



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

Bc. Jakub Herrmann
MOŽNOSTI RECYKLACE VÝROBKŮ NA BÁZI
SÁDRY

Diplomová práce

2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Herrmann

Jméno: Jakub

Osobní číslo: 409669

Zadávací katedra: 132

Studijní program: SI

Studijní obor: NC

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Možnosti recyklace výrobků na bázi sádry

Název diplomové práce anglicky: Possibilities of recycling of gypsum-based products

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vypracování rešerše na téma DP.
- 2) Praktická část:

Otestovat vlastnosti dvou sádrových pojiv a dvou recyklátů na bázi sádrových výrobků.

Navrhnout optimální množství náhrady sádry pomocí recyklátu.

Navrhnout modifikaci vlastností za účelem zlepšení tepelně-technických parametrů.

Stanovit soubor materiálových vlastností na vzorcích zatvrdlé sádry s obsahem recyklátu.

Seznam doporučené literatury:

Databáze WoS a kniha Černý R. a kol.: Vlastnosti modifikované sádry, Brno 2009.

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 28. 2. 2019

Termín odevzdání diplomové práce: 19. 5. 2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

28. 2. 2019
Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje.

V Praze dne 20. května 2019

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlovi Tesárkovi, Ph.D. za odborné a pedagogické vedení, dále pak panu Ing. Zdeňkovi Proškovi za odborné konzultace na pracovišti, panu Ing. Janovi Valentinovi, Ph.D. za umožnění přístupu k zatěžovacím strojům a panu doc. Ing. Petrovi Semerákovi, Ph.D. za zapůjčení isometu.

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je otestování dvou sádrových pojiv a recyklátů na bázi sádrových pojiv, návržení optimálního množství náhrady sádry za použití recyklátů a stanovení souborů vlastností na vzorcích ztvrdlé sádry s obsahem recyklátu.

První část je věnována teoretickým poznatkům sádry a její recyklace, druhá část je tvořena vlastním výzkumem.

Klíčová slova

Sádrová pojiva, stavební odpad, recyklace.

Abstract

The subject of this diploma thesis is to test two gypsum binders and recycled materials based on gypsum binders, to design the optimal amount of gypsum replacement using recycled materials and to determine the set of properties on samples of hardened gypsum containing recycled material.

The first part is devoted to the theoretical knowledge of plaster and its recycling, the second part is made by own research.

Keywords

Gypsum binders, construction waste, recycling.

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Sádra.....	9
2.1 Historie využití sádry.....	9
2.2 Suroviny pro výrobu.....	9
2.2.1 Přírodní sádrovec.....	10
2.2.2 Chemosádrovec.....	11
2.2.3 Energosádrovec.....	11
2.3 Výroba sádrových pojiv.....	12
2.4 Hydratace sádry.....	13
2.5 Druhy sádrových pojiv.....	14
2.5.1 Rychle tuhnoucí sádra.....	14
2.5.2 Pomalu tuhnoucí sádra.....	15
2.5.3 Anhydrit.....	15
2.5.4 Modifikovaná sádra.....	15
2.6 Vlastnosti sádry.....	16
2.6.1 Normové zatřídění sádry.....	16
2.6.2 Pevnost a přetváření.....	17
2.6.3 Porozita.....	18
2.6.4 Vlhkost.....	18
2.6.5 Tepelně technické vlastnosti.....	19
2.6.6 pH sádry.....	19
3. Recyklace sádry a její znovupoužití.....	20
4. Výzkum.....	22
4.1 Cíl.....	22
4.2 Použitý materiál.....	22
4.3 Postup výzkumu s jemně mletými recykláty.....	23
4.3.1 Vodní součinitel.....	23
4.3.2 Množství přidaného recyklátu.....	25

4.3.3	Vliv množství recyklátů na objemové změny	27
4.3.4	Modul pružnosti v průběhu času.....	33
4.3.5	Tlakové zkoušky	37
4.3.6	Tepelně technické vlastnosti	41
4.4	Přidání hrubozrnných recyklátů.....	43
4.4.1	Objemové změny u hrubozrnných recyklátů	43
4.4.2	Tlakové zkoušky	48
4.4.3	Experiment se zpěňující přísadou a teplotní charakteristiky	51
4.5	Shrnutí postupů výzkumu	54
5.	Závěr	57
6.	Seznam citací	59
7.	Seznam tabulek	63
8.	Seznam obrázků.....	65

1. Úvod

Sádra, zvláště pak sádrokarton, je velmi populární materiál používaný nejen při rekonstrukcích objektů, zateplení, budování příček či úpravách interiérů. Jeho význam a tím i uplatnění stále roste. K tomu přispívá také odolnost sádry vůči ohni nebo schopnost bránit pronikání hluku. Jeho obliba je tak velká, že za jeden rok vyprodukuje evropský průmysl (od samotných odpadů při výrobě, přes stavební odřezky po demolice) na 2 350 000 tun sádrokartonového odpadu. S tím, jak je více používán, je také potřeba se snažit, aby se dal sádrokarton co nejlépe recyklovat. Myšlenka recyklovat sádro a sádrový odpad vznikla v 90. letech na popud ekologů. Problematikou recyklace je však kompaktní povaha několika sloučených materiálů. Sádrokarton už dávno není jen papír a sádra. Vnitřní jádro, tvořené síranem vápenatým, surovým sádrovcem a celulóзовými vlákny, plastifikátory, pěnidly, urychlovači, škrobovými látkami proti plísním, nebo voskovými emulzemi, je sendvičově stlačeno mezi papírové lišty či laminátové podložky. Zástupci velkých evropských firem proto začali jednat o tom, jak cíleně posílit materiálovou recyklaci a znovu zapojení sádrokartonu do oběhu. Do budoucna se předpokládá, že hlavním trendem bude přejít od demolic budov, což obvykle vytvoří obrovské množství stavebního odpadu bez rozlišení, k jejich demontážím. Budovy se pak rozloží na jednotlivé prvky a vyseparovaný sádrokarton by se mohl stát jednou z hlavních druhotných surovin. [1] [2] [3]

2. Sádra

2.1 Historie využití sádry

Sádra je materiál, který se používal již v dávné minulosti. Na některých stavbách, datovaných 7000 let př. n. l, se používala sádra pro úpravy stěn. Před více než 4000 lety používali Egypťané sádro do zdících malt pro pyramidy, Římané pak pokračovali v používání sádry k výrobě dekorativních prvků. V 16. století se speciálně zpracovaná sádra používala jako náhrada mramoru v intarzovaných obrazech. Po ničujícím požáru Londýna ve 2. polovině 17. století nařídil starosta Paříže, že všechny dřevěné stavby musí být opatřeny sádrovými omítkami jako protipožární ochrana. K výrobě sádry se využíval zdroj suroviny v blízkosti Paříže. Z té doby pochází název „Plaster de Paris“ (Pařížská sádra). Do dnešní doby tento název dochoval jako označení pro rychle tuhnoucí sádro. Později se začala sádra používat na vnitřní omítky, vyráběné speciální technikou ze sádry, vápna, křídla a barevných pigmentů, které měly podobu mramoru. V poslední době se zvýšilo používání sádry, zejména díky výrobě sádrokartonových a sádrovláknitých desek. Rozvoj jejich výroby umožnily technologie odsiřování kouřových plynů, které produkují poměrně čistý síran vápenatý dihydrát, vhodný pro výrobu hemihydrátové sádry. [3] [30]

2.2 Suroviny pro výrobu

Surovina pro výrobu sádry je sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, neboli dihydrát síranu vápenatého. Ten se vyskytuje volně v přírodě, v ČR jsou však ložiska jakostního sádrovce velmi ojedinělá. Dnes probíhá těžba pouze v Kobeřicích na Opavsku, kam zasahuje výběžek Polské pánve. Mocnosti vrstev jsou však slabé a více či méně znečištěné jílem. Z toho důvodu je v ČR i v ostatních zemích s malými přírodními zásobami zaměřena pozornost na možnost výroby sádrových pojiv z odpadních surovin průmyslové výroby. Vzniká

jako vedlejší produkt při některých výrobcích, při odsiřování kouřových plynů v tepelných elektrárnách a teplárnách, nebo v chemických výrobcích. Na tento způsob, při kterém dochází ke zpracování odpadních hmot, se však zaměřují i země s dostatečnými přírodními zdroji, protože je to možnost velmi ekologická. [3] [4] [31]

2.2.1 Přírodní sádrovec

V přírodě vznikl sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) spolu s anhydritem (CaSO_4) z přesycených vodných roztoků v mělkých mořích, ze kterých se odpařila voda. Z roztoku se nejprve vyloučily uhličitany, poté sírany, a nakonec nejvíce rozpustné chloridy. V důsledku vyloučení těchto solí se sádrovce navzájem liší svojí čistotou, strukturou a barvou. Přírodní sádrovec je průhledný, bezbarvý, bílý (alabastr), nebo podle druhu příměsí zbarven do žluta, šeda nebo hněda. Sádrovec krystalizuje v jednodílné soustavě, tvoří tabulkovité krystalky vyskytující se v mnoha tvarech, z nichž nejčastější jsou lupenité, jemnozrnné, tabulkové, jehličkové až prizmatické nebo čočkovité. Velmi často dochází ke zdvojení krystalů – tzv. vlaštovčí ocasy. Ušlechtilou podobou je např. alabastr, který je velmi jemně zrnitý a čistě bílý, selenit, který má až vláknité krystalky a hedvábný nádech, nebo mariánské sklo, jenž tvoří mocné čiré krystaly, či saharská růže, vytvářející shluky krystalů připomínající květ růže. Nejčastějšími nečistotami jsou uhličitany vápenatý, hlinitan vápenotohořečnatý, jílové minerály, chlorid sodný, síran sodný a také živice.

V přírodě se sádrovec vyskytuje v ložiskách, která se dle vzniku dělí na primární a sekundární. Primární ložiska vznikla odpařením vody z uzavřených moří a slaných jezer. Tím, jak se voda odpařovala, se postupně zvyšovala koncentrace solí, až došlo k přesycení roztoků. Postupně docházelo k jejich vylučování a usazování. Nejnižší se v primárních ložiscích nachází síran vápenatý, který se jako nejméně rozpustný vylučoval nejdříve.

Sekundární vznik se vysvětluje rozkladem pyritu za přítomnosti vody, vzduchu a vápence.

V České republice existuje naleziště sádrovce u Kobeřic na Opavsku. Naleziště o rozloze 140 ha má mocnost okolo 35 m. Těží se povrchově již od roku 1965. Obsah sádrovce se

v těžené surovině pohybuje od 60 do 85 %. Hlavní příměsí jsou jílové minerály, v malém množství je přítomen anhydrit.

Ve světě se největší ložiska nachází v Polsku, Německu, Francii, Řecku, Rusku, USA nebo v Japonsku. [3] [4]

2.2.2 Chemosádrovec

Chemosádrovec vzniká jako odpad chemických nebo průmyslových výrob, kde se odpadní kyselina sírová nebo rozpustné sírany srážejí hydroxidem vápenatým ve formě vápenného hydrátu. Využití takovýchto sádrovců je závislé na čistotě vzniklého sádrovce a způsobu jeho využití. K výrobě chemosádrovce je možno využívat sádrovce z výroby kyseliny fosforečné (fosfosádrovec) a sádrovce z výroby titanové běloby (titanosádrovec). V této technologii se volná odpadní kyselina sírová neutralizuje vápencem. Vzniklý produkt – sádrovec – se používá jako regulátor tuhnutí cementu a na výrobu sádry. [3]

2.2.3 Energosádrovec

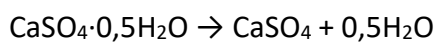
Jedním z velkých zdrojů sádrovce, potřebným pro výrobu sádry, je energosádrovec. Jedná se o chemicky čistý materiál, vznikající odsířením spalin z tepelných elektráren a tepláren, kde hlavním palivem je hnědé uhlí s obsahem síry. Probíhá zde jednak vysokoteplotní (1400 – 1600 °C) nebo fluidní (850 °C) spalování, podle kterého se následně volí metoda desulfatace. Mokrý desulfatace probíhá při vysokoteplotním spalování. Polosuchá je tehdy, kdy je aktivní látka vstřikována ve formě vodní suspenze do proudu horkých spalin. Suchá desulfatace se používá při fluidním spalování.

Z odlučovačů jsou spaliny vedeny do absorberů, kde projdou zchlazením vodní suspenze jemně mletého vápence. Dochází tak k vymývání oxidů síry, čímž vzniká energosádrovec.

Čistota získaného sádrovce závisí na čistotě použitého vápence. V energosádrovci je běžně obsah $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ vyšší než 98 hmotnostních %. Tento sádrovec se používá pro výrobu rychletuhnoucí sádry, která se uplatní při výrobě sádrokartonových a sádrovláknitých desek. [3] [16]

2.3 Výroba sádrových pojiv

Odvodnění sádrovce vzniká hemihydrát a následně bezvodý síran vápenatý. Reakce rozkladu sádrovce probíhá ve dvou fázích:



Celkový proces je mnohem složitější, než to na první pohled vypadá. Liší se již odvodnění sádrovce z přírodní suroviny, která má jistý podíl hlinitokřemičitanů a uměle připraveného vzorku z čistých chemikálií. Již při 60 °C byla v obou vzorcích pozorována přítomnost malého množství hemihydrátu ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Zahřátím sádrovce na teplotu 170 °C se zvyšuje podíl hemihydrátu i anhydritu v přírodní surovině i v uměle vyrobeném $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Při 240 °C je v přírodní surovině přítomno více $\text{CaSO}_4 \cdot 0,15\text{H}_2\text{O}$ než $\text{CaSO}_4 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$, ale v uměle vyrobeném dihydrátu ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) jsou obě sloučeniny zastoupeny stejným dílem. Při zvýšení teploty na 450 °C je v uměle připraveném vzorku přítomen pouze anhydrit, zatímco ve vzorku z přírodního sádrovce je ještě jistý podíl hemihydrátu.

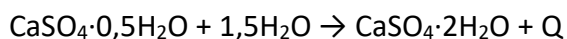
Sádra se dá vyrábět několika různými postupy. Daný výrobní postup a zařízení se volí podle požadavků na vyrobenou maltovinu a podle surovin, které jsou k dispozici. Natěžená hornina se před výpalem podrtí a uloží v zásobnících. K dehydrataci sádrovce může docházet např.:

- v sušících rotačních mlýnech, v nichž se surovina mele a současně vysouší procházejícím teplým vzduchem (používá se pro výrobu rychle tuhnoucí β -sádry),
- v rotačních pecích
- v šachtových pecích při teplotách 800 až 1000 °C (výroba pomalu tuhnoucí sádry)
- v tzv. vařácích, kde teplota suroviny dosahuje 130 – 150 °C (starší způsob výroby),
- v autoklávech, které pracují s přetlakem při teplotě okolo 120 ° (výroba nejkvalitnější α -sádry).

Získaný produkt rozkladu sádrovce, $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, se nazývá rychletuhnoucí sádra, kterou lze vyrobit ve dvou formách. Kvalitnější α -sádra a β -sádra, nazývaná také jako štuková nebo Pařížská sádra. [3] [5] [6]

2.4 Hydratace sádry

Vytvrzovací proces sádry je zpětná hydratace, kdy dochází k navázání vody a ke vzniku síranu vápenatého dihydrátu za uvolnění tepla Q . Jedná se tedy o děj exotermický.



