



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie

**EKOLOGICKY ŠETRNÝ KOMPOZITNÍ MATERIÁL NA BÁZI
POVRCHOVĚ UPRAVENÉ ŘEPKOVÉ SLÁMY**

**ENVIRONMENT-FRIENDLY COMPOSITE MATERIAL
BASED ON SURFACE-TREATED RAPE STRAW**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Jaroslav Čižmodij Dušek

Doktorský studijní program: P3607 - Stavební inženýrství

Studijní obor: 3911V005 - Fyzikální a materiálové inženýrství

Školitel: Ing. Miloš Jerman, Ph.D.

Praha, 2023

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Jaroslav Čížmodij Dušek

Název disertační práce: Ekologicky šetrný kompozitní materiál na bázi povrchově upravené řepkové slámy

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele Ing. Miloše Jermana, Ph.D.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:

GA 20-12166S Charakterizace kompozitních materiálů na bázi povrchově modifikované řepkové slámy a ekologicky šetrných lepidel

V Praze dne

.....

podpis

PODĚKOVÁNÍ:

Mé poděkování patří zejména vedoucímu práce panu Ing. Miloši Jermanovi, Ph.D., kterému vděčím za rady, připomínky a trpělivost, které mi během zpracování práce věnoval. Dále díky patří kolegům z Katedry materiálového inženýrství a chemie za rady a pomoc související s jejich specializací.

Rád bych též vzpomenul svojí úžasnou manželku, která mi usnadnila psaní této práce svojí péčí o rodinu.

Abstrakt

Práce se zabývá využitím druhotné zemědělské produkce v podobě řepkové slámy ve stavebnictví. V teoretické části je shrnuto využití řepky a statistická data o výsevu této plodiny.

V experimentální části jsou jednotlivě popsány základní vlastnosti tří nově vyvíjených materiálů.

První dva materiály jsou kompozity z řepkové slámy, které se liší pojivovou složkou. Pojivová složka prvního kompozitu byla tvořena kostním kličem modifikovaným lignosulfonátem sodným. U druhého materiálu to byl epoxid s podílem bio složky. U obou těchto kompozitů byl sledován vliv úpravy řepkové slámy. Řepková sláma byla upravena hydrotermálně a louhováním v roztoku hydroxidu sodného. Zajímavé výsledky byly získány pomocí elektronové mikroskopie, které dokazují narušení povrchu řepkové slámy upravené louhováním v hydroxidu a výskyt drobných minerálních krystalků.

Přínosem této práce je kompletní soubor mechanických, tepelných, difuzních a vlhkostních parametrů nově vyvíjených materiálů. Vliv úpravy řepkové slámy se projevil zásadně pouze u absorpce, kdy sláma upravená v roztoku NaOH byla více hygroskopická a zaznamenala vyšší hodnoty bobtnání.

Posledním materiálem byla bezpojivová deska. U tohoto materiálu bylo vyhodnoceno, že nejefektivnější teplota při výrobě je 180 °C. Oproti teplotě 140 °C byly dosažené tahové pevnosti téměř dvojnásobné (12,5 kPa). Zajímavých výsledků bylo také dosaženo při stanovení součinitele tepelné vodivosti, který dosahoval hodnot v suchém stavu cca 0,05 W.m⁻¹.K⁻¹.

Klíčová slova: řepková sláma, kompozity z řepkové slámy, bezpojivové desky

Abstract

The thesis deals with the use of secondary agricultural production in the form of rape straw in the construction industry. The theoretical part summarizes the use of rape and statistical data on the sowing of this crop.

In the experimental part, the basic properties of three newly developed composite materials are described individually.

The first two materials are rape straw composites, which differ in the binder component. The binder component of the first composite was composed of bone glue modified with sodium lignosulfonate. The second material was bonded with epoxy with a bio component. The effect of rape straw treatment was investigated for both composites. The rape straw was treated hydrothermally and by leaching in sodium hydroxide solution. Interesting results were obtained by electron microscopy, which showed the distortion of the surface of the rape straw treated by leaching in hydroxide and the appearance of minerals on the straw surface.

This work contributes to a complete set of mechanical, thermal, diffusion, and moisture parameters of the newly developed materials. The effect of the treatment of rape straw was only significantly evident for absorption, where the straw treated in NaOH solution was more hygroscopic and recorded higher swelling values.

The last material was a binderless board. For this material, a temperature of 180 °C was evaluated as the most efficient manufacturing temperature. Almost twice the tensile strength (12.5 kPa) was achieved compared to 140 °C. Interesting results were also obtained in the determination of the thermal conductivity coefficient, which in the dry state reached values of about $0.05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Keyword: *rape straw, rape straw composites, binderless board*

OBSAH

1. ÚVOD	8
2. CÍLE PRÁCE	10
3. ŘEPKA OLEJKA	11
3.1 Historie a popis rostliny	11
3.2 Využití řepky.....	12
3.3 Statistické údaje	14
3.4 Řepková sláma	15
3.5 Současný stav výzkumu v oblasti řepkové slámy	18
4. METODIKA	20
4.1 Analýza rozměrů.....	20
4.2 Objemová hmotnost a základní fyzikální vlastnosti	21
4.3 Sorpční izotermy a bobtnání	22
4.4 Elektronová mikroskopie	24
4.5 Difúzní vlastnosti	26
4.6 Tepelné vlastnosti	28
4.7 Mechanické vlastnosti.....	29
4.8 Ekotoxicita a biodegradace	31
5. KOMPOZITY Z ŘEPKOVÉ SLÁMY	35
5.1 Klihový kompozit (KK)	35
5.1.1 Stanovení poměru a postup míchání (KK).....	36
5.1.2 Výběr směsi (KK).....	39
5.1.3 Úprava povrchu slámy (KK)	40
5.1.4 Ekotoxicita a biodegradace (KK).....	45
5.1.5 Objemová hmotnost, hustota a pórovitost (KK)	48
5.1.6 Sorpční izotermy a bobtnání (KK).....	49
5.1.7 Difúzní vlastnosti (KK).....	52
5.1.8 Tepelné vlastnosti (KK)	53
5.1.9 Mechanické vlastnosti (KK)	55
5.1.10 Shrnutí výsledků klihového kompozitu	57
5.2 Epoxidový kompozit (EK).....	58
5.2.1 Stanovení poměru a postup míchání (EK).....	58
5.2.2 Ekotoxicita a biodegradace (EK).....	60

5.2.3 Objemová hmotnost, hustota a pórovitost (EK)	62
5.2.4 Sorpční izotermy a bobtnání (EK)	63
5.2.5 Difúzní vlastnosti (EK)	66
5.2.6 Tepelné vlastnosti (EK)	66
5.2.7 Mechanické vlastnosti (EK)	67
5.2.8 Shrnutí výsledků epoxidového kompozitu	68
6. BEZPOJIVOVÁ DESKA Z ŘEPKOVÉ SLÁMY	70
6.1 Postup výroby vzorků	71
6.2 Základní a mechanické vlastnosti	72
6.3 Sorpční izotermy a difúzní vlastnosti	76
6.4 Tepelné vlastnosti	77
7. ZÁVĚR	79
8. POUŽITÁ LITERATURA	82
9. SEZNAM VYOBRAZENÍ	90

1. ÚVOD

Celosvětově stěžejním tématem je bezesporu ochrana životního prostředí. Toto téma nastoluje trend, kdy se přehodnocuje dosavadní vztah člověka k přírodě, což má dopad na veškerou činnost, kterou člověk vytváří. Řada průmyslových odvětví se tak transformuje, aby eliminovala negativní dopady na přírodu. [1].

Stavebnictví je bezesporu jedním z předních odvětví, které se na znečišťování podílí. Vše začíná výrobou stavebních hmot, která bývá extrémně náročná na energetickou spotřebu (například kovy, cihlářské výrobky) a často přitom ještě při jejich výrobě vzniká významné množství emisí skleníkových plynů (například při výrobě cementu). Následuje samotná výstavba, která je nejen energeticky náročná, ale často zatěžuje okolí prachem, hlukem či světelným znečištěním. Provozování dokončených staveb je pak energeticky také náročné. Právě v úspoře energií při provozování budov jsou patrné veliké změny. U novostaveb je dnes již standardem navrhovat stavby jako úsporné nebo mimořádně úsporné. U starší zástavby je pak patrné, že již mnoho budov prošlo revitalizací (zateplení obálky budovy, výměna okenních a dveřních výplní apod.) a mnoho dalších se na revitalizaci chystá. Trendem je pak například využívání tepelných čerpadel pro vytápění a ohřev teplé vody nebo montáž fotovoltaických panelů na střechy domů pro zvýšení energetické soběstačnosti. Mezi další negativní vlivy, které stavebnictví přináší, je nutno zmínit významné požadavky na dopravu. Ať se jedná o dopravu surovin k výrobě stavebních hmot, dopravu výrobků k zákazníkům, ale i odvozy zeminy a suti.

Doprava nebyla nikdy v historii lidstva tak dostupná [2]. Přípraváři staveb sice kalkulují a přemýšlejí nad dopravou materiálů a suti na stavbu a ze stavby, aby výstavba byla co nejefektivnější, ale nemají již šanci dohlédnout na dopravní nároky surovin, které slouží k výrobě stavebních výrobků. Při pohledu do nedávné historie, kdy doprava materiálu ke stavbám byla mnohem obtížnější, se při výstavbě zejména pro bydlení nebo pro zemědělské stavby využívaly hmoty nalézající se blízko stavby. Pro nosné konstrukce se tak ve velkém využíval kámen a dřevo [3].

Mimo kamene a dřeva nacházela uplatnění ve stavebnictví i druhotná zemědělská výroba. Mezi klasické představitele pak lze uvést snopky ze slámy zvané došky, které byly využívány jako střešní krytina. U starých stavení zejména na venkově,

kde přístup ke kameni nebyl snadný, lze dodnes najít domy vyžděné z vepřovic. Tedy nepálených cihel vzniklých směsí jílu, slámy, písku a dalších surovin [3].

Ve druhé polovině kalendářního jara lze zaznamenat žlutou barvu v české krajině. Jedná se o hojně pěstovanou řepku olejku, která právě mezi dubnem a červnem charakteristicky zabarvuje krajinu do žluté barvy [4]. Rostlina se pěstuje primárně pro získání olejnatých semen. Druhotnou surovinou je poté řepková sláma. Vzhledem k množství osevních ploch této plodiny tak vzniká potencionálně zajímavý, regionální materiál v podobě slámy.

Mimo zmíněné slámy, která se historicky na území ČR ve stavebnictví používala, se v současnosti ve stavebnictví prosazuje jiná zemědělská plodina, kterou je konopí. Využití nalézá v rozvlákněné formě jako tepelná izolace nebo pojené směsí vápen a pucolánu jako výplňový materiál do dřevostaveb nebo jako materiál pro výrobu různých tvárnic pod známým pojmem konopný beton. Lokální uplatnění konopí ve stavebnictví je pak přímo úměrné lokálnosti výsevu této plodiny. Vzhledem ke zcela zanedbatelným osevním plochám konopí v ČR je tak právě záměna za řepku zcela logickým krokem.

Kromě dobře zdokumentovaného konopného betonu lze ve vědeckých databázích vidět trend ve zkoumání využití druhotných zemědělských produktů. Společným jmenovatelem všech těchto prací je lokálnost plodiny.

2. CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této práce je nalezení možných způsobů, jak smysluplně využít lokální druhotnou zemědělskou surovinu v podobě řepkové slámy a to pro obor stavebnictví nebo obory příbuzné (např. nábytkářství). Rozbor smysluplného využití zahrnuje i analýzu současného stavu pěstování řepky olejky a posouzení, zda lze její hojný současný výsev očekávat i v budoucnu. Dále se jedná o experimentální vývoj materiálů s co největším podílem řepkové slámy a následné hodnocení vybraných vlastností, které umožní posoudit nejvhodnější možné použití těchto materiálů. Zúžitkování druhotné lokální suroviny ze zemědělství povede k výrobě nových alternativních stavebních materiálů šetrných k životnímu prostředí.

Díličí cíle práce jsou:

- Na základě provedené literární rešerše navrhnout a vyrobit kompozitní materiály z řepkové slámy s optimálními vlastnostmi pro použití ve stavebnictví.
- Doporučit vhodný způsob úpravy povrchu řepkové slámy a posoudit její účinek na fázové rozhraní mezi povrchem slámy a použitým lepidlem.
- Vyhodnotit vliv použitého lepidla a to jak pro pojivo na přírodní bázi, tak pro syntetická pojiva
- Charakterizovat vybrané vlastnosti experimentálně vyrobených materiálů v závislosti na jejich způsobu použití ve stavebnictví.

Výsledky uvedené v této práci byly autorem publikovány v časopisech *Building and Environment*, *Polymers* a *Construction and Building Materials* zařazených v databázi Web of Science a dále pak ve sbornících z mezinárodních konferencí zařazených do databáze SCOPUS (*AIP Conference Proceedings*).

3. ŘEPKA OLEJKA

3.1 Historie a popis rostliny

Řepka olejka je jednou z nejnámějších olejnin pěstována nejčastěji ve své ozimé formě. Existuje i jarní forma, ta se ovšem v našich podmínkách příliš nepěstuje z důvodu nižších výnosů. Jedná se o rostlinu s délkou lodyhy nejčastěji v rozmezí 125 – 200 cm s typicky žlutým květenstvím [5].

Historie pěstování řepky sahá až do středověku. Do konce 18. století se ovšem nerozlišovalo mezi řepkou a řepicí, jelikož tyto druhy byly považované za totožné. Vyobrazení brukvovitých a krmných plodin se našlo například na malbách v Pompejích a Herkulaneum. Na území českých zemí jsou první zmínky o řepce z 15. století. S rozvojem uplatnění svítiplynu, používáním petroleje ke svícení a minerálních olejů k mazání strojů se význam řepky v 19. století prudce snížil. Díky vylepšení technologie pěstování a novým odrůdám se výsevní plochy v druhé polovině 20. století navyšovaly [5].



Obr. 1 Řepka v květu - fotogalerie autora

3.2 Využití řepky

Využití řepky olejné lze rozdělit do čtyř stěžejních oblastí:

- potravinářství
- krmivářství
- oleochemie
- energetické využití

Vylisovaný olej ze semen dobře snáší vyšší teploty při vaření a díky vyšší oxidační stabilitě je oproti jiným olejům trvanlivější. Díky dalším plusům (příznivý poměr kyseliny linolenové : linolové 2:1, atd.) se tak jeho uplatnění v potravinářství i nadále zvyšuje [6].

Extrahované šroty a výlisky společně s drcenými semeny jsou významnou bílkovinnou součástí krmných směsí pro hospodářská zvířata. Překážkou pro užití do krmiv může být nadlimitní množství glukosinolátů (GSL). Avšak díky novým odrudám problémy s obsahem GSL postupně upadají [6].

Pro oleochemii je významná možnost rozkladu olejů a tuků buď hydrolýzou, nebo alkoholýzou. Produkty rozkladu jsou mastné kyseliny, glyceryl a estery mastných kyselin. Z těch pak mají velký význam hydrolýzou uvolněné mastné kyseliny vzhledem k přítomnosti reaktivních dvojných vazeb a rovněž karboxylové kyseliny. Glycerol je významným vedlejším produktem při reesterifikaci řepkového oleje [5].



Obr. 2 Šešule a semena - fotogalerie autora

Chemickou reakcí řepkového oleje s metylalkoholem se získává metylester řepkového oleje (MEŘO) čili bionafta. Jedná se o alternativní palivo velmi podobné motorové naftě s přesně normovanými parametry [5,6].

Od 1. září 2007 bylo v ČR zavedeno povinné přimíchávání biosložky do nafty a benzínu. Nejprve musela veškerá motorová nafta obsahovat minimálně 2 % biosložky. V roce 2009 se podíl biosložky povinně zvýšil na 4,5 % u nafty a 3,5 % u benzínu. Od 1. 6. 2010 byl podíl zákonem stanoven na 6 % pro naftu a 4,1 % pro benzín [7].

Senát schválil změnu zákona, kdy se má povinné přimíchávání MEŘO zrušit ke dni 31. 7. 2022. Vzhledem k povinnosti snižování skleníkových plynů dle zákona 201/2012 (Zákon o ochraně ovzduší), kdy je dodavatel motorového benzínu či nafty povinen ročně snížit emise skleníkových plynů o 6 %, ale bude dodavatel zřejmě nucen i nadále MEŘO do pohonných hmot přimíchávat.

Biomasu z řepky lze také spalovat. Z hlediska palivářského lze šrot a výlisky spalovat buď samostatně, nebo častěji v našich podmínkách ve směsi s hnědým uhlím. Z pohledu pěstitele je však nutné zvážit užití řepkové slámy pro energetická či jiná využití v širším kontextu. Odvoz řepkové slámy znamená také odvoz dusíku, který následně bude na poli chybět. Doplnění dusíku na pole znamená zvýšení nákladů pro zemědělce [5].



Obr. 3 Řepkové pole v květu - fotogalerie autora

3.3 Statistické údaje

Z tabulky 1 je zřejmé, že celková zemědělská osevní plocha se neustále zmenšuje. Tento trend, byť je pomalý, platí nejen pro Českou republiku, ale pro celou Evropskou unii. Za posledních 15 let se celková osevní plocha u nás zmenšila o více než 5 %. Poměr vysetých olejnin, kam řepka spadá, je v čase téměř konstantní vůči celkové osevní ploše. Ze všech olejnin je řepka zdaleka nejvíce osetou rostlinou. Poslední roky je řepka vysetá na necelých 15 % veškeré osevní plochy. Z dalších významných olejnin můžeme zmínit slunečnici, sóju a hořčici.

Tab. 1: Vývoj osevních ploch zemědělských plodin k 31. 5. v ČR [8]

Rok	2006	2011	2021
Osevní plocha celkem (ha)	2 585 685	2 488 141	2 452 133
Olejniny	437 940	464 405	442 310
řepka	292 246	373 386	342 315
<i>slunečnice na semeno</i>	47 068	28 554	17 981
<i>sója</i>	9 641	7 584	19 679
<i>mák</i>	57 786	31 495	43 867
<i>hořčice na semeno</i>	21 167	18 122	15 274
<i>len na semeno</i>	7 869	2 475	1 828
<i>ostatní olejniny</i>	2 164	2 789	1 366
<i>konopí</i>	.	299	204
<i>len pšadný</i>	2 904	.	.
<i>kořeninové rostliny</i>	3 429	4 525	3 403
<i>z toho: kmín</i>	.	4 372	3 183
<i>léčivé rostliny</i>	2 429	4 063	3 845
<i>energetické plodiny jinde neuvedené</i>	.	717	151
<i>ostatní technické plodiny</i>	4 071	601	105

Z tabulky 2 je patrné, že Česká republika patří dlouhodobě do pěti největších producentů řepky v Evropské unii. Největší producenti jsou Německo, Francie a Polsko, tyto 3 státy mají dohromady více než polovinu produkce řepky v Evropské unii. Zatímco poměr vyseté řepky k celkové orné půdě je v EU zhruba 5 až 6 %, v České republice je tento poměr více než trojnásobný.

Tab. 2: Výsevní plochy řepky ve vybraných státech EU [9]

Rok	2011	2021
Orná půda celkem EU27 (ha)	100 142 160	98 781 650*
EU27	6 043 310	5 325 080
Francie	1 556 030	980 130
Německo	1 328 600	1 000 090
Polsko	830 100	993 410
Rumunsko	392 670	438 290
ČR	373 386	342 315
Lotyšsko	250 200	310 480
<i>*hodnota z roku 2020, jelikož rok 2021 ještě nebyl uveřejněn</i>		

3.4 Řepková sláma

Ačkoliv se kvůli eliminaci ztrát doporučuje sečení těsně pod spodními šešulemi, praxe bývá odlišná [6]. Během sklizně tak dochází k tomu, že část stonku s kořenem zůstává nedotčena a následně se zaorává. Větší část stonku je ovšem posečena a kombajnem rozfoukaná buď na pole, nebo ji lze zachytávat k jiným účelům než k zaorání, jak je vidět na obrázku číslo 4.

Rumunský vědec Bogdan Tofanica ve svém článku věnovanému řepce uvádí hodnotu 3 až 10 tun suché biomasy na hektar. Při jím uváděné objemové hmotnosti 250 až 300 kg.m⁻³ se tak jedná o přibližně 10 až 40 m³ řepkové slámy na hektar [10]. Kvalifikovaným odhadem při účasti na sklizni bylo odhadnuto, že z jednoho hektaru lze zachytit přibližně 90 m³ řepkové slámy, tedy značně více než uvádí rumunský vědec. Při výsevu na ploše 342 315 ha (rok 2021) se tedy orientačně jedná o více než 30 mil. m³ řepkové slámy. Pro zajímavost v roce 2020 bylo vytěženo 35,8 mil. m³ dřeva [11]. Toto množství bylo navíc ovlivněno probíhající kalamitou, standardně je roční těžené množství dřeva na zhruba poloviční úrovni.

Množství zachycené slámy bude ovšem záviset na mnoha faktorech jako například na:

- Odrůdě
- Typu kombajnu
- Polehlosti porostu
- Systému zachycování

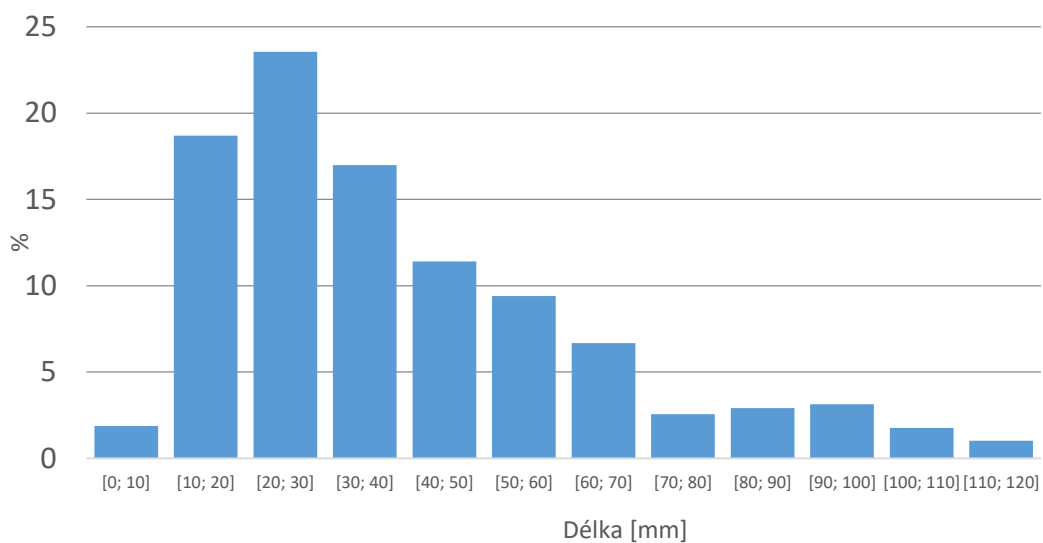


Obr. 4 Sklizeň - fotogalerie autora

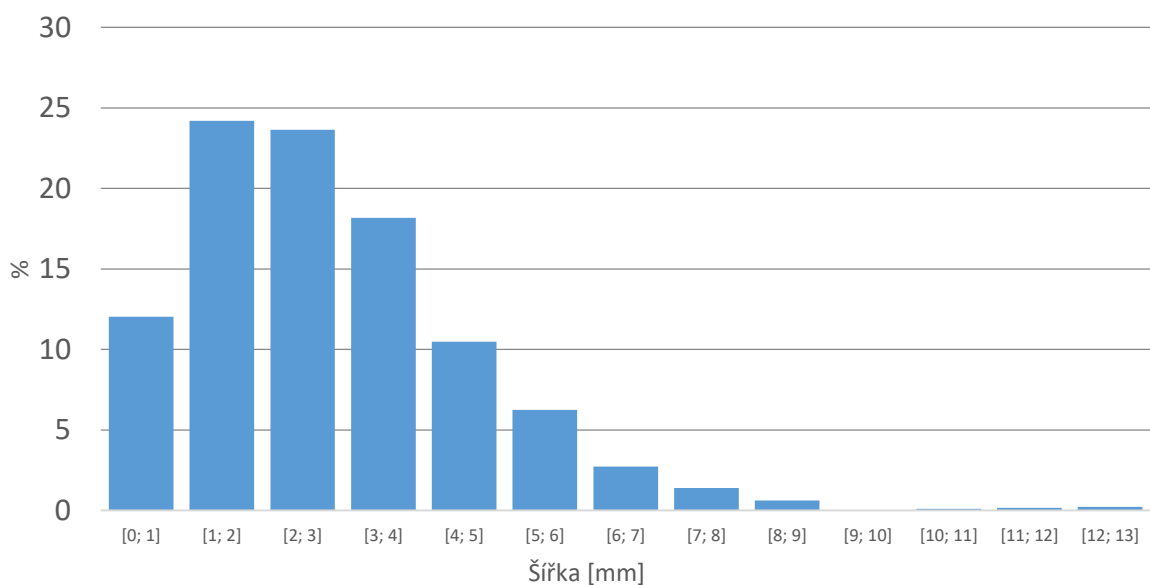
Jedná se tedy o stonky řepky značně dřevnatého charakteru. Přirozená hmotnostní vlhkost slámy byla změřena 10,7 %. Řepková sláma byla pro laboratorní účely zachycována a následně i skladována ve velkoobjemových vacích. Oblast, ze které řepková sláma byla do laboratoře dodána, leží poblíž obce Polepy v Ústeckém kraji. Pro zajištění vhodné reprezentativnosti byla sláma homogenizována ručním mícháním. Poté nasypána na desku a rozdělena na čtyři stejné části. Dvě části byly odstraněny a zbylé dvě části se smísily a celý postup se opakoval, dokud nebylo dosaženo požadovaného množství. Velikost a tvar řepkové slámy byly analyzovány pomocí skeneru Olivetti D-Color MF 283 (Telecom Italia) a softwaru NIS Elements BR

5.10 (Laboratory Imaging, Praha). Před analýzou byly odstraněny nejmenější částice. Pro analýzu bylo použito 250 g vzorku.

Jmenovitý průměr a délka slámy je znázorněna na obrázcích 5 a 6. Délka slámy byla v rozmezích 0 až 120 mm, zatímco nejvyšší zastoupení délky bylo v rozsahu 10 až 60 mm. Průměr částí stonků se pohyboval od 0 do 13 mm a nejvyšší výskyt byl v rozmezí 1 až 6 mm.



