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

ZMĚNY VLASTNOSTÍ CEMENTOTŘÍSKOVÝCH DESEK VLIVEM KOLÍSÁNÍ VZDUŠNÉ VLHKOSTI

CHANGES IN THE PROPERTIES OF CEMENT-BONDED PARTICLEBOARDS DUE TO FLUCTUATIONS IN ATMOSPHERIC HUMIDITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Silvestr Vasas
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2023

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav technologie stavebních hmot a dílců
Student:	**Bc. Silvestr Vasas**
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.**
Akademický rok:	2022/23
Studijní program:	N0732A260027 Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Změny vlastností cementotřískových desek vlivem kolísání vzdušné vlhkosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Záměrem diplomové práce bude analýza změn vlastností cementotřískových desek v důsledku působení proměnlivé míry vlhkosti vzduchu. Důraz je třeba klást na hygroskopicitu desek, jejichž složení bylo modifikováno alternativními surovinami. V rámci alternativních surovin je nutné soustředit pozornost převážně na vedlejší produkty, vznikající při opracování cementotřískových desek. Diplomovou práci je třeba realizovat jak v rovině teoretické, tak i experimentální, včetně vyvození závěrů s dopadem na praxi či jako podklad navazujícího výzkumu.

Cíle a výstupy diplomové práce:

- Průzkum aktuálních informací a poznatků relevantních s řešenou problematikou.
- Návrh receptur s konkrétními alternativními složkami, jejich případnou úpravou (drcení, mletí, eliminace nežádoucích složek atd.).
- Návrh metodiky experimentů a hodnocení dynamiky sorpce modifikovaných i referenčních cementotřískových desek.
- Stanovení sorpčních křivek v rozmezí relativní vlhkosti okolního vzduchu 0 až 95 % - posouzení změn rozměrů, hmotnosti, atd.
- Posouzení základních materiálových charakteristik.
- Komparace dosažených výsledků se zjištěními jiných autorů zabývajících se relevantní problematikou.
- Zhodnocení dosažených výsledků mimo jiné z hlediska praktického využití i případného navazujícího výzkumu.

Doporučený rozsah diplomové práce 60 až 80 stran.

Seznam doporučené literatury a podklady:

- Li T., Cheng D., Avramidis S., Wålinder M.E.P., Zhou D. Response of hygroscopicity to heat treatment and its relation to durability of thermally modified wood. Construction and Building Materials 144, 2017.

- Quiroga V., Marzocchi V., Rintoul I. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood–cement composites and of Populus Euroamericana wood fibers. Composites Part B: Engineering 84:25-32, 2016.

- Rowell, R., M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, second edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, USA, 2012.

- Fan M.Z., Dinwoodie J.M., Bonfield P.W., Breese M.C. Dimensional instability of cement bonded particleboard: Part 1. Behaviour and modelling prediction under a constant and single change in RH. Wood Sci. Technol. 36:125– 143, 2002.

- Relevantní technické normy a www.sciencedirect.com

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 16. 3. 2022

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

Abstrakt

Práce je zaměřena na změnu rozměrových, objemových, hmotnostních a mechanických vlastností cementotřískových desek vlivem kolísání vlhkosti okolního prostředí. Součástí práce je rešerše vědecké odborné literatury zaměřená na možnou úpravu organických materiálů využívaných jako plniva do cementotřískových matric, a také cementotřískových kompozitů. Jelikož se jako plnivo používá dřevo, které je velice náchylné na vlhkost, je důležitá jeho úprava – tepelná, chemická.

V praktické části jsou pak navrženy a zkoušeny různé receptury cementotřískových desek inspirované dosavadním výzkumem. Laboratorní posouzení změn vlastností cementotřískových desek vlivem relativní vlhkosti prokázalo soulad s teoretickými podklady, jako výsledek diplomové práce byly definovány vhodné receptury pro výrobu cementotřískových desek včetně jejich ověření.

Klíčová slova

Cementotřísková deska, alternativní surovina, struska, stavební materiály, vlhkost

Abstract

The work is focused on changing dimensional, volume, weight and mechanical properties of cement bonded particleboards due to fluctuations in the humidity of the surrounding environment. Part of the work is a search of scientific literature focused on the possible modification of organic materials used as fillers in cement bonded matrices, as well as cement bonded composites. Since wood is used as a filler, which is very susceptible to moisture, it is important to treat it – thermally, chemically.

In the practical part, various recipes of cement bonded particleboards were inspired by previous research are designed and tested. The laboratory assessment of changes in the properties of cement bonded particleboards due to relative humidity demonstrated compliance with the theoretical foundations, as a result of the thesis, suitable recipes for the production of cement bonded particleboards including their verification were defined.

Keywords

Cement-bonded particle board, alternative raw material, slag, building materials, humidity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VASAS, Silvestr. Změny vlastností cementotřískových desek vlivem kolísání vzdušné vlhkosti [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/143511. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Jiří Bydžovský.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci s názvem Změny vlastností cementotřískových desek vlivem kolísání vzdušné vlhkosti zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2023

.....

Bc. Silvestr Vasas

DECLARATION OF AUTHORSHIP OF THE FINAL THESIS

I declare that this final thesis titled *Changes in the properties of cement-bonded particleboards due to fluctuations in atmospheric humidity* are my own work and the result of my own original research. I have clearly indicated the presence of quoted or paraphrased material and provided references for all sources.

Brno, January 13th 2023

.....

Bc Silvestr Vasas

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval doc. Ing. Jiřímu Bydžovskému, CSc., vedoucímu mé diplomové práce, za jeho odborné vedení. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomášovi Melicharovi Ph.D. za cenné rady a čas, který mi poskytoval v průběhu vypracování diplomové práce, a v neposlední řadě mé rodině a přátelům za podporu během studia a při zpracování mé závěrečné práce.

Diplomová práce byla vytvořena s využitím infrastruktury Centra AdMaS v rámci řešení projektu GA ČR 22-06991S „Stabilizace vlastností a struktury smrkového dřeva s ohledem na trvanlivost dřevo-cementových kompozitů“.

Obsah

1. Úvod ... 10
2. Cíl práce ... 11
3. Cementotřísková deska ... 12
3.1. Složky pro výrobu cementotřískových desek ... 12
3.1.1. Pojivo ... 13
3.1.2. Plnivo ... 13
3.1.3. Vodní sklo ... 14
3.1.4. Síran hlinitý ... 15
3.1.5. Voda ... 16
3.2. Výroba cementotřískových desek ... 16
3.3. Vlastnosti cementotřískových desek ... 18
3.4. Změny vlastností vybraných surovin a materiálů v důsledku změn vlhkosti ... 18
3.4.1. Dřevo ... 18
3.4.2. Cementotřískové desky ... 27
3.5. Zhodnocení teoretických poznatků z dostupných zdrojů ... 34
4. Experimentální část ... 35
4.1. Metodika ... 35
4.2. Alternativní složky, receptury ... 35
4.3. Výroba desek a zkušebních těles ... 37
4.4. Podmínky expozice a příprava zkušebních těles ... 44
4.5. Testování hygroskopicity desek ... 46
4.6. Ověření fyzikálně-mechanických vlastností ... 57
4.7. Analýza mikrostruktury ... 60
4.8. Diskuze výsledků ... 64
4.8.1. Hygroskopicita ... 64
4.8.2. Fyzikálně-mechanické vlastnosti ... 66
4.8.3. Mikrostruktura ... 66
5. Závěr ... 67
6. Použitá literatura ... 69

1. Úvod

Vlhkost ve stavebnictví se obecně bere téměř vždy jako negativní, a to ať působí z venkovního prostředí nebo z prostředí vnitřního. Konstrukce je vlhkosti vystavována po celou dobu jejího užívání, a to jak vodou srážkovou působící na exteriér konstrukce, tak vodou spodní působící na základy stavby. Proto je důležité nezanedbat působení vlhkosti na konstrukci, ať už z důvodu vlivu na mechanické parametry, tak i z hlediska zdravotního, kdy zvýšená vlhkost často vede ke vzniku plísní či jiným negativním projevům.

Dlouhodobý výskyt vlhkosti ve stavbě může mít za následky snížení mechanických schopností, ale také zvýšit tepelnou vodivost, co se projeví snížením izolační schopnosti. Při snížení teploty dochází k vytvoření ledu, který má negativní vliv na trvanlivost materiálu.

Cementotřískové desky jsou ovlivněny změnami relativní vlhkosti ve velké míře. Dochází u nich k patrným změnám změn rozměrů, vlhkost a její změny mohou mít vliv na další parametry, jako je pevnost v ohybu, rozlupčivost atd.

Nedostatek surovin, a obecně i snaha o jejich optimální využití, včetně úspory surovin neobnovitelných, také vede k hledaní alternativních zdrojů. Vzhledem k energetické náročnosti výroby portlandského cementu je efektní jeho alespoň částečná substituce. V dnešní době je cenové i ekologické hledisko velmi důležité, a proto je důležité hledat možné alternativní zdroje, které by mohly nahradit klasické suroviny, aniž by přitom došlo ke zhoršení podstatných parametrů výsledných stavebních materiálů a konstrukcí z nich zhotovených.

2. Cíl práce

Záměrem diplomové práce je analýza změn vlastností cementotřískových desek v důsledku působení proměnlivé míry vlhkosti vzduchu. Důraz je třeba klást na hygroskopicitu desek, jejichž složení bylo modifikováno alternativními surovinami. V rámci alternativních surovin je nutné soustředit pozornost převážně na vedlejší produkty, vznikající při opracování cementotřískových desek. Diplomovou práci je třeba realizovat jak v rovině teoretické, tak i experimentální, včetně vyvození závěrů s dopadem na praxi či jako podklad navazujícího výzkumu.

3. Cementotřísková deska

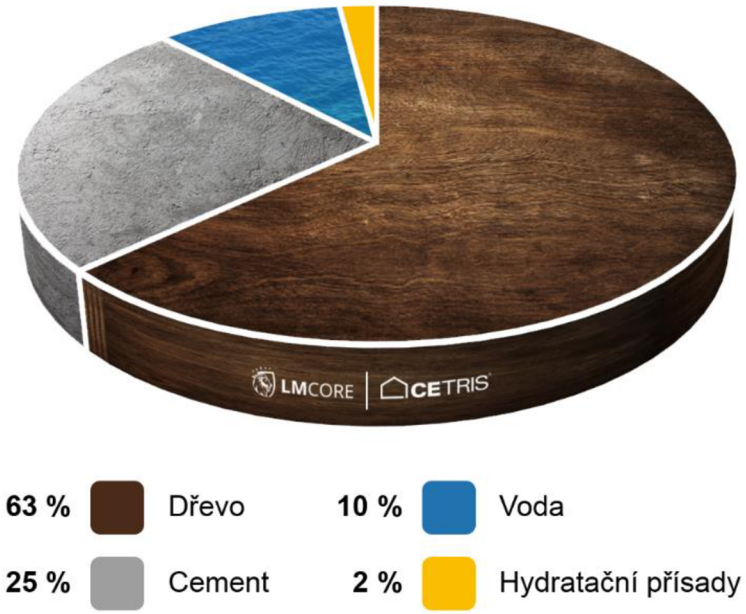
Cementotřískové desky jsou kompozitní materiály složené převážně ze dřeva a pojené cementovým tmelem. Kombinací těchto složek dochází k synergickému chování, kde vzniká deska s lepšími fyzikálními i mechanickými vlastnostmi než samostatné dřevo nebo cementová matrice. I když jsou desky tvořeny převážně ze dřeva, jsou nehořlavé, mrazuvzdorné, odolné proti povětrnostním podmínkám, houbám, plísním a hmyzu.

Technická norma ČSN EN 633 specifikuje cementotřískovou desku jako desku vyrobenou lisováním z částic na bázi dřeva nebo jiných organických částic pojených hydraulickým cementem nebo na bázi hořčíku s možnými přísadami. Možnými úpravami se desky dělí na surové, povrchově upravené, broušené, také s možností probarvení.

Využití desek je určeno převážně pro podlahové systémy, odvětrávané fasády, střešní nástavby, protipožární aplikace, balkóny, sokly, podhledy, půdní vestavby, ztracená bednění, stěny a další.

3.1. Složky pro výrobu cementotřískových desek

Z hlediska objemového složení (viz Obr. 1) cementotřísková deska dominantě obsahuje smrkové třísky, dále cementové pojivo, vodu a v minoritním množství pak hydratační přísady ve formě vodního skla a síranu hlinitého.



Obr. 1 : Objemové složení cementotřískových desek Cetris [19.]

3.1.1. Pojivo

Cement je anorganické pojivo, které po smíchání s vodou vytváří kaši se schopností tuhnout, tvrdnout a vázat se spolu s dalšími materiály jak na vzduchu, tak pod vodou. Po zatuhnutí zachová svou pevnost a objemovou stálost.

Základní druhy cementu dle normy ČSN EN 197-1 se rozdělují do pěti skupin CEM I až CEM V. Další rozdělení je podle pevnostní třídy - pevnosti v tlaku v MPa (32,5; 42,5; 52,5), podílu a druhu příměsi a rychlosti tuhnutí (R, N, L). K výrobě cementotřískových desek se nejčastěji používá portlandský cement s rychlým nárůstem pevností CEM I 42,5 R. V posledních několika letech je také pro výrobu desek využíván portlandský struskový cement CEM II/A-S 42,5 R.

Výroba cementu probíhá semletím slínku, regulátoru tuhnutí a dalších složek. K výrobě slínku se využívají zpevněné i nezpevněné zeminy jako břidlice, jíly a hlíny s vápencem v rotačních pecích za teploty 1450 °C. Slínek obsahuje 4 základní slínkové minerály, kterými jsou alit (C_3S), belit (C_2S), trikalciumaluminát (C_3A) a tetrakalciumaluminát ferit (C_4AF). Tyto minerály zásadně ovlivňují výsledné vlastnosti cementu. [13.] [14.]

3.1.2. Plnivo

Dřevo se využívá hlavně kvůli jeho vhodným vlastnostem. Dobře se opracovává, má nízkou objemovou hmotnost, malou tepelnou a zvukovou vodivost a je poměrně dobře dostupné. Z hlediska udržitelného stavebnictví je značnou výhodou to, že se jedná o obnovitelnou surovinu, šetrnou k životnímu prostředí.

Pro cementotřískové desky se z pravidla používá dřevo jehličnaté, převážně smrk nebo jedle. Patří mezi levnější druhy dřeva, s ohledem na jejich značné zastoupení v tuzemských lesích, i na fakt že jejich průměrná doba růstu do těžby (obmýtí) je nižší (cca 80 let) než pro jiné, zejména listnaté dřeviny

Obr. 2 : Třísky pro výrobu cementotřískových desek [37.]

Dřevní biomasa je heterogenní materiál složený ze strukturálních složek (celulózy, hemicelulózy a ligninu) a nestrukturních složek (polysacharidy, bílkoviny, škroby, atd.) Celulóza (40-45 %) je polysacharid s vysoce pravidelnou strukturou a vysokým stupněm krystalinity. Dodává dřevu jeho charakteristickou pevnost. Lignin (18 - 30 %) je amorfní pryskyřice na bázi fenolpropanu, vyplňující prostory mezi polysacharidovými vlákny. Poskytuje tvar a strukturu dřeva. Hemicelulóza (20 - 32 %) se skládá z heteropolysacharidů. Jsou velice rozvětvené a snadno rozpustné ve vodě. [26.]

3.1.3. Vodní sklo

Vodní sklo je tuhá tavenina alkalických křemičitanů nebo vodný roztok křemičitanu sodného. Ve stavebnictví se používá hlavně k mineralizaci organických pojiv a k urychlení tuhnutí cementové směsi. Výroba vodního skla se rozděluje na dva způsoby. První způsob je roztavení sklářského písku ve sklářské vanové peci alkalickými tavidly na teplotu 1400-1600 °C, kterou poté prudce ochladíme za podnětem rozpraskání na co nejmenší části. Tento produkt se pak v autoklávu rozpouští na tekuté vodní sklo. Druhým způsobem je výroba pouze pomocí hydrotermální reakce, kde v autoklávu rovnou rozpustíme křemičitý písek. Touto metodou dokážeme vyrobit jen omezený druh vodního skla.

Složení vodního skla je charakterizováno křemičitým modulem M, což je molární poměr SiO_2/Na_2O nebo SiO_2/K_2O. Hodnota běžného vodního skla se pohybuje v rozmezí 1,6 – 4,1. Dalšími charakteristikami je hodnota pH, hustota a viskozita. Vodní sklo s reakcí s CO_2 reaguje a vzniká gel, který obalí povrch organického materiálu i s jeho póry, který

způsobuje mineralizaci třísek. Množství vodního skla se uvádí do 2 % z celkového objemu, ale převážně závisí na množství organického plniva. [6.] [8.] [9.]

3.1.4. Síran hlinitý

Síran hlinitý značený vzorcem $Al_2(SO_4)_3$ je anorganická sloučenina na bázi soli hliníku kyseliny sírové. Používá se jako urychlovač s účinky urychlení tuhnutí hydratační reakce, tvrdnutí cementu a rychlejšího nárůstu manipulačních pevností. Nicméně může také zlepšit kompatibilitu struskového cementu smíchaného s dřevem. Nejvýraznějším jevem zlepšení hydratace vedlo k hydratačnímu procesu podobnému jako u čistého cementu. U dřeva také zlepšuje jeho mineralizační schopnosti. [6.] [8.][42.]

Weatherwax a Tarkow popsali termín inhibiční index, který srovnává změnu dřevocementové inhibice na bázi procentuálního nárůstu dobry tuhnutí. Inhibiční index se počítá z hodnot maximálního tepla hydratace, maximálního sklonu exotermické křivky a doby potřebné k dosažení maximální teploty cementu s urychlovačem se srovnáním s cementem bez urychlovače. Čím menší tato hodnota je, tím lepší je jejich kompatibilita mezi dřevem a cementem.[42.][43.]

$$I = 100[((t_2 - t'_2)/t'_2)*((T'_2 - T_2)/T'_2)*((S'_2 - S_2)/S'_2)]$$

Kde: t_2 – čas potřebný k dosažení maximální teploty u cementu s urychlovačem

t'_2 –čas potřebný k dosažení maximální teploty u cementu bez urychlovače

T_2 – maximální teplota u cementu s urychlovačem

T'_2 – maximální teplota u cementu bez urychlovače

S_2 – maximální sklon exotermické křivky u cementu s urychlovačem

S'_2 – maximální sklon exotermické křivky u cementu bez urychlovače

Tab. 1 – Inhibiční index pro kompatibilitu dřeva k cementu [42.]

Inhibitory index (%)	Grade
$I < 10$	Low inhibition
$I = 10–50$	Moderate inhibition
$I = 50–100$	High inhibition
$I > 100$	Extreme inhibition

Směs dřeva a $Al_2(SO_4)_3$ při využití jako urychlovače má dobrou kompatibilitu a klasifikuje se jako „nízká inhibice“. Při použití nadměrného množství urychlovače došlo k opačnému jevu viz. Tab. 2. [41.]

Tab. 2 - Inhibiční index dřeva s kombinací urychlovače [41.]

Mixture of cement/water/ accelerator	Inhibitory index (%)	
	Natural red meranti	Plantation red meranti
cement/water	0.703	5.625
cement/water/2.5% $MgCl_2$	-3.812	-4.178
cement/water/5% $MgCl_2$	-2.776	-4.511
cement/water/7.5% $MgCl_2$	-4.920	-6.004
cement/water/2.5% $Al_2(SO_4)_3$	-4.380	-1.540
cement/water/5% $Al_2(SO_4)_3$	-5.062	-4.335
cement/water/7.5% $Al_2(SO_4)_3$	2.639	9.562

3.1.5. Voda

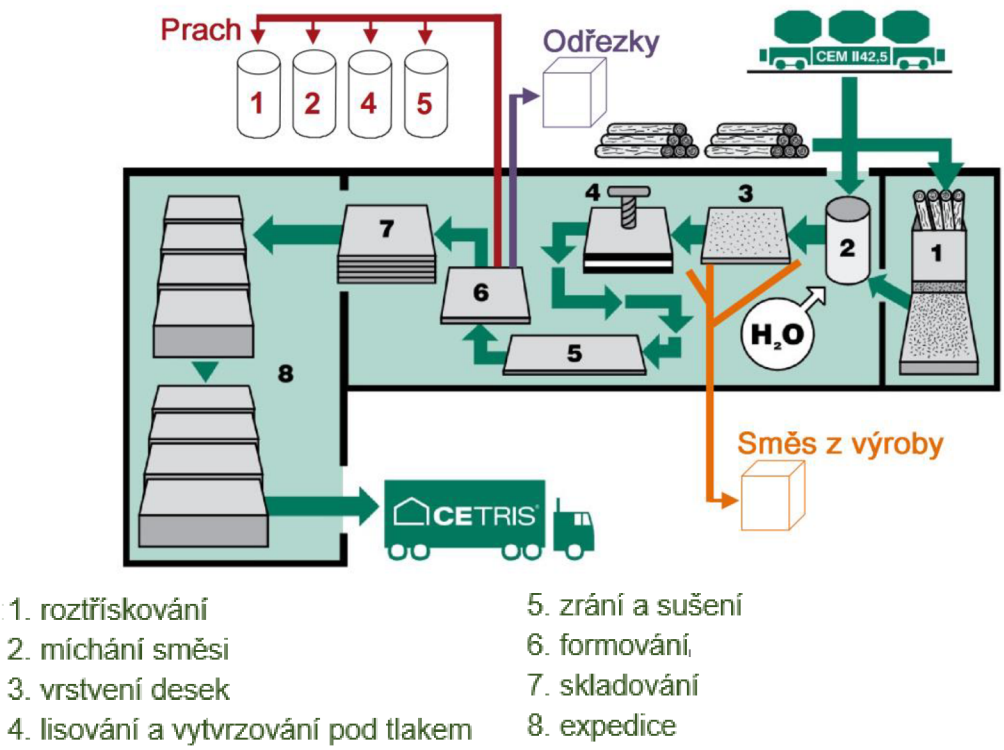
Hlavní využití vody je pro hydrataci cementu a pro zpracovatelnost výrobní směsi. Takto využívaná voda se nazývá záměsová. Tato voda nesmí být nijak znečištěná anebo obsahovat nadměrné množství chemikálií. Kvalita vody může ovlivnit dobu tuhnutí a tvrdnutí cementové matrice. Pitná voda se podle normy ČSN EN 1008 nemusí zkoušet a bere se jako dostačující. Množství vody se uvádí přibližně na 10 % z celkového objemu, ale může být korigováno v rámci vlhkosti dřevěných třísek a dávkování hydratačních a mineralizačních přísad.

3.2. Výroba cementotřískových desek

Na území České republiky působí již přes 30 let jeden výrobce cementotřískových desek, tj. spol. CIDEM Hranice a.s. Technologie výroby tuzemského výrobce vychází z postupu výroby německé spol. BISON. Dále v textu je popsán postup výroby cementotřískových desek ze spol. CIDEM Hranice a.s.

K výrobě cementotřískových desek se z dřevin používá smrk, který se nařeže na kulatinu, odstraní se kůra a nechá se několik měsíců odležet ve venkovním prostředí pro odstranění cukrů a jiných škodlivých látek. Takto upravené dřevo se roztřískuje na jehlicové třísky a uloží se do zásobních sil. V silech jsou třísky předehřívány odpadním teplem z biomasy. Třísky pak putují do kladivových mlýnů, kde jsou upravovány na požadovanou velikost a pomocí dvoupatrových vibračních strojů jsou systematicky směšovány.

Navážené množství třísek, portlandského cementu (CEM I 42,5 R), mineralizačních látek a vody se smíchá a dopraví na vrstvící linku. Vrstvy se pak nanáší pomocí čtyř za sebou umístěných dávkovačů. Vrchní a spodní vrstva obsahuje jemnější třísky pro hladší typ povrchu, zatím co střední vrstva obsahuje hrubější třísky pro zajištění lepších mechanických vlastností. Poté jsou stohovány na sebe a při dosažení dostatečného počtu se lisují hydraulickým lisem na 1/3 sypané tloušťky. Po slisování putují do vytvrzovací komory, kde zůstanou 8 hodin v teplotě 60 °C s relativní vlhkostí min. 95 %, pro dosažení manipulačních pevností. Po vytvrzení se desky oddělí a putují do klimatizační komory na několik dní. Po vyzrání se desky nechají vysušit na vlhkost 9 % a formátují se na přání zákazníků. [6.] [8.] [9.][45.]



Obr. 3 : Schéma zjednodušeného výrobního postupu s vyznačením lokalit výrobní linky, kde vznikají vedlejší produkty [7.]

3.3. Vlastnosti cementotřískových desek

Cementotřískové desky jsou vyráběny globálně. Technologie jednotlivých výrobců se stejně jako vstupní suroviny mohou lišit a z toho plynou i různé parametry desek. V Tab. 3 níže jsou uvedeny základní fyzikálně-mechanické vlastnosti vybraných výrobců cementotřískových desek. Normové hodnoty jsou převzaty z technické normy ČSN EN 634-2. [51.][56.]

