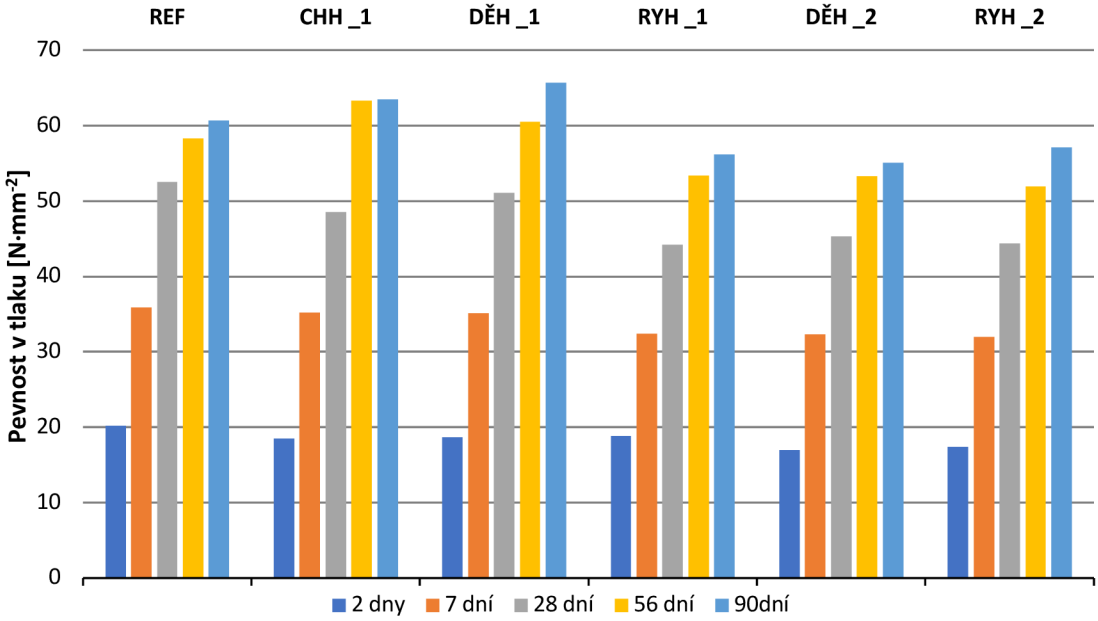


Graf 7: Grafické znázornění pevnosti v tlaku – míchané popílky

Výše uvedené grafické porovnání směsných popílků má obdobný průběh jako neupravené popílky s tím rozdílem, že dosahují vyšších hodnot. Obecně lze konstatovat, že popílky mísené s ohledem na výslednou jemnost dosahují mírně vyšších pevností vůči směsem popílků s optimalizovanou křivkou zrnitosti. Tento výsledek je způsoben poměrem mísením, jelikož dominantní část tvoří škváro-popílková směs Nováky, která dle výsledků uvedených výše dosahuje nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku. Konkrétní nárůst pevností vůči referenčnímu vzorku je názorně zobrazen v kapitole níže – Účinnost mísení.

Tabulka 29: Pevnost v tlaku – mleté popílky

Označení	Pevnost v tlaku [N·mm^{-2}]				
	2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
CHH _1	18,5	35,2	48,5	63,3	63,5
DĚH _1	18,7	35,1	51,1	60,5	65,7
RYH _1	18,8	32,4	44,2	53,4	56,2
DĚH _2	17,0	32,3	45,3	53,3	55,1
RYH _2	17,4	32,0	44,4	51,9	57,1



Graf 8: Grafické znázornění pevnosti v tlaku – mleté popílky

Mleté popílky díky své vyšší reaktivitě zvyšují pevnost v tlaku. Mírně vyšší pevnosti dosahují popílky mleté s ohledem na výsledný měrný povrch. Díky lepší reaktivitě popílku, je největší nárůst pevností patrný v rozmezí 2–28 dnů, v pozdějších stádiích je nárůst pevností již minimální. Konkrétní nárůsty pevností vůči neupraveným popílkům jsou názorně zobrazeny v kapitole – Účinnost mletí.

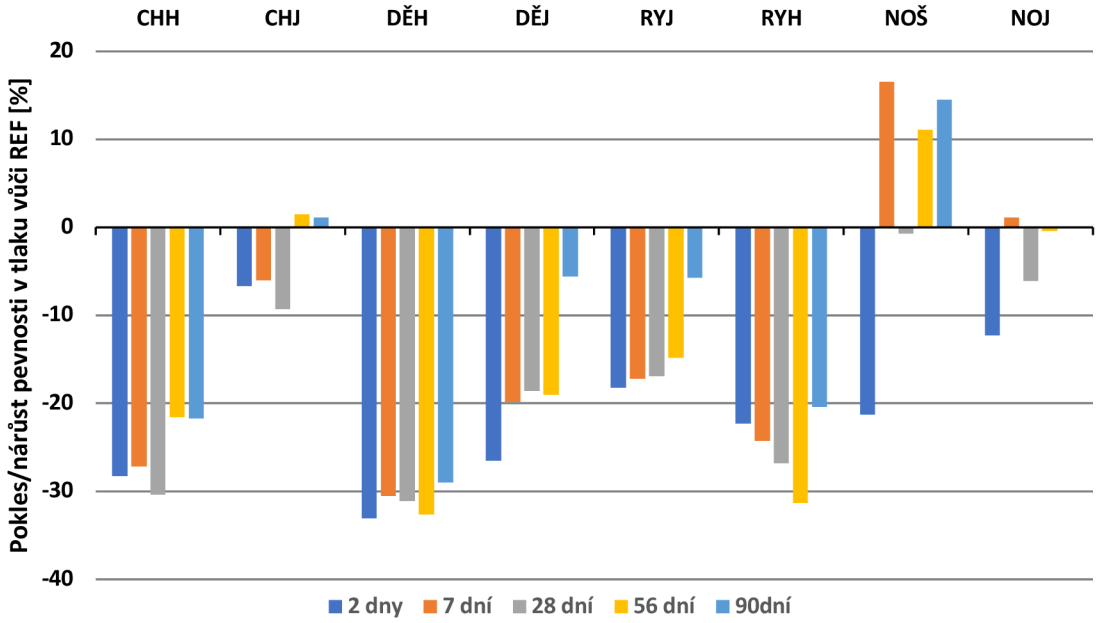
9.2.1.4 Index účinnosti

Tabulka 30: Index účinnosti – stejný vodní součinitel

Označení	Index účinnosti [%]				
	2 dny	7 dní	28 dní*1)	56 dní	90 dní*2)
REF	-	-	-	-	-
CHH	71,7	72,8	69,6	78,4	78,3
CHJ	93,3	94,0	90,7	101,5	101,1
DĚH	66,9	69,5	68,9	67,4	71,0
DĚJ	73,5	80,2	81,4	81,0	94,4
RYJ	81,8	82,8	83,1	85,2	94,3
RYH	77,7	75,7	73,2	68,7	79,6
NOŠ	78,7	116,5	99,3	111,1	114,5
NOJ	87,7	101,1	93,9	99,6	100,1

*1) dle ČSN EN 450-1 požadovaná hodnota po 28 dnech je minimálně 75 %

*2) dle ČSN EN 450-1 požadovaná hodnota po 90 dnech je minimálně 85 %



Graf 9: Grafické znázornění pevnosti v tlaku v porovnání s REF

Pro lepší porovnání osa x znázorňuje referenční maltu. Z grafického znázornění je patrné, že vybrané hrubé popílky nevyhovují požadavkům dle ČSN EN 450-1 a pro použití do cementového kompozitu je potřeba další modifikace. Hrubé popílky po 28 dnech dosahují cca 70 % a po 90 dnech zrání cca 70–80 %. Tento výsledek může být způsobem malou reaktivitou, která úzce souvisí s jemností popílku. Naopak jemné popílky ze stejné elektrárny splňují

požadavky dle normy. Po 28 dnech se hodnoty indexu účinnosti pohybují v rozmezí 80–90 %, nicméně v 90 dnech index účinnosti u vybraných jemných popílků atakuje či dokonce přesahuje hranici 100 %. Tento výsledek je zcela evidentně způsobem pucolánovou aktivitou a dostačující reaktivitou popílku. Jako extrémně reaktivní je možné hodnotit popílky z elektrárny Nováky. Škváro-popílková směs z elektrárny Nováky (NOŠ) přesahuje hranici 100 % už po 7 dnech zrání a po 90 dnech zrání dosahuje až 115 %. Jedná se o velice jemný, a vysoce reaktivní popílek. Z tohoto důvodu je tento popílek dále využíván pro mísení popílků. Obdobných hodnot dosahuje NOJ, který dosahuje po 28 dnech zrání cca 95 % a po 90 dnech 100 %. Obecně je možno konstatovat, že jemné popílky je možno použít do betonu jako aktivní příměsi bez další modifikace, nicméně ložové popílky pro jejich zužitkování je nutné dále upravit.

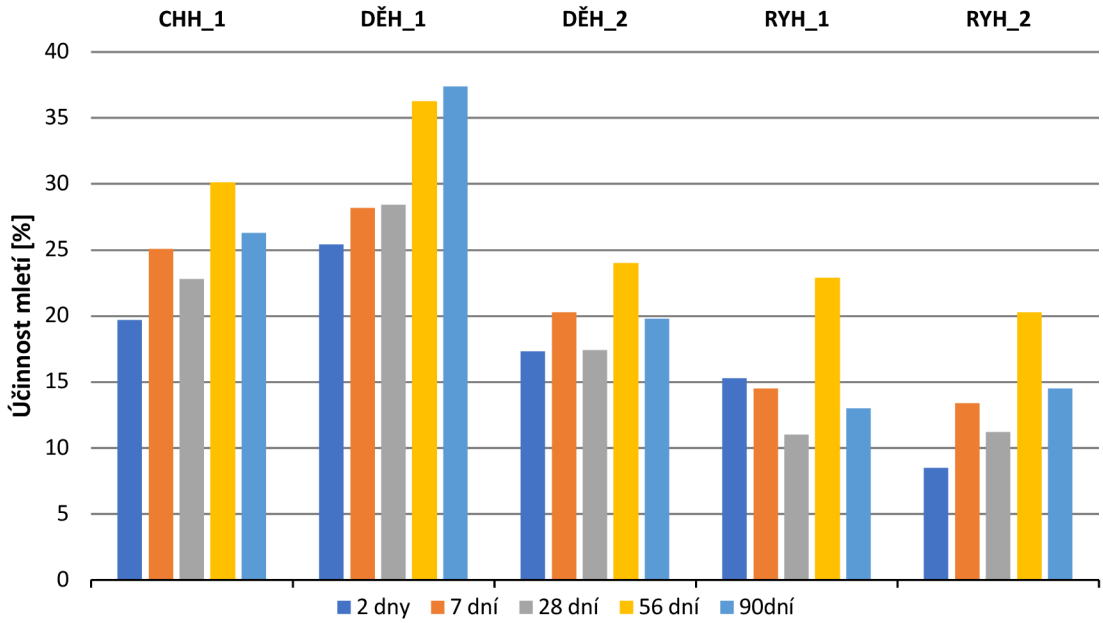
9.2.1.5 Účinnost mletí

Tabulka 31: Index účinnosti – mleté popílky (stejný vodní součinitel)

Označení	Index účinnosti [%]				
	2 dny	7 dní	28 dní*1)	56 dní	90 dní*2)
CHH	71,7	72,8	**69,6**	78,4	**78,3**
CHH_1	91,4	97,9	**92,4**	108,5	**104,6**
DĚH	66,9	69,5	**68,9**	67,4	**71,0**
DĚH_1	92,3	97,7	**97,3**	103,7	**108,4**
DĚH_2	84,2	89,8	**86,3**	91,4	**90,8**
RYH	77,7	75,7	**73,2**	68,7	**79,6**
RYH_1	93,0	90,2	**84,2**	91,6	**92,6**
RYH_2	86,2	89,1	**84,4**	89,0	**94,1**

*1) dle ČSN EN 450-1 požadovaná hodnota po 28 dnech je minimálně 75 %

*2) dle ČSN EN 450-1 požadovaná hodnota po 90 dnech je minimálně 85 %



Graf 10: Grafické znázornění účinnosti mletí v závislosti na čase

Účinnost mletí je vypočítána jako procentuální nárůst indexu účinnosti vůči neupravenému (hrubému) popílku z dané lokality. Z výsledků je patrné, že mletí má pozitivní účinek na pevnost v tlaku cemento-popílkové malty, a tím pádem i na index účinnosti, který vychází z pevnosti v tlaku. Z grafického porovnání, kde osa x odpovídá původní hodnotě indexu účinnosti hrubého popílku, je možno pozorovat značný nárůst pevnosti. Nejvyššího nárůstu pevností dosahují popílky z Dětmarovic a Chvaletic, které byly mleté na měrný povrch 3500–4000 $cm^2 \cdot kg^{-1}$. Nejlepších výsledků dosahuje popílek Dětmarovice, kde byl procentuální nárůst pevností v rozmezí 25–35 %. Následuje popílek Chvaletice s nárůstem v rozmezí 20–30 % vůči neupravenému hrubému popílku. Popílky mleté na výslednou jemnost 40 % dosahují nárůstu pevností pouze v rozsahu 10–20 %, nicméně i tento nárůst je dostačující. Díky tomuto nárůstu pevností veškeré mleté popílky splňují požadavky normy ČSN EN 450–1 a jejich použití jako aktivní příměsi do betonu je z hlediska indexu účinnosti bezproblémové. Tento výsledek souvisí především se změnou morfologie zrn, kdy jsou zrna rozdrcena na menší částice, díky kterým se popílek stává více reaktivní a tím pádem snáze reaguje a vytváří potřebné hydratační produkty. Výsledky účinnosti mletí korespondují s poznatky získané v teoretické části této práce.