Obr. 5 Rozdělení délky částic řepky – publikováno autorem [12]



Obr. 6 Distribuce průměru částic řepky – publikováno autorem [12]

Z tabulky 3 níže je vidět, že samotná řepková sláma se skládá zejména z holocelulózy a ligninu. Holocelulóza je označení pro součet celulózových a hemicelulózových řetězových polymerních buněk. Lignin je oproti tomu trojrozměrná amorfni látka, která spojuje celulózu a vyplňuje mezibuněčné prostory. Obecně lze říci, že čím vyšší je v rostlině množství ligninu, tím bude vyšší tvrdost, a čím vyšší bude množství holocelulózy, tím bude vyšší pevnost. Extraktivní látky se obecně označují látky, které jsou vyluhovatelné, nejčastěji mezi ně patří pektiny, tříslovinny a jiné. Mezi popel obvykle patří nespalitelné a nevyluhovatelné prvky jako N, Mg, K a Ca.

Tab. 3: Složení slámy v % hmotnosti [13]

Druh slámy	Popel	Extraktivní látky	Lignin	Holocelulóza
Řepková délky 2-5 mm	7,08	14,11	16,99	61,72
Pšeničná	4,70	-	15,30	74,50
Konopné lýko	5,00	12,00	2,90	77,50
Rýžová	9,20	-	21,90	60,70
Lněné lýko	1,00	3,60	5,10	90,00

3.5 Současný stav výzkumu v oblasti řepkové slámy

Na rozdíl od velmi dobře zdokumentovaného konopného betonu, kde své využití ve stavebnictví našlo konopné pazdeří, je informací o řepkové slámě řádově méně. Za výzkumem věnujícím se řepkové slámě velmi často stojí jen úzký okruh autorů.

V článku zabývajícím se závislostí vybraných parametrů na modifikaci řepkové slámy, bylo zjištěno, že pokud je sláma ošetřena roztokem NaOH, vařena v čisté vodě nebo bez ošetření, vykazuje odlišné složení prvků ve slámě i na povrchu [14].

V článku zabývajícím se nahrazením části dřevěné hmoty řepkovou slámou v deskách, výsledky ukázaly, že čím vyšší je poměr řepkové slámy, tím se snižují mechanické vlastnosti desky. Dále bobtnání a vodní absorpce byly vyšší u vzorků s větším zastoupením řepky ve směsi [15]. Při obdobném experimentu (nahrazení dřevité složky v dřevoplastových - WPC deskách) výsledky ukazují, že desky z řepkové

slámy měly výrazně nižší mechanické vlastnosti, než tradiční desky s dřevěnou výplní [16].

Zajímavý experiment provedli čeští vědci, kteří vyrobili desky z řepkové slámy a polyester-epoxidového lepidla. Navíc použili řepkovou slámu modifikovanou vařením ve vodě a louhováním v roztoku NaOH. Desky se vyráběly stlačením při tlaku 2,3 MPa. Tyto desky poté porovnali s OSB deskou a dřevotřískovou deskou používanou v truhlářství. Všechny desky měly tloušťku 12 mm. Desky z řepkové slámy obstály proti komerčním deskám velmi dobře a dokonce v ohybových vlastnostech desky z modifikované řepky komerční desky předčily [17]. Úplně stejný koncept výzkumu, se stejnými materiály ovšem zaměřený na jiné vlastnosti, mají na svědomí také čeští vědci. Z jejich výsledků je patrné, že desky z modifikované řepky měly vyšší hodnoty bobtnání, nasákavosti a absorpce než desky ze slámy bez úpravy. Desky ze slámy ošetřené roztokem NaOH vykazovaly nejvyšší hodnoty adheze mezi slámou a lepidlem [18]. Při porovnání desek z pohledu modulu pružnosti se ovšem ukázalo, že desky z řepkové slámy nedosahovaly hodnot, aby mohly být kvalifikovány do kategorie P2 dle normy EN 312 na rozdíl od OSB a dřevotřískových desek [19].

Zřejmě nejobsáhlejší článek vydala polská vědkyně Dorota Dukarska, která publikovala článek, kde na deskách z řepkové slámy pojené fenol-formaldehydovým lepidlem měřila mechanické vlastnosti, vybrané tepelné a difúzní vlastnosti v závislosti na objemové hmotnosti. Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu a modulu pružnosti byly nejvyšší u desek s nejvyšší objemovou hmotností $650 \text{ kg.m}^{-3} = 20,6 \text{ MPa}$ a $3\,610 \text{ MPa}$, což jsou hodnoty obdobné jako u desek OSB/3. S klesající objemovou hmotností tyto mechanické hodnoty také klesaly. Oproti tomu součinitel tepelné vodivosti byl nejnižší u vzorku s nejmenší objemovou hmotností $450 \text{ kg.m}^{-3} = 0,065 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Deska s objemovou hmotností 650 kg.m^{-3} měla tuto hodnotu $0,08 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Bobtnání se také zvyšovalo s rostoucí objemovou hmotností, od 11,6 % (450 kg.m^{-3}) až po 14,7 % (650 kg.m^{-3}) [20].

4. METODIKA

Jelikož cílem práce bylo nalezení možnosti, jak efektivně a rozumně využít řepkovou slámu ve stavebnictví, byla většina materiálových parametrů stanovena dle uváděných norem, ale některé byly s ohledem na vlastnosti daného materiálu prováděny experimentálně, nebo byla zvolena jednodušší zkouška. Cílem bylo vyvinout nový materiál s co největším využitím řepkové slámy a co nejlépe charakterizovat zásadní vlastnosti, které mohou napovědět, jak lze takový materiál uvést na trh.

4.1 Analýza rozměrů

Řepková sláma, která pochází z obce Polepy v úrodném regionu Polabí, byla do laboratoře dodána ve velkoobjemových vacích o objemu 1 m³. Obsah vaku byl vysypán a ručně promíchán. Následně se kvartací dosáhlo požadovaného množství vzorku 125 g.

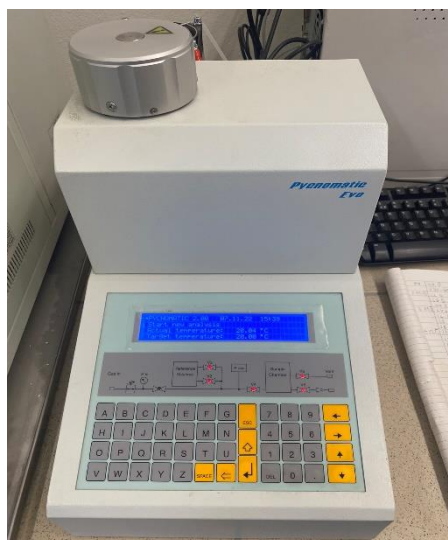
Vzorek o hmotnosti 250 g se nasypal na skener Olivetti D-Color MF 283 a pomocí softwaru NIS Elements BR 5.10 byla provedena analýza rozměrů. Výsledek analýzy je patrný z obrázku 5 a 6 v předchozí kapitole 3.4.



Obr. 7 Příklad obrazové analýzy – publikováno autorem [21]

4.2 Objemová hmotnost a základní fyzikální vlastnosti

Hustota ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] byla zjištěna pomocí héliového pyknometru. Vysušený vzorek se zvážil a umístil do válcové komory o známém objemu. Do struktury rozemleté slámy proniknul za specifického tlaku inertní plyn helium. Z objemu vzorku a objemu helia plně automatický pyknometr Pycnomatic Evo následně vypočte hustotu.



Obr. 8 Héliový pyknometr Pycnomatic Evo - fotogalerie autora

Pro získání objemové hmotnosti ρ_V [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] byla zkušební tělesa klimatizována při teplotě $23\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu $(50 \pm 5)\%$. Objem tělesa V [m^3] se vypočetl ze změřených hodnot s přesností 0,5 %. Hmotnost m [kg] byla zaznamenána v kilogramech a vážena s přesností 0,5 %. Objemová hmotnost se vypočte podle vztahu:

$$\rho_V = \frac{m}{V} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$$

Objemová hmotnost byla měřena v souladu s ČSN EN 1602.

Celková pórovitost byla vypočtena ze vzorce:

$$\psi = \left(1 - \frac{\rho_V}{\rho}\right) \cdot 100\% \quad [\%]$$

Pro zjištění nasákavosti byly vzorky odebrány a nařezány dle normy EN 326-1. Jednalo se o vzorky tvaru kvádru. Podstava byla tvořena čtvercem o straně 50 ± 1 mm. Vzorky byly temperovány při vlhkosti vzduchu 65 ± 5 % a teplotě 20 ± 2 °C, dokud se hmotnost měřena v intervalu 24 hodin nelišila méně než o 0,1 % hmotnosti vzorku. Před uložením do nádoby s vodou byly vzorky zváženy a následně byly ponořeny do vody s pH 7 ± 1 a teplotou 20 ± 1 °C. Horní stěna vzorku byla 25 mm pod hladinou. Vzorky se vzájemně nedotýkaly a bylo zamezeno jejich opírání se o boky stěn a dna. Po 24 hodinách se vzorky z vody vyjmuly a byla odstraněna povrchová voda. Hmotnostní nasákavost se následně vypočetla dle vzorce:

$$w_m = \frac{(m_w - m_d)}{m_d} \cdot 100 \quad [\%]$$

Kde w_m je nasákavost vyjádřena v %

m_d je hmotnost temperovaného vzorku před uložením do vody v kg

m_w je hmotnost vzorku povrchově usušeného po 24 hodinách uložení ve vodě kg

4.3 Sorpční izotermy a bobtnání

Křivka sorpční izotermy názorně ukazuje schopnost materiálu přijímat vzdušnou vlhkost. Jedná se o závislost relativní vlhkosti vzduchu a rovnovážného obsahu vlhkosti. Metoda byla inspirována metodou popsanou v článku pana Roelse [22]. V této práci byly konstruovány pouze adsorpční izotermy. Vzorky byly nejdříve vysušeny, následně se zvážila hmotnost m_0 . Velikost vzorků byla poměrně malá a pohybovala se v řádu centimetrů. Vzorky se zvláště zvážily v každém prostředí až do rovnovážného stavu. Rovnovážný stav nastává, když dvě po sobě jdoucí měření (nejméně po 24 hodinách) nevykazují rozdíl ve změřené hmotnosti větší než 0,1 %. Pro každé prostředí se vypočte hmotnostní vlhkost dle následujícího vzorce:

$$w_m = \frac{m_w - m_0}{m_0} \quad [-]$$

Kde w_m je hmotnostní vlhkost pro každé prostředí

m_0 je hmotnost vysušeného vzorku v kg

m_w je hmotnost vzorku v prostředí v rovnovážném stavu v kg

Pro zajištění požadované vlhkosti, byly vzorky umístěny do exsikátorů s atmosférou o známé aktivitě vody (nasyčeným roztokem). Jednotlivé roztoky soli s uvedenou relativní vlhkostí prostředí v exsikátoru:

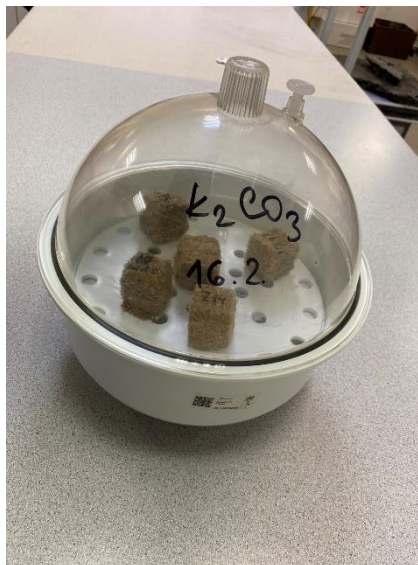
LiCl – 12 %

K_2CO_3 – 44 %

NaCl – 75 %

KCl – 85 %

K_2SO_4 – 98 %



Obr. 9 Exsikátor se vzorky - fotogalerie autora

Pro vláknité (bezpojivové) materiály byla použita metoda pro stanovení bobtnání v souladu s normou ČSN EN 317. Postup odebrání a klimatizování vzorků je popsán v předchozí kapitole 4.2. Vztah pro výpočet dle uvedené normy bobtnání je:

$$G_1 = \frac{(t_2 - t_1)}{t_1} \cdot 100 \text{ [\%]}$$

Kde G_1 bobtnání vyjádřeno v %

t_2 je tloušťka zkušebního tělesa po ponoření v mm

t_1 je tloušťka zkušebního tělesa před ponořením v mm

Vzorky spojené lepidlem nejsou určeny ke dlouhodobému styku s vodou. Proto na těchto materiálech nebylo možné použít normovou metodu popsanou výše. Z tohoto důvodu byla použita experimentální metoda. Bobtnání lze popsat jako změny délky s rostoucím obsahem vlhkosti materiálu. Opakem pak je smrštění při vysychání. Zkouška byla proto inspirována normou ČSN EN 680. Měření bobtnání probíhalo na vzorcích o velikosti čtvercové podstavy 50 x 50 mm a výšce 25 mm. Měřena byla změna tloušťky materiálu. Vzorky v jednotlivých prostředích byly v ustáleném stavu změřeny s přesností na desetiny milimetru. Pro každé prostředí pak bylo zjištěno bobtnání B dle vzorce:

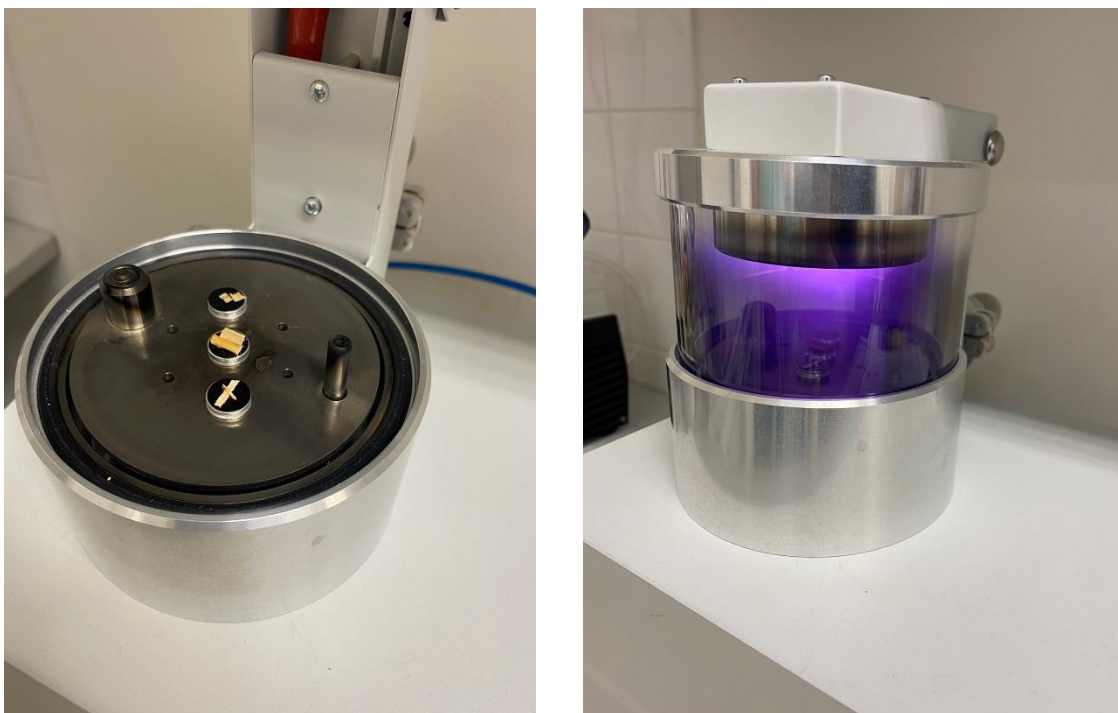
$$B = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \quad [-]$$

Kde d_1 je tloušťka vzorku v daném prostředí v mm

d_0 je tloušťka vzorku při relativní vlhkosti 11 % v mm

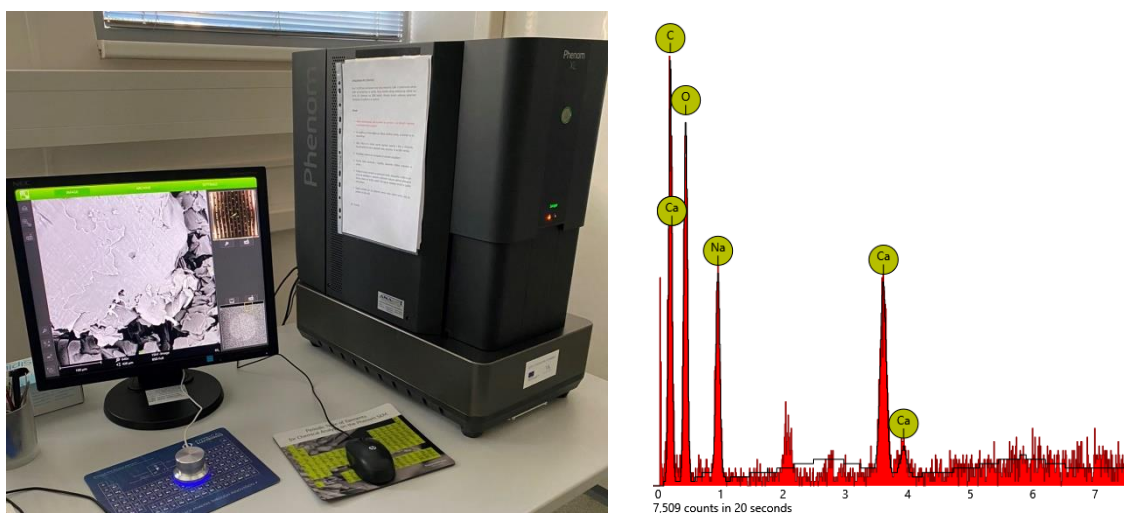
4.4 Elektronová mikroskopie

Slouží jednak k přiblížení povrchu vzorku 1: 100 – 1: 1 000 000 a také k prvkové analýze. Zcela zásadní pro tuto metodu je výběr vzorků. Vzhledem k tomu, že se jedná o vzorky velikosti v řádu milimetrů, je zcela zásadní vybrat vzorek s ohledem na účel zkoumání. Vzorky byly nejdříve vysušeny ve vakuové sušárně. Následovalo nanesení vodivé vrstvy naprášením vzácných kovů (zlata a palladia, nebo uhlíku) v přístroji zvaném naprašovačka, který je zobrazen na obrázku 10. Následně se vzorky umístily do elektronového mikroskopu Phenom XL, který je vidět na levé části obrázku číslo 11 (vedle monitoru).



Obr. 10 Napařovačka Quorum - *fotogalerie autora*

Nanášením vzácných kovů v napařovačce se zamezí spálení povrchu vlivem dopadajících elektronů. Díky energiově disperznímu detektoru dokáže přístroj určit jednotlivé prvky nacházející se na povrchu vzorku.



Obr. 11 Pohled na mikroskop s monitorem a ukázka prvkové analýzy - *fotogalerie autora*

4.5 Difúzní vlastnosti

Pro stanovení faktoru difúzního odporu μ [-] a součinitele difuze vodní páry D [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] byla použita metoda dle ČSN EN ISO 12572. Principiálně se jedná o uzavření vzorku mezi dvěma prostředími s rozdílnou relativní vlhkostí. Následně se sledují úbytky nebo přírůstky hmotnosti, dané difúzí vodních par skrze vzorek.

Nádoba, do které je vzorek umístěn, může mít různé tvary. V našem případě se jednalo o nerezové nádoby hranatého tvaru pro vzorky s půdorysným tvarem čtverce 100 x 100 mm.



Obr. 12 Připravený vzorek na difuze - *fotogalerie autora*

Minimální plocha vzorku nesmí být menší než $0,005 \text{ m}^2$ a tloušťka vzorku menší než 20 mm. Vzorky z řepkové slámy byly čtvercového průřezu o délce strany 100 mm a tloušťce 20-30 mm. Jelikož plocha vzorku je menší než $0,05 \text{ m}^2$, muselo být měřeno minimálně 5 vzorků. Celé měření včetně přípravy vzorků bylo realizováno v prostředí o teplotě $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $50 \pm 5 \%$.

Při metodě dry cup, kdy vnitřní prostředí v nádobě je sušší, byl jako vysoušedlo použit silikagel [RH 5 %]. Při reverzní metodě wet cup je standardně v nádobě používán roztok K_2SO_4 nebo voda. Vzhledem k povaze zkoumaných materiálů, které vykazují velké objemové změny se změnou vlhkosti, byl použit roztok NaCl [RH 75 %] pro zachování objektivitu zkoušky. Spára mezi vzorkem a hranou nádoby byla pečlivě vytmelena, aby byl zajištěn jednosměrný transport. Toto vytmelení je dobře viditelné

na obrázku 12. Po přípravě vzorku následovalo jeho periodické vážení. Vážení probíhá tak dlouho, dokud se pět po sobě jdoucích měření neliší o méně než 5 %. Difuzní vlastnosti se pak vypočítají následovně:

$$\mu = \frac{D_a}{D}$$

$$D = \frac{\delta_m \cdot R \cdot T}{M}$$

$$\delta_m = \frac{\Delta m \cdot d}{t \cdot S \cdot \Delta p_v}$$

Δm [kg] je přírůstek hmotnosti

d [m] je tloušťka vzorku

t [s] je čas

S [m²] je plocha vzorku

Δp_v [Pa] je rozdíl parciálního tlaku

D_a [m²/s] je koeficient difuze vodní páry při teplotě vzduchu 25 °C = 2,82 x 10⁻⁵

R [Pa·m³·mol⁻¹·K⁻¹] = 8,314 je plynová konstanta

T [K] je teplota

M [kg/mol] = 0,01802 je molární hmotnost vody

μ [-] je faktor difuzního odporu

D [m²·s⁻¹] je součinitel difuze vodní páry

δ_m [s] je součinitel difuzní vodivosti

Dle normy musí pro propustné materiály následovat korekce koeficientem, jenž závisí na tloušťce vzduchové mezery mezi vzorkem a médiem na dně nádoby. Odpor vrstvy nad miskou mohl být zanedbán, jelikož ve zkušební komoře byla rychlost vzduchu vyšší než hodnota předepsaná normou EN ISO 12572. Vzorec pro korekční koeficient:

$$\delta_{m,corr} = \frac{d}{\frac{t \cdot S \cdot \Delta p_v}{\Delta m} - \frac{d_a}{\delta_a}}$$

d_a [m] je tloušťka vzduchové vrstvy

δ_a [kg m⁻¹ s⁻¹·Pa⁻¹] = 1.993 x 10⁻¹⁰ je propustnost vodní páry při teplotě vzduchu 25 °C

4.6 Tepelné vlastnosti

Pro zjištění součinitele tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] a měrné tepelné kapacity c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] byla vybrána nestacionární metoda. Při zkoumání současného stavu poznání obdobných materiálů, byly nestacionární metody pro stanovení tepelných vlastností v publikacích použity častěji. Nespornou výhodou této metody je jednoduchost a rychlost. Podstata metody spočívá v analýze teplotní odezvy vyvolané pulsy tepelného toku. Pro měření byl použit přístroj Isomet 2104 s plošnou sondou. Jak součinitel tepelné vodivosti, tak měrná tepelná kapacita byly měřeny i v závislosti na vlhkosti.

Vzorky byly sušeny při teplotě 50 °C. Za suché vzorky byly považovány takové vzorky, kdy se po dvou po sobě jdoucích měřeních hmotnost nelišila o méně než 0,1 %. Tepelné vlastnosti pak byly stanoveny v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu vyšší vždy o 20 % až do relativní vlhkosti 98 %, vyjma materiálů, kde byl použit kostní klič. Vlhkost prostředí byla nastavena v klimatické komoře s regulovanou teplotou a vlhkostí a teplota byla držena na konstantních 20 °C.

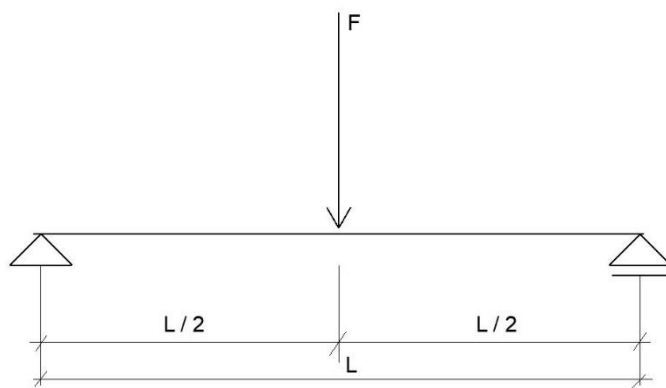


Obr. 13 Isomet 2104 - fotogalerie autora

4.7 Mechanické vlastnosti

Jelikož kompozity z řepkové slámy jsou podobné deskám na bázi dřeva, bylo pro stanovení mechanických parametrů vycházeno z normy ČSN EN 310 s názvem: „Desky ze dřeva. Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu.“

Pro zkoušku byly vyrobeny vzorky o velikosti 12 x 50 x 300 mm. Jednalo se o klasické statické schéma, kde osamělá síla vyvozená lisem působila ve středu prostého nosníku, viz obrázek 14. Pro stanovení mechanických vlastností byl použit přístroj FP 100.



Obr. 14 Zatěžovací schéma

Délka rozpětí podpěr byla 240 mm a rychlost zatěžování byla 0,15 mm / min. Pro výpočet modulu pružnosti E_m [MPa] a ohybové pevnosti f_m [MPa] byly použité následující vztahy:

$$f_m = \frac{3F_{max}L}{2bt^2}$$

$$E_m = \frac{(F_2 - F_1) L^3}{4bt^3(a_2 - a_1)}$$

L [mm] je vzdálenost středu podpěr

b [mm] je šířka vzorku

t [mm] je výška (tloušťka) vzorku

F_{\max} [N] je maximální síla při mezi pevnosti

$F_2 - F_1$ [N] je přírůstek zatížení do meze úměrnosti, F_1 je přibližně 10 % a F_2 je přibližně 40 % maximálního zatížení.

$a_2 - a_1$ [m] je přírůstek průhybu uprostřed rozpětí

U vláknitých materiálů byla zjišťována pevnost v tahu kolmo k rovině desky dle normy ČSN EN 1607. Zkušební těleso je upevněno mezi dvě tuhé desky nebo bloky, které jsou upevněny do zkušebního zařízení (přístroj FP 100). Pro výpočet pevnosti se zaznamená největší tahová síla. Počet zkušebních vzorků byl 5 kusů. Pevnost σ_{mt} [kPa] se vypočítá dle normového vzorce:

$$\sigma_{mt} = \frac{F_m}{A} = \frac{F_m}{l \times b}$$

Kde je

F_m [kN] největší zaznamenaná tahová síla

A [m²] plocha průřezu zkušebního tělesa

l, b [m] délka a šířka zkušebního tělesa



Obr. 15 Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky - *fotogalerie autora*

4.8 Ekotoxicita a biodegradace

Jako referenční vzorek byla použita deionizovaná čistá voda (odpor při 25 °C > 18,2 M Ω .cm), tato voda byla také použita k získání výluhů. Ke stanovení množství vyluhovaných kovů byl použit emisní spektrometr (ICP-OES) s indukčně vázaným plazmatem Agilent 5150 SDVD. Zařízení bylo vybaveno SeaSpray skleněným nebulizérem a automatickým vzorkovačem SPS 4 (Agilent Technologies) [23].