Tab. 3 Tabulka základních fyzikálně mechanických vlastností cementotřískových desek vybraných výrobců

Tabulka základních fyzikálně mechanických vlastností	Normové hodnoty	Cetris	Betopan	Tamak	BZSPlus	Vivaboard	Viroc	Dataholz
Objemová hmotnost dle ČSN EN 323 [kg/m3]	≥ 1000	1350	1300 ± 50	1250-1400	1350	1300	1350 ± 100	1200
Pevnost v tahu za ohybu dle ČSN EN 310 [N/mm2]	≥ 9,0	> 11,5	> 9	9±3	13	12	12	> 12
Modul pružnosti dle ČSN EN 310 [N/mm2]	≥ 4500	> 6800	> 4500	3500	6300	5000	≥ 4500	> 4500
Rozlupčivost dle ČSN EN 321 [N/mm2]	≥ 0,5	> 0,63	> 0,5	≥ 0,4	> 0,5	0,7	≥ 0,5	≥ 0,5
Mrazuvzdornost dle ČSN EN 1328[1]	≥ 0,7	> 0,971[2]	-	< 10[3]	-	-	-	-
Reakce na oheň dle EN 13 501-1	-	A2-s1, d0	B-s1, d0	B-s1, d0	B-s1, d0	B-s1, d0	B-s1, d0	B-s1, d0

3.4. Změny vlastností vybraných surovin a materiálů v důsledku změn vlhkosti

3.4.1. Dřevo

Dřevo nemůže být použito přímo tak jak je získáno z přírody, pro využití v cementotřískových kompozitech je nutná stabilizace jeho vlastností (pro cementové kompozity nejčastěji – mineralizace). Tato modifikace má za cíl učinit dřevo vhodné pro další použití, ale nevratně změní jeho strukturu a/nebo chemické složení dřeva. Tyto

[1] Firmy neudávající přesnou hodnotu pouze udávají mrazuvzdornost dle ČSN EN 1328
[2] Udávaná hodnota je po 100 cyklech. Technická norma ČSN EN 1328 požaduje min. 50 cyklů.
[3] Udávaná hodnota je pro ruskou normu ГОСТ 8747-88

změny mohou docílit zejména odstranění hemicelulózy, změnu stupně krystalinity celulózy nebo depolymerace uhlovodíků s dlouhými řetězci a ligninu. V souladu s tím lze podrobit dřevo různým typům mineralizace a jejich kombinací: mechanická, chemická, hydrotermální, biologická a tepelná. Hlavním cílem tepelné úpravy je zlepšení odolnosti proti absorpci vody a zvýšená rozměrová stabilita. To je dosaženo částečným odstranění hemicelulózy. [33.]

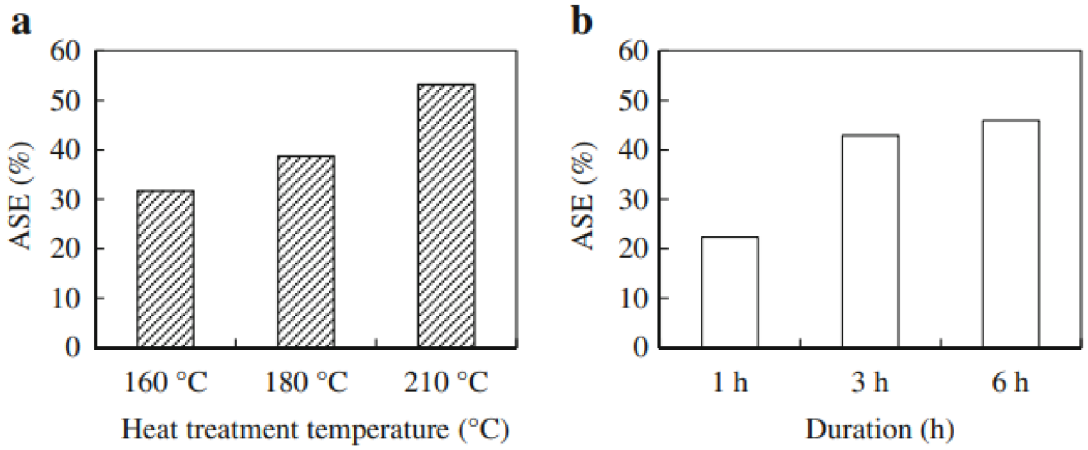
Problematikou rozměrové stabilizace dřeva se zabýval např. Kocaefe a kol.[34.]. Jejich teoretický výzkum se skládal z posouzení poznatků literatury jiných vědců zabývajících se různými typy stabilizací dřeva a výzkumu stabilizace dřeva tepelnou úpravou.

Účinky tepelné úpravy mají efekt na rozměrovou stabilitu dřeva, sorpční vlastnosti a mnohé další. Teplota se při tomto způsobu úpravy pohybuje v rozmezí 160 až 220 °C v různých plynech (pára, dusík), ale i například v rostlinném oleji s různou kombinací tlaků (přetlak, atmosférický tlak, vakuum), které způsobují degradaci hemicelulózy a ligninu. Všechny typy testovaných druhů dřeva vykazovaly po provedené teplotní úpravě zlepšení rozměrové stability (viz Tab. 4). [34.]

Tab. 4 – Efekt tepelné úpravy na stabilizaci dřeva [34.]

Wood species	Media	Conditions		Changes in dimensional stability	
		Temperature (°C)	Duration (h)	ASE (%)	EMC (%)
Pinus pinaster	Steam	210	12	−57	−46
Eucalyptus globulus	Steam	210	12	−90	−61
Pinus pinaster	Steam	190	8	–	−50
Pinus radiata	Oil	180	3	−(29~31)	–
Acacia hybrid	N_2	210~230	2~6	−(20~48)	–
Abies bornmulleriana Mattf.	Steam	210	12	−(44~57)	–
Pseudotsuga menziesii	Steam	220	4	−43	67.47
Coriolus versicolor	Oil	220	6	−21	42.8
Chinese Fir	Steam	230	5	−72	–
Populus ussuriensis	Oil	210	3	−56	–
Pinus nigra	Steam	225	3	−66	–
Hevea brasiliensis	Vacuum	210~240	1~8	−(20~38)	–
Grevillea robusta	Vacuum	210~240	1~8	−(12~42)	–
Eucalyptus cloeziana F. Muell	Steam	240	4	−68	−64
Pinus pinaster	Steam	200	6	−48	–
Quercus mongolica	Steam	220	2/4	−(35/43)	−(56/60)
Hevea brasiliensis	Air/vacuum/N_2	240	–	>40	>50

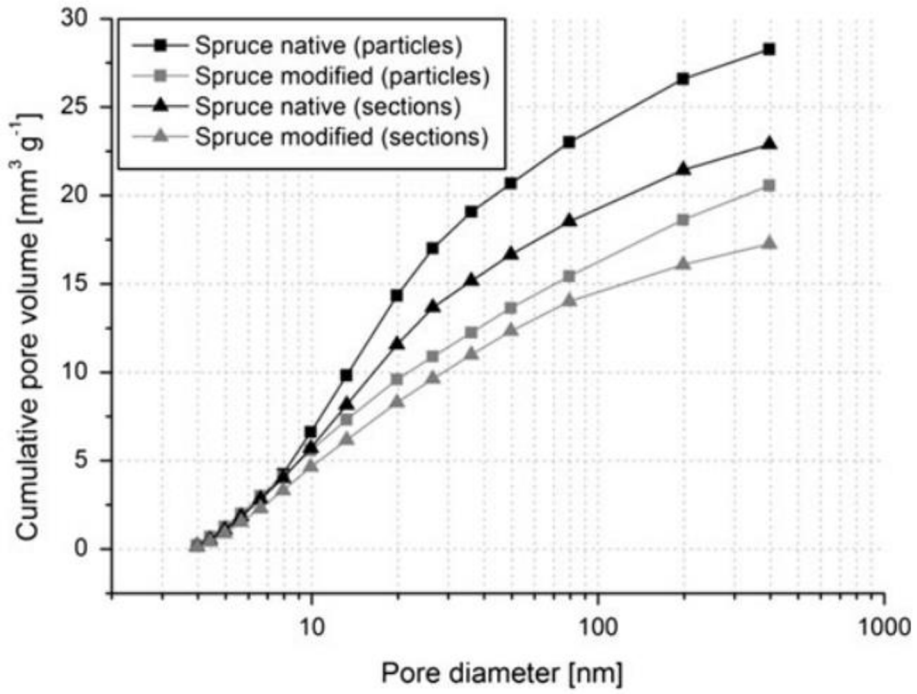
Nejlepší změny rozměrové stability byly zaznamenány u blahovičníku při teplotě 210 °C po dobu 12 hodin. Z výsledků je zřetelné, že doba trvání nebo doba namáčení při maximální teplotě během procesu tepelné úpravy hraje důležitou roli (viz Tab. 4 a Obr. 4 (a,b)). Obecně lze říct, že bobtnání dřeva klesá s narůstající dobou a teplotou tepelné úpravy. [34.]



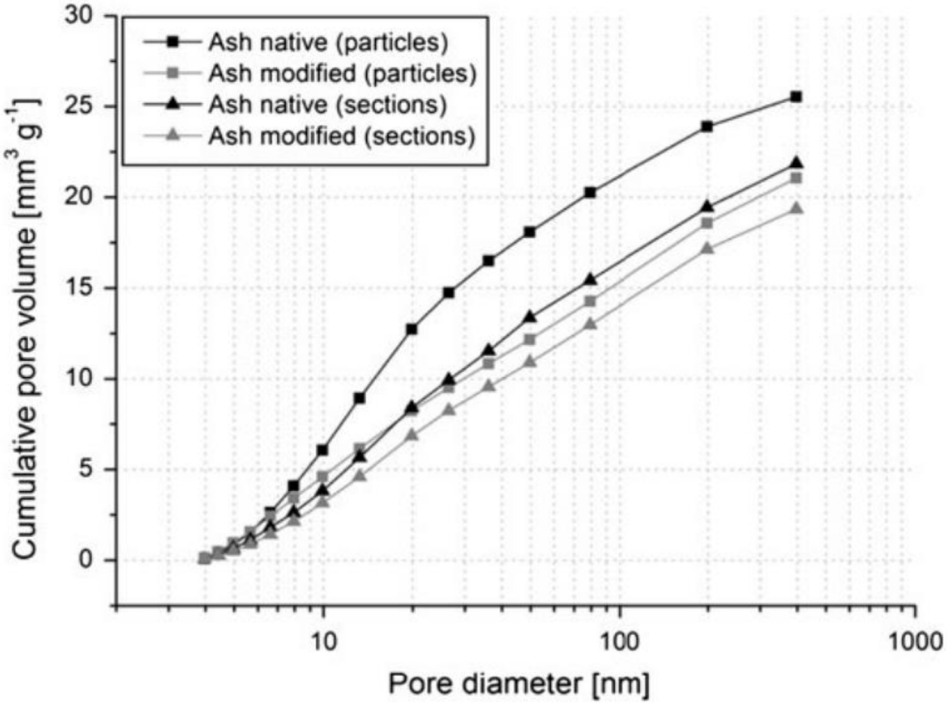
Obr. 4 – Účinnost proti bobtnání tepelně upraveného dřeva při (a) různých teplotách a (b) různé době působení [34.]

Důsledkem oxidačních a kondenzačních procesů se může vyskytnou samozasíťování buněčných stěn. Tím se modifikuje pórovitost, distribuce pórů buněčné stěny a také dutiny ve struktuře dřeva (např. špičaté konce lumen, otvory a dutiny membrán). Také vzhledem k degradaci hemicelulózy je bod nasycení buněčných stěn menší. Vlivem degradace a zejména přeměny látek buněčných stěn nemohou enzymy dřevokazných hub působit na dřeva, a tím zvyšují jeho biologickou trvanlivost. Kromě toho se porozita buněčných stěn snižuje, která může omezit difúzi enzymů do buněčných stěn. Je tedy možné, že podíl kapilárně kondenzované vody klesá a tím omezuje možnost pro enzymatickou aktivitu ve srovnání s přírodním dřevem. Proto znalost distribuce velikosti pórů, ve kterých může dojít ke kapilární kondenzaci důležitý pro zlepšení biologické trvanlivosti dřeva. [36.]

Z grafů je zřejmé, že distribuce pórů je rozdílná vzhledem na tvar (třísky, kusy) a stav (přírodní, s tepelnou úpravou). Póry u třísek jsou ve srovnány s celými kusy vždy větší, to je pravděpodobně dáno lepší přístupností a schopností bobtnání buněčných stěn jednotlivých částí ve srovnání s dřevěnými kusy. Kontaktní body jednotlivých třísek budou produkovat další dutinky. [36.]

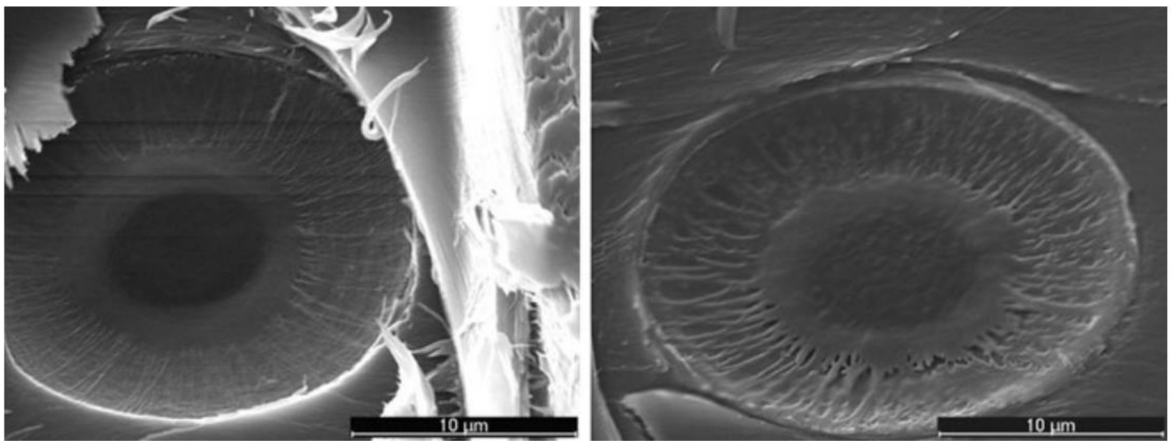


Obr. 5 – Přírodně a tepelně upravené smrkové třísky a masiv [36.]



Obr. 6 – Přírodně a tepelně upravené jasanové třísky a masiv [36.]

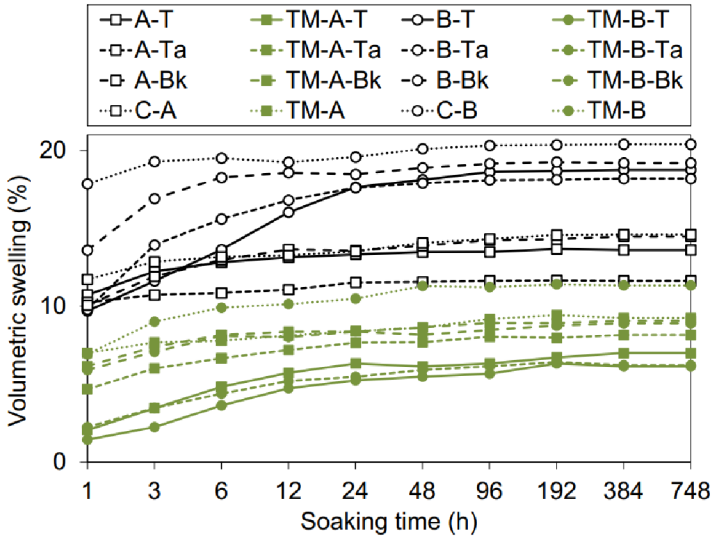
Z výsledků je jasné, že tepelná modifikace sníží podíl pórů pod 400 nm a sníží mez nasáknutí buněčných stěn. Z toho důvodu se kapilárně kondenzované vody snižují i s aktivitou dřevokazných hub, vedoucí ke zlepšení trvanlivosti. Chemické alterace a degradace složek buněčných stěn pravděpodobně vede ke zlepšení biologické trvanlivosti. Výsledky jasně ukazují, že třísky přírodní i tepelně modifikované mají vyšší podíl pórů ve srovnání s masivním dřevem, a proto výsledky závisí na tvaru vzorku. [36.]



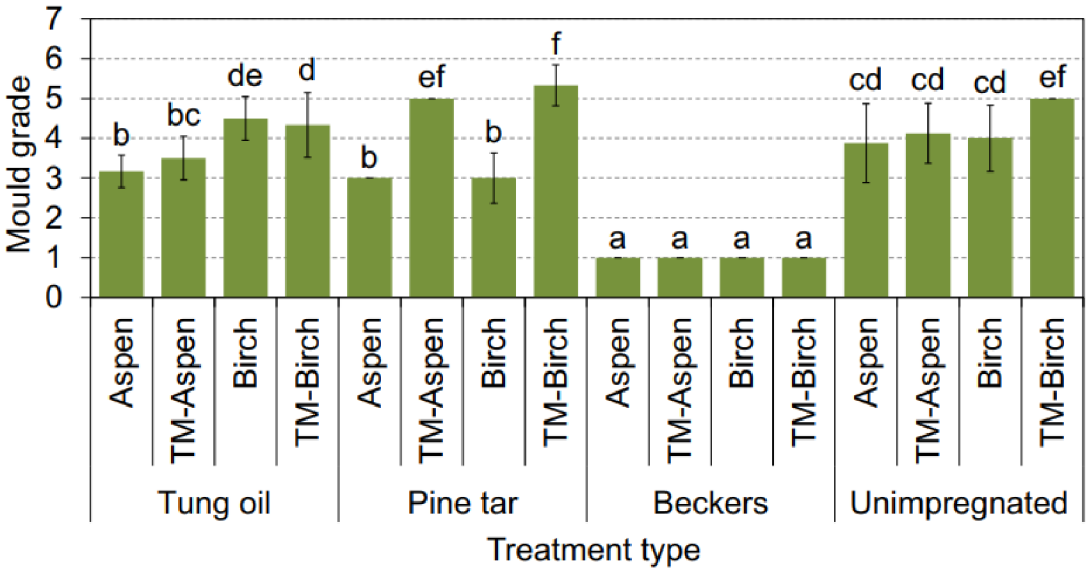
Obr. 7 - Změna membrány smrku v důsledku tepelné úpravy [36.]

Obr. 7 znázorňuje neporušenou ohraničenou membránu ze smrku na levé straně a degradovanou důsledkem tepelné úpravy na straně pravé. Je jasně vidět, že membrána získává větší póry v důsledku degradačních procesů oproti neošetřenému dřevu. [36.]

Běžné chemické prostředky na ochranu dřeva byly v některých aplikacích zakázány vzhledem k obsaženým toxickým látkám, které by mohly mít negativní vliv na lidi, zvířata a okolní prostředí. Problematikou zlepšení vlastností tepelně modifikovaného dřeva impregnací oleji se zabýval Sheikh a kol. Experimenty byly provedeny na dřevu osiky a břízy a byly impregnovány třemi různými oleji – vodou ředitelný olej (Beckers), borový dehet a tungový olej. Mezi sledované vlastnosti patřila vodoodpudivost, rozměrová stabilita a náchylnost k plísním. Z výsledků (viz Obr. 8) plyne, že impregnace tungovým olejem a borovicovým dehtem snížila jak rychlost, tak rozsah nasáknutí vodou a zlepšila tak rozměrovou stabilitu. Objem bobtnání na vzorky sledoval následující trend – neimpregnované dřevo > impregnované > tepelně upravené > impregnované s tepelnou úpravou. Tepelná úprava má znatelný vliv na pokles obsahu vlhkosti, kterou je možno ještě snížit impregnací. [16.]



Obr. 8 – Objemové bobtnání dřeva – (A) – osika, (B) – bříza, (TM) – tepelná úprava, (T) -tungový olej, (Ta) – borový dehet, (Bk) – Beckers, (C) – neimpregnované dřevo [16.]



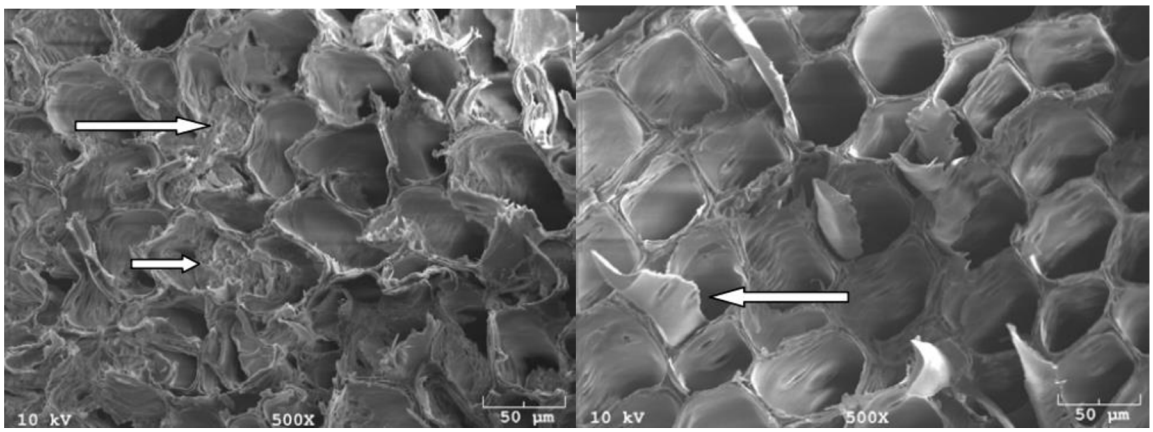
Obr. 9 – Test tvorby plísně [16.]

Naimpregnované dřevo tungovým olejem a borovým dehtem vykazovalo lepší vodoodpudivost a rozměrovou stabilitu, nicméně olej Beckers prokazoval lepší ochranu proti plísním ve srovnání s ostatními oleji. Z Obr. 9 je jasně vidět, že impregnace tungovým olejem a borovým dehtem nevykazovaly žádné inhibiční účinky a v některých případech spíše posílily růst plísní. Tepelná úprava také urychlila nebo neomezila vznik plísní. Vzhledem k nízké přirozené odolnosti proti plísním je důležité vybrat správnou impregnaci u míst se zvýšeným rizikem na vzniku plísní. [16.]

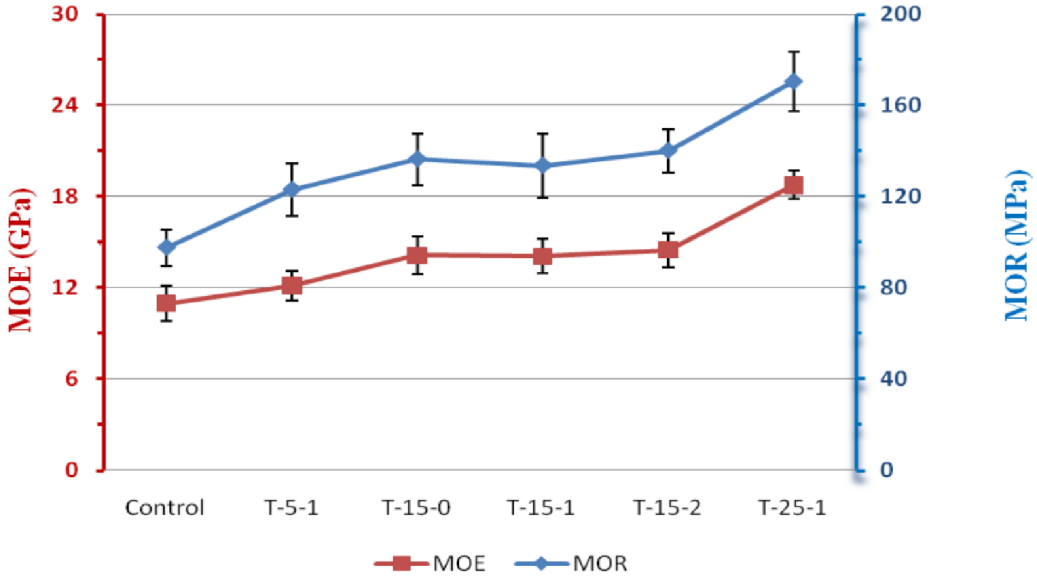
Účinky anorganického křemíku sodného neboli vodního skla jako mineralizační přísadu dřeva se zabýval Yucheng Peng a kol. Bylo prokázáno, že vodní sklo dokáže zlepšit fyzikální vlastnosti dřeva jako jsou rozměrová stabilita, tvrdost, odolnost proti rozkladu a požární odolnost. Nicméně, vysoká hygroskopicita má své nevýhody: zvýšená absorpce vody, snížení pevnosti v ohybu a vysoké chemické vyluhování.

Proces mineralizace probíhal na vysušeném dřevěné desce o parametrech 12,7×12,7×203 mm. Ta byla položena do tlakové nádoby, zalita roztokem po dobu 30 minut byl tlak snížen a poté opět zvýšen.

