



# PŘÍRODNÍ ORGANICKO-ANORGANICKÁ PLNIVA V POLYMERNÍCH SYSTÉMECH

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály

*Autor práce:* **Bc. Kryštof Luňák**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.  
*Konzultanti:* Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D., Ing. Mateusz Fijalkowski, Ph.D.





# NATURAL ORGANIC-INORGANIC FILLERS IN POLYMER SYSTEMS

## Diploma thesis

*Study programme:* N2301 – Strojní inženýrství

*Study branch:* 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály

*Author:* **Bc. Kryštof Luňák**

*Supervisor:* doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.

*Consultants:* Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D., Ing. Mateusz Fijalkowski, Ph.D.



**Tento list nahrad'te originálem zadání**

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tom-to případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Mé poděkování patří všem, kteří mně během mého studia stále podporovali, a to zejména mé přítelkyni, rodině a přátelům. Dále musím moc poděkovat doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D za trpělivé a svědomité vedení mé diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Kejzlarovi, Ph.D. za pomoc při rastrovací elektronové mikroskopii. Poté nesmím zapomenout na pana Ing. Davida Pospíšila a pana Ing. Mateusze Fijalkowského, Ph.D., kteří mi pomáhali s přípravou vzorků. Panu Ing. Mateusze Fijalkowského, Ph.D, chci dále poděkovat za pomoc při tribologii.

## **Anotace**

Cílem mé diplomové práce bylo seznámit se s vybraným typem organicko-anorganického plniva, navrhnout polymerní systém, na kterém budou experimenty realizovány, navrhnout množství plniva, na kterém bude jeho vliv na polymerní matrici experimentálně vyhodnocován, navrhnout přípravu jednotlivých typů vzorků a vhodné materiálové zkoušky k posouzení chování plniva v připraveném polymerním - kompozitním systému. Jako plniva bylo použito namletých rýžových slupek. Polymerní matricí byla dvousložková epoxidová pryskyřice vytvrzená tvrdidlem. Množství plniva bylo stanoveno na 1 dsk respektive 10 dsk rozemletých rýžových slupek. Pro tyto polymerní - kompozitní systémy byly aplikovány a vyhodnoceny vhodné materiálové zkoušky.

## **Klíčová slova:**

kompozitní systém, rýže, rýžové slupky, epoxidová pryskyřice, organicko-anorganické plnivo, polymer

## **Annotation**

The main aim of this thesis was to examine the type of organic-inorganic fillers and suggested a polymer system where we could make experiments. Then we should have suggested a quantity of the filler and experimentally evaluated the effect of the filler on the matrix. After that, we should have suggested a preparation of particular types of samples and appropriate material tests where we could evaluate behaviour of the filler in the prepared polymer-composite system. Milled rice husks were used as filler. For polymer matrix was used a two-component epoxy resin cured by hardener. The quantity of the filler is defined on 1 dsk thus 10 dsk milled rice husks. Appropriate material tests were applied and evaluated for those polymer-composite systems.

## **Keywords:**

composite system, rice, rice husk, epoxy resin, organic-inorganic filler, polymer

## Obsah

1. Úvod.....	9
2. Teoretická část.....	10
2.1 Kompozitní systémy.....	10
2.2 Polymerní matrice .....	13
2.3 Plniva v kompozitních systémech .....	16
2.4 Přírodní plniva.....	17
2.5 Přírodní organicko-anorganická plniva .....	23
3. Experimentální část.....	25
3. 1 Použité materiály.....	25
3. 1. 1 Epoxidová pryskyřice.....	25
3. 1. 2 Rýžové slupky .....	25
3. 2 Příprava vzorků .....	26
3. 3 Metody zkoumání.....	30
3. 3. 1 Rastrovací elektronová mikroskopie – energiově disperzní analýza (EDX) .....	31
3. 3. 3 Zkouška tahem .....	38
3. 3. 3. 1 Hodnocení lomové plochy vzorků po tahové zkoušce .....	42
3. 3. 4 Zkouška tlakem .....	45
3. 3. 5 Zkouška tvrdosti Shore.....	47
3. 3. 6 Zkouška tvrdosti - mikrotvrdomost.....	51
3. 3. 7 Hustota .....	52
3. 3. 6 Rázová houževnatost.....	54
3. 3. 7 Absorpce vody.....	55
3. 3. 8 Desorpce vody.....	57
3. 3. 10 Tribologické chování.....	58
4. Diskuse výsledků.....	63

5. Závěr.....	65
6. Literatura .....	68



# 1. Úvod

Přírodní plniva v polymerních systémech v současné době nabývají stále většího a většího významu. Jsou alternativou k plnivům dříve používaným, jakými jsou standardně skelná a uhlíková vlákna a to nejen díky požadovaným mechanickým vlastnostem, ale zejména z hlediska obnovitelného surovinového zdroje a nízké ceny. Přírodní plniva jsou užívána v největší míře jako plniva krátkovláknová. Připravený granulát nejčastěji na bázi PE či PP se dále zpracovává vstřikováním. Nejpoužívanější přírodní plniva mají vláknitý charakter, z hlediska chemického složení má největší zastoupení celulóza, doprovázená hemicelulózou, ligninem, pektinem a vosky. Typickými příklady jsou vlákna konopná, lněná, bambusová a kokosová.

Malá pozornost byla dosud věnována využití plniv na rostlinné bázi, která jsou charakteristická svým složením a ve kterých se vyskytuje vyšší obsah oxidu křemičitého. Typickým příkladem jsou rýžové slupky, které v sobě dokáží naakumulovat až 23 hmotnostních % oxidu křemičitého. Tyto rostliny mají schopnost absorbovat koloidní roztok kyseliny orthokřemičité z půdy, ve které rostou a v důsledku řady biochemických procesů a fotosyntézy dochází k vytváření systému, který rostlině zajišťují specifický způsob ochrany.

Bylo zjištěno, že části rostlin tohoto typu namleté na vhodnou velikost mohou zajistit pokles koeficientu tření a zároveň zvýšit odolnost vůči opotřebení. Na základě této skutečnosti byla pozornost věnována přírodním plnivům majícím charakter zemědělského odpadu s potřebným obsahem oxidu křemičitého, která vykazují značný potenciál stát se plnivou, kterými bude dosaženo zvýšení odolnosti vůči opotřebení. Tento poznatek byl na základě dosud provedených experimentů dále rozpracován.

Cílem diplomové práce bylo seznámit se s vybraným typem organicko-anorganického plniva, navrhnout polymerní systém, na kterém budou experimenty realizovány, navrhnout množství plniva, na kterém bude jeho vliv na polymerní matici experimentálně vyhodnocován, navrhnout přípravu jednotlivých typů vzorků a vhodné materiálové zkoušky k posouzení chování plniva v připraveném polymerním - kompozitním systému.

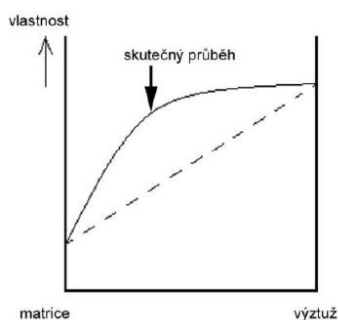
## 2. Teoretická část

### 2.1 Kompozitní systémy

Myšlenka vzájemného kombinování různých druhů materiálů do jednoho celku je velmi stará. V historii lidské společnosti se můžeme setkat s použitím složených materiálů jak pro stavby, tak i pro jiné účely, i když spíše jako důsledek zkušeností než znalostí. Například při stavbě obydlí se do hlíny či jílu dodávala sláma nebo jiná vlákna přírodního typu pro zlepšení vlastností (zvětšení pevnosti, zmenšení trhlin, odvodu vlhkosti zevnitř ven). Rovněž v konstrukci zbraní se složené systémy používaly od dávných dob. Mezi nejznámější patří mongolské laminované luky, damašské dělové hlavně nebo japonské ceremonní meče. O složených materiálech se v tomto ohledu mnohému můžeme naučit i z přírody, která ve svých strukturách tohoto principu hojně využívá. Typickým příkladem může být struktura dřeva nebo dokonce struktura obalu rostlinné buňky [1].

Abychom kompozity mohli popsat a charakterizovat je, musí existovat jejich přesná definice. Tato definice použitá v knize [2] je následující: „Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišící se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.“ [2]

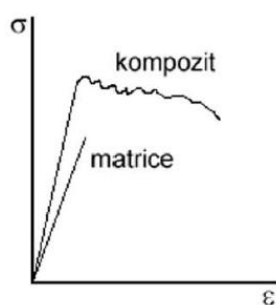
V případě složených materiálů byl popsán specifický jev, který je označován jako synergický efekt nebo synergický jev. To znamená, že výsledné vlastnosti složeného neboli kompozitního systému jsou vždy vyšší, než by byl pouhý součet vlastností jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností – viz obr. 1. [3]



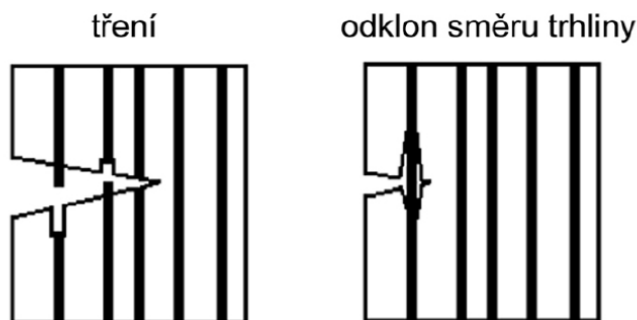
Obr. 1 Modelové znázornění synergického efektu [3].