Po smísení hemihydrátu s vodou dochází k jeho rozpouštění. V okamžiku, kdy koncentrace Ca^{2+} a SO_4^{2-} iontů překročí koncentraci nasyceného roztoku vzhledem k rozpustnosti $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, se začnou tvořit zárodky krystalů. Krystaly dihydrátu postupně rostou, vzájemně srůstají a prorůstají, než vytvoří mikrostrukturu zatvrdlé sádry jako nositele fyzikálních a chemických vlastností zatvrdlého produktu. Vlastní mechanismus reakce je velmi složitý.

Zvýšení pevnosti zatvrdlé sádry lze dosáhnout jejím vysušením. Odpařením vody vznikají mezi krystaly uloženého síranového roztoku další krystaly sádrovce, které zesilují již existující spojení. Mimoto po odpaření vody nedochází tak snadno k vzájemnému posunu krystalů. Na hydrataci hemihydrátu mají vliv silné anorganické kyseliny a soli silných kyselin. Tyto sloučeniny působí jako urychlovače tuhnutí a tvrdnutí sádry. Počátek tuhnutí nastává od 2 do 6 minut. Proto je snaha v různých technologiích, používající sádro, rychlost tuhnutí zpomalit. Jako zpomalovače tuhnutí se používají elektrolyty a neelektrolyty, které mění rozpustnost, ale nevytváří na povrchu částic špatně rozpustné filmy, látky povrchově aktivní, které brání vstupu vlhkosti do zrna (klíh, deriváty celulózy, keratin), látky tvořící nerozpustný film na povrchu sádrových zrn zabraňující krystalizaci (kyselina vinná, jablečná, citronová, boritá), nebo jejich kombinaci. Na druhou stranu se v současné době v některých případech přidávají do hemihydrátu mikroaditiva, urychlující proces tuhnutí za účelem dobře zhutněné, husté struktury krystalů. Díky tomu má výsledný produkt vyšší hodnoty pevnosti a lepší odolnost proti vodě. [3] [7] [25]

2.5 Druhy sádrových pojiv

Existuje několik typů sádrových pojiv nejrůznějších vlastností. Každá však vzniká během jiného technologického procesu výroby, za přítomnosti různých teplot, tlaků nebo vlhkosti. Sádrová pojiva lze zatřídit do následujících skupin:

2.5.1 Rychle tuhnutí sádra

Rychletuhnoucí sádra patří mezi pojiva získaná ohřevem sádrovce až na 180 °C. Vlivem těchto teplot vzniká hemihydrát síranu vápenatého (α i β) a menší množství anhydritu.

α -sádra je považována za nejkvalitnější složku rychle tuhnutí sádry. Vyrábí se v prostředí nasyceném vodní párou při teplotách mezi 110 a 150 °C v autoklávech nebo v roztoku solí. Její struktura je tvořena jehličkovitými, hutnými krystalky. Při stejné zrnitosti má menší pórovitost než β -sádra, díky které je potřeba vody pro směs stejné konzistence menší. Při smíchání s vodou se krystalky rozpouštějí pomaleji. To má za následek pomalejší proces tuhnutí, než u β -sádry a vznik uspořádanější mřížky krystalků, čímž má ztvrdlá směs výrazně vyšší pevnost (40 až 60 MPa). Díky těmto pevnostním vlastnostem se α -sádra používá nejen ve stavebnictví (samonivelační podlahové směsi), ale i v zubním lékařství.

β -sádra, nebo taky jako stavební sádra, vzniká ohřevem sádrovce v prostředí nenasyčeném vodní párou v tzv. vařících nebo v rotačních pecích. Takovýto způsob výroby má za následek rozrušování formy krystalků. Struktura této směsi je tak náchylná na poruchy krystalické mřížky. Jedná se o sádro horší kvality. Její pevnosti dosahují pouze 2 až 10 MPa. β -hemihydrát je, podle obsahu jílu, bílý nebo šedý. Používá se k výrobě malty či štukových omítek, v elektrikářství nebo k výrobě sádrokartonových a sádrovláknitých desek.

Sádrokarton má obrovské využití, především při stavbě příček, podhledů nebo jako lehká plovoucí podlaha. Funguje i jako tepelná a zvuková izolace. Sádrovláknité desky jsou podobné výrobky, jako desky sádrokartonové. Rozdíl je hlavně ve výrobním procesu. Tyto desky mají větší pevnost, protipožární odolnost a mohou se použít ve vlhkém prostředí. [4] [7] [8] [10] [11]

2.5.2 Pomalu tuhnoucí sádra

Pomalu tuhnoucí sádra, tzv. potěrová či zednická, vzniká výpalem sádrovce nad 800 °C. Je tvořena jemně mletým anhydritem, volným vápnem a hemihydrátem. Směs začíná tuhnout po dvou až pěti hodinách a končí až po osmi hodinách. Nejčastěji se používá se jako potěr bezespárých podlah. Díky neekonomickému výpalu při vysokých teplotách se tato sádra prakticky nepoužívá. [4] [8]

2.5.3 Anhydrit

Výroba anhydritové maltoviny probíhá jemným rozemletím přírodního nebo vypáleného anhydritu a vhodného budiče (např. cement, vápno, síran apod.). Ten je k anhydritu přidáván před výpalem sádrovce, nebo se semele společně s přírodním nebo vypáleným anhydritem. Budič se k této maltovině přidává z hydratačních důvodů. Anhydrit samotný reaguje s vodou velmi pomalu. Prakticky zde nenastává proces tuhnutí a je tedy zapotřebí přidat budič, který umožní tuto reakci spustit.

Vlastnosti takto vyrobené maltoviny jsou značně ovlivněny velikostí vodního součinitele, kdy s jeho nárůstem klesají pevnosti.

V dnešní době se s aplikací anhydritu nejčastěji setkáme u samonivelačních podlah. Díky malým objemovým změnám jsou vhodné i pro aplikaci podlahového vytápění, ale pouze v suchém prostředí. Lze ji použít také jako maltu na zdění a omítání. [4] [7] [26]

2.5.4 Modifikovaná sádra

Sádrové pojivo má, v porovnání s ostatními stavebními pojivy, spoustu kladných vlastností, jako je rychlý nárůst manipulační pevnosti, možnost použít ji samostatně bez plniv atp. Na druhou stranu má řadu nedostatků, kde mezi hlavními vlastnostmi je vysoký vodní součinitel, negativně ovlivňující pevnost sádry, nasákavost nebo tepelné technické vlastnosti. Alespoň částečně můžeme tyto negativní vlastnosti odstranit, a to přidáním přísad ve formě různých anorganických solí, organických kyselin a jejich solí, makromolekulárních látek nebo také reaktivních či nereaktivních příměsí za účelem zlepšení požadovaných vlastností sádry. Vlastnosti výrobků ze sádry se dají upravit

modifikací sádry už v samotné hmotě anebo úpravou povrchu ztvrdlého výrobku. Sádra se může zkombinovat s dalšími jinými pojivy (struska, cement, vápno), nebo smíchat s výztužnými vlákny, která by měla zlepšit mechanické vlastnosti výrobku.

Přísady můžeme rozdělit podle účinků na sádro na plastifikátory (ovlivňují vodní součinitel sádrové kaše), hydrofobizátory, regulátory tuhnutí, zpěňovadla (ovlivňují tepelné a vlhkostní parametry) a ostatní.

Použití takto vylepšené sádry se dá uplatnit u prvků nosných konstrukcí staveb nebo tepelně a zvukově izolačních prvků. [3] [27]

2.6 Vlastnosti sádry

2.6.1 Normové zatřídění sádry

Vlastnosti sádry jsou vypsány v normě ČSN 72 2301 Sádrová pojiva. Podle normy se sádra podle pevnosti v tlaku dělí do 12 tříd po dvou hodinách tvrdnutí, viz tab. 1. V tab. 2 je uvedeno dělení sádry do tří skupin, a to podle počátku a doby tuhnutí na rychle, normálně a pomalu tuhnoucí. Dalším kritériem vlastností sádry je jemnost mletí. Jemnost mletí dle uvedené normy souvisí s množstvím záměsové vody. Z tohoto pohledu je sádra rozdělena na hrubě, středně a jemně mletou, viz tab. 3. [3]

Tab. 1: Pevnostní třídy sádry

Třída pojiva	Pevnost v tlaku [MPa]	Třída pojiva	Pevnost v tlaku [MPa]	Třída pojiva	Pevnost v tlaku [MPa]
G-2	2	G-6	6	G-16	16
G-3	3	G-7	7	G-19	19
G-4	4	G-10	10	G-22	22
G-5	5	G-13	13	G-25	25

Tab. 2: Počátek a doba tuhnutí sádry

Druh pojiva	Označení	Tuhnutí – počátek dříve než [min]	Doba tuhnutí ne déle než [min]
rychle tuhnoucí	A	2	15
normálně tuhnoucí	B	6	30
pomalou tuhnoucí	C	20	nepožaduje se

Tab. 3: Rozdělení sádrových pojiv podle jemnosti mletí

Druh pojiva	Označení	Zbytek na síť 0,2 mm max. [%]
hrubě mleté	I	30
normálně mleté	II	15
jemně mleté	III	2

2.6.2 Pevnost a přetváření

Pevnost sádry je závislá hlavně na dvou faktorech, a to na čistotě suroviny a na vodním součiniteli směsi (poměr objemu vody k objemu sádry).

Přírodní sádrovec obsahuje až 40 hm. % nečistot, hlavně pokud se jedná o jílové minerály. Díky výrobě sádry za vysokých teplot nedochází k dehydrataci těchto nečistot. Ty pak v sádře zůstávají a působí jako jemné plnivo.

I přes stejné chemické složení jsou mezi přírodní a umělou sádrrou jisté rozdíly v objemové hmotnosti a v pevnosti v tlaku (viz tab. 4). Rozdíly mezi nimi jsou dány rozdílnou mikrostrukturou.

Modul pružnosti E se často uvádí mezi 2 a 6 GPa, dotvarování φ pak mezi 5,4 a 6,2‰.

[3] [7]

Tab. 4: Rozdíly mezi přírodním sádrovcem a zatvrdlým produktem

Název	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Pevnost v tlaku [MPa]
přírodní sádrovec	2300	40 - 45
sádrovec vzniklý hydratací sádry	500 - 1500	1 - 35
přírodní anhydrit	2600	100 - 150
zhydratovaný anhydrit	1900	20 - 30

2.6.3 Porozita

Porozita je charakteristika materiálu, která udává tvar, velikost a množství pórů obsažených v mikrostrukturu sádry. Je závislá na vodním součiniteli (poměru množství vody ku použitému množství hemihydrátu). Čím vyšší je vodní součinitel, tím vyšší je výsledná porozita materiálu, volnější mikrostruktura a tím nižší pevnost sádry, závislá na srůstech vytvořených krystalů. Objemová hmotnost, závislá na množství vody obsažené v pórech, se se stoupajícím vodním součinitelem zmenšuje. S časem, kdy směs postupně vysychá, se voda z pórů uvolňuje a objemová hmotnost klesá. [3]

2.6.4 Vlhkost

Sádrové výrobky díky své porézní struktuře (až 70 % objemu zaujímají póry a kapiláry) obsahují volnou vodu a páru, která se udržuje právě v pórech. Ztvrdlá sádra je hydrokopická, tzn. že ve vlhkém prostředí velmi ochotně přijímá vodu z okolního prostředí, ale také ji, v případě snížení vlhkosti okolního klima, opět uvolňuje. Nedochozí při tom k negativním objemovým změnám. Této vlastnosti lze využít pro udržení stálé vlhkosti vzduchu prostředí. Problém nastává ve chvíli, kdy je sádra permanentně vystavena vlhkosti okolního prostředí 75 % a výše. Sádra tehdy ztrácí svoji pevnost a při zatížení má tendenci se dotvarovávat. Není tedy vhodná pro nosné konstrukce ve vlhkém prostředí. [17] [24] [29]

2.6.5 Tepelně technické vlastnosti

Mezi hlavní tepelně technické parametry suché sádry bývá uváděna měrná tepelná kapacita a tepelná vodivost. Tepelná kapacita se při ustálené vlhkosti pohybuje mezi 840 až 1050 J/kg·K, pro tepelnou vodivost se uvádí hodnoty mezi 0,25 až 0,55 W/m·K.

Sádra má, díky vodě vázané v pórech, výborné protipožární vlastnosti. Při teplotě vyšší než 110 °C se sádrový výrobek odvodní a vytěsněnou vodou vytvoří na povrchu výrobku vrstvu páry, kterou ho chrání před ohněm. Při vystavení teplotě nad 160 °C je sádra schopná z 1 tuny své hmotnosti takto uvolnit až 200 litrů vody.

Takto vysušená sádra však ztrácí svoji pevnost. [7] [9]

2.6.6 pH sádry

Hodnota pH udává kyselost materiálu a s tím i možné způsobení nepříjemných reakcí lidské pokožky v kontaktu s materiálem. Z hlediska zdravotní bezpečnosti je sádra považována za nezávadný materiál. Hodnota pH sádry na jejím povrchu je udávána kolem 5,5, kdežto pH lidské pokožky se pohybuje v rozmezí od 4,5 do 5,5. Kromě vodní páry neuvolňuje žádné nebezpečné látky, ionty ani radikály a síran vápenatý nepůsobí člověku žádné potíže. Jelikož není prokázáno, že by sádra vyvolávala při kontaktu s lidskou pokožkou alergické reakce, vysušovala ji nebo jinak poškozovala, je hojně používána v lékařství pro fixační vazby nebo jako kostní výplň. [9] [32]

3. Recyklace sádry a její znovupoužití

Hned třetina evropského odpadu pochází ze staveb a jejich demolicí. Velkou část celkového stavebního a demoličního odpadu tvoří výrobky na bázi sádry, od sádrových omítek, přes příčkové tvárnice, po sádrokartonové či sádrovláknité desky. Bohužel ani nejmodernější typy těchto výrobků nejsou bez příměsí. Obvykle je největším problémem vysoký obsah síranů, který může kontaminovat půdní a vodní zdroje.

Velké množství tohoto odpadu míří na skládky, i když mnohé materiály by bylo možné znovu využít. Právě proto Evropská komise stanovila stavební a demoliční odpad jako prioritu pro recyklační iniciativy. Nejvíce po změně trendu volá evropský gigant Eurogypsum, který společně s partnery z Belgie, Francie, Německa, Nizozemí a Velké Británie založil projekt **Gypsum to Gypsum** („Ze sádry znovu sádrou“), který spolufinancovala Evropská unie a jehož cílem je, v rámci doporučení a směrnic doporučit, jakým způsobem je možné tento materiál dokonale znovu využít, nastavit standardy a podpořit znovuzavedení recyklovaného sádrokartonu do oběhu. Projekt je zaměřen na transformaci trhu s odpady ze sádrokartonu v Evropě s cílem dosáhnout vyšší míry recyklace odpadů ze sádry, což přispěje k hospodárnému využívání zdrojů.