Výluh ze vzorků byl získán v souladu s normou ČSN EN 12457-4. Při přípravě výluhu byl zkoušený materiál smíchán s vodou v hmotnostním poměru 1:10, tedy 100 g pevného vzorku bylo smícháno s 1 l vody. Následně byl vzorek ve vodě po dobu 24 hodin míchán automatickým přístrojem Reax 20/4 (Heidolph Instruments, Schwabach, Germany). Po dokončení míchání byl výluh filtrován přes filtrační papír (Whatman, grade 6). Výluhy byly následně použity pro ekotoxikologické testy a ke zjištění pH [20]. Pro ekotoxikologické zkoušky byly použity:

Kvasinky *Saccharomyces cerevisiae* RIBM BP11 daroval VÚPS s.r.o.. Kvasinky byly kultivovány v roztoku sacharózy (400 g.l⁻¹) a destilované vodě při teplotě 35 °C. Odpovídající objem kultury kvasinek o hustotě 100 000 buněk/ml byl smíchán s 20 ml roztoku sacharózy. Všechna měření, i včetně měření kontrolních (referenčních), byla provedena třikrát. Následně byly vzorky zavíčkované a uloženy v biologickém inkubátoru při teplotě 35 °C po dobu 24 hodin. Počet kvasinkových buněk byl měřen spektrofotometricky (přiblížení 600 nm) pomocí spektrofotometru Yenaway 3600. Vlnová délka pro měření absorpance byla použita na základě literární rešerše [24]. Stejně vzorky bez kvasinek byly analyzovány jako slepé pro měření koncentrace kvasinek a získané výsledky byly porovnány s kalibrační křivkou, která byla sestrojena pomocí sady kalibračních roztoků obsahujících 20, 10, 5, 2,5 a 1,25 x 10⁶ buněk.ml⁻¹ [25].



Obr. 16 Kvasinky druhu *Saccharomyces cerevisiae*

Efípie žábřonožky solné (*Artemia salina*) byly zakoupeny v Easyfish s.r.o. (Kyjov). Deset čerstvě narozených korýšů bylo umístěno do kontrolního média z roztoku NaCl. Korýši mladší 24 hodin byli umístěni do předem provzdušněné vody. Samotný test byl prováděn po dobu 48 hodin. Sledovaným parametrem byla mortalita a imobilizace po 24 a 48 hodinách v testovaném výluhu. Pro kontrolní měření bylo také použito 10 jedinců/nádoba [23].



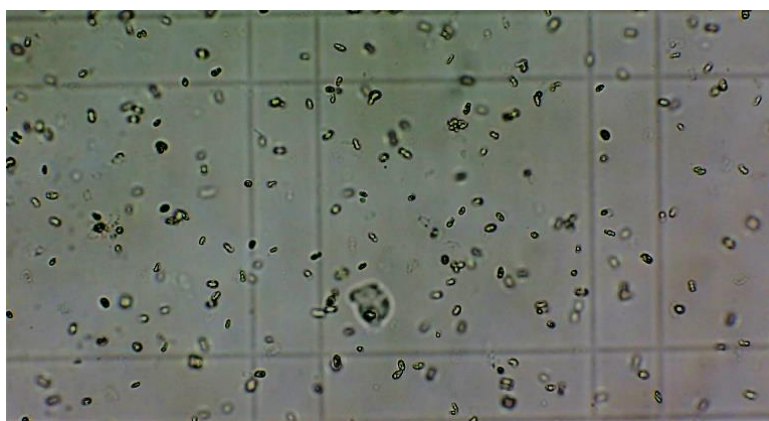
Obr. 17 Žábřonožka solná

Semena Hořčice seté (*Sinapis alba*) byla zakoupena u společnosti Osiva-semena s.r.o. (Praha). Semena byla předklíčena a v počtu 15 kusů umístěna na navlhčeném filtračním papíru do petriho misky. Následně byly vzorky umístěny do inkubátoru při teplotě 20 ± 2 °C po dobu 96 hodin bez přítomnosti světla. Po této době byla měřena délka kořenů. Pro vzorky a kontrolu byly použity tři triplikáty [23].



Obr. 18 Semena druhu Hořčice setá

Sladkovodní řasa *Desmodesmus subspicatus* byla zakoupena od Botanického ústavu AV pracoviště Třeboň. Studované kultury byly smíchány s čirým kultivačním médiem tak, aby koncentrace byla 25 g.l^{-1} . Test byl proveden v biologickém inkubátoru při teplotě $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a osvětlením $4\,500 \text{ [lx]}$ po dobu 72 hodin. Následně byla biomasa vyhodnocena při vlnové délce 680 nm pomocí spektrofotometru Yenaway 3600. Při této vlnové délce byl pozorován nejvyšší vrchol pro zásobní roztok ($10\,000 \text{ buněk.ml}^{-1}$). Stejně vzorky bez řas byly použité jako referenční pro stanovení koncentrace. Získané výsledky byly porovnány s kalibrační křivkou, která byla zkonstruována pomocí sady kalibračních roztoků obsahujících $10, 5, 2,5, 1,25, 0,625$ a $0,3125 \times 10^3 \text{ buněk.ml}^{-1}$ [25].



Obr. 19 Řasy rodu *Desmodesmus subspicatus*

Pro biodegradaci byly použity nspecifikované vzdušné plísně. Na konci inkubační doby byla provedena vizuální analýza plísňového mycelia pomocí stereomikroskopu. Výsledek byl kategorizován na stupnici 0 až 5, kde 0 znamená žádný růst a 5 znamená silný růst plísni dle ČSN EN ISO 846 [23].

5. KOMPOZITY Z ŘEPKOVÉ SLÁMY

5.1 Klihový kompozit (KK)

Při výběru lepidla bylo zohledněno zejména environmentální hledisko. Z tohoto důvodu byl vybrán právě kostní kliš, jelikož při použití tradičních pojiv (cement, vápno) vznikají směsi s velmi vysokým obsahem pojiva ve směsi, u kterých při výrobě vznikají značné emise oxidu uhličitého, což je neekologické a v rozporu se současným směřováním lidského úsilí.

Při experimentu s cementovým pojivem se prokázalo, že k dosažení byť minimálních pevností, bylo potřeba enormní množství pojiva. Při zjišťování poměru mezi plnivem a pojivem se ukázalo, že ideální poměr je 15 %, tedy na 100 g cementu připadalo 15 g řepkové slámy (vodní součinitel činil 0,5). Objemově byl tento poměr zhruba 1 : 7 (cement : řepková sláma). Při výsledné objemové hmotnosti vzorků $1\ 100 \pm 70\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ bylo cementu ve směsi okolo 900 kg, což je více než u ultra vysoko hodnotných betonů (UHPC).

Výše popsaný experiment s použitím cementu byl inspirován ve světě známým konopným betonem, který již svojí tradici a uplatnění ve stavebnictví má. Ovšem i u tohoto materiálu je nevýhodou poměrně vysoké množství pojivové složky, kdy typická směs je tvořena přibližně (bráno hmotnostním podílem) 35 % pojivem (směs hydraulického vápna s příměsemi), 15 % plnivem (konopné pazdeří) a 50 % záměsové vody. Nevýhodou jsou velmi nízké pevnosti [26, 27, 28]. Směsi organických plniv s hydraulickými pojivy mají navíc pomalý nárůst pevností [29]. Ze všech těchto důvodů bylo odstoupeno od úvah o použití konvenčních pojiv a přešlo se k použití kostního klišu.

Kostní kliš je historicky používané lepidlo zejména mezi truhláři, a to ke klížení dých a překližek. Uplatnění v dnešní době nalézá zejména mezi restaurátory. Kliš se ve studené vodě nerozpouští, ale bobtná. Hmotnostní nasákavost dosahuje hodnot 100 % i vyšších. Při zahřátí na teplotu 35 – 50 °C se nabobtnalý kliš rozpouští a po vychladnutí zrosolovává. Kliš je koloidní látka reversibilní a řadí se mezi nejstálejší a nejtrvanlivější organické látky. Umělecká díla lepená klišem vydrží i stovky let, navíc stářím se kliš ustaluje a ve vodě bobtná méně [30].

Klihy se vyrábí z kolagenních proteinů, které jsou obsaženy v pojivových tkáních všech savců a ryb. Mezi tyto tkáně patří kosti, chrupavky, vaziva, šlachy, rohovina a kůže. Kolagenní látky se extrahují horkou vodou. Hlavní složky pojiva jsou kolagen, elastin a glykosaminoglykany. K výrobě vzorků byl použit kostní klich značky BALTECH od výrobce BARVY A LAKY HOSTIVAŘ, a.s. [30].

Při výzkumu bio izolace z bambusových vláken spojených kostním klichem se prokázalo, že směs modifikovaná lignosulfonátem sodným dosahuje až dvojnásobných ohybových pevností než směs bez lignosulfonátu sodného. Modifikovaná směs měla dále vyšší hodnoty modulu pružnosti a také nepatrně vyšší hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Jako optimální se prokázala směs 70 : 21 : 9 (plnivo : kostní klich : lignosulfonát sodný), stanovená v % hmotnosti [31]. Dosažené výsledky jsou podpořeny a doloženy mnoha dalšími vědeckými pracemi, kde tato interakce vede ke zvýšení mechanických vlastností a voděodolnosti [32] [33] [34].

Lignosulfonáty se získávají jako vedlejší produkty při zpracování dřeva. Zejména jde o proces pro bisulfitového rozvlákňování dřevní buničiny, který se používá při separaci čistých celulózových vláken rozpuštěním ligninu a hemicelulózy. Ve stavebnictví se lignosulfonáty používají jako plastifikační přísada do betonové směsi se schopností redukovat vodu ve směsi [35]. Lignosulfonát sodný pro výzkum poskytla společnost STACHEMA CZ s.r.o.

5.1.1 Stanovení poměru a postup míchání (KK)

Vzhledem k tomu, že řepková sláma je druhotná surovina (agro odpad), je předpokladem, že bude ekonomicky výhodná. I pro účely výzkumu byla řepková sláma bez obtíží poskytnuta bezplatně. Pro potenciální využití v praxi a uvedení na trh v jakékoliv podobě, by zajisté byla hlavním faktorem pořizovací cena (výrobní náklady). S tímto vědomím, tak bylo přistoupeno i k dávkování co nejnižšího možného množství pojivové složky, která má hlavní vliv na výrobní náklady.

Navržené směsi jsou uvedené v tabulce 4. Při nižším dávkování pojiva (pod 20 %) se při mechanickém namáhání řepková sláma oddělovala z kompozitu. Takový vzorek pak nebylo možné například řezat. Hmotnost kostního klichu navažovaného do směsi byla měřena ve stavu nabobtnaném po 2 hodinách od smíchání s vodou.

Tab. 4: Stanovení poměru směsí KK – publikováno autorem [36]

Směs	Řepková sláma [% hmotnosti]	Kostní klih [% hmotnosti]	Lignosulfonát sodný [% hmotnosti]
S1	75	20	5
S2	70	25	5
S3	65	30	5

Míchání směsí začíná kostním klihem, který se dodává v plastových sáčcích. Po rozbalení se hnědý prášek v hmotnostním poměru 1:1 smíchá se studenou vodou a nechá se nabobtnat po dobu 2 hodin. Po uplynutí této doby se směs klihu a vody zahřívá až do rozpuštění. Zásadní pro výrobu vzorků je správně nastavená teplota pro rozpuštění a vhodně použitá nádoba. Při nízkých teplotách nedojde k úplnému rozpuštění nabobtnalého klihu, což má za následek výrazné snížení jeho adhezních vlastností. Při vysokých teplotách naopak dochází k připalování klihu, což má za následek jeho úplné znehodnocení. Jako zcela vyhovující se ukázalo použití mlékovaru do kterého se vlila voda o teplotě 70 °C. Mlékovar je novodobou variantou dříve používaných kotlíků na rozpuštění klihů s dvojitým dnem. Po rozpuštění klihu se do nádoby přilil lignosulfonát a směs se míchala po dobu 5 minut.



Obr. 20 Postup míchání (postup zleva doprava) - fotogalerie autora

Rozpuštěný kliš s lignosulfonátem se následně v předehřáté nádobě smíchal s naváženou řepkovou slámou a uložil do formy. Míchání probíhalo ručně a trvalo 60 s. Vnitřní forma byla vyrobena z desek voděodolné překližky o tl. 12 mm. Pro přenos vodorovných sil vyvolaných stlačováním byla forma vložena do ocelového svařence, viz obrázek 21. Celá forma se následně umístila do lisu a vycentrovala. Pro rovnoměrné roznesení tlaku po celé ploše byla použita roznášecí deska z ploché válcované oceli tloušťky 15 mm. Mezi roznášecí desku a směs byla umístěna separační fólie. Směs byla následně v lisu stlačena konstantním tlakem 2 MPa po dobu 24 hodin, po této době byla forma odbedněna a materiál připravený pro testování. Takto vyrobený vzorek měl deskovitý tvar a rozměry 300 x 100 x 25 mm.



Obr. 21 Stlačování na lisu - *fotogalerie autora*

5.1.2 Výběr směsi (KK)

Od každé směsi bylo vyrobeno 5 vzorků. Objemová hmotnost směsi S2 a S3 byla velmi podobná, u směsi S1 byla přibližně o 15 % nižší. Hodnoty objemové hmotnosti jsou při porovnání s OSB deskami výrobce EGGER výrazně nižší ($600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ale ve srovnání s dřevovláknitou deskou ISOLAIR výrobce PAVATEX je objemová hmotnost vyšší ($270 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Tab. 5: Objemová hmotnost – publikováno autorem [36]

Směs	Objemová hmotnost
	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
S1	326
S2	389
S3	384

Další měřenou vlastností byl faktor difúzního odporu (tab. 6). Hodnoty u metody dry cup byly téměř shodné pro všechny směsi, rozdíly byly pozorovány pouze u metody wet cup. Při porovnání s obdobným typem materiálu, bambusová vlákna pojená kličovým lepidlem [31], byly naměřené hodnoty velmi podobné. Poměr jednotlivých složek neměl také vliv u tepelných vlastností, kde byly naměřené hodnoty prakticky totožné (tab. 7).

Tab. 6: Faktor difuzního odporu – publikováno autorem [36]

Směs	Faktor difuzního odporu μ [-]	
	Dry cup	Wet cup
S1	12,37	6,19
S2	12,27	10,22
S3	12,31	8,24

Tab. 7: Tepelné vlastnosti v suchém stavu – publikováno autorem [36]

Směs	Součinitel tep. vodivosti $[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita $[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
S1	0,10	1073
S2	0,11	1027
S3	0,10	986

U ohybové pevnosti vykazovala směs S3 více než trojnásobné hodnoty než ostatní studované směsi. V porovnání s výše uvedenými OSB deskami jsou tyto hodnoty výrazně nižší, jelikož OSB desky mají pevnost 15 - 25 MPa, nutno zmínit, že hodnoty uváděné výrobcem jsou v souladu s EN 12369-1, což porovnání zkrusluje.

Tab. 8: Ohybová pevnost – publikováno autorem [36]

Směs	Pevnost v ohybu [MPa]
S1	1,10
S2	0,83
S3	3,50

Na základě provedených měření bude dále pokračováno se směsí S3. Tedy hmotnostní podíl řepkové slámy ve směsi byl 65 %. Rozhodujícím kritériem byla pevnost v ohybu, která byla u vybrané směsi výrazně vyšší. Toto kritérium bylo vybráno z důvodu, že změna poměru pojivové a plnivové složky neměla za následek vliv na vybrané difúzní a tepelné vlastnosti. Pro zvýšení mechanických vlastností bylo potřeba zvýšit objemovou hmotnost materiálů, dosažení vyšší objemové hmotnosti bylo docíleno vyšším lisovacím tlakem na dvojnásobnou hodnotu, z 2 MPa na 4 MPa.

5.1.3 Úprava povrchu slámy (KK)

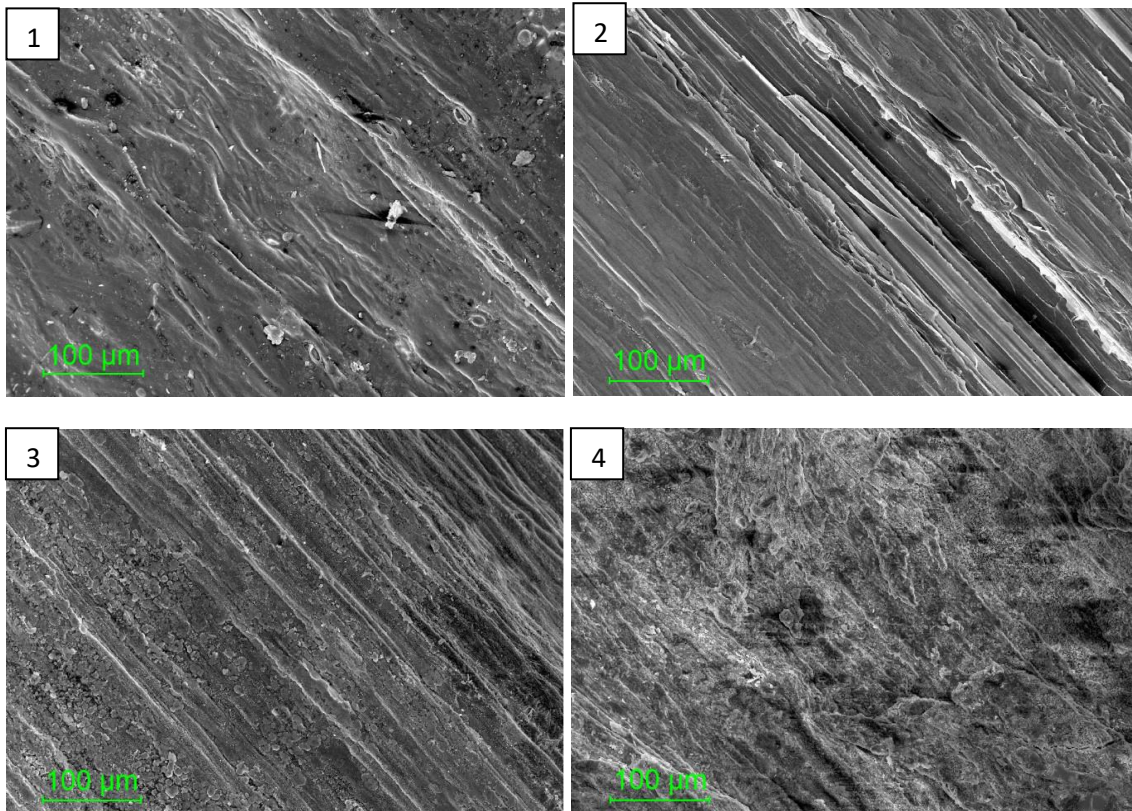
Díky předešlému výzkumu je známo, že se na povrchu řepkové slámy nalézají voskové částice, což snižuje adhezi pojiva. To má za následek snížení pevností a voděodolnosti vyrobených kompozitních desek [37]. Jedno z možných řešení tohoto problému, může být úprava řepkové slámy před výrobou kompozitů. Některé předchozí výzkumy ukázaly, že vhodným řešením může být hydrotermální úprava nebo úprava povrchu řepkové slámy roztokem hydroxidu sodného. Úprava hydroxidem sodným vykazovala zlepšenou smáčivost slámy lepidlem, ale kompozitní materiály vyrobené z takto upravené slámy měly nižší mechanické vlastnosti a vyšší sorpční hodnoty. Důvodem je rozrušení povrchu slámy alkalickou úpravou a ulpívání krystalků na povrchu [18].

Existují ovšem i jiné možnosti, jak modifikovat druhotnou zemědělskou surovinu před jejím použitím. Inspirací by tak mohl být výzkum, který proběhl u konopného betonu. Konopné pazdeří bylo ošetřeno, mimo již uvedených modifikací, v roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$, kyselině edetové a ultrasonifikací (působení ultrazvukových vln) [38]. V principu se většinou jedná o snahu zbavit se povrchových nečistot (hydrotermální úprava) a další metody se snaží narušit povrch tak, aby se zajistilo lepší spolupůsobení pojivové složky s agro odpadem.

Pro pokračování výzkumu tedy bylo nutné zjistit vhodnou povrchovou úpravu řepkové slámy před jejím použitím k výrobě vzorků. Pro elektronovou mikroskopii byla použita řepková sláma (obrazově uvedené na obrázku 22):

1. Neošetřená (vlevo nahoře)
2. Mytá ve vodě o teplotě 70 °C po dobu 30 minut (vpravo nahoře)
3. Louhovaná ve 2% roztoku NaOH po dobu 30 min (vlevo dole)
4. Louhovaná v 10% roztoku NaOH po dobu 30 min (vpravo dole)

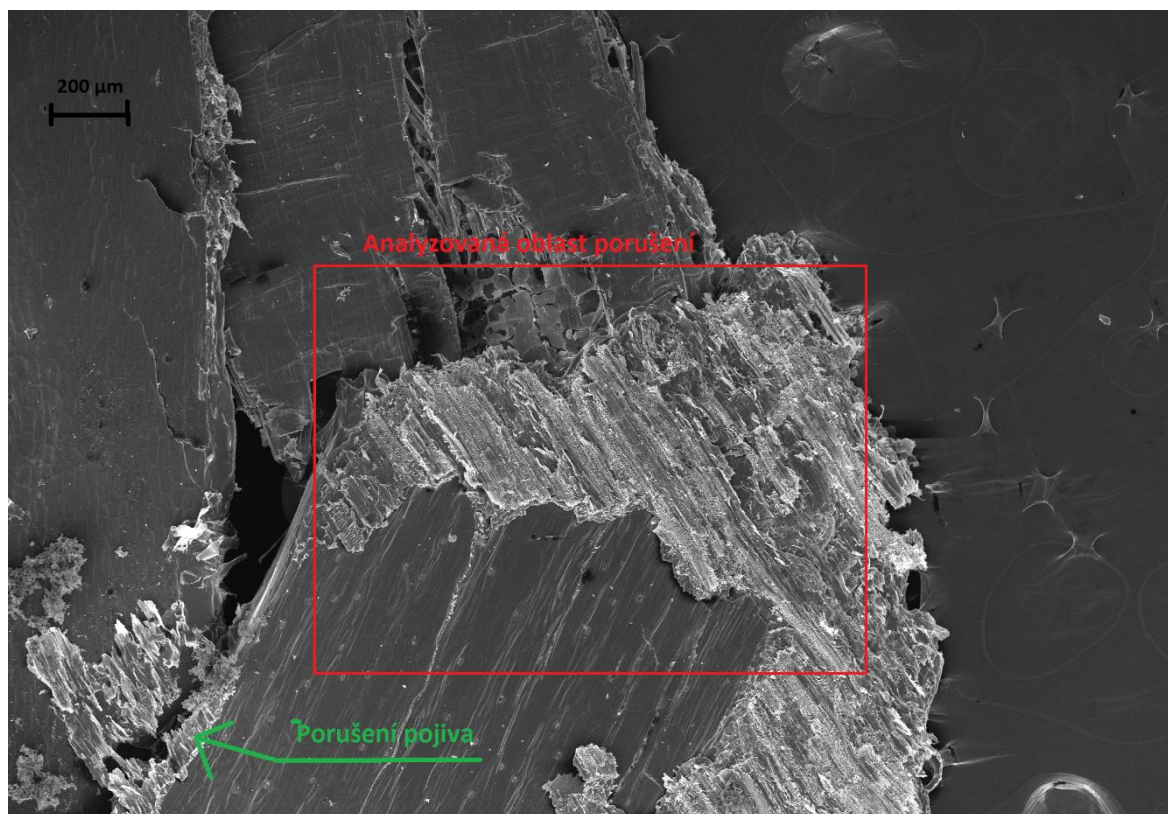
Z těchto čtyř skupin řepkové slámy byly vyrobené desky v poměru, který vzešel z prvních měření. Tedy hmotnostní podíl 65 : 30 : 5 (sláma : kliš : LS).



Obr. 22 Snímky povrchové úpravy z elektronového mikroskopu [37]

Z obrázku 22 je dobře patrné, jak povrchové úpravy ovlivňují povrchovou morfologii řepkové slámy. Na neupravené slámě jsou dobře viditelné nečistoty, které by mohly bránit přilnutí lepidla k povrchu. Řepka omytá ve vodě má hladký povrch bez nečistot. Zároveň teplota lázně nebyla tak vysoká, aby došlo k narušení buněčné stěny. Avšak i zde jsou patrné známky povrchového poškození, které by ovšem mohlo být způsobeno vlivem mechanického opotřebení při míchání nebo opotřebením vzniklým při sklizni a následném sběru. Na snímku povrchu slámy upraveného 2% roztokem NaOH je patrné větší rozrušení povrchu a přítomnost krystalů. Při ošetření 10% roztokem je povrch slámy značně rozrušený a jsou porušeny svazky celé buněčné tkáně [37].

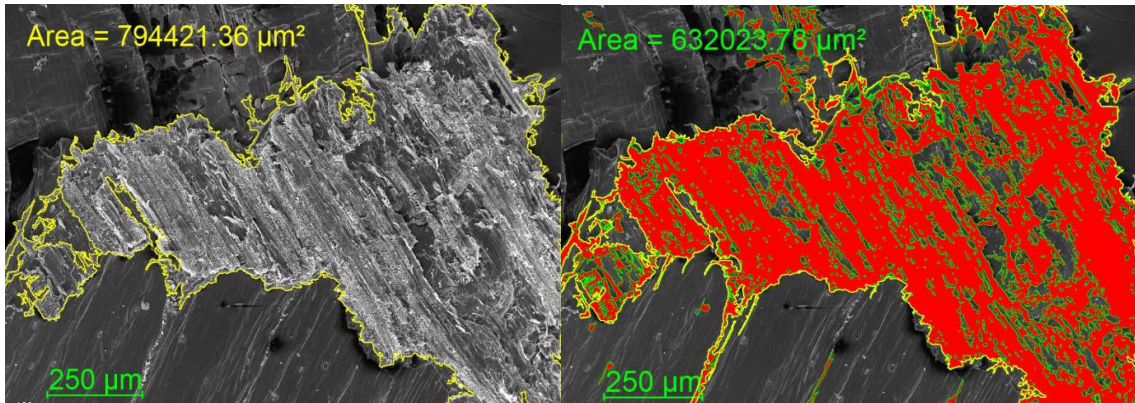
Dalším sledovaným detailem bylo místo rozpojení. Stébla od sebe byla odtržena a následně bylo mikroskopem zacíleno na oblast porušení.