Typickým příkladem synergického efektu je kompozit složený z keramické matrice, která je vyztužená keramickými vlákny. I když jsou matrice i vlákna samostatně velmi křehká, výsledný kompozitní systém je charakteristický určitou mírou houževnatosti.

Pro ilustraci jsou na obr. 2 pozorovány tahové diagramy matrice a matrice vyztužené křehkými vlákny. Uvedené chování kompozitu je způsobeno tím, že šířící se lomová trhlinka je brzděna na rozhraní mezi matricí a vlákny. Dochází zde jednak k odklánění směru šíření trhliny, jednak k intenzivnímu tření mezi vytahujícími se vlákny a matricí. Kvalita rozhraní mezi matricí a vyztužujícími vlákny má zásadní vliv na vlastnosti kompozitního systému [3].



Obr. 2 Tahový diagram matrice a kompozitního systému složeného z této matrice a křehkých keramických vláken [3].



Obr. 3 Modelové znázornění výše popsaných jevů na rozhraní matrice a výztuže [3].

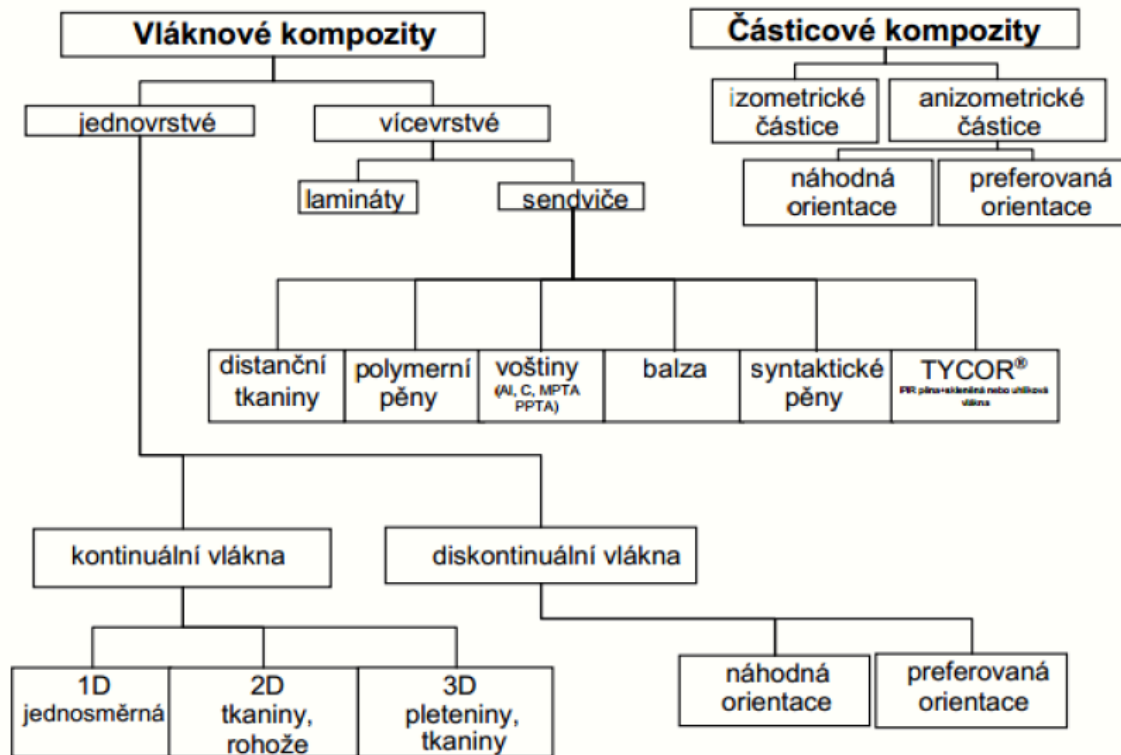
Jak bylo uvedeno, kompozitní systémy jsou složeny ze dvou nebo více fází. Tužší, tvrdší a pevnější nespojitá fáze se nazývá výztuž, spojitá a poddajnější složka, která plní funkci pojiva, se nazývá matrice. Obecně je známo, že nespojitá fáze vede k vytvoření „nového“ materiálu, který vykazuje vysoké hodnoty mechanických vlastností, ale může mít i jiné velice důležité vlastnosti, např. elektrickou vodivost. Výztuž před vlivy vnějšího prostředí chrání

matrice. Matrice v kompozitním systému zajišťuje spojení s výztuží v kompaktní celek a vytváří také konečný tvar výrobku [5].

Výsledné vlastnosti kompozitních systémů jsou dány jejich výrobou a především použitým typem matrice a výztuže. Každý průmyslový podnik zabývající se výrobou kompozitních dílů si připravuje kompozit tzv. "na míru" a je si vědom všech jeho pozitivních i negativních vlastností. Přesto existuje několik obecných výhod a nevýhod při jejich využití [4].

Mezi jasné výhody kompozitních systémů patří jejich vysoká pevnost a tuhost, nízká hmotnost, odolnost vůči korozi, dobré vlastnosti při statickém i dynamickém zatěžování, dobré tlumicí vlastnosti, možnost vyrábět designově složitě díly. Mezi nevýhody kompozitních materiálů patří specifické, mnohdy složité způsoby výroby a zpracování, horší mechanické vlastnosti ve směru kolmo k orientaci uložení vláken (u vláknově vyztužených kompozitů), vysoké náklady při dimenzování náročných konstrukcí, lokální poškození, např. po nárazu, se obtížně identifikuje a opravuje ve srovnání s konvenčními materiály [4].

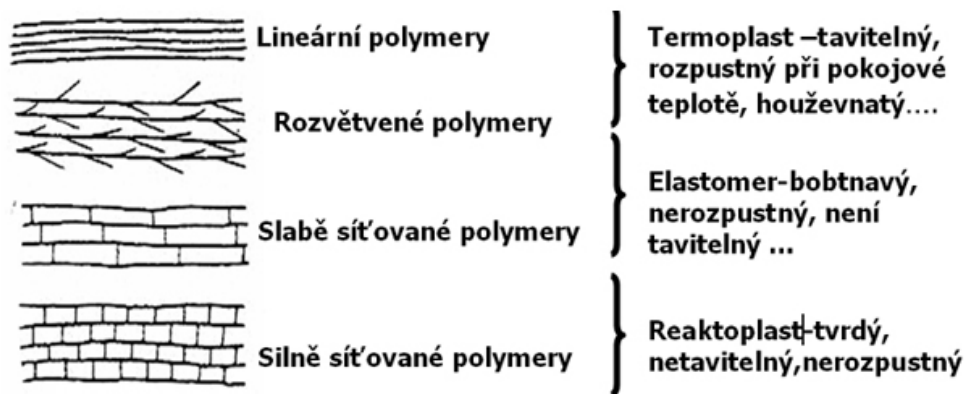
V dnešní době existuje mnoho typů kompozitních materiálů a nové přibývají. Z tohoto důvodu je nutné je třídit do skupin a klasifikovat. Kompozitní systémy lze rozdělovat dle různých parametrů a hledisek, např. dle druhu matrice, druhu výztuže, velikosti vláken, orientace vláken a dalších [5]. Kompozitní materiály rozdělující se podle typu disperze jsou obvykle děleny na kompozit I. typu, kde je výztuž tvořena z pevné fáze. Tyto kompozity se používají v technice nejčastěji. Kompozity II. typu, ve kterých je disperze v kapané fázi, nejsou příliš běžné (některé póry vyplněné kapalinou - samomazná ložiska). Kompozity III. typu jsou především pěnové materiály (pěny, pěnokeramika, pěnoplasty) a disperze je v plynné fázi [5]. Podle povahy matrice jsou kompozity děleny na kompozity s kovovou maticí (metal matrix composites - MMC), s polymerní maticí (polymer matrix composites - PMC), s keramickou maticí (ceramic matrix composites - CMC) a se speciální maticí (skleněná matrice, uhlíková matrice) [3, 6]. Rozdělení kompozitních systémů dle geometrie výztuže je znázorněno na následujícím schématu.



Obr. 4 Rozdělení kompozitních systémů dle geometrie výztuže [5].

## 2.2 Polymerní matrice

Materiál, který má v kompozitním systému charakter spojité fáze a dává konečnému produktu vzhled, se nazývá matrice. Zároveň plní ochrannou funkci - chrání výztuž před vlivy vnějšího prostředí. Úkolem matrice je přenášet vnější zatížení na výztuž, udržovat vlákna ve správných pozicích a zprostředkovat chemické a elektrické vlastnosti. Jedny z nejpoužívanějších matric jsou polymerní materiály, které se dají rozdělit do dvou kategorií - termoplastové a reaktoplastové. Termoplasty jsou polymery, které vlivem teploty měknou, taví se a s ochlazením znovu nabývají původních vlastností. Naproti tomu reaktoplasty nemohou být taveny a znovu navraceny do původního stavu použitím teploty nebo tlaku [7, 8]. Toto chování souvisí s tvarem polymerních řetězců a jejich segmentů – obecně s charakterem nadmolekulární struktury.



Obr. 5 Modelové znázornění tvaru makromolekul polymerů [9].