Sádra a výrobky z ní mohou být brány jako stavební materiál umožňující uzavřený recyklační cyklus (closed-loop recycling). V praxi to znamená, že se sádra může používat znovu a znovu, protože proces recyklace nemění chemické složení suroviny. Recyklovatelnost sádry má velký potenciál být úspěšným průmyslovým řešením. Umožňuje výrobu nových, opakovaně použitelných výrobků s méně negativními dopady na životní prostředí, minimálně snížením emisí vyprodukovaných během vypalování sádrovců. Některé firmy už umí oddělit ze sádrokartonu papír a nadrcenou sádro a navýšit tak procento recyklovatelné sádry v sádrokartonech až na 30 %. [1] [2] [13] [14] [15] [18] [20]

Výzkumná pracoviště u nás i ve světě začala na popud těchto projektů testovat různé sádrové směsi s přidaným recyklovaným stavebním odpadem na bázi sádry. Ovšem některé experimenty byly, kromě sádrového recyklátu, zaměřené na přidání jiných stavebních odpadů, jako např. vylehčení sádrových výrobků za použití směsí z polystyrenových odpadů. Použili polystyren jak pěnový, tak i extrudovaný, a to jako náhradu za perlit či vermikulit, používaný k vylehčení směsí. Takto vylehčené vzorky odpovídaly svými mechanickými vlastnostmi normovým hodnotám i při nižší hustotě, než mají lehčené sádry používané v současnosti.

Zvýšení voděodolnosti bylo zkoušeno za pomoci příměsí ze silikonových slínek. Ten v testované směsi vytvořil zhuštěnou strukturu materiálu, díky které měl výsledný vzorek o 17 % nižší rychlost absorpce vody a zároveň vyšší mechanickou pevnost v porovnání s čistou sádro.

Jiné výzkumy, zaměřené více na ekologii, testovali na vzorkách sádry příměsí na bázi biologicky rozložitelných materiálů. Od přidaných rozemletých skořápek a lastur, které měly podivuhodně pozitivní vliv na zlepšení mechanických, tepelných a absorpčních vlastností, přes vlákna z palmy olejně a rýžových slupek jako vyztužení směsi, až po sypaný černý čaj, kterým se snížil vodní součinitel směsi na úkor prodloužení doby hydratace. [19] [21] [22] [23] [28]

4. Výzkum

4.1 Cíl

Diplomová práce byla zaměřena na možnosti využití recyklovaného stavebního odpadu na bázi ztvrdlé sádry. Zkoumalo se optimální množství náhrady sádry za použití recyklátů různé formy a hrubosti namletí a stanovení souborů vlastností na vzorcích ztvrdlé sádry s obsahem těchto recyklátů.

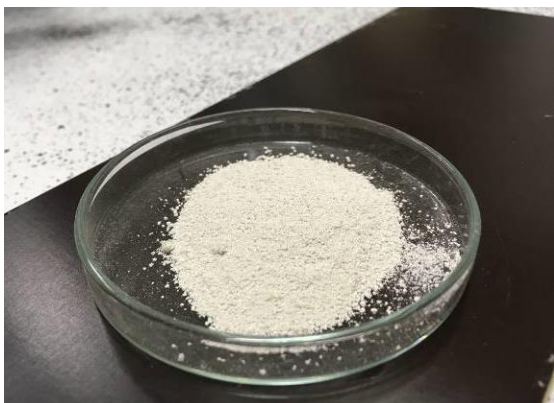
4.2 Použitý materiál

V rámci diplomové práce bylo testováno několik různých materiálů. Jednalo se o dvě sádrová pojiva a o dva druhy recyklátů, které byly před jejich použitím upraveny různými způsoby.

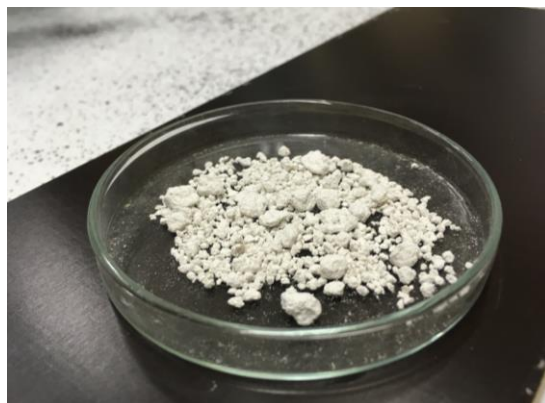
Jedním z použitých sádrových pojiv je bílá sádra, která se běžně využívá k výrobě sádrokartonových desek.

Druhým použitým sádrovým pojivem je stavební šedá sádra, jejíž využití je velmi široké. Od stavebního pojiva pro zednické a instalatérské práce, přes výrobu sádrových příčkových dílců, po výstavbu protipožárních zdí v uhelných dolech. [12]

Jako příměsí přidané do testovaných směsí byly použity dva typy odpadního materiálu na bázi sádry: sádrové bloky a sádrokartonové desky. Sádrové bloky prošly, před přidáním do zkoumaných směsí, mletím na recyklační lince. Sádrokartonové desky prošly drcením (obr. 1), mletím hrubým (0 - 1 mm; obr. 2) a jemným (s kousky papíru; obr. 3) a po separaci papíru následně mikromletím. Všechny čtyři varianty výsledného odpadu sádrokartonových desek byly k dispozici.



Obr. 1: Drcený SDK



Obr. 2: Hrubě mletý SDK



Obr. 3: SDK mletý s kousky papíru

4.3 Postup výzkumu s jemně mletými recykláty

4.3.1 Vodní součinitel

Před započítím míchání testovaných směsí a tvorby vzorků bylo zapotřebí najít vhodný poměr hmotnosti vody k hmotnosti suché směsi, tzv. vodní součinitel w . Míchání směsí probíhalo ručně, bez použití techniky určené k míchání sádrových směsí. Vzhledem k rychlosti tuhnutí sádry bylo proto nutné nalézt vodní součinitel tak, aby byla směs po určité době dobře zpracovatelná.

Množství vody se nejprve zkušelo na samotné šedé stavební sádře. Určité množství suché směsi (zde jen šedé sádrové pojivo) se nasypalo do umělohmotné mísy, ve které se, po nalití vody hmotnostně odpovídající vodnímu součiniteli w , promíchalo pomocí

ručního míchadla. Po zhomogenizování se směs vlivala do válcové formy (průměr 40 mm, výška 50 mm; obr. 4). Na takto vyrobených vzorcích se měřila doba tuhnutí a tvrdnutí směsi.

Zkouška rozlití byla v rámci výzkumu prováděna na válcové formě o průměru 55 mm a výšce 20 mm, do které se směs se nalila. Hned poté se válec vytáhl kolmo vzhůru a na rozlité směsi se změřil její průměr (obr. 5 a 6).

Jelikož se nejedná o rozměry formy uvedené v normě ČSN 72 2301 Sádrová pojiva, nelze podle zkoušky rozlití zařadit zkoumané směsi do kategorií uvedené v této normě. Výsledky této zkoušky rozlití sloužily pouze pro porovnání směsí v rámci výzkumu.



Obr. 4: Vzorky směsí testované na dobu tuhnutí a tvrdnutí



Obr. 5: Zkouška rozlití



Obr. 6: Měření rozlité směsi

Testovat se začalo na vodním součiniteli $w = 0,6$ a postupně se navyšoval až na hodnotu 1,2. Použití nižšího vodního součinitele zde nemělo význam. Už při $w = 0,6$ směs začala tuhnout velmi brzy a nebylo možné ji vylít z mísy do formy. Naopak u vyššího vodního součinitele, než $w = 1,2$, nenastalo tvrdnutí ani po uplynulých dvou hodinách. Tento vyšší poměr množství směsí byl tedy také nevhodný pro další postupy. Z výsledků zkoumaného vodního součinitele na šedou sádro u uvedených v tab. 5 si lze všimnout závislosti doby tuhnutí a tvrdnutí a rozlití směsi na množství vody. Čím vyšší je vodní součinitel, tím déle směs tuhne a tvrdne, je řidší a průměr rozlité směsi je tedy větší.

Tab. 5: Vodní součinitel pro šedou sádro

Vodní součinitel w [-]	Doba tuhnutí [min]	Doba tvrdnutí [min]	Rozlití [mm]
0,6	1	2	61
0,8	7	6	104
1,0	9	7	113
1,2	18	10	146

4.3.2 Množství přidaného recyklátu

Po určení rozsahu použitelného vodního součinitele pro ruční míchání směsí se začalo zkoumat množství recyklátu, přidaného k sádrovému pojivu. Pro tento další postup byla zvolena bílá sádra, ke které se přimíchávaly pomleté sádrové tvárnice v určitých poměrech. Vzhledem k rychlejšímu nárůstu tuhnutí bílé sádry se vodní součinitel zvolil $w = 1,2$. Jak můžeme z tabulky 6. vyvozovat, různé množství recyklátu nemá na zkoušku rozlití ani dobu tuhnutí a tvrdnutí do 50 hm. % recyklátu, přidaného do suché směsi, příliš velký vliv. Při množství recyklátu 50 hm. % a více začala směs tuhnout, v porovnání s ostatními směsi, až po delší době nebo vůbec. Proto v dalších

následujících testech největší množství recyklátu, přidaného k sádrovému pojivu, bylo 50 %. Ovšem u některých recyklátů i u tohoto množství nedocházelo k procesu tvrdnutí a použilo se menší množství.

Vzhledem k rychlejšímu nárůstu doby tuhnutí a tvrdnutí bílé sádry byl zkoumaný recyklát smíchán také s šedou stavební sádrovou. Vodní součinitel se zde zvolil 1,0 a 1,2. Doby tuhnutí a tvrdnutí a rozlití této směsi jsou zaznamenány v tab.7.

Přidáním recyklátu do směsi se sádrovým pojivem došlo k urychlení procesu tuhnutí, což v našem případě, kdy byly směsi zpracovávány pouze ručně, značně komplikovalo jejich zpracovatelnost. Z tohoto důsledku byl u některých vzorků v dalších testech volen vodní součinitel až 1,4.

Tab. 6: Množství recyklátu přidaného k bílé sádře

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Doba tuhnutí [min]	Doba tvrdnutí [min]	Rozlití [mm]
90	10	1,2	1	2	50
75	25	1,2	2	2	56
50	50	1,2	12	Více než 2 týdny	58
10	90	1,2	Více než 2 týdny	Více než 2 týdny	61

Tab. 7: Množství recyklátu přidaného k šedé stavební sádře

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Doba tuhnutí [min]	Doba tvrdnutí [min]	Rozlití [mm]
90	10	1,0	4	3	80
75	25	1,0	2	7	63
90	10	1,2	4	5	128
75	25	1,2	3	10	97

4.3.3 Vliv množství recyklátů na objemové změny

Další testování směsí bylo prováděno na ztvrdlých trámečkách o rozměrech stanovených normou, a to sice 160 x 40 x 40 mm. Od každé směsi byly vyrobeny tři trámečky, na kterých byly prováděny různé zkoušky a měření (obr. 7). Výsledky se ze tří vzorků za každou směs zprůměrovaly.

Vytvořily se vzorky se směsí z bílé sádry a pomletých sádrových bloků přidaných v množství 10 hm. % a 25 hm. % ku hmotnosti pojiva, z šedé sádry a pomletých sádrových bloků o stejném množství jako u sádry bílé a z šedé sádry a pomletých sádrokartonových desek bez obsahu papíru v množství 10 hm. %, 25 hm. % a 50 hm. % ku hmotnosti sádry. K porovnání vzorků se také vytvořily trámečky pouze z použitých pojiv bez přidaných recyklátů.

V průběhu následujících 28 dní od vytvoření trámečků se u vzorků průběžně měřily jejich rozměry a hmotnost. K měření rozměrů vzorků bylo používáno posuvné měřítko, hmotnost trámeků se zjišťovala pomocí váhy (obr. 8). Vzorky s časem vysychaly, čímž docházelo nejen k úbytku hmotnosti jako takové, ale také docházelo k smršťování vzorků.



Obr. 7: Testovací trámečky

Obr. 8: Průběh měření tvarových
a hmotnostních vlastností

Bílá sádra + pomleté sádrové bloky

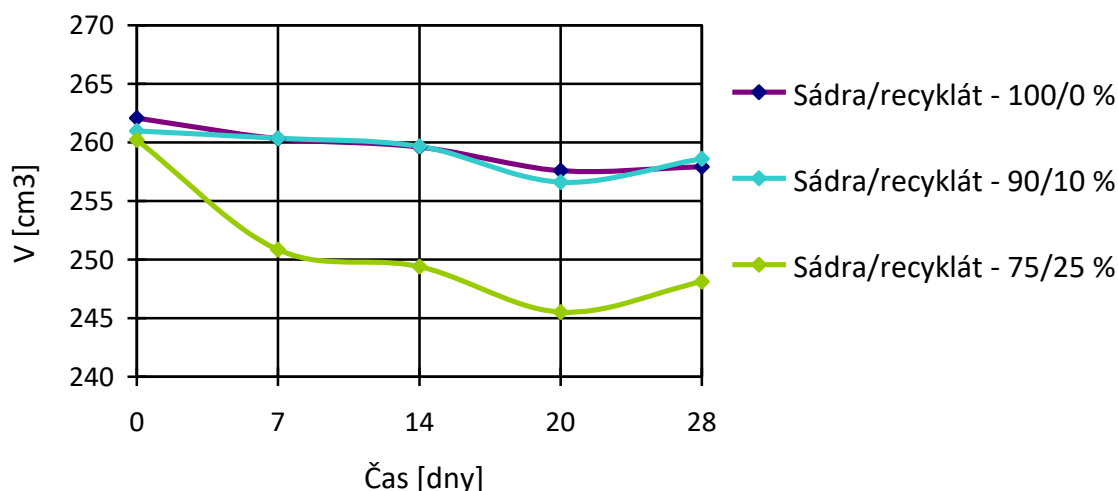
V tab. 8 jsou zaznamenány počáteční tvarové a hmotnostní hodnoty pro směs bílé sádry s přidáním pomletými sádrovými bloky a vodním součinitelem $w = 1,4$. Tyto počáteční hodnoty se změřily do 24 hodin po ztuhnutí směsi a možnosti manipulace se vzorkem. Množství recyklátu, přidaného do sádry, bylo 10 a 25 hm. % k hmotnosti suchého pojiva. Pro porovnání byla smíchána směs s čistým sádrovým pojivem. V průběhu 28 dní se tvarové a hmotnostní vlastnosti průběžně měřily. Jejich konečné hodnoty, včetně výsledného úbytku objemu vzorků, jsou uvedeny v tab. 9. Průběh objemových změn je zaznamenán v grafu (obr. 9).