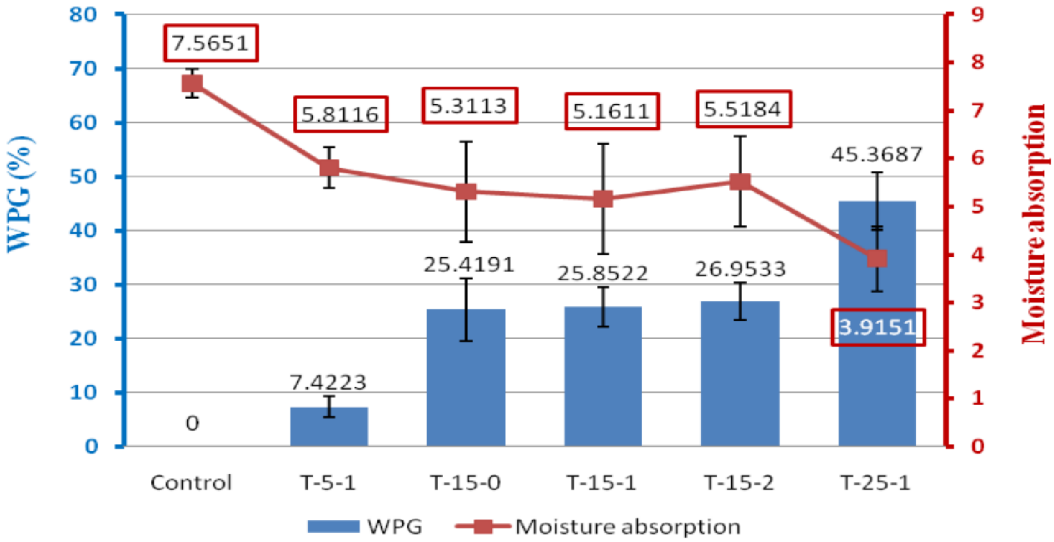
Z výsledků (viz Obr. 11 a Obr. 12) je zřejmé, že mechanické vlastnosti dřeva se zvětšily o 70 %. Mineralizace pomohla k snížení absorpce vlhkosti dřeva. Lomové plochy prozkoumané elektronovým mikroskopem ukazují známky křemičitanu v laminách buněk dřeva. Hmotnost při vysoké koncentraci vodního se zvětšila o 45 %. [35.]



Obr. 10 – SEM snímky dřeva stabilizovaného vodním sklem – detail vodního skla v buněčné struktuře borovice [35.]



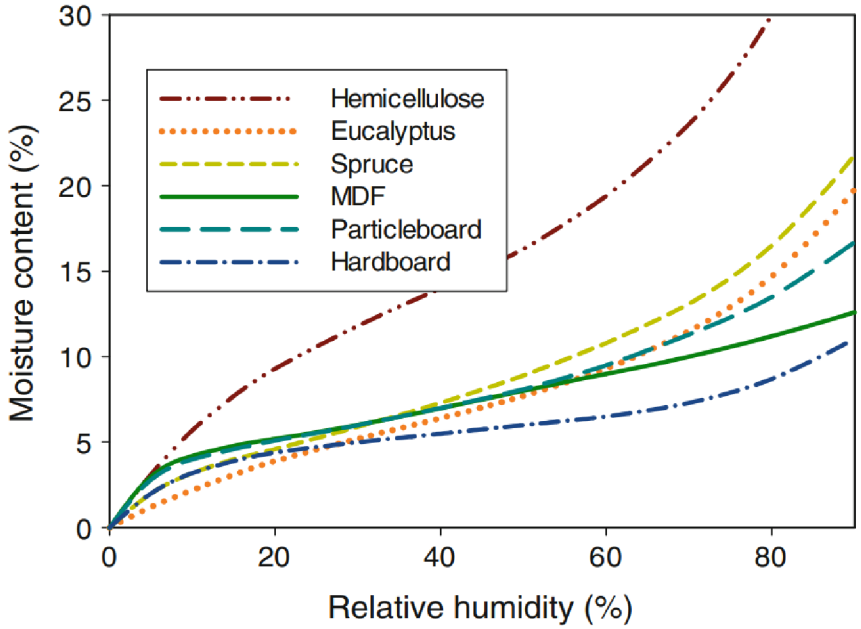
Obr. 11 – Modul pružnosti (MOE) a modul pevnosti (MOR) neimpregnovaného dřeva (control) a impregnovaného dřeva (v %) [35.]



Obr. 12 – Procentuální změna hmotnosti (WPG) a obsahu vlhkosti [35.]

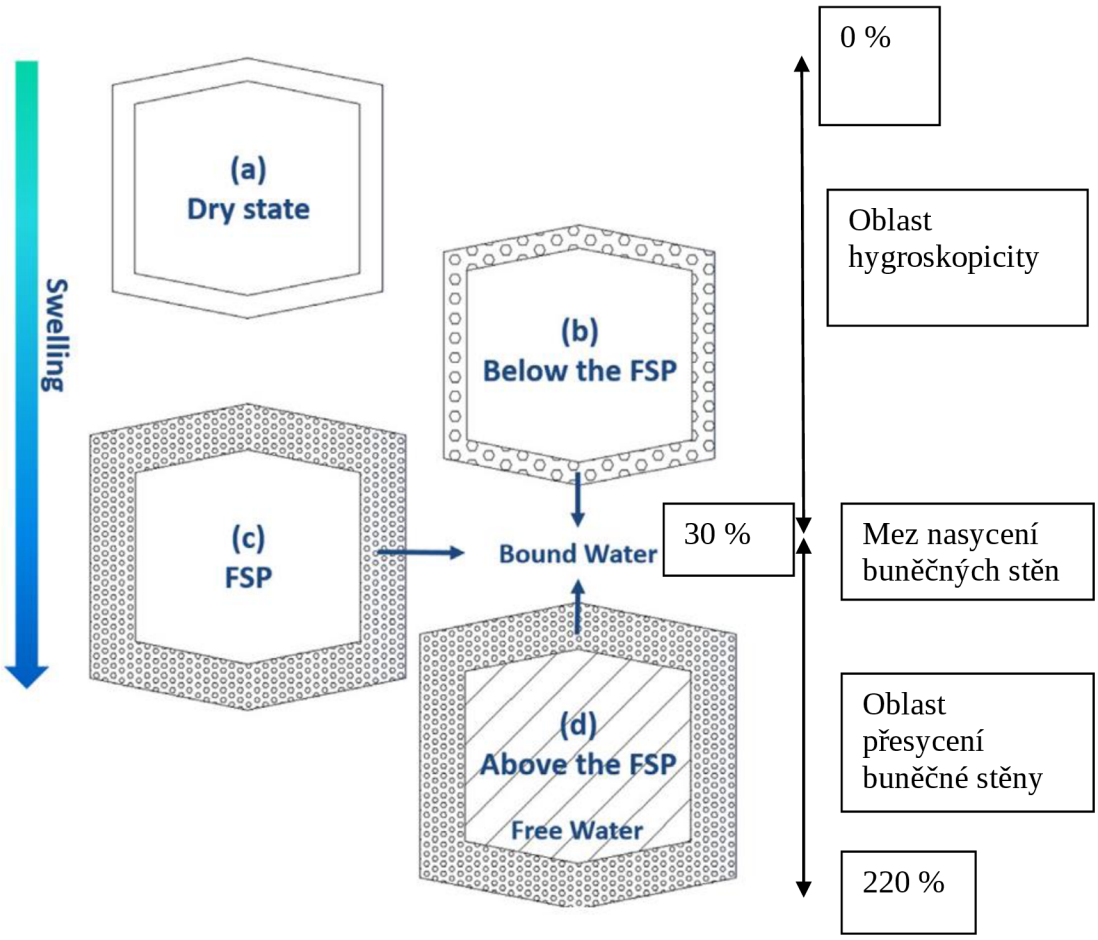
Vodní pára v atmosféře je všudypřítomná, klasifikovaná jako relativní vlhkost. Jak se relativní vlhkost mění, tak může docházet k přechodu z kapalné fáze na plynnou fázi. Při určité vlhkosti můžou částice absorbovat nebo desorbovat vodu, aby udržely rovnováhu obsahu vody s okolním prostředím, což se označuje jako hygroskopicita. [31.][32.]

Významnou vlastností dřeva je jeho vysoká citlivost na změny okolní vlhkosti. Podle druhu působení ji rozlišujeme na vzdušnou (hygroskopicita – relativní vlhkost z okolního vzduchu) a kapalnou (nasákavost – přímý kontakt s kapalinou – např. déšť). Hygroskopicita dřeva ovlivňuje rozměrovou stabilitu, mechanické vlastnosti, tepelné vlastnosti, hustotu, afinitu s jinými materiály a trvanlivost.

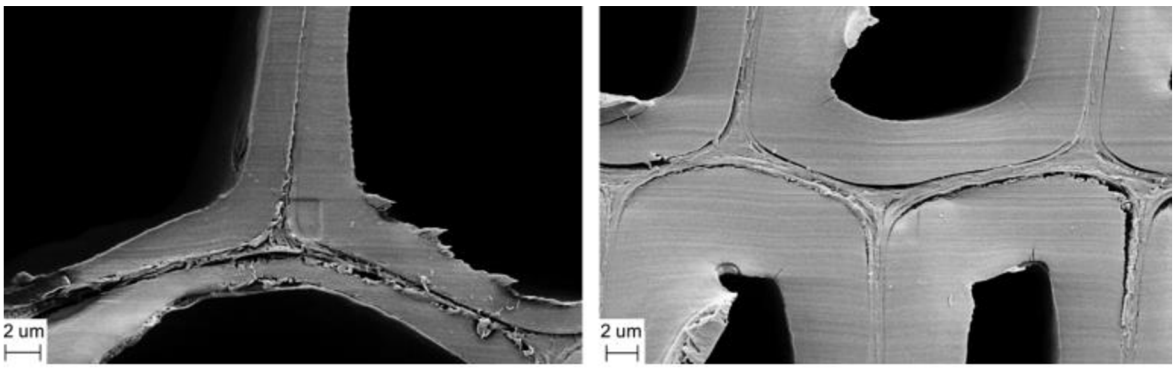


Obr. 13 – Sorpční izoterma vybraných dřevin a dřevotřískových desek [20.][21.][22.][23.][24.][25.][45.]

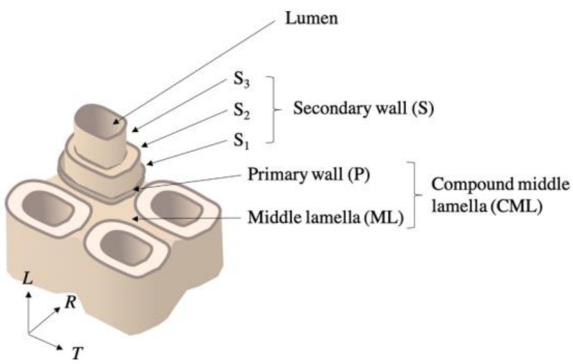
Struktura dřeva se skládá z buněk – vyznačuje se buněčnými stěnami a prázdnými lumeny. Při vysušeném stavu nemáme žádnou vodu ve struktuře. Při zvýšení vlhkosti se dostáváme do hydroskopické oblasti, kde je chování ovlivněno především přítomností amorfní celulózy a hemicelulózy, která přitahuje více vody a chemicky váže molekuly vody, díky dostupných sorpčních míst (-OH skupiny). V této oblasti se buněčné stěny plní až do bodu plného nasycení, kdy kapalina už není schopná se do buněčné stěny dostat (viz Obr. 14). Tato oblast se nazývá mez nasycení buněčných stěn (MNBS), udává se jako 30 % obsah vlhkosti. Zde dochází k největším objemovým a rozměrovým změnám. Po 30 % vlhkosti se dostáváme do oblasti přesycení buněčných stěn, kdy se voda volně ukládá do mezibuněčných částí, tj. lumenu. Zde nedochází k výrazným objemovým změnám, pouze k zvyšování hmotnosti. Pokud by se vlhkost snižovala, odebírala by se nejdřív voda volná z lumenu. [5.]



Obr. 14 – Detail meze nasycení buněčných stěn (MNBS) [5.]



Obr. 15 – Detail buněčné stěny dřeva letního dřeva (vlevo) a jarního (vpravo) [44.]



Obr. 16 – Složky ve dřevě: orientační systém [44.]

Tab. 5 – Přibližné podíly složek buněčné stěny [44.]

	Cellulose	Hemicellulose	Lignin
S wall	45%	35%	20%
CML	10%	25%	75%

Dřevo s nízkou hustotou se nazývá letní dřevo a s hustší se nazývá pozdní dřevo. V mikrospopickém hledisku lze dřevo považovat za příčně ortotropní, protože rozdíl ve vlastnostech mezi směrem R a T primárně závisí na distribuci buněk, zatímco ve směru L jsou vlastnosti oslišné vzhledem k úhlu celulézových fibrilách. [44.]

3.4.2. Cementotřískové desky

Vhodnou volbou složek do výsledných materiálů lze dosáhnout synergického efektu, kdy spojením složek dosáhneme lepší výsledné vlastnosti, než jsou vlastnosti samostatných složek v součtu. Proto je velice důležité, kromě zjištění fungování samotného dřeva a cementu, zjistit vlastnosti spolupůsobení cementotřískových desek a jejich vliv na vlhkost, zejména objemovou a rozměrovou stabilitu. Tyto materiály se označují jako kompozitní.

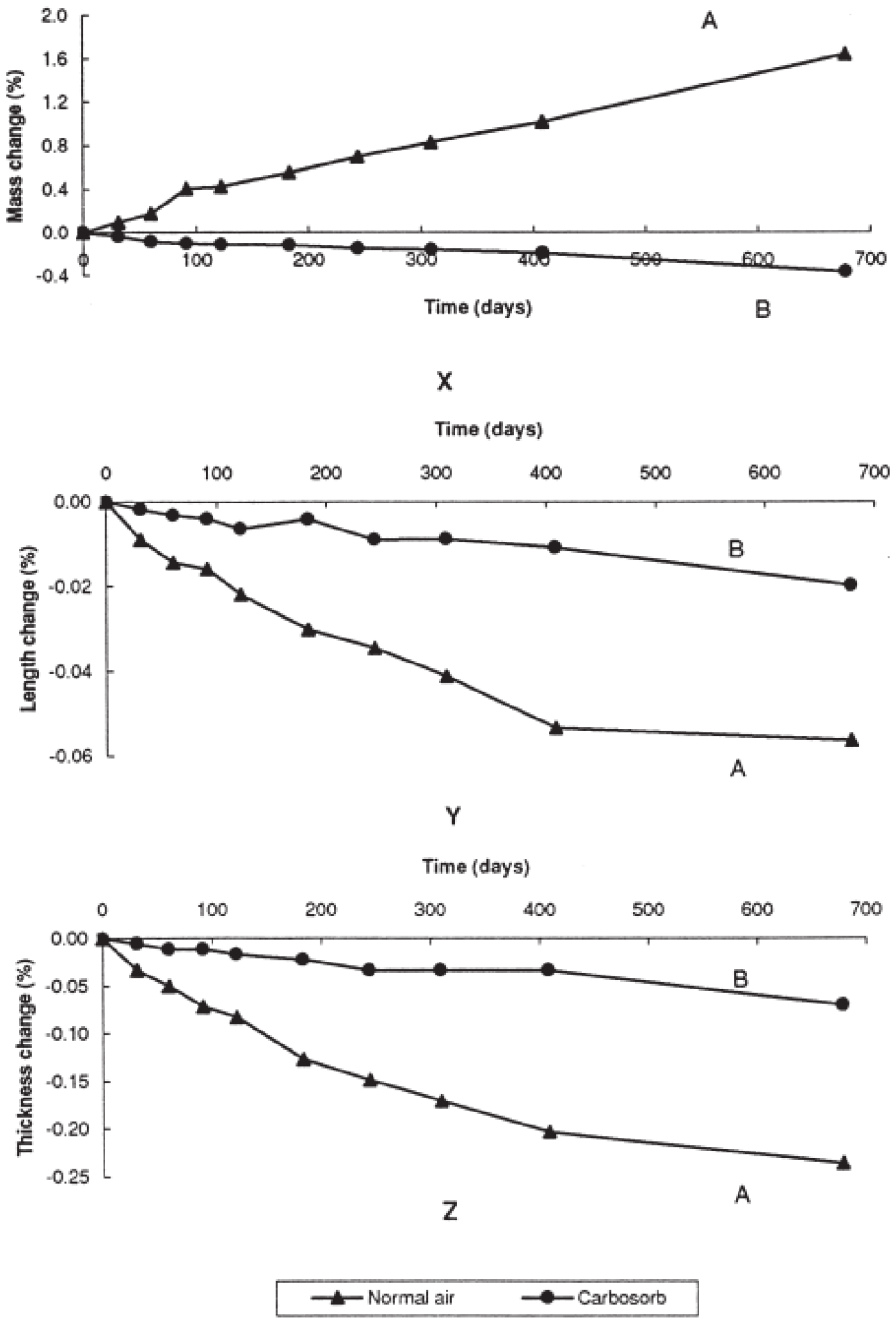
Jednou z příčin rozměrového pohybu cementotřískových desek je karbonatace. Mechanismus karbonatace se hlavně skládá z plynné difúze kombinované s chemickou reakcí. Tato reakce je interakce CO_2 ve vzduchu s $Ca(OH)_2$ vzniklého při hydrataci cementu.

Další příčinnou je degradace dřeva. Dřevěné třísky jsou obklopeny cementovou pastou, která je za přítomnosti vlhkosti vysoce alkalická. Tato látka je schopná odstranit velkou část extraktivních látek a rozpustit dřevěné složky, zejména hemicelulózu, což způsobí ztrátu hmoty a změnu rozměru. V důsledku toho se zhorší rozměrová stabilita u cementotřískových desek.

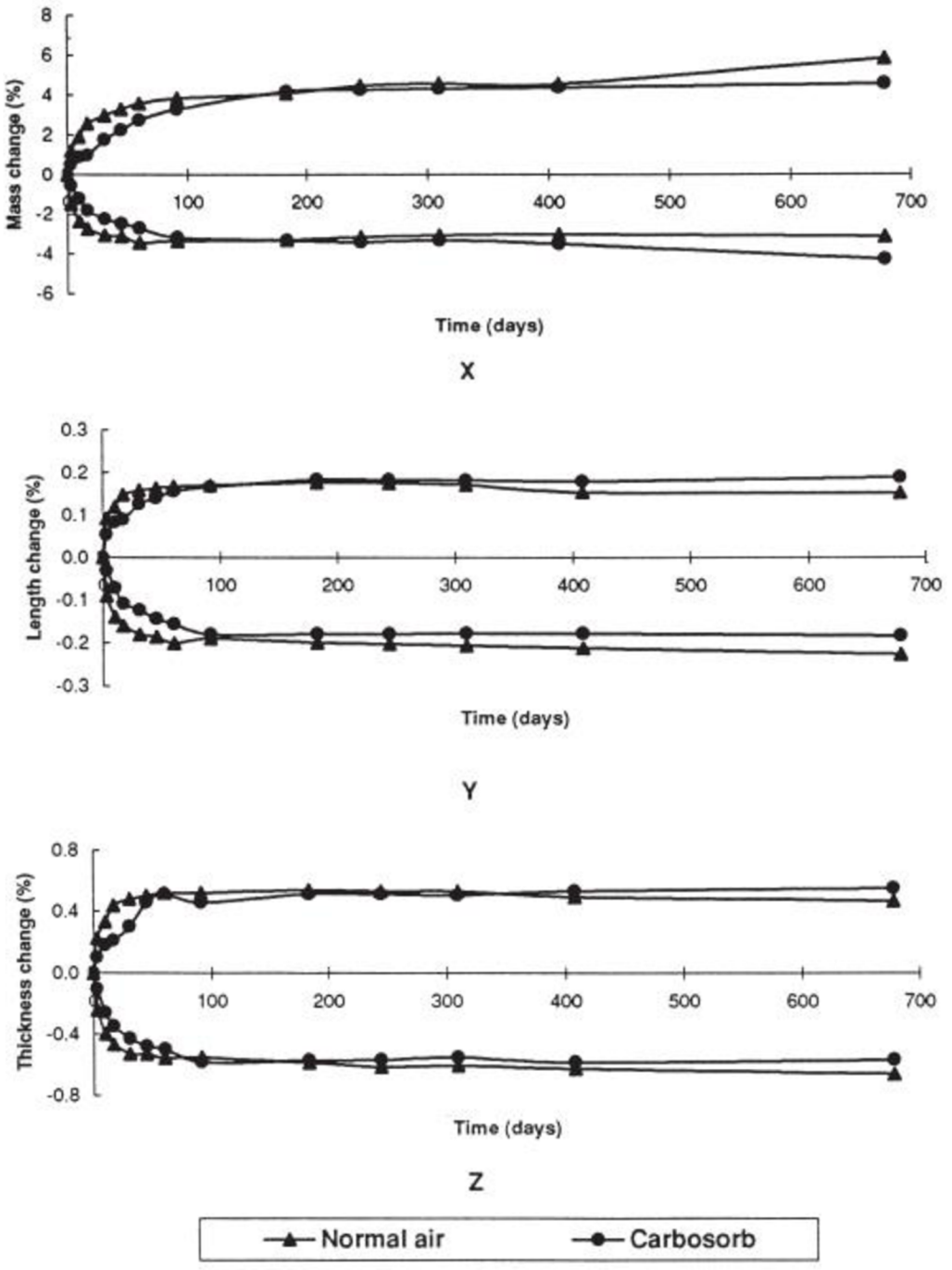
Asi nejdůležitější příčinou objemových změn dřeva je jeho nasycení vodou. Je důležité si uvědomit, že smrštění nebude probíhat vždy stejně, závisí to převážně na procentuálním obsahu vody ve dřevě. Při úplném nasycení bude rozměr největší, a postupně se bude snižovat s jeho vysušováním. Do relativní vlhkosti 40 % se vysušuje voda z pórů a rozměr dřeva změní minimálně. Jakmile se dostaneme pod 40 % vznikají v adsorbované vodě silné tangenciální síly, které způsobují smrštění dřeva. Tento proces je pravděpodobně zpomalen pod 10 % obsahu vlhkosti, z důvodu přítomnosti pouze malého množství vody. V tomto rozsahu vlhkosti odebírání další vody vede ke

spontánnímu uzavření mezer a dodatečnému smrštění, vlivem snížení vzdáleností mezi krystalovými vrstvami. Přiblížení 0 % obsahu vlhkosti, smrštění může být doprovázeno určitým rozkladem hydratovaných produktů cementové pasty v důsledku uvolnění a vypuzení chemicky vázané hydroxylové vody zevnitř krystalické mřížky. [17.]

Problematikou působení karbonatace se zabýval Fan a kol. [17.], kde vystavili cementotřískové desky působení běžné atmosféry a atmosféry bez CO_2. Jejich výsledky u cementotřískových desek při 65 % vlhkosti prokázaly přítomnost karbonatace, ale i příspěvek CO_2 a vliv vlhkosti (viz Obr. 17). Obr. 18 představuje hmotnostní a rozměrové změny cementotřískových desek při změně vlhkosti z 90 na 35 % vlhkosti a od 35 % na 90 % vlhkosti. Z výsledků lze odvodit, že efekt karbonatace má mnohem menší vliv na materiál vystavený periodickému opětovnému smáčení. To je dáno tím, že karbonatace je doprovázena uvolňováním vody a časem potřebným k extrakci vody sušením. Tento výsledek byl pozorován i Schubertem [38.] a Meyera [39.], který dospěl k závěru, že opětovné smáčení snížilo karbonataci kvůli nižší rychlosti difúze oxidu uhličitého skrz částečně nasycené póry matrice cementové pasty.