Hlavní výhodou termoplastů oproti reaktoplastům jsou jejich mechanické vlastnosti – zejména vysoká houževnatost. V průběhu jejich zpracování nedochází k chemickému procesu, ale pouze k tepelným pochodům. K prosycení vyztužujících vláken dochází ve chvíli, kdy je termoplast roztaven a s ohledem na vyšší viskozitu je u tohoto procesu třeba urychlení procesu prosycení vláken působením vnějších sil. Při použití rozpouštědel pro snížení viskozity dochází ke snížení odolnosti proti korozi při napětí. Za normální teploty jsou termoplasty v pevném stavu, do tekutého stavu přechází až při vyšších teplotách (většinou nad 200°C). Jako materiály pro velmi namáhané aplikace jsou vyztuženy skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Velký podíl na trhu mají termoplasty, které jsou vyztuženy krátkými vlákny kolem 0,2 mm. Mezi hlavní zástupce termoplastů patří polypropylen, polyamid, polyester a polykarbonát [4]. Termoplasty i reaktoplasty mohou být použity jako matrice pro přírodní vlákna.

Reaktoplastové pryskyřice patří mezi nejčastější užívané polymery při výrobě kompozitních systémů. Dříve se používaly především nenasycené polyesterové a epoxidové pryskyřice, které jsou většinou při normální teplotě v tekutém stavu, a pokud jsou v této formě zpracovávány, mají viskozitu v porovnání s termoplasty nižší o několik řádů. Díky této vlastnosti se lépe zpracovávají a snáze smáčejí a prosycují vlákna výztuže. Další významnou vlastností je nižší teplota při zpracování a z toho plynoucí menší energetická náročnost i možnost použití přírodních plniv, které by při vyšších zpracovatelských teplotách degradovala. Pro získání konečných vlastností je třeba vytvrzení, ke kterému dochází samostatně nebo smícháním se složkami, které jsou nazývána jako tvrdidla. Tvrdidla jsou doplňována také iniciátory a katalyzátory průběhu vytvrzovacích reakcí [4, 11].

Epoxidové pryskyřice se za normální teploty vyskytují v kapalném až pevném stavu, stejně jako přidávané tvrdidlo, které obsahuje aktivní vodíkové ionty. Všeobecně se epoxidové pryskyřice vyznačují svými velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, velkou rozměrovou stálostí a přilnavostí. Pro konkrétní aplikace je možné dosáhnout určitých vlastností použitím vhodných tvrdidel a přísad. Výsledná směs má nižší viskozitu a tedy horší prosycování vláken, než v případě nenasyčených polyesterů. Objemové smrštění, ke kterému dochází převážně v kapalně fázi, je poměrně nízké (2-5%). Především jejich velmi dobré mechanické vlastnosti je předurčují pro použití jako matrice pro vysokopevnostní vlákna, jako např. uhlíková vlákna při stavbě letadel. Hlavním omezením jejich využití je cena, která je až čtyřnásobně vyšší, než u nenasyčených polyesterů [4, 10]. Základní rozdíly mezi termoplasty a reaktoplasty jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Základní rozdíly mezi termoplasty a reaktoplasty (termosety) [4].

	Termoplasty	Termosety
Matrice	Polymerovaná, vysokoviskózní tavenina, špatně se spojuje lepením	Nevytvrzená, nízkoviskózní, dobře se spojuje lepením a opatřuje nátěrem
Cena matrice	Nízká, ale i vysoká	Nízká
Předimpregnace	Obtížné smáčení a prosycování	Snadné
Cena předimpregnace	Vysoká	Nízká
Skladování	Neomezeně skladovatelné	Omezená skladovatelnost (v chladu), reakce pomalu pokračuje
Polotovary	Termoplasty vyztužené skleněnou rohoží (GMT), pásy	Lisovací hmoty SMC (prepregy)
Přímé zpracování	Granulát (krátká vlákna), přímo zpracovatelný dlouhovláknitý polotovary (D-LFT)	Výztuž a reaktivní pryskyřice
Teplota při zpracování	Teplota taveniny	Teplota okolí
Tvarování	Vhodné pro velké série	Nevhodné
Ruční kladení	Nevhodné	Vhodné pro velkoplošné díly
Kladení pásů	Vysoká automatizace, malá lepivost, svařování	Vysoká automatizace, dobrá lepivost, citlivé vytvrzování
Teplota nástroje při lisování	Teplota taveniny 150 až 180 °C	Reakční teplota 140 až 160 °C
Lisovací tlak	GMT: 200 až 300 N · mm <sup>-2</sup> D-LFT: 30 až 100 N · mm <sup>-2</sup>	SMC: 20 až 50 N · mm <sup>-2</sup>
Plocha povrchu	Přiměřená, svařitelná	Dobrá, tvrdá; lze ji lepit a natírat
Mechanické chování	Houževnaté, sklon ke krípu	Dynamicky zatížitelné, křehký lom
Chování za tepla	Výrazné změknutí při T <sub>g</sub>	Méně závislé na teplotě
Stárnutí	Málo odolné až odolné	Velmi odolné proti stárnutí
Možnost opravy	Omezená	Dobrá

### 2.3 Plniva v kompozitních systémech

Mezi nejběžnější typy plniv používaných v kompozitních systémech patří částicová a vláknová plniva. Částice jsou kulovité, destičkovité, tyčinkovité nebo mohou mít jakýkoliv jiný pravidelný či nepravidelný tvar. Částicové kompozity mívají menší pevnost a tuhost než vláknové kompozity, jsou však většinou mnohem levnější. Také zpravidla obsahují nižší objemový podíl výztuže než vláknové kompozity. Jejich další nevýhodou je jejich křehkost [4,12].

Největšího potenciálu v oblasti kompozitních systémů dosáhly takové systémy, kde polymer vystupuje jako matrice a výztuž představují anorganická či organická vlákna [4,13]. Tento typ kompozitních systémů kombinuje vysokou pevnost tuhých výztuží s vysokou houževnatostí pružné polymerní matrice, přičemž na celkové vlastnosti kompozitu mají vliv vlastnosti vyztužujících vláken, matrice, mezivrstev, objemový zlomek vláken v matrici, jejich geometrie a orientace. Nejrozšířenějším druhem vláknové výztuže jsou skelná vlákna, která tvoří okolo 90% produkce kompozitních systémů. Mezi další vlákna můžeme zařadit vlákna uhlíková, aramidová, ale také vlákna přírodní [2,14].

Skelná vlákna dominují v kompozitních systémech především díky svým výborným mechanickým vlastnostem, jako je vysoká pevnost a modul pružnosti v tahu. Navíc jsou tato vlákna poměrně odolná vůči vysokým teplotám, jsou nehořlavá, chemicky odolná a také disponují dobrými elektrickými vlastnostmi. Pro svoje výhodné tepelné a zvukové izolační vlastnosti jsou hojně využívána ve stavebním průmyslu ve formě rohoží. Tkaniny se používají jako základní výztuž laminátů například v dopravě či v letectví, z vláken samotných se pak mohou šít i ochranné oděvy, především pro extrémně horké provozy [2, 14, 18].

Uhlíková vlákna disponují krystalickou strukturu s krystaly orientovanými paralelně k podélné ose vláken. Tato vlákna mají vysokou pevnost, nízkou tepelnou vodivost a měrnou hmotnost a dobrou elektrickou vodivost. Vlákna se vyrábí metodou řízené oxidace, karbonizace a grafitizace organických látek s vysokým obsahem uhlíku (polyakrylonitril, celulóza a bitumen). Tento typ vláken se často ještě povrchově upravuje, což má zajistit lepší adhezi k polymerní matrici. Jejich využití je především pro špičkové aplikace při stavbě lodí, automobilů, sportovních potřeb, v letectví a v kosmických programech [2, 14].



Aramidová vlákna jsou vyrobena z aromatických polyamidů, která disponují vysokou pevností a modulem pružnosti v tahu. Mimoto mají tato vlákna nízkou měrnou hmotnost, jsou žáruvzdorná a citlivá na UV záření a vlhkost. Výroba je založena na zvláknování z kapalného roztoku za pomoci iontové složky reakční směsi, která se váže na vodíkové můstky amidové skupiny, přičemž důležitá je volba organického rozpouštědla [2, 14].

Čedičová vlákna mají podobné vlastnosti, jako vlákna skelná typu S. Širší výroba těchto vláken se zavedla teprve nedávno. Jejich výhodou je nižší cena, jsou cca o 40% levnější, než sklená vlákna typu S. Jejich charakteristické vlastnosti jsou vysoká pevnost, nízká tažnost, nehořlavost, nízká nasákavost, nízká tepelná vodivost, vysoký elektrický odpor a dobrá tepelná odolnost. Naopak jsou velmi křehká. Jejich uplatnění je hlavně v stavebnictví (tepelně a zvukově izolační desky, stropy, příčky a podlahy) a v různých dalších technických výrobcích jako rozbrušovací kotouče, lamináty, brzdové destičky [4].

V současné době jsou vyvíjeny materiály, které mají ve své historii zahrnutou možnost recyklace, čímž se snižuje potenciální zátěž životního prostředí po ukončení užitého cyklu výrobku. Díky těmto snahám nacházejí své uplatnění nové typy vyztužujících materiálů – přírodní plniva rostlinného a živočišného původu.

## **2.4 Přírodní plniva**

Přírodní plniva zejména ve formě vláken zahrnují širokou škálu rostlinných, živočišných a minerálních vláken. Původní zájem v minulém století o tato vlákna klesal současně s vývojem syntetických vláken, jako jsou vlákna skelná, uhlíková, kevlarová, čedičová a také vlákna polymerní. V současné době se zájem o přírodní vláknová plniva částečně vrací z důvodů zavádění nových environmentálních technologií souvisejících zejména s problematikou biodegradovatelných kompozitních systémů. V této oblasti se využívají především přírodní rostlinná vlákna, která budou v dalším textu podrobněji popsána.