Obr. 23 Detail porušení 2% NaOH [37]

Na porušených vzorcích bylo možné pozorovat různé způsoby porušení, přičemž typ porušení byl ovlivněn povrchovou úpravou slámy. U slámy ošetřené roztokem NaOH bylo porušení nejčastěji vlivem vyčerpání pevnosti v lepeném spoji

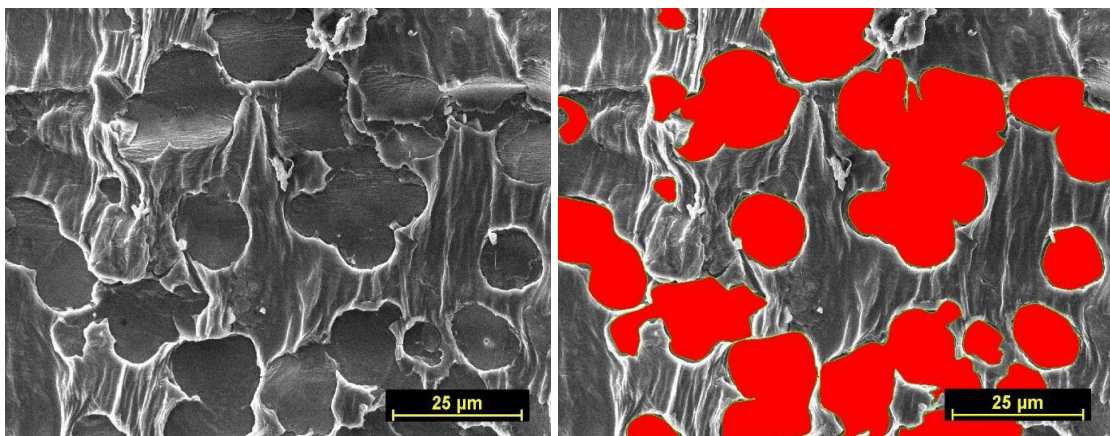
dvou stébel. V menší míře bylo pozorováno porušení pojivové složky samotné, jak je vidět v levém dolním rohu obrázku 23. Totéž platilo i pro slámu ošetřenou hydrotermálně, tam ale ovšem plochy porušené slámy nebyly tak veliké a souvislé. U vzorků z neupravené slámy bylo pozorováno mnohem více porušení v pojivové složce [37].



Obr. 24 Detail plochy porušení 2% NaOH [37]

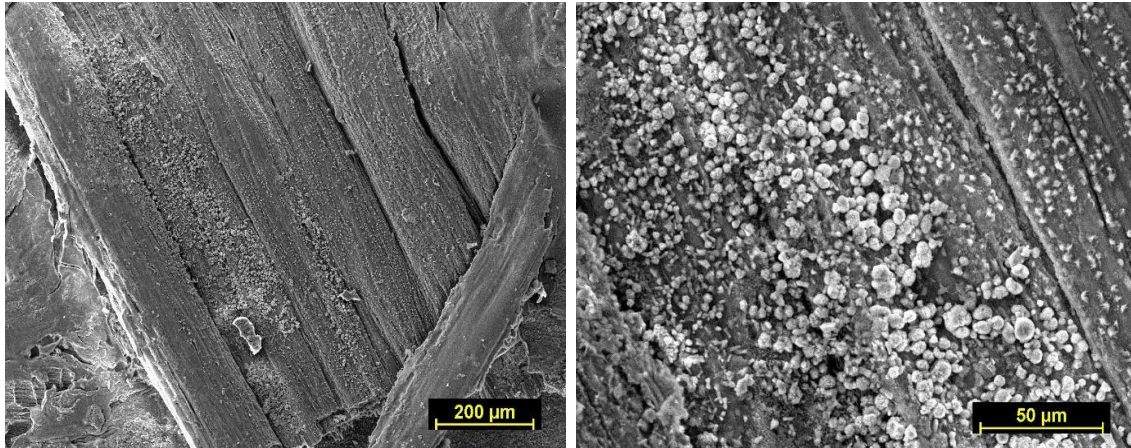
Na levém obrázku 23 je celková plocha lepeného spoje dvou stébel a na pravém je vyobrazena plocha, kde došlo k porušení soudržnosti [37].

Z obrázku 24 je zřejmé, že v tomto případě došlo k porušení soudržnosti spoje na téměř 80 % celkové lepené plochy. Z dalších zkoumaných vzorků lze vyvodit, že vzorky z řepky modifikované 2% roztokem NaOH vykazovaly porušení koheze na více než 2/3 plochy spoje. U vzorků modifikovaných 10% roztokem NaOH dochází k porušení na menších plochách [37].



Obr. 25 Detail porušení 10% NaOH [39]

Na obrázku 25 je v detailu zkoumaný lepený spoj u vzorku louhovaném v 10% roztoku NaOH. Červeně zvýrazněná oblast je oblast, kde lepidlo správně nepřilnulo k povrchu. Nesoudržná plocha v tomto konkrétním případě zabírá oblast ve 42,1 %. Adhezní vlastnosti s vyšší koncentrací NaOH v roztoku klesají [39].



Obr. 26 Krystaly na povrchu 10% NaOH [39]

Na začátku kapitoly bylo zmíněno, že v jiném výzkumu, kde byl zkoumán vliv úpravy řepkové slámy na některé vlastnosti, sláma upravená právě NaOH vykazovala narušení povrchu a ulpívání krystalků na povrchu řepkové slámy [9]. Při pohledu na detail vzorku vyrobeného z řepkové slámy louhované v 10% NaOH se výskyt krystalů potvrdil [39].

Na základě této mikroskopické analýzy lze konstatovat, že lepidlo tvořené modifikovaným kostním kličem s lignosulfonátem sodným lze úspěšně použít k lepení řepkové slámy. U neošetřené slámy dochází vlivem nečistot ke špatné adhezi. U příliš koncentrovaného hydroxidu zase dochází k porušení pletiv řepkové slámy a navíc k ulpívání velkého množství krystalků na povrchu, což vede ke snížení mechanických vlastností [37, 39]. Závěrem této analýzy je, že se nebude pokračovat s řepkovou slámou modifikovanou 10% roztokem NaOH.

5.1.4 Ekotoxicita a biodegradace (KK)

Biologové, kteří se experimenty v tomto směru zabývají, začínají vždy u chemické analýzy a zjištění hodnot pH. Z těchto hodnot již lze usoudit, zda dané prostředí bude slučitelné s životem organismů. Jak bylo závěrem řečeno v předchozí kapitole, vzorky z modifikované řepkové slámy hydroxidem, byly louhované pouze ve 2% roztoku.

Tab. 9a: Chemická analýza výluhů v ppm [23]

Vzorek	Al	B	Ba	Ca	Fe	K
Destilovaná voda	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Řepková sláma	0,00	0,00	0,00	32,20	0,03	41,70
Lignosulfonát (LS)	0,00	0,00	0,00	1,50	0,01	0,06
Klih	0,09	1,00	0,20	191,00	0,44	>325
Klih+LS+NaOH	0,20	1,00	0,03	16,60	0,35	234,00
Klih+LS+H ₂ O	0,13	0,70	0,06	127,00	0,52	227,00

Tab. 9b: Chemická analýza výluhů v ppm [23]

Vzorek	Mg	Mn	Na	P	Si	Zn
Destilovaná voda	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Řepková sláma	4,00	0,10	5,21	0,00	0,20	0,02
Lignosulfonát (LS)	0,20	0,00	1,44	0,00	0,10	0,01
Klih	41,20	0,82	>103	1,40	0,30	2,98
Klih+LS+NaOH	23,70	0,08	>22	0,60	0,70	1,06
Klih+LS+H ₂ O	24,30	0,34	>66	0,40	2,60	2,51

Hlavní biogenní prvky C, N, O a H nebylo možné změřit z důvodu jejich přítomnosti v okolní atmosféře. Malé stopy kovů u lignosulfonátu mohou pocházet z impregnace použitého dřeva přípravky obsahujícími Zn, Al a další prvky. Ve vzorcích kostního klihu bylo zjištěno nezanedbatelné množství Al, Ba a B [23].

Hodnoty pH vzorků (až na vzorky s NaOH) byly v rozmezí optimálních hodnot pro sladkovodní organismy. Žábřonožka solná (*A. salina*) je organismus žijící v brakických vodách, proto hodnoty pH kolem 9 byly také vhodné pro její život [20].

Tab. 10: Hodnoty pH KK [23]

Vzorek	pH
Destilovaná voda	6,9
Řepková sláma	6,5
Klih	6,5
Klih+LS+NaOH	9,5
Klih+LS+H ₂ O	6,9

Výsledky ekotoxikologické analýzy jsou uvedené v tabulce 11. Výluh z řepkové slámy způsobil úmrtnost 16 a 21 % artémií, ale na ostatní organismy měl stimulační vliv. Zvířata tohoto vodního korýše se nemohla vylíhnout ve vzorcích z klihu samotného a vzorku z klihového kompozitu ze slámy ošetřené hydrotermálně. Ve vzorku s modifikovanou slámou hydroxidem se sice vylíhli, ale během následujícího dne zemřeli. Tyto výsledky mohou být ovlivněny nižšími hladinami některých prvků ve výluhu s hydroxidem. [23]

Tab. 11: Výsledky ekotoxikologických testů [23]

Vzorek	Inhibice [%]				
	Kvasinky 24 h tempo růstu	Artemia 24 h mortalita	Artemia 48 h mortalita	Hořčice 96 h přírůstek	Řasy 72 h tempo růstu
Kontrola	0	0	0	0	0
Řepková sláma	-82	16	21	-6	-26
Klih	-89	100	100	100	12
Klih+LS+NaOH+sláma	-34	74	100	100	0
Klih+LS+H ₂ O+sláma	-21	100	100	100	10

Hořčičná semena v této studii neprodlužovala kořeny. 100% inhibice prodloužení kořenů není možné dostatečně uspokojivě vysvětlit. Řasám testované vzorky nezpůsobily výraznou citlivost (pouze do 12 %). Stimulace kvasinek lze vysvětlit profitem z látek obsažených v testovaných vzorcích [23].

Pro biodegradaci byla použita stupnice od 1 – 5. Kategorizace probíhala na základě mikroskopického pozorování pokrytí vzorků plísní. Všechny vzorky byly plísní pokryté [23].

Stupeň 1 = 1 – 25 %

Stupeň 2 = 26 – 50 %

Stupeň 3 = 51 - 75 %

Stupeň 4 = 76 - 99 %

Stupeň 5 = 100 %

Nejvyššího stupně dosáhly vzorky samotného klihu (~4), něco nižšího potom vzorky se slámou ošetřené vodou (~3) a nejlépe dopadly vzorky se slámou ošetřenou hydroxidem (~2). Je zřejmé, že organické materiály jako řepková sláma, lignosulfonát nebo kliš nejsou schopné odolávat biodegradacím [23].

Toxicita byla zjištěna pro rostliny a bezobratlé živočichy. Stimulace proti tomu byla zjištěna u mikroorganismů (řasy, kvasinky, plísně) [23].

Porovnání s dalšími materiály není úplně snadné, kvůli malému množství vědeckých článků věnovaných biodegradaci a ekotoxikologii obdobných kompozitů. Zajímavou prací pro porovnání biodegradace tak byla pouze práce lotyšských vědců. Nejvyššího stupně zasažení plísní dosáhly vzorky vyrobené z lněných vláken, konopných vláken, konopných vláken s pojivem z hydraulického vápna a konopných vláken s pojivem ze směsi hydraulického a vzdušného vápna. Naopak úplnou rezistenci vykazovaly vzorky obsahující jezerní sedimenty pojené hydraulickým vápnem s příměsí konopných vláken a dále kompozity s vysokým podílem hydraulického vápna a konopnými vlákny. Obecně bylo v této práci zjištěno, že pojiva na vápenné bázi jsou odolnější v závislosti na množství pojiva, čím více je pojivové složky ve směsi, tím je odolnost vůči plísním vyšší. Bio kompozity s obsahem sapropelu (organické jezerní bahno) vykazovaly nejvyšší mikrobiologickou odolnost [40]. V oblasti ekotoxikologie lze

například srovnat s terénními výluhy z dubového dřeva, které se ukázaly pro Artemie toxické [41]. Ekotoxikologické výsledky obdobných kompozitů s bio-plnivý se nepodařilo nalézt.

5.1.5 Objemová hmotnost, hustota a pórovitost (KK)

Ačkoliv v jedné z předchozích kapitol 5.1.2 Výběr směsi, byla uvedena tabulka s hodnotami objemové hmotnosti, bylo nutné měření základních vlastností opakovat znovu, jelikož došlo ke zvýšení lisovacího tlaku na dvojnásobek, jak bylo na konci zmíněné kapitoly uvedeno.



Obr. 27 Vyrobená deska – publikováno autorem [12]

Po zvýšení lisovacího tlaku vyrobená deska značně opticky připomínala desku z orientovaných třísek známou pod zkratkou OSB. Vzhledem k této viditelné podobnosti se často naměřené hodnoty porovnávají právě s tímto materiálem. Desky vykazovaly po zvýšení lisovacího tlaku citelně vyšší odolnost proti obrusu. Také při dělení desky na menší vzorky již nedocházelo k odtrhávání jednotlivých stébel, jak tomu bylo u desek vyráběných za nižšího lisovacího tlaku.

Tab. 12: Základní vlastnosti – publikováno autorem [12]

Vzorek	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Hustota [kg.m ⁻³]	Otevřená pórovitost [%]
Referenční	512 ± 11	1429 ± 41	59,0
Voda	530 ± 40	1512 ± 30	64,9
NaOH	655 ± 36	1522 ± 42	56,9

V tabulce 12 výše jsou vzorky označené jako referenční, voda a NaOH. Referenční vzorky jsou vzorky vyrobené z řepkové slámy, která nebyla nijak ošetřena. Vzorky označené jako voda, jsou vyrobeny z řepkové slámy ošetřené hydrotermálně a vzorky s označením NaOH jsou vyrobené z řepkové slámy louhované v 2% roztoku NaOH.

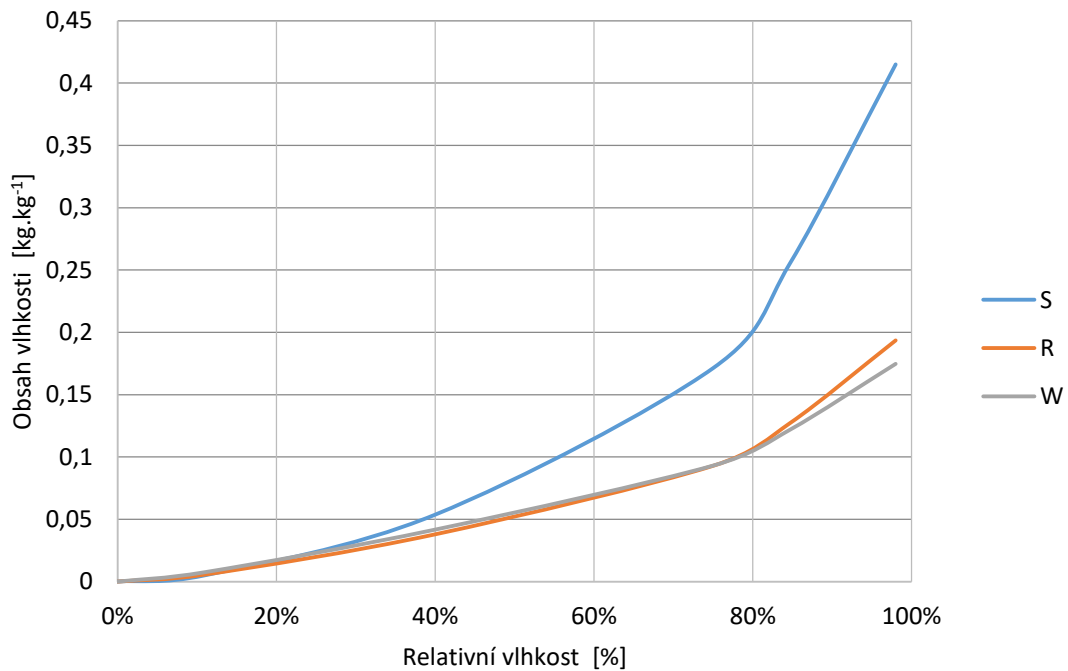
Jak je vidět v tabulce 12, zvýšení lisovacího tlaku na dvojnásobek při výrobě desek vedlo ke zvýšení objemové hmotnosti o desítky procent. Naměřené hodnoty objemové hmotnosti jsou porovnatelné s OSB deskami výrobce EGGER (600 kg.m⁻³). Při porovnání s deskou z řepkové slámy a polyester-epoxidového lepidla [18] jsou hodnoty objemové hmotnosti komparativní. Oproti konopnému betonu jsou hodnoty výrazně vyšší 330 ± 10 kg.m⁻³ (hodnoty materiálu Hemcrete výrobce NORICUM s.r.o.). Konopný beton, z jiného publikovaného výzkumu, měl hodnotu objemové hmotnosti 430 kg.m⁻³ hustotu 2 002 kg.m⁻³ a otevřenou pórovitost 77 % [42].

Nejvyšší hodnoty objemové hmotnosti a hustoty u vzorku ošetřeného NaOH lze přisuzovat lepší adhezi pojiva. Nejnižší hodnoty u referenčních vzorků pak lze vysvětlit sníženou přilnavostí vlivem nečistot na povrchu. Nejvyšší hodnoty otevřené pórovitosti byly naměřeny u vzorků ošetřených vodou [12].

5.1.6 Sorpční izotermy a bobtnání (KK)

Křivky sorpčních izoterem jsou znázorněné na obrázku 28. Všechny vzorky byly značně hygroskopické. Hygroskopičnost řepkové slámy, již ostatně byla dříve analyzovaná [15]. Zatímco křivky vzorků referenčních a vodou ošetřených se téměř překrývaly, vzorky ošetřené hydroxidem byly výrazně hygroskopičtější, což potvrzuje již dříve prováděné výzkumy s upravenou řepkou a polymerovým lepidlem [18]. Lepší přijímání vlhkosti u vzorků ošetřených hydroxidem si lze vysvětlit jednak rozrušeným

povrchem stébel řepkové slámy a také výskytem krystalků na povrchu. Nejvyšší hmotností vlhkosti bylo dosaženo při relativní vlhkosti 98 % u vzorků ošetřených hydroxidem, kdy její hodnota překročila 40 % [12]. Při porovnání se vzorky z konopného betonu, je sorpční křivka téměř totožná jako u vzorků referenčních a vzorků označených jako voda [42].

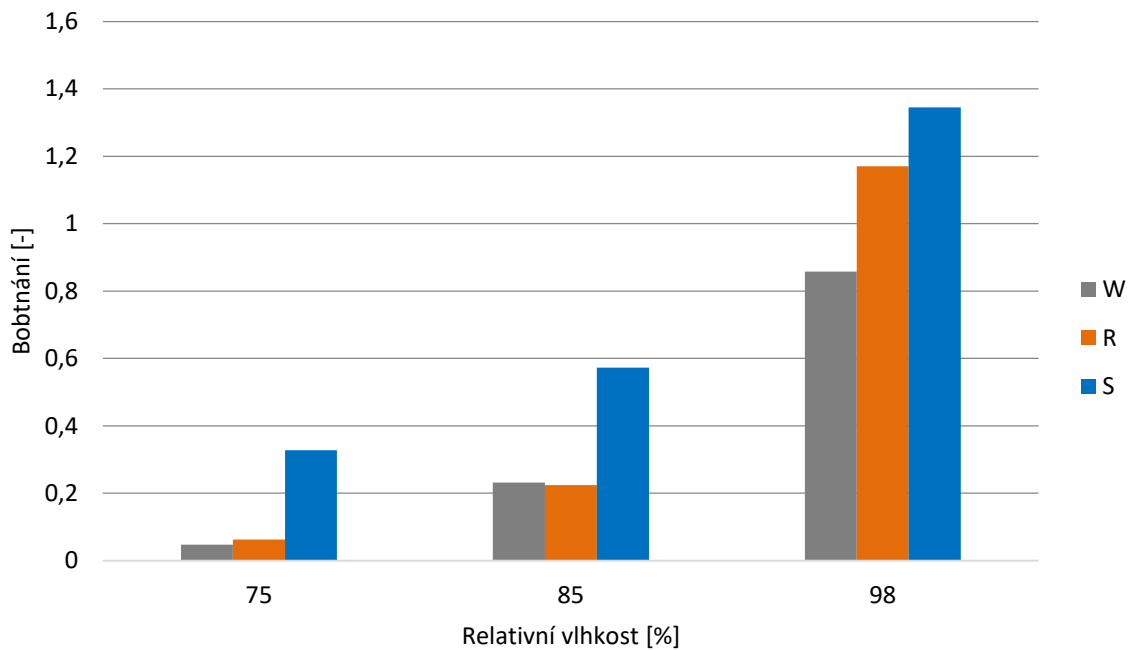


Obr. 28 Sorpční izotermy KK – publikováno autorem [12]

(R – referenční, W – voda, S – NaOH)

Velikost bobtnání v závislosti na prostředí s různou relativní vlhkostí jednotlivých vzorků je zobrazena na obrázku 29. V prostředí s nasyceným solným roztokem K_2CO_3 o relativní vlhkosti 44 % byly hodnoty změny délky tak malé, že byly zanedbány. Podstatné hodnoty bobtnání začaly být až v prostředí NaCl o relativní vlhkosti 75 %. Velikost bobtnání následně akcelerovala s dalšími prostředími o vyšší relativní vlhkosti, a to pro všechny vzorky bez rozdílu. Pro každé prostředí vykazovaly nejvyšší hodnoty vzorky ošetřené hydroxidem. Stejně jako u sorpčních izoterem byly hodnoty v jednotlivých prostředích téměř totožné pro vzorky referenční a vodou ošetřené. Nicméně tak jako u sorpcí, také u bobtnání referenční vzorky v prostředí s nejvyšší relativní vlhkostí (98 %) vykazovaly vyšší hodnoty, než hydrotermálně upravené vzorky označené jako voda. Velikost bobtnání byla v každém prostředí výrazně vyšší u vzorků se slámou ošetřenu NaOH. V prostředí o relativní vlhkosti 75 %

byly hodnoty bobtnání referenční a vodou ošetřených vzorků pod 10 %, zatímco u vzorků ošetřených hydroxidem téměř 40 %. V nejvlhčím prostředí pak vzorky referenční i hydroxidem ošetřené přesáhly hodnotu 100 %, tedy tyto vzorky byly více než dvojnásobné vzhledem k výchozím rozměrům na počátku experimentu [12].



Obr. 29 Velikost bobtnání KK – publikováno autorem [12]

V již několikrát zmiňované práci [18], kde byly vzorky z řepkové slámy upravené stejnými metodami, které se lišily lepidlem (polyester-epoxidovým), byla velikost bobtnání měřena v prostředí o relativní vlhkosti 65 %. Navíc v této práci bylo měřeno bobtnání i pro dřevotřískové desky a OSB:

Referenční – 54,7 %

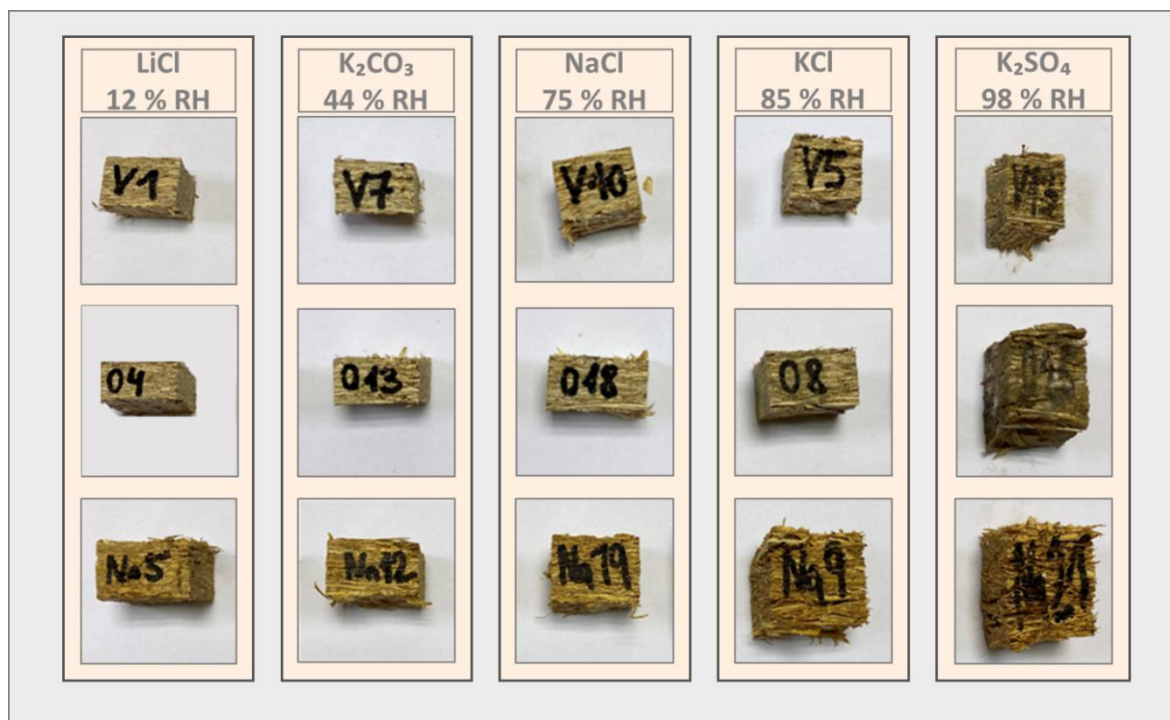
Voda – 63,1 %

NaOH – 70,7 %

Dřevotříska – 24,8 %

OSB – 29,4 %

Naměřené hodnoty v rámci této práce jsou pro daná prostředí výrazně vyšší, než hodnoty uváděné v jiných odborných studiích. Společným rysem pak zůstává, že hydroxidem modifikované vzorky mají velikost bobtnání největší.