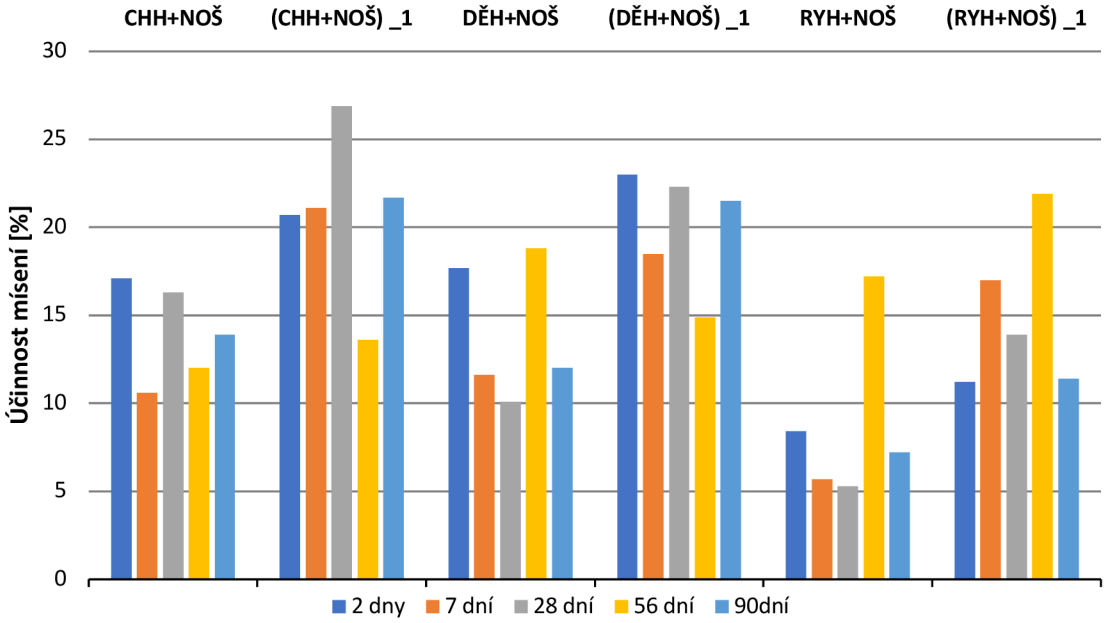
9.2.1.6 Účinnost mísení

Tabulka 32: Index účinnosti – míchané popílky (stejný vodní součinitel)

Označení	Index účinnosti [%]				
	2 dny	7 dní	28 dní*1)	56 dní	90 dní*2)
CHH	71,7	72,8	69,6	78,4	78,3
CHH+NOŠ	88,8	83,4	85,9	90,4	92,2
(CHH+NOŠ) _1	92,4	93,9	96,5	92,0	100,0
DĚH	66,9	69,5	68,9	67,4	71,0
DĚH+NOŠ	84,6	81,1	79,0	86,2	83,0
(DĚH+NOŠ) _1	89,9	88,0	91,2	82,3	92,5
RYH	77,7	75,7	73,2	68,7	79,6
RYH+NOŠ	86,1	81,4	78,5	85,9	86,8
(RYH+NOŠ) _1	88,9	92,7	87,1	90,6	91,0

*1) dle ČSN EN 450-1 požadovaná hodnota po 28 dnech je minimálně 75 %

*2) dle ČSN EN 450-1 požadovaná hodnota po 90 dnech je minimálně 85 %



Graf 11: Grafické znázornění účinnosti mísení v závislosti na čase

Účinnost mísení se vypočítá jako procentuální nárůst indexu účinnosti ve srovnání s hrubým popílkem bez úprav. Všechny směsi byly smíchány s velmi jemným, a tedy reaktivním popílkem z elektrárny Nováky (NOŠ). Měnil se pouze poměr mísení jednotlivých složek na základě požadavků. Z výsledků je možno pozorovat zvýšení indexu mísení v každém poměru i stáří. Konkrétně nejlepší výsledky je možno pozorovat u směsí popílku Chvaletice a Dětmarovice s ohledem

na výslednou jemnost, kdy nárůst vůči hrubému popílku je v rozmezí 15–25 %. Ve variantě směsí s optimalizovanou křivkou zrnitosti je možno procentuální nárůst zhodnotit v rozmezí cca 10–15 % u míchaných popílků Chvaletice a Dětmarovice. Obecně nižší nárůst pevností je možno pozorovat u směsí s hrubým popílkem Rybnik. V případě směsi s optimalizovanou křivkou zrnitosti je nárůst pouze 5–10 % (kromě zrání po 56 dnech), nicméně i tento nárůst je dostačující. Všechny varianty, díky mísení ve správném poměru splňují požadavky normy ČSN EN 450–1, kromě popílku Dětmarovice, který po 90 dnech zrání dosahoval 83,0 %, nicméně tato hodnota se blíží požadovaným 85,0 %. Narůst výsledných pevností je způsoben smícháním hrubého popílku s velmi jemným a reaktivním popílkem v daném poměru. Je možno konstatovat, že mísení má pozitivní vliv na výslednou pevnost a umožňuje zpracování hrubého (ložového) popílku.

9.2.2 Výroba na stejnou konzistenci

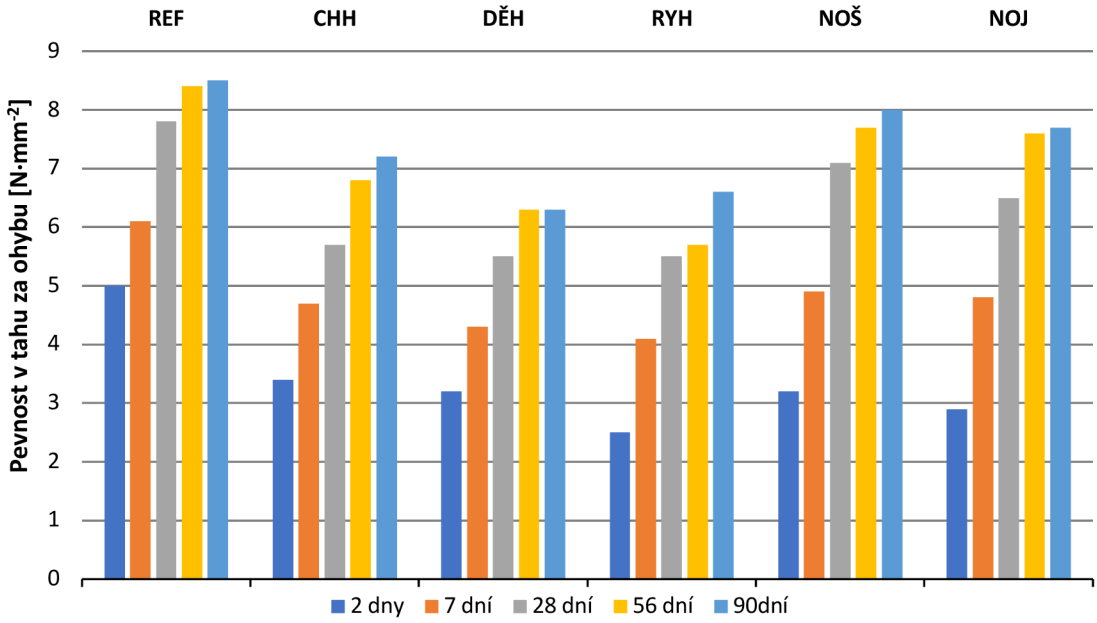
Na základě výsledků z předešlých experimentů je možno konstatovat, že jemné popílky splňují požadovanou konzistenci, již při stejném vodním součiniteli dle normy ČSN EN 450–1. Určitou výjimkou jsou popílky z produkce Nováky, kde se jedná o velice jemné směsi. V této části práce probíhalo testování pouze na popílcích, které dosahovaly horší konzistence vůči referenční směsi, jedná se především o hrubé a velmi jemné popílky.

Konzistence byla stanovena dle ČSN EN 1015–3. Konstantní hodnota rozlití zkušebního vzorku dle referenční malty byla stanovena na 150 ± 10 mm. Na uvedenou hodnotu byly veškeré vzorky zhotoveny pomocí dodatečného přidávání vody, a tím pádem zvyšování vodního součinitele. Toto složení již neodpovídá ČSN EN 196–1, nicméně pro účely této práce byl postup i vyhodnocení zachován z důvodu porovnání výsledků. V této části práce konzistence malty již nebude komentována a bude uveden pouze vodní součinitel.

9.2.2.1 Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost

Tabulka 33: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – vybrané popílky (stejná konzistence)

Označení	w [-]	Objemová hmotnost [kg·m^{-3}]	Pevnost v tahu za ohybu [N·mm^{-2}]				
			2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
REF	0,50	2240	5,0	6,1	7,8	8,4	8,5
CHH	0,56	2170	3,4	4,7	5,7	6,8	7,2
DĚH	0,56	2150	3,2	4,3	5,5	6,3	6,3
RYH	0,58	2150	2,5	4,1	5,5	5,7	6,6
NOŠ	0,58	2180	3,2	4,9	7,1	7,7	8,0
NOJ	0,58	2180	2,9	4,8	6,5	7,6	7,7



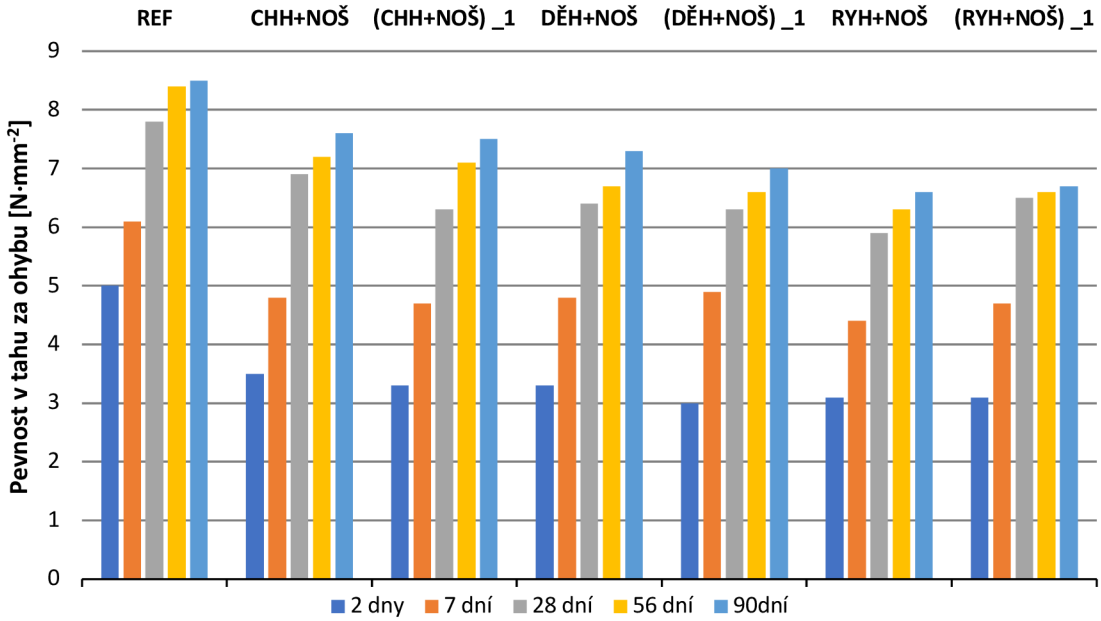
Graf 12: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu – vybrané popílky (stejná konzistence)