Pod pojmem přírodní rostlinné vlákno zpravidla rozumíme svazek vláken získaný z dané rostliny. Tyto svazky se poté skládají z jednotlivých fibril. K oddělení svazků vláken z rostlin se používají mechanické procesy, kdežto k získání vláken samotných je zapotřebí procesů chemických či enzymatických [19, 20].

Z chemického hlediska jsou hlavními složkami přírodních rostlinných vláken celulóza, hemicelulóza, lignin, pektiny a vosky. Hodnoty mechanických parametrů přírodních plniv

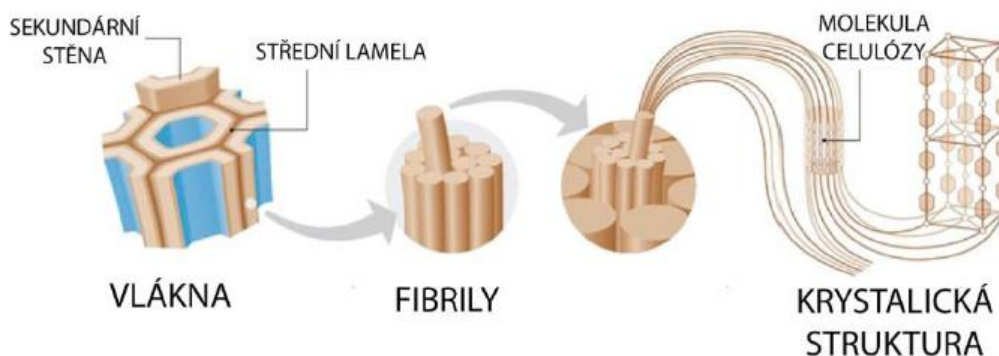
nejsou tak vysoké jako u syntetických plniv a navíc se mohou měnit podle klimatických podmínek, ve kterých jsou rostliny pěstovány. Na druhou stranu mají nižší hustotu a pro mnoho aplikací, kde hmotnost hraje významnou roli, jsou atraktivním řešením. Krátká životnost přírodních plniv, pokud jsou vystavena povětrnostním vlivům, je jejich hlavní nevýhodou. Naopak tato vlastnost však může být výhodou tam, kde je požadována jejich rozložitelnost v přírodním prostředí. Mezi další velké výhody patří to, že jsou získávány z obnovitelných zdrojů, jsou biologicky odbouratelné a energetická náročnost na jejich výrobu je nízká [15,17].

Přírodní vlákna se používají zejména v kombinaci s termoplastickými polymery a to pro zlepšení pevnosti a tuhosti při současném zachování nízké hmotnosti. Nejčastěji se vlákna kombinují s polyolefiny, protože zpracovatelská teplota polymerů je dostatečně nízká a nedochází k tepelnému narušení vláken. Použití přírodních vláken komplikuje především jejich hydrofilní chování. Pro vytvoření správné kompatibility je nutné použití spojovacích prostředků [15, 16].

Mezi přírodní částicová plniva patří například namletý dřevný prášek, který dává výrobku přírodní vzhled a výrazně snižuje jeho cenu. Bohužel také snižuje životnost materiálu. Mezi vláknenné výztuže patří např. konopí, které vykazuje vysokou pevnost v tahu. Dalšími často používanými plnivými jsou vlákna juty, bavlny, agáve, lnu, kenafu, kokosu a další [16].

Struktura, složení a vlastnosti vláken získaných z různých druhů rostlin se liší. Velmi záleží také na podmínkách, ve kterých daná rostlina roste a stáří rostliny, při kterém se obvykle sklízí, neboť složení buněčných stěn rostliny se s časem mění. Dalším faktorem je zvolený proces získání přírodních vláken z těla rostliny a to buď mechanicky, chemicky či enzymaticky [19, 20].

Z chemického hlediska se rostlinná vlákna se skládají ze silných, tuhých molekul celulózy, které jsou vnořeny do matrice tvořené ligninem společně s dalšími polysacharidy včetně hemicelulózy a pektinu, které jsou propojeny celulózou a ligninem. V buněčné stěně vlákna je obsažena řada dalších látek zahrnujících vosky, anorganické soli, dusíkaté sloučeniny, tyto sloučeniny však většinou nemají stavební funkci. Vysoce uspořádané molekuly celulózy spojené hemicelulózou, ligninem a ostatními polysacharidy v buněčné stěně tvoří strukturu známou jako mikrofibrily [19, 20].



Obr. 6 Modelové zobrazení uspořádání mikrofibril celulózy v buněčné stěně [20].

U přírodních vláken obecně dochází k degradaci při teplotách okolo 240°C, přičemž jednotlivé stavební složky vlákna jsou citlivé na různé rozsahy teplot. K degradaci dochází nejprve u ligninu při zhruba 200°C, celulóza a hemicelulóza degradují při vyšších teplotách [21].

Tab. 2 Porovnání chemického složení jednotlivých přírodních rostlinných vláken [22].

typ vlákna	celulóza [% hmotn.]	lignin [% hmotn.]	hemicelulóza [% hmotn.]	pektiny [% hmotn.]	Vosky [% hmotn.]	úhel stoupání mikrofibril [°]	obsah vlhkosti [% hmotn.]
<b>ze stonků</b>							
juta	61 – 71,5	12,0 – 13,0	13,6 – 20,4	0,2	0,5	8,0	12,6
len	71	2,2	18,6 – 20,6	2,3	1,7	10,0	10,0
konopí	70,2 – 74,4	3,7 – 5,7	17,9 – 22,4	0,9	0,8	6,2	10,8
ramie	68,6 – 76,2	0,6 – 0,7	13,1 – 16,7	1,9	0,3	7,5	8,0
kenaf	31,0 – 39,0	15,0 – 19,0	21,5	-	-	-	-
<b>z listů</b>							
sisal	67,0 – 78,0	8,0 – 11,0	10,0 – 14,2	10,0	2,0	20,0	11,0
ananas	70,0 – 82,0	5,0 – 12,0	-	-	-	14,0	11,8
henequen	77,6	13,1	4,0 – 8,0	-	-	-	-
<b>ze semen</b>							
bavlna	82,7	-	5,7	-	0,6	-	-
<b>z plodů</b>							
kokos	36,0 – 43,0	41,0 – 45,0	0,15 – 0,25	3,0 – 4,0	-	41,0 – 45,0	8,0

Mechanické a jiné vlastnosti přírodních vláken závisí na celé řadě faktorů, což je hlavní problém pro reprodukovatelnost při výrobě polymerních kompozitních systémů na bázi přírodních plniv. V následující tabulce jsou uvedeny základní mechanické vlastnosti vybraných přírodních vláken. Pro porovnání jsou v tabulce uvedena i syntetická vlákna.

Tab. 3 Porovnání vybraných vlastností přírodních rostlinných vláken a vláken běžně používaných v kompozitních systémech [22].

typ vlákna	hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	průměr vlákna [μm]	mez pevnosti v tahu [MPa]	Youngův modul pružnosti [GPa]	protažení při lomu [%]
bavlna	1,5 – 1,6	-	287 – 800	5,5 – 12,6	7,0 – 8,0
juta	1,3 – 1,45	25 – 200	393 – 773	13 – 26,5	1,2 – 1,5
len	1,5	-	345 – 1100	27,6	2,7 – 3,2
konopí	1,5	-	690	-	1,6
ramie	1,5	-	400 – 938	61,4 – 128,0	1,2 – 3,8
sisal	1,45	50 – 200	468 – 640	9,4 – 22,0	3,0 – 7,0
ananas	-	20 – 80	413 – 1627	34,5 – 82,5	1,6
kokos	1,15	100 – 450	131 – 175	4,0 – 6,0	15,0 – 40,0
E-sklo	2,5	-	2000 – 3500	70,0	2,5
S-sklo	2,5	-	4570	86,0	2,8
aramid	1,4	-	3000 – 3150	63,0 – 67,0	3,3 – 3,7
uhlík	1,7	-	4000	230,0 – 240,0	1,4 – 1,8

Bavlna je z hlediska využití člověkem nejdůležitější přírodní vlákno. Bavlníková vlákna jsou jednobuněčná vlákna obrůstající semena bavlníku. Bavlník je rod zahrnující asi 40 druhů a 700 poddruhů dvouděložných rostlin z čeledi slézovitých. Jsou jednoleté nebo víceleté. Složení bavlněného vlákna: 88 - 96% celulózy, 0,9 - 1,2% pektinu, 1,1 - 1,9% bílkovin, 0,3 - 1% vosků, 0,5 - 1% organických kyselin, 0,7 - 1,6% minerálních solí, 0,3% cukru a 0,9% ostatních látek [27, 30].

Délka elementárních vláken se pohybuje v rozmezí od 15 do 56 mm. Průměr vlákna mezi 12 - 35 μm. Hustota vlákna je 1,51 g/cm<sup>3</sup>. Mez pevnosti v tahu je v intervalu 287 až 800 MPa. Protažení při lomu bývá 6 - 10%. Vlákna mají dobré elektroizolační a tepelně izolační vlastnosti. Bavlněná vlákna při teplotě 120°C zvolna žloutnou, při 150°C hnědnou a při 400°C vzplanou. Působením alkálií vlákna bobtnají, průřez vlákna se zaobluje, lumen se zužuje, stužkovitý tvar se vyrovnává a zvyšuje se lesk. Působením minerálních kyselin dochází k hydrolýze [27, 30].