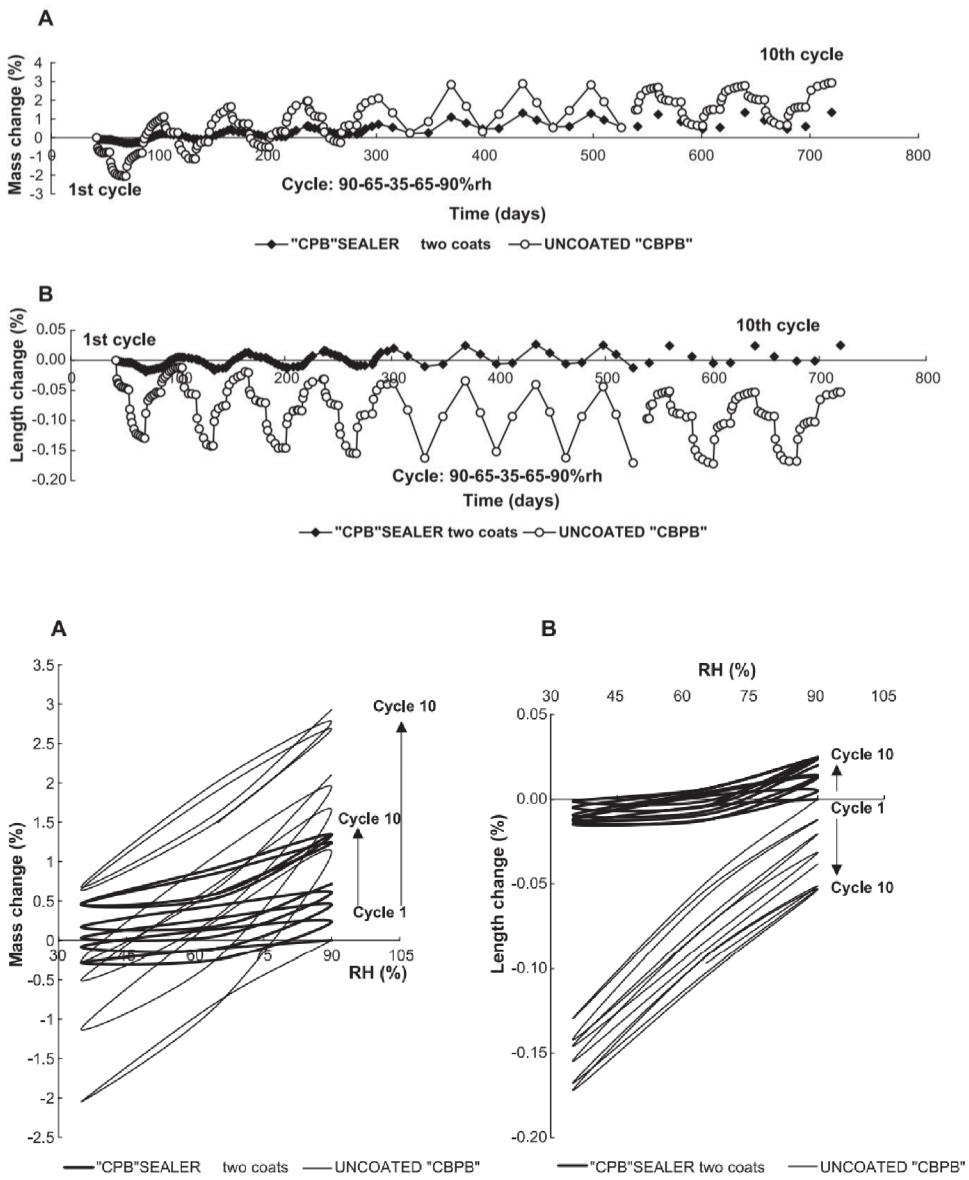
Obr. 17 – Změna hmotnosti, délky a tloušťky cementotřískových desek prostředí běžné atmosféry a atmosféry bez CO_2 za konstrantní vlhkosti 65 % [17.]



Obr. 18 – Změny hmotnosti, délky, a tloušťky cementotřískových desek v prostředí běžné atmosféry a atmosféry bez CO_2 za střídající se relativní vlhkosti od 35 od 90 % [17.]

Problematika objemových, délkových a hmotnostních změn nezávisí pouze na materiálu, ale také na prostředí, ve kterém se deska využívá. Je známo, že cementotřískové desky se využívají pro konstrukce přímo vystavené povětrnosti, kde dochází ke změně relativní vlhkosti. Toto prostředí bude působit na cementotřískové desky opakovanou změnou vlhkosti. Tento efekt rozměrové nestability se dá snížit u cementotřískových desek především třemi způsoby. (1) Modifikace dřevěných třísek za účelem snížení hygroskopicity. (2) Modifikace cementové pasty za účelem snížení propustnosti. (3) Aplikace povrchových nátěrů k zabránění vniknutí vlhkosti do materiálu. [1.]

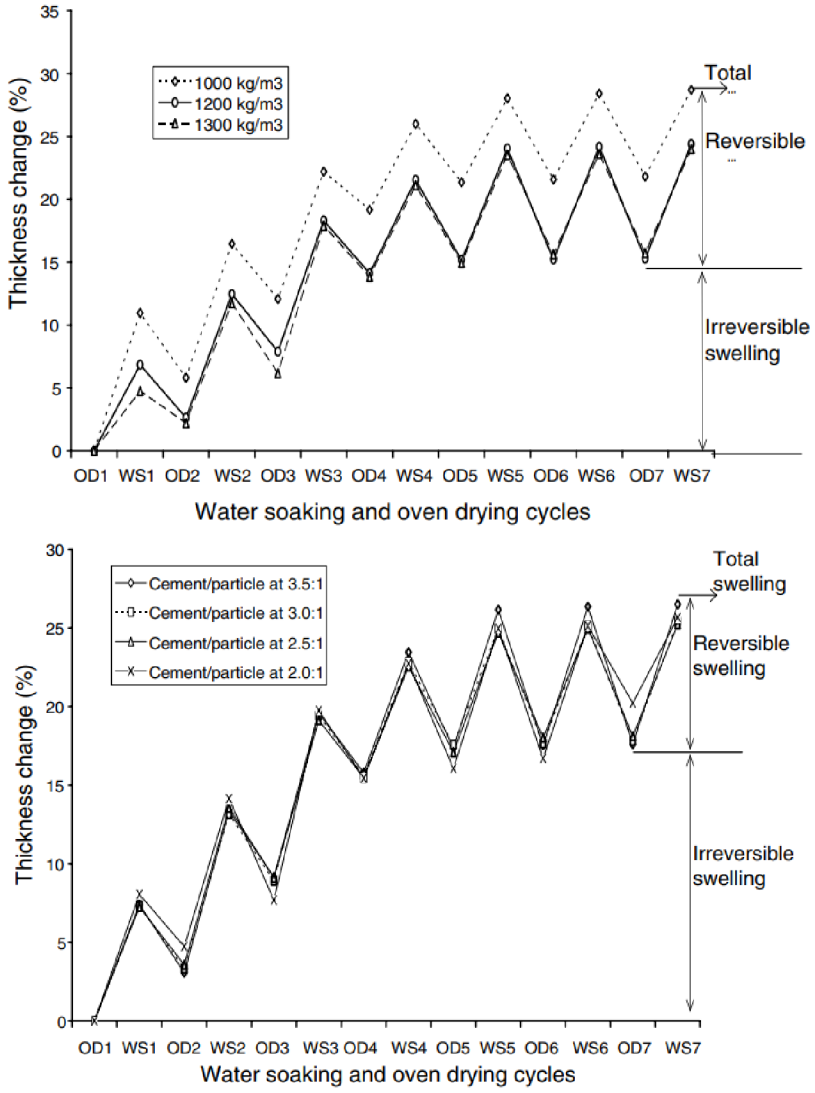
Fan a kol. [1.] se zabývali problematikou rozměrových změn u cementotřískových desek působením cyklické relativní vlhkosti na desky s nátěrem a bez nátěru. Nátěry se v minulosti používaly k ochraně proti fyzickému poškození, ale také měly vizuální efekt. Vzhledem k chemickým a fyzickým vlastnostem cementotřískových desek se vylučuje použití určitých nátěrů. Povrch je velice alkalický a může nepříznivě ovlivnit a reagovat s různými nátěry. Na povrchu cementotřískových desek je velké množství miniaturních pórů, které vždy obsahuje určitý stupeň vlhkosti a mohou způsobit bublinky a dírkování u naneseného nátěru v důsledku expanze. Povrch vykazuje relativně nízkou pevnost v tahu oproti ocelovým a masivním dřevům, což může způsobit praskání. Cementotřískové desky jsou ovlivněny rozměrovými změnami, a proto musí být nátěr dostatečně roztažitelný, odolný vůči vysoké alkalitě a odolný vůči vodní páře a CO_2. [1.]



Obr. 19 - Změna hmotnosti a délky cementotřískových desek s nátěrem a bez nátěru vystavených cyklickým změnám relativní vlhkosti [1.][45.]

Z výsledků (viz Obr. 19) je jasně vidět, že použití nátěru mělo pozitivní efekt na snížení hmotnostních a délkových změn cementotřískových desek. Postupně docházelo k nezvratným změnám jak při hmotnosti, tak změně délce desky. Tento efekt byl snížen aplikováním nátěru.

Autoři Fewape a kol. [40.] se zabírali využitím sběrového papíru a pilin jako náhrady dřeva. Množství vyprodukovaného odpadního papíru v poslední době vzrostla obzvlášť v rozvojových zemích a má vliv na globální oteplování. Využití těchto odpadů bude mít pozitivní vliv na enviromentální systém a pozitivně přispěje k ekonomickému růstu.



Obr. 20 – Změna tloušťky v cyklech cementotřískových desek pro tři různé hustoty a čtyři směšovací poměry *[40.]*

Z Obr. 20 lze pozorovat procentuální změny tlouštěk (bobtnání a smrštění) během cyklického namáčení vodou a sušení. Je zřejmé, že jsou zde dvě složky bobtnání: vratné a nevratné. Hlavním důvodem agresivního nárůstu bobtnání při počátečních cyklech (1. až 5. cyklus) by mohlo být vysvětleno odlepováním cementu a částic (vláken) v důsledku smršťování vláken během sušení. Nevratná tloušťka bobtnání dřevěných kompozitu byla primárně odvozena jako uvolnění zbytkových (elastických) tlakových napětí uvnitř dřevěné struktury vzniklé během lisování. [40.]

3.5. Zhodnocení teoretických poznatků z dostupných zdrojů

Téma změn vlastností v souvislosti s proměnlivou relativní vlhkostí okolí v případě materiálů kombinujících cementovou matrici a organické plnivo je analyzována a studována v globálním měřítku, což potvrzuje výše uvedený souhrn teoretických poznatků. Byly a jsou zkoumány různé varianty úpravy dřeva či drobnějších dřevěných částic za účelem stabilizace buněčné struktury dřeva tak, aby byla zajištěna optimální míra synergie dvou na první pohled nekompatibilních složek kompozitního materiálového systému (tj. cementové matrice a dřeva). Mnoho alternativ bylo již prozkoumáno a úspěšně vyřešeno. Nicméně podrobným průzkumem lze také poukázat na nedostatky, které plynou zejména z neustálého vývoje a hledání nových alternativ v souvislosti se zlepšením environmentální situace či zvýšením konkurenceschopnosti daného producenta na trhu. Příkladem toho je např. vznik vedlejších produktů při výrobě cementotřískových desek, které prozatím nenalézají dalšího uplatnění a výhodou by bylo jejich opětovné využití právě při výrobě těchto desek (v upravené formě). Použití těchto alternativních složek bude mít nutně vliv na finální vlastnosti, což souvisí i se stabilizací primárních smrkových třísek a tím i chování desek za proměnlivé vlhkosti. Ani škvára a vápenec nebyly testovány (jinými autory) z hlediska vlivu na hygroskopicitu cementotřískových desek, které tyto alternativní složky obsahují. Nebylo zjištěno, že by se vědecké týmy zabývaly touto problematikou. Proto lze shledat studium chování cementotřískových desek, jejichž složení bylo modifikováno výše zmíněnými alternativními surovinami, z hlediska hygroskopicity jako opodstatněné a potřebné v oboru stavebních materiálů.

4. Experimentální část

V návaznosti na teoretickou část a zadání mojí diplomové práce byla primárně pozornost zaměřena na posuzování změn vlastností z hlediska hygroskopicity. Testování byly podrobeny desky s obsahem alternativních surovin zahrnujících mimo jiné i vedlejší produkty vznikající při výrobě cementotřískových desek. Vzhledem k typu provedení diplomové práce je důležité podotknout, že byla inspirovaná technickou normou ČSN EN 318 – Desky ze dřeva – Stanovení rozměrových změn v závislosti na změnách relativní vlhkosti vzduchu a doplněna o hraniční body měřených relativních vlhkostí. Kromě toho byla stanovena i hmotnost vzorků, kterou tato norma nepopisuje, ale je důležitou vlastností pro porozumění chování cementotřískových desek. Pozornost je věnována také fyzikálně-mechanickým vlastnostem a mikrostruktuře.

4.1. Metodika

Sled a postup jednotlivých experimentů byl navržen tak, aby bylo možné objektivně posoudit a zhodnotit změny vlastností cementotřískových desek modifikovaného složení během výkyvů relativní vlhkosti vzduchu prostředí, jíž jsou tyto desky vystaveny.

S ohledem na řešení diplomové práce lze experimentální část rozdělit do několika etap a to konkrétně:

- výběr a příprava vhodných alternativních složek pro úpravu složení cementotřískových desek;
- výroba cementotřískových desek, resp. zkušebních těles;
- návrh tepelně-vlhkostních podmínek a příprava zkušebních těles;
- testování hygroskopicity desek;
- ověření základních parametrů (pevnostní charakteristiky, modul pružnosti atd.) před a po vystavení desek proměnné vlhkosti okolí;
- analýza mikrostruktury vybraných variant navržených desek;
- zhodnocení výsledků a poznatků, doporučení pro navazující výzkum.

4.2. Alternativní složky, receptury

Na základě dosavadních výsledků a zjištění [6.], [9.], [46.] až [48.] bylo vybráno několik typů alternativních složek nahrazujících v deskách jak cement, tak smrkové třísky. Tyto suroviny pro zatím nejsou používány při výrobě cementotřískových desek a většina

z nich představuje odpad bez dalšího využití, čímž zatěžují životní prostředí. Konkrétně se jednalo o následující:

- teplárenská škvára (z lokality Oslavany), která byla pomleta v kulovém mlýnu na měrný povrch cca 500 m^2/kg, podrobné parametry této škváry jsou uvedeny v publikaci [46.];
- jemně mletý vápenec (Kotouč Štramberk) o měrném povrchu cca 570 m^2/kg, podrobné parametry této suroviny jsou uvedeny v publikaci [46.];
- prach o velikosti zrna max. 1 mm, který vzniká jako vedlejší produkt při opracování cementotřískových desek a je zachytáván do zásobníků přímo v lokalitě výrobní linky těchto desek, podrobné parametry této suroviny jsou uvedeny v publikaci [47.];
- druhotné třísky o velikosti 0,5 až 2 mm, které byly získány drcením a separace kusových odřezků, které vznikají jako vedlejší produkt při formátování cementotřískových desek, podrobné parametry této suroviny jsou uvedeny v publikaci [48.].

Jak plyne tedy z výše uvedeného, úprava vlastností byla provedena v případě teplárenské škváry a druhotných třísek, kdežto jemně mletý vápenec a prach z opracování cementotřískových desek je možné aplikovat ve stávajícím stavu.

Výchozí receptura cementotřískových desek (viz Obr. 1) byla modifikována výše uvedenými surovinami, kdy bylo navrženo celkem 6 variant materiálového složení:

- Receptura Po – standardní referenční receptura na bázi portlandského cementu pevnostní třídy 42,5;
- Receptura Sm – receptura na bázi směsného cementu (struskoportlandský) pevnostní třídy 42,5;
- Receptura Sm/Šk – receptura na bázi směsného cementu (struskoportlandský) pevnostní třídy 42,5 a jemně mleté teplárenské škváry (10% náhrada cementu);
- Receptura Sm/Va – receptura na bázi směsného cementu (struskoportlandský) pevnostní třídy 42,5 a jemně mletého vápence (10% náhrada cementu);
- Receptura Sm/Pr – receptura na bázi směsného cementu (struskoportlandský) pevnostní třídy 42,5 a prachu vznikajícího při opracování cementotřískových desek (6% náhrada cementu a 1% náhrada smrkových třísek);

- Receptura Sm/Tř – receptura na bázi směsného cementu (struskoportlandský) pevnostní třídy 42,5 a druhotných smrkových třísek z drcení odřezků vznikajících při formátování cementotřískových desek (7% náhrada primárních smrkových třísek).

4.3. Výroba desek a zkušebních těles

Cementotřískové desky pro experimenty byly vyrobeny v závodu spol. CIDEM Hranice, a.s. Alternativní suroviny byly během výroby desek přidávány přímo do míchačky ručně. Ostatní primární suroviny jsou dávkovány automatizovaně – výpočetní technikou řízené navažování (s poměrně vysokou přesností). S ohledem na délku výrobní linky v Hranicích, může při změně receptury (výrobní směsi) docházet k plynulé úpravě složení cementotřískových desek, než je docíleno požadované konstantní složení směsi. Toto je samozřejmě nežádoucí. Proto objem směsi pro výrobu každé receptury cementotřískových desek činil cca 11 m^3. Tímto postupem bylo možné získat konstantní vlastnosti vyrobených desek od požadované receptury. Z vyrobených desek byla dále na výrobní lince naformátována zkušební tělesa požadovaných rozměrů dle požadavku relevantních technických norem.

Obr. 21 : Mísící zařízení výrobní linky CIDEM Hranice, a.s. s připraveným jemně mletým vápencem

Obr. 22 : Dávkování jemně mletého vápence do výrobní směsi cementotřískových desek

Obr. 23 : Dávkování primárních třísek do výrobní směsi cementotřískových desek

Obr. 24 : Druhotné třísky získané z drcení odřezků připravené před dávkováním do směsi pro výrobu cementotřískových desek

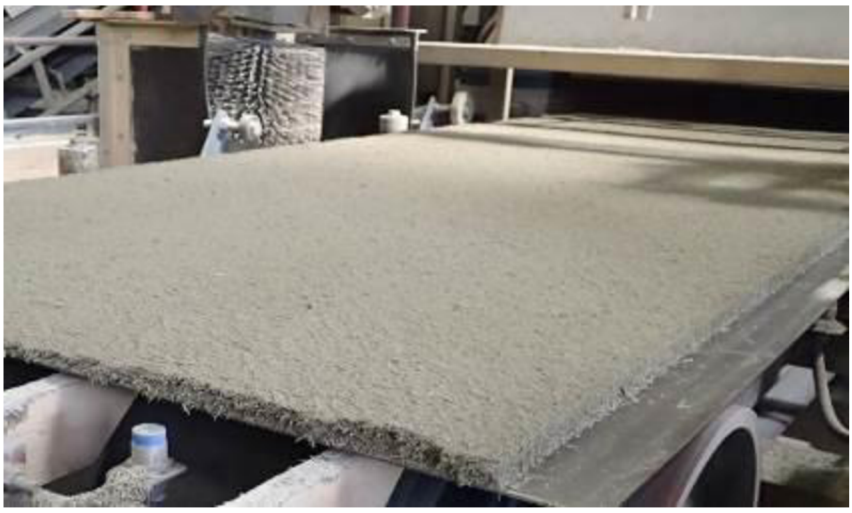
Obr. 25 : Jemně mletá teplárenská škvára připravená před dávkováním do směsi pro výrobu cementotřískových desek

Obr. 26 : Dávkování jemně mleté teplárenské škváry do výrobní směsi cementotřískových desek

Obr. 27 : Dávkování prachu V2 do výrobní směsi cementotřískových desek

Obr. 28 Homogenizace třísek v mísicím zařízení pro výrobu desek

Obr. 29 : Čerstvá navrstvená směs na výrobní lince před lisováním a proteplováním



Obr. 30 : Detail na vrstvené směsi modifikované receptury cementotřískových desek

Obr. 31 : Navrstvené jednotlivé desky (modifikované receptury) v průběhu lisování

Obr. 32 : Slisované desky umístěné v propařovací komoře (před 1. fází proteplování)

Po zhotovení zkušebních těles byla tato dopravena do laboratoří VUT FAST THD, kde byla před testováním uložena v prostředí o relativní vlhkosti 75 % a laboratorní teplotě, cca 22 °C.

Obr. 33 : Uložení těles před testováním – prostředí o relativní vlhkosti 75 %

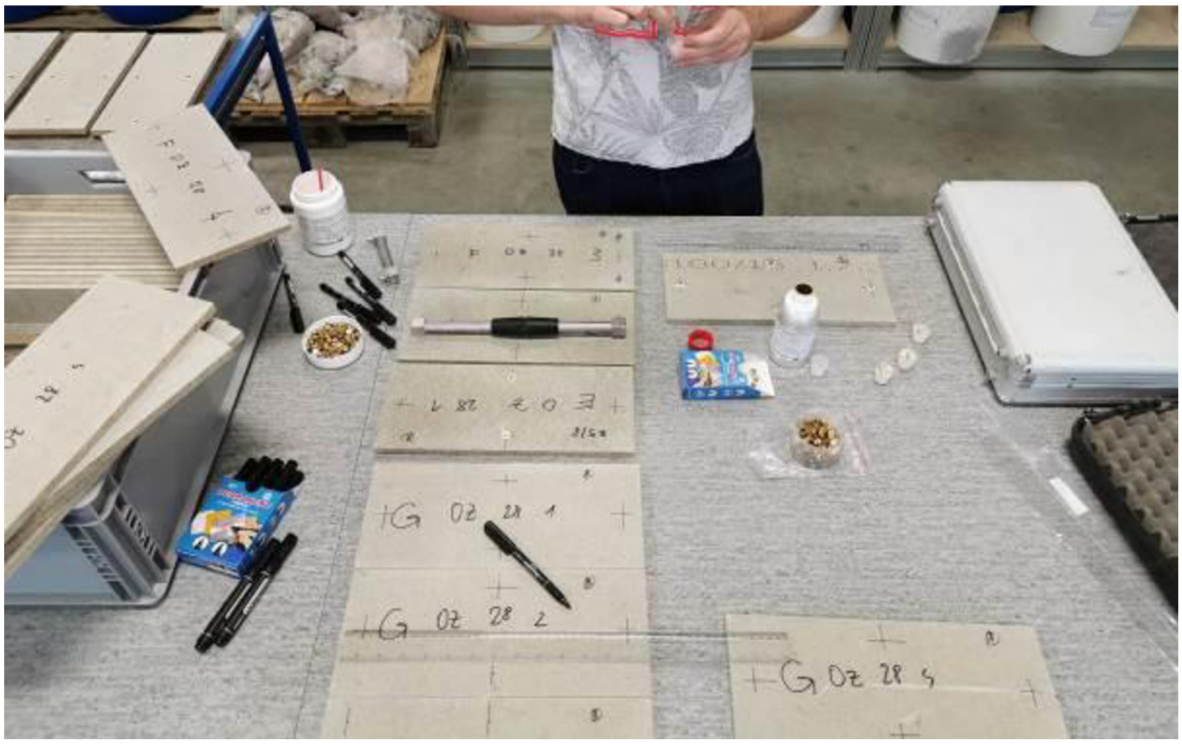
4.4. Podmínky expozice a příprava zkušebních těles

Dřevěné třísky obsažené v cementotřískové matrici mají hygroskopické vlastnosti, to znamená, že pohlcují vlhkost z okolního prostředí. Jelikož je cementotřísková deska z 63 % objemu složená ze dřeva, má na ni tato vlastnost velký vliv. Změny relativní vlhkosti tak u cementotřískových desek vyvozují jejich objemové a hmotnostní změny. Obecně tuto problematiku popisuje norma ČSN EN 13009. Rovnovážná vlhkost deskových výrobků závisí na průběhu změn vlhkosti. Při desorpci se při stejné relativní vlhkosti vzduchu ustaví vyšší rovnovážná vlhkost než při adsorpci; tento jev se nazývá hystereze [18.].

Postup provádění zkoušky zkušebních těles byl inspirován normou ČSN EN 318, kde se rozměrová změna stanoví jak při adsorpci mezi 65 % a 85 % relativní vlhkosti vzduchu, tak i při desorpci mezi 65 % a 30 % relativní vlhkosti vzduchu [18.]. Tato škála rozhraní byla upravena a rozšířena od vysušení vzorku za teploty 40 °C v sušárně (Memmert UF750) do maximální saturace vlhkosti v komoře s možností nastavení požadované relativní vlhkosti a teploty (CTS C-20/350), a to v intervalech, které se měnily po 10 % relativní vlhkosti. Konkrétně průběžným měřením v bodech 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 % a 96 %, které vytvoří absorpční křivku a pak následnému snížení z 96 %, 90 %, 80 %, 70 %, 60 %, 50 %, 40 %, 30 %, 20 % 10 % na 0 %, které vytvoří desorpční křivku. Pro každé z uvedených podmínek muselo být před měřením dosaženo ustálené hmotnosti zkušebních těles. Těleso o ustálené, tj. konstantní hmotnosti je charakterizováno stavem, kdy se výsledky dvou po sobě následujících vážení v intervalu 24 h neliší o více jak 0,1 % hmotnosti [18.].

Dle normy jsou požadována zkušební tělesa o rozměrech (300 ± 2) mm × (50 ± 2) mm × t. Postup pro realizaci experimentů v rámci řešení projektu byl upraven tak, že byla použita zkušební tělesa svým formátem lépe charakterizující reálně používané cementotřískové desky ve stavebních konstrukcích a dále pak i z hlediska podrobnější analýzy sorpčních křivek. Konkrétně byly použity desky o rozměrech 350 mm × 150 mm × 12 mm (podélný směr × příčný směr × tloušťka; značení směrů se shoduje s vyhodnocením, viz kap. 5.4.5). Podélný směr (tj. délka) se shoduje se směrem výroby desek.

Měření objemových změn bylo provedeno pomocí mosazných terčů s kuželovými otvory pro umístění hrotů dilatometru. Terče na cementotřískovou desku byly fixovány lepidlem Sikadur CF31 Rapid na obě strany desky (strana A i B). Vzdálenost ve směru délky byla 300 mm a vzdálenost ve směru šířky byla 100 mm. Přesnost měření byla 0,001 mm. Kromě měření dilatometrem bylo provedeno i měření posuvným měřítkem (délka šířka) a mikrometrem (tloušťka). Měření hmotností bylo provedeno na váze podle normy EN 322 s přesností 0,01 g.



Obr. 34 : Příprava zkušebních těles pro testování objemových změn vlivem kolísání vzdušné vlhkosti

Obr. 35 : Zkušební tělesa cementotřískových desek modifikovaného složení (matrice i plnivo) v sušárně – sušení do konstantní hmotnosti při 40 °C před testováním vlivu hygroskopicity v souvislosti s objemovými a hmotnostními změnami

Od každé receptury desek byla zhotovena sada čtyř zkušebních těles – 4 tělesa pro každý sledovaný parametr, tj. hygroskopicita, pevnost v ohybu a pevnost v tahu kolmo na rovinu desky.