Tab. 8: Bílá sádra + pomleté sádrové bloky – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Počáteční hmotnost m [kg]	Počáteční objem V [cm ³]	Počáteční objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
100	0	1,4	0,334	262,07	1275
90	10	1,4	0,315	260,98	1207
75	25	1,4	0,272	260,21	1045

Tab. 9: Bílá sádra + pomleté sádrové bloky – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Konečná hmotnost m [kg]	Konečný objem V [cm ³]	Konečná objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Úbytek objemu V [%]
100	0	1,4	0,169	257,92	658	1,6
90	10	1,4	0,158	258,61	613	0,9
75	25	1,4	0,262	165,41	528	36,4



Obr. 9: Úbytek objemu bílé sádry s pomletými sádrovými bloky v závislosti na čase

Šedá sádra + pomleté sádrové bloky

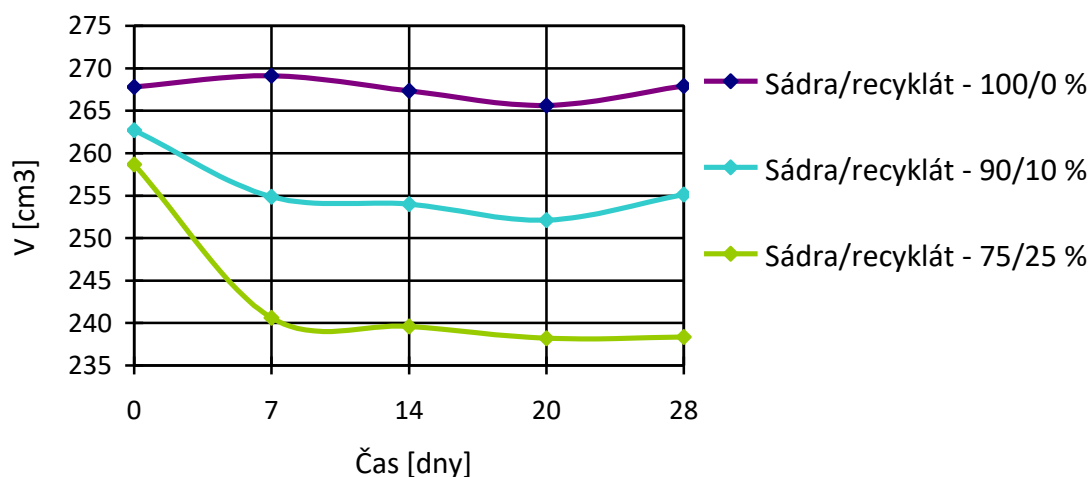
Šedá sádra nevykazovala takový rychlý nárůst doby tuhnutí, jako v případě bílé sádry. Proto se pro směs šedé sádry s pomletými sádrovými bloky zvolil menší vodní součinitel $w = 1,2$. Stejně jako u bílé sádry se zde vytvořila směs s čistým pojivem bez přidání recyklátů a směsi s 10 a 25 hm. % odpadních příměsí. V tab. 10 a 11 jsou uvedeny naměřené počáteční a konečné tvarové a hmotnostní vlastnosti. V grafu (obr. 10) je pak znázorněn průběh objemových změn naměřených během 28 dní vysychání.

Tab. 10: Šedá sádra + pomleté sádrové bloky – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Počáteční hmotnost m [kg]	Počáteční objem V [cm ³]	Počáteční objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
100	0	1,2	0,338	267,79	1261
90	10	1,2	0,318	262,71	1213
75	25	1,2	0,278	258,68	1074

Tab. 11: Šedá sádra + pomleté sádrové bloky – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Konečná hmotnost m [kg]	Konečný objem V [cm ³]	Konečná objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Úbytek objemu V [%]
100	0	1,2	0,185	267,91	690	-
90	10	1,2	0,168	255,13	656	2,9
75	25	1,2	0,145	238,35	608	7,9



Obr. 10: Úbytek objemu šedé sádry s pomletými sádrovými bloky v závislosti na čase

Šedá sádra + pomletý sádrokarton

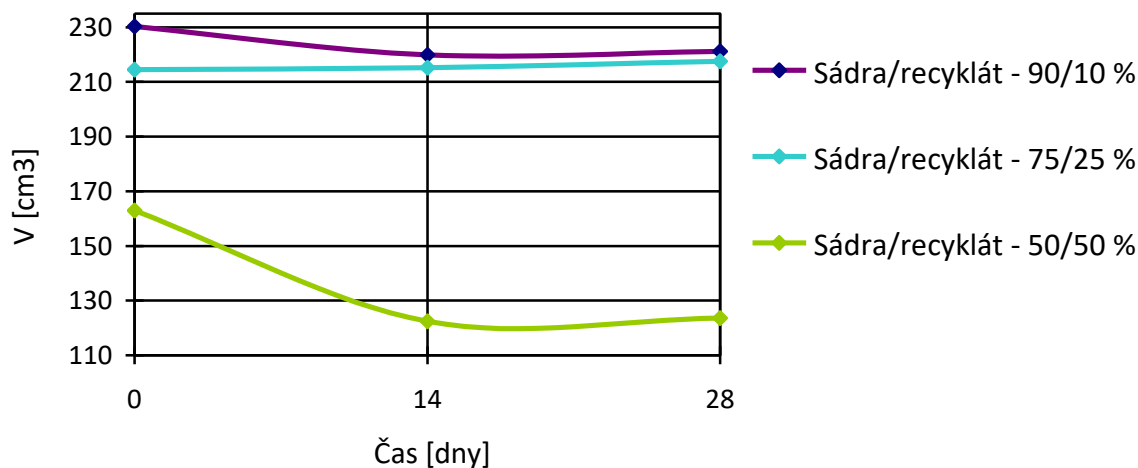
Jelikož testovaná směs s větším množstvím pomletého sádrokartonu po určité době, oproti sádrovým blokům, ztuhla i ztvrdla, byl k šedé sádře přidán tento recyklát v množství 10, 25 a 50 hm. % k hmotnosti suchého pojiva. Naměřené hodnoty tvarových a hmotnostních vlastností jsou zaznamenány v tab. 12 a 13, vč. průběhu objemových změn během 28 dní v grafu obr. 11.

Tab. 12: Šedá sádra + pomletý SDK – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Počáteční hmotnost m [kg]	Počáteční objem V [cm ³]	Počáteční objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
90	10	1,2	0,256	230,28	1112
75	25	1,2	0,197	214,55	920
50	50	1,2	0,215	162,99	1323

Tab. 13: Šedá sádra + pomletý SDK – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Konečná hmotnost m [kg]	Konečný objem V [cm ³]	Konečná objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Úbytek objemu V [%]
90	10	1,2	0,179	221,20	810	3,9
75	25	1,2	0,190	217,58	875	-
50	50	1,2	0,161	123,61	1304	24,2



Obr. 11: Úbytek objemu šedé sádry s pomletým SDK v závislosti na čase

Přestože některé trámečky měly tendenci po 28 dnech svůj objem zvětšit o necelé 1 %, většinou svůj objem ztrácely. Z naměřených hodnot lze vyčíst určitý poměr mezi obsahem recyklátů ve směsi a následným smršťováním vzorků sádry. Čím větší množství recyklovaného materiálu na bázi sádry bylo přítomno ve směsi, tím více se vzorek zmenšil, společně s úbytkem hmotnosti, způsobeným vysycháním vzorků. (Obr. 12.) Nejstabilnější směsí, co se změny velikosti vzorku týče, vyšla kombinace šedého sádrového pojiva s pomletým sádrokartonem, a to do 25 hm. % recyklátu přidaného k sádře.



Obr. 12: Smrštění vzorků

4.3.4 Modul pružnosti v průběhu času

Na ztvrdlých vzorečkách směsí s recykláty se v průběhu jejich vysychání kromě tvarových a hmotnostních vlastností měřil také modul pružnosti E . Metodou tohoto měření byla frekvenční (modální) analýza jednotlivých vzorků, tedy zjištění jejich rezonančních frekvencí, ze kterých bylo možno vypočítat modul pružnosti pro každou testovanou směs. Měření probíhalo za pomoci rázového kladívka se snímačem (obr. 13), kterým se zlehka, vlastní vahou, pětkrát kleplo z jedné strany testovaného trámečku. Sonda, připnutá na druhé straně vzorku, snímala odezvy na vybuzené rázy kladívka a naměřené frekvence odesílala na propojený počítač. Ten přijaté údaje pomocí specializovaného softwaru zpracoval a zprůměroval hodnoty frekvencí pro každý testovaný vzorek. Z těchto údajů se vypočítal Youngův modul pružnosti E pro každou testovanou směs.



Obr. 13: Rázové kladívko. (zdroj: OMEGA Engineering inc., web: <https://in.omega.com/pptst/IH101.html>)

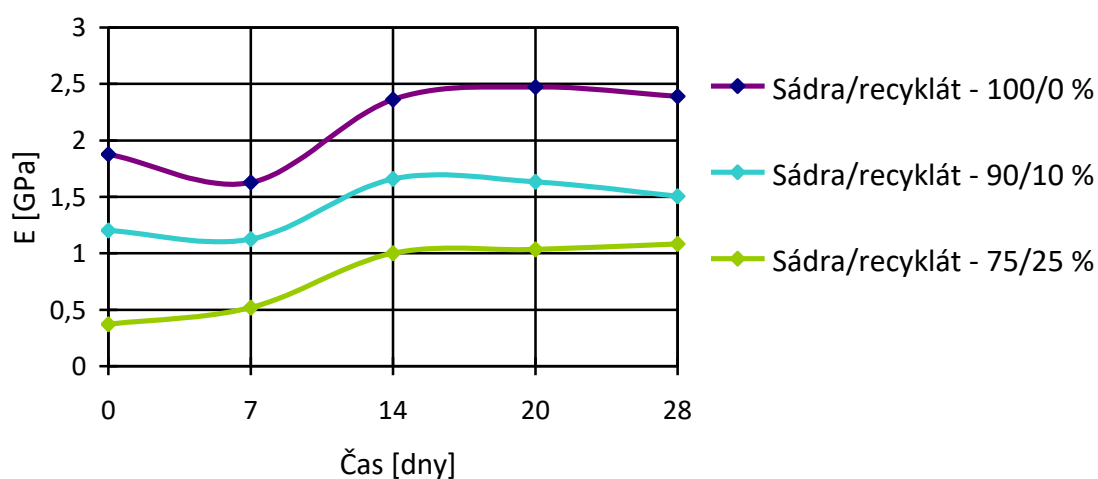
Modul pružnosti se zjišťoval na stejných vzorcích, jako v případě předchozích měření tvarových a hmotnostních vlastností. Měření probíhalo průběžně během 28 dní tvrdnutí sádrových trámů. Počáteční naměřené hodnoty byly změřeny do 24 hodin po ztuhnutí směsi a možnosti manipulace se vzorkem.

Bílá sádra + pomleté sádrové bloky

V tab. 14 jsou uvedené naměřené hodnoty počátečního a konečného modulu pružnosti směsi bílé sádry s pomletými tvárnici. Počáteční hodnoty se opět měřily hned do 24 hodin po ztuhnutí směsi. Konečné hodnoty, naměřené 28 dní od výroby testovacích trámečků, jsou v porovnání s hodnotami počátečními, o 20 až 60 % větší. V grafu (obr. 14) je vykreslen průběh tohoto nárůstu modulu pružnosti.

Tab. 14: Bílá sádra + pomleté sádrové bloky – počáteční a konečný modul pružnosti

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Počáteční modul pružnosti E [GPa]	Modul pružnosti po 28 dnech E [GPa]	Nárůst modulu pružnosti E [%]
100	0	1,4	1,877	2,389	21,4
90	10	1,4	1,202	1,507	20,2
75	25	1,4	0,372	1,083	65,6



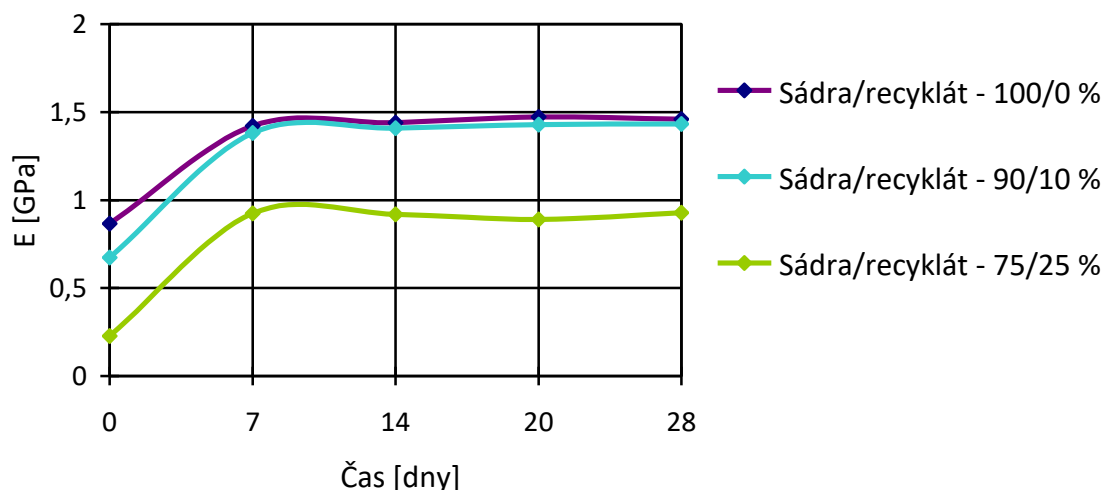
Obr. 14: Nárůst modulu pružnosti bílé sádry s pomletými sádrovými bloky v závislosti na čase

Šedá sádra + pomleté sádrové bloky

U směsi šedé sádry s přidávanými sádrovými tvárniciemi byl průběh nárůstu modulu pružnosti (obr. 15) lehce odlišný od modulu pružnosti u předchozí směsi bílé sádry se stejným recyklátem. Nedošlo zde k počátečnímu poklesu hodnot a konečný modul pružnosti vzrostl o 40 až 75 %. Výsledky počátečních a konečných měření této směsi jsou zaznamenány v tab. 15.

Tab. 15: Šedá sádra + pomleté sádrové bloky – počáteční a konečný modul pružnosti

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Počáteční modul pružnosti E [GPa]	Modul pružnosti po 28 dnech E [GPa]	Nárůst modulu pružnosti E [%]
100	0	1,2	0,867	1,459	40,6
90	10	1,2	0,674	1,432	52,9
75	25	1,2	0,228	0,928	75,4



Obr. 15: Nárůst modulu pružnosti šedé sádry s pomletými sádrovými bloky v závislosti na čase

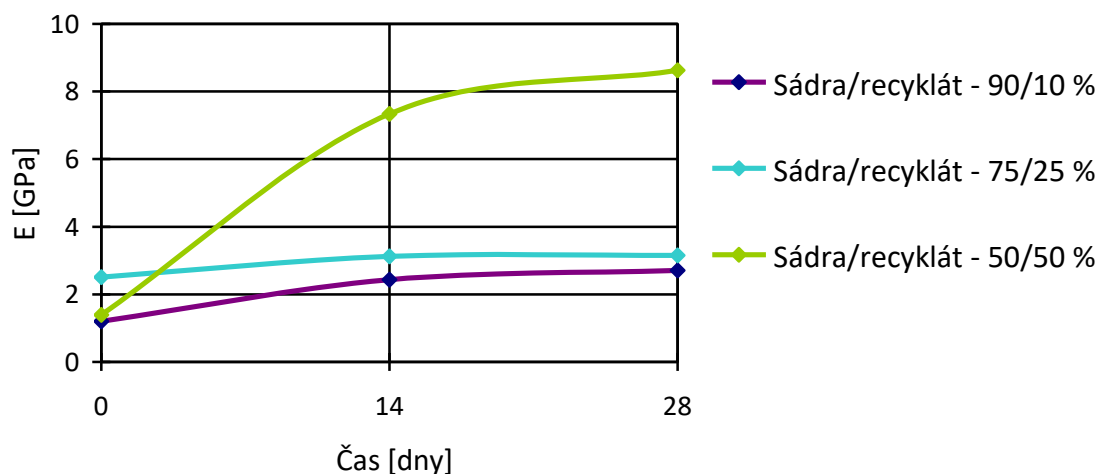
Šedá sádra + pomletý sádrokarton

V případě směsi šedé sádry s přidaným pomletým sádrokartonem byly naměřeny vyšší hodnoty konečného modulu pružnosti (tab. 16), než u předchozích dvou kombinací materiálů. Dalo by se podle toho usuzovat, že použitý recyklát ze sádrokartonu má lepší účinky na ztvrdlou směs než sádrové bloky.