Tabulka 34: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – směs vybraných popílků bez úprav s optimalizovanou křivkou zrnitosti (stejná konzistence)

Označení	w [-]	Objemová hmotnost [kg·m^{-3}]	Pevnost v tahu za ohybu [N·mm^{-2}]				
			2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
CHH+NOŠ	0,57	2190	3,5	4,8	6,9	7,2	7,6
DĚH+NOŠ	0,57	2170	3,3	4,8	6,4	6,7	7,3
RYH+NOŠ	0,58	2160	3,1	4,4	5,9	6,3	6,6

Tabulka 35: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – směs vybraných popílků bez úprav s ohledem na vyhovující výslednou jemnost (stejná konzistence)

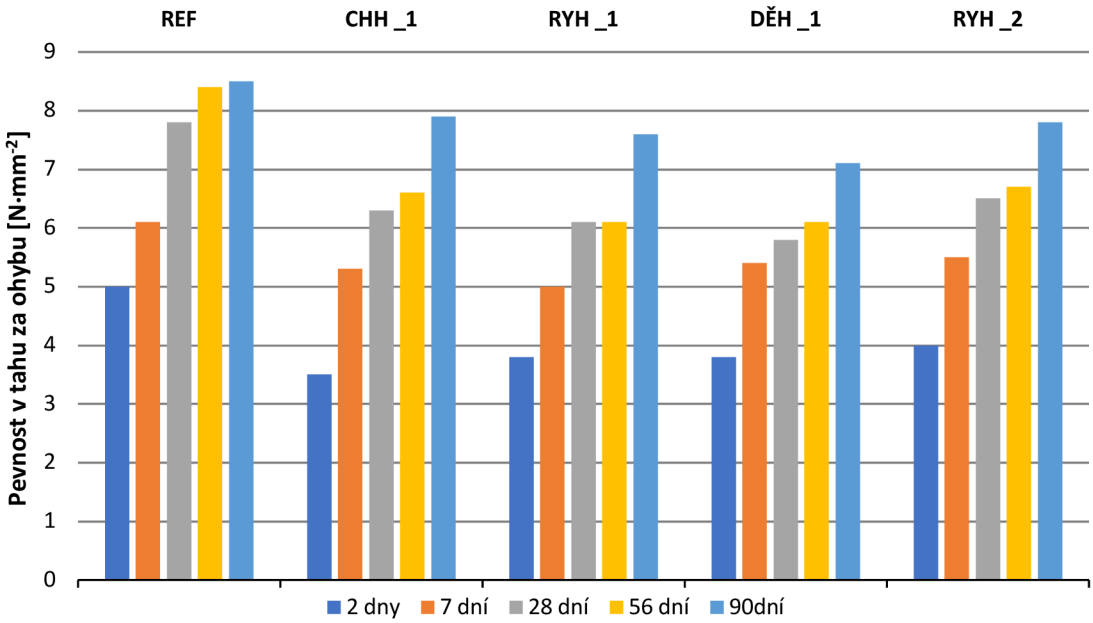
Označení	w [-]	Objemová hmotnost [kg·m^{-3}]	Pevnost v tahu za ohybu [N·mm^{-2}]				
			2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
(CHH+NOŠ) _1	0,57	2180	3,3	4,7	6,3	7,1	7,5
(DĚH+NOŠ) _1	0,57	2170	3,0	4,9	6,3	6,6	7,0
(RYH+NOŠ) _1	0,58	2180	3,1	4,7	6,5	6,6	6,7



Graf 13: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu – míchané popílky (stejná konzistence)

Tabulka 36: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – mleté popílky (stejná konzistence)

Označení	w [-]	Objemová hmotnost [kg·m^{-3}]	Pevnost v tahu za ohybu [N·mm^{-2}]				
			2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
CHH _1	0,56	2230	3,5	5,3	6,3	6,6	7,9
RYH _1	0,56	2240	3,8	5,0	6,1	6,1	7,6
DĚH _1	0,54	2230	3,8	5,4	5,8	6,1	7,1
RYH _2	0,54	2240	4,0	5,5	6,5	6,7	7,8

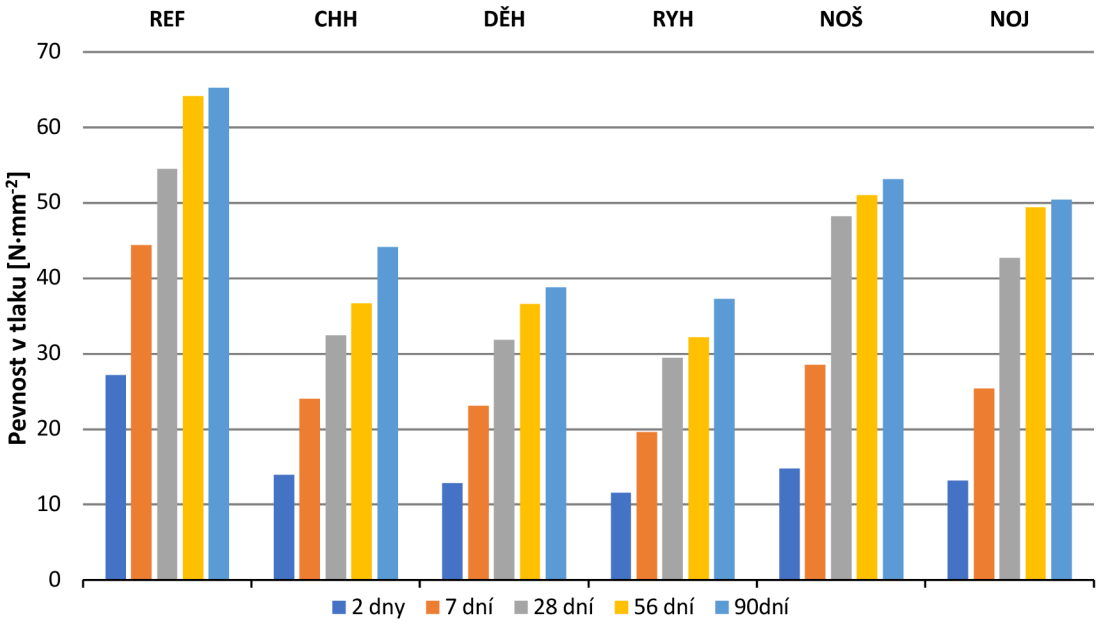


Graf 14: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu – mleté popílky (stejná konzistence)

9.2.2.2 Pevnost v tlaku

Tabulka 37: Pevnost v tlaku – vybrané popílky (stejná konzistence)

Označení	Pevnost v tlaku [N·mm^{-2}]				
	2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
REF	27,2	44,4	54,5	64,2	65,3
CHH	13,9	24,0	32,4	36,7	44,1
DĚH	12,8	23,1	31,8	36,6	38,8
RYH	11,6	19,6	29,5	32,2	37,3
NOŠ	14,8	28,5	48,2	51,0	53,1
NOJ	13,2	25,4	42,7	49,4	50,4



Graf 15: Grafické znázornění pevnosti v tlaku – vybrané popílky (stejná konzistence)

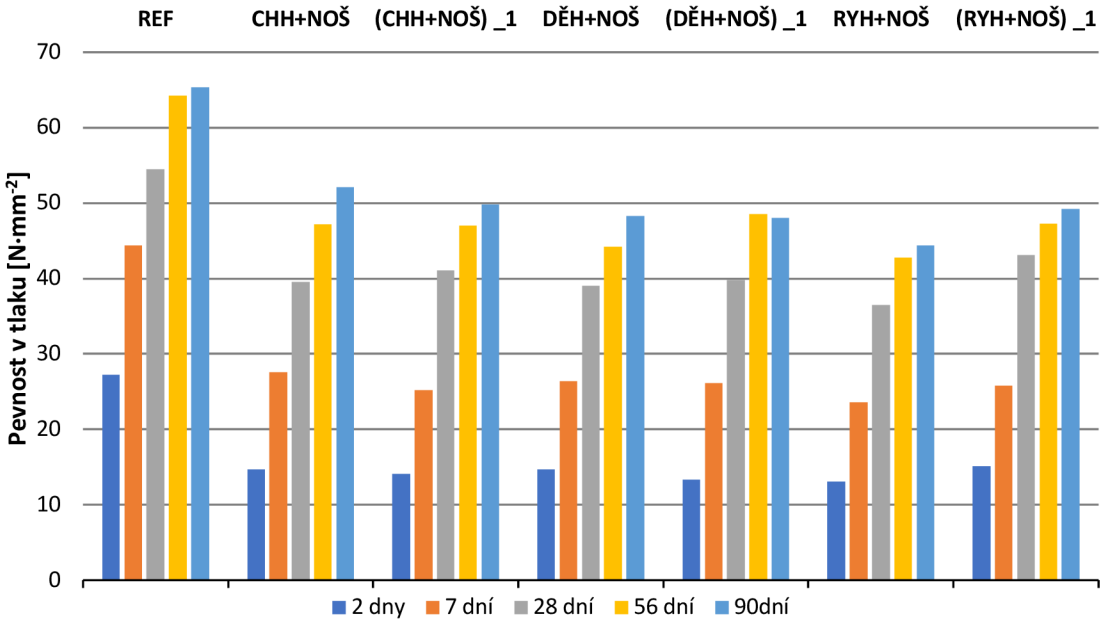
Při výrobě malt na stejnou konzistenci byla značně ovlivněna pevnost v tlaku u cemento-popílkových malt. Referenční malta připravená pouze z cementu značně převyšuje ostatní popílkové směsi. V raných stádií (2 a 7 dny) referenční směs dosahuje takřka dvojnásobné pevnosti. Tento jev je do jisté míry ovlivněn pucolánovou reakcí, ale především dodatečným přidáváním vody, pro dosažení stejné konzistence. Po 28 dnech hrubé popílky dosahují pouze 30 N·mm^{-2}. Popílky z produkce Nováky v předešlých experimentech vykazovaly nadprůměrné výsledky, nicméně dodatečným přidáním vody byly jejich přednosti eliminovány. Přesto dosahují lepších hodnot než hrubé popílky a blíží se referenční maltě.

Tabulka 38: Pevnost v tlaku – směs vybraných popílků bez úprav s optimalizovanou křivkou zrnitosti (stejná konzistence)

Označení	Pevnost v tlaku [N·mm^{-2}]				
	2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
CHH+NOŠ	14,7	27,6	39,5	47,2	52,1
DĚH+NOŠ	14,7	26,4	39,0	44,2	48,3
RYH+NOŠ	13,1	23,6	36,5	42,8	44,4

Tabulka 39: Pevnost v tlaku – směs vybraných popílků bez úprav s ohledem na vyhovující výslednou jemnost (stejná konzistence)

Označení	Pevnost v tlaku [N·mm^{-2}]				
	2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
(CHH+NOŠ) _1	14,1	25,2	41,1	47,0	49,8
(DĚH+NOŠ) _1	13,3	26,1	39,8	48,5	48,0
(RYH+NOŠ) _1	15,1	25,8	43,1	47,3	49,2

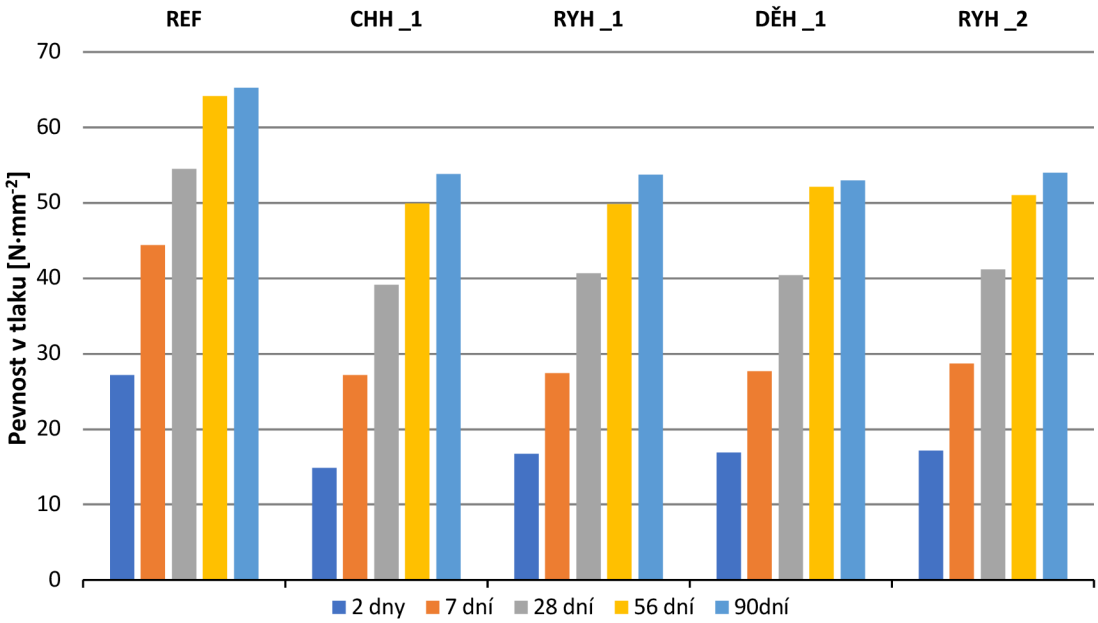


Graf 16: Grafické znázornění pevnosti v tlaku – míchané popílky (stejná konzistence)

Z pohledu míchaných popílků je nárůst pevností v závislosti na čase téměř totožný. Mírně vyšší pevnost vůči ostatním je možno pozorovat u popílku Chvaletice. Díky mísení s vysoce aktivním popílkem je možno konstatovat, že pevnosti v tlaku dosahují mírně vyšších hodnot než popílky bez úprav. Porovnání vůči referenční maltě je podrobně komentováno v kapitolách níže (Účinnost mletí).