4.5. Testování hygroskopicity desek

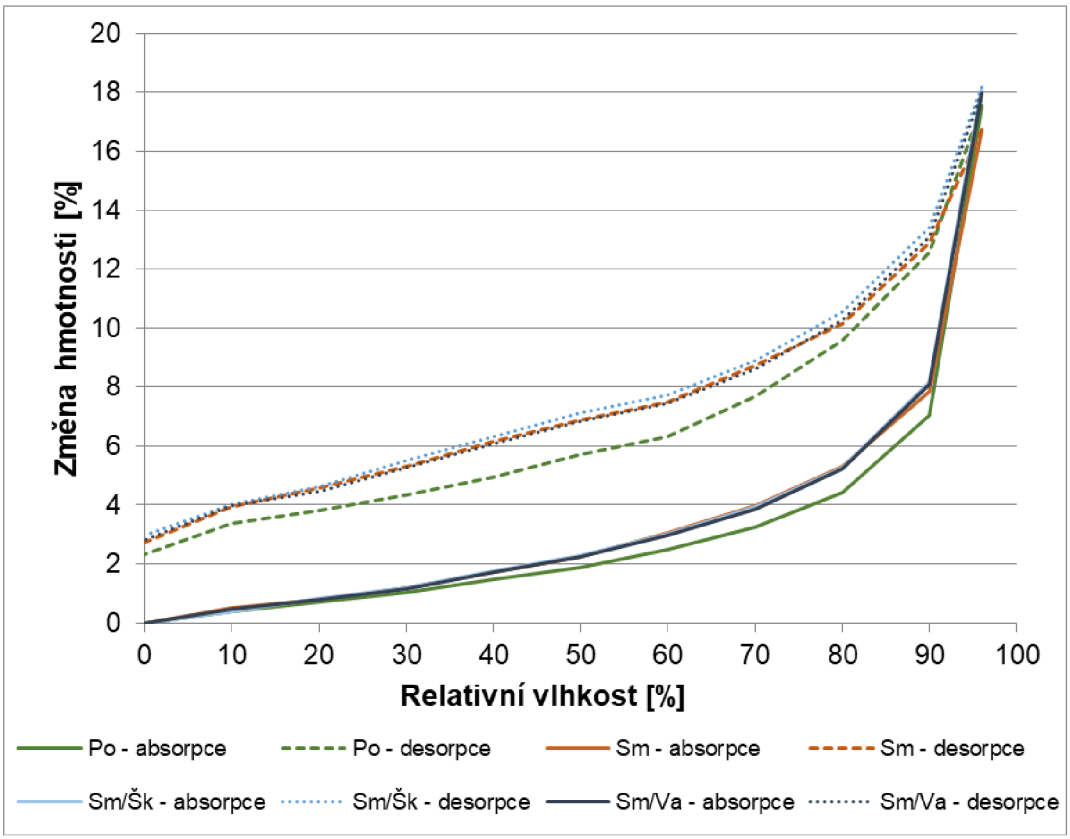
Sestavení sorpčních a desorpčních křivek bylo realizováno na tělesech o rozměrech 350×150×12 mm. Ustálení hmotnosti zkušebních těles desek při každé relativní vlhkosti vyžadovalo odlišnou dobu, což je zaznamenáno v následující tabulce (viz Tab. 6). Po ustálení hmotnosti vždy proběhlo stanovení hmotnosti, rozměrů (délka, šířka, tloušťka), objemu a vzdáleností terčů (vzdálenost 300 mm a 100 mm). Sorpční křivky byly pak stanoveny pro každý sledovaný parametr, což je pak uvedeno v následujících grafech (viz Obr. 37 až Obr. 50). Pro přehlednost je vždy vyhodnocení daného parametru rozděleno do dvou grafů, kdy každý z příslušných grafů dané dvojice obsahuje receptury standardně vyráběné, tj. Po a Sm a k nim pak dvojici desek modifikovaného složení, tj. Sm/Šk a Sm/Va, resp. Sm/Pr a Sm/Tř.

Tab. 6 : Záznam doby potřebné pro ustálení hmotnosti zkušebních těles během testování hygroskopicity desek

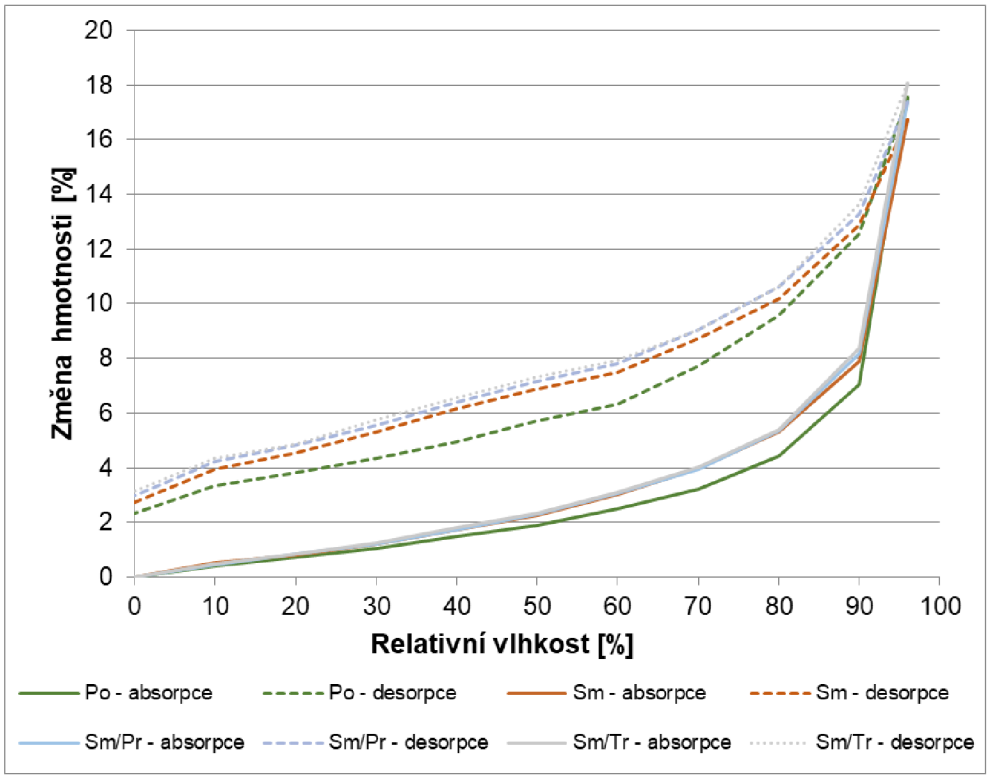
Absorpce		Desorpce	
Relativní vlhkost [%]	Ustálení hmotnosti [den]	Relativní vlhkost [%]	Ustálení hmotnosti [den]
0	6	90	14
10	3	80	10
20	3	70	8
30	4	60	6
40	5	50	6
50	6	40	5
60	6	30	4
70	8	20	4
80	10	10	3
90	14	0	6
96	24	Celkem	155

Obr. 36 : Deska modifikovaného složení (matrice) v průběhu analyzování objemových a hmotnostních změn vlivem rostoucí relativní vlhkosti okolí při teplotě cca 22 °C

Vlivem změn relativní vlhkosti vzduchu došlo k absorpci a desorpci, kdy v případě parametru hmotnosti byly zaznamenány nejvýraznější změny, tj. až přibližně 18 %. Výsledky poukazují na skutečnost, že vliv složení není z hlediska hygroskopicity zanedbatelný. Nejlépe je možné hodnotit desky Po, tj. referenční na bázi portlandského cementu. Naopak nejvýrazněji se proměnlivá relativní vlhkost projevila změnou hmotnosti u desek obsahujících teplárenskou škváru a prach z obracování desek (Sm/Šk a Sm/Pr). Rozdíly mezi jednotlivými recepturami se v tomto případě pohybují do 2 %. Z grafů (viz Obr. 37 a Obr. 38) je také patrné, že k nejvyššímu nárůstu hmotnosti došlo při relativní vlhkosti 80 % a více. Trendy sorpčních křivek jsou podobné, ale lze si všimnout rozdílů, což je charakterizováno hysterezí, kdy určité množství vody se ze vzdušné vlhkosti do struktury cementotřískových desek naváže (v rozmezí 2,3 % až 3,1 %) a ani při vysušení tato vlhkost není odbourána.

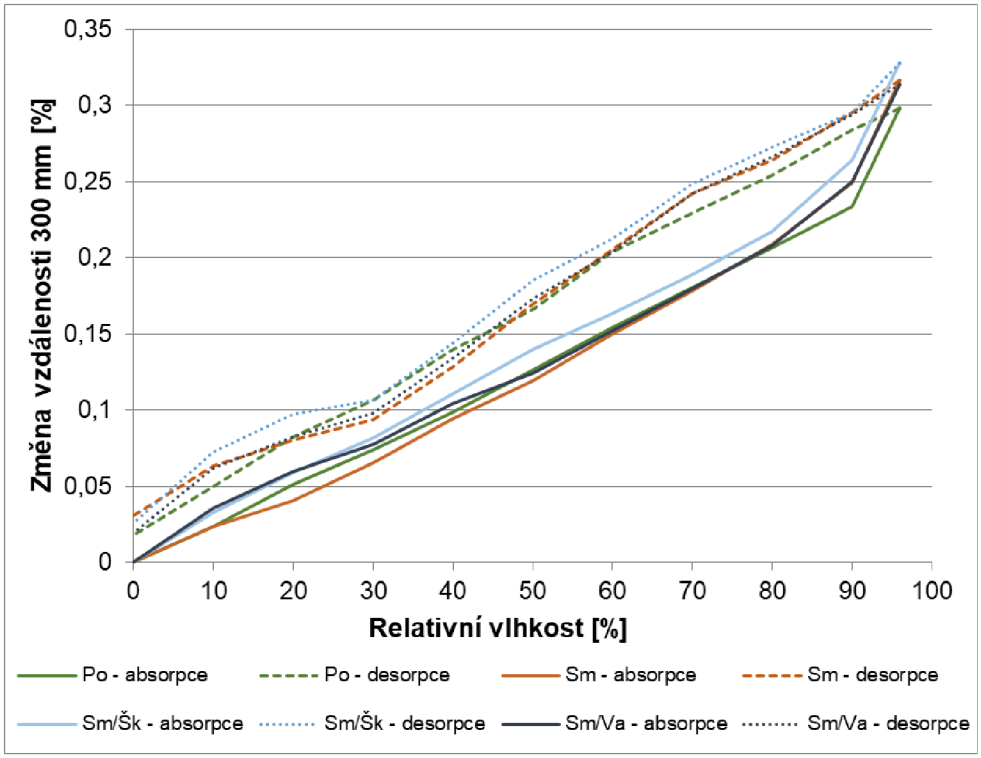


Obr. 37 : Sorpční křivky – změny hmotnosti



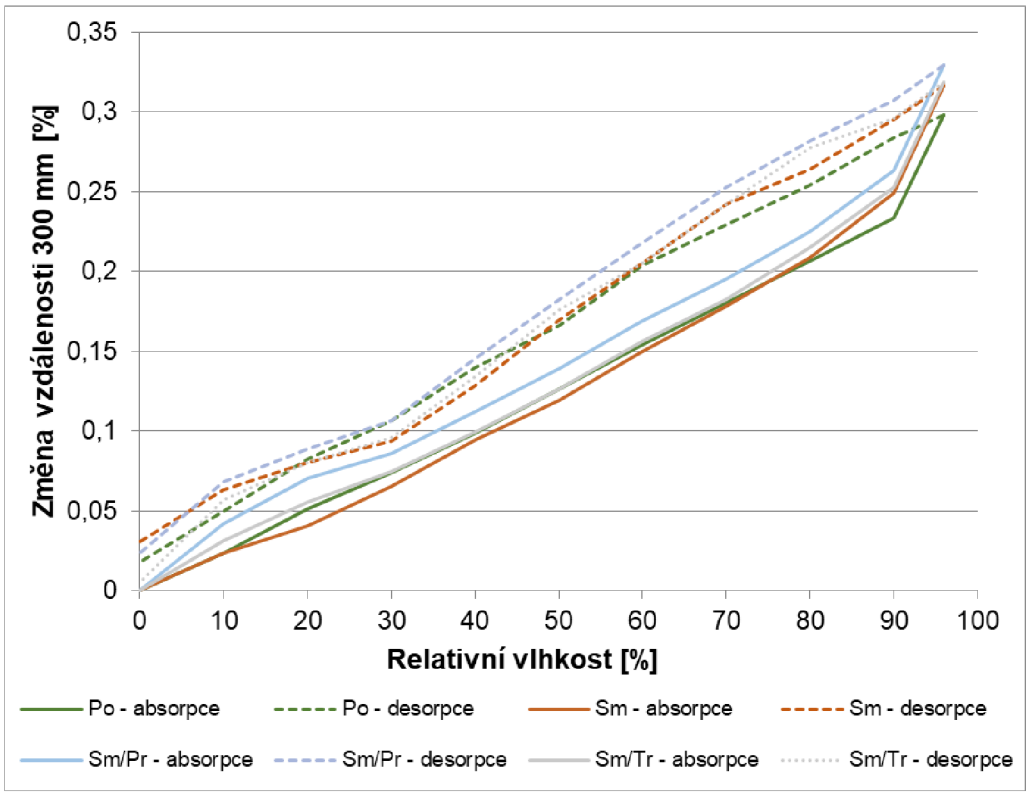
Obr. 38 : Sorpční křivky – změny hmotnosti

Dalším sledovaným a hodnoceným parametrem byly rozměrové změny v podélném směru desek na úsečkách definovaných mosaznými terči vzájemně vzdálenými 300 mm a to na rubové i lícové ploše. Dále v grafech (viz Obr. 39 až Obr. 42Obr. 40) jsou uvedeny pouze průměrné hodnoty pro každou sadu. Trendy vyhodnocených křivek prokazují podobnost průběhu lineárních změn testovaných desek. Nejlépe lze s maximální změnou v lineárním směru hodnotit desky Po, tj. 0,30 %. Naopak nejvíce podléhaly změnám relativní vlhkosti desky Sm/Šk a Sm/Pr, tj. 0,33 %. Velice dobře je možné hodnotit desky Sm/Tř, jejichž chování je srovnatelné s deskami Sm. Druhotné třísky se v tomto ohledu tedy projevily pozitivně. Sorpční křivky jsou poměrně plynulé, až na nárůst z 90 % na 96 %. Zde je patrná strmější expanze v podélném směru a to u všech receptur.

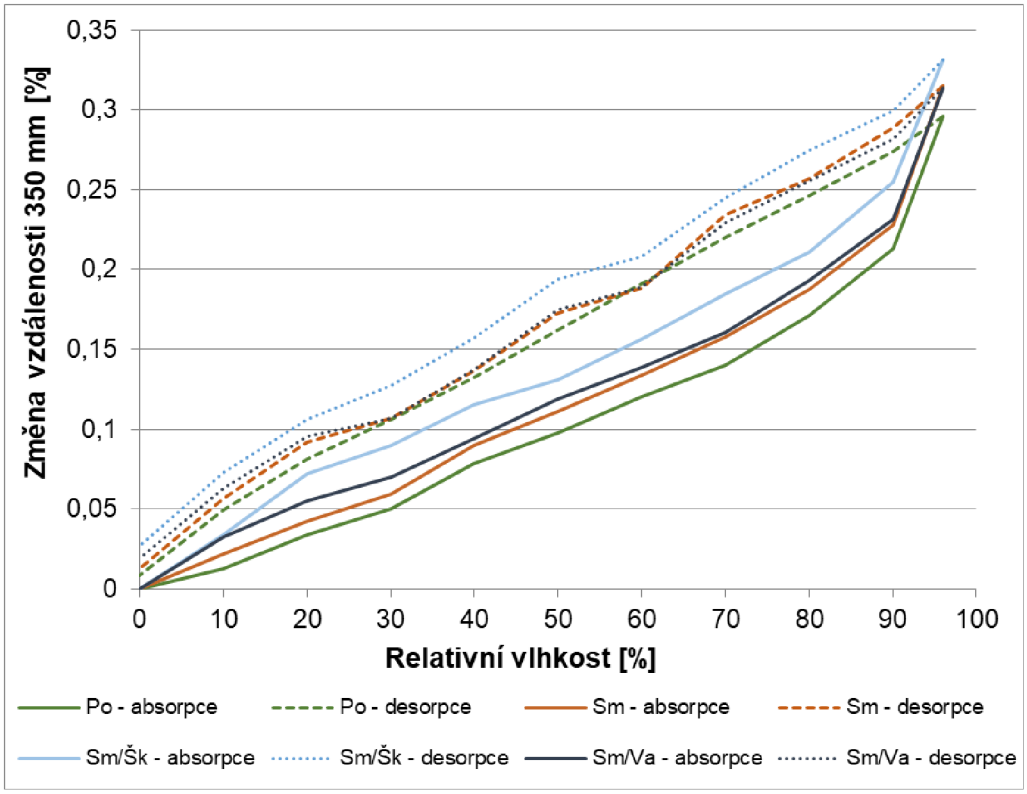


Obr. 39 Sorpční křivky – změny stanovené dilatometrem ve směru délky

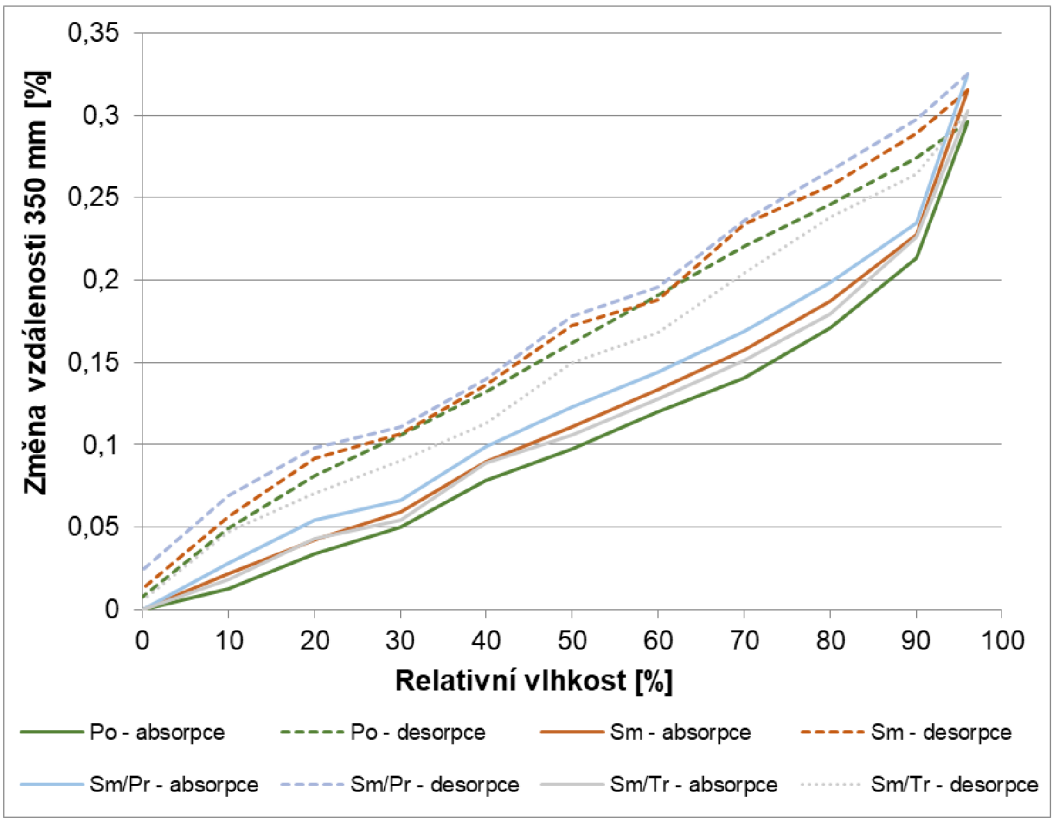
Zajímavé je porovnání průběhů sorpčních izoterem získaných z měření dilatometrem (na vzdálenosti 300 mm) a posuvným měřítkem (celková délka zkušebních těles, tj. 350 mm). Oba způsoby stanovení rozměrových změn prokázaly obdobnou maximální expanzi a smrštění ve sledovaném rozměru. Ovšem průběhy křivek jako takové se liší. Stanovení změn posuvným měřítkem vykazuje větší rozptyly mezi jednotlivými sorpčními křivkami. Při porovnání trendu sorpčních křivek získaných z rozdílných způsobů stanovení je zřejmé, že v případě stanovení rozměrů posuvným měřítkem vychází změny nižší.



Obr. 40 Sorpční křivky – změny stanovené dilatometrem ve směru délky



Obr. 41 Sorpční křivky –změny stanovené posuvným měřítkem ve směru délky

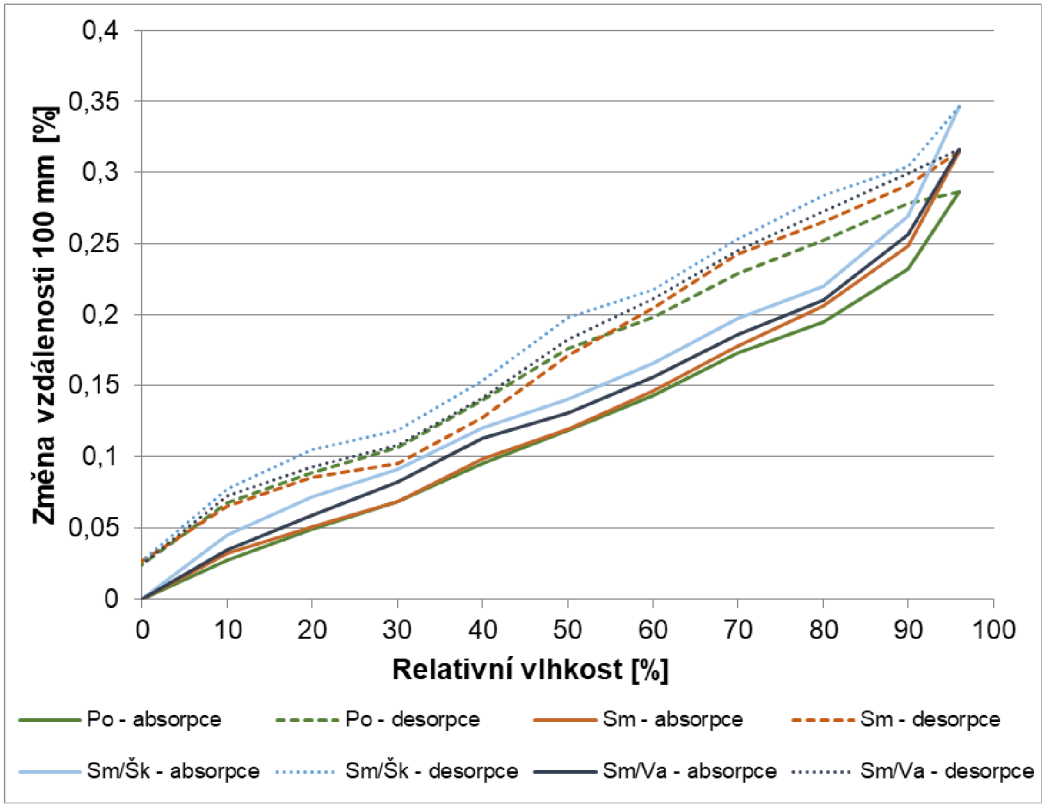


Obr. 42 Sorpční křivky – změny stanovené posuvným měřítkem ve směru délky

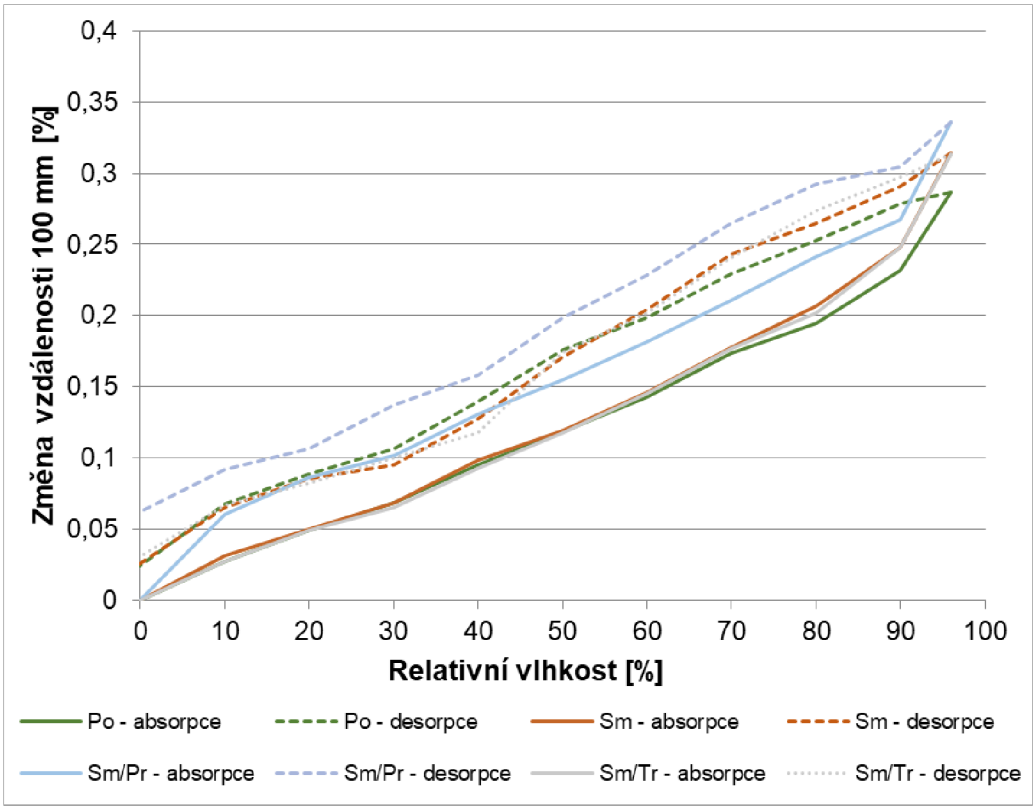
Posuzovaným parametrem byly rozměrové změny v příčném směru desek na úsečkách definovaných mosaznými terči vzájemně vzdálenými 100 mm a to na rubové i lícové ploše. Dále v grafech (viz Obr. 43 až Obr. 46) jsou uvedeny pouze průměrné hodnoty pro každou sadu. Trendy vyhodnocených křivek prokazují podobnost průběhu lineárních změn testovaných desek v příčném směru. Nejlépe lze s maximální změnou v příčném směru hodnotit desky Po, tj. 0,29 %. Naopak nejvíce podléhaly změnám relativní vlhkosti desky Sm/Šk a Sm/Pr, tj. 0,35 % a 0,34 %. Opět, stejně jako v případě změn ve směru podélném je možné velice dobře hodnotit desky Sm/Tř, jejichž chování je srovnatelné s deskami Sm. Druhotné třísky se v tomto ohledu tedy projevily pozitivně. Sorpční křivky jsou poměrně plynulé, až na nárůst z 90 % na 96 %. Zde je patrný strmější expanze v příčném směru a to u všech receptur.