Mezi často používaná vlákna v polymerních systémech náleží vlákna lněná. Len je jednoletá rostlina z čeledi lnovitých - *Linaceae*, která je považována za nejstarší pěstovanou vláknitou rostlinu. Existuje více druhů lnu: len přadný, len olejopřadný, len olejný. Lněné vlákno má

následující složení: 74% celulózy, 17% hemicelulózy, 2% ligninu, 1,7% pektinů, 3,8% látek nerozpustných ve vodě a 1,5% tuků a vosků. Stonek má kulatý průřez. Délka stonku je od 0,2 m do 1,4 m. Tloušťka stonku od 0,5 mm do 3 mm. Do průměru 1,5 mm se zvyšuje počet vláken a jsou jemná, nad 1,5 se počet vláken nezvyšuje, vlákna se zvětšují (hrubá vlákna) [23].

Lněné vlákno je tvořeno z vláken elementárních. Délka technického vlákna je 600 mm až 800 mm, elementární bývá od 25 mm do 30 mm. Tloušťka technického vlákna je 600 $\mu$ m, elementárního je 15  $\mu$ m až 18  $\mu$ m. Hustota lněného vlákna je 1,45 g/cm<sup>3</sup>. Mez pevnosti v tahu od 345 MPa do 1100 MPa. Youngův modul pružnosti okolo 70 GPa. Protážení při lomu je 2,7% až 3,2 %. Obsah vlhkosti za normálních podmínek je kolem 15%. Do teploty 120°C je len odolný, při vyšších teplotách ztrácí barvu. Účinkem UV záření postupně ztrácí pevnost. Špatně izoluje elektřinu, dobře vede teplo. Len je odolný vůči alkáliím, kyseliny vlákno narušují [23].

Konopí je jednoletá dvoudomá rostlina - *Canabis sativa* - kulturní konopí. Známe různé druhy konopí - severské, středněruské, jižní, hašišné. Konopné vlákno obsahuje 70% až 75% celulózy, 8% až 15% hemicelulózy, 8% až 12% ligninu, 0,5% až 1% popelovin, 2% až 4% tuků a vosků a 10% až 12% vlhkosti. Konopný stonek je zpočátku více méně kulatý, ale po čase začíná dřevnatět a mění svůj tvar na čtyřhranný nebo šestihranný [23].

Délka technického vlákna je 1 m až 2 m, elementární vlákno má délku 15 mm až 25 mm. Tloušťka elementárních vláken je mezi 15  $\mu$ m a 50  $\mu$ m. Hustota vlákna je 1,48 g/cm<sup>3</sup>. Youngův modul pružnosti má hodnotu cca 65 GPa. Mez pevnosti v tahu cca 690 MPa. Protážení při lomu bývá 1,6%. Obsah vlhkosti za normálních podmínek je 13%. Odolnost vůči povětrnostním vlivům vykazuje konopí z přírodních vláken nevyšší [23].

Jutovník - *Corchorus* je jednoletá rostlina z čeledi slézovitých. Juta obsahuje 65% celulózy, 15% hemicelulózy, 10% ligninu, 1,5% pektinů, 1% látek nerozpustných v vodě, 0,4% popelovin a 0,5% tuků a vosků [24, 25].

Délka technického vlákna je 150 cm až 400 cm, délka elementárního vlákna bývá od 1 mm do 5 mm. Tloušťka elementárních vláken je okolo 18  $\mu$ m. Hustota vlákna je 1,59 g/cm<sup>3</sup>. Mez pevnosti v tahu okolo 500 MPa. Protážení při lomu bývá cca 1,7%. Youngův modul pružnosti dosahuje cca 30 GPa. Navlhavost dosahuje až 34%. Juta ze zpracovatelského hlediska odolává mikroorganismům a velmi snadno se barví. K nevýhodám patří skutečnost, že

výrobky z juty značně práší (dochází k uvolňování elementárních vláken) a nepříjemně zapáchají [24, 25].

Sisalová vlákna jsou získávána z listů rostliny agáve - *Agave sisalana*. Agáve je víceletá xerofytní rostlina z čeledi chřestovitých, která se nejvíce pěstuje ve východní Africe a Brazílii. Sisalová vlákna obsahují 66% celulózy, 12% hemicelulózy, 10% ligninu, 2% pektinů, 3,5% látek nerozpustných ve vodě, 0,3% popelovin a 1% tuků a vosků. Agáve má tlustý, ale relativně krátký dřevitý stvol, ze kterého vyrůstají až 2 metry dlouhé, 10-15 široké dužnaté, čárkovitě kopinaté listy [26].

Délka technického vlákna je 80 cm až 130 cm, elementární vlákno bývá dlouhé od 6 cm do 10 cm. Tloušťka elementárních vláken je mezi 17  $\mu\text{m}$  až 50  $\mu\text{m}$ . Hustota vlákna je 1,2  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Mez pevnosti v tahu je cca 600 MPa. Protažení při lomu bývá 3%. Youngův modul pružnosti je mezi 8 až 38 GPa. Navlhavost dosahuje 11%. Vlákna mají dobré akustické a tepelně-izolační vlastnosti [26, 27].

Bambus patří do čeledi lipnicovitých. Vyskytuje se v tropech, subtropích i mírném pásu. Jedná se o širokou skupinu rostlin zahrnující přes 600 druhů. Mezi travami je to jediná skupina rostlin, která dřevnatí. Největší druhy mají kmen až 30 cm v průměru a jsou až 40 m vysoké. Bambusy rostou 24 hodin denně po dobu přibližně 40 dní. Složení bambusového vlákna: 38,9% celulózy, 26,1% pentosanů, 25% ligninu, 2% pektinových látek, 0,8 až 6% bílkovin, 2 - 4% tuků a vosků a 1,7% popelovin [28, 29].

Bambusové vlákno je druh regenerovaného celulóзовého vlákna, které je vyrobeno ze surového bambusového materiálu. Technické bambusové vlákno se skládá z více než 100 elementárních vláken. Po úpravě mají bambusová vlákna relativně vysokou pevnost ve srovnání s jinými travními vlákny a mohou být srovnatelná se skleněnými vlákny, jakožto výztuž v kompozitech [28, 29].

Všechna výše popsaná vlákna byla charakterizována chemickým složením, popisujícím obsah celulózy, hemicelulózy, ligninu, pektinů, vosků a popelovin. Obsah popelovin se společně u všech vláken pohyboval ve velmi malých rozmezích, řádově v jednotkách procent. Rozdíl mezi popsány přírodními vlákny a skupinou organicko-anorganických plniv je právě v obsahu anorganických fází, tvořící již zmíněné popeloviny.

## 2.5 Přírodní organicko-anorganická plniva

Za přírodní organicko-anorganická plniva lze považovat takové rostlinné materiály, jejichž chemické složení je charakterizováno nejen přítomností celulózy, hemicelulózy, ligninu, pektinů a vosků, ale obsahuje také vysoké množství anorganických sloučenin, řádově v desítkách procent, a to zejména na bázi oxidu křemičitého.

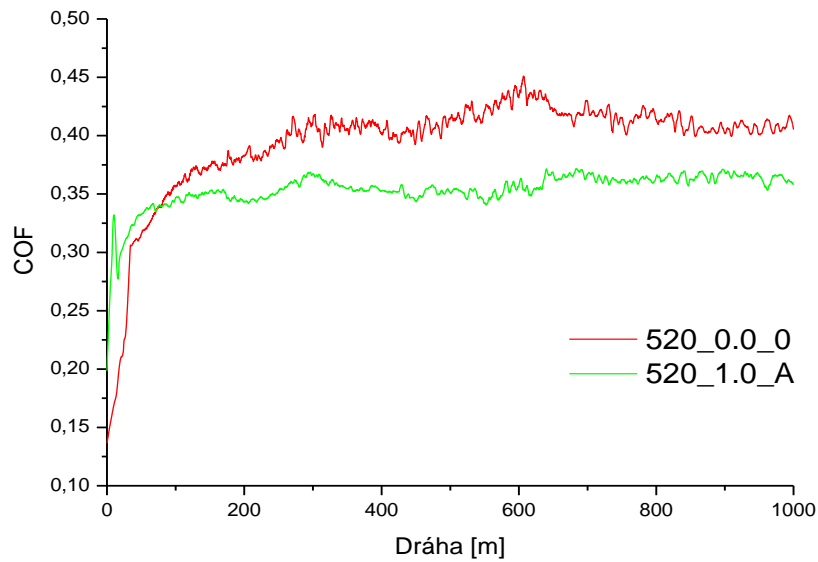
Mezi rostliny, jejichž rostlinné části vyhovují tomuto specifickému složení, patří například zejména rýže setá (*Oryza sativa*), různé typy přesliček (*Equisetaceae*), ale také ječmen setý (*Hordeum vulgare*).

Tyto rostliny jsou zvláštní tím, že z půdy, ve které rostou, dokáží absorbovat koloidní roztok kyseliny orthokřemičité. V průběhu řady biochemických reakcí a fotosyntézy ji transformují na nanočástice oxidu křemičitého, které se uspořádávají do větších shluků či vrstev. Ty poté vytváří ochranné funkce a bariéry, které jsou pro dané rostlinné části důležité z řady hledisek [34].