Obr. 30 Bobtnání ilustrativně KK – publikováno autorem [12]

Z obrázku výše je dobře viditelné, jak jednotlivé materiály bobtnají při různých relativních vlhkostech prostředí. Vzorky s označením „Na“ jsou vzorky upravené hydroxidem, vzorky s označením „O“ jsou vzorky bez úpravy, tedy referenční a v prvním řádku vzorky začínající písmenem „V“ jsou hydrotermálně upravené. Obrázek 30 tak dobře ilustruje, že ani jeden materiál není vhodný do příliš vlhkého prostředí, jelikož při relativních vlhkostech nad 85 % ztrácí kohezi.

5.1.7 Difúzní vlastnosti (KK)

Výsledky naměřených hodnot faktoru difúzního odporu a součinitele difuze vodní páry jsou uvedené v tabulce 13 níže. Z výsledků měření lze konstatovat, že vliv modifikace řepkové slámy na difúzní vlastnosti je zanedbatelný.

Tab. 13: Difuzní vlastnosti KK – publikováno autorem [12]

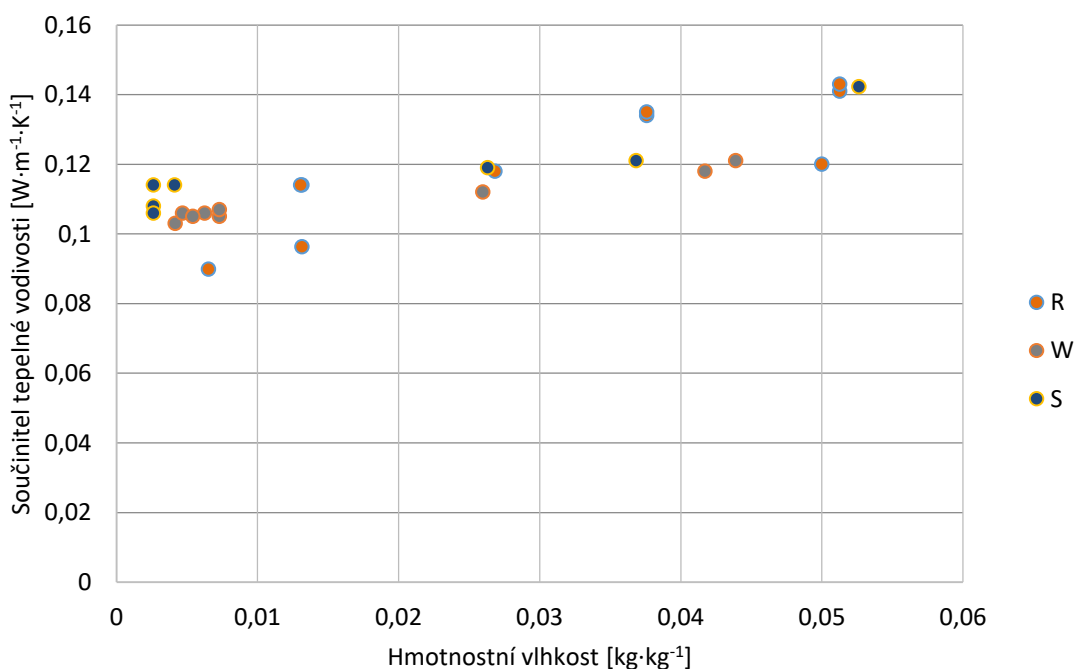
Vzorek	Součinitel difuze vodní páry [$\times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$]		Faktor difúzního odporu [-]	
	Dry cup 5-50% RH	Wet cup 75-35% RH	Dry cup 5-50% RH	Wet cup 75-35% RH
Referenční	6,88 ± 0,62	9,90 ± 0,53	33,70 ± 3,3	23,30 ± 1,22
Voda	7,08 ± 0,60	8,99 ± 0,33	32,72 ± 2,8	25,62 ± 0,90
NaOH	6,53 ± 0,63	9,56 ± 0,50	35,51 ± 3,3	24,12 ± 1,20

Při porovnání s OSB deskou jsou hodnoty značně nižší. Například výrobce Kronospan uvádí $\mu_{\text{wet}} = 100$ a $\mu_{\text{dry}} = 200$. V článku, kde se porovnává konopný a řepkový beton (směs vápna a bio plniva) jsou hodnoty $\mu_{\text{dry}} = 10,6$ pro konopný beton a $\mu_{\text{dry}} = 9,4$ pro beton řepkový [43]. Naměřené hodnoty jsou přibližně dvakrát vyšší, než u materiálu vyrobeného z kostního klišu a bambusových vláken [31].

Při určování správného poměru mezi pojivem a plnivem v jedné z předchozích kapitol byly testovány i difúzní vlastnosti. Hodnoty u směsi s označením S3 (tedy směs, která byla nadále vybrána jako nejvhodnější) byly $\mu_{\text{wet}} = 8,24$ a $\mu_{\text{dry}} = 12,31$.

5.1.8 Tepelné vlastnosti (KK)

Součinitel tepelné vodivosti byl měřen při různé hmotnostní vlhkosti, výsledky měření jsou uvedené níže na obrázku 31. Stejně jako u difúzních vlastností, i zde lze konstatovat, že modifikace povrchu řepkové slámy nemá na tyto vlastnosti vliv. Jednotlivé vzorky měly přibližně stejnou hodnotu součinitele tepelné vodivosti při rozdílných hmotnostních vlhkostech [12]. Trend růstu součinitele tepelné vodivosti s hmotností vlhkostí je velmi obdobný, jako v práci, kde byla řepková sláma pojená hlínou [44].



Obr. 31 Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti KK – publikováno autorem [12]

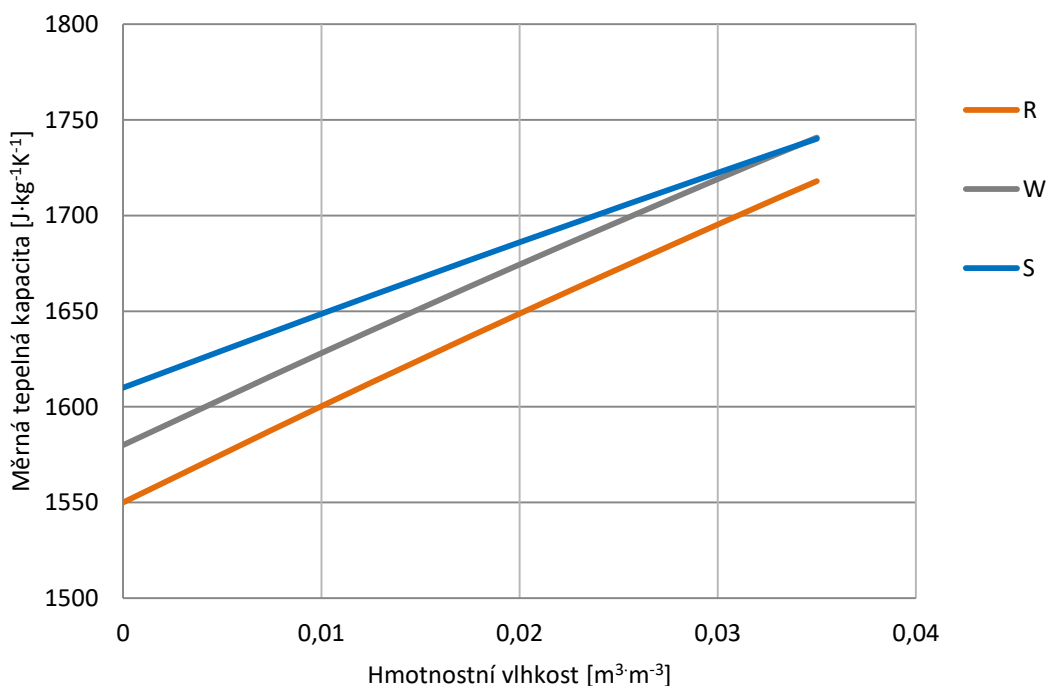
(R – referenční, W – voda, S – NaOH)

V předchozí kapitole pro zmíněnou OSB desku uvádí výrobce Kronospan hodnotu $\lambda = 0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (ovšem měřena dle EN 12664). Pro porovnání s obdobnými typy materiálů, tak jako v předchozích případech, se nabízí srovnání s relativně dobře známým konopným betonem. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti jsou prakticky totožné, ačkoliv objemová hmotnost vzorků z konopného betonu se pohybovala okolo $400 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}]$. Při zvyšování dávky pojiva ve směsi se i hodnoty součinitele tepelné vodivosti zvyšovaly dle očekávání. Při měření závislosti velikosti konopného pazdeří na hodnotu součinitele tepelné vodivosti se prokázalo, že velikost pazdeří nemá žádný vliv. Prokázal se ovšem vliv objemové hmotnosti, kdy vzorky s nižší objemovou hmotností lépe izolovaly [45].

Při výběru vhodné směsi byla mezi sledovanými parametry i schopnost vedení tepla. Hodnota součinitele tepelné vodivosti byla u prvních vzorků $0,10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (kap. 5.1.2). Vzorky byly ovšem lisovány menším tlakem, a tak jejich objemová hmotnost byla $384 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, což je o 25 % méně než u referenčních vzorků a přesto schopnost materiálu vést teplo je prakticky neměnná. Ukazuje se zde tedy jistý nesoulad vzhledem ke konopnému betonu. Toto lze vysvětlit poměrně malým rozdílem objemových hmotností nebo také přesností měření, kdy použitá nestacionární metoda je obecně považována za méně přesnou. Tedy v případě snahy o snížení hodnot součinitele tepelné vodivosti přichází v úvahu snížení objemové hmotnosti, což lze provést snížením lisovacího tlaku nebo snížením dávky pojiva. Pro zachování celistvosti je ovšem nutné současné dávkování příliš nesnižovat, při nižších dávkách kostního klišu docházelo k odtrhávání stébel při manipulaci. Pro zachování celistvosti by se pak při nižších dávkách lepidla musel zvýšit lisovací tlak, tedy jednalo by se o iracionální snahu. V úvahu ovšem připadá změna technologie výroby vzorků, kdy při efektivnějším přidávání pojivé složky (např. naprašováním) může dojít k jeho úspoře.

V této práci dosažené výsledky ukazují, že není závislost mezi součinitelem tepelné vodivosti a způsobem ošetření řepkové slámy před jejím mísením s pojivem. Obdobný výzkum proběhl s konopným betonem, kde povrch konopného pazdeří byl ošetřen stejně jako v této práci a navíc ještě v roztoku Ca(OH)_2 , kyselině edetové (EDTA) a ultrasonifikací. Jedinou významnou odchylkou od ostatních pak byly vzorky ošetřené ultrasonifikací, které vedly teplo o 36-40 % lépe. Jinak ostatní úpravy také neměly takřka žádný vliv na schopnost materiálu vést teplo [38].

Měrná tepelná kapacita změřená také v závislosti na vlhkosti vzorku je uvedena na obrázku 32 níže. V suchém stavu byla nejvyšší hodnota $1\,610\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, a to u desky z ošetřené slámy hydroxidem. Vodou ošetřena deska měla tepelnou kapacitu $1\,580\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a hodnotu $1\,550\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ měla deska referenční. Hodnoty se zvyšovaly s rostoucí vlhkostí, což je dáno větší měrnou tepelnou kapacitou vody [12].



Obr. 32 Měrná tepelná kapacita v závislosti na vlhkosti KK – publikováno autorem [12]

(R – referenční, W – voda, S – NaOH)

V obou případech měření v závislosti na obsahu vody ve vzorku bylo prostředí v klimakomoře regulováno do hodnoty 60 % RH. Při vyšších relativních vlhkostech by docházelo k nevratným porušením vlivem vlhkostní roztažnosti a výsledky měření by byly zkresleny.

5.1.9 Mechanické vlastnosti (KK)

Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jsou prezentovány v tabulce 14. Oproti předpokladům, které vzešly zejména z mikroskopických analýz, se jednotlivé pevnosti od sebe příliš nelišily. Potvrdilo se sice, že referenční vzorky mají pevnost nejnižší, což je nejpravděpodobněji dáno nečistotami na povrchu slámy, které brání přilnavosti, ale je to pouze o 10 % méně než vzorky ošetřené hydroxidem. Nejvyšší pevnost pak dosáhly vzorky ošetřené pouze hydrotermálně.

Tab. 14: Pevnost v tahu za ohybu – publikováno autorem [12]

Vzorek	Pevnost v ohybu [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
Referenční	2,9 ± 0,4	1200 ± 140
Voda	3,4 ± 0,4	1400 ± 170
NaOH	3,2 ± 0,3	1350 ± 150

Komerční výrobky příbuzných materiálů mají zpravidla ohybové pevnosti vyšší. Několikrát zmiňovaná OSB deska od výrobce Kronospan má uváděnou pevnost v ohybu 16,4 MPa. Cementotřísková deska Cetriss má výrobcem uváděnou hodnotu 11,5 MPa. Naopak nižší hodnoty byly naměřené u sádkartonových desek, kde se průměrné hodnoty pevnosti pohybovaly okolo 2,5 MPa, nutno dodat, že uváděné hodnoty výrobci jsou v souladu s EN 12369-1 [46].

Vyšší ohybové pevnosti byly také publikované v práci, která se zabývala částečným nahrazením dřevité složky v deskách právě řepkovou slámou. Desky s největším podílem řepkové slámy k dřevu (70 : 30), dosáhly průměrné pevnosti 6,3 MPa. Je ovšem nutné zmínit, že lisovací tlak byl dvakrát vyšší (8 MPa) a bylo použité močovinoformaldehydové lepidlo. Objemová hmotnost pak činila necelých 650 kg.m⁻³ [15].

U konopného betonu se prokázalo, že velikost konopného pazdeří má, byť nikoliv zásadní, vliv na velikost ohybové pevnosti. Materiál z nejdelších konopných částic délky okolo 10 mm měl ohybovou pevnost nejvyšší. Mnohem větší vliv měl poměr pojiva, kdy změna poměru 1 : 1,8 na 1 : 2,6 (plnivo : pojivo) měla za následek téměř trojnásobně vyšší ohybové pevnosti [45].

V již zmiňovaném článku, kde taktéž byly zkoumány modifikace bio-plniva na vybrané vlastnosti, se ukázalo, že vzorky z neošetřeného konopí (referenční) měly přibližně o 25 % vyšší pevnost v tlaku než vzorky ošetřené NaOH, Ca(OH)₂ a louhované v teplé vodě. Naopak jednoznačně nejvyšších pevností dosahovaly vzorky z konopí upraveného ultrasonifikací [38]. Při porovnání materiálu, kde byl použit kostní kliš (v kombinaci s bambusovými vlákny), jsou hodnoty ohybových pevností obdobné [31].

5.1.10 Shrnutí výsledků klišového kompozitu

Klišový kompozit, kde jako plnivo byla použita různě modifikovaná řepková sláma a pojivo bylo tvořeno kostním klišem vylepšeným lignosulfonátem sodným, je zajímavý materiál, který by jistě své uplatnění na trhu našel.

Elektronovou mikroskopií bylo zacíleno na povrch vzorků z jednotlivě modifikovaných řepkových slám. Neupravená řepková sláma měla na povrchu nečistoty. Hydrotermálně upravená sláma již tyto nečistoty na sobě neměla. Sláma louhovaná v roztoku hydroxidu měla rozrušený povrch stébel a také byly na povrchu viditelné krystalky.

Modifikace řepkové slámy neměla významný vliv na tepelné a difúzní vlastnosti. Vzorky vyrobené z hydrotermálně upravené slámy měly nejvyšší pevnost (o 15 % větší než referenční vzorky), hygroskopické vlastnosti vzorků z hydrotermálně upravené řepkové slámy pak byly prakticky totožné se vzorky referenčními.

Vzorky vyrobené z řepkové slámy louhované ve 2% roztoku NaOH, vykazovaly značně vyšší hygroskopičnost. Zasažení plísněmi bylo u těchto vzorků nejmenší.

Obecně je klišový kompozit ze své podstaty nepoužitelný do vlhkého prostředí a teplého prostředí, což je dáno reverzibilitou kostního klišu. Pro zlepšení některých vlastností lze uvažovat o:

1. Změna technologie výroby – zvýšení dávkování lepidla, způsob nanášení lepidla (např. rozstřikováním), zvýšení lisovacího tlaku
2. Jiná modifikace slámy – u konopného betonu se osvědčila ultrasonifikace [38]
3. Použití jiného pojiva

5.2 Epoxidový kompozit (EK)

Jak je uvedeno v závěru studie klišového kompozitu, jednou z možností k odstranění nestability materiálu ve vlhkém prostředí je nahrazení pojivové složky kompozitu. Pro udržení cílů, aby byl výběr složek co nejvíce environmentální, bylo jako pojivo použité epoxidové lepidlo. Jedná se o epoxidovou pryskyřici na vysoké biologické bázi určené zejména pro laminace a nátěry. Obchodní název lepidla je ONE, výrobcem je společnost Entropy Resins z Velké Británie. Výrobce nabízí tento produkt ve dvou variantách, které se liší dobou zpracovatelnosti. První varianta má dobu zpracovatelnosti 18 minut a druhá s označením SLOW má zpracovatelnost 43 minut. Ačkoliv míchání, uložení do forem a stlačení na lisu by nemělo zabrat více než 10 minut, raději byla testována varianta s prodlouženou dobou zpracovatelnosti.

Výrobek ONE je certifikovaný u amerického ministerstva zemědělství certifikátem BioPreferred®, kterým je garantováno, že minimálně 30 % obsahu je tvořeno biologickým materiálem.

Z technických informací o výrobku je podstatná ohybová pevnost (dle normy ASTM D790), která je 100,5 MPa a teplota skelného přechodu 53 °C. Objemová hmotnost pak činí 1 080 kg.m⁻³.

Teplota skelného přechodu je jedna z nejdůležitějších vlastností všech epoxidů. Jedná se o hranici, při které začne epoxid přecházet z tvrdého (skelného) materiálu na materiál měkčí, podobný gumě. Na rozdíl od termoplastických materiálů, jsou epoxidy termosety, což má za následek, že při zvýšené teplotě se neroztaví, ale podléhají mírnému změknutí. Teplota skelného přechodu T_g není to samé, co teplota tání T_m . Konvencí je označování T_g jednou hodnotou, ve skutečnosti se ovšem jedná o teplotní rozsah, kde uvedená hodnota je střední bod ohraničený tečnami ke dvěma plochým oblastem křivky tepelného toku [47].

5.2.1 Stanovení poměru a postup míchání (EK)

Stejně jako u stanovení poměru u klišového kompozitu i zde byla snaha neplýtvat zbytečným množstvím lepidla, jelikož se nejedná o levný typ epoxidu. U již citovaného článku, kde se z řepkové slámy a polyester epoxidového lepidla vyráběly desky, byl poměr 90 % řepková sláma a 10 % lepidlo. Stejně lepidlo do kompozitu s

řepkovou slámou bylo použité i v jiném článku, kde byl stanoven stejný poměr [17,18]. V jiné práci byla řepková sláma pojena směsí pMDI a PF lepidla, poměr byl opět 90 % řepková sláma a 10 % lepidlo [20]. Vzhledem k výborným vlastnostem lepidla uváděných výrobcem a vyššího lisovacího tlaku (4,0 MPa), než u uvedených článků (2,3 MPa), byl poměr stanoven následovně:

95 % řepková sláma hmotnostně

5 % epoxidové lepidlo (po zamíchání tvrdila a plnidla) hmotnostně

Při provedení zkušebního vzorku pochyby o příliš malém dávkování lepidla zmizely. Deska byla kompaktní, nerozeznatelná od desky vyrobené z kostního klihu. Oproti zmíněnému kostnímu klihu byl proces míchání velmi jednoduchý. Po navážení řepkové slámy se zvláště navážilo plnidlo a tvrdidlo, a to v poměru hmotnostním 100 : 43. Obě složky se smíchaly a důkladně se promíchaly ručně po dobu 4 minut. Následně se lepidlo přidalo k řepkové slámě a směs se po dobu 1 minuty společně míchala. Následné uložení do formy a stlačení probíhalo stejně jako u klihového kompozitu. Lis byl vypnut až po 24 hodinách. Vzorky pak byly uloženy na minimální dobu 7 dní do laboratorního skladu, jelikož výrobce lepidla garantuje uváděné vlastnosti po 7 dnech od smíchání tvrdidla s plnivem. Forma a lis byly použité stejné jako u klihového kompozitu (obr. 21).

Ačkoliv se u kompozitů z klihu a různě povrchově modifikované řepkové slámy, neprokázal zásadní vliv na většinu zkoumaných vlastností vyvíjených materiálů, tak i přesto byla modifikovaná sláma nadále používána pro ověření předchozích závěrů. Zejména pak u ověření vlivu na mechanické vlastnosti, kdy u klihového kompozitu nastal rozpor mezi předpokladem a skutečně naměřenými hodnotami, jelikož předpokladem bylo, že vzorky upravené v hydroxidu budou mít lepší vnitřní soudržnost, což povede ke zlepšení mechanických vlastností. Pro připomenutí byly naměřeny mechanické vlastnosti o něco vyšší u vzorků ošetřených hydrotermálně.

5.2.2 Ekotoxicita a biodegradace (EK)

Hodnoty pH jsou při porovnání s klišem modifikovaným lignosulfonátem velmi podobné. Zásaditou hodnotu pak měl vzorek se slámou modifikovanou 2% roztokem NaOH. Hodnoty pH jsou tak, až na zmíněnou zásadu, v rozmezí optimálních hodnot pro sladkovodní organismy. Žábřonožky žijí v brakických vodách s vysokým obsahem solí, hodnoty níže uvedených pH jsou vhodné pro jejich život [23]. Pro srovnání z výzkumu jiných autorů je přiložena tabulka 16, jedná se o hodnoty samotné slámy [14].

Tab. 15: Hodnoty pH EK [23]

Vzorek	pH
Destilovaná voda	6,9
Řepková sláma	6,5
Epoxid	6,0
Epoxid-NaOH	9,5
Epoxid-H ₂ O	7,6

Tab. 16: Srovnání pH řepková sláma a její modifikace [14]

Vzorek	pH
Řepková sláma	7,9
Řepková sláma-H ₂ O	6,6
Řepková sláma-NaOH	9,4

Oproti klišu byly naměřené hodnoty toxického hliníku a barya u samotného epoxidu (lepidla). Jejich výskyt může souviset s průmyslovou výrobou lepidel a nečistotami z výrobních zařízení. Lze předpokládat, že epoxid obsahuje také prvky C, N, O, H a Cl, jelikož jsou tyto prvky deklarované výrobcem. Prvků z výluhů bylo přítomno obecně méně než u klišu. To lze připsat zasítované struktuře epoxidu, což snižuje schopnost vyluhování [23].

Tab. 17a: Chemická analýza v ppm EK [23]

Vzorek	Al	B	Ba	Ca	Fe	K
Destilovaná voda	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Řepková sláma	0,00	0,00	0,00	32,20	0,03	41,70
Epoxid	0,02	1,40	0,15	186,00	0,11	288,00
Epoxid-NaOH	0,07	1,00	0,04	14,80	0,20	149,00
Epoxid-H ₂ O	0,03	0,60	0,06	102,00	0,08	91,80

Tab. 17b: Chemická analýza v ppm EK [23]

Vzorek	Mg	Mn	Na	P	Si	Zn
Destilovaná voda	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Řepková sláma	4,00	0,10	5,21	0,00	0,20	0,02
Epoxid	35,50	0,71	87,90	2,30	0,00	0,17
Epoxid-NaOH	15,70	0,11	>27	0,90	0,30	0,11
Epoxid-H ₂ O	15,20	0,21	48,30	0,50	1,40	0,10

Pro porovnání s výsledky jiných autorů je přiložena tabulka 18, kde byla prvková analýza prováděna pouze na samotné řepkové slámě bez i s modifikacemi. Jak je vidět, chemické složení řepkové slámy se značně liší.

Tab. 18: Chemická analýza řepkové slámy v ppm porovnání [14]

Vzorek	Al	B	Ca	Fe	K	Mg	P	Zn
Sláma	45,30	11,01	6941,90	42,67	5036,80	998,80	248,90	1,26
Sláma-H ₂ O	59,73	7,75	5858,50	46,97	1026,10	739,10	217,50	1,68
Sláma-NaOH	61,93	7,94	5705,20	50,83	732,80	1089,80	210,3	2,5

Výsledky z ekotoxikologie jsou uvedeny v tabulce 19. Výsledky prakticky kopírují hodnoty uvedené pro klišový kompozit. Jedinci vodního korýše se nemohli vylíhnout v eluátech ze samotného epoxidu ani z kompozitu s řepkou upravenou hydrotermálně. Stejně jako u klišového kompozitu se korýši dokázali vylíhnout u kompozitu vyrobeného z řepkové slámy ošetřené hydroxidem, ovšem uhynuli během následujícího dne. Účinky epoxidového lepidla na korýších jsou v obecné shodě s jinými vědeckými pracemi. Ty byly ovšem zkoušeny na hrotnatkách (dafnie) [23,48,49].

Tab. 19: Výsledky ekotoxikologie EK [23]

Vzorek	Inhibice [%]				
	Kvasinky 24 h tempo růstu	Artemia 24 h mortalita	Artemia 48 h mortalita	Hořčice 96 h přírůstek	Řasy 72 h tempo růstu
Kontrola	0	0	0	0	0
Řepková sláma	-82	16	21	-6	-26
Epoxid čistý	-100	100	100	100	0
Epoxid-NaOH-sláma	-37	5	100	100	-16
Epoxid-H ₂ O-sláma	-38	100	100	100	12

Výskyt plísně byl pozorován na všech vzorcích. Nejnižší pokrytí bylo pozorováno u vzorku kompozitu z řepkové slámy upravené louhováním v hydroxidu (~2), kompozit ze slámy ošetřené hydrotermálně byl na stupnici na hodnotě (~3) a nejvíce napadený byl vzorek samotného epoxidu (~4). Vlhkost okolo vzorků byla vysoká, protože vzorky byly v Petriho miskách umístěny na vlhkém agaru [23]. Možné napadení epoxidu plísněmi, již bylo popsáno v práci, kde autoři uvedli, že nádoby z epoxidu mohou podporovat růst mikroorganismů více než nerezová ocel [50].

U materiálů s vysokým obsahem přírodních plniv lze s problémem výskytu plísní počítat vždy. Například lze uvést kompozit vzniklý smísením konopného pazdeří a cementu. Na všech typech vzorků byla po několika měsících zřejmá přítomnost plísní [51].

5.2.3 Objemová hmotnost, hustota a pórovitost (EK)

Ačkoliv technologie výroby vzorků byla stejná, na rozdíl od klišového kompozitu byla naměřená objemová hmotnost nižší přibližně o čtvrtinu. I zde byla naměřená nejvyšší objemová hmotnost u vzorků vyráběných z modifikované řepkové slámy louhované v 2% hydroxidu sodném. Naopak otevřená pórovitost měřená héliovým pyknometrem byla vyšší než u slámy s klišem. Hustota pak v porovnání s klišovým kompozitem dosahovala hodnot velmi podobných [52].