V porovnání se změnami v podélném směru je při porovnání průběhů sorpčních izoterem získaných z měření dilatometrem (na vzdálenosti 100 mm) a posuvným měřítkem (celková šířka zkušebních těles, tj. 150 mm) jsou patrné výraznější rozdíly výsledků takto stanovených. Při stanovení rozměrových změn dilatometrem dosahovala maximální hodnota 0,35 %, kdežto měřením posuvným měřítkem byla prokázána maximální změna v příčném směru 0,41 %. Při porovnání trendu sorpčních křivek získaných z rozdílných způsobů stanovení je tedy prokazatelné, že v případě stanovení rozměrů posuvným měřítkem vychází změny výraznější. Průběhy sorpčních izoterem

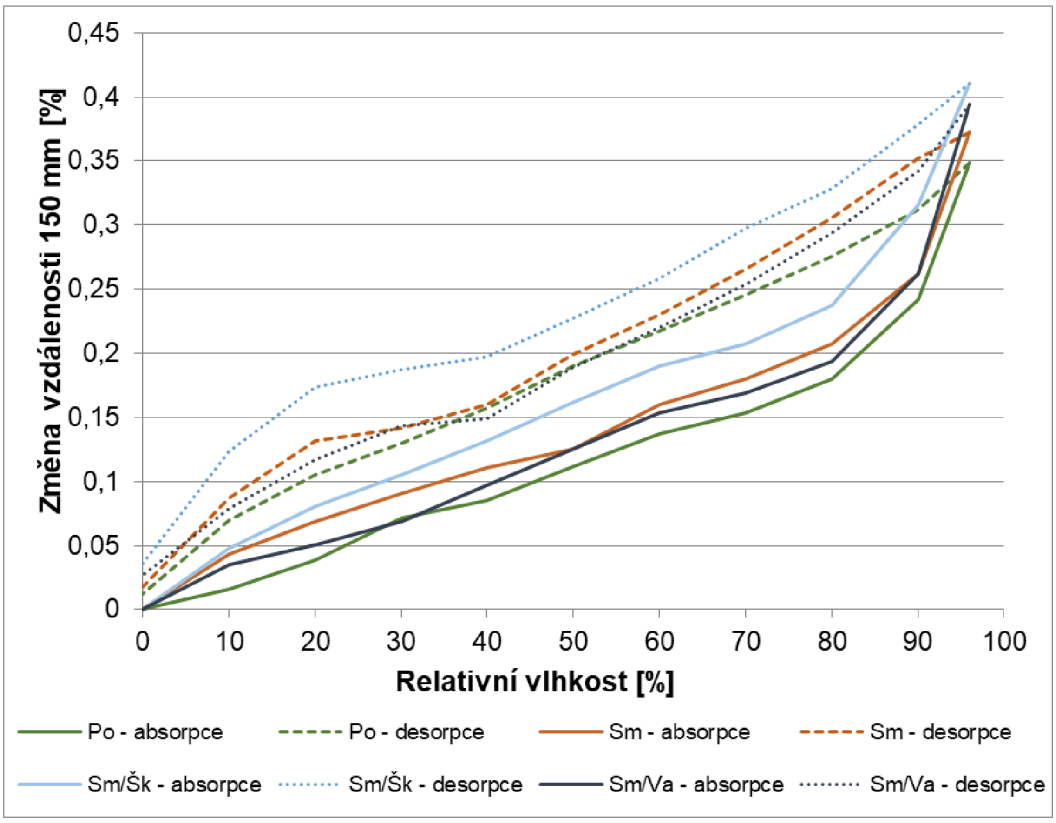
se liší. Stanovení změn posuvným měřítkem vykazuje větší rozptyly mezi jednotlivými sorpčními křivkami.



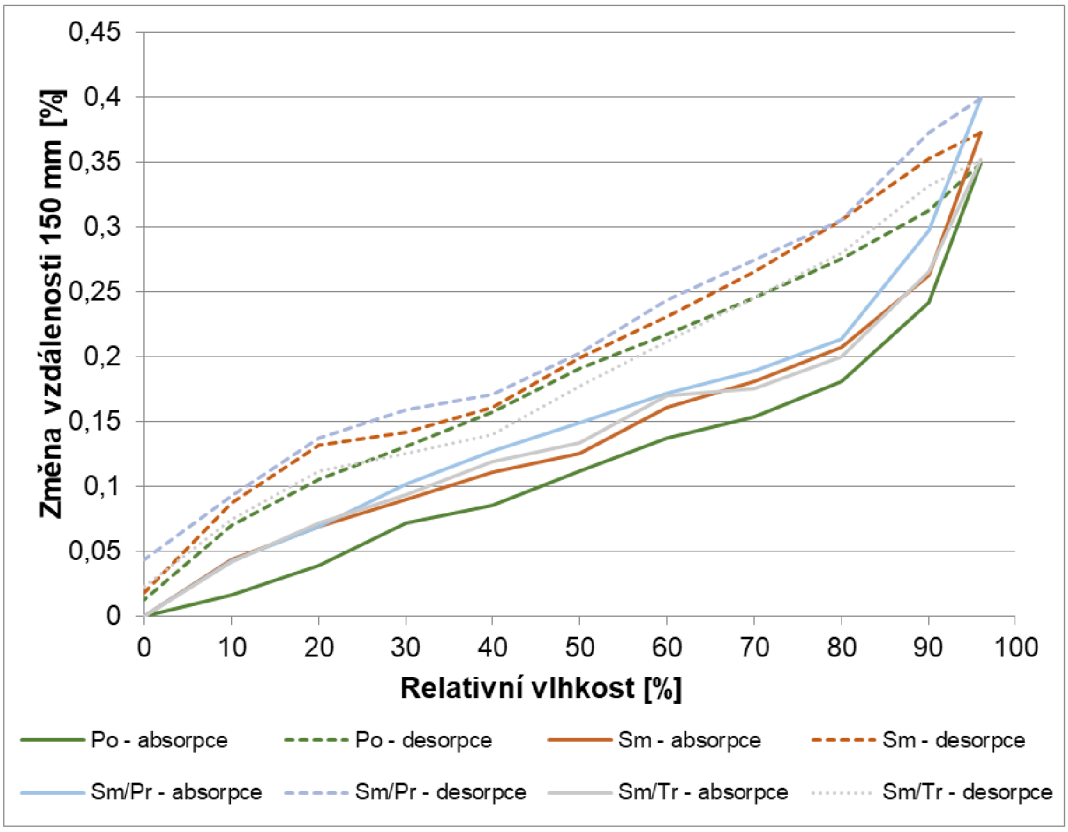
Obr. 43 Sorpční křivky – změny stanovené dilatometrem ve směru šířky



Obr. 44 Sorpční křivky – změny stanovené dilatometrem ve směru šířky



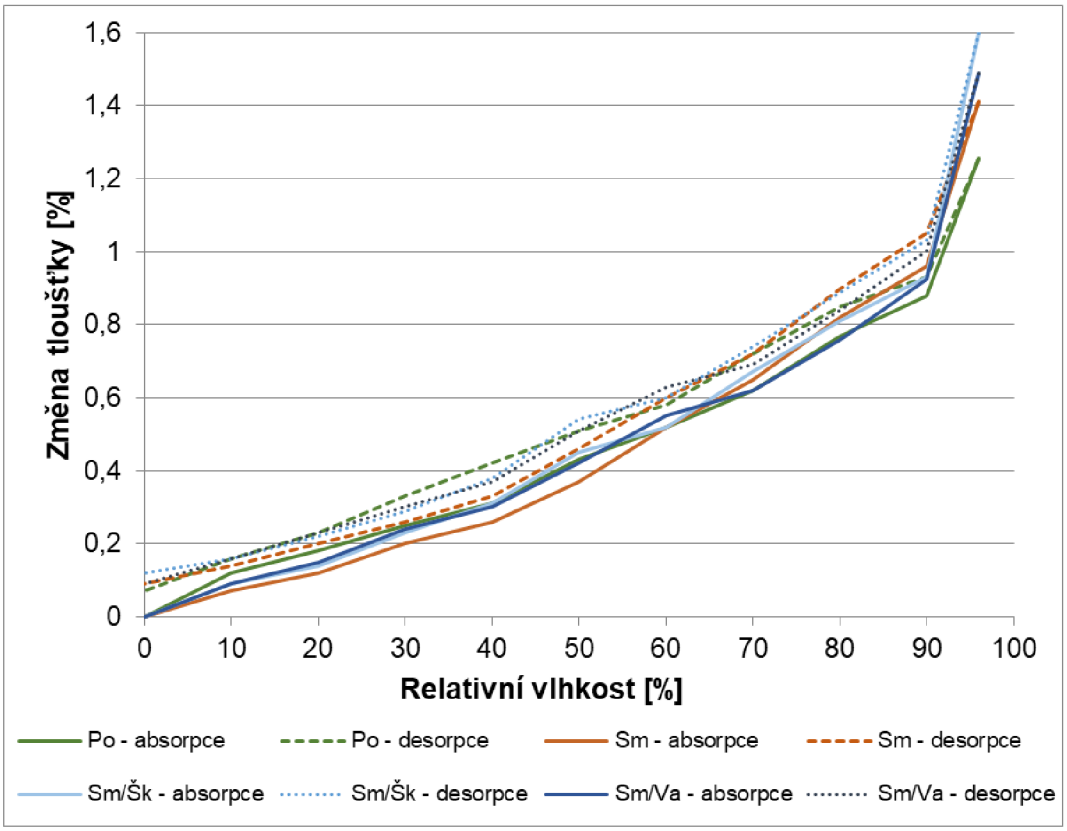
Obr. 45 Sorpční křivky – změny stanovené posuvným měřítkem ve směru šířky



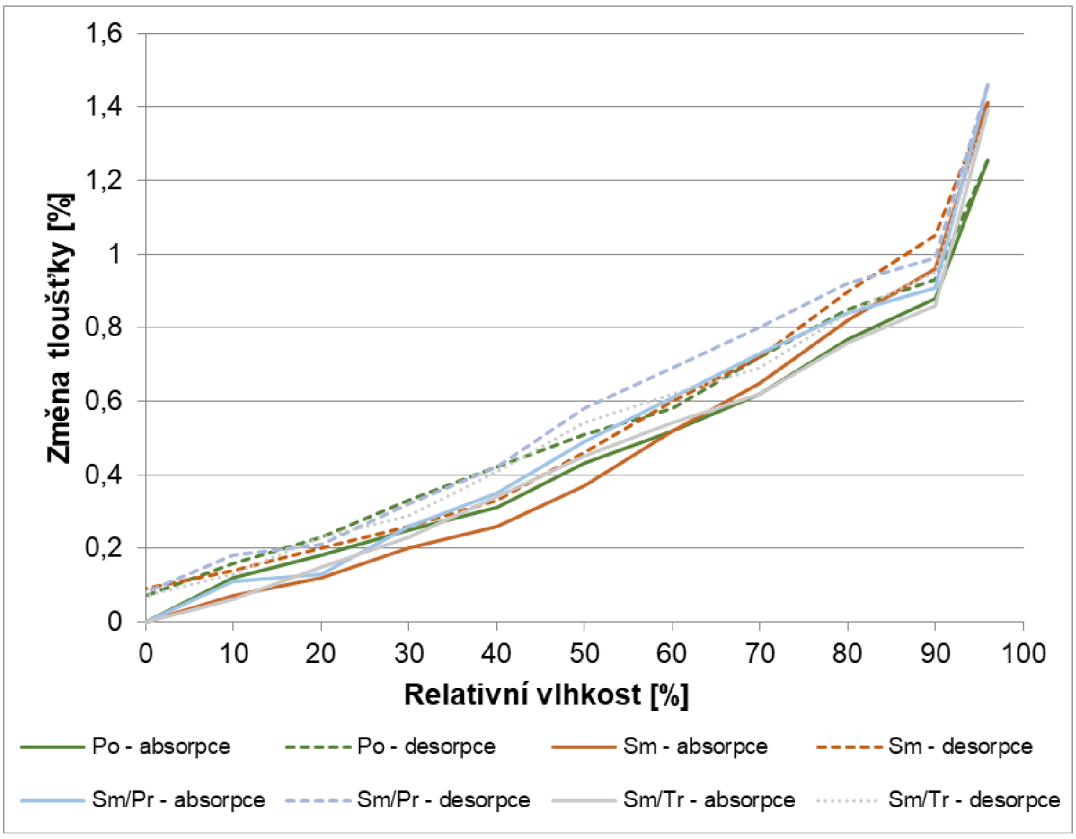
Obr. 46 Sorpční křivky –změny stanovené posuvným měřítkem ve směru šířky

Rozměrové změny ve směru tloušťky dosahují nejvyšších změn (viz Obr. 47 a Obr. 48). Z hlediska rozměrových změn a jejich vzájemných rozdílů je podstatná orientace smrkových třísek v cementotřískových deskách. Poměrně názorně je toto popsáno v [46.]. Autoři uvádí CT snímky, které prokazují orientaci radiálního a tangenciálního směru třísek převážně kolmo na rovinu desky, čímž lze zdůvodnit největší rozměrové změny právě ve směru tloušťky. Významné rozměrové, resp. objemové změny dřeva v radiálním a tangenciálním směru zkoumali a zjistili autoři v [4.][15.].

V případě všech testovaných receptur se největší změna odehrává v rozmezí relativní vlhkosti 90 % a 96 %, kdy maximální stanovená změna tloušťky byla 1,6 % (receptura Sm/Šk). Nejlépe je možné hodnotit opět referenční desky Po, tj. změna 1,3 %. Je ovšem patrné, že rozdíly nejsou v porovnání s ostatními změnami rozměrů tolik patrné. Značně příznivě je možné hodnotit desky obsahující druhotné třísky z drcení odřezků, tj. receptura Sm/Tř , jejichž změny tloušťky přibližně korespondují se zjištěnými výsledky desek Po. Jev hystereze se u tloušťky projevil přibližně dvojnásobně v porovnání s ostatními hodnocenými změnami rozměrů.

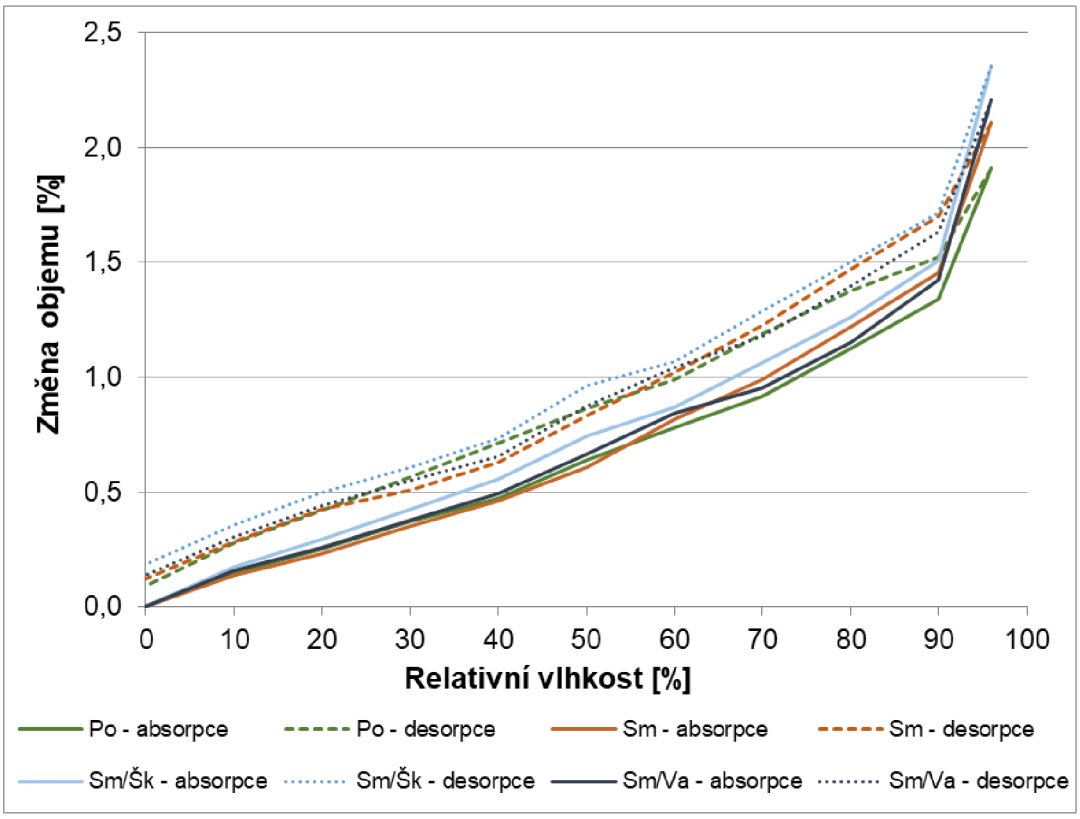


Obr. 47 Sorpční křivky – změny stanovené mikrometrem ve směru tloušťky

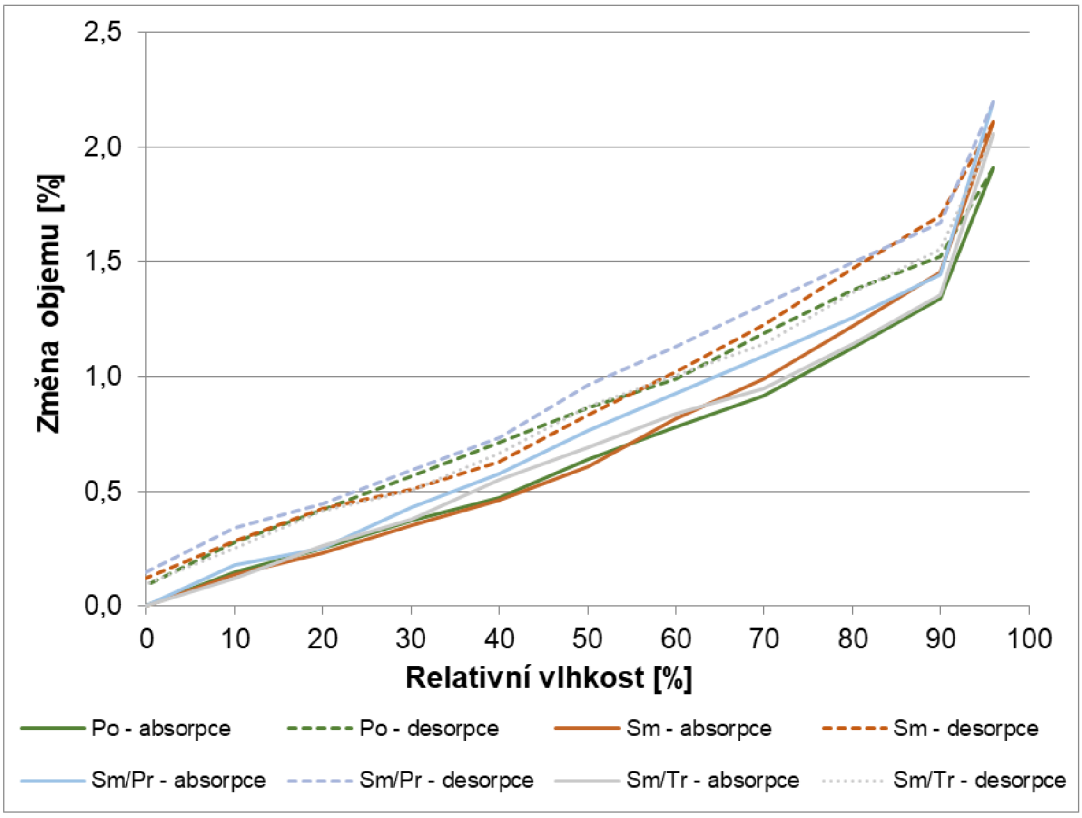


Obr. 48 Sorpční křivky – změny stanovené mikrometrem ve směru tloušťky

Sorpční izotermy charakterizující změny objemu (viz Obr. 49 a Obr. 50) dosahují maxima při vystavení desek relativní vlhkosti 96 %. Maximální expanzní změny se pohybují v rozmezí 1,9 % až 2,4 %, kdy hystereze nepřesahuje 0,18 %. Z průběhu křivek je zřejmé, že nejlépe odolné vůči změnám relativní vlhkosti jsou desky referenční, tj. Po. Srovnatelné chování pak vykazují desky Sm, Sm/Tř a Sm/Va. Nejvýraznější změny objemu lze zpozorovat u desek obsahujících prach a škváru, tj. Sm/Pr a Sm/Šk. Náhrada cementu prachem z opracování cementotřískových desek a teplárenskou škvárou tedy má nejvýrazněji negativní vliv na chování desek za proměnlivých vlhkostních podmínek.



Obr. 49 Sorpční křivky – změny objemu



Obr. 50 Sorpční křivky – změny objemu

4.6. Ověření fyzikálně-mechanických vlastností

V rámci posouzení fyzikálně-mechanických parametrů cementotřískových desek byly analyzovány:

- hustota (objemová hmotnost);
- pevnost v ohybu;
- modul pružnosti v ohybu;
- pevnost v tahu kolmo na rovinu desky.

Postupy pro stanovení hustoty desek uvádí EN 323 [55.]. Dle této technické normy se hustota (v kg/m^3) určí jako poměr hmotnosti zkušebního tělesa k jeho objemu (vše při stejné vlhkosti). Hustota byla stanovena na tělesech, na kterých byly testovány ohybové charakteristiky a pevnost v tahu kolmo na rovinu desky.

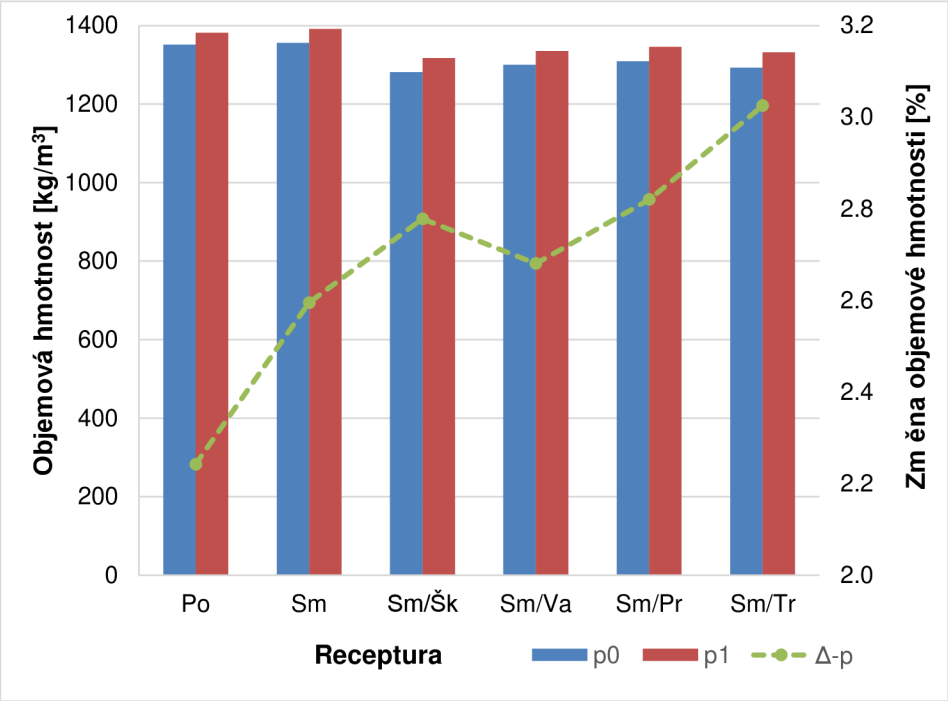
Ohybové charakteristiky, tj. pevnost a modul pružnosti v ohybu byly stanoveny dle EN 310 [52.]. Zatěžování zkušebního tělesa probíhá v jeho středu. Těleso je uloženo na dvou válcových podpěrách a zatížení působí prostřednictvím válcové zatěžovací hlavy umístěné rovnoběžně s podporami a ve stejné vzdálenosti mezi nimi, tj. jedná se o tříbodový ohyb. Modul pružnosti se stanoví z lineární části zatěžovací křivky. Pevnost každého tělesa se vypočte stanovením poměru ohybového momentu M při maximálním zatížení F_{max} k momentu jeho celého průřezu. Šířka zkušebních těles je 50 mm a délka se stanoví jako – (20 × tloušťka) + 50 mm. Vzdálenost mezi středy podpěr se nastaví na rozměr – 20 × tloušťka desky. Maximálního zatížení – porušení zkušebního tělesa musí být při zkoušce dosaženo do (60±30) s. Zatížení se vyvozuje konstantní rychlostí.