Tabulka 40: Pevnost v tlaku – mleté popílky (stejná konzistence)

Označení	Pevnost v tlaku [N·mm^{-2}]				
	2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
CHH _1	14,9	27,2	39,1	49,9	53,8
RYH _1	16,7	27,4	40,7	49,8	53,7
DĚH _1	16,9	27,7	40,4	52,1	53,0
RYH _2	17,2	28,7	41,2	51,0	54,0



Graf 17: Grafické znázornění pevnosti tlaku – mleté popílky (stejná konzistence)

Z grafického znázornění je možno pozorovat prakticky totožný průběh nárůstu pevností v tlaku s tím rozdílem, že dosahuje vyšších hodnot. Pevnost v tlaku u mletých popílků dosahuje po 28 dnech zrání cca 40 N·mm^{-2} a po 90 dnech cca 45 N·mm^{-2}. Tento výsledek je způsoben vyšší reaktivitou popílku díky mletí. Nicméně stále je nutno konstatovat, že dodatečné přidávání vody má negativní vliv na vývoj pevností. V porovnání se vzorky, které byly vyrobeny se stejným vodním součinitelem, mleté popílky dosahují 45 N·mm^{-2} již po 28 dnech zrání.

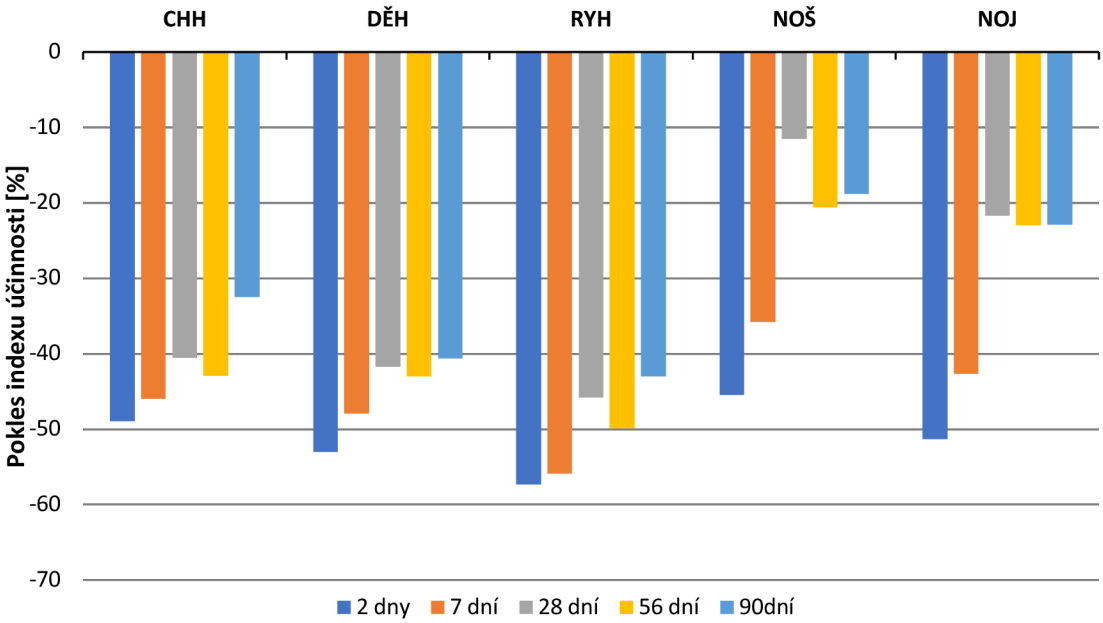
9.2.2.3 Index účinnosti

Tabulka 41: Index účinnosti – stejná konzistence

Označení	w [-]	Index účinnosti [%]				
		2 dny	7 dní	28 dní*1)	56 dní	90 dní*2)
REF	0,50	-	-	-	-	-
CHH	0,56	51,1	54,0	**59,5**	57,1	**67,5**
DĚH	0,56	47,0	52,1	**58,3**	57,0	**59,4**
RYH	0,58	42,7	44,1	**54,2**	50,1	**57,0**
NOŠ	0,58	54,5	64,2	**88,5**	79,4	**81,2**
NOJ	0,58	48,7	57,3	**78,3**	77,0	**77,1**

*1) dle ČSN EN 450-1 požadovaná hodnota po 28 dnech je minimálně 75 %

*2) dle ČSN EN 450-1 požadovaná hodnota po 90 dnech je minimálně 85 %



Graf 18: Grafické znázornění poklesu indexu účinnosti v závislosti na čase

Pro lepší přehlednost je graf zobrazený výše sestaven tak, že osa x odpovídá 100 %, tzn. Referenční maltě. Z grafického znázornění je patrné, že dodatečné přidávání vody má dle předpokladu negativní vliv na výsledný index účinnosti. Jak už bylo zmíněno v úvodu praktické části, dle normy ČSN EN 450–1 se index účinnosti stanoví při konstantním vodním součiniteli 0,5. V této části práce je vodní součinitel odlišný, nicméně z důvodu porovnání výsledků je vyhodnocení zkoušky zachováno. Při dodržení stejné konzistence žádný z vybraných hrubých popílků nevyhovuje požadavkům normy ČSN EN 450–1. Po 28 dnech indexy účinnosti dosahují pouze cca 55–60 % a po 90 dnech zrání cca 60–70 %. Popílky z elektrárny Nováky po 28 dnech dosahují indexu účinnosti 88,5 % u (NOŠ) a 78,3 % u (NOJ). Oba tyto výsledky splňují požadavky normy po 28, který je 75 %. Nicméně po 90 dnech oba popílky dosahují nižších indexů účinnosti než 85 %. S ohledem na výsledné indexy účinnosti, které jsou uvedeny v tabulce výše, není možno tyto popílky použít do betonu jako aktivní příměs dle požadavků uvedených výše. Negativní výsledek je zapříčiněn obecně známým faktem, s přibývající vodou klesá pevnost. Pro dosažení stejné konzistence bylo potřeba pro jednotlivé popílky zvýšení vodního součinitele na hodnoty 0,56–0,58. Obecně lze konstatovat, že navyšování vodního součinitele není žádoucí a je nutné hledat jiné alternativy. Určitým řešením této problematiky je použití plastifikačních či superplastifikačních přísad.

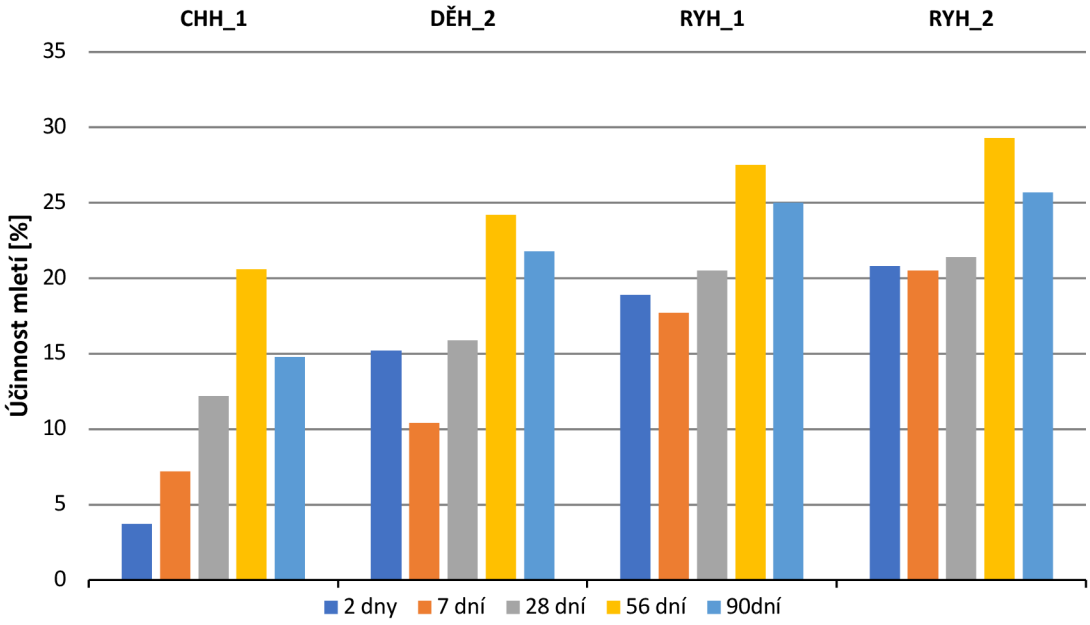
9.2.2.4 Účinnost mletí

Tabulka 42: Index účinnosti – mleté popílky (stejná konzistence)

Označení	w [-]	Index účinnosti [%]				
		2 dny	7 dní	28 dní*1)	56 dní	90 dní*2)
CHH	0,56	51,1	54,0	59,5	57,1	67,5
CHH_1	0,56	54,8	61,2	71,7	77,7	82,3
DĚH	0,56	47,0	52,1	58,3	57,0	59,4
DĚH_2	0,54	62,2	62,5	74,2	81,2	81,2
RYH	0,58	42,7	44,1	54,2	50,1	57,0
RYH_1	0,56	61,6	61,8	74,7	77,6	82,0
RYH_2	0,54	63,5	64,6	**75,6**	79,4	82,7

*1) dle ČSN EN 450-1 požadovaná hodnota po 28 dnech je minimálně 75 %

*2) dle ČSN EN 450-1 požadovaná hodnota po 90 dnech je minimálně 85 %



Graf 19: Grafické znázornění účinnosti mletí v závislosti na čase

Pro přehlednost grafu osa x představuje popílek bez úprav. Mletí popílku má pozitivní vliv na výsledné pevnosti a z grafického znázornění je možno pozorovat určitý nárůst pevností. Nicméně díky extrémně nízkým indexům účinnosti neupravených popílků ani upravené popílky nevyhovují požadavkům normy, kromě popílku Rybnik, a to pouze po 28 dnech zrání. Ostatní popílky se pohybují v rozmezí 70–75 %, což znamená, že jsou při hranici použitelnosti. Po 90 dnech zrání popílky dosahují 80–83 % indexu účinnosti, jedná se taktéž o hodnoty blízké hranici 85 %. Z pohledu nárůstu pevností nejlepších hodnot dosahuje popílek Rybnik,

kde je možno pozorovat nárůst pevností v intervalu 20–25 %. Nejmenšího nárůstu pevností dosáhl popílek z produkce Chvaletice, který byl od 5 do 15 %. Obecně je možno konstatovat, že malty s mletými popílky vyrobené na stejnou konzistenci nevyhovují normě a nelze je použít do betonu jako aktivní příměs. Tento výsledek je způsoben nízkým indexem účinnosti již neupraveného popílku, jelikož mletím bylo dosaženo určitého nárůstu pevnosti u všech popílků. Nicméně indexy účinnosti se pohybují blízko požadovaných hodnot a určitým řešením by bylo použití plastifikační přísady, která je v dnešní praxi součástí všech betonových směsí.