V případě 50 % přidaného recyklátu je nárůst modulu pružnosti extrémní (průběh viz obr. 16). Nárůst téměř o 84 % může být způsoben smrštěním vzorků, které zde bylo o něco vyšší díky použitému množství přidaného recyklátu.

Tab. 16: Šedá sádra + pomletý SDK – počáteční a konečný modul pružnosti

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Počáteční modul pružnosti E [GPa]	Modul pružnosti po 28 dnech E [GPa]	Nárůst modulu pružnosti E [%]
90	10	1,2	1,206	2,705	55,4
75	25	1,2	2,513	3,149	20,2
50	50	1,2	1,395	8,625	83,8



Obr. 16: Nárůst modulu pružnosti šedé sádry s pomletým SDK v závislosti na čase

Jak lze z naměřených hodnot zjistit, modul pružnosti se s časem zvyšuje. Je to způsobeno samotným procesem vysychání, kdy se ze vzorků odpařuje vázaná voda. Sádra se pak stává kompaktnější a pevnější. U některých testovaných trámečků došlo k poměrně velkému smrštění, které, díky tomuto „zhutnění“, mělo za následek vyšší navýšení modulu pružnosti.

Norma ČSN 72 2301 Sádrová pojiva uvádí hodnoty modulu pružnosti mezi 2 až 6 GPa. Testované směsi s přidaným recyklátem ze sádrových bloků dosáhly po 28 dnech obvykle nižších než normových hodnot. Kombinace sádry s pomletým sádrokartonem těchto hodnot dosáhla. V případě vzorku s 50 hm. % recyklátu ku hmotnosti sádrového pojiva došlo, v kombinaci s poměrně velkým smrštěním, k naměření vyšších hodnot modulu pružnosti, než se uvádí v normě.

4.3.5 Tlakové zkoušky

V rámci výzkumu byly na dříve uvedených vzorcích provedeny také destruktivní tlakové zkoušky. Jednotlivé vysušené trámy se podrobily zkouškám v tlaku za ohybu a v prostém tlaku. K testování se použil zatěžovací lis (obr. 17), do kterého se trámy vložily. Nejprve se každý vzorek vložil do lisu na dvě krajní podpory, přičemž veškerá síla lisu působila svrchu doprostřed umístěného trámku (obr. 18). U takovéto zkoušky se jedná o zkoušku v tlaku za ohybu. Po rozlomení se obě části vzorku vložily opět do lisu. Tentokrát byly vzorky celoplošně podepřeny, přičemž síla lisu působila také na celou plochu trámku (obr. 19). Zde se jednalo o prostý tlak.

Hodnoty z tlakových zkoušek se zaznamenaly, zprůměrovaly a vypočítala se pevnost vzorků v tlaku (viz tab. 17, 18 a 19).



Obr. 17: Zatěžovací lis



Obr. 18: Tlak za ohybu



Obr. 19: Prostý tlak

Bílá sádra + pomleté sádrové bloky

Tab. 17: Bílá sádra + pomleté sádrové bloky – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Tlak za ohybu [kN]	Prostý tlak [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
100	0	1,4	0,72	13,22	2,06
90	10	1,4	0,49	4,03	0,63
75	25	1,4	0,20	0,86	0,13

Šedá sádra + pomleté sádrové bloky

Tab. 18: Šedá sádra + pomleté sádrové bloky – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Tlak za ohybu [kN]	Prostý tlak [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
100	0	1,2	0,50	4,05	0,63
90	10	1,2	0,38	3,36	0,53
75	25	1,2	0,23	1,79	0,28

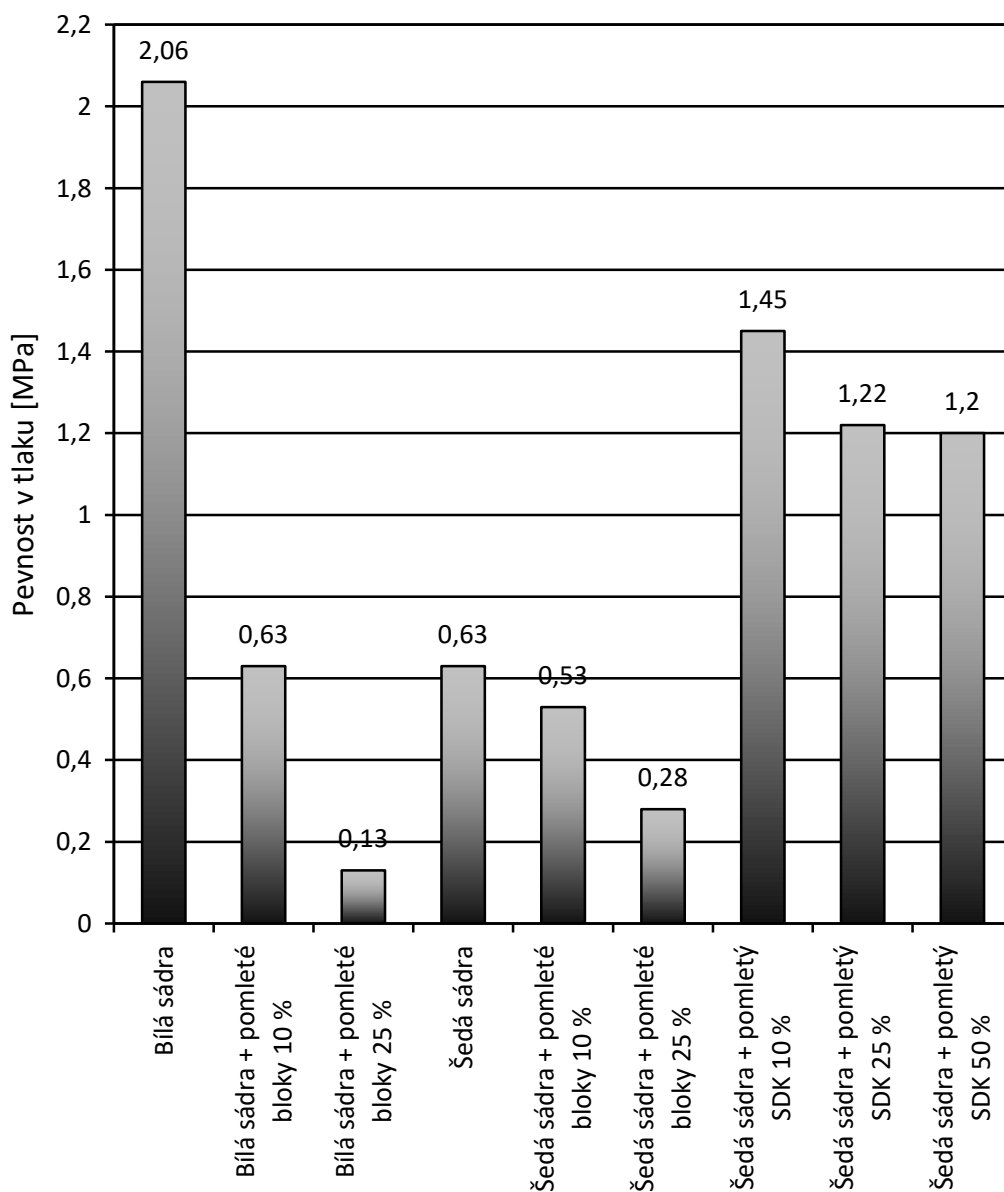
Šedá sádra + pomletý sádrokarton

Tab. 19: Šedá sádra + pomletý SDK – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Tlak za ohybu [kN]	Prostý tlak [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
90	10	1,2	0,82	9,25	1,45
75	25	1,2	0,69	7,83	1,22
50	50	1,2	0,77	7,71	1,20

Porovná-li se mezi sebou výsledné pevnosti testovaných směsí (obr. 20), zjistíme, že směsi, obsahující recyklát ze sádrových tvárnic mají výrazně nižší hodnoty pevností než směsi s přidaným pomletým sádrokartonem.

V porovnání s normovými hodnotami pevností v tlaku (viz kapitola 2.6.1 Normové zatřídění sádry) však testované vzorky nedosahují pevností pro jejich zatřídění do normových tříd, a to včetně směsí bez recyklátů. To může být způsobeno ručním způsobem přípravy směsí i vyšším vodním součinitelem, potřebným k dobré zpracovatelnosti.

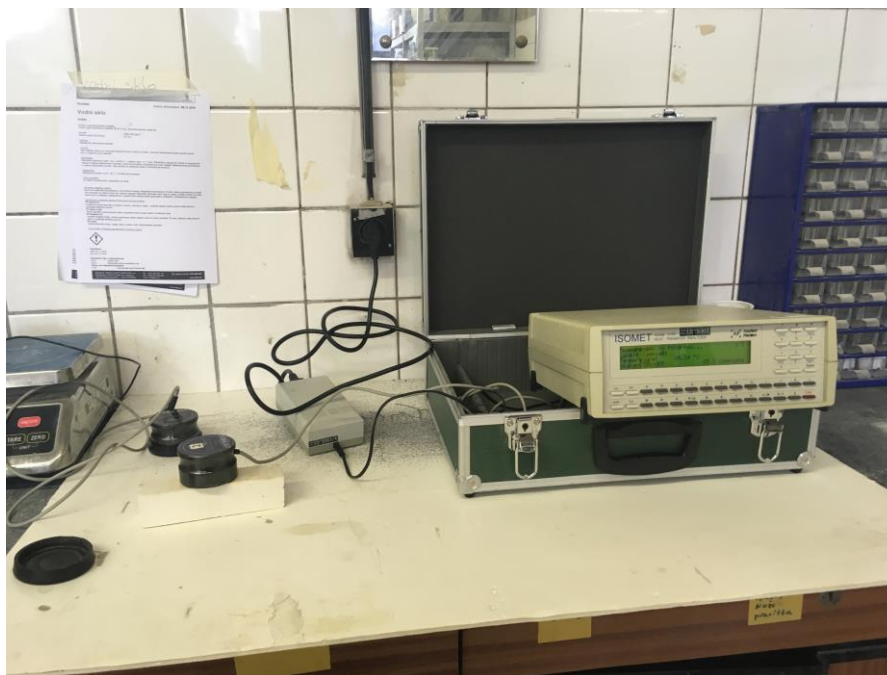


Obr. 20: Porovnání pevností v tlaku pro vzorky s jemnozrným recyklátem

4.3.6 Tepelně technické vlastnosti

K změření tepelně technických vlastností testovaných směsí byl k dispozici zapůjčený isomet, model 2104 (obr. 21). Průběh měření těchto vlastností probíhal v uzavřené laboratorní místnosti, aby bylo zamezeno možným naměřeným odchylkám v důsledku vanutí vzduchu různé teploty či vlhkosti. Měření bylo založené na analýze průběhu teplotní odezvy na impulsy tepelného toku do testovaného vzorku v průběhu času. Tepelný tok se vytvářel rozptýleným elektrickým výkonem sondy, která se přiložila na testovaný vzorek. Koeficienty, získané tímto měřením, byly použity k výpočtu zkoumaných veličin. Testování probíhalo pro každou směs třikrát, hodnoty se pak zaznamenaly a zprůměrovaly.

Z naměřených hodnot (tab. 20, 21 a 22) se dá usuzovat, že v případě přidání mletých bloků se s vyšším množstvím obsahu recyklátu sníží součinitel tepelné vodivosti λ a tím selepší tepelně izolační vlastnosti. V případě recyklovaného sádrokartonu se součinitel tepelné vodivosti s větším množstvím obsaženého recyklátu zvyšoval, tedy zhoršil tepelně izolační vlastnosti.



Obr. 21: Isomet

Bílá sádra + pomleté sádrové bloky

Tab. 20: Bílá sádra + pomleté sádrové bloky – tepelně technické parametry

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Tepelná vodivost λ [W/m·K]	Vedení tepla $c \cdot \rho$ [J/m ³ K]·10 ⁶	Součinitel teplotní vodivosti a [m ² /s]·10 ⁻⁶
100	0	1,4	0,212	1,06	0,190
90	10	1,4	0,185	1,07	0,174
75	25	1,4	0,145	0,81	0,182

Šedá sádra + pomleté sádrové bloky

Tab. 21: Šedá sádra + pomleté sádrové bloky – tepelně technické parametry

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Tepelná vodivost λ [W/m·K]	Vedení tepla $c \cdot \rho$ [J/m ³ K]·10 ⁶	Součinitel teplotní vodivosti a [m ² /s]·10 ⁻⁶
100	0	1,2	0,198	1,12	0,176
90	10	1,2	0,186	1,04	0,179
75	25	1,2	0,157	0,82	0,192

Šedá sádra + pomletý sádrokarton

Tab. 22: Šedá sádra + pomletý SDK – tepelně technické parametry

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Tepelná vodivost λ [W/m·K]	Vedení tepla $c \cdot \rho$ [J/m ³ K]·10 ⁶	Součinitel teplotní vodivosti a [m ² /s]·10 ⁻⁶
90	10	1,2	0,244	0,98	0,267
75	25	1,2	0,286	0,92	0,321
50	50	1,2	0,450	1,15	0,434

Přesné naměření hodnot tepelně technických vlastností může být leckdy problematické. Sonda, snímající teplotní odezvu tepelného toku, je velmi citlivá na okolní prostředí, jako je teplota a vlhkost vzduchu. Nedokonalost ručního míchání směsi pak může způsobit nerovnoměrnou strukturu materiálu napříč vzorkem a to vše, společně s vyšším vodním součinitelem může dát dohromady jiné výsledky než u vzorků připravených ve specializovaných laboratořích.

4.4 Přidání hrubozrnných recyklátů

V předchozích testech se analyzovaly vzorky s přidanými jemně mletými sádrovými tvárnici a jemně mletým sádrokartonem bez přidaného papíru. Dalším krokem výzkumu bylo vmísení hrubozrnného recyklátu. Díky lepším vlastnostem u předchozí řady vzorků se použil recyklovaný sádrokarton, a to ve formě podrceného sádrokartonu, hrubě mletého sádrokartonu (velikost zrn 0 - 1 mm) a mletého sádrokartonu s neodseparovanými kousky papíru. Jako sádrové pojivo byla pro tuto část výzkumu použita pouze bílá sádra. Vodní součinitel a množství recyklátu vzhledem k hmotnosti pojiva byly použity stejné, jako u předchozí části výzkumu.