Dle ustanovení EN 319 [54.] se tato pevnost stanoví při tahovém napětí působícím na zkušební těleso až do momentu jeho porušení ve směru kolmém na rovinu tělesa (shodnou s rovinou desky). Pevnost v tahu kolmo na rovinu se určí z maximální síly působící na povrch zkušebního tělesa. Pro zkoušku byla použita zkušební tělesa tvaru čtverce o hraně (50±1) mm. Na tělesa byly přilepeny bloky. Pomocí těchto bloků bylo možné tělesa upevnit do elektro-hydraulického zařízení. K tomuto účelu byly použity ocelové terče, které byly fixovány lepidlem na bázi dvousložkové epoxidové pryskyřice. Byla nastavena rychlost zatěžování tak, aby k porušení tělesa došlo do (60±30) s. Rychlost vyvození tahové síly byla 3 mm/min.

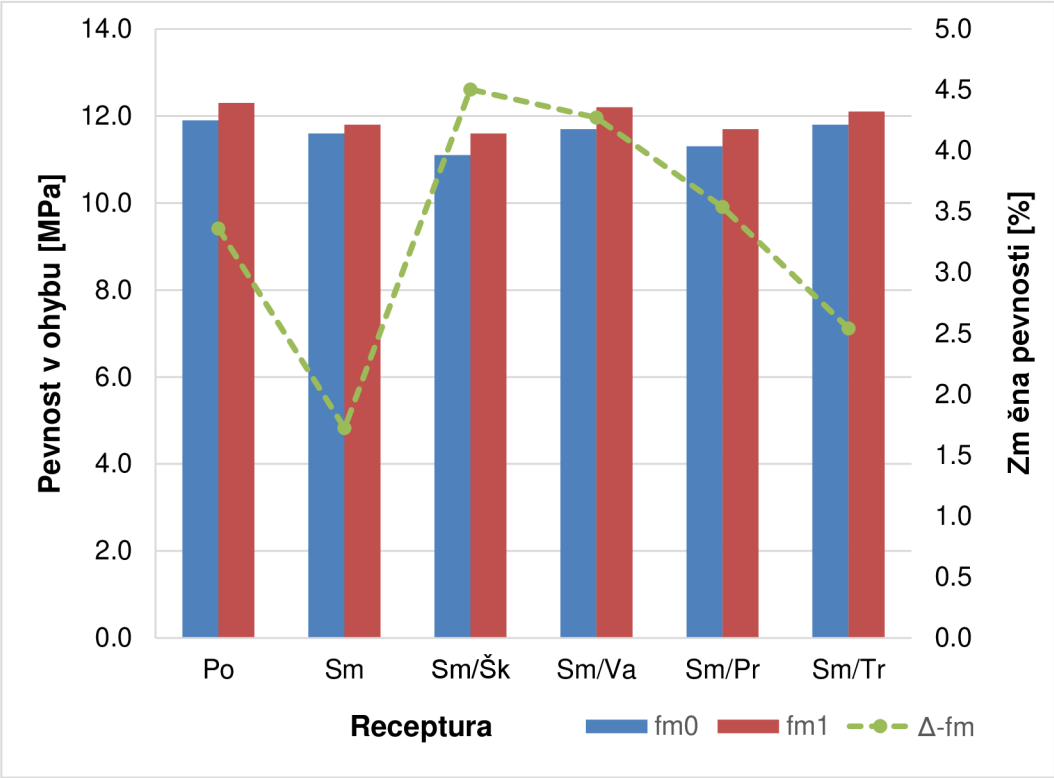
Vlivem vystavení desek vlhkosti došlo k nárůstu parametrů. Důvodem je jednak dotace cementové matrice vlhkostí a tím tedy pokračující hydratace, kdy přítomnost

vlhkosti se projeví pozitivně. Dále docházelo během saturace smrkových třísek vodou k jejich expanzi a v určité míře i uvolňování reziduálních napětí vnesených při výrobě desek [40.], což také mohlo přispět k zhutnění a tím i zpevnění struktury desek. Podstatné je, že uvolněné reziduální napětí s největší pravděpodobností nepřekročilo mez pevnosti (soudržnosti) desky. V takovém případě by totiž naopak došlo k poklesu parametrů, což by se nejvíce projevilo na rozlupčivosti, která právě charakterizuje soudržnost desky ve směru tloušťky, tj. kolmo na rovinu desky.

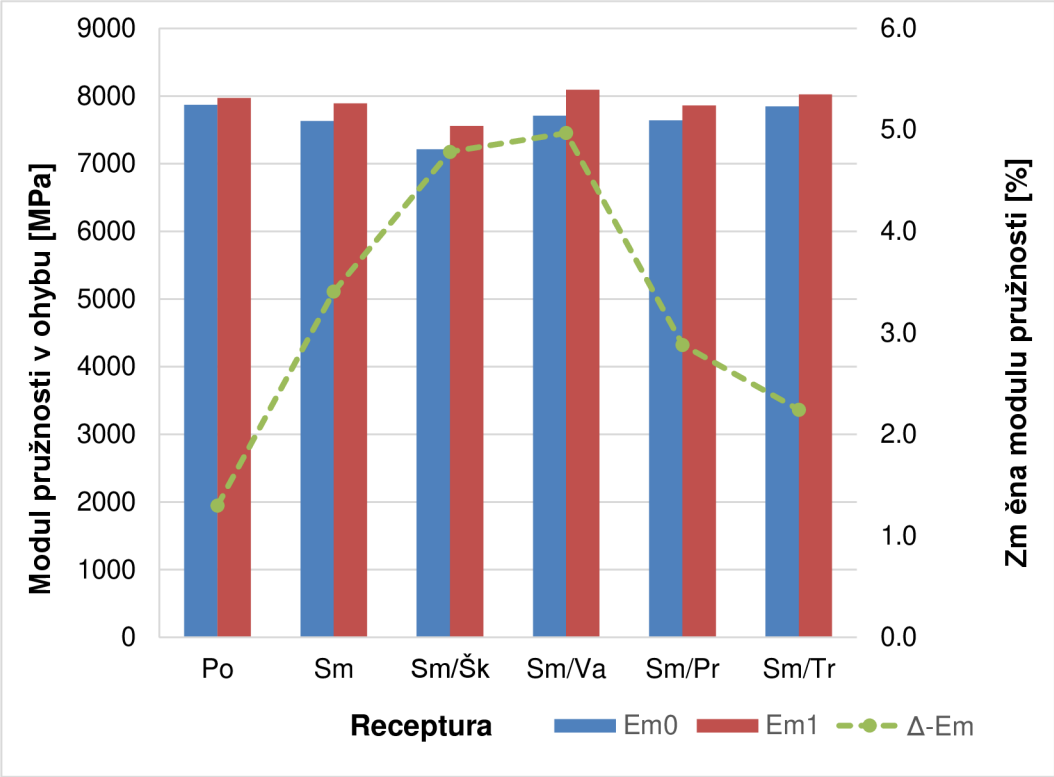
Nebyla vypozorována závislost změny parametrů vlivem vzdušené vlhkosti na složení desek, přičemž nárůst parametrů se pohyboval v řádech jednotek procent. Parametry jako takové bez uvažování vlivu vlhkosti podléhaly změnám v závislosti na typu a množství modifikační složky matrice či třísek. Nejvíce negativně se projevila náhrada cementu jemně mletou škvárou, kde lze tedy předpokládat spíše její inertní chování v matrici desek a tím i tedy menším podílu na hydratačních reakcích cementu. Podstatné je ovšem, že výkyvy vlastností nejsou v porovnání s referenční recepturou výrazné a je tedy možné uvažovat testované receptury pro reálnou výrobu cementotřískových desek.



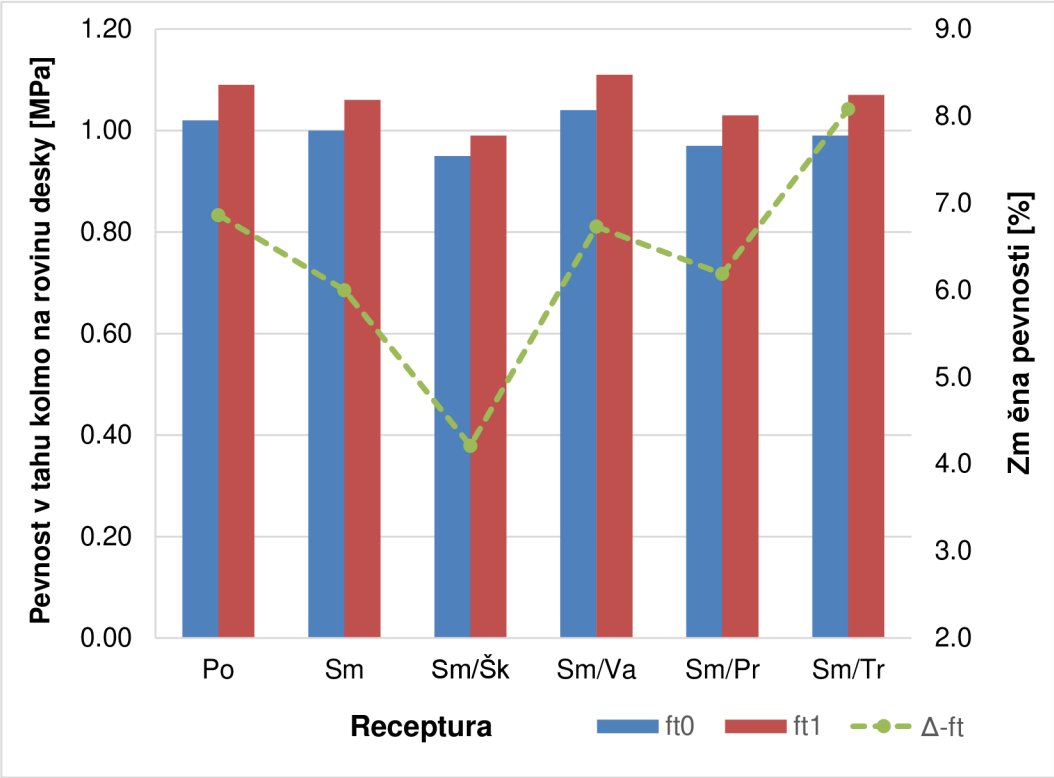
Obr. 51 : Objemová hmotnost desek před a po vystavení proměnlivé relativní vlhkosti okolí



Obr. 52 : Pevnost v ohybu desek před a po vystavení proměnlivé relativní vlhkosti okolí



Obr. 53 : Modul pružnosti v ohybu desek před a po vystavení proměnlivé relativní vlhkosti okolí



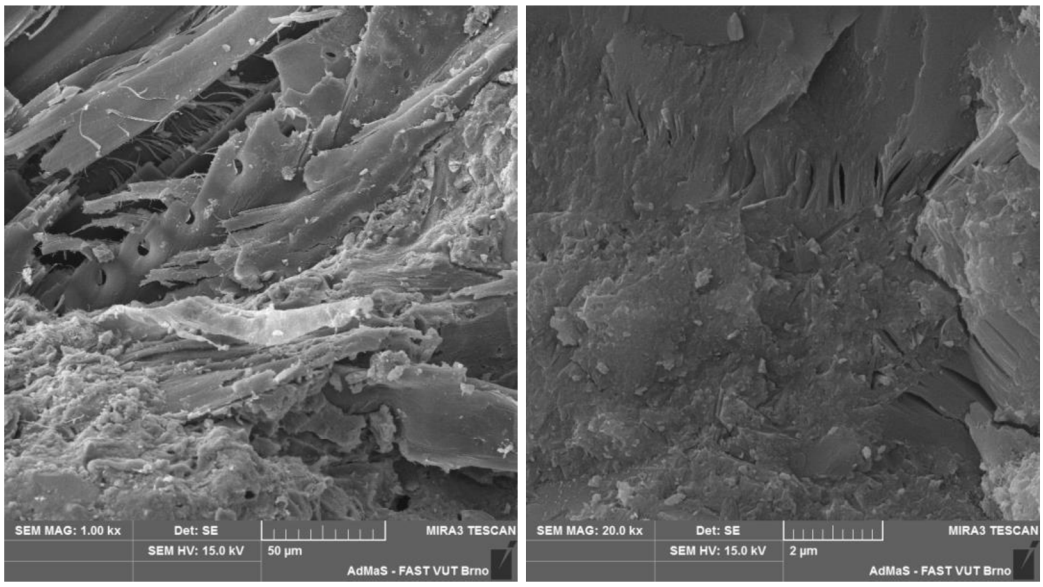
Obr. 54 : Pevnost v tahu kolmo na rovinu desky před a po vystavení proměnlivé relativní vlhkosti okolí

4.7. Analýza mikrostruktury

Následující snímky zobrazují mikrostrukturu vybraných typů testovaných cementotřískových desek (viz Obr. 55 až Obr. 61). Při analýze mikrostruktury byla pozornost zaměřena na kompaktnost cementové matrice a to i v okolí smrkových třísek, provázání buněčné struktury třísek s cementovou matricí, resp. penetrace hydratačních produktů do smrkových třísek a dále také vývoj struktury vlivem vystavení zvyšující se relativní vlhkosti.

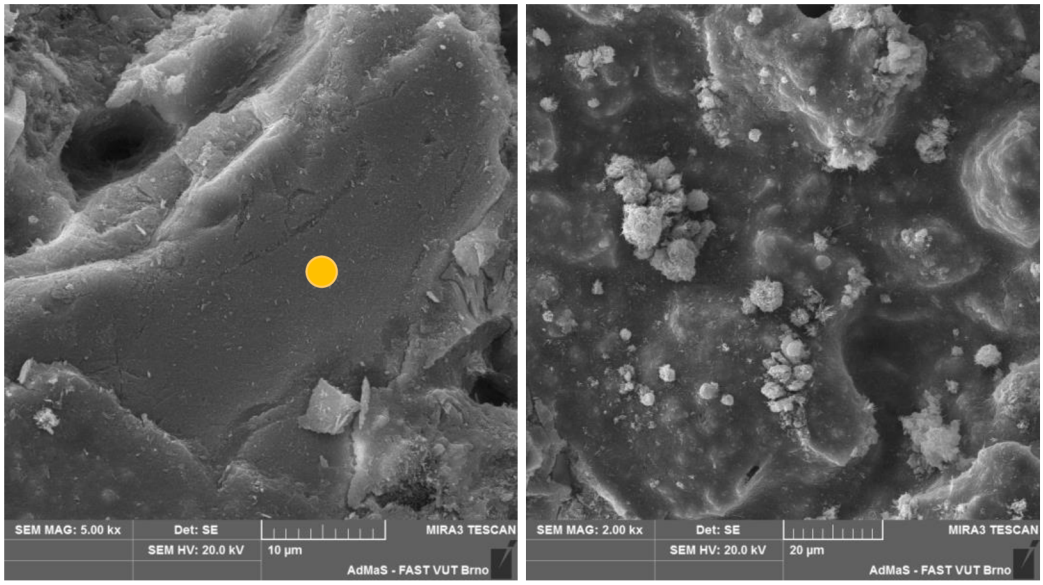
Z provedené analýzy je patrné, že struktura testovaných desek je kompaktní, kdy cementová matrice velmi dobře spolupůsobí se smrkovými třískami. Podstatná je skutečnost, že vlivem vystavení desek zvýšené vzdušné vlhkosti nedochází pouze k dodatečné hydrataci cementu, ale také k částečnému zapojení alternativních složek, tj. reakce s matricí.

Posouzení mikrostruktury bylo doplněno o prvkovou analýzu, kde byla pozornost zaměřena především na přítomnost alternativních složek v cementové matrici a jejich případné zapojení do struktury cementotřískových desek, tj. spolupůsobení s cementovou matricí či smrkovými třískami.

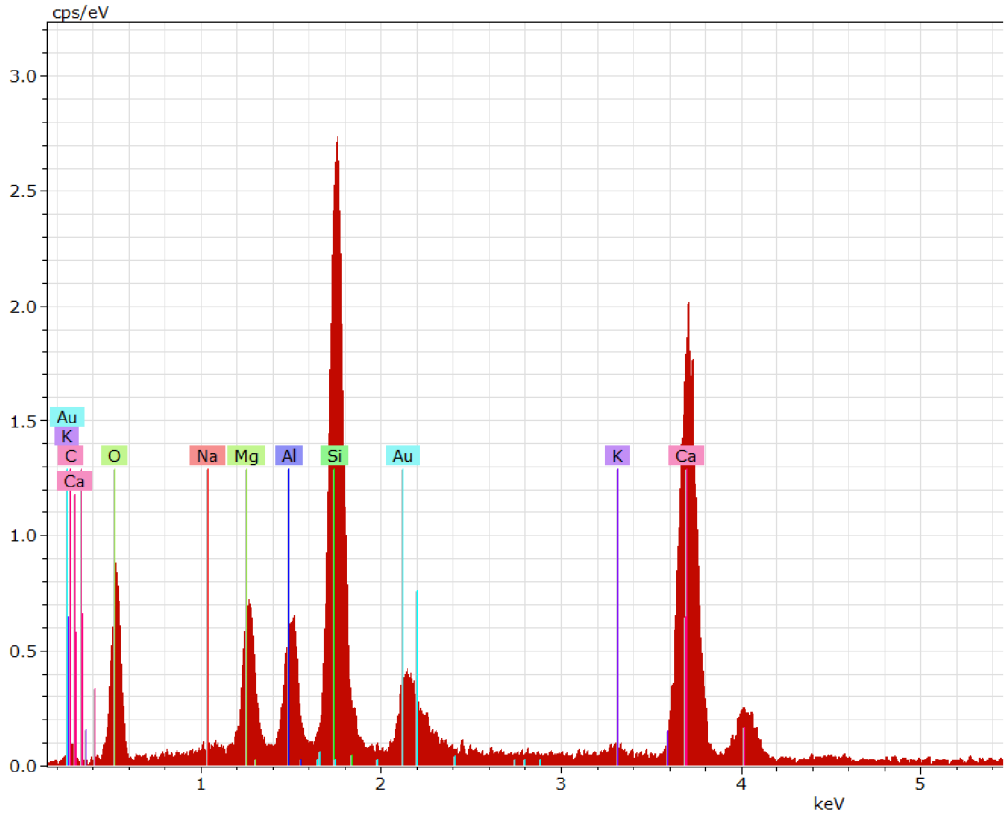


Obr. 55 : Mikrostruktura desky Sm před (vlevo) a po (vpravo) vystavení proměnlivé relativní vlhkosti okolí

Bylo potvrzeno, že teplárenská škvára z Oslavan se projeví převážně jako inertní plnivo bez aktivního zapojení do hydratačních reakcí. Toto také souvisí se stabilizací smrkových třísek, což se projevilo výraznějšími rozměrovými, resp. objemovými změnami (sorpční izotermy – viz Obr. Obr. 49). Níže na snímku (Obr. 56) je zachyceno zrno škváry, což bylo potvrzeno i prvkovou analýzou (viz Obr. 57). Jak je patrné ze snímku, kde je zachycena mikrostruktura desky Sm/Šk po vystavení zvýšené vlhkosti, matrice se jeví jako značně hutná a kompaktní

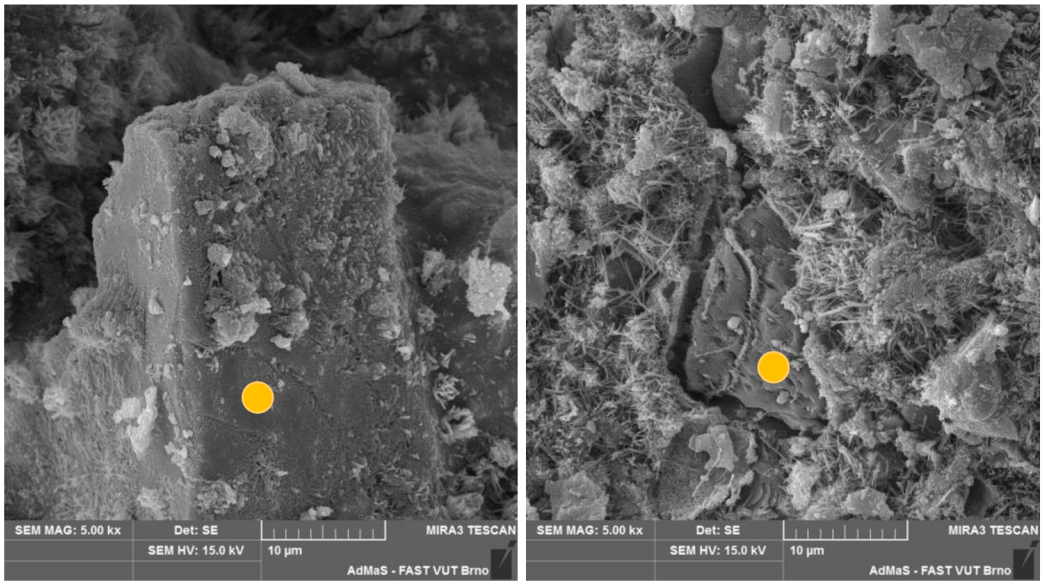


Obr. 56 : Mikrostruktura desky Sm/Šk před (vlevo; s vyznačením lokality prvkové analýzy) a po (vpravo) vystavení proměnlivé relativní vlhkosti okolí

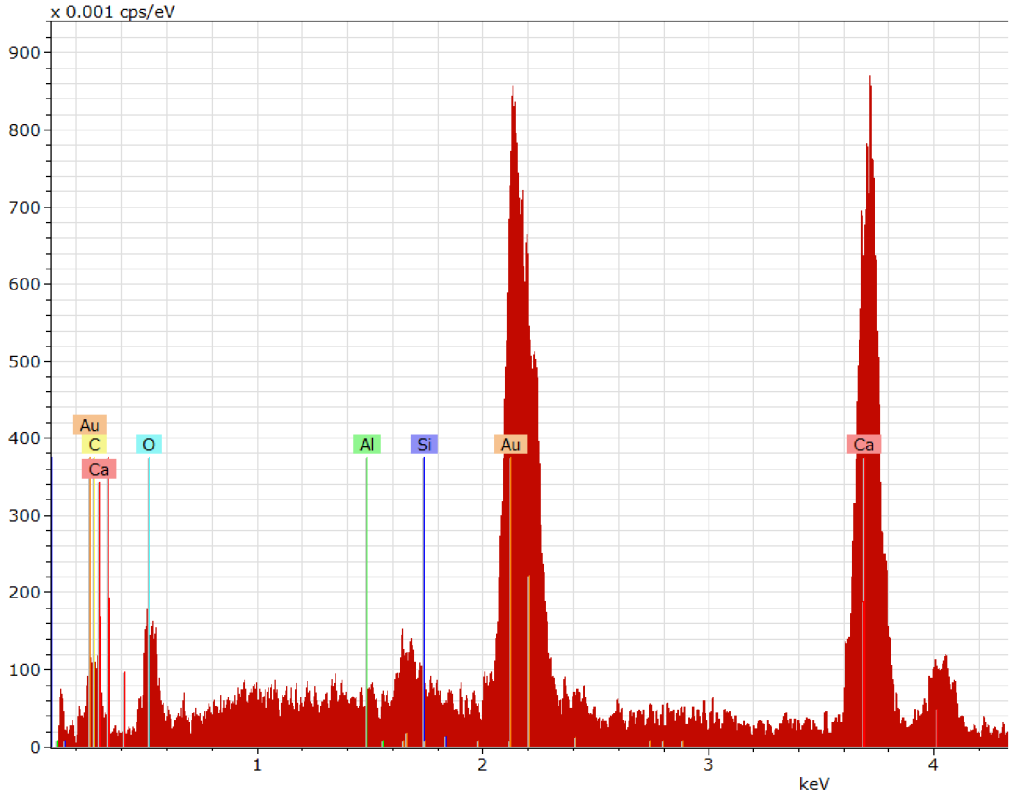


Obr. 57 : Prvková analýza (viz Obr. 56 vlevo)

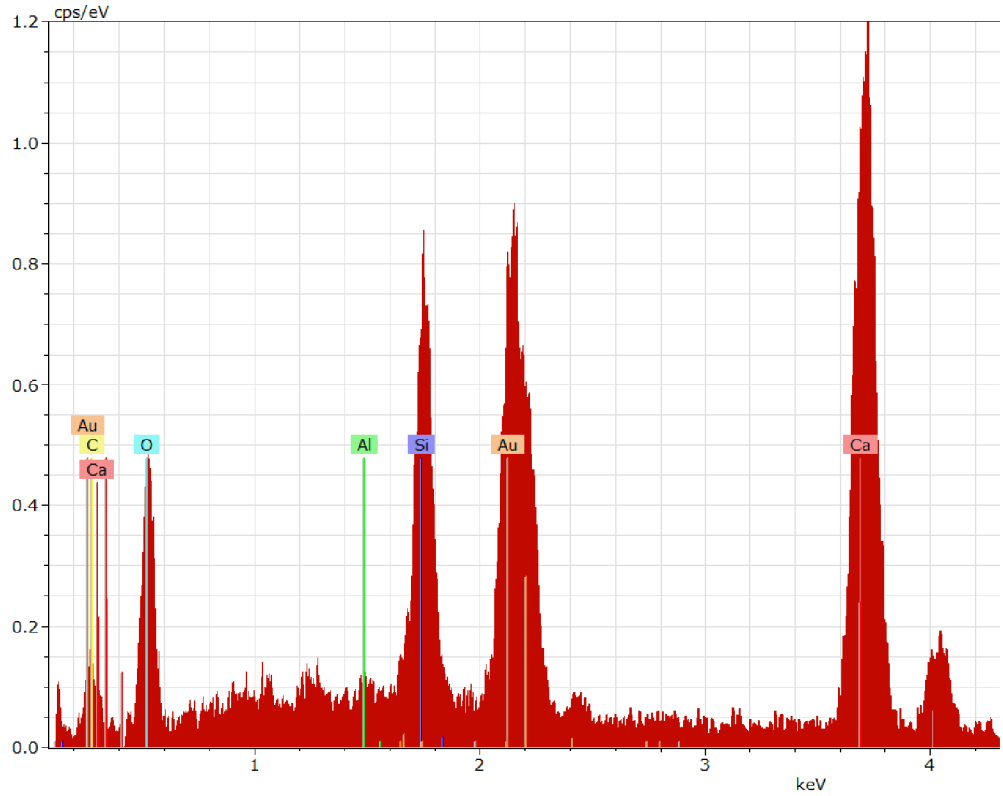
Na snímku níže (Obr. 58) si můžeme všimnout detailu vápence v jeho rané fázi (snímek vlevo). Na snímku vpravo je již s největší pravděpodobností zrno vápence zreagované vlivem delšího působení vlhkosti. Skutečnost, že se jedná o zrno vápence, byla potvrzena prvkovou analýzou, viz Obr. 59 a Obr. 60.