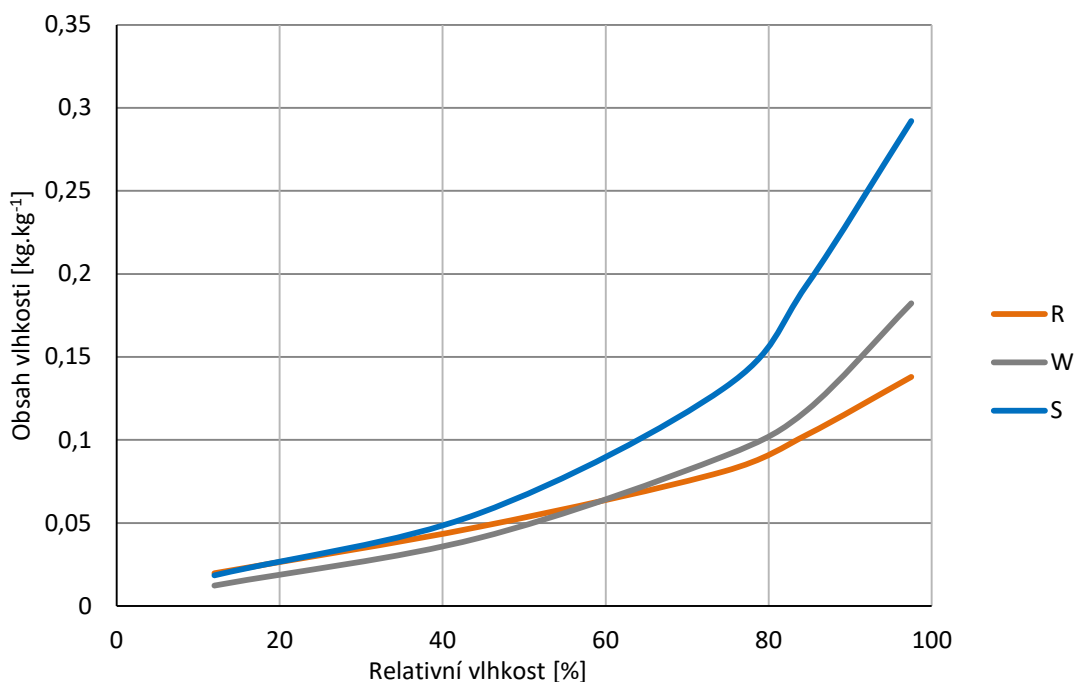
Tab. 20: Základní fyzikální vlastnosti EK – publikováno autorem [52]

Vzorek	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Hustota [kg.m ⁻³]	Otevřená pórovitost [%]
Referenční	375	1 470	74,5
Voda	420	1 490	71,8
NaOH	450	1 510	74,5

Pórovitost je pak při srovnání s konopným betonem obdobná. Konopí pojené cementem mělo publikovanou pórovitost 73 % [51]. Ovšem konopný kompozit s pojivem ze směsi vápna měl otevřenou pórovitost nižší, a to 49,9 %. Stejný autor zkoušel ještě vzorky z řepkové slámy se směsí vápna a otevřenou pórovitost uvádí 54,9 % [43].

5.2.4 Sorpční izotermy a bobtnání (EK)

Stejně jako u klišového kompozitu i v tomto případě jsou vzorky hygroskopické, jak lze pozorovat na obrázku 33. Epoxidový vzorek z ošetřené slámy hydroxidem sodným potvrzuje předchozí závěr u klišového kompozitu, že ošetřením touto zásadou se stává následně vzorek výrazně hygroskopickým na rozdíl od neošetřené slámy nebo ošetřené hydrotermálně. Jednotlivé hodnoty hmotnostních vlhkostí jsou pro jednotlivá prostředí prakticky stejná, to se týká vzorků ze slámy upravené hydrotermálně a vzorků ze slámy neošetřené. U nejvíce hygroskopického vzorku, tedy ze slámy ošetřené v NaOH, jsou hodnoty v nejvlhčejších prostředích menší, než tomu bylo u klišových vzorků ze slámy stejně modifikované.



Obr. 33 Sorpční izotermy EK – publikováno autorem [52]

(R – referenční, W – voda, S – NaOH)

Výsledky lze dobře porovnat s hodnotami publikovanými polskými vědci. Jednalo se o velmi podobný materiál lišícím se v použitém lepidlu, kde byla použita směs pMDI a PF lepidla v poměru 10 % lepidlo a 90 % řepkové slámy, která nebyla modifikována. Z křivky sorpční izotermy, v práci polských vědců, lze vyčíst přibližné hodnoty hmotnostních vlhkostí, které jsou [20]:

Pro 30% RH – 0,05

Pro 60% RH – 0,09

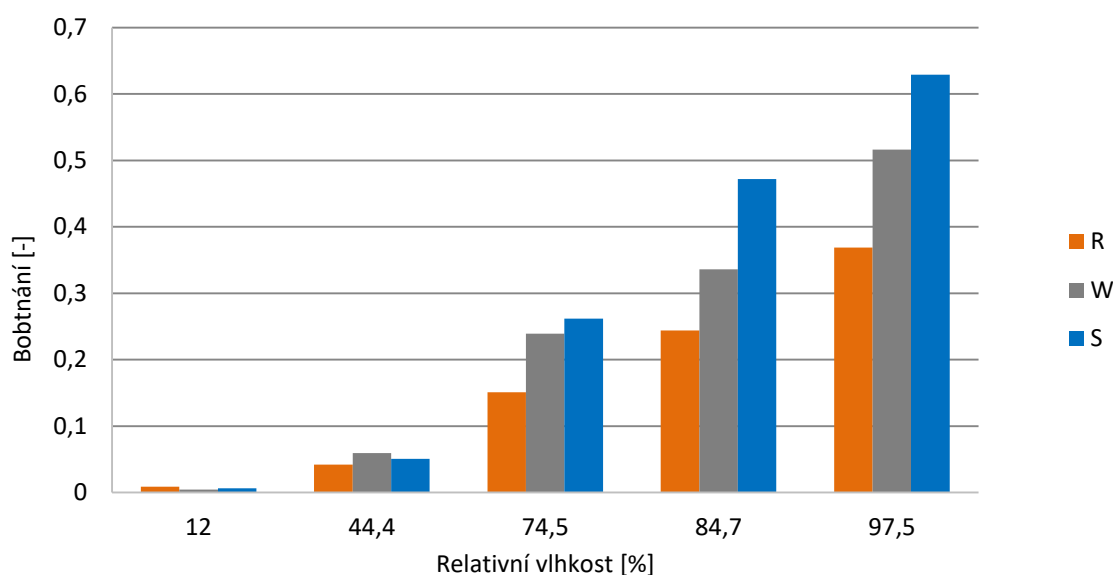
Pro 80% RH – 0,18

Při porovnání tak vychází epoxidový kompozit méně hygroskopický než zmíněný materiál polských vědců.

Hodnoty bobtnání v závislosti na relativní vlhkosti okolí jsou patrné na obrázku 34. Zajímavým zjištěním je, že do prostředí o relativní vlhkosti ~ 85 %, které zajišťuje roztok chloridu draselného, jsou hodnoty bobtnání obdobné s klišovým kompozitem. Také zde největšího bobtnání dosahují vzorky ze slámy ošetřené v hydroxidu. Ovšem v

prostředí s nejvyšší relativní vlhkostí jsou absolutní hodnoty cca dvakrát menší, než tomu bylo u klihu. To lze vysvětlit výrazným přispěním klihu samotného v takto vlhkém prostředí díky jeho reverzibilitě.

Pro porovnání se ideálně nabízí desky vyrobené ze stejně modifikované řepkové slámy lepené polyester-epoxidovým lepidlem. Výsledky měření bobtnání jsou shodné. Tedy i v jejich případě došlo k nejvyšším hodnotám bobtnání u vzorků ze slámy upravené NaOH, nižších hodnot dosahovaly vzorky upravené hydrotermálně a nejmenších délkových změn nabyly vzorky ze slámy nemodifikované [18].



Obr. 34 Velikost bobtnání EK – publikováno autorem [52]

(R – referenční, W – voda, S – NaOH)

Pro případné snížení hygroskopicity lze uvažovat o jiné modifikaci bio-plniva. Práce francouzských vědců, kteří se zaměřovali na změnu základních vlastností různě modifikovaných slunečnicových částic, ukazuje, že při úpravě těchto vedlejších zemědělských produktů parafínovým voskem, se absorpční vlastnosti snížily více než 2,5 násobně oproti vzorkům neupraveným nebo louhovaným v $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [53].

5.2.5 Difúzní vlastnosti (EK)

Stejně jako v případě řepkové slámy s epoxidovým lepidlem se ukazuje, že modifikace řepkové slámy nemá žádný vliv na difúzní vlastnosti těchto materiálů. Dokonce vliv rozdílného pojiva (epoxid vs. klij) je také zanedbatelný, jelikož hodnoty difúzních vlastností zobrazené u klijového kompozitu v tabulce 13, jsou prakticky identické s výsledky v tabulce 21 níže.

Tab. 21: Difúzní vlastnosti EK – publikováno autorem [52]

Vzorek	Součinitel difúze vodní páry [$\times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$]		Faktor difúzního odporu [-]	
	Dry cup 5-50% RH	Wet cup 75-35% RH	Dry cup 5-50% RH	Wet cup 75-35% RH
Referenční	6,88	12,70	33,37	18,26
Voda	6,87	9,60	33,47	24,01
NaOH	6,07	10,40	38,25	22,10

5.2.6 Tepelné vlastnosti (EK)

Součinitel tepelné vodivosti byl v tomto případě měřen nikoliv v závislosti na hmotnostní vlhkosti, ale při konstantních laboratorních podmínkách. Naměřené hodnoty se pohybovaly okolo $0,100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Stejně jako u difúzních vlastností lze konstatovat, že sledované druhy pojiva neměly na tyto vlastnosti vliv. Ačkoliv stejně jako u klijového kompozitu dosahovaly nejvyšších hodnot součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity vzorky vyrobené z modifikované řepkové slámy louhované v NaOH, jsou tyto rozdíly tak malé (v řádu jednotek %), že lze považovat vliv úpravy řepkové slámy na tepelné vlastnosti za zanedbatelný. Naměřené hodnoty jsou patrné níže v tabulce 22.

Tab. 22: Tepelné vlastnosti EK – publikováno autorem [52]

Vzorek	Součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Měrná tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
Referenční	0,095	1434
Voda	0,102	1482
NaOH	0,109	1531

Pro porovnání s obdobnými materiály z jiných publikovaných prací, byla vytvořena tabulka 23. Jedná se o materiály, které spojuje výběr plniva. U všech níže vybraných materiálů je plnivo druhotná zemědělská surovina. Obecně lze říci, že hodnoty součinitele tepelné vodivosti úzce souvisí s velikostí objemové hmotnosti. Poměrně překvapivých hodnot nabývá řepková sláma ve spojení s netradičním pojivem, které je směsí popílků, různých kyselin, hořčíku a monoamonium fosfátu (MPC). Ačkoliv uváděná objemová hmotnost $575 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ je vyšší než u zkoumaného epoxidového kompozitu (tab. 20), uvedená hodnota součinitele tepelné vodivosti je téměř dvakrát nižší [55].

Tab. 23: Srovnání tepelných vodivostí [20, 42, 44, 51, 54, 55, 56]

Plnivo	Pojivo	Součinitel tepelné vodivosti ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Objemová hmotnost (kg.m^{-3})	Zdroj
Řepka	pMDI+PF	0,065	450	[20]
Levandule	metakaolin	0,142	577	[55]
Konopí	směs vápen	0,085	400	[56]
Konopí	směs vápen	0,236	887	[42]
Konopí	cement	0,105	327	[51]
Řepka	jíl	0,043	65	[44]
Slunečnice	jíl	0,053	129	[44]
Řepka	MPC	0,055	575	[54]

5.2.7 Mechanické vlastnosti (EK)

Ačkoliv epoxid se od kostního klihu liší v mnoha ohledech poměrně zásadně, naměřené mechanické vlastnosti o tom nevyovídají. Hodnoty uvedené v tabulce 24, jsou velmi podobné pevnostem u klišového kompozitu (tabulka 14). U epoxidového kompozitu jsou hodnoty pevností zhruba o 10 % menší pro každý vzorek, než v případě vzorků s klišem, což není nikterak zásadní změna. Nutno ovšem připomenout, že zastoupení epoxidu ve směsi je značně nižší, než u jiných autorů. V hmotnostním poměru bylo epoxidu pouze 5 %, ačkoliv jiní autoři dávkovali pojiva dvojnásobně více.

Řepková sláma spojená s netradičním pojivem tvořeným směsí kyselin, popílků a dalšími složkami, byla mechanicky testována v závislosti na množství pojiva.

Očekávaně se prokázalo, že čím více pojivové složky ve směsi je, tím větší byla naměřená tlaková pevnost. Avšak závislost nebyla lineární. Ztráty pevností byly významně vyšší mezi vzorky s nižším množstvím řepkové slámy. Naopak pokles pevností mezi vzorky, kde byl podíl slámy větší, byl mnohem mírnější [18]. Naprosto stejné závěry jsou i v práci, kde byla vlákna datlové palmy a písek pojeny cementem [57]. Na základě těchto prací lze predikovat, že zvýšením podílu lepidla by se mechanické vlastnosti zlepšily, ale nelze čekat, že by závislost dávkování lepidla na mechanické vlastnosti byla lineární. V jiné práci se zabývali závislostí mechanických vlastností na poměru dřeva a řepkové slámy v kompozitu, kde bylo použito močovino formaldehydové lepidlo. S větším podílem dřevité složky se mechanické vlastnosti zlepšovaly a zmenšovalo se bobtnání [58].

Tab. 24: Mechanické vlastnosti EK [39]

Vzorek	Pevnost v ohybu (MPa)	Modul pružnosti (Mpa)
Referenční	2,6 ± 0,4	1200 ± 140
Voda	3,0 ± 0,4	1300 ± 170
NaOH	2,9 ± 0,3	1250 ± 150

5.2.8 Shrnutí výsledků epoxidového kompozitu

Epoxidový kompozit je bezpochyby zajímavým materiálem, jenž je na rozdíl od klišového kompozitu velmi snadné vyrobit. Stejně jako u klišového kompozitu, ani zde nelze uvažovat o použití v místnostech s vysokou vlhkostí nebo vysokými teplotami.

U zkoušek ekotoxikologie a biodegradace byl prokázán pozitivní vliv upravené řepkové slámy v hydroxidu. Jediný výluh, kde se dokázala vylíhnout zvířata vodního korýše, byl připraven právě ze vzorku z takto upravené řepkové slámy, což lze vysvětlit vyšším pH než u ostatních výluhů. Ačkoliv byl zmíněn pozitivní vliv této modifikace, nutno konstatovat, že všechny vzorky způsobily do dvou dnů smrt vodním korýšům a také inhibici kořenového růstu. Řasy nevykazovaly výraznou citlivost na jednotlivé

vzorky. Toxicita pro kvasinky nebyla pozorována u žádného vzorku. Plíseň byla pozorována na všech vzorcích, na vzorcích z řepkové slámy modikované louhováním v NaOH bylo však pokrytí plísní nejmenší.

U sorpčních izoterem se potvrdilo, že úprava slámy hydroxidem má za následek větší hygroskopičnost. Průběh sorpčních izoterem kopíroval trend izoterem pro klišový kompozit. Průběh bobtnání byl také obdobný s přechozím kompozitem. I zde jsou vlhkostní deformace značně veliké. Rozdílem pak mezi oběma kompozity byla velikost bobtnání v nejlhčím prostředí, kde hodnoty u klišu byly mnohem větší.

U difúzních vlastností se opakovaly poměrně vysoké hodnoty faktoru difuzního odporu, kdy u dry cup přesahovaly hodnotu 30 u všech vzorků. Stejně jako u klišu se prokázalo, že vliv modifikace řepkové slámy na difúzní vlastnosti jsou zanedbatelné.

Vliv modifikace se prokázal jako minimální také u tepelných a mechanických vlastností. Pevnosti v tahu za ohybu byly prakticky totožné jako u klišového kompozitu. Pro zvýšení pevností se nabízí zvýšit poměr lepidla ve směsi ze současných 5 % hmotnosti na 10 % nebo více.

6. BEZPOJIVOVÁ DESKA Z ŘEPKOVÉ SLÁMY

Mezi nejrozšířenější konvenční pojiva u deskových materiálů patří fenol formaldehydová, melamin formaldehydová a močovino formaldehydová lepidla, která nachází uplatnění u známých materiálů jako je OSB nebo MDF. Z lepidel na přírodní bázi pak lze zmínit škroby, taniny, lignin a sójový protein. Deskové materiály organického původu lze ovšem vyrobit i bez přidání jakéhokoliv pojiva [59].

Samolepicí schopnost je možná za jistých podmínek díky přechodu do měkkého stavu bio-polymerů za zvýšené teploty. Při zvýšení teploty se vnitřní energie zvyšuje, jednotlivé části a segmenty molekul se mohou pohybovat a deformovat. Relativní poloha se nemění (těžiště zůstává stejné), ale díky velkým elastickým deformacím je lignin schopný obalit při zvýšené teplotě celulózová vlákna a po snížení teploty je tak držet při sobě. Stejně jako u epoxidů se u bio-polymerů jedná o teplotu skelného přechodu [60].

Teplota skelného přechodu pak závisí na mnoha faktorech. Jedním z nejdůležitějších je ovšem vlhkost. V suchém stavu je tato hranice u ligninu 205 °C. Je však obtížné tuto teplotu ověřit, jelikož lignin blízko této teploty začíná degradovat. Degradáční studie prováděné na různých typech ligninu vykazovaly endotermní vrchol („peak“) při teplotách v rozmezí 100 - 180 °C [60].

Bez ohledu na použitý, vstupní bio-materiál jsou hlavními složkami vždy celulóza, lignin a hemicelulóza. Vazby mezi bio-částicemi jsou dány chemickými a fyzikálními interakcemi během lisování za tepla. Klíčovou složkou pro samolepicí schopnost je lignin [60]. Vzhledem k těmto skutečnostem bylo rozhodnuto o výrobě a zkoušení bezpojivových desek z řepkové slámy.

Tab. 25: Obsah ligninu různé biomasy [13, 61, 62, 63, 64, 65, 66]

Biomasa	Obsah ligninu (%)	Reference
Řepková sláma	16,9	13
Kokosová vlákna	45-62,9	61
Rýžové slupky	14,3	62
Kenaf	18,7-24,3	63,64
Kukuřičná sláma	22,2	65
Rýžová sláma	15-28	66

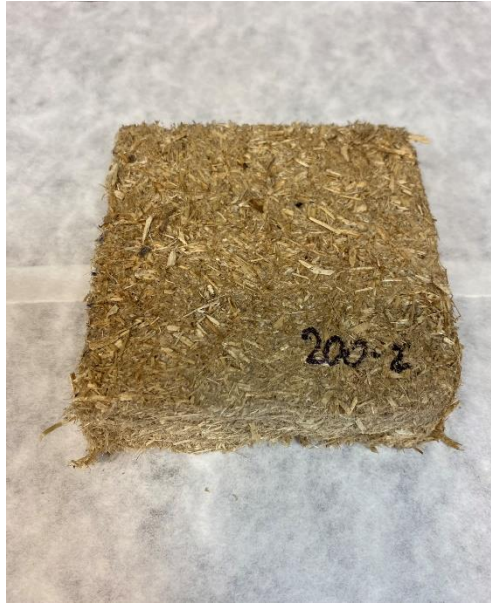
6.1 Postup výroby vzorků

Pro výrobu bezpojivových vláknitých desek byla použita stejná řepková sláma jako u kompozitů popsaných v předchozím textu. Jak již bylo zmíněno u kompozitů v přechozích kapitolách, je známo, že na povrchu řepkové slámy se nalézají voskovité částice, které mají za následek zhoršení pojivových vlastností [37]. Pro zbavení se těchto částic byla nejprve sláma vložena do nádoby a zalita vodou o teplotě 80 °C, čehož bylo dosaženo rychlovarnou konvicí s regulací teploty. Sláma se ručně vyprala a scedila. Tento postup se opakoval celkem třikrát. Následně se sláma rozvláknila. Proces rozvláknění probíhal v horké vodní lázni za pomoci rozvlákňovače se spirálovitým rotorem po dobu 10 minut při nastavených 3600 otáčkách za minutu [67].

Vzhledem k velikosti rozvlákňovače a množství slámy nedošlo k úplnému rozvláknění slámy, a tak vyrobené vzorky obsahovaly i drobné části stonků, jak je vidět na obrázku 35. Z rozvlákněné slámy byly vyřazeny částice, které neprošly skrze kontrolní síto s velikostí oka 4 mm.

Následně se vzniklá hmota přendala do formy o půdorysných rozměrech 300 x 300 mm. Po urovnání do souvislé, vodorovné vrstvy se horní povrch překryl hliníkovou fólií. Následně byla hmota vystavena po dobu jedné minuty tlaku 8 kPa. Hodnota stlačení byla takto malá z obav ohledně velkých deformací vlivem bobtnání finální desky. Pro rovnoměrný přenos tlaku byla použita roznášecí deska z ploché, válcované oceli tloušťky 15 mm. Po uvolnění tlaku byla přebytečná voda slita a forma s rozvlákněnou slámou umístěna do klimakomory, kde byla ve vlhkém prostředí propařována po dobu 30 minut při různých nastavených teplotách.

Po napařování se vzorky sušily při teplotě 60 °C po dobu 48 hodin. Vzorky byly rozlišovány podle teploty nastavené v komoře (100 °C, 140 °C, 180 °C a 200 °C). Výsledná tloušťka desky byla 40 mm. Během celého procesu nebyla přidána žádná pojivová ani jiná složka [67]. Prakticky stejný postup byl již v minulosti aplikován na bezpojivových deskách ze smrkové kůry [68].



Obr. 35 Pohled na vzorek vyráběný při napařovací teplotě 200 °C - *fotogalerie autora*

Vzorky byly vyráběné ve vlhkém prostředí, jelikož při experimentech na rozvlákněném dřevu se prokázalo, že čím vyšší je výrobní vlhkost u samolepicích desek, tím byly mechanické vlastnosti lepší. To lze vysvětlit faktem, že se zvyšující se vlhkostí prostředí jsou hydroxylové skupiny v postranních řetězcích ligninu více náchylné k dehydrataci, je podporována hydrolytická reakce a štěpení aryl-etherových vazeb v ligninovém hlavním řetězci odhaluje aktivnější místa. Tudiž je usnadněna tvorba nových C—C vazeb a pevnost vzniklého materiálu je vylepšena díky samokondenzaci ligninu [69].

Sofistikovanější postup při výrobě desek pak může být takový, jaký byl popsán při výrobě desek bez přidané pojivové složky z kenafu. Forma s vlákny se uložila do lisu, každá lisovací plocha měla teplotu 190 °C, lisovací tlak byl 5 MPa a během lisování byla do formy vháněna horká vodní pára [70]. Stlačování při zvýšené teplotě (14,7 MPa, 140 - 200 °C), ale v suchém prostředí, bylo také použito na výrobu vláknité desky bez přidaného lepidla z kokosových slupek a bagasy [71].

6.2 Základní a mechanické vlastnosti

Z tabulky 26 uvedené níže jsou vidět základní naměřené vlastnosti při různých teplotách propařování. Hodnoty objemové hmotnosti jsou zhruba dvakrát menší než obdobně vyráběné vzorky ze smrkové kůry [68]. Vyšší objemové hmotnosti by šlo

dosáhnout větším tlakem při výrobě vzorků, podobně jako byly vyrobené desky z rýžové slámy pod tlakem 5 MPa ($800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) [72].

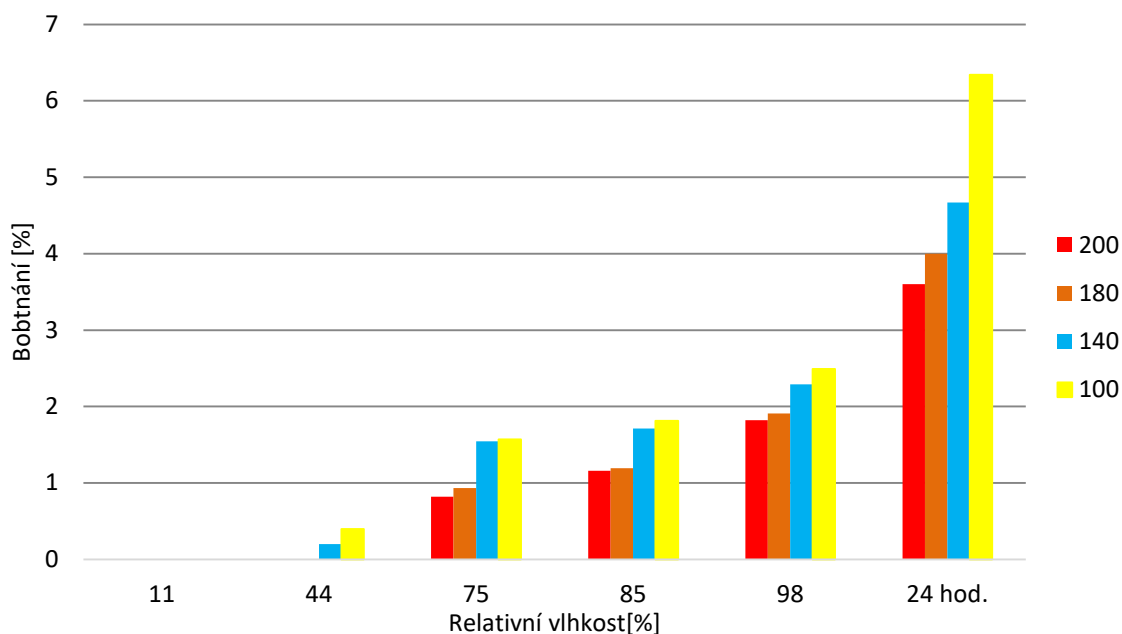
Tab. 26: Základní vlastnosti vláknité bezpojivové desky – publikováno autorem [67]

Teplota propařování	Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Nasákavost 24 h [% $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	Bobtnání 24 h [%]
100 °C	104 ± 4	634 ± 23	6,34 ± 0,18
140 °C	104 ± 4	606 ± 20	4,67 ± 0,20
180 °C	107 ± 5	606 ± 24	4,00 ± 0,28
200 °C	107 ± 4	601 ± 22	3,40 ± 0,29

Hodnoty nasákavosti se v závislosti na teplotě propařování zásadně neliší. Hodnoty nasákavosti jsou výrazně vyšší v porovnání s jinými obdobnými materiály. Například desky ze smrkové kůry měly nasákavost maximálně 300 % [68], desky z modifikované slámy pšeničné pak maximálně 140 % [73]. U bobtnání je viditelný trend, kdy s rostoucí teplotou při propařování klesá míra deformace bobtnání. Stejný trend byl již publikován u desek z rýžové slámy [74].