4.4.1 Objemové změny u hrubozrnných recyklátů

Bílá sádra + hrubě mletý sádrokarton (0 – 1 mm)

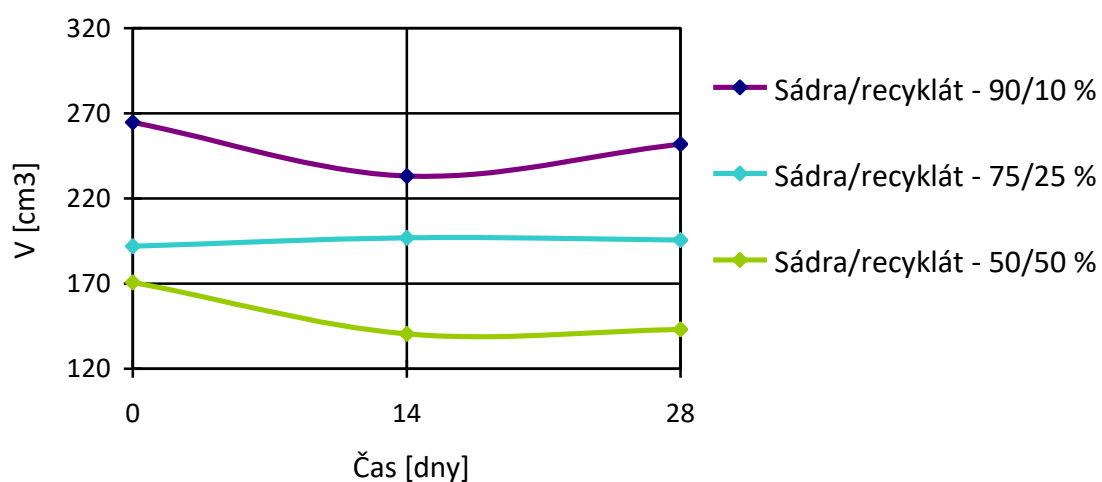
Pro směs bílé sádry s přidaným hrubě mletým sádrokartonem se vodní součinitel vybral $w = 1,2$. Recyklát se přidal ve třech množstvích. 10, 25 a 50 hm. % k hmotnosti suchého pojiva. Pro vzorky těchto směsí se v průběhu vysychání měřily tvarové a hmotnostní vlastnosti, jejichž výsledky jsou zapsány v tab. 23 a 24. Zatímco trámečky se směsí s 25 % přidaného recyklátu se tvarově prakticky neměnily, v případě směsi s 50 % přidaného mletého sádrokartonu se vzorky zmenšily až o 16 %. (Průběh objemových změn vyobrazen na obr. 22.)

Tab. 23: Bílá sádra + hrubě mletý SDK – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Počáteční hmotnost m [kg]	Počáteční objem V [cm ³]	Počáteční objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
90	10	1,2	0,321	264,81	1373
75	25	1,2	0,317	191,97	1659
50	50	1,2	0,234	170,70	1384

Tab. 24: Bílá sádra + hrubě mletý SDK – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Konečná hmotnost m [kg]	Konečný objem V [cm ³]	Konečná objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Úbytek objemu V [%]
90	10	1,2	0,188	251,90	744	4,9
75	25	1,2	0,181	195,49	928	-
50	50	1,2	0,171	143,07	1195	16,2



Obr. 22: Úbytek objemu bílé sádry s hrubě mletým SDK v závislosti na čase

Bílá sádra + mletý sádrokarton s papírem

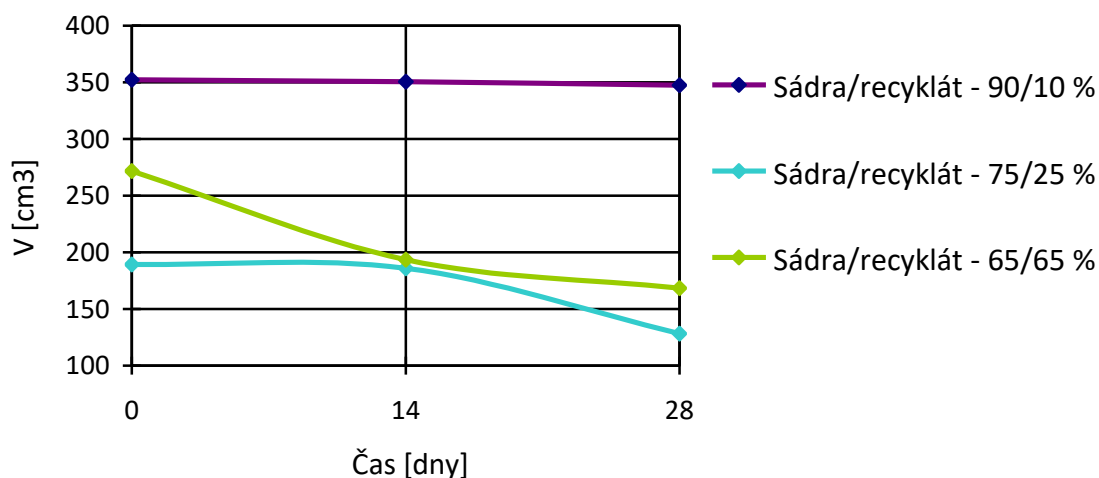
Stejně, jako u předchozí směsi s hrubě namletým sádrokartonem, se pro kombinaci pojiva s mletým sádrokartonem s neodseparovaným papírem zvolil vodní součinitel $w = 1,2$. Množství recyklátu se zvolilo 10, 25 a 35 hm. %. V případě směsi s 50 % přidané příměsí nedošlo v požadované době k vytvrnutí vzorků, proto byla tato kombinace nahrazena směsí s 35 % recyklátu. Obsah papíru, který v příměsí po namletí zůstal, měl poměrně velký vliv na úbytek objemu testovaných trámečků. Nejstabilnější směs v této kombinaci sádry s recyklátem obsahovala jen 10 % mletého sádrokartonu. Počáteční a konečné hodnoty jsou zaznamenány v tab. 25 a 26, průběh objemových změn je vyobrazen na obr. 23.

Tab. 25: Bílá sádra + mletý SDK s papírem – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Počáteční hmotnost m [kg]	Počáteční objem V [cm ³]	Počáteční objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
90	10	1,2	0,343	352,25	1620
75	25	1,2	0,315	195,49	2438
65	35	1,2	0,295	271,79	1147

Tab. 26: Bílá sádra + mletý SDK s papírem – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Konečná hmotnost m [kg]	Konečný objem V [cm ³]	Konečná objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Úbytek objemu V [%]
90	10	1,2	0,184	347,56	771	1,3
75	25	1,2	0,174	128,36	936	34,3
65	35	1,2	0,173	193,48	913	28,8



Obr. 23: Úbytek objemu bílé sádry s mletým SDK s papírem v závislosti na čase

Bílá sádra + drcený sádrokarton

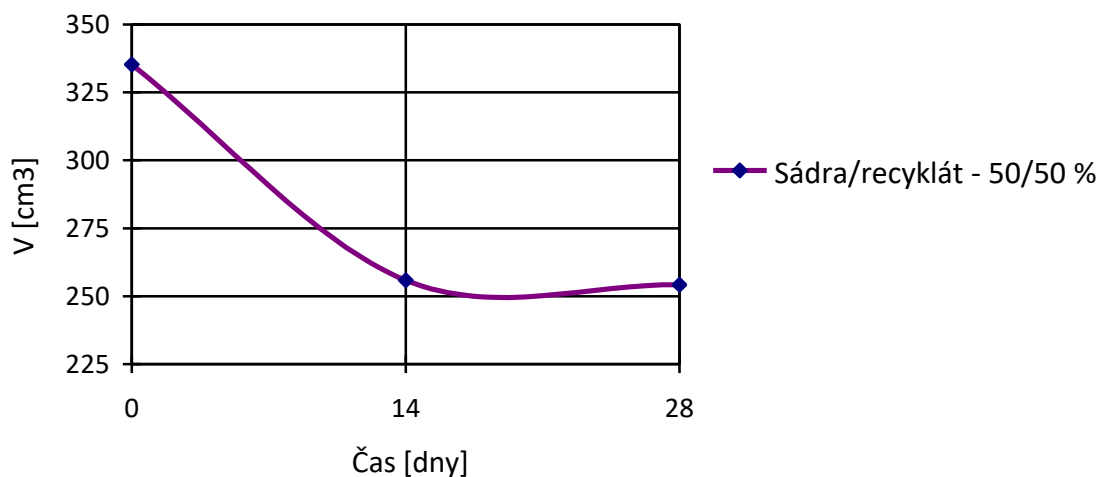
V případě přidaného recyklátu s hrubě podrceným sádrokartonem se testovala pouze směs s 50 hm. % obsahu recyklátu. Odpad v této podobě zde fungoval na principu výplňového kameniva, které bylo spojeno pojivem v podobě čisté sádry. Menší obsah tohoto „kameniva“ nemělo pro výzkum příliš význam. Vlivem smrštění došlo u vzorků této kombinace k až 24 % úbytku objemu, jak je znázorněno v grafu (obr. 24). Počáteční a koncové hmotnostní a tvarové naměřené hodnoty jsou pro porovnání zaznamenány v tab. 27 a 28.

Tab. 27: Bílá sádra + drcený SDK – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Počáteční hmotnost m [kg]	Počáteční objem V [cm ³]	Počáteční objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
50	50	1,0	0,300	335,32	924

Tab. 28: Bílá sádra + drcený SDK – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Konečná hmotnost m [kg]	Konečný objem V [cm ³]	Konečná objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Úbytek objemu V [%]
50	50	1,0	0,174	254,26	682	24,1



Obr. 24: Úbytek objemu bílé sádry s drceným SDK v závislosti na čase

Bílá sádra + drcený sádrokarton + mletý sádrokarton s papírem

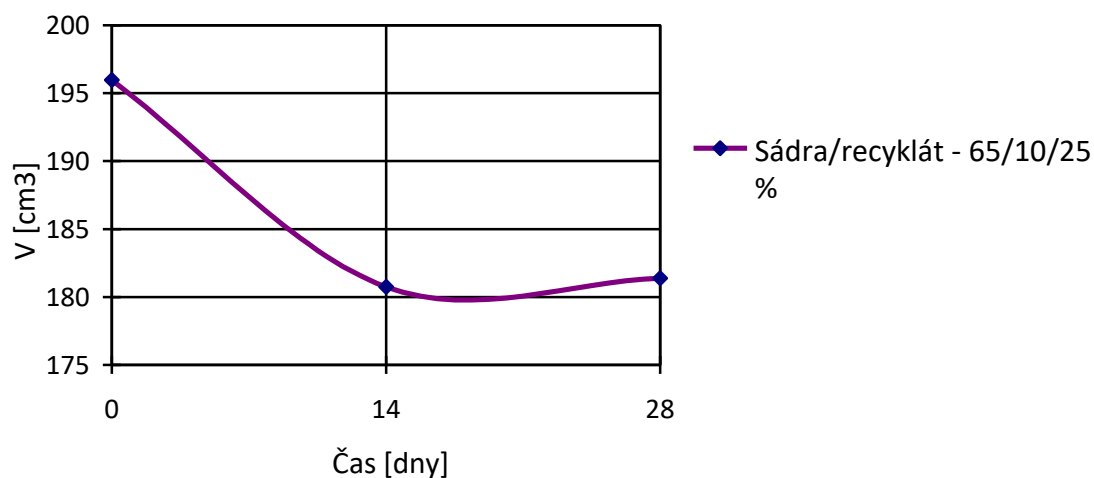
V rámci výzkumu byla testována také směs bílé sádry s kombinací dvou typů recyklátu. V tomto případě šlo o 10 hm. % hrubě nadrceného sádrokartonu a 25 % pomletého sádrokartonu s neodseparovanými kousky papíru k 65 % sádry jako pojiva. V porovnání se směsmi, obsahující pouze drcený sádrokarton nebo pouze mletý SDK s papírem, měla tato kombinace mnohem menší výsledné objemové změny (tab. 29 a 30). Průběh objemových změn můžeme vidět v grafu na obr. 25.

Tab. 29: Bílá sádra + drcený SDK + mletý SDK s papírem – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Množství sádry [%]	Množství drceného SDK [%]	Množství mletého SDK [%]	Vodní součinitel w [-]	Počáteční hmotnost m [kg]	Počáteční objem V [cm ³]	Počáteční objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
65	10	25	1,2	0,253	195,97	1298

Tab. 30: Bílá sádra + drcený SDK + mletý SDK s papírem – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Množství sádry [%]	Množství drceného SDK [%]	Množství mletého SDK [%]	Vodní součinitel w [-]	Konečná hmotnost m [kg]	Konečný objem V [cm ³]	Konečná objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Úbytek objemu V [%]
65	10	25	1,2	0,172	181,38	946	7,4



Obr. 25: Úbytek objemu bílé sádry s drceným SDK a mletým SDK s papírem v závislosti na čase

Podle naměřených výsledků se dá usuzovat, že čím větší množství hrubozrnného recyklátu se přidá k sádrovému pojivu do směsi, k tím větším objemovým změnám, tedy ke smršťování, bude docházet. To má samozřejmě neblahý vliv na případný sádrový výrobek z takovéto směsi.

4.4.2 Tlakové zkoušky

Tlakové zkoušky byly provedeny také na vzorcích s hrubozrnnými recykláty, tedy na směsi bílé sádry s drceným sádrokartonem, hrubě mletým sádrokartonem (0 - 1 mm) a mletým sádrokartonem s kousky papíru. Postup této zkoušky byl stejný, jako u předchozí řady testovaných trámečků. Jednalo se tedy o zkoušku v tlaku za ohybu a v prostém tlaku na vyzrálých vzorcích (min. 28 dní). Naměřené hodnoty jsou uvedené v následujících tabulkách 31 až 34.

Bílá sádra + hrubě mletý sádrokarton (0 – 1 mm)

Tab. 31: Bílá sádra + hrubě mletý SDK – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Tlak za ohybu [kN]	Prostý tlak [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
90	10	1,2	0,75	6,21	0,97
75	25	1,2	0,92	9,50	1,48
50	50	1,2	1,07	12,30	1,92

Bílá sádra + mletý sádrokarton s papírem

Tab. 32: Bílá sádra + mletý SDK s papírem – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Tlak za ohybu [kN]	Prostý tlak [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
90	10	1,2	0,92	8,15	1,27
75	25	1,2	1,00	7,40	1,16
65	35	1,2	0,88	10,51	1,64

Bílá sádra + drcený sádrokarton

Tab. 33: Bílá sádra + drcený SDK – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Tlak za ohybu [kN]	Prostý tlak [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
50	50	1,0	0,53	3,00	0,47