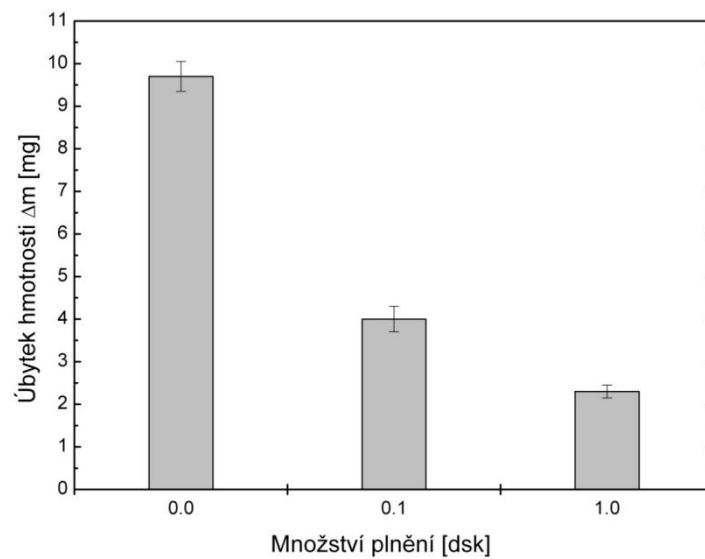
Tento typ plniv lze zařadit do kategorie částicových plniv. Díky stavbě a struktuře rostlinných částí nemohou být získány vláknové struktury. Potenciál využití těchto přírodních materiálů spočívá v chemickém složení s vysokým obsahem anorganické fáze přírodního původu.

Přírodní organicko-anorganická plniva byla ve formě částicového plniva použita v kombinaci s epoxidovou pryskyřicí ChS - Epoxy 520. Při vhodné velikosti částic a při vhodném plnění bylo dosaženo mírného snížení koeficientu tření oproti čisté epoxidové pryskyřici. Dále bylo zjištěno, že přítomnost částicového plniva s těmito parametry vede k výraznému zvýšení odolnosti vůči opotřebení – viz obr. 8 [35].

Analogické výsledky chování organicko-anorganických plniv byly experimentálně zjištěny i v jiných typech materiálů, například na bázi pryže [35].



Obr. 7 Závislost koeficientu tření u neplněné epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 520 (označení v grafu 520\_0.0\_0) a 1 dsk organicko-anorganického plniva [35].



Obr. 8 Vliv organicko-anorganického plniva na snížení opotřebení vytvrzeného vzorku z epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 520 neplněné, plněné – 0,1 dsk – 1,0 dsk [ 35].



## 3. Experimentální část

### 3. 1 Použité materiály

Pro navržené experimenty byla použita dvousložková epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 520 (EPOXY 15) vytvrzovaná tvrdidlem P11 a mleté rýžové slupky jako charakteristické plnivo splňující podmínku organicko-anorganického plniva.

#### 3. 1. 1 Epoxidová pryskyřice

Základní charakteristika použité pryskyřice CHS-EPOXY 520 (EPOXY 15) vychází z údajů uvedených v materiálovém listu producenta, kterým je DCH - Sincolor, a.s.[31].

CHS-EPOXY 520 (EPOXY 15) je dvousložková nízkomolekulární epoxidová pryskyřice připravená reakcí bisfenolu A s epichlorhydrinem bez modifikujících složek. Je to nažloutlá čirá viskózní kapalina s hustotou v rozmezí 1,16-1,17 g.cm<sup>-3</sup> při 20 °C, viskozitou 12,0-14,5 Pa.s při 25 °C. Obsah epoxidových skupin je 5,2–5,5 mol.kg<sup>-1</sup>, epoxidový hmotnostní ekvivalent 182–192 g.mol<sup>-1</sup>. Pryskyřice CHS-Epoxy 520 se vytvrzuje tvrdidlem P 11 (diethylentriamin) v hmotnostním poměru 100 : 11, nebo objemovém poměru 100 : 13,5. Tvrdidlo P 11 je rychlé tvrdidlo s kratší dobou zpracovatelnosti. Vyznačuje se tzv. dolepem na povrchu po vytvrzení. Dolep lze odstranit omytím vodou nebo 3% roztokem kyseliny citronové. Vytvrzená kompozice zůstává transparentní. Zpracování popisované epoxidové pryskyřice je snadné, doba želatinace se pohybuje v rozmezí 20 – 30 min. při 23 °C podle připraveného množství, nejnižší doporučená teplota zpracování je 15 °C. Vytvrzení probíhá po dobu 24 hodin při teplotě 23 ± 5 °C, plné vytvrzení vyznačující se dosažením konečných fyzikálně-mechanických vlastností je 7 dní při teplotě 23 ± 5 °C nebo 1–2 dny při 23 ± 5 °C a dotvrzení po dobu 3 dní při teplotě 50–60 °C.

Tato pryskyřice slouží impregnaci, zalévání, odlévání a lepení v různých odvětvích průmyslu. Pro výrobu a opravy sportovních laminátových potřeb. K přípravě laminátů a k výrobě modifikovaných pryskyřic. Je vhodná pro výrobu tmelů, lepidel a stěrkových hmot. Pryskyřice ani natužená směs před aplikací nesmí být zředována přídavkem jakéhokoliv rozpouštědla či ředidla.

#### 3. 1. 2 Rýžové slupky

Původ rýže lze nalézt v tropických částech Afriky a Asie. Rýže setá (*Oryza sativa*) je jednoletá bylina, dorůstající do výšky 1 až 2 metrů. Taxonomicky je řazena do čeledi

lipnicovitých. Rostlina má ploché listy 600 x 15 mm velké, na krajích drsné, s dlouhými pochvami. Stébla jsou přímá, lysá a olistěná. Lata dosahuje až 300 mm, je úzká, po odkvětu převislá, klásky jsou silně z boku zmáčknuté, plevy okrouhlé a bezkvětné pluchy jednožilné. Obilky jsou zploštělé, červenohnědě okoralé [32].

Rýže setá náleží mezi rostliny s výraznou schopností absorbovat koloidní roztok kyseliny orthokřemičité a v průběhu následných biochemických procesů a procesu fotosyntézy vytvářet ve tkáních rýžových slupek ochranné vrstvy s vysokým zastoupením oxidu křemičitého ve formě nanočástic. Nanočástice oxidu křemičitého spolu s doprovodnými ionty (sodík, draslík, vápník, hořčík, draslík, hliník) jsou primárně uloženy v organické matici na bázi celulózy, hemicelulózy a ligninu, se kterou jsou pevně spojeny. Rýžové slupky patří k největším zemědělsky produkovaným odpadům. Odhaduje se, že každoročně je celosvětově vyprodukováno 684 milionů tun rýžových slupek.

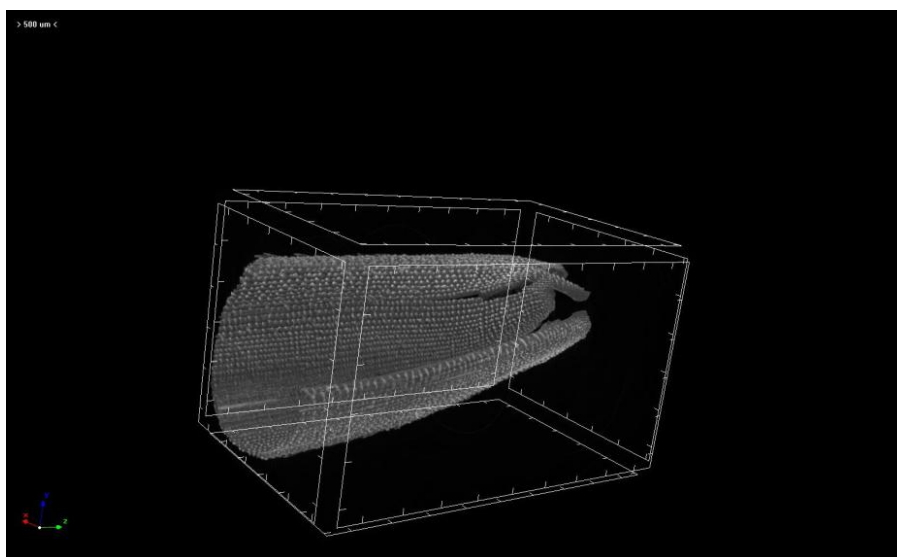


Obr. 9 Detailní snímek rýžových slupek na rostlině (vlevo),  
suché rýžové slupky (vpravo).

### 3. 2 Příprava vzorků

Jako plniva bylo použito namletých rýžových slupek – mletí bylo provedeno dle patentové přihlášky PV2014-595 Epoxidová pryskyřice plněná organicko-anorganickým plnivem přírodního původu a způsob její přípravy. Příprava směsí pro výrobu vzorků byla realizována podle užitého vzoru CZ 27491 U1 Epoxidová pryskyřice plněná organicko-anorganickým plnivem přírodního původu - ke 100g použité epoxidové pryskyřice byl přimíchán 1g (1dsk)

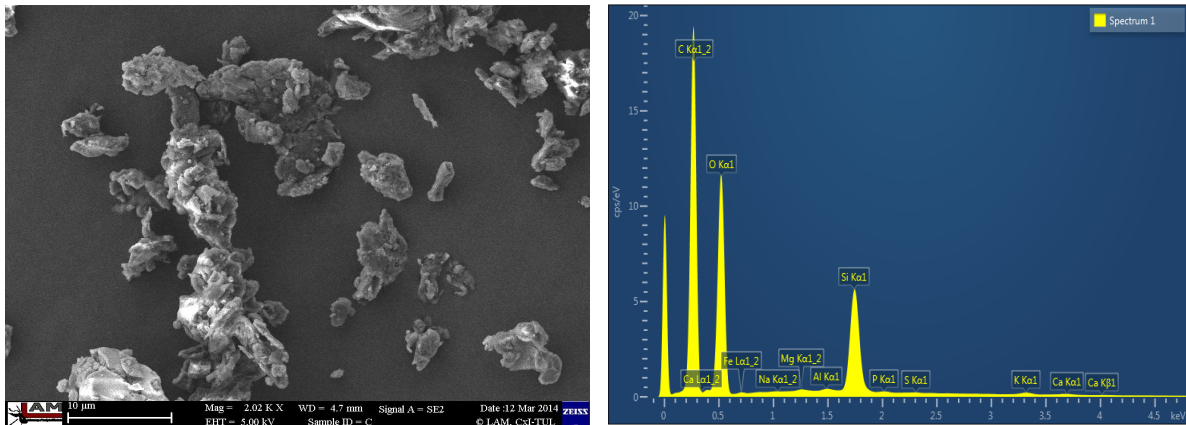
respektive 10g (10dsk) namletých rýžových slupek s velikostí částic v rozmezí 1 až 100 mikrometrů.