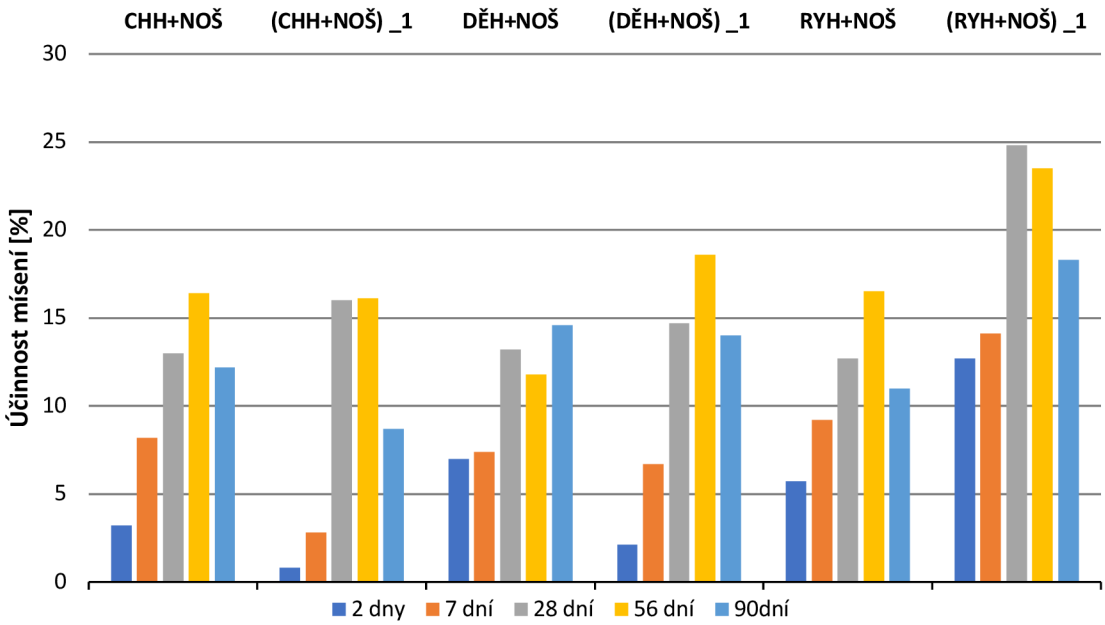
9.2.2.5 Účinnost mísení

Tabulka 43: Index účinnosti – míchané popílky (stejná konzistence)

Označení	w [-]	Index účinnosti [%]				
		2 dny	7 dní	28 dní*1)	56 dní	90 dní*2)
CHH	0,56	51,1	54,0	**59,5**	57,1	**67,5**
CHH+NOŠ	0,57	54,3	62,2	**72,5**	73,5	**79,7**
(CHH+NOŠ) _1	0,57	51,9	56,8	**75,5**	73,2	**76,2**
DĚH	0,56	47,0	52,1	**58,3**	57,0	**59,4**
DĚH+NOŠ	0,57	54,0	59,5	**71,5**	68,8	**74,0**
(DĚH+NOŠ) _1	0,57	49,1	58,8	**73,0**	75,6	**73,4**
RYH	0,58	42,7	44,1	**54,2**	50,1	**57,0**
RYH+NOŠ	0,58	48,4	53,3	**66,9**	66,6	**68,0**
(RYH+NOŠ) _1	0,58	55,4	58,2	**79,0**	73,6	**75,3**

*1) dle ČSN EN 450-1 požadovaná hodnota po 28 dnech je minimálně 75 %

*2) dle ČSN EN 450-1 požadovaná hodnota po 90 dnech je minimálně 85 %



Graf 20: Grafické znázornění účinnosti mletí v závislosti na čase

Jak už bylo komentováno ve všech předešlých kapitolách i v případě mísení má navyšování vodního součinitele negativní dopad na výsledný kompozit. Pro přehlednost osa x znázorňuje původní index účinnosti pro neupravený hrubý popílek. Z grafického znázornění je možno pozorovat, že u všech popílků byl nárůst indexu účinnosti v intervalu 5–15 %, kromě směsi popílku Rybnik, který byl míchán s ohledem na vyhovující jemnost, kde je nárůst 15–25 %. Díky tomuto nárůstu tento popílek po 28 dnech dosahuje 79 % indexu účinnosti a splňuje požadavek normy. Obdobný výsledek je možno pozorovat i u popílku Chvaletice, který dosahuje po 28 dnech zrání 75,5 %. Nicméně oba popílky nevyhovují normě po 90 dnech, kdy dosáhly indexu účinnosti pouze v rozmezí 75–80 %. Ostatní popílky obecně nesplňují požadavek normy a z pohledu celkového indexu účinnosti se hodnoty pohybují v hodnotách 67–73 % po 28 dnech a 70–80 % po 90 dnech. Mísení přináší určitý nárůst pevností, který ovšem nestačí na extrémně nízký index účinnosti neupravených popílků, kdy se některé hrubé popílky blíží hranici 55 %.

9.3 Ekonomické zhodnocení

Co se týká ekonomického zhodnocení, je poměrně složité určit celkové náklady cementového kompozitu, jedná-li se o mechanicky aktivovaný popílek, kde proces úpravy je poměrně složitý pro vyjádření v nákladech. Pro účely této práce proto budeme pracovat s náklady, které byly stanoveny na základě odborného odhadu. Nicméně účelem tohoto zhodnocení nejsou výsledné náklady, jako spíše poměr mezi jednotlivými popílky a referenčním vzorkem. V rámci ekonomického zhodnocení bude porovnávána referenční malta složená pouze z cementu a malta s částečnou náhradou cementu popílkem, a to buď neupraveným či upraveným. Pro zjednodušení výpočtu budeme uvažovat pouze cenu pojiva z cementové matrice, která tvoří nejvyšší položku a je jedinou proměnnou. Ostatní složky jako je kamenivo a voda, budeme uvažovat, že jsou v konstantní dávce. Průměrná cena cementu byla stanovena na 2000 Kč / t a cena popílku na cca 300 Kč / t bez dalších úprav. Cena mletí na požadovaný měrný povrch cca 3500–3800 $cm^2 \cdot g^{-1}$ byla stanovena na 400 Kč / t. Z těchto výchozích hodnot byla stanovena cena referenční malty, cena malty s popílkem bez úprav a cena malty s popílkem po mletí.

- Vstupní parametry:
  - Cena cementu 2000 Kč / t
  - Cena popílku bez úprav 300 Kč / t
  - Náklady na mletí popílku 400 Kč / t
- Cena pojiva:
  - Referenční malta 2000 Kč / t
  - Malta s 25% náhradou cementu popílkem 1575 Kč / t
  - Malta s 25% náhradou cementu mletým popílkem 1675 Kč / t

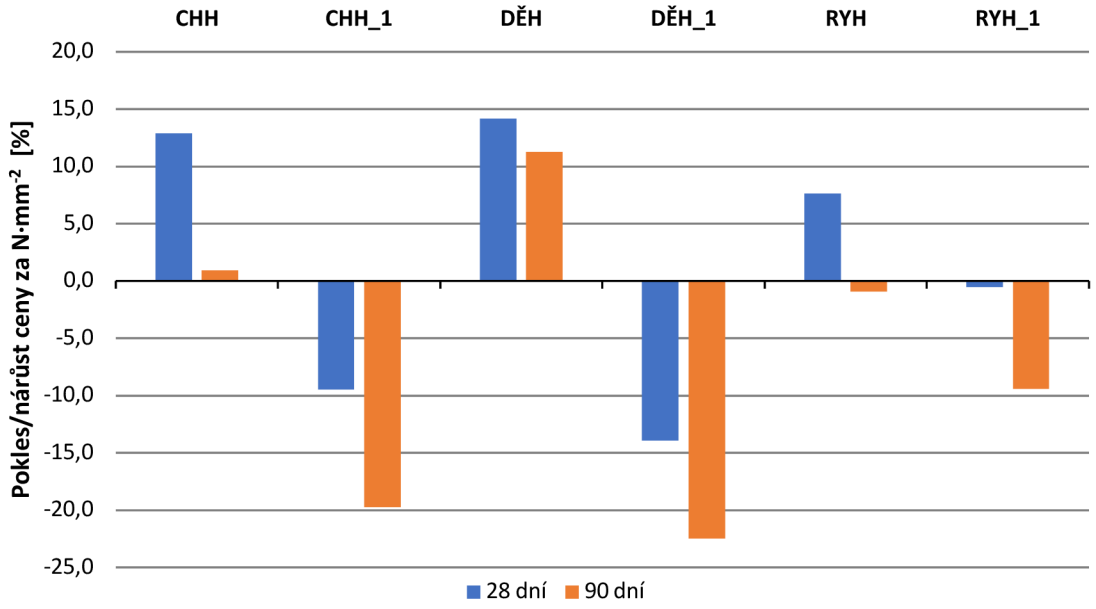
Pro přehlednost byly výše uvedené ceny přepočítány na cenu za 1 $N \cdot mm^{-2}$ a byly vztaženy k tuně pojiva. Pro ekonomické zhodnocení byly zvoleny popílky Chvaletice, Dětmarovice a Rybnik ve stáří 28 a 90 dnů. Konkrétní náklady je možno pozorovat v tabulce níže.

Tabulka 44: Ekonomické zhodnocení pojivové složky různých směsí v závislosti na pevnosti

Označení	Specifikace	Cena za 1 N·mm^{-2} [Kč]	
		28 dní	90 dní
REF	-	38,1	32,9
CHH	Chvaletice HRUBÝ	43,0	33,2
CHH_1	Chvaletice MLETÝ	34,5	26,4
DĚH	Dětmarovice HRUBÝ	43,5	36,6
DĚH_1	Dětmarovice MLETÝ	32,8	25,5
RYH	Rybnik HRUBÝ	41,0	32,6
RYH_1	Rybnik MLETÝ	37,9	29,8

* **červená** barva značí výhodnější cenu pro referenční maltu, **zelená** barva značí jako výhodnější maltu s daným popílkem.

Pro lepší přehlednost jsou výše uvedené ceny přepočítány na procentuální nárůst či pokles vůči referenční maltě složené pouze z cementu. Osa x tedy představuje referenční maltu, která odpovídá 100 %.



Graf 21: Grafické znázornění průběhu ceny v závislosti na čase

Z grafického znázornění je patrné, že mletí má pozitivní vliv nejen na výsledné pevnosti, ale i na ekonomickou stránku věci. Veškeré mleté popílky představují úsporu na pojivové složce, v některých případech jsou úspory až 20 % vůči referenci. Taktéž hrubé popílky představují určitou úsporu, která je viditelná až po 90 dnech zrání. Tento výsledek je ovlivněn pucolánovou aktivitou popílku, která je patrná i u mletých popílku v porovnání 28 a 90 dní. Obecně je možno konstatovat, že mleté popílky jsou ekonomicky výhodnější než referenční malty složené pouze z cementu.

10 III. ETAPA – Vliv mletí popílku na výsledné vlastnosti

10.1 Stanovení reologie vybraných popílků před a po úpravě na rotačním viskozimetru

Pro ověření vlivu použití mechanicky aktivovaného popílku na reologii byla zvolena metoda torzního momentu cementové pasty. Stanovení reologie bylo prováděno na univerzálním rotačním viskozimetru Viskomat NT, který pracuje na základě odporu cementové pasty otáčející se ve zkušebním kelímku vůči stacionární lopatce viskozimetru.

Obrázek 30: Viskomat NT

V první řadě byla stanovena reologie na referenční cementové pastě bez použití popílku. Další zkoušení bylo prováděno na cementových pastách, kde 25 % cementu bylo nahrazeno popílkem. Vodní součinitel byl stanoven na hodnotu 0,36 a byl počítán z celkové navážky pojiva. Konkrétní složení jednotlivých past je znázorněno v tabulce níže.