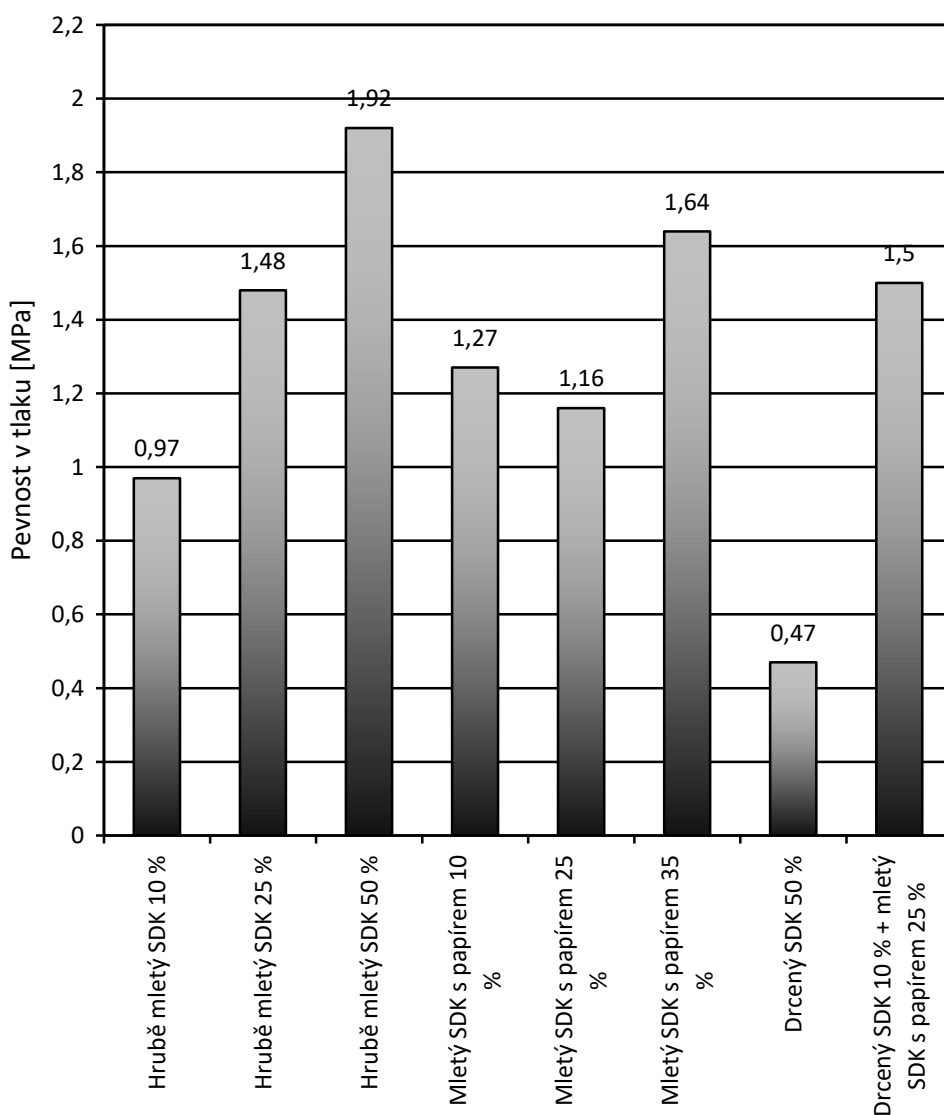
Bílá sádra + drcený sádrokarton + mletý sádrokarton s papírem

Tab. 34: Bílá sádra + drcený SDK + mletý SDK s papírem – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Množství sádry [%]	Množství drceného SDK [%]	Množství mletého SDK [%]	Vodní součinitel w [-]	Tlak za ohybu [kN]	Prostý tlak [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
65	10	25	1,2	0,81	9,63	1,50

Porovnáme-li výsledné hodnoty pevností v tlaku testovaných směsí s výsledky předchozí řady vzorků s jemně mletými recykláty, můžeme si všimnout určité závislosti hrubosti namletí recyklovaného materiálu na výslednou pevnost v tlaku. Čím jemněji je přimíchávaný materiál namletý, tím vyšší výslednou pevnost ztvrdlá směs má.

U této řady vzorků s hrubozrnným recyklátem zase platí, že čím větší množství recyklované sádry bude obsaženo ve směsi, tím bude mít větší pevnost v tlaku (porovnání na obr. 26). Ani tato řada testovaných vzorků však nedosahuje svojí pevností k normovým třídám sádry. Snížením vodního součinitele (např. za použití plastifikátorů) by bylo možné dosáhnout větších hodnot pevnosti v tlaku.



Obr. 26: Porovnání pevností v tlaku pro vzorky s hrubozrnným recyklátem

4.4.3 Experiment se zpěňující přísadou a teplotní charakteristiky

Pro zvýšení tepelně technických vlastností se do některých materiálů, sádro nevyjímaje, přidávají tzv. zpěňující přísady. Ty způsobí napěnění směsi a vytvoří tím větší množství uzavřených pórů. Větší množství takto uzavřeného vzduchu v materiálu zvýší odpor vedení tepla materiálem a tím zlepší tepelně technické vlastnosti.

Jako zpěňující látka byla v rámci výzkumu použita tekutá směs do hasicích přístrojů. Tato látka se pomocí robotického šlehače (obr. 27) vyšlehala do zpěněné formy, která byla vmíchána do již připravené směsi vody, sádrového pojiva a recyklovaného mletého sádrokartonu s kousky papíru. Po zhomogenizování mokré směsi s pěnou se vlila do připravených forem stejným způsobem, jako u předchozích vzorků. Hasící pěna zde plnila také funkci plastifikátoru. Díky tomu se mohl zvolit menší vodní součinitel.

I u těchto vzorků byly provedeny tlakové zkoušky kvůli vlivu většího množství pórů na snížení celkové pevnosti směsi. Výsledná naměřená hodnota pevnosti v tlaku (tab. 35) je nižší než pevnosti většiny ostatních vzorků testovaných na tlak v rámci celého výzkumu. Zvýšení množství pórů má tak ve výsledku vliv na snížení pevnosti v tlaku.



Obr. 27: Robotický šlehač

Bílá sádra + mletý sádrokarton s papírem + zpěňující látka

Tab. 35: Bílá sádra + mletý SDK s papírem + zpěňující látka – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Tlak za ohybu [kN]	Prostý tlak [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
75	25	1,0	0,39	1,73	0,27

Pro použitou zpěněnou směs a směs o stejném obsahu recyklátu bez přidané zpěňující látky pro srovnání byly změřeny také tepelně technické vlastnosti pro porovnání vlivu většího množství pórů ve struktuře hmoty na tyto vlastnosti. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 36 a 37. Měření těchto vlastností probíhalo stejným způsobem, jako u předchozí řady vzorků, tj. měřením trámečků pomocí isometu se snímací sondou.

Bílá sádra + mletý sádrokarton s papírem + zpěňující látka

Tab. 36: Bílá sádra + mletý SDK s papírem + zpěňující látka – tepelně technické parametry

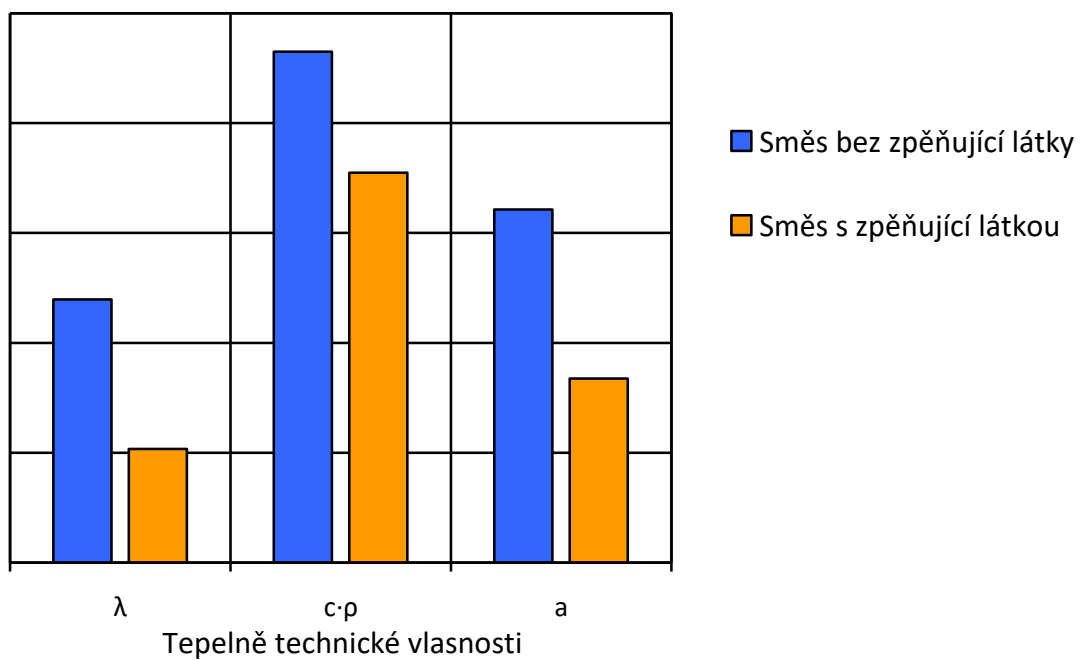
Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Tepelná vodivost λ [W/m·K]	Vedení tepla $c \cdot \rho$ [J/m ³ K]·10 ⁶	Součinitel teplotní vodivosti a [m ² /s]·10 ⁻⁶
75	25	1,0	0,207	0,71	0,335

Bílá sádra + mletý sádrokarton s papírem

Tab. 37: Bílá sádra + mletý SDK s papírem – tepelně technické parametry

Množství sádry [%]	Množství recyklátu [%]	Vodní součinitel w [-]	Tepelná vodivost λ [W/m·K]	Vedení tepla $c \cdot \rho$ [J/m ³ K]·10 ⁶	Součinitel teplotní vodivosti a [m ² /s]·10 ⁻⁶
75	25	1,2	0,479	0,93	0,643

V porovnání zpěněné směsi se vzorkem se stejným typem a množstvím recyklátu bez přidané zpěňující látky (obr. 28) došlo ke snížení hodnot měřených tepelně technických vlastností až o 50 %. To znamená, že se vlivem zpěnění směsí zlepšily tepelně izolační vlastnosti vzorku. Vhodnou kombinací přidaných recyklovaných směsí, volbou vodního součinitele v závislosti na možnostech míchání směsí a typu zpěňující látky by bylo možné dosáhnout velmi dobrých tepelně technických vlastností.



Obr. 28: Porovnání směsí s a bez zpěňující látky z hlediska tepelně technických vlastností

4.5 Shrnutí postupů výzkumu

V první části výzkumu, zaměřeného na jemnozrnné recykláty přidané k sádrovému pojivu, se na několika testovaných vzorcích samotné sádry nejprve určil vodní součinitel. Vzhledem k ručnímu míšení a celkové zpracovatelnosti směsí se pro další testy volily vodní součinitelé v rozmezí $w = 1,0 - 1,4$. Následovalo určení množství přidaného recyklátu. Postupovalo se systematicky, od nejmenšího zvoleného množství příměsí 10 hm. % k hmotnosti pojiva, až po určení hranice maximálního objemu recyklátu. V závislosti na druhu sádry a typu příměsí se však stanovilo jako nejvyšší množství recyklátů 50 hm. % ku hmotnosti pojiva. U vzorků s větším množstvím přidaného recyklovaného materiálu na bázi sádry se výrazně prodloužila doba tuhnutí. U některých směsí ani po dvou týdnech nenastartoval proces tvrdnutí.

Po stanovení rozsahu vodního součinitele a množství přidaných recyklátů se vytvořila první řada trámečků, určených k testování některých jejich mechanických a fyzikálních vlastností. Jako pojiva byly vybrány dvě sádry, a to sádra bílá a sádra šedá. K těmto pojivům se jako recyklát přimíchaly pomleté sádrové tvárnice a pomletý sádrokarton.

Vzhledem k rychlejšímu nárůstu tuhnutí bílé sádry po přidání testovaných příměsí se u směsí s tímto pojivem zvolil vyšší vodní součinitel, tedy $w = 1,4$. U šedé sádry se použil vodní součinitel $w = 1,2$. Nejvyšší množství přidaných pomletých sádrových bloků bylo 25 %, u semletého sádrokartonu až 50 %. U použitých recyklátů z tvárnice se pro množství 50 hm. % k pojivu prodloužila doba tuhnutí, zatímco tvrdnutí během požadované doby nenastalo vůbec. U sádrokartonu při 50 hm. % ke ztvrdnutí vzorků po delší časové prodlevě došlo.

Na vyrobených trámečkách těchto směsí se v průběhu 28–denního vysychání průběžně měřily rozměry vzorků a zaznamenávaly jejich hmotnosti. Z těchto naměřených hodnot se vypočítaly objemy a objemové hmotnosti testovaných trámečků, které se následně porovnály. V průběhu vysychání vzorků docházelo k objemovým změnám. Díky úbytku vázané vody ve struktuře jednotlivých materiálů se velikosti trámečků a jejich objemové hmotnosti snižovaly. U kombinace bílé sádry a 25 hm. % pomletých sádrových bloků došlo na objemu k úbytku až 36,4 %. Z hlediska objemových změn vyšla nejlépe kombinace šedé sádry s pomletým sádrokartonem o 25 hm. % suché

směsi. Vzorek byl v průběhu testovaných 28 dní prakticky stálý, účinkem sádry došlo jen k velmi mírnému zvětšení vzorku. Úbytek záměsové vody neměl na objemové změny vliv.

Souběžně s měřením tvarových a hmotnostních vlastností se průběžně měřila modální analýza vlastních frekvencí trámečků za účelem určení modulu pružnosti E jednotlivých testovaných směsí. Měření se provádělo pomocí rázového kladívka a sondy, která snímala odezvy kladívka na jednotlivých trámečkách, z kterých se průběžně vypočítával modul pružnosti. V průběhu 28 dní s vysycháním vzorků modul pružnosti narůstal na konečných 20 až bezmála 84 % oproti hodnotám naměřených hned po ztvrdnutí směsí. Po uplynutí 28 dní byly jednotlivé trámečky vkládány do zatěžovacího lisu a podrobovány destruktivním zkouškám v tlaku za ohybu a v prostém tlaku. Ze zjištěných hodnot se pro každou směs určila pevnost v tlaku. Konečná pevnost v tlaku na vzorkách starých 28 dní se ustálila u směsí s přidanými pomletými tvárniciemi v průměru na 600 kPa, u směsí s pomletým sádrokartonem kolem 1200 kPa.

Tepelně technické vlastnosti analyzovaných směsí se měřily za pomoci isometu. Zjišťoval se součinitel tepelné vodivosti, vedení tepla a součinitel teplotní vodivosti.

Nižší součinitel tepelné vodivosti, s kterým souvisí zlepšení tepelně izolačních vlastností, byl naměřen u vzorků s pomletými sádrovými bloky. Pro tuto kombinaci navíc platilo, že čím větší množství recyklátu bylo ve směsi, tím nižší byla hodnota tepelné vodivosti. U vzorků s pomletým sádrokartonem je to naopak. S vyšším množstvím obsahu tohoto recyklátu ve směsi byl součinitel tepelné vodivosti také vyšší, tudíž tepelně izolační vlastnosti horší.

Druhá část výzkumu se zaměřila na hrubozrnný recyklát na bázi sádry. Použil se podrcený sádrokarton, hrubě mletý sádrokarton (velikost zrn 0 - 1 mm) a mletý sádrokarton s kousky papíru. Jako sádrové pojivo se pro tuto část výzkumu použila jen bílá sádra. Vodní součinitel byl zvolen $w = 1,0$ pro směs s drceným sádrokartonem, u ostatních se zvolil vodní součinitel $w = 1,2$. Stejně jako pro řadu prvních testovaných vzorků se i zde měřily trámečky na objemové změny v průběhu 28 - denního vysychání. Zde vyšla jako nejstabilnější kombinace směsi s 25 hm. % hrubě mletého

sádrokartonu (0 - 1 mm). Největší objemové změny se projevily u směsi s přidaným mletým sádrokartonem s obsahem papíru.

Vyschlé vzorky se následně, stejně jako u první řady vzorků, testovaly v zatěžovacím lisu na tlak za ohybu a na prostý tlak. U směsí s hrubě mletým sádrokartonem a směsí s mletým SDK s obsahem papíru platilo, že čím větší množství recyklátu bylo obsažené v suché směsi, tím větší byla výsledná pevnost v tlaku. Naopak směs s hrubě drceným sádrokartonem měla výslednou pevnost nejnižší. Výsledné pevnosti se pohybovaly v rozmezí od 1 do 1,9 MPa.