Obr. 10 Prostorové zobrazení části rýžové slupky  
– CT mikrofotografie [33].



Obr. 11 Slupky – organicko-anorganické plnivo v surovém stavu  
a jako namleté plnivo.



Obr. 12 Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu dokumentující velikost částic plniva a chemické složení stanovené EDX analýzou [33].

Tab. 4 Chemické složení částic organicko-anorganického plniva stanovené EDX analýzou [33].

prvek	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe
hm. %	52,10	34,20	0,01	0,12	0,19	11,72	0,20	0,08	0,65	0,42	0,31
at. %	62,44	30,77	0,01	0,07	0,10	6,01	0,09	0,04	0,24	0,15	0,08

Pro navržené experimenty byly použity směsi tří složení – čistá epoxidová pryskyřice a plněná epoxidová pryskyřice s obsahem plniva 1dsk a 10dsk (dsk – zkratka pro označení množství plniva v matrici, 1dsk znamená 1 díl plniva na 100 dílů kaučuku, pryskyřice nebo obecně polymeru, obecně hmotnostní díl). Všechny připravené vzorky byly hodnoceny po 10 dnech po odlití, poté kdy je dle materiálového listu pro použitou epoxidovou pryskyřici dosaženo konečných hodnot mechanických parametrů.





Obr. 13 Vzorky připravené pro měření tvrdosti a nasákavosti  
 – čistá epoxidová pryskyřice – epoxidová pryskyřice s plněním 1 dsk.  
 – epoxidová pryskyřice s plněním 10 dsk.



Obr. 14 Obr. X. Vzorky pro zkoušku tlakem – čistá epoxidová pryskyřice –  
 epoxidová pryskyřice s plněním 1 dsk – epoxidová pryskyřice s plněním 10 dsk.



Obr. 15 Vzorky pro zkoušku tahem – čistá epoxidová pryskyřice  
 – epoxidová pryskyřice s plněním 1 dsk – epoxidová pryskyřice s plněním 10 dsk.

Připravené směsi byly odlity do forem podle volby následujícího experimentálního hodnocení. Pro hodnocení fyzikálních a mechanických parametrů byla zvolena zkouška tlakem, tahem, hodnocení tvrdosti dle Shoreho a hodnocení mikrotvrdosti, zkouška rázové houževnatosti Charpy a měření hustoty imerzní metodou. Pro hodnocení vlivu okolního prostředí bylo zvoleno posouzení nasákavosti. Dále byl experimentálně vyhodnocen koeficient tření a odolnost materiálu vůči opotřebení a to pro případ čisté epoxidové

pryskyřice a epoxidové pryskyřice plněné běžně používanými pigmenty (hliníkový bronz a titanová běloba) a epoxidové pryskyřice plněné běžně používanými pigmenty s přídavkem plniva v množství 1 dsk. Naměřené hodnoty byly porovnány s publikovanými hodnotami [35].



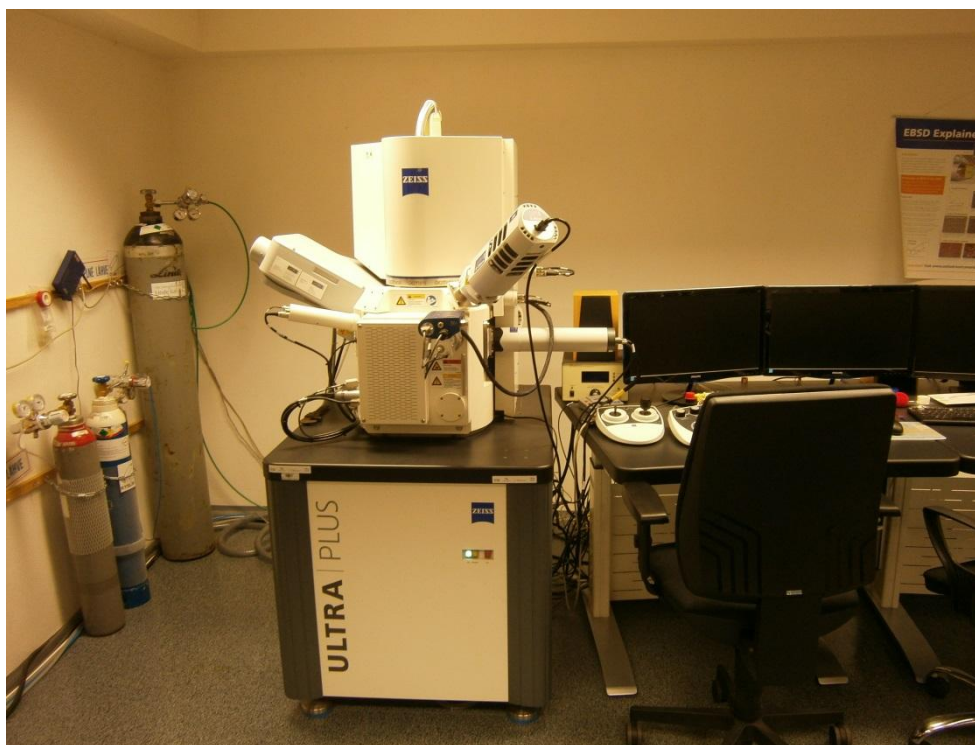
Obr. 16 Formy použité pro přípravu vzorků pro jednotlivé experimenty.

### 3.3 Metody zkoumání

Pro hodnocení fyzikálních a mechanických vlastností sledovaných vzorků byly použity vybrané zkoušky a metody s cílem určit základní materiálové vlastnosti a porovnat vliv plniva charakteristického svým organicko-anorganickým složením na chování polymerní matrice.

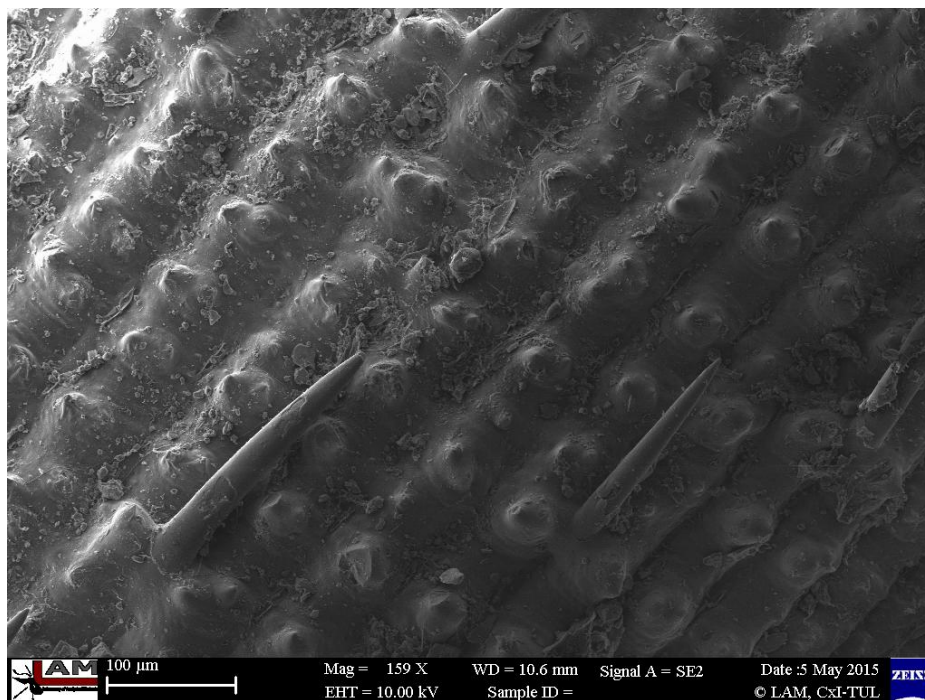
### 3. 3. 1 Rastrovací elektronová mikroskopie – energiově disperzní analýza (EDX)

Rastrovací elektronová mikroskopie (mikroskop ZEISS ULTRA PLUS) doplněná o EDX analýzu byla využita při studiu rýžových slupek a při posouzení charakteru lomů vybraných vzorků.