Tabulka 45: Složení cementových past pro stanovení reologie

Ozn.	Množství [g]									
	Cement	Voda	Popílek							
			CHH	CHJ	CHH_1	DĚH	DĚJ	DĚH_2	RYH	RYJ	RYH_2
REF	700	252	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CHH	525	252	175	-	-	-	-	-	-	-	-
CHJ	525	252	-	175	-	-	-	-	-	-	-
CHH_1	525	252	-	-	175	-	-	-	-	-	-
DĚH	525	252	-	-	-	175	-	-	-	-	-
DĚJ	525	252	-	-	-	-	175	-	-	-	-
DĚT_2	525	252	-	-	-	-	-	175	-	-	-
RYH	525	252	-	-	-	-	-	-	175	-	-
RYJ	525	252	-	-	-	-	-	-	-	175	-
RYH_2	525	252	-	-	-	-	-	-	-	-	175

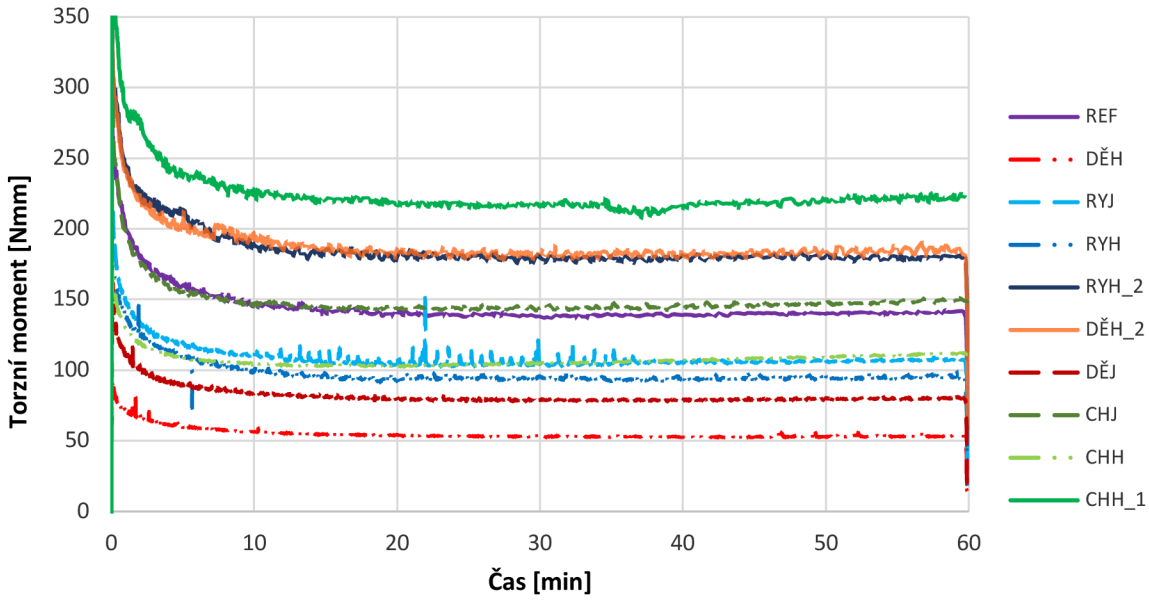
Zkušební postup byl stanoven stejně pro všechny směsi, aby bylo zachováno dávkování složek, postup a doba míchání. Jednotlivé komponenty byly dávkovány hmotnostně. Nejdříve byly veškeré pomůcky navlhčeny, následně byla nalita voda do nádoby a poté byly přidány sypké složky. Míchání bylo prováděno v normové míchačce Hobart s tím, že míchání probíhalo po dobu 60 vteřin, následovalo očištění a následovalo dalších 60 vteřin míchání. Ihned po zamíchání byla cementová případně cemento-popílková pasta přelita do zkušebního kelímku a bylo zahájeno automatické měření po dobu 60 minut. Rychlost otáčení kelímku byla stanovena na 60 otáček za minutu pro všechny směsi. Na vnější povrch kelímku navíc působila kapalina o teplotě 20 °C z důvodu dodržení konstantních podmínek po celou dobu měření.

Obrázek 31: Univerzální normová míchačka Hobart

V tabulce níže jsou uvedeny výsledné torzní momenty jednotlivých cementových past. Následně je graficky znázorněn průběh torzního momentu v závislosti na čase.

Tabulka 46: Vyhodnocení torzního momentu

Receptura	Specifikace popílku		Torzní moment [Nmm]
REF	-		140,6
CHH	hrubý	Chvaletice	111,1
CHJ	jemný		148,6
CHH_1	mletý		221,5
DĚH	hrubý	Dětmarovice	53,4
DĚJ	jemný		79,7
DĚT_2	mletý		184,6
RYH	hrubý	Rybnik	95,2
RYJ	jemný		107,1
RYH_2	mletý		179,6



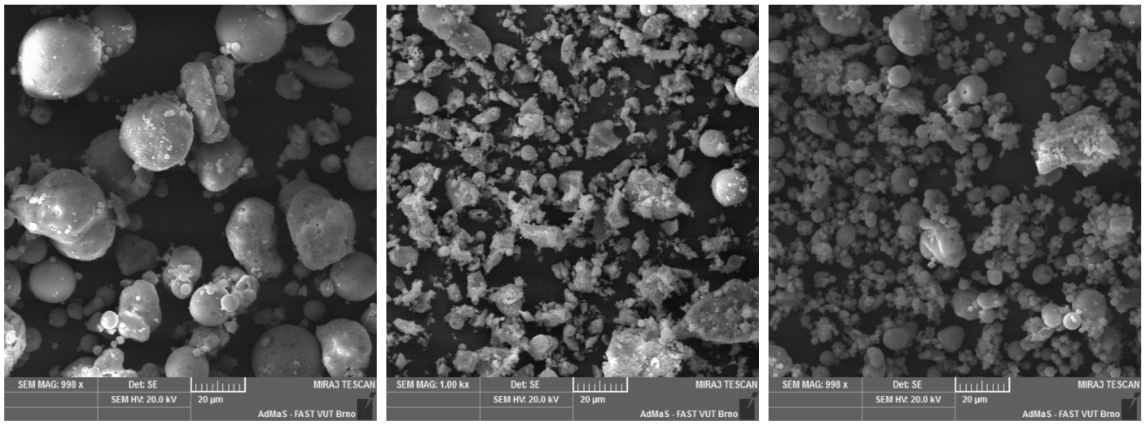
Graf 22: Vykreslení torzních momentů cementových past s popílky

Z grafického znázornění můžeme pozorovat rozdílné hodnoty torzního momentu. U všech směsí bylo možno pozorovat v počátku měření tixotropní chování, které je patrné i z grafického vyjádření. U mletých popílků je možno pozorovat zvýšení torzního momentu, a tedy nejhorší tekutost pasty. Konkrétně nejvyšší hodnota byla zaznamenána u mletého popílku z elektrárny Chvaletice (CHH_1) cca 220 Nmm. Upravené popílky z produkce Rybnik a Dětmarovice dosahují obdobného torzního momentu cca 180 Nmm a křivky jsou téměř totožné. Naopak nižšího torzního momentu dosahují obecně hrubé popílky. Nejnižší torzní moment byl naměřen u hrubého popílku z elektrárny Dětmarovice (DĚH), který byl cca 50 Nmm. To je způsobeno morfologií zrn, která jsou téměř ideálního kulovitého tvaru (viz. Morfologie zrn). Jemný popílek z elektrárny Chvaletice (CHJ) dosahuje obdobných hodnot jako referenční pasta bez přídavku popílku (REF) cca 140 Nmm. Všechny ostatní popílkové pasty dosahují nižších hodnot torzního momentu než referenční pasta, to je zcela v souladu s obecně známým faktem, že díky kulovitému tvaru zrn popílku se zlepšuje tekutost pasty. Obecně je možno konstatovat, že mletí popílku, jakožto mechanická aktivace má negativní vliv na reologii cementových past. Tento výsledek je pravděpodobně způsoben vyšším měrným povrchem, jemností a tvarem zrn, který je nepravidelného tvaru. Vyšší měrný povrch a jemnost popílku způsobuje, že k omočení všech zrn popílku je potřeba větší množství vody, a tím pádem se zhoršuje tekutost pasty. Nepravidelné zrna popílku navíc eliminují tzv. efekt kuličkového ložiska. Tyto

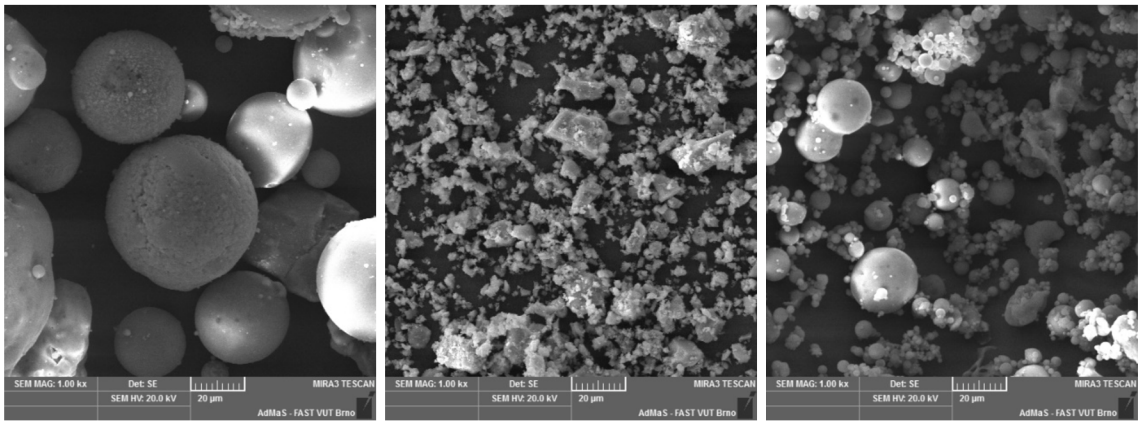
veškeré výsledky jsou v rozporu se stanovenou konzistencí, kdy mletí zlepšovalo zpracovatelnost u vybraných popílků, a naopak nejhorší konzistence byla dosažena u hrubých popílků. Tento výsledek mohl být způsoben zcela odlišným měřením, kdy stanovení konzistence probíhalo na maltě a reologie byla měřena pouze na cemento-popílkových pastách, tedy bez kameniva. Z pohledu fungování systému cement-popílek se jeví jako přesnější stanovení reologie na pastách.

10.2 Morfologie zrn vybraných popílků před a po úpravě

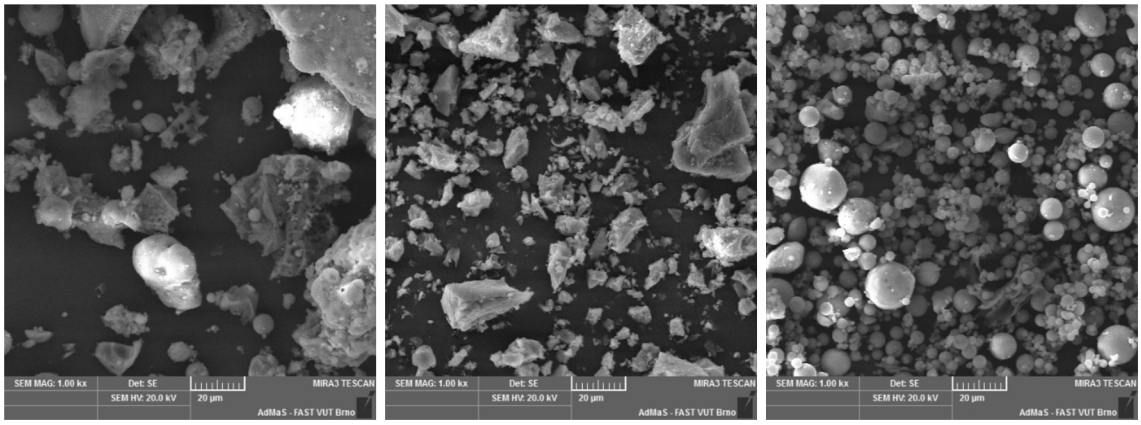
Morfologie zrn a jejich změny byly sledovány pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu (REM). Všechny snímky jsou 1000× zvětšeny. Přiložené snímky poukazují na rozdílnost surového (neupraveného) popílku oproti mechanicky aktivovaným popílkům. Podrobnější analýzou jemných a hrubých popílků je možno pozorovat tvar zrn, který je téměř ideálního kulovitého tvaru se sklovitým povrchem, s tím rozdílem, že u jemných popílků jsou zrna menší. Pouze u hrubého popílku Rybnik je možno pozorovat pórovitou strukturu a nepravidelná zrna. Z přiložených snímku mletých popílků je patrné, že při mletí došlo k rozdrcení velkých zrn (cenosfér), za vzniku ostrohranných zrn nepravidelného tvaru. Jak už bylo zmíněno výše, reologie cementové pasty se opírá o morfologii zrn. Tento fakt zcela evidentně koresponduje s výsledky získanými v předchozí kapitole – Stanovení reologie, kde mleté popílky vykazují znatelně horší tekutost oproti neupraveným popílkům.