Při výrobě desek byl záměrně použit co nejmenší možný tlak při stlačení z důvodu vysoké hodnoty bobtnání. Při porovnání s bezpojivovými deskami vyrobenými při lisovacím tlaku 14,7 MPa z vláken kokosu a bagasy, byly deformace při bobtnání vzhledem k deskám z řepkové slámy řádově větší (22 - 43 %) [71]. Desky vyrobené z rýžové slámy lisovacím tlakem 5 MPa měly hodnoty bobtnání zhruba dvakrát větší (8 - 12 %) proti deskám vyrobeným z řepkové slámy [72]. Faktorů ovlivňujících bobtnání je pravděpodobně více, lisovací tlak při výrobě je jedním ze zásadních.

Při porovnání velikosti bobtnání v závislosti na vlhkosti prostředí, které je graficky uvedené na obrázku 36, lze konstatovat, že vzorky vyráběné za teploty 100 °C a 140 °C mají trendy růstu deformace podobné. Stejnou dvojici poté tvoří vzorky vyráběné při teplotě 180 °C a 200 °C. Je vidět, že chování materiálu se výrazně liší mezi výrobní teplotou 140 °C a 180 °C.



(24 hod značí dobu, po kterou byly vzorky ponořeny ve vodě)

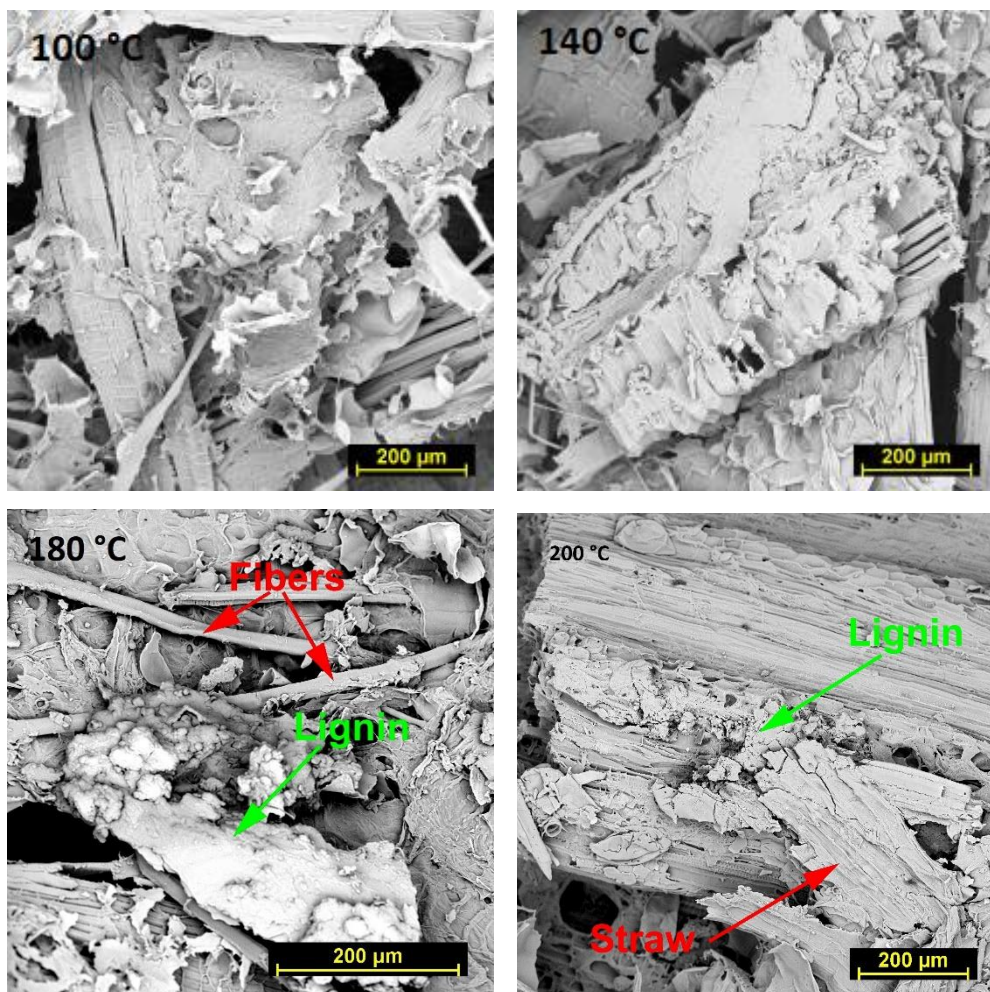
Obr. 36 Bobtnání při různé vlhkosti prostředí – publikováno autorem [67]

U mechanických vlastností, které jsou charakterizovány pevností v tahu kolmo k rovině desky, je vidět závislost na výrobní teplotě. Velikosti pevností a modulů pružnosti jsou zobrazeny níže v tabulce 27. I zde je patrný zásadní rozdíl v naměřených hodnotách mezi teplotou 140 °C a 180 °C.

Tab. 27: Mechanické vlastnosti – publikováno autorem [67]

Teplota propařování	Pevnost v tahu [kPa]	Modul pružnosti [kPa]
100 °C	4,6 ± 0,37	273 ± 25
140 °C	6,3 ± 0,42	373 ± 35
180 °C	12,5 ± 0,68	409 ± 40
200 °C	14,0 ± 0,53	442 ± 32

Výraznější změny vlastností materiálu při vyšší výrobní teplotě si lze vysvětlit lepším obalením vláken celulózy ligninem. Toto tvrzení lze demonstrovat díky obrázkům z mikroskopu, které jsou vidět níže na obrázku 37. Na tomto obrázku je patrné (ze snímku s označením 180 °C), že lignin byl dostatečně změkklý na to, aby dokázal vlákna lépe obalit.



Obr. 37 Mikroskopické pohledy na vzorky vyráběné při různé teplotě – publikováno autorem [67]

Na deskách z rýžové slámy, bylo dokázáno, že významné zvýšení pevnosti v tahu lze dosáhnout autoklávováním slámy před výrobou desek, čím vyšší teplota v autoklávu byla, tím se pevnost zvyšovala. Nutno říci, že se jedná o energeticky náročnou předúpravu [74]. Ke zlepšení lepidlových vlastností může být také použito Fentonovo činidlo [75]. Výrazný vliv má také délka vláken. Při výzkumu vlivu vláken ze smrkové kůry na různé vlastnosti se prokázalo, že vzorky vyrobené z vláken délky 1,6 mm, měly tahovou pevnost 129 kPa, zatímco vzorky z vláken délky 7 mm pouze 9 kPa [68]. U bezpojivových vláknitých desek z ibišku byla prokázána závislost mezi objemovou hmotností a tahovou pevností, čím vyšší byla objemová hmotnost, tím byla vyšší pevnost [70].

Zajímavých výsledků bylo dosaženo u bezpojivových desek vyráběné z kokosu a bagasy. Ačkoliv byl tlak při lisování desek 14,7 MPa, což je o několik řádů více než u řepkových desek, a obsah ligninu byl v případě kokosu také výrazně větší v porovnání

s řepkou, tak se hodnoty tahových pevností pohybovaly od 2 do 14 kPa [71]. Tyto výsledky jsou prakticky totožné v porovnání s bezpojivovými deskami z řepkové slámy studovanými v této práci. Takto nízké pevnosti si lze odůvodnit suchou cestou výroby, protože pozitivní vliv zvýšené vlhkosti při výrobě na mechanické vlastnosti byl již dříve publikován [69].



Obr. 38 Vzorčky po zkoušce v tahu - vlastní fotogalerie autora

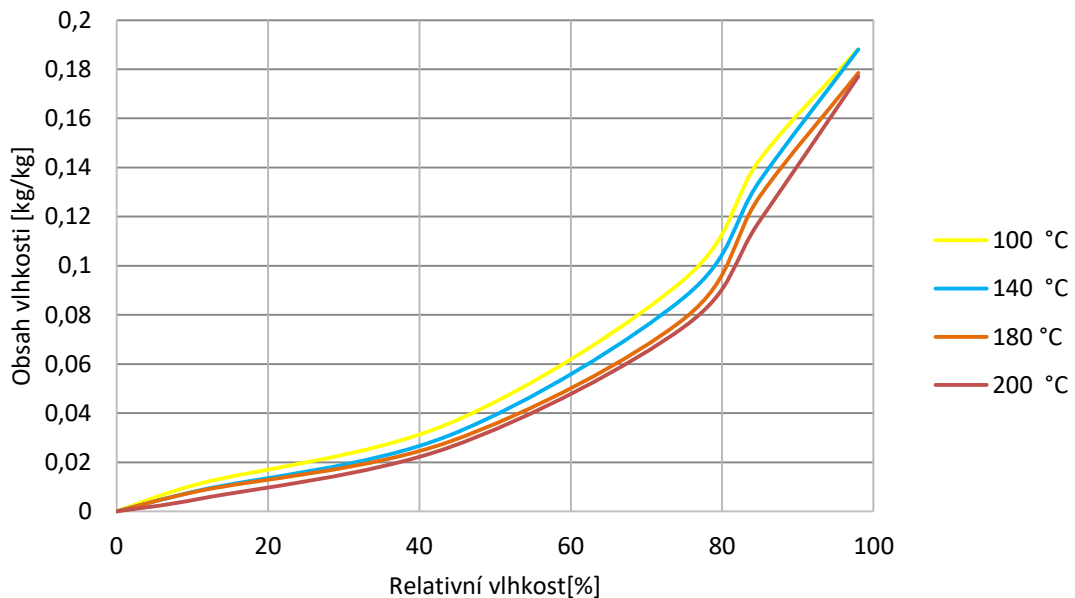
Publikované výsledky měření bezpojivových desek z bavlny potvrdily předchozí závěr, že mechanické pevnosti jsou závislé na vlhkosti při výrobě, čím vyšší byla výrobní vlhkost, tím byla vyšší výsledná tahová pevnost. Mimo to v této práci bylo dokázáno, že na výslednou pevnost měla významný vliv doba stlačení při výrobě, čím déle působil lisovací tlak při jejich výrobě, tím vyšší pevnosti byly. Například mezi dobou 20 s.mm^{-1} a 30 s.mm^{-1} byl pevnostní rozdíl víc než dvojnásobný [76].

Závěrem k této problematice lze konstatovat, že jako neefektivnější teplota při výrobě se jeví $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Z výsledků v tabulce 27 lze vyčíst, že při teplotě $200 \text{ }^\circ\text{C}$ jsou pevnostní hodnoty nepatrně vyšší, na rozdíl od výsledků dosažených mezi teplotou $140 \text{ }^\circ\text{C}$ a $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Na základě uvedené rešerše lze přemýšlet o efektivním zvýšení pevností úpravou délky vláken a propařováním při lisování. Ostatní se jeví jako neefektivní, vzhledem k vysokým energetickým nárokům při výrobě.

6.3 Sorpční izotermy a difúzní vlastnosti

Sorpční izotermy jsou zobrazeny na obrázku 39 níže. Průběh jednotlivých křivek je prakticky totožný a vliv teploty tak lze u této vlastnosti zanedbat. Hygroskopičnost vláknité bezpojivové desky z řepkové slámy je shodná s řepkovými kompozity (v této

práci popsanými) vyrobenými ze slámy modifikované hydrotermálně nebo bez úpravy. Při porovnání s jinými vláknitými materiály je průběh izoterm srovnatelný s křivkami dosaženými u materiálu vyrobeného z juty a lnu [77]. Více hygroskopické pak byly vzorky vláknitých desek vyrobených z pilin dřeva a recyklovaného papíru [78].



Obr. 39 Sorpční izotermy vláknitých desek z řepky – publikováno autorem [67]

U difúzí, stejně jako u mechanických vlastností, lze sledovat, že s rostoucí teplotou se zvyšují i dosažené hodnoty charakterizující transport vodní páry. Faktor difúzního odporu je v mezích hodnot uváděných pro izolační materiály, které se obecně používají pro difuzně otevřené konstrukce. Oproti kompozitům z klihatu a epoxidu jsou hodnoty o řád nižší.

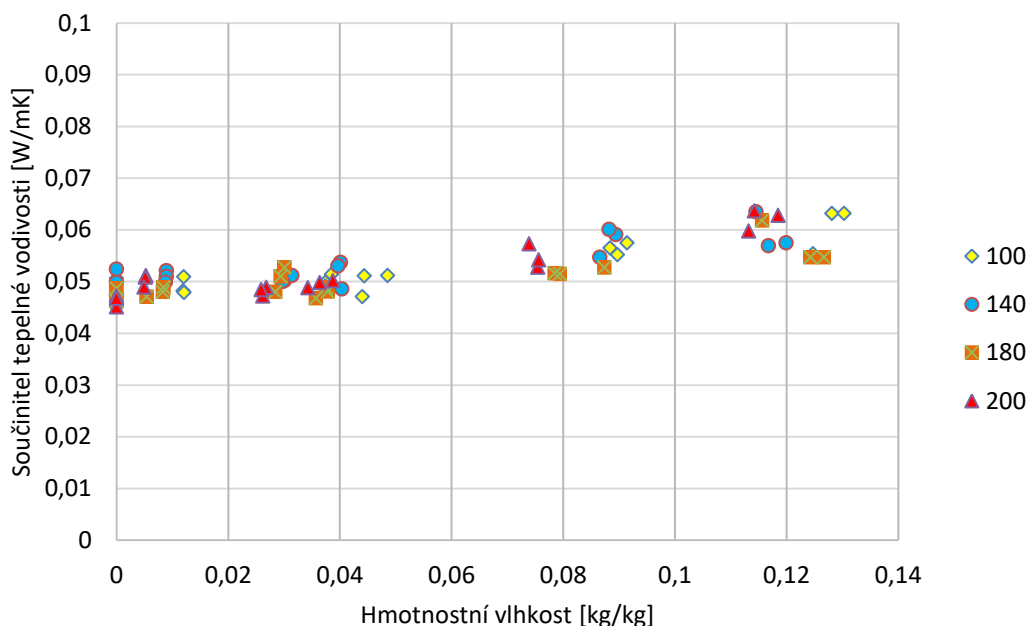
Tab. 28: Difúzní vlastnosti – publikováno autorem [67]

Teplota propařování	Součinitel difuze vodní páry [$\times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$]		Faktor difuzního odporu [-]	
	Dry cup 5-50% RH	Wet cup 75-35% RH	Dry cup 5-50% RH	Wet cup 75-35% RH
100 °C	5,33 ± 0,27	7,68 ± 0,21	4,33 ± 0,23	3,00 ± 0,28
140 °C	4,84 ± 0,31	6,83 ± 0,17	4,77 ± 0,29	3,40 ± 0,21
180 °C	4,14 ± 0,23	4,68 ± 0,21	5,59 ± 0,32	4,91 ± 0,22
200 °C	4,09 ± 2,01	4,84 ± 0,46	5,63 ± 0,23	4,80 ± 0,47

6.4 Tepelné vlastnosti

Závislost hmotnostní vlhkosti na součiniteli tepelné vodivosti je vidět na obrázku 40. Lze prohlásit, že vliv výrobní teploty na součinitel tepelné vlastnosti je zanedbatelný. Nutno říci, že naměřené hodnoty se pohybují na hraně, pod kterou jsou

již materiály označovány jako vhodné pro tepelně izolační materiály. V suchém stavu byly naměřené hodnoty v rozmezí $0,045 - 0,052 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.



Obr. 40 Závislost součinitele tep. vodivosti na hmotnostní vlhkosti – publikováno autorem [67]

Naměřené hodnoty se shodují s jinými vláknitými materiály vyrobenými bezpojivovou technologií z druhotných zemědělských surovin, jak je vidět v tabulce 29 níže.

Tab. 29: Porovnání součinitele tep. vodivosti [70, 76, 79, 80]

Materiál	Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Zdroj
Polystyren EPS	16-35	0,034-0,038	[79]
Polystyren XPS	24-42	0,026-0,035	[79]
Skleněná vlákna	24-120	0,034-0,047	[79]
Expandovaný perlit	78-224	0,0477-0,0616	[79]
Minerální vlna	80-200	0,025-0,035	[79]
Bez pojivová vláknitá deska z kenafu	150-200	0,051-0,058	[70]
Bez pojivová vláknitá deska z bavlny	150-450	0,0585-0,0815	[76]
Bez pojivová vláknitá deska z pšenice	150-250	0,0481-0,0521	[80]

7. ZÁVĚR

Ačkoliv se výsevní plochy řepky mezi jednotlivými roky mění, stále je řepka olejka zdaleka nejvíce osévanou olejninou v České republice. Česká republika patří mezi pět největších producentů řepky v Evropské unii a vzhledem k širokému uplatnění řepkového oleje v rozdílných oborech, nelze v nejbližších dekádách očekávat výrazný úbytek této plodiny na našich polích. S přihlédnutím ke statistickým údajům a odhadem získaným v rámci zachytávání řepkové slámy během sklizně lze odhadnout, že každý rok je možné zachytit více než 30 miliónů m³ řepkové slámy.

Hlavním cílem práce bylo nalézt materiál vhodný k použití ve stavebnictví, který bude z velké části tvořen druhotnou zemědělskou surovinou v podobě řepkové slámy. Prvním experimentálně vyrobeným materiálem byl kompozit vzniklý z řepkové slámy a kostního klišu. Směs byla dále modifikována lignosulfonátem sodným pro zlepšení mechanických vlastností. V prvním kroku byl optimalizován poměr složek ve směsi. Na základě dosažených nejvyšších ohybových pevností byla vybrána směs v hmotnostním poměru 65 : 30 : 5 (řepková sláma : nabobtnalý kostní kliš : lignosulfonát sodný).

Pro výrobu klišového kompozitu byla použita řepková sláma:

- A) Neošetřená
- B) Ošetřená hydrotermálně
- C) Louhovaná v 2% roztoku hydroxidu sodného

Elektronovou mikroskopií pak bylo pozorováno, že na neošetřené slámě se nalézají nečistoty, na slámě upravené teplou vodní lázní pak tyto nečistoty pozorovány nebyly. Na slámě modifikované hydroxidem pak bylo pozorováno ulpívání krystalků na rozrušeném povrchu stěn.

Vliv modifikace řepkové slámy se neprojevil nebo projevil jen minimálně na zkoušené mechanické, tepelné a difúzní vlastnosti. Naměřené hodnoty ohybové pevnosti se pak pohybovaly $3,2 \pm 0,7$ MPa, součinitele tepelné vodivosti v suchém stavu $\lambda = 0,09 - 0,11$ W.m⁻¹.K⁻¹ a hodnoty měrné tepelné kapacity v suchém stavu $1\,550 - 1\,610$ J.kg⁻¹.K⁻¹. Faktor difúzního odporu pak byl v případě metody dry cup $33,98 \pm 4,83$ a u metody wet cup $24,35 \pm 2,27$.

Naopak významný vliv byl zaznamenán u hygroskopičnosti a bobtnání. Zatímco vzorky vyrobené ze slámy neošetřené a ošetřené hydrotermálně se chovaly velmi podobně, vzorky ze slámy louhované v 2% hydroxidu NaOH byly mnohem více hygroskopické. Dále experimentálně zaznamenané hodnoty bobtnání byly u vzorků z louhované slámy v NaOH znatelně vyšší. Další rozdíly byly pozorovány u zkoušek biodegradačních, kdy napadení plísněmi bylo u těchto vzorků nejmenší. U zkoušek ekotoxicity způsobily všechny výluhy smrt vodním korýšům a na ostatní organismy měly stimulační vliv. Alespoň vylíhnout se vodním korýšům podařilo ve výluhu z řepkové slámy ošetřené hydroxidem.

Navrhnutí vhodného způsobu aplikace pro klišový kompozit z řepkové slámy je otázkou budoucnosti. Ačkoliv je na pohled téměř nerozeznatelná od hojně používané OSB desky a má mnoho vlastností podobných, je zejména nutno zmínit nižší ohybové pevnosti a nevhodnost použití do vlhkého prostředí. Výhodou je pak šetrnost k životnímu prostředí a snadná recyklace. Své uplatnění by tak materiál mohl naleznout kromě stavebnictví i v truhlářství nebo jako obalový materiál.

Pro eliminaci nekompatibility materiálu s vlhkým prostředím byla zaměněna pojivová složka. Druhým zkoumaným materiálem pak tedy byl kompozit, vzniklý spojením řepkové slámy a ekologicky šetrnou epoxidovou pryskyřicí. Směs byla hmotnostně tvořena 95 % řepkovou slámou a 5 % epoxidového lepidla (po smísení tvrdidla a plnidla). Pro ověření závěrů u předchozího klišového kompozitu byly vzorky vyrobené z řepkové slámy neupravené i upravené.

U mechanických, tepelných a difúzních vlastností se potvrdil minimální vliv úpravy řepkové slámy. Naměřené hodnoty těchto vlastností jsou pak velmi podobné hodnotám naměřeným u kompozitu klišového. Naměřené hodnoty ohybové pevnosti se pohybovaly $2,8 \pm 0,6$ MPa, součinitele tepelné vodivosti v suchém stavu $\lambda = 0,09 - 0,11$ W.m⁻¹.K⁻¹, měrné tepelné kapacity v suchém stavu $1\,434 - 1\,531$ J.kg⁻¹.K⁻¹. Faktor difuzního odporu pak byl v případě metody dry cup $35,03 \pm 3,22$ a u metody wet cup $21,46 \pm 3,20$.

Potvrdil se vliv úpravy slámy na hygroskopičnost. Zatímco sorpční izotermy dosažené u vzorků vyrobených z neošetřené slámy a z upravené slámy hydrotermálně měly průběh podobný, vzorky vyrobené z řepkové slámy upravené louhováním v roztoku NaOH, byly stejně, jako u klišového kompozitu, výrazně více hygroskopické.

U bobtnání největší deformace opět dosáhly vzorky ze slámy upravené hydroxidem. Velikost bobtnání byla ovšem v průměru dvakrát menší než u klišového kompozitu.

Plísní byly zasaženy všechny vzorky. Nejnižšího stupně pokrytí plísní byly ohodnoceny vzorky vyrobené ze slámy louhované v hydroxidu. Zkoušky ekotoxicity pak byly v naprosté shodě s výsledky u klišového kompozitu.

Posledním experimentálně vyrobeným a zkoušeným materiálem byla bezpojivová vláknitá deska z řepkové slámy. Pro její výrobu byla využita samolepicí vlastnost ligninu při zvýšené teplotě. Byl zkoumán vliv teploty v kombinaci při výrobě tohoto materiálu. Jednalo se o čtyři nastavené teploty během propařování = 100 °C, 140 °C, 180 °C a 200 °C.

Teplota při výrobě neměla téměř žádný vliv na tepelně izolační vlastnosti. V suchém stavu byly naměřené hodnoty v rozmezí $\lambda = 0,045 - 0,052 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Sestrojené sorpční izotermy se ve všech případech překrývaly. Faktor difúzního odporu pak rostl s rostoucí teplotou, ale nejednalo se o zásadní rozdíly. Hodnoty, v případě metody dry cup, byly od 4,33 (100 °C) do 5,63 (200 °C) a u metody wet cup od 3,00 (100 °C) do 4,91 (180 °C). Teplota při výrobě neměla vliv ani na nasákavost, kdy všechny vzorky měly hmotnostní nasákavost po 24 hodinách lehce přes 600 %.

Ačkoliv bobtnání dosahovalo ve všech případech pouze jednotky procent, byl evidentní trend, kdy s rostoucí výrobní teplotou deformace klesaly.

Nejvýraznější vliv pak byl zaznamenán u mechanických vlastností. Hodnoty pevností v tahu kolmo k rovině desky rostly s rostoucí teplotou propařování. Nejvýraznější skok nastal mezi teplotou 140 °C ($6,3 \pm 0,42 \text{ kPa}$) a 180 °C ($12,5 \pm 0,68 \text{ kPa}$). Vzhledem k těmto dosaženým výsledkům se zdá optimální výrobní teplota 180 °C, jelikož s vyšší teplotou již přírůstky pevností nejsou tak markantní.

V této práci jsou prezentovány 3 nově vyvíjené materiály, které jsou vyrobeny z řepkové slámy. V dalším kroku bude důležité propojit tyto znalosti s praxí a pokusit se tyto materiály či jejich modifikace uvést na trh.

8. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ODBOR 01200, Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Iniciativa Průmysl 4.0: Průmysl 4.0 má v Česku své místo* [online]. In: . 14.7.2017 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/53723/64358/658713/priloha001.pdf>
- [2] RODRIGUE, Jean-Paul. *Transportation and Society. The Geography of Transport Systems* [online]. 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://transportgeography.org/contents/chapter3/transportation-and-society/>
- [3] ŠKABRADA, Jiří. *Konstrukce historických staveb*. Praha: Argo, 2003. ISBN 80-7203-548-7.
- [4] BARANYK, Petr. *Jak to vidíte?: Krajina září žlutě! Máme se radovat nebo bát?* [online]. In: . 16.6.2015 [cit. 2023-05-15]. ISBN Český rozhlas. Dostupné z: <https://prehovac.rozhlas.cz/audio/3410198>
- [5] BARANYK, Petr. *ŘEPKA: pěstování - využití - ekonomika*. Praha: Profi Press, 2007. ISBN 978-80-86726-26-7.
- [6] BEČKA, David. *Řepka ozimá: pěstitelský rádce*. Praha: Pro katedru rostlinné výroby, FAPPZ, ČZU v Praze vydalo vydavatelství Kurent, 2007. ISBN 978-80-87111-05-5.
- [7] BARTOVSKÝ, Tomáš. *Zavádění biopaliv v České republice*. Ministerstvo průmyslu a obchodu [online]. 4.9.2007 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/zavadeni-biopaliv-v-ceske-republice--34289/>
- [8] *Vývoj osevních ploch zemědělských plodin k 31.5*. In: *Český statistický úřad: Veřejná databáze* [online]. Praha: ČSÚ [cit. 2022-07-14]. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt&z=T&f=TABULKA&skupId=346&katalog=30840&pvo=ZEM02C&pvo=ZEM02C#w=%20%20>
- [9] Rape, turnip rape, sunflower seeds and soya by area. In: *Eurostat* [online]. eurostat: eurostat, 2022, 2022 [cit. 2022-07-14]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tag00100/default/bar?lang=en>
- [10] TOFANICA, BOGDAN MARIAN. RAPESEED – A VALUABLE RENEWABLE BIORESOURCE. *Cellulose Chemistry and Technology* [online]. 2019, **53**(9-10), 837-849 [cit. 2022-10-23]. ISSN 05769787. Dostupné z: doi:10.35812/CelluloseChemTechnol.2019.53.81
- [11] CIESLAR, Jan. *Rekord v těžbě dřeva byl znovu pokořen* [online]. In: . 31.05.2021 [cit. 2022-08-31]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/rekord-v-tezbe-dreva-byl-znovu-pokoren>

- [12] DUŠEK, Jaroslav, Miloš JERMAN, Milan PODLENA, Martin BÖHM a Robert ČERNÝ. Sustainable composite material based on surface-modified rape straw and environment-friendly adhesive. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **300** [cit. 2022-12-26]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124036
- [13] Potucek, Frantisek & Milichovsky, Miloslav. (2011). Rapeseed straw as a possible source of non-wood fibre materials. *Cellulose Chemistry and Technology*. 45. 23-28.
- [14] ČÁSTKOVÁ, Tereza, Štěpán HÝSEK, Adam SIKORA, Ondřej SCHÖNFELDER a Martin BÖHM. Chemical and Physical Parameters of Different Modifications of Rape Straw (*Brassica napus* L.). *BioResources* [online]. 2017, **13**(1), 104-114 [cit. 2022-08-31]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.13.1.104-114
- [15] COSEREANU, Camelia, CERBU Camelia. Morphology, Physical, and Mechanical Properties of Particleboard Made from Rape Straw and Wood Particles Glued with Urea-Formaldehyde Resin." *Bioresources* 14 (2019): 2903-2918.
- [16] MIRSKI, Radosław, Dorota DZIURKA. Using Rape Particles in the Production of Polymer and Lignocellulose Boards. (2019). *Bioresources*, 14, 6736-6746.
- [17] GAFF, Milan, Štěpán HÝSEK, Adam SIKORA a Marián BABIAK. Newly developed boards made from crushed rapeseed stalk and their bendability properties. *BioResources* [online]. 2018, 13(3), 4776-4794 [cit. 2023-01-12]. ISSN 19302126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.13.3.4776-4794
- [18] HÝSEK, Štěpán, Adam SIKORA, Ondřej SCHÖNFELDER a Martin BÖHM. Physical and mechanical properties of boards made from modified rapeseed straw particles. *BioResources* [online]. 2018, 13(3), 6396-6408 [cit. 2023-01-12]. ISSN 19302126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.13.3.6396-6408
- [19] HÝSEK, Štěpán, Milan GAFF, Adam SIKORA a Marián BABIAK. New composite material based on winter rapeseed and his elasticity properties as a function of selected factors. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2018, 153, 108-116 [cit. 2022-09-06]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2018.07.042
- [20] DUKARSKA, Dorota, Rafał CZARNECKI, Dorota DZIURKA a Radosław MIRSKI. Construction particleboards made from rapeseed straw glued with hybrid pMDI/PF resin. *European Journal of Wood and Wood Products* [online]. 2017, **75**(2), 175-184 [cit. 2022-10-23]. ISSN 0018-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00107-016-1143-x
- [21] BÖHM, Martin, Miloš JERMAN, Jaroslav DUŠEK, Zuzana HLAVÁČOVÁ a Robert ČERNÝ. *Microscopic analysis of composite boards made from rapeseed straw particles* [online]. In: . 2021, 030007- [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: doi:10.1063/5.0047799
- [22] ROELS, Staf, Prabal TALUKDAR, Chris JAMES a Carey J. SIMONSON. Reliability of material data measurements for hygroscopic buffering. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2010, 53(23-24), 5355-5363 [cit. 2023-01-12]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.020

- [23] KOBETIČOVÁ, Klára, Martin BÖHM, Miloš JERMAN, Jaroslav DUŠEK a Robert ČERNÝ. Ecotoxicity and Biodegradation of Sustainable Environment-Friendly Bone-Glue-Based Adhesive Suitable for Insulation Materials. *Polymers* [online]. 2022, **14**(11) [cit. 2023-01-12]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym14112209
- [24] SCHMITT, Marcel, Georg GELLERT, Jost LUDWIG a Hella LICHTENBERG-FRATÉ. Phenotypic yeast growth analysis for chronic toxicity testing. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [online]. 2004, **59**(2), 142-150 [cit. 2023-01-07]. ISSN 01476513. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecoenv.2004.06.002
- [25] KOBETIČOVÁ, Klára, Jan FOŘT a Robert ČERNÝ. Interactions of superabsorbent polymers based on acrylamide substances with microorganisms occurring in human dwellings. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [online]. 2020, **195** [cit. 2023-01-12]. ISSN 01476513. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecoenv.2020.110522
- [26] RAHIM, M., O. DOUZANE, A.D. TRAN LE a T. LANGLET. Effect of moisture and temperature on thermal properties of three bio-based materials. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, **111**, 119-127 [cit. 2023-02-20]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.061
- [27] ELFORDY, S., F. LUCAS, F. TANCRET, Y. SCUDELLER a L. GOUDET. Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hempcrete") manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials* [online]. 2008, **22**(10), 2116-2123 [cit. 2023-02-20]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016
- [28] RAHIM, M., O. DOUZANE, A.D. TRAN LE, G. PROMIS, B. LAIDOUDI, A. CRIGNY, B. DUPRE a T. LANGLET. Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity. *Energy and Buildings* [online]. 2015, **88**, 91-99 [cit. 2023-01-12]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.043
- [29] STRANDBERG-DE BRUIJN, Paulien a Peter JOHANSSON. Moisture transport properties of lime–hemp concrete determined over the complete moisture range. *Biosystems Engineering* [online]. 2014, **122**, 31-41 [cit. 2023-01-12]. ISSN 15375110. Dostupné z: doi:10.1016/j.biosystemseng.2014.03.001
- [30] SUKOVÁ, Tereza. *Studium kolagenních pojiv používaných v uměleckých dílech*. Praha, 2010. Diplomová práce. Karlova univerzita, Pedagogická fakulta, Katedra chemie a didaktiky chemie. Vedoucí práce Štěpánka Kučková.
- [31] NGUYEN, Dang Mao, Anne-Cécile GRILLET, Thi My Hanh DIEP, Chi Nhan HA THUC a Monika WOLOSZYN. Hygrothermal properties of bio-insulation building materials based on bamboo fibers and bio-glues. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **155**, 852-866 [cit. 2022-12-01]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.075
- [32] DUVAL, Antoine, Sonia MOLINA-BOISSEAU a Christine CHIRAT. Comparison of Kraft lignin and liginosulfonates addition to wheat gluten-based materials: Mechanical and thermal properties. *Industrial Crops and Products* [online]. 2013, **49**, 66-74 [cit. 2023-02-20]. ISSN 09266690. Dostupné z: doi:10.1016/j.indcrop.2013.04.027

- [33] KAEWTATIP, Kaewta, Paul MENUT, Remi AUVERGNE, Varaporn TANRATTANAKUL, Marie-Helene MOREL a Stephane GUILBERT. Interactions of Kraft Lignin and Wheat Gluten during Biomaterial Processing: Evidence for the Role of Phenolic Groups. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* [online]. 2010, **58**(7), 4185-4192 [cit. 2023-01-12]. ISSN 0021-8561. Dostupné z: doi:10.1021/jf9042776
- [34] KUNANOPPARAT, Thiranan, Paul MENUT, Marie-Hélène MOREL a Stéphane GUILBERT. Improving wheat gluten materials properties by Kraft lignin addition. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2012, **125**(2), 1391-1399 [cit. 2023-01-12]. ISSN 00218995. Dostupné z: doi:10.1002/app.35345
- [35] ZETOCHA, Martin. VYUŽITÍ PLASTIFIKÁTORU NA BÁZI LIGNOSULFONÁTU V ALKALICKY AKTIVOVANÝCH MATERIÁLECH. Brno, 2020. Bakalářská práce. VUT, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Lukáš Kalina.
- [36] JERMAN, Miloš, Jaroslav DUŠEK, Martin BÖHM a Robert ČERNÝ. *Composite material based on rape straw and environmentally friendly adhesive* [online]. In: . 2021, 030008- [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: doi:10.1063/5.0047731
- [37] BÖHM, Martin, Miloš JERMAN, Jaroslav DUŠEK, Zuzana HLAVÁČOVÁ a Robert ČERNÝ. *Microscopic analysis of composite boards made from rapeseed straw particles* [online]. In: . 2021, 030007- [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: doi:10.1063/5.0047799
- [38] STEVULOVA, Nadezda, Julia CIGASOVA, Ivana SCHWARZOVA, Alena SICAKOVA a Jozef JUNAK. Sustainable Bio-Aggregate-Based Composites Containing Hemp Hurds and Alternative Binder. *Buildings* [online]. 2018, **8**(2) [cit. 2022-12-28]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings8020025
- [39] JERMAN, Miloš, BOHM, Martin, DUŠEK, Jaroslav, ČERNÝ, Robert. (2022). Effect of surface treatment of straw on microstructure and mechanical properties of rapeseed particleboards. AIP Conference Proceedings. 2611. 040005. 10.1063/5.0119795.
- [40] OBUKA, Vaira, Maris SINKA, Vizma NIKOLAJEVA, Solvita KOSTJUKOVA, Ruta OZOLA-DAVIDANE a Maris KLAVINS. Microbiological Stability of Bio-Based Building Materials. *Journal of Ecological Engineering* [online]. 2021, **22**(4), 296-313 [cit. 2022-12-19]. ISSN 2299-8993. Dostupné z: doi:10.12911/22998993/134033
- [41] SVENSSON, Henric, Yahya JANI, William HOGLAND a Marcia MARQUES. Particle size characterization of oak wood leachate: chemical oxygen demand and toxicity distribution within different fractions. *Water Science and Technology* [online]. 2014, **70**(3), 502-509 [cit. 2022-12-19]. ISSN 0273-1223. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2014.252
- [42] COLLET, Florence, Julien CHAMOIN, Sylvie PRETOT a Christophe LANOS. Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy and Buildings* [online]. 2013, **62**, 294-303 [cit. 2022-12-27]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2013.03.010

- [43] RAHIM, M., O. DOUZANE, A.D. TRAN LE, G. PROMIS a T. LANGLET. Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, **102**, 679-687 [cit. 2022-12-27]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021
- [44] BROUARD, Yoann, Naima BELAYACHI, Dashnor HOXHA, Narayanaswami RANGANATHAN a Stéphane MÉO. Mechanical and hygrothermal behavior of clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **161**, 196-207 [cit. 2022-12-28]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140
- [45] WILLIAMS, Joseph, Mike LAWRENCE a Pete WALKER. The influence of constituents on the properties of the bio-aggregate composite hemp-lime. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **159**, 9-17 [cit. 2022-12-28]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.109
- [46] ČERMÁKOVÁ, Zuzana. *Experimentální zjišťování poruchy sádrokartonových desek*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Pavel Padevět.
- [47] TECHNOLOGY INC, Epoxy. Tg - Glass Transition Temperature for Epoxies. *Epotek* [online]. 2012, 1-2 [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: https://www.defender.com/pdf/756897_TG_BROCH.pdf
- [48] VERMEIRSEN, Etienne L.M., Conrad DIETSCHWEILER, Inge WERNER a Michael BURKHARDT. Corrosion protection products as a source of bisphenol A and toxicity to the aquatic environment. *Water Research* [online]. 2017, **123**, 586-593 [cit. 2023-01-12]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2017.07.006
- [49] OLIVEIRA PEREIRA, Erico A., Lisa M. LABINE, Sonya KLEYWEGT, Karl J. JOBST, André J. SIMPSON a Myrna J. SIMPSON. Metabolomics Reveals That Bisphenol Pollutants Impair Protein Synthesis-Related Pathways in *Daphnia magna*. *Metabolites* [online]. 2021, **11**(10) [cit. 2023-01-02]. ISSN 2218-1989. Dostupné z: doi:10.3390/metabo11100666
- [50] BAE, B., J.H. JEONG a S.J. LEE. The quantification and characterization of endocrine disruptor bisphenol-A leaching from epoxy resin. *Water Science and Technology* [online]. 2002, **46**(11-12), 381-387 [cit. 2023-01-02]. ISSN 0273-1223. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2002.0766
- [51] MARCEAU, Sandrine, Philippe GLÉ, Marielle GUÉGUEN-MINERBE, Etienne GOURLAY, Sandrine MOSCARDELLI, Issam NOUR a Sofiane AMZIANE. Influence of accelerated aging on the properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **139**, 524-530 [cit. 2023-01-07]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.129
- [52] JERMAN, Miloš, Martin BÖHM, Jaroslav DUŠEK a Robert ČERNÝ. *Water vapor and thermal properties of newly developed rapeseed particleboards* [online]. In: . 2022, 040004- [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: doi:10.1063/5.0119793

- [53] NOZAHIC, V. a S. AMZIANE. Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2012, **43**(11), 1837-1849 [cit. 2023-01-16]. ISSN 1359835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2012.07.011
- [54] NING, Liu a Chen BING. Experimental Investigation Concrete Using Magnesium Phosphate Cement, Fly Ash, and Rape Stalk. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 2016, **28**(4) [cit. 2023-01-12]. ISSN 0899-1561. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001459
- [55] RATIARISOA, Rijaniaina Valéry, Camille MAGNIONT, Stéphane GINESTET, Claire OMS a Gilles ESCADEILLAS. Assessment of distilled lavender stalks as bioaggregate for building materials: Hygrothermal properties, mechanical performance and chemical interactions with mineral pozzolanic binder. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, **124**, 801-815 [cit. 2023-01-07]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.011
- [56] MAZHOUD, Brahim, Florence COLLET, Sylvie PRETOT a Julien CHAMOIN. Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters. *Building and Environment* [online]. 2016, **96**, 206-216 [cit. 2023-01-07]. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2015.11.013
- [57] BENMANSOUR, Nadia, Boudjemaa AGOUDJIL, Abdelkader GHERABLI, Abdelhak KARECHE a Aberrahim BOUDENNE. Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. *Energy and Buildings* [online]. 2014, **81**, 98-104 [cit. 2023-01-16]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2014.05.032
- [58] OH, Yong-Sung a Mohd Ariff JAMALUDIN. AVALIAÇÃO DE CAULE DA COLZA AGLOMERADO VINCULADO COM LABORATÓRIO RESINA UREIA-FORMALDEÍDO. *Ciência Florestal* [online]. 2015, **25**(2), 515-521 [cit. 2023-01-16]. ISSN 1980-5098. Dostupné z: doi:10.5902/1980509818471
- [59] OWODUNNI, Amina Adedoja, Junidah LAMAMING, Rokiah HASHIM, et al. Adhesive application on particleboard from natural fibers: A review. *Polymer Composites* [online]. 2020, **41**(11), 4448-4460 [cit. 2023-02-06]. ISSN 0272-8397. Dostupné z: doi:10.1002/pc.25749
- [60] BÖRCSÖK, Zoltán a Zoltán PÁSZTORY. The role of lignin in wood working processes using elevated temperatures: an abbreviated literature survey. *European Journal of Wood and Wood Products* [online]. 2021, **79**(3), 511-526 [cit. 2023-02-06]. ISSN 0018-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00107-020-01637-3
- [61] OWODUNNI, Amina Adedoja, Junidah LAMAMING, Rokiah HASHIM, et al. Properties of green particleboard manufactured from coconut fiber using a potato starch based adhesive. *BioResources* [online]. 2020, **15**(2), 2279-2292 [cit. 2023-02-06]. ISSN 19302126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.15.2.2279-2292
- [62] ANTOV, Petar, Vassil JIVKOV, Viktor SAVOV, Ralitsa SIMEONOVA a Nikolay YAVOROV. Structural Application of Eco-Friendly Composites from Recycled Wood Fibres Bonded with Magnesium Lignosulfonate. *Applied Sciences* [online]. 2020, **10**(21) [cit. 2023-02-06]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app10217526

- [63] JUDT, Manfred. Non-wood plant fibres, will there be a come-back in paper-making?. *Industrial Crops and Products* [online]. 1993, **2**(1), 51-57 [cit. 2023-02-06]. ISSN 09266690. Dostupné z: doi:10.1016/0926-6690(93)90011-W
- [64] HUSSEIN, MA, HD ROZMAN a GS TAY. The effect of kenaf fibre loadings on the properties of UV-cured unsaturated polyester composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. 2013, **32**(14), 1062-1071 [cit. 2023-02-06]. ISSN 0731-6844. Dostupné z: doi:10.1177/0731684413481863
- [65] DAUD, Zawawi, Mohd Zainuri MOHD HATTA, Angzzas Sari MOHD KASSIM, Halizah AWANG a Ashuvila MOHD ARIPIN. Exploring of Agro Waste (Pineapple Leaf, Corn Stalk, and Napier Grass) by Chemical Composition and Morphological Study. *BioResources* [online]. 2013, **9**(1), 872-880 [cit. 2023-02-06]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.9.1.872-880
- [66] KHAZAEIAN, Abolghasem, Alireza ASHORI a Mostafa Yahyavi DIZAJ. Suitability of sorghum stalk fibers for production of particleboard. *Carbohydrate Polymers* [online]. 2015, **120**, 15-21 [cit. 2023-02-06]. ISSN 01448617. Dostupné z: doi:10.1016/j.carbpol.2014.12.001
- [67] JERMAN, Miloš, Martin BÖHM, Jaroslav DUŠEK a Robert ČERNÝ. Effect of steaming temperature on microstructure and mechanical, hygric, and thermal properties of binderless rape straw fiberboards. *Building and Environment* [online]. 2022, **223** [cit. 2023-02-07]. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2022.109474
- [68] GÖSSWALD, Jakob, Marius-Cătălin BARBU, Alexander PETUTSCHNIGG a Eugenia Mariana TUDOR. Binderless Thermal Insulation Panels Made of Spruce Bark Fibres. *Polymers* [online]. 2021, **13**(11) [cit. 2023-02-08]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13111799
- [69] ZHAO, Yinling, Jinquan YUE, Longchen TAO, Yusen LIU, Sheldon Q. SHI, Liping CAI a Shengling XIAO. Effect of lignin on the self-bonding of a natural fiber material in a hydrothermal environment: Lignin structure and characterization. *International Journal of Biological Macromolecules* [online]. 2020, **158**, 1135-1140 [cit. 2023-02-07]. ISSN 01418130. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.04.060
- [70] XU, Jianying, Ryo SUGAWARA, Ragil WIDYORINI, Guangping HAN a Shuichi KAWAI. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science* [online]. 2004, **50**(1), 62-67 [cit. 2023-02-08]. ISSN 1435-0211. Dostupné z: doi:10.1007/s10086-003-0522-1
- [71] PANYAKAEW, Satta a Steve FOTIOS. New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and Buildings* [online]. 2011, **43**(7), 1732-1739 [cit. 2023-02-08]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.015
- [72] KUROKOCHI, Yoko a Masatoshi SATO. Effect of surface structure, wax and silica on the properties of binderless board made from rice straw. *Industrial Crops and Products* [online].

2015, **77**, 949-953 [cit. 2023-02-08]. ISSN 09266690. Dostupné z:
doi:10.1016/j.indcrop.2015.10.007

[73] DOMÍNGUEZ-ROBLES, Juan, Quim TARRÉS, Manel ALCALÀ, Nour-Eddine EL MANSOURI, Alejandro RODRÍGUEZ, Pere MUTJÉ a Marc DELGADO-AGUILAR. Development of high-performance binderless fiberboards from wheat straw residue. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, **232** [cit. 2023-02-08]. ISSN 09500618. Dostupné z:
doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117247

[74] KUROKOCHI, Yoko a Masatoshi SATO. Steam treatment to enhance rice straw binderless board focusing hemicellulose and cellulose decomposition products. *Journal of Wood Science* [online]. 2020, **66**(1) [cit. 2023-02-08]. ISSN 1435-0211. Dostupné z:
doi:10.1186/s10086-020-1855-8

[75] KHARAZIPOUR, A., K. BERGMANN, K. NONNINGER a A. HÜTTERMANN. Properties of fibre boards obtained by activation of the middle lamella lignin of wood fibres with peroxidase and H₂O₂ before conventional pressing. *Journal of Adhesion Science and Technology* [online]. 1998, **12**(10), 1045-1053 [cit. 2023-02-11]. ISSN 0169-4243. Dostupné z:
doi:10.1163/156856198X00713

[76] ZHOU, Xiao-yan, Fei ZHENG, Hua-guan LI a Cheng-long LU. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings* [online]. 2010, **42**(7), 1070-1074 [cit. 2023-02-13]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2010.01.020

[77] KORJENIC, Azra, Vít PETRÁNEK, Jiří ZACH a Jitka HROUDOVÁ. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings* [online]. 2011, **43**(9), 2518-2523 [cit. 2023-02-15]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2011.06.012

[78] FEDORIK, Filip, Jiri ZACH, Marja LEHTO, Hanna-Riitta KYMÄLÄINEN, Risto KUISMA, Marja JALLINOJA, Kimmo ILLIKAINEN a Sanna ALITALO. Hygrothermal properties of advanced bio-based insulation materials. *Energy and Buildings* [online]. 2021, **253** [cit. 2023-02-15]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2021.111528

[79] JAKTORN, Chanatip a Somchai JIAJITSAWAT. Production of Thermal Insulator from Water Hyacinth Fiber and Natural Rubber Latex. *International Journal of Science* [online]. Thailand, 2014, **2014**(11 (2)), 31-41 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z:
<https://www.thaiscience.info/Journals/Article/NUSJ/10991491.pdf>

[80] ZHOU, Xiao-yan a Ding-guo ZHOU. Thermal Transfer Properties of Low Density Wheat Strawboard. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)* [online]. Nanjing, 2004, **28**(6), 1-4 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z:
<http://nldxb.njfu.edu.cn/EN/Y2004/V47/I06/1>

9. SEZNAM VYOBRAZENÍ

Seznam obrázků

- Obr. 1 Řepka v květu
- Obr. 2 Šešule a semena
- Obr. 3 Řepkové pole v květu
- Obr. 4 Sklizeň
- Obr. 5 Rozdělení délky částic řepky [12]
- Obr. 6 Distribuce průměru částic řepky [12]
- Obr. 7 Příklad rozměrové analýzy [21]
- Obr. 8 Héliový pyknometr Pycnomatic Evo
- Obr. 9 Exikátor se vzorky
- Obr. 10 Naprašovačka Quorum
- Obr. 11 Pohled na mikroskop s monitorem a ukázka prvkové analýzy
- Obr. 12 Připravený vzorek na difuze
- Obr. 13 Isomet 2104
- Obr. 14 Statické schéma
- Obr. 15 Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky
- Obr. 16 Kvasinky druhu *Saccharomyces cerevisiae* – laskavě poskytla RNDr. Klára Kobetičová, Ph.D.
- Obr. 17 Žábronožka solná – laskavě poskytla RNDr. Klára Kobetičová, Ph.D.
- Obr. 18 Semena druhu Hořčice setá – laskavě poskytla RNDr. Klára Kobetičová, Ph.D.
- Obr. 19 Řasy rodu *Desmodesmus subspicatus* – laskavě poskytla RNDr. Klára Kobetičová, Ph.D.
- Obr. 20 Postup míchání
- Obr. 21 Stlačování na lisu
- Obr. 22 Modifikace pod mikroskopem [12]
- Obr. 23 Detail porušení 2% NaOH [12]
- Obr. 24 Detail plochy porušení 2% NaOH [12]
- Obr. 25 Detail porušení 10% NaOH [39]
- Obr. 26 Krystaly na povrchu 10% NaOH [39]

- Obr. 27 Vyrobená deska [12]
- Obr. 28 Sorpční izotermy KK [12]
- Obr. 29 Velikost bobtnání KK [12]
- Obr. 30 Bobtnání ilustrativně KK [12]
- Obr. 31 Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti KK [12]
- Obr. 32 Měrná tepelná kapacita v závislosti na vlhkosti KK [12]
- Obr. 33 Sorpční izotermy EK [52]
- Obr. 34 Velikost bobtnání EK [52]
- Obr. 35 Pohled na vzorek vyráběný při napařovací teplotě 200 °C
- Obr. 36 Bobtnání při různé vlhkosti prostředí [67]
- Obr. 37 Mikroskopické pohledy na vzorky vyráběné při různé teplotě [67]
- Obr. 38 Vzorky po zkoušce v tahu
- Obr. 39 Sorpční izotermy vláknitých desek z řepky [67]
- Obr. 40 Závislost součinitele tep. vodivosti na hmotnostní vlhkosti [67]

Seznam tabulek

- Tab. 1: Vývoj osevních ploch zemědělských plodin k 31.5. v ČR [8]
- Tab. 2: Výsevní plochy řepky ve vybraných státech EU [9]
- Tab. 3: Složení slámy v % hmotnosti [13]
- Tab. 4: Stanovení poměru směsí KK [36]
- Tab. 5: Objemová hmotnost [36]
- Tab. 6: Faktor difuzního odporu [36]
- Tab. 7: Tepelné vlastnosti v suchém stavu [36]
- Tab. 8: Ohybová pevnost [36]
- Tab. 9a: Chemická analýza v ppm [23]
- Tab. 9b: Chemická analýza v ppm [23]
- Tab. 10: Hodnoty pH KK [23]
- Tab. 11: Výsledky ekotoxikologie [23]
- Tab. 12: Základní vlastnosti [12]
- Tab. 13: Difuzní vlastnosti KK [12]
- Tab. 14: Pevnost v tahu za ohybu [12]

- Tab. 15: Hodnoty pH EK [23]
- Tab. 16: Srovnání pH řepková sláma a její modifikace [14]
- Tab. 17a: Chemická analýza v ppm EK [23]
- Tab. 17b: Chemická analýza v ppm EK [23]
- Tab. 18: Chemická analýza řepkové slámy v ppm porovnání [14]
- Tab. 19: Výsledky ekotoxikologie EK [23]
- Tab. 20: Základní fyzikální vlastnosti EK [52]
- Tab. 21: Difuzní vlastnosti EK [52]
- Tab. 22: Tepelné vlastnosti EK [52]
- Tab. 23: Srovnání tepelných vodivostí [20, 54, 55, 56, 42, 44, 51]
- Tab. 24: Mechanické vlastnosti EK [50]
- Tab. 25: Obsah ligninu různé biomasy [23, 61, 62, 63, 64, 65, 66]
- Tab. 26: Základní vlastnosti vláknité bez pojivové desky [67]
- Tab. 27: Mechanické vlastnosti [67]
- Tab. 28: Difúzní vlastnosti [67]
- Tab. 29: Porovnání součinitele tep. vodivosti [70, 76, 79, 80]