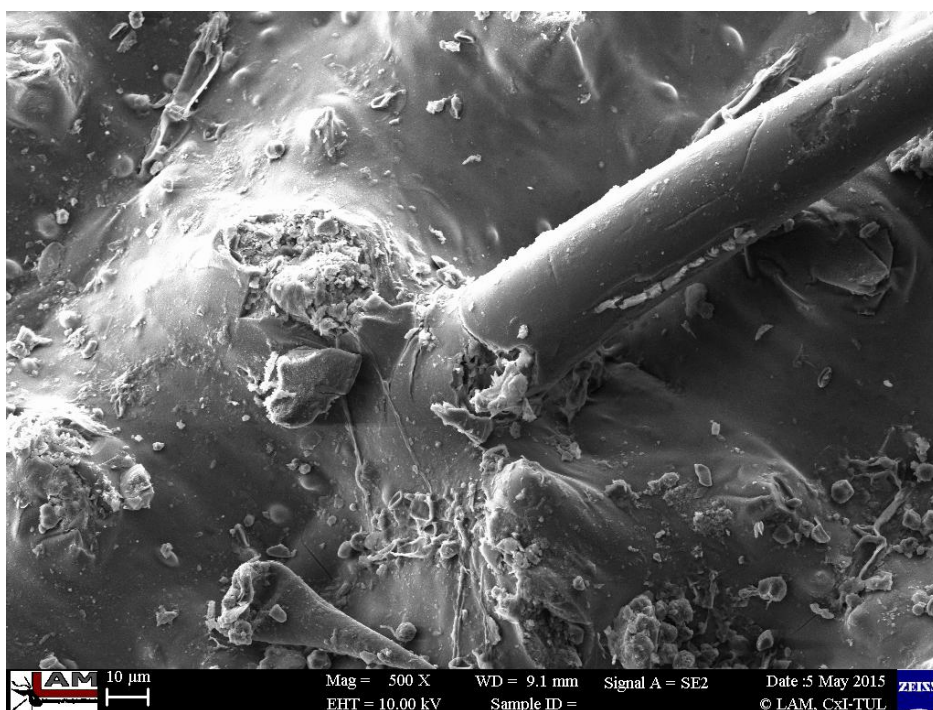


Obr. 17 Rastrovací elektronový mikroskop ZEISS ULTRA PLUS.

Cílem mikroskopického hodnocení rýžových slupek bylo studium rozložení oxidu křemičitého, který se ve slupkách vyskytuje. Slupky upevněné oboustrannou na terčičky oboustrannou lepicí uhlíkovou páskou byly napařeny tenkou vrstvou platiny – cca 1nm. Pozorován byl povrch slupky a příčný řez slupkou. Díky tenké vrstvě platiny bylo možné realizovat současně jak mikroskopické pozorování a tak určení chemického složení a rozložení jednotlivých prvků ve vzorku.

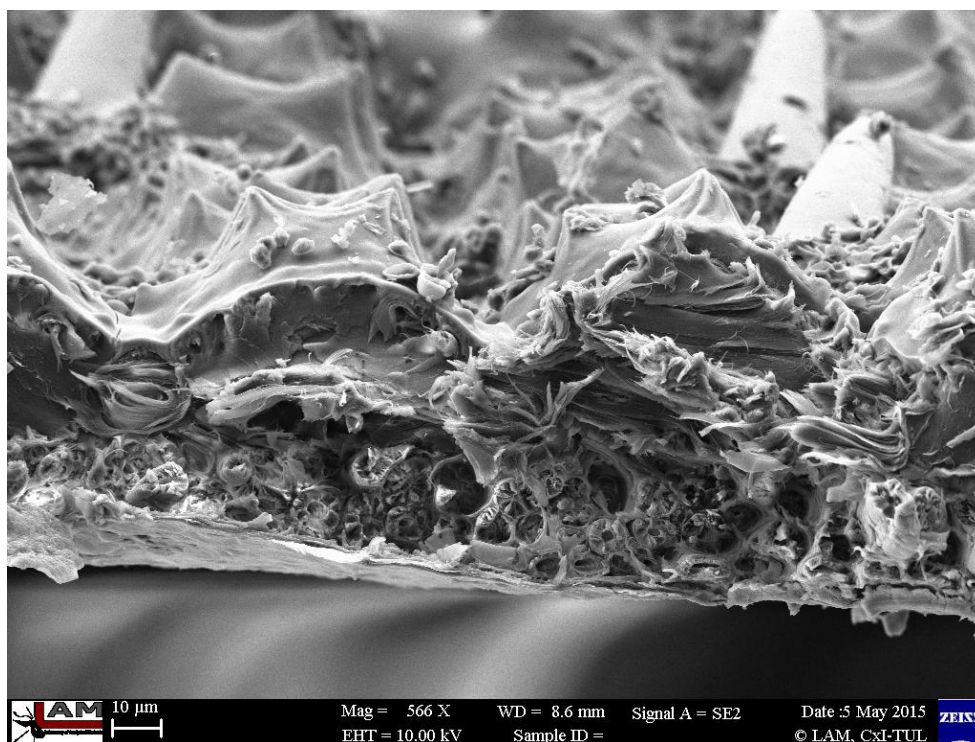


Obr. 18 Snímek povrchu rýžové slupky – rastrovací elektronová mikroskopie.  
Ze snímku je dobře patrný hrubý povrch tvořený výstupky vytvářející rovnoběžné řady.

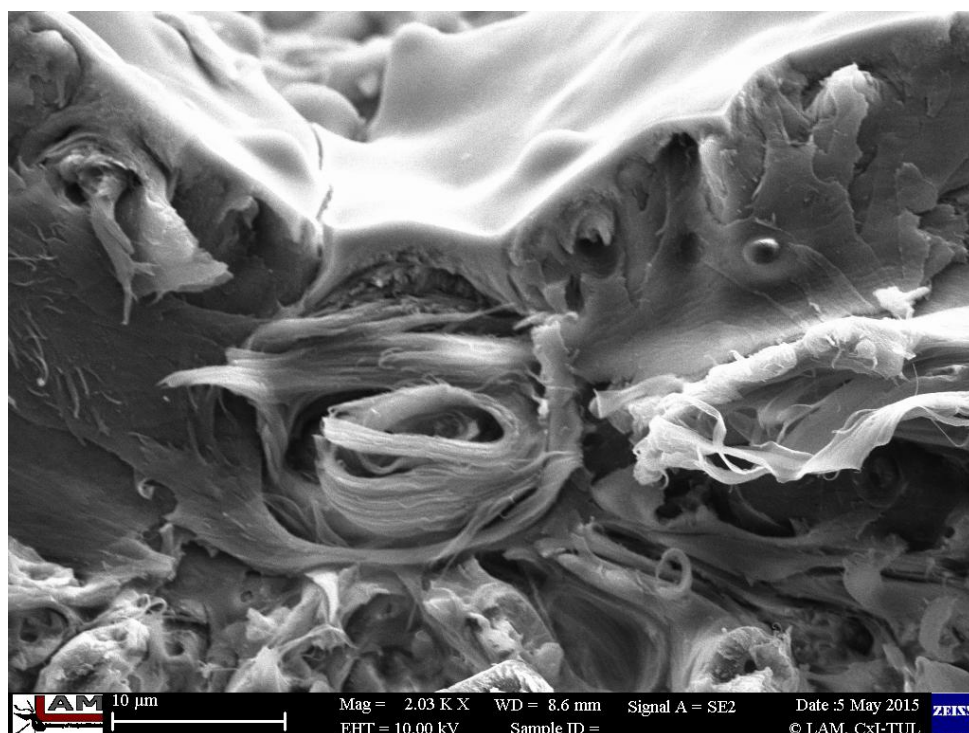


Obr. 19 Detailní snímek povrchu rýžové slupky – rastrovací elektronová mikroskopie.  
Ze snímku je patrný charakter povrchu výstupku na rýžové slupce.





Obr. 20 Detailní snímek řezu rýžovou slupkou – rastrovací elektronová mikroskopie. Na povrchu rýžové slupky jsou vidět ostny (trichomy) o délce okolo 200 μm a průměru v rozmezí od 20 do 30 μm.

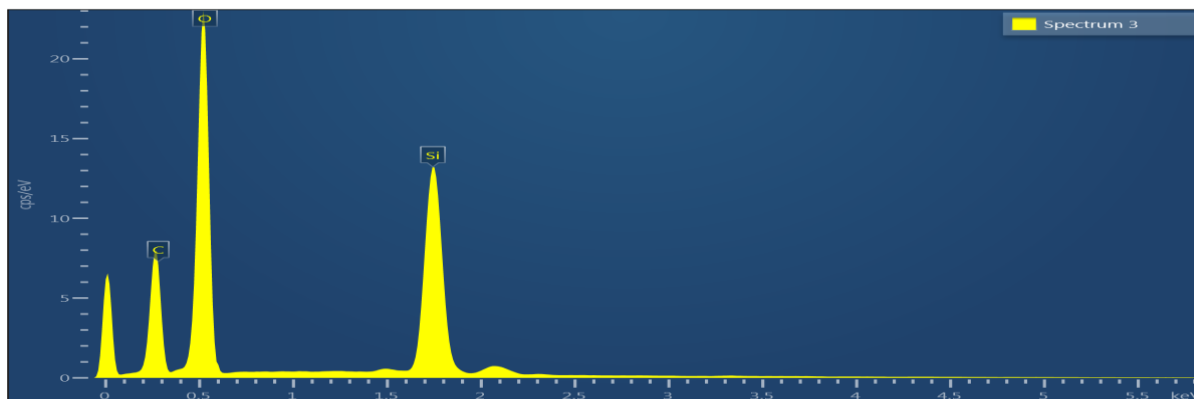


Obr. 21 Detailní snímek řezu rýžovou slupkou – rastrovací elektronová mikroskopie. Na povrchu je patrná kompaktní vrstva na bázi oxidu křemičitého.

Na předchozím snímku je možné zřetelně pozorovat odlišný (světlejší) odstín povrchu na rozdíl od plochy řezu slupky. Jiný odstín je způsobem využitím tzv. chemického kontrastu, kterým je dosahováno lepšího zviditelnění některých chemicky odlišných struktur nebo fází. Světlejší odstín na snímku je dán přítomností těžších prvků, naopak lehčí prvky dávají tmavší barvu. Pro zjištění koncentrace a umístění prvků v řezu slupky byla následně použita EDX analýza, která byla provedena na stejných vzorcích jako zkoumání elektronovým mikroskopem.



Obr. 22 Povrch rýžové slupky s naznačeným ohraničením, na kterém byla provedena EDX analýza.