Obrázek 32: Fotografie zrn popílku č. 7 a 8 Chvaletice 1000× zvětšeno – VLEVO před mletím HRUBÝ (CHH), UPROSTŘED po mletí HRUBÝ (CHH_1), VPRAVO JEMNÝ (CHJ)



Obrázek 33: Fotografie zrn popílku č. 10 a 11 Dětmarovice 1000× zvětšeno – VLEVO před mletím HRUBÝ (DĚH), UPROSTŘED po mletí HRUBÝ (DĚH_1), VPRAVO JEMNÝ (DĚJ)



Obrázek 34: Fotografie zrn popílku č. 15 a 16 Rybnik 1000× zvětšeno – VLEVO před mletím HRUBÝ (RYH), UPROSTŘED po mletí (RYH_1), VPRAVO JEMNÝ (RYJ)

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo studium možností aktivace elektrárenských popílků jako aktivní příměsi do betonu.

V teoretické části práce jsou podrobně popsány oba druhy popílků včetně jejich chemického složení, fyzikálních vlastností a normativních požadavků. Dále byly shromážděny data pro posouzení současné produkce popílků jak ve světě, tak na území České republiky. Teoretická část je obohacena o denitrifikaci spalin, která úzce souvisí se zpracováním popílků. Stále se zvyšující požadavky na kvalitu produkovaných spalin nutí producenty popílku do nasazení dodatečných ekologizačních technologií. Vzhledem k ekonomickým bilancím dochází v ČR k instalaci hlavně nejlevnějších metod, což má za následek negativní dopad na popílek. V teoretické části jsou popsány dosavadní poznatky z aktivace elektrárenských popílků, především ze zahraničních studií. Jsou zde popsány jednotlivé možnosti aktivace popílků a jejich dopad na výsledný cementový kompozit.

Na základě zadání práce a předložené metodiky bylo zvoleno několik typů popílků z různých produkcí tepelných elektráren na území České republiky a sousedních států (Slovensko, Polsko). Skupina těchto popílků byla podrobena analýzám pro stanovení jejich vlastností. Následně byly stanoveny indexy účinnosti vybraných neupravených popílků. Dle předpokladu jemné popílky splnily požadavky normy ČSN EN 450–1, která požaduje index účinnosti 75 % po 28 dnech a 85 % po 90 dnech. Nicméně hrubé neupravené popílky tento požadavek nesplnily, a proto byly vystaveny dalším úpravám.

Vybrané ložové popílky byly vystaveny celkem dvěma způsobům mechanické aktivace. Prvním způsobem bylo mísení hrubého popílku s velmi aktivní popílkovou směsí z produkce Nováky v určitém poměru. Poměr mísení byl stanoven ve dvou různých režimech. První poměr mísení byl stanoven s optimalizovanou křivkou zrnitosti, a tedy nevyhovující jemností dle ČSN EN 450–1 a druhý poměr mísení byl stanoven s ohledem na výslednou jemnost právě dle normy. Druhou metodou zvýšení vazného potenciálu vybraných hrubých popílků bylo mletí. Mletí bylo prováděno v planetárním kulovém mlýně, taktéž ve dvou režimech. První způsob

mletí byl stanoven s ohledem na výsledný měrný povrch 3500 až 4000 $cm^2 \cdot g^{-1}$ a druhý s ohledem na výslednou jemnost, která byla stanovena na 40 %.

Obecně lze konstatovat, že mechanická aktivace má pozitivní vliv na výsledné vlastnosti cementových kompozitů. V dnešní době stále se zvyšujících požadavků na omezování skladování odpadů je žádoucí spotřebovávat veškeré odpady z produkce elektráren. Zpracování úletového popílku je v dnešní době běžnou praxí, nicméně problematika nastává při zpracování ložového (hrubého) popílku. Praktická část této práce zcela jasně potvrzuje, že hrubý neupravený popílek ve všech případech nevyhovuje požadavkům normy. Nicméně právě mechanická aktivace se ukázala jako jedna z možností zpracování právě těchto popílků. Jako nejúčinnější způsob modifikace popílků se jeví mletí. V případě mletí dochází k rozdrcení velkých zrn, a tím pádem se popílek stává reaktivnější. Nárůst pevností na základě výsledků této práce je možno zobecnit a procentuálně zhodnotit v intervalu cca 15–25 %. U popílků, které byly upravovány mísením je nárůst pevností mírně menší, a to v rozmezí 10–20 %. Nicméně tento nárůst pevností je dostatečný k tomu, aby daný popílek mohl být zpracován jako aktivní příměs a splňuje tedy požadavky normy.

V další části byly vybrané popílky míchány na stejnou konzistenci stanovenou na základě referenční malty. Dle výsledků z praktické části je možno konstatovat, že tato problematika se stává poněkud krizovou. Tento výsledek je ovlivněn zcela zásadním faktem, kdy dodatečným přidáváním vody klesá výsledná pevnost. Na základě tohoto faktu, již neupravené popílky dosahovaly extrémně nízkých indexů účinnosti a dodatečný nárůst pevností díky modifikaci popílku již nebyl dostačující. Nicméně určitým řešením této problematiky by bylo použití plastifikační přísady.

V poslední části diplomové práce byl zhodnocen vliv mletí popílku na výslednou morfologii a reologii v čase. Z hlediska reologie má mletí negativní vliv na zpracovatelnost. Při mletí dochází k rozdrcení velkých zrn, za vzniku menších ostrohranných zrn. Reologie přímo souvisí s morfologií zrn, která právě tato zrna jasně zobrazuje. Pomletý popílek má i vyšší jemnost, tím pádem je potřeba větší množství vody na omočení zrn. Pro dosažení lepší zpracovatelnosti by bylo vhodné otestovat působení plastifikační přísady na zkoumané popílky.

V neposlední řadě bylo provedeno ekonomické srovnání, které hodnotí mechanickou aktivaci z pohledu ekonomické náročnosti. Proces mletí je z hlediska ekonomiky složitý proces, do kterého vstupuje příliš neznámých. Nicméně pro účely této práce byla ekonomická náročnost vyhodnocena poměrově. Díky částečné náhradě cementu (nejdražší složky) levnějším popílkem dochází ke značné úspoře. A díky nárůstu pevností se úspora v přepočtu na výsledné pevnosti násobí. Z pohledu výrobců betonových prvků je zabudování drtícího zařízení značnou investicí, nicméně z dlouhodobého hlediska je možno předpokládat významnou úsporu.

Poznatky z diplomové práce představují jistou možnost uplatnění neupravených ložových popílků. Pro další výzkum navrhuji ověření těchto popílků s použitím plastifikačních přísad, které mohou eliminovat negativní vlivy a další ověření na betonech. Elektrárenský hrubý popílek by se tímto způsobem stal využitelnou surovinou v oblasti stavebnictví a jeho produkce by neměla tak významný dopad na životní prostředí.

Seznam použité literatury

[1] **Ez-zaki, H., a další.** *Effect of mechanical activation of fly ash added to Moroccan Portland cement.* Rabat, Morocco : MATEC Web of Conferences, 2018. Sv. 149.

[2] **Bhatt, Arpita, a další.** *Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review.* Arlington, Texas, United states : Case Studies in Construction Materials, 2019. Sv. 11.

[3] **In: Český statistický úřad.** Produkce, využití a odstranění odpadu a produkce druhotných surovin v roce 2018. *www.czso.cz.* [Online] 31. 10 2019. https://www.czso.cz/csu/czso/cri/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-a-produkce-druhotnych-surovin-v-roce-2018.

[4] **Pytlík, Petr.** *Technologie betonu.* Brno : VUTIUM, 2000. ISBN 80- 214-1647-5.

[5] **Bydžovský a kol.** *Vybrané statě z technologie stavebních hmot.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2011.

[6] **Chen, Zhiliang, a další.** *Mechanical activation of fly ash from MSWI for utilization in cementitious materials.* Hangzhou, China : Waste Management, 2019. stránky 182-190. Sv. 88.

[7] **Černý, Vít.** *Technologie výroby umělého popílkového kameniva.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie hmot a dílců.

[8] **Škvára, František, a další.** *Hydraulic clinkerless binder on the fluid sulfocalcic fly ash basis.* Praha : Cement and Concrete Composites, 2018. stránky 118-126. Sv. 93.

[9] **ČSN EN 450-1.** *Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody.* Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Třídící znak 72 2064.

[10] **Fečko, Peter.** *Popílky.* Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0327-5.

[11] **Hemalatha, T. a Ramaswamy, Ananth.** *A review on fly ash characteristics e Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete.* Chennai, India : Journal of Cleaner Production, 2017. stránky 546-559. Sv. 147.

[12] **Benscheidt, N. a Hela, R.** *Příručka Popílek v betonu: základy výroby a použití.* Hostivice : ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP, 2013. ISBN 978-80-260-4226-6.

[13] **Sakai E. a kol.** *Hydration of fly ash cement.* Tokyo, Japan : Cement and Concrete Research, 2005. stránky 1135-1140. Sv. 35.

[14] **Vyhláška č.415/2012 Sb.** *o přípustné úrovni znečišťování ovzduší a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší.*

[15] **Hemerka, Jiří a Vybíral, Pavel.** *Ochrana ovzduší.* Praha : ČVUT, 2010. ISBN 978-80-01-04646-3.

[16] **Ťažký, Martin a Hela, Rudolf.** *Dopad SNCR na fyzikálně-mechanické vlastnosti popílků.* Brno : Popílky ve stavebnictví, 2017. stránky 141-150. ISBN 978-80-214-5498-9.

[17] **Snop, Roman.** *Vliv technologie SNCR z pohledu zpracovatele a distributora popílku.* Brno : Popílky ve stavebnictví, 2015. stránky 189-195. ISBN 978-80-214-5192-6.

[18] **Machač, P. a Vávrová, J.** *Co víme o nekatalytické redukci oxidů dusíku.* Kouty nad Desnou : VŠCHT Praha, 2013.

[19] **Radojevic, Miroslav.** *Reduction of nitrogen oxides in flue gases.* Brunei Darussalam : Environmental Pollution, 1998. stránky 685-689. Sv. 102. ISSN 02697491.

[20] **Ahmaruzzaman, M.** *A review on the itilization on fly ash.* Assam, India : In Progress in Energy ad Combustion Science, 2010. stránky 327-363. Sv. 36. ISSN 0360-1285.

[21] **Hefni, Yasmin, El Zaher, Yehia Abd a Wahab, Mona Abdel.** *Influence of activation of fly ash on the mechanical properties of concrete.* Ain Shams University, Egypt : Construction and Building Materials, 2018. stránky 728-734. Sv. 172.

[22] **Marjanovic, N., a další.** *Improving reactivity of fly ash and properties of ensuing geopolymers through mechanical activation.* Belgrade, Serbia : Construction and Building Materials, 2014. stránky 151-162. Sv. 57.

[23] **Felekoglu, Burak, Turkel, Selcuk a Kalyoncu, Hasan.** *Optimization of fineness to maximize the strength activity of high-calcium ground fly ash-Portland cement composites.* Izmir, Turkey : Construction and Building Materials, 2009. stránky 2053-2061. Sv. 23.

[24] **Aydin, S., Karatay, C. a Baradan, B.** *The effect of grinding process on mechanical properties and alkali-silica reaction resistance of fly ash incorporated cement mortars.* Izmir, Turkey : Powder Technology, 2010. stránky 68-72. Sv. 197.

[25] **Hela, Rudolf a Orsáková, Denisa.** *The Mechanical Activation of Fly Ash.* Brno, Czech Rebuplic : Procedia Engineering, 2013. stránky 87-93. Sv. 65.

[26] **Kumar, Sanjay a Kumar, Rakesh.** *Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer.* Jamshedpur, India : Ceramics International, 2011. stránky 533-541. Sv. 37.

[27] **Kumar, Rakesh, Kumar, Sanjay a Mehrotra, S.P.** *Towards sustainable solutions for fly ash through mechanical activation.* Jamshedpur, India : Resources, Conservation and Recycling, 2007. stránky 157-179. Sv. 52.

[28] **Šulc, Rostislav a Svoboda, Pavel.** *Alkalická aktivace mletého úletového popílku.* Praha : Ecology and new building materials and products, 2003.

[29] **Chindaprasirt a kol.** *Influence of fly ash fineness on strenght, driing shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar.* Khon Kaen, Thailand : Cement and Concrete Research, 2004. stránky 1087-1092. Sv. 34.

[30] **Payá a kol.** *Comparison among Magnetic and Non-magnetic Fly ash Fractions: Strenght Development of Cement-Fly ash Mortars.* Valencia, Spain : Waste Management, 1996. stránky 119-124. Sv. 16.