V rámci výzkumu se okrajově zkoumal i vliv zpěňující přísady na pevnostní a tepelné technické charakteristiky. Do směsi bílé sádry s mletým SDK s obsahem papíru se přidala vyšlehaná zpěněná směs, používaná v hasících přístrojích. Ztvrdlé trámečky s touto směsí se následně podrobily tlakovým zkouškám a měření isometem. Výsledná pevnost v tlaku u zpěněného vzorku byla až o 75 % nižší než u vzorku stejných příměsí bez zpěňující látky. Hodnota tepelné vodivosti u zpěněného vzorku byla ovšem o více než polovinu nižší než u nezpěněného vzorku. Zpěňující přísada tedy zlepšila tepelně izolační vlastnosti za cenu snížení pevnosti v tlaku.

5. Závěr

Cílem výzkumu, prováděného v rámci diplomové práce, bylo nalezení optimálního množství recyklátů na bázi sádry, přidaného do směsí se sádrovými pojivy. Míchání jednotlivých směsí různých poměrů složek probíhalo ručně, bez použití techniky určené k míchání sádrových směsí, kterými disponují výrobci výrobků na bázi sádry. Vzhledem k rychlosti tuhnutí sádry a potřeby dobré zpracovatelnosti po určitou dobu byl zvolen poměrně vysoký vodní součinitel. Větší množství záměsové vody v testovaných směsích však mělo za následek nižší pevnostní charakteristiky, než které udává norma pro směsí bez použitého recyklátu. V tomto směru můžeme porovnávat naměřené hodnoty u vzorků různých směsí mezi sebou, ať už jde o typ nebo množství recyklovaných příměsí a jejich vliv na některé mechanické či fyzikální vlastnosti. Ne tak dobře se ale dají porovnávat s normovými hodnotami. Pro případné pokračování nebo navázání jiného výzkumu by proto stálo za vyzkoušení přidání plastifikátorů do směsí, díky kterým by se mohl snížit vodní součinitel a zvýšit tím pevnostní vlastnosti na úroveň normových hodnot.

Recykláty přidané k sádře v závislosti na jejich druhu a množství mimo pevnostních aspektů ovlivnily také tepelné vlastnosti testovaných výrobků. U vzorků s recyklovanými sádrovými tvárnicemi došlo ke zlepšení těchto vlastností, u směsí s pomletým sádrokartonem k jejich zhoršení. Jedním ze směrů, kterým by se mohl výzkum dále ubírat, by mohl být přidání a analyzování odpadního materiálu nejen na bázi sádry, ale i jiných materiálů. Účelem takového výzkumu by mohlo být zlepšení tepelně technických vlastností sádry pro použití tepelně izolačních podhledů a dalších prvků s podobnými požadavky na tepelnou pohodu v objektech.

Vzhledem k množství vyprodukovaného stavebního odpadu a dnešním tendencím, co se jeho třídění a recyklace týče, je logické se zaměřit na jeho využití. Obzvláště, když u materiálů jako je sádra, nedochází jeho recyklací k změně chemického složení. V dnešní době probíhá spousta různých výzkumů na využití odpadu nejen na bázi sádry, ale i jiných materiálů za účelem stanovení účinků recyklátů ve stavebních hmotách a jejich vlastností. V tomto směru jsme však teprve na začátku dlouhé cesty za snížením stavebního odpadu a jeho znovuvyužitím ve stavebnictví nebo v jiných průmyslových odvětvích.

6. Seznam citací

- [1] BOUKHEMISOVÁ, Magdalena. Jak recyklovat sádrokarton? *Stavební vzdělání* [online]. 2018 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.stavebni-vzdelani.cz/recyklace-sadrokartonu/>
- [2] DOHNAL, Radomír. Recyklace sádrokartonu? Evropa teprve začíná. *ESTAV.cz* [online]. 2014 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/949.recyklace-sadrokartonu-evropa-teprve-zacina>
- [3] ČERNÝ, Robert, Pavla ROVNANÍKOVÁ a Zbyněk KERŠNER. *Vlastnosti modifikované sádry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. ISBN 978-80-214-3988-7
- [4] VAVŘÍN, F. *Maltoviny*. Brno: Rektorát vysokého učení technického v Brně, 1980
- [5] SKOUPIL, Zbyněk. *Vývoj sádrových prvků jako součásti komplexního příčkového systému*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
- [6] JIRÁSEK, J., VAVRO, M.: *Nerostné suroviny a jejich využití*. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3
- [7] SCHULZE, W., TISCHER, W., ETEL, W., LACH, V. *Necementové malty a betony*, Praha: STNL, 1990. ISBN 80-03-00188-9
- [8] HLAVÁČ, J. *Základy technologie silikátů*, 2. vydání. Praha: STNL, 1988
- [9] Sádrové materiály a jejich fyzikální vlastnosti. *Stavebnictví3000.cz* [online]. 23.7.2008 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/sadrove-materialy-a-jejich-fyzikalni-vlastnosti>
- [10] NYČ, M. *Sádrokarton, stavby a rekonstrukce*. Praha: Grada Publishing, 2002. ISBN 8024790289
- [11] *Systémy suché výstavby. Sádrovláknité desky FERMACELL* [online] 1999 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: http://www.fermacell.cz/cz/content/fermacell_sadrovlaknité_desky_vyroba.php
- [12] Sádra: Stavební sádra - šedá. *Gypstrend.cz* [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: http://www.gypstrend.cz/?forum_new=1&clanek=18

- [13] GtoG project. *Gypsum to Gypsum* [online]. 2013 [cit. 2019-05-1]. Dostupné z: <http://gypsumtogypsum.org>
- [14] GERALDO, Rodrigo H., Sayonara M.M. PINHEIRO, Jefferson S. SILVA, Heloysa M.C. ANDRADE, Jo DWECK, Jardel P. GONÇALVES a Gladis CAMARINI. Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier, 2015, s. 288-300 [cit. 2019-05-1]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188>
- [15] ZHU, Cong, Jianxin ZHANG, Wei YI, Wenxiang CAO, Jiahui PENG a Jiansen LIU. Research on degradation mechanisms of recycled building gypsum. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2018, s. 540-549 [cit. 2019-05-1]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.060>
- [16] Energosádrovec. SiloTransport [online]. [cit. 2019-05-1]. Dostupné z: <https://www.silotransport.cz/energoadrovec>
- [17] Sádra a její složení při různé teplotě a vlhkosti. *Stavebnictví3000.cz* [online]. 2008 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/sadry-a-její-složení-pri-různé-teplotě-a-vlhkosti>
- [18] Carbon footprint analysis of calcined gypsum production in the Czech Republic. FOŘT, Jan a Robert ČERNÝ. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier, 2018, s. 795-802 [cit. 2019-05-10] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618300027>
- [19] Preparation of waterproof block by silicate clinker modified FGD gypsum. WU, Qisheng, Hongen MA, Qiuqing CHEN, Zichen HUANG, Changsen ZHANG a Tao YANG. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2019, s. 318-325 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819308955>
- [20] PEDREÑO-ROJAS, M.A., I. FLORES-COLEN, J. DE BRITO a C. RODRÍGUEZ-LIÑÁN. Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier, 2019, s. 444-457 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619300617>

- [21] HUANG, Yuyan, Chao XU, Haoxin LI, Zhengwu JIANG, Zhiqi GONG, Xiaojie YANG a Qing CHEN. Utilization of the black tea powder as multifunctional admixture for the hemihydrate gypsum. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier, 2019, s. 231-237 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618333377>
- [22] DEL RIO MERINO, Mercedes, Paola VILLORIA SÁEZ, Iolanda LONGOBARDI, Jaime SANTA CRUZ ASTORQUI a César PORRAS-AMORES. Redesigning lightweight gypsum with mixes of polystyrene waste from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier, 2019, s. 144-151 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619305219>
- [23] Waste shell powders as valuable bio- filler in gypsum plaster – Efficient waste management technique by effective utilization. SOPHIA, M. a N. SAKTHIESWARAN. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier, 2019, s. 74-86 [cit. 2019-05-3].
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619305086>
- [24] Mechanical properties of Michigan Basin's gypsum before and after saturation. SADEGHAMIRSHAHIDI, Mohammadhossein a Stanley J.VITTON. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* [online]. Elsevier, 2019 [cit. 2019-04-23].
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775518302622>
- [25] KONDRATIEVA, Nataliia, Maud BARRE, François GOUTENOIRE a Myroslav SANYTSKY. Study of modified gypsum binder. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2017, s. 535-542 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817310255>
- [26] SYCHUGOV, Stanislav, Yuriy TOKAREV, Tatiana PLEKHANOVA, Olesya MIKHAILOVA, Igor PUDOV, Rinat FAIZULLIN, Albert GAIFULLIN a Ruslan SAGDIEV. Line of Approach to a Problem of Water Resistance of Anhydrite Cements. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier, 2017, s. 982-990 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817306306>
- [27] YAKOVLEV, Grigory, Irina POLYANSKIKH, Galina FEDOROVA, Anastasiia GORDINA a Aleksandr BURYANOV. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier, 2015, s. 13-21 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815011492>

- [28] Comparative study of oil palm trunk and rice husk as fillers in gypsum composite for building material. SELAMAT, Mohd Ezwan, Rokiah HASHIM, Othman SULAIMAN, Mohamad Haafiz Mohamad KASSIM, Nur Izzaati SAHARUDIN a Owolabi Folahan Abdulwahab TAIWO. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier, 2019, s. 526-532 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818326692>
- [29] Analysis of drying and saturating natural gypsum samples for mechanical testing. SADEGHAMIRSHAHIDI, Mohammadhossein a Stanley J.VITTON. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* [online]. Elsevier, 2019, s. 219-227 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775518301823>
- [30] Gypsum in Ticinese stucco artworks of the 16–17th century: Use, characterization, provenance and induced decay phenomena. CAROSELLI, Marta, Giovanni CAVALLO, Alberto FELICI, Stefania LUPPICHINI, Giovanni NICOLI, Lucia ALIVERTI a Giacinta JEAN. *Journal of Archaeological Science: Reports* [online]. Elsevier, 2019, s. 208-219 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352409X18303870>
- [31] Chapter 2 - Gypsum Materials. *Materials Science for Dentistry* [online]. Elsevier, 2018, s. 40-69 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352409X18303870>
- [32] LI, Fan, Jianli LIU, Guangyong YANG, Zongyou PAN, Xiao NI, Huazi XU a Qing HUANG. Effect of pH and succinic acid on the morphology of α -calcium sulfate hemihydrate synthesized by a salt solution method. *Journal of Crystal Growth* [online]. Elsevier, 2013, s. 31-36 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022024813002315>

7. Seznam tabulek

Tab. 1: Pevnostní třídy sádry

Tab. 2: Počátek a doba tuhnutí sádry

Tab. 3: Rozdělení sádrových pojiv podle jemnosti mletí

Tab. 4: Rozdíly mezi přírodním sádrovcem a zatvrdlým produktem

Tab. 5: Vodní součinitel pro šedou sádro

Tab. 6: Množství recyklátu přidaného k bílé sádře

Tab. 7: Množství recyklátu přidaného k šedé stavební sádře

Tab. 8: Bílá sádra + pomleté sádrové bloky – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Tab. 9: Bílá sádra + pomleté sádrové bloky – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Tab. 10: Šedá sádra + pomleté sádrové bloky – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Tab. 11: Šedá sádra + pomleté sádrové bloky – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Tab. 12: Šedá sádra + pomletý SDK – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Tab. 13: Šedá sádra + pomletý SDK – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Tab. 14: Šedá sádra + pomleté sádrové bloky – počáteční a konečný modul pružnosti

Tab. 15: Šedá sádra + pomletý SDK – počáteční a konečný modul pružnosti

Tab. 16: Šedá sádra + pomletý SDK – počáteční a konečný modul pružnosti

Tab. 17: Bílá sádra + pomleté sádrové bloky – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Tab. 18: Šedá sádra + pomleté sádrové bloky – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Tab. 19: Šedá sádra + pomletý SDK – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Tab. 20: Bílá sádra + pomleté sádrové bloky – tepelně technické parametry

Tab. 21: Šedá sádra + pomleté sádrové bloky – tepelně technické parametry

Tab. 22: Šedá sádra + pomletý SDK – tepelně technické parametry

Tab. 23: Bílá sádra + hrubě mletý SDK – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Tab. 24: Bílá sádra + hrubě mletý SDK – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Tab. 25: Bílá sádra + mletý SDK s papírem – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Tab. 26: Bílá sádra + mletý SDK s papírem – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Tab. 27: Bílá sádra + drcený SDK – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Tab. 28: Bílá sádra + drcený SDK – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Tab. 29: Bílá sádra + drcený SDK + mletý SDK s papírem – počáteční tvarové a hmotnostní vlastnosti

Tab. 30: Bílá sádra + drcený SDK + mletý SDK s papírem – tvarové a hmotnostní vlastnosti po 28 dnech

Tab. 31: Bílá sádra + hrubě mletý SDK – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Tab. 32: Bílá sádra + mletý SDK s papírem – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Tab. 33: Bílá sádra + drcený SDK – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Tab. 34: Bílá sádra + drcený SDK + mletý SDK s papírem – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Tab. 35: Bílá sádra + mletý SDK s papírem + zpěňující látka – pevnost v tlaku za ohybu a v prostém tlaku

Tab. 36: Bílá sádra + mletý SDK s papírem + zpěňující látka – tepelně technické parametry

Tab. 37: Bílá sádra + mletý SDK s papírem – tepelně technické parametry

8. Seznam obrázků

Obr. 1: Drcený SDK

Obr. 2: Hrubě mletý SDK

Obr. 3: SDK mletý s kousky papíru

Obr. 4: Vzorky směsí testované na dobu tuhnutí a tvrdnutí

Obr. 5: Zkouška rozlití

Obr. 6: Měření rozlité směsi

Obr. 7: Testovací trámečky

Obr. 8: Průběh měření tvarových a hmotnostních vlastností

Obr. 9: Úbytek objemu bílé sádry s pomletými sádrovými bloky v závislosti na čase

Obr. 10: Úbytek objemu šedé sádry s pomletými sádrovými bloky v závislosti na čase

Obr. 11: Úbytek objemu šedé sádry s pomletým SDK v závislosti na čase

Obr. 12: Smrštění vzorků

Obr. 13: Rázové kladívko. (zdroj: OMEGA Engineering inc., web:

<https://in.omega.com/pptst/IH101.html>)

Obr. 14: Nárůst modulu pružnosti bílé sádry s pomletými sádrovými bloky v závislosti na čase

Obr. 15: Nárůst modulu pružnosti šedé sádry s pomletými sádrovými bloky v závislosti na čase

Obr. 16: Nárůst modulu pružnosti šedé sádry s pomletým SDK v závislosti na čase

Obr. 17: Zatěžovací lis

Obr. 18: Tlak za ohybu

Obr. 19: Prostý tlak

Obr. 20: Porovnání pevností v tlaku pro vzorky s jemnozrnným recyklátem

Obr. 21: Isomet

Obr. 22: Úbytek objemu bílé sádry s hrubě mletým SDK v závislosti na čase

Obr. 23: Úbytek objemu bílé sádry s mletým SDK s papírem v závislosti na čase

Obr. 24: Úbytek objemu bílé sádry s drceným SDK v závislosti na čase

Obr. 25: Úbytek objemu bílé sádry s drceným SDK a mletým SDK s papírem v závislosti na čase

Obr. 26: Porovnání pevností v tlaku pro vzorky s hrubozrnným recyklátem

Obr. 27: Robotický šlehač

Obr. 28: Porovnání směsí s a bez zpěňující látky z hlediska tepelně technických vlastností