Obr. 58 : Mikrostruktura desky Sm/Va před (vlevo; s vyznačením lokality prvkové analýzy) a po (vpravo; s vyznačením lokality prvkové analýzy) vystavení proměnlivé relativní vlhkosti okolí

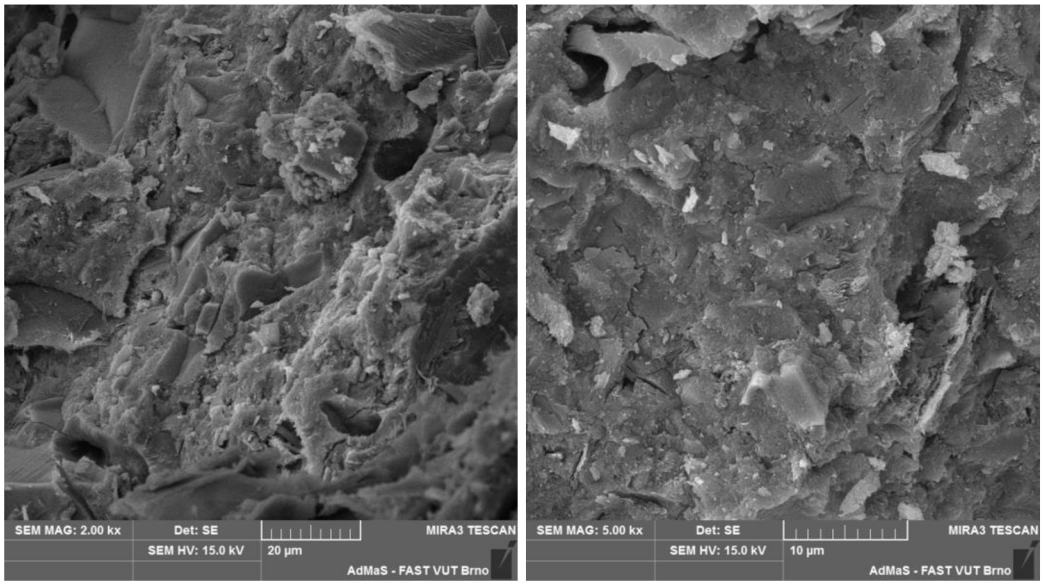


Obr. 59 : Prvková analýza (viz Obr. 58 vlevo)



Obr. 60 : Prvková analýza (viz Obr. 58 vpravo)

Na obrázku níže (Obr. 61) lze patrný detail kompaktní struktury při použití částic prachu jako alternativní složky pojiva i plniva. Struktura desek Sm/Pr se rovněž jeví jako hutná a kompaktní. Vlivem působení vlhkosti se tato struktura jeví jako hutnější, což potvrzuje mikroskopický snímek. Částice prachu (pocházejícího z opracování cementotřískových desek) jsou kompatibilní s cementovou matricí, resp. surovinovou směsí pro výrobu desek, což je dokumentováno faktem, že nelze jednoznačně identifikovat rozhraní mezi těmito částicemi a matricí desek.



Obr. 61 : Mikrostruktura desky Sm/Pr před (vlevo) a po (vpravo) vystavení proměnlivé relativní vlhkosti okolí

4.8. Diskuze výsledků

Výsledky poukazují na skutečnost, že složení cementotřískových desek dokáže výrazně ovlivnit jejich hygroskopicitu, což souvisí s chováním desek a změnami jejich vlastností, především objemových změn za proměnlivé relativní vlhkosti okolí.

4.8.1. Hygroskopicita

Sorpční izotermy prokázaly rozdílné chování desek během nárůstu a poklesu okolní vzdušené vlhkosti, které byly desky vystaveny vždy po takovou dobu, aby došlo k ustálení jejich hmotnosti. Stanovené výsledky a zjištěné poznatky prokazují či poukazují na následující skutečnosti:

- Nejvíce rezistentní vůči objemovým a hmotnostním změnám je standardně vyráběná cementotřísková deska na bázi portlandského cementu (receptura Po).

- Nejvíce naopak podléhají změnám desky obsahující teplárenskou škváru a prach z opracování cementotřískových desek jako substituenty primárních složek směsi.

- Nejvýraznější změny byly ze sledovaných parametrů zaznamenány v případě hmotnosti (v porovnání se změnami jednotlivých rozměrů a objemu).

- Stanovené diference mezi jednotlivými recepturami nejsou příliš výrazné, což přibližně koresponduje s kompatibilitou a množstvím surovin ve směsi pro výrobu cementotřískových desek.

- Značně pozitivně lze hodnotit chování desek, kde bylo nahrazeno 5 % primárních smrkových třísek třískami recyklovanými (pocházejícími z drcení odřezků – vedlejšího produktu výroby cementotřískových desek). Tyto desky Sm/Tř vykazovaly objemové a hmotnostní změny srovnatelné a v některém případě i lepší než desky Sm, tj. pouze s obsahem primárních třísek. Důvodem je náhrada třísek nijak neupravovaných (surového dřeva) třískami, které již jednou prošly výrobním procesem (tj. mineralizace – cementem, vodním sklem, síranem hlinitým za současného působení tlaku a zvýšené teploty), což se nutně musí projevit na stabilizaci jejich vlastností.

- Byl zaznamenán rozdíl mezi měřením dilatometrem (s přesností na 0,001 mm) a posuvným měřítkem (s přesností na 0,01 mm). Provádění měření a zejména pak příprava je mnohem pracnější, vzhledem k nutnosti lepení terčíků, které mohou v proběhu měření odpadnout v případě neopatrné manipulace apod. Stanovení rozměrů posuvným měřítkem dochází k měření celé desky.

- Hystereze dřeva byla zaznamenána kolem 0,1 % změny objemu, což je v porovnání s výsledky uvedenými v teoretické části diplomové práce o něco nižší hodnota. Jednalo se ale o desky s vyšším obsahem alternativních složek a mnohdy i složek nižší kvality (např. odpadní papír [40.], atd.).

- Složení směsi pro výrobu cementotřískových desek má vliv mimo jiné i na stabilizaci smrkových třísek, což se projevilo při testování hygroskopicity desek.

4.8.2. Fyzikálně-mechanické vlastnosti

Fyzikálně-mechanické vlastnosti testovaných desek nebyly příliš ovlivněny jejich vystavením proměnlivé relativní vlhkosti. U některých zkoušek došlo k mírnému zvýšení parametrů. Tento jev byl pravděpodobně dán dodatečnou hydratací cementu, která měla pozitivní vliv na mechanické vlastnosti. Pozitivní vliv lze připisovat také stáří, kdy po skončení analýzy hygroskopicity vykazovaly desky stáří cca 210 dní.

Modifikace složení receptury desek měla za následek i rozdílné parametry a v případě všech sledovaných charakteristik (objemová hmotnost, pevnost a modul pružnosti v ohybu, pevnost v tahu kolmo na rovinu desky).

Z křivek charakterizujících změny daného konkrétního parametru vlivem vystavení vlhkosti nelze odvodit jednoznačné závislosti. Nicméně rozdíly vlastností před a po expozici v klimatické komoře se projevily v řádu jednotek procent, přitom diference mezi recepturami jsou minimální.

4.8.3. Mikrostruktura

Zjištěné skutečnosti a stanovené výstupy v případě analýzy mikrostruktury doplněné o prvkovou analýzu lze zhodnotit následně:

- Struktura všech typů analyzovaných desek je hutná a kompaktní bez defektů a poruch.
- Kontaktní zóna matrice a třísek vypovídá o jejich dobrém spolupůsobení, což je předpoklad synergického efektu.
- Rovněž zapojení alternativních složek, i když převážně jako inertního plniva (vyjma vápence), lze hodnotit jako pozitivní, kdy v oblasti rozhraní cementové matrice a těchto složek nebyly identifikovány dutiny, poruchy či nežádoucí fáze.
- V případě alternativních složek se jedná o inertní jemnozrnná plniva, která tedy téměř nereagují, a tedy nenapomáhají při hydratačních reakcích

k penetraci hydratačních produktů do buněčné struktury dřeva, což má mimo jiné právě vliv na stabilizaci smrkových třísek v cementové matrici.

- Vlivem vystavení desek zvyšující se a následně klesající relativní vlhkosti vzduchu nedošlo k nepříznivému ovlivnění struktury. Naopak struktura po této expozici se jeví jako značně kompaktní a hutná, což bylo také potvrzeno stanovenými objemovými hmotnostmi.

5. Závěr

Lze konstatovat, že v rámci řešení diplomové práce bylo postupováno v souladu se zadáním.

Teoretická část obsahuje poznatky relevantní s řešenou problematikou, kdy byla pozornost zaměřena na studium sorpčních jevů a hystereze v cementotřískových deskách při jejich kontaktu s vlhkostí včetně sorpce z hlediska rozdílného složení desek, což souvisí se stabilizací dřevěných třísek. Vyhodnocením poznatků z teoretické části byla navržena metodika experimentální části práce, kdy bylo navrženo celkem 6 receptur cementotřískových desek se složením modifikovaným aktuálně produkovanými alternativními složkami. Úprava složení desek spočívala v modifikaci matrice i plniva. Cílem bylo podrobné studium a analýza sorpčních křivek v rozmezí 0 až 96 % právě v závislosti na rozdílném složení desek, které má mimo jiné vliv na stabilizaci vlastností smrkových třísek v deskách obsažených. Poznatky byly doplněny o posouzení základních fyzikálně-mechanických vlastností a analýzu mikrostruktury vybraných materiálových variant.

Velmi přínosné jsou především průběhy stanovených sorpčních izoterem rozměrů, objemu a hmotnosti, čímž se jiní vědci příliš nezabývají a mnoho poznatků v této oblasti nelze v odborné literatuře nalézt. Přínosem je také, že tyto charakteristiky byly stanoveny na deskách s modifikovaným složením, které je zajímavé i z hlediska výrobního portfolia tuzemského producenta cementotřískových desek. Nebyly nalezeny odborné publikace zabývající se právě těmito materiálovými variantami cementotřískových desek. Maximální objemové změny, tj. při ustálení hmotnosti v prostředí o relativní vlhkosti 96 % se pohybovaly v rozmezí 1,91 % (desky Po) až 2,36 % (desky Sm/Šk). Hystereze je pak charakterizována ireverzibilní změnou objemu v rozmezí 0,09 % (desky Po) až 0,18 % (Sm/Šk). Byl jednoznačně prokázán pozitivní vliv náhrady primárních třísek třískami pocházejících z drcení odřezků (vznikajících jako vedlejší produkt výroby cementotřískových desek).

Všechny testované varianty cementotřískových desek se vyznačují vlastnostmi vyhovujícími technické normě ČSN EN 634-2, kdy rozdíly mezi jednotlivými recepturami nejsou příliš výrazné.

Analýzou mikrostruktury bylo prokázáno velmi dobré spolupůsobení alternativních složek ve struktuře desek bez poruch a defektů, a to jak v matrici, tak na rozhraní matrice a třísek. Nicméně vyjma vápence se alternativní složky uplatní převážně jako inertní plnivo bez vlivu na stabilizaci vlastností smrkových třísek, a tedy i na vlastnosti cementotřískové desky jako celku.

6. Použitá literatura

[1.] M.Z. Fan, P.W. Bonfield, J.M. Dinwoodie, J. Boxall, M.C. Breese, Dimensional instability of cement-bonded particleboard: the effect of surface coating, Cement and concrete research 34 (2004) str. 1189-1197, ISSN 0008-8846.

[2.] Ramadan A. Nasser, Mohamed Z.M. Salem, Hamad A. Al-Mefarrej, Ibrahim M. Aref, Use of tree pruning wastes for manufacturing of wood reinforced cement composites, Cement and concrete composites 72 (2016) str. 246-256.

[3.] Wan Noor Aidawati Wan Nadhari, Mohammed Danish, Muhammad Syafiq Ridhwan Mohd Nasir, Boon Jia Geng, Mechanical properties and dimensional stability of particleborard fabricated from steam pre-treated banana trunk waste particles, Journal of building engineering 26 (2019) 100848.

[4.] Eleni Makarona, Chara Koutzagioti, Constantinos Salmas, George Ntalos, Maria-Christina Skoulikidou, Christos Tsamis, Enhancing wood resistence to humidity with nanostructured ZnO coating, Nano-Structures & Nano-Objects 10 (2017) str. 57-68.

[5.] V. Caprai, F. Gauvin, K. Schollbach, H.J.H. Brouwers, Influence of the spruce strands hygroscopic behaviour on the parformances of wood-cement composites, Construction and building materials 166 (2018) str. 522-530

[6.] KONEČNÝ, D. Vývoj cementotřískových desek s matricí modifikovaného složení. Brno, 2014. 119 s., 1 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

[7.] Cetris. [online]. [cit. 2023-1-12]. Dostupné z: http://www.cetris.cz/pagedata_cz/download/511_ppp_kap-02.pdf

[8.] Cetris. Výrobní program. [online]. [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: http://www.cetris.cz/pagedata_cz/download/511_ppp_kap-02.pdf

[9.] MELO, M. Analýza možnosti využití odpadů vznikajících při výrobě cementotřískových desek. Brno, 2013. 112 s., 3 s. příl., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

[10.] Vodní sklo. Základní informace o vodním sklu. [online]. [cit. 2022-8-20]. Dostupné z: http://www.vodnisklo.cz/cz/clanky/zakladni-informace-o-vodnim-skle

[11.] Mendelova univerzita. Význam půdních mikroorganismů pro produkční a mimoprodukční funkce půdy. [online]. [cit. 2022-10-09]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=4009&typ=html

[12.] Dreamstime. [online]. [cit. 2022-08-23]. Dostupné z: https://www.dreamstime.com/huge-pile-wood-chips-against-sky-fresh-woodchips-image190300560

[13.] ROHÁČEK, L. Možnosti využití příměsí pro vodonepropustné betony. Brno, 2016. 71 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

[14.] ČSN EN 197-1. Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. ČNI. 2001

[15.] Zongying Fu, Yongdong Zhou, Xin Gao, Honghai Liu, Fan Zhou, Changes of water related properties in radiata pine wood due to heat treatment, Construction and building materials 227 (2019) 116692

[16.] Sheikh Ali Ahmed, Tom Morén, Margot Sehlstedt-Persson, Asa Blom, Effect of oil impregnation on water repellency, dimensional stability and mold susceptibility of thermally modified European aspen and downy birch wood, J Wood science (2017) str. 74-82

[17.] M.Z. Fan, P.W. Bonfield, J.M. Dinwoodie, J. Boxall, M.C. Breese, Dimensional instability of cement-bonded particleboard: Mechanisms of deformations of CBPB, Cement and Concrete Reasearch 29 (1999) str. 923-932

[18.] ČSN EN 318. Desky ze dřeva – Stanovení rozměrových změn v závislosti na změnách relativní vlhkosti vzduchu. ČNI, 2003

[19.] Cetris. [online]. [2013-12-14]. Dostupné z: https://cetris.lmcore.cz/

[20.] Christensen GN, Kelsey KE (1959) Die Sorption von Wasserdampf durch die chemischen Bestandteile des Holzes. Holz Roh Werkst 17:189–203

[21.] Skaar C (1984) Wood-water relationships. In: Rowell R (ed) The chemistry of solid wood. Advances in Chemistry Series, American Chemical Society, Washington, DC, pp 127–172

[22.] Niemz P (2010) Water absorption of wood and wood-based panels–significant influencing factors. In: Thoemen H et al (eds) Wood-based panels. An introduction for specialists. Brunel University Press, London

[23.] Skaar C (1972) Water in wood, 1st edn. Syracuse University Press, NY

[24.] Suchsland O (2004) The swelling and shrinking of sood. A practical technology primer. Forest Products Society, Madison, WI

[25.] Eckelman CA (1998) The shrinking and swelling of wood and its effect on furniture. Forest Natural Resources 163:1–26

[26.] Manuel Raul Pelaez-Samaniego, Vikram Yadama, Eini Lowell, Raul Espinoza-Herrera, A review of wood thermal pretreatments to improve wood composite properties, Wood Science technologie (2013) 47: str. 1285-1319

[27.] Joseph Adeola Fuwape, James Sunday Fabiyi, Edward Olusola Osuntuyi, Technical assessment of three layered cemen-bonded boards produced from wastepaper and sawdust, Waster Management 27 (2007) str. 1611-1616

[28.] M. Li, V. Nicolas, M. Khelifa, M. El Ganaoui, V. Fierro, A. Celzard, Modelling the hydrothermal behaviour of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork, Industrial crops & Products 142 (2019) 111784

[29.] Lelievre, D., Colinart, T., Glouannec, P., 2014. Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: experimental and numerical analyses. Energy Build. 84, 617–627. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.013.

[30.] Palumbo, M., Lacasta, A.M., Holcroft, N., Shea, A., Walker, P., 2016. Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials. Constr. Build. Mater. 124, 269–275. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat. 2016.07.106.

[31.] Zuend et al., 2010 A. Zuend, C. Marcolli, T. Peter, J.H. Seinfeld Computation of liquid-liquid ekvilibria and phase stabilities: implications for RH-dependent gas/particle partitioning of organic-inorganic aerosols Atmos. Chem. Phys., 10 (2010), pp. 7795-7820

[32.] Hemming and Seinfeld, 2001 B.L. Hemming, J.H. Seinfeld On the hygroscopic behavior of atmospheric organic aerosols ind. Eng. Chem. Res., 40 (2001), pp. 4162-4171

[33.] Hill C (2006) Wood modification. Chemical, thermal and other processes. Wiley, Chichester

[34.] Duygu Kocaefe & Xianai Huang & Yasar Kocaefe, Dimensional Stabilization of Wood, Curr Forestry Rep, (2015) 1:151–161

[35.] Yucheng Peng, Yousoo Han and Douglas J. Gardner. (2010). Sodium silicate coated wood, University of Maine, 04469

[36.] Mario Zauer • Jens Kretzschmar • Livia Großmann • Alexander Pfriem • Andre´ Wagenfuhr. (2014). Analysis of the pore-size distribution and fiber saturation point of native and thermally modified wood using differential scanning calorimetry. Wood Sci Technol. 48:177–193

[37.] Nicolas Hofmann, Theresa Mendel, Fabian Schulmeye, Daniel Kuptz b, Herbert Borchert a, Hans Hartmann b. (2018). Drying effects and dry matter losses during seasonal storage of spruce wood chips under practical conditions. Biomass and Bioenergy 111. Pages 196-205.

[38.] P. Schubert, Y. Efes, The carbonation behaviour of mortars and concrete, Proc RILEM Sym Paper 3 (5) (1976) 4 p

[39.] A. Meyer, Investigation on the carbonation of concrete, Proc Chem Cem Tokyo 3 (1968) 394-401

[40.] Joseph Adeola Fuwape, James Sunday Fabiyi, Edward Olusola Osuntuyi. Technical assessment of three layered cement-bonded boards produced from wastepaper and sawdust. Waste Management 27 (2007) 1611-1616

[41.] Ismail Budiman, Subyakto, Sasa Sofyan Munawar. Cement Bonded Particleboard from Natural and Plantation of Red Meranti. Center for Innovation – Indonesian Institute of Sciences

[42.] Wei YM, Zhou YG, Tomita B. Study of hydration behaviour of wood cement-based composite II : effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood-cement composites. J Wood Sci 2000; 46:444-451.

[43.] Okino EYA, de Souza MR, Santana MAE, Alves MVdS, de Sousa ME, Teixeira DE. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. Cement & Concrete Composites 2004; 26:729-734.

[44.] Jenny Carlsson, Per Isaksson. Simulating fracture in a wood microstructure using a high resolution dynamic phase field model. Engineering Fracture Mechanics 232 (2020) 107030

[45.] Vasas, S. Ovlivnění vlastností stavebních materiálů s organickým plnivem změnami vlhkosti. Brno, 2021. 46 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

[46.] MELICHAR, T.; LÉDL, M.; BYDŽOVSKÝ, J.; DUFKA, A. Effect of use of non-traditional raw materials on properties and microstructure of cement-bonded particleboards. Waste forum, 2020, vol. 2020, no. 4, p. 254-262. ISSN: 1804-0195

[47.] MELICHAR, T.; BYDŽOVSKÝ, J. Vliv prachového odpadu s obsahem silikátové matrice a organického plniva na vlastnosti cementových kompozitů. Waste forum, 2019, roč. 2019, č. 4, s. 378-390. ISSN: 1804-0195.

[48.] MELICHAR, T.; BYDŽOVSKÝ, J.; DUFKA, A. Seldom Used By-product from Trimming Cement-bonded Particleboard Shows Potential for Modifying Building Materials Composition. Waste forum, 2019, vol. 2019, no. 4, p. 368-377. ISSN: 1804-0195

[49.] MELICHAR, T.; MÉSZÁROSOVÁ, L.; BYDŽOVSKÝ, J.; LÉDL, M.; VASAS, S. The effect of moisture on the properties of cement-bonded particleboards made with non-traditional raw materials. JOURNAL OF WOOD SCIENCE, 2021, vol. 67, no. 1, p. 1-18. ISSN: 1435-0211.

[50.] ČSN EN 634-1 Cementotřískové desky – Specifikace – Část 1: Všeobecné požadavky, ČNI, 1997.

[51.] ČSN EN 634-2 Cementotřískové desky – Specifikace – Část 2: Požadavky pro třískové desky pojené portlandským cementem pro použití v suchém, vlhkém a venkovním prostředí, ČNI, 2007.

[52.] ČSN EN 310 Desky ze dřeva. Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu, ČNI, 1995.

[53.] ČSN EN 318 Desky ze dřeva – Stanovení rozměrových změn v závislosti na změnách relativní vlhkosti vzduchu, ČNI, 2003.

[54.] ČSN EN 319 Trieskové a vláknité dosky. Stanovenie pevnosti v ťahu kolmo na rovinu dosky, ČNI 1994.

[55.] ČSN EN 323 Dosky z dreva. Zisťovanie hustoty, ČNI, 1994.

[56.] Cetris. [online]. [cit. 2023-1-12]. Dostupné z: https://www.cetris.cz/pagedata/systems/PPP_CZ_02.pdf?1673626714