[31] **Bouzoubaa a kol.** *The Effect of Grinding on the Physical Properties of Fly Ashes and Portland Cement Clinker.* Ontario, Canada : Cement and Concrete Research, 1997. stránky 1861-1874. Sv. 27.

[32] **Saraswathy, V., a další.** *Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete.* Tamilnadu, India : Cement and Concrete Composites, 2003. stránky 673-680. Sv. 25.

[33] **Hela, R.** *Tepelná aktivace elektrárenského popílku.* 2002. str. 243. Sborník příspěvků konference BETONÁŘSKÉ DNY 2002. ISBN 80-238-9644-2.

[34] **Mezhov, Alexander, a další.** *Influence of mechanical activation of fly ash in presence of polynaphthalene sulfonate superplasticizer on rheology and hydration kinetics of cement – fly ash pastes.* Israel : Construction and Building Materials, 2019. stránky 380-390. Sv. 210.

[35] **ČSN EN 1015-3.** *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střásacího stolku).* Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000. Třídící znak 72 2400.

[36] **ČSN EN 196-1.** *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti.* Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. Třídící znak: 72 2100.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Globální produkce a využití popílku z uhlí [2] .....- 13 -

Obrázek 2: Produkce surovin v roce 2018 [3] .....- 14 -

Obrázek 3: Vysokoteplotní způsob spalování [7] .....- 16 -

Obrázek 4: Fluidní způsob spalování [7] .....- 17 -

Obrázek 5: Schéma tepelné elektrárny se systémem SRNC [16].....- 23 -

Obrázek 6: Množství odstranění NO_x při SNCR v závislosti na teplotě [17] .....- 23 -

Obrázek 7: Schéma selektivní katalytické redukce [19] .....- 24 -

Obrázek 8: Zrna popílku po SNCR (zvětšeno 500, 1000 a 3000×) [16].....- 25 -

Obrázek 9: Reologie analyzovaných popílků [16] .....- 25 -

Obrázek 10: Princip mechanické aktivace [23] .....- 28 -

Obrázek 11: Mikroskopické snímky ukazující morfologii popílku: a) surový popílek (RFA), (b) mechanicky aktivovaný popílek pomocí vibračního mlýna (VMFA), (c) mechanicky aktivovaný popílek pomocí kulového mlýna (AMFA) a (d) tříděný popílek (CFA) [27] .....- 29 -

Obrázek 12: Vliv mechanické aktivace na reaktivitu (RFA – surový popílek, AMFA – popílek aktivovaný v kulovém mlýnu, VMFA – popílek aktivovaný ve vibračním mlýnu) [27].....- 29 -

Obrázek 13: Vliv mechanické aktivace na morfologii produktu (po 180 dnech); a) RFA – surový popílek, b) AMFA – popílek aktivovaný v kulovém mlýně, c) VMFA – popílek aktivovaný ve vibračním mlýně [27] ..... - 30 -

Obrázek 14: Závislost velikosti středního zrna popílku na době mletí v kulovém mlýně [28] ..... - 31 -

Obrázek 15: Schéma vlivu zaváděcího režimu PNS na reologii past z popílku cementu: a) PNS zavedený se směsnou vodou; b) PNS zavedený do mlýna. Sloupce ukazují normalizované hodnoty, kde 100 % je maximální dosažitelná hodnota pro systém a 0 % minimum [34] ..... - 39 -

Obrázek 16: Závislost pevnosti v tlaku na době zrání při 10% nahrazením cementu popílkem [32] ..... - 40 -

Obrázek 17: Závislost pevnosti v tlaku na době zrání při 20% nahrazením cementu popílkem [32] ..... - 40 -

Obrázek 18: Závislost pevnosti v tlaku na době zrání při 30% nahrazením cementu popílkem [32] ..... - 40 -

Obrázek 19: Závislost pevnosti v tlaku na době zrání při 40% nahrazením cementu popílkem [32] ..... - 41 -

Obrázek 20: Schématické znázornění I. Etapy praktické části DP ..... - 43 -

Obrázek 21: Schématické znázornění II. Etapy praktické části DP ..... - 44 -

Obrázek 22: Schématické znázornění III. Etapy praktické části DP ..... - 45 -

Obrázek 23: Směs popílku CHH + NOŠ ..... - 48 -

Obrázek 24: Směs popílku DĚH + NOŠ ..... - 48 -

Obrázek 25: Směs popílku RYH + NOŠ ..... - 48 -

Obrázek 26: Planetární kulový mlýn ..... - 50 -

Obrázek 27: Mlecí médium ..... - 50 -

Obrázek 28: Střásací stolek ..... - 52 -

Obrázek 29: Fotodokumentace zkoušky stanovení konzistence ..... - 56 -

Obrázek 30: Viskomat NT ..... - 81 -

Obrázek 31: Univerzální normová míchačka Hobart ..... - 83 -

Obrázek 32: Fotografie zrn popílku č. 7 a 8 Chvaletice 1000× zvětšeno – VLEVO před mletím HRUBÝ (CHH), UPROSTŘED po mletí HRUBÝ (CHH_1), VPRAVO JEMNÝ (CHJ) ..... - 86 -

Obrázek 33: Fotografie zrn popílku č. 10 a 11 Dětmarovice 1000× zvětšeno – VLEVO před mletím HRUBÝ (DĚH), UPROSTŘED po mletí HRUBÝ (DĚH_1), VPRAVO JEMNÝ (DĚJ) ..... - 86 -

Obrázek 34: Fotografie zrn popílku č. 15 a 16 Rybnik 1000× zvětšeno – VLEVO před mletím HRUBÝ (RYH), UPROSTŘED po mletí (RYH_1), VPRAVO JEMNÝ (RYJ) ..... - 86 -

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozsah oxidů přítomných v popílcích třídy C a F [11] ..... - 19 -

Tabulka 2: Fyzikální vlastnosti popílků [12] ..... - 20 -

Tabulka 3: Normové požadavky dle ČSN EN 450-1 [9] ..... - 21 -

Tabulka 4: Indexy účinnosti analyzovaných popílků [16] ..... - 26 -

Tabulka 5: Charakteristické průměry částic [22] ..... - 33 -

Tabulka 6: Receptura [21] ..... - 35 -

Tabulka 7: Pevnost v tlaku v $N \cdot mm^{-2}$ [21] ..... - 36 -

Tabulka 8: Označení jednotlivých receptur [32] ..... - 39 -

Tabulka 9: Označení popílků ..... - 46 -

Tabulka 10: Chemické složení popílků ..... - 47 -

Tabulka 11: Fyzikální vlastnosti popílků ..... - 47 -

Tabulka 12: Optimalizace kombinace hrubých a jemných popílků bez předešlých úprav s ohledem na minimální mezerovitost směsí ..... - 49 -

Tabulka 13: Optimalizace kombinace hrubých a jemných popílků bez předešlých úprav s ohledem na vyhovující jemnost ..... - 49 -

Tabulka 14: Parametry mletí popílku s ohledem na výsledný měrný povrch .... - 50 -

Tabulka 15: Parametry mletí popílku s ohledem na výslednou jemnost ..... - 50 -

Tabulka 16: Složení malty pro výrobu jedné zkušební formy ..... - 51 -

Tabulka 17: Metodika výroby zkušebních těles.....- 52 -
Tabulka 18: Konzistence – vybrané popílky bez úprav.....- 54 -
Tabulka 19: Konzistence – mleté popílky.....- 55 -
Tabulka 20: Konzistence – směs vybraných popílků bez úprav s optimalizovanou křivkou zrnitosti.....- 56 -
Tabulka 21: Konzistence – směs vybraných popílků bez úprav s ohledem na vyhovující výslednou jemnost.....- 56 -
Tabulka 22: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – vybrané popílky- 58 -
Tabulka 23: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – směs vybraných popílků bez úprav s optimalizovanou křivkou zrnitosti .....- 58 -
Tabulka 24:Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – směs vybraných popílků bez úprav s ohledem na vyhovující výslednou jemnost.....- 59 -
Tabulka 25: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – mleté popílky...- 59 -
Tabulka 26: Pevnost v tlaku – vybrané popílky bez úprav .....- 60 -
Tabulka 27: Pevnost v tlaku – směs vybraných popílků bez úprav s optimalizovanou křivkou zrnitosti.....- 61 -
Tabulka 28: Pevnost v tlaku – směs vybraných popílků bez úprav s ohledem na vyhovující výslednou jemnost.....- 62 -
Tabulka 29: Pevnost v tlaku – mleté popílky .....- 63 -
Tabulka 30: Index účinnosti – stejný vodní součinitel .....- 64 -
Tabulka 31: Index účinnosti – mleté popílky (stejný vodní součinitel).....- 65 -
Tabulka 32: Index účinnosti – míchané popílky (stejný vodní součinitel).....- 67 -
Tabulka 33: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – vybrané popílky (stejná konzistence) .....- 69 -
Tabulka 34: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – směs vybraných popílků bez úprav s optimalizovanou křivkou zrnitosti (stejná konzistence) .....- 69 -
Tabulka 35: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – směs vybraných popílků bez úprav s ohledem na vyhovující výslednou jemnost (stejná konzistence) .....- 70 -

Tabulka 36: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost – mleté popílky (stejná konzistence) ..... - 70 -
Tabulka 37: Pevnost v tlaku – vybrané popílky (stejná konzistence) ..... - 71 -
Tabulka 38: Pevnost v tlaku – směs vybraných popílků bez úprav s optimalizovanou křivkou zrnitosti (stejná konzistence) ..... - 72 -
Tabulka 39: Pevnost v tlaku – směs vybraných popílků bez úprav s ohledem na vyhovující výslednou jemnost (stejná konzistence) ..... - 72 -
Tabulka 40: Pevnost v tlaku – mleté popílky (stejná konzistence) ..... - 73 -
Tabulka 41: Index účinnosti – stejná konzistence ..... - 74 -
Tabulka 42: Index účinnosti – mleté popílky (stejná konzistence) ..... - 76 -
Tabulka 43: Index účinnosti – míchané popílky (stejná konzistence) ..... - 77 -
Tabulka 44: Ekonomické zhodnocení pojivové složky různých směsí v závislosti na pevnosti ..... - 80 -
Tabulka 45: Složení cementových past pro stanovení reologie ..... - 82 -
Tabulka 46: Vyhodnocení torzního momentu ..... - 83 -

Seznam grafů

Graf 1: Grafické znázornění průměru rozlití neupravených a upravených popílků (stejný vodní součinitel) ..... - 55 -
Graf 2: Grafické znázornění průměru rozlití u míchaných popílků ..... - 57 -
Graf 3: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu – vybrané popílky ..... - 58 -
Graf 4: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu – míchané popílky ..... - 59 -
Graf 5: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu – mleté popílky ..... - 60 -
Graf 6: Grafické znázornění pevnosti v tlaku – vybrané popílky ..... - 61 -
Graf 7: Grafické znázornění pevnosti v tlaku – míchané popílky ..... - 62 -
Graf 8: Grafické znázornění pevnosti v tlaku – mleté popílky ..... - 63 -
Graf 9: Grafické znázornění pevnosti v tlaku v porovnání s REF ..... - 64 -
Graf 10: Grafické znázornění účinnosti mletí v závislosti na čase ..... - 66 -
Graf 11: Grafické znázornění účinnosti mísení v závislosti na čase ..... - 67 -

Graf 12: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu – vybrané popílky (stejná konzistence) ..... - 69 -
Graf 13: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu – míchané popílky (stejná konzistence) ..... - 70 -
Graf 14: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu – mleté popílky (stejná konzistence) ..... - 71 -
Graf 15: Grafické znázornění pevnosti v tlaku – vybrané popílky (stejná konzistence) ..... - 72 -
Graf 16: Grafické znázornění pevnosti v tlaku – míchané popílky (stejná konzistence) ..... - 73 -
Graf 17: Grafické znázornění pevnosti tlaku – mleté popílky (stejná konzistence) .. - 74 -
Graf 18: Grafické znázornění poklesu indexu účinnosti v závislosti na čase .... - 75 -
Graf 19: Grafické znázornění účinnosti mletí v závislosti na čase ..... - 76 -
Graf 20: Grafické znázornění účinnosti mletí v závislosti na čase ..... - 78 -
Graf 21: Grafické znázornění průběhu ceny v závislosti na čase ..... - 80 -
Graf 22: Vykreslení torzních momentů cementových past s popílky..... - 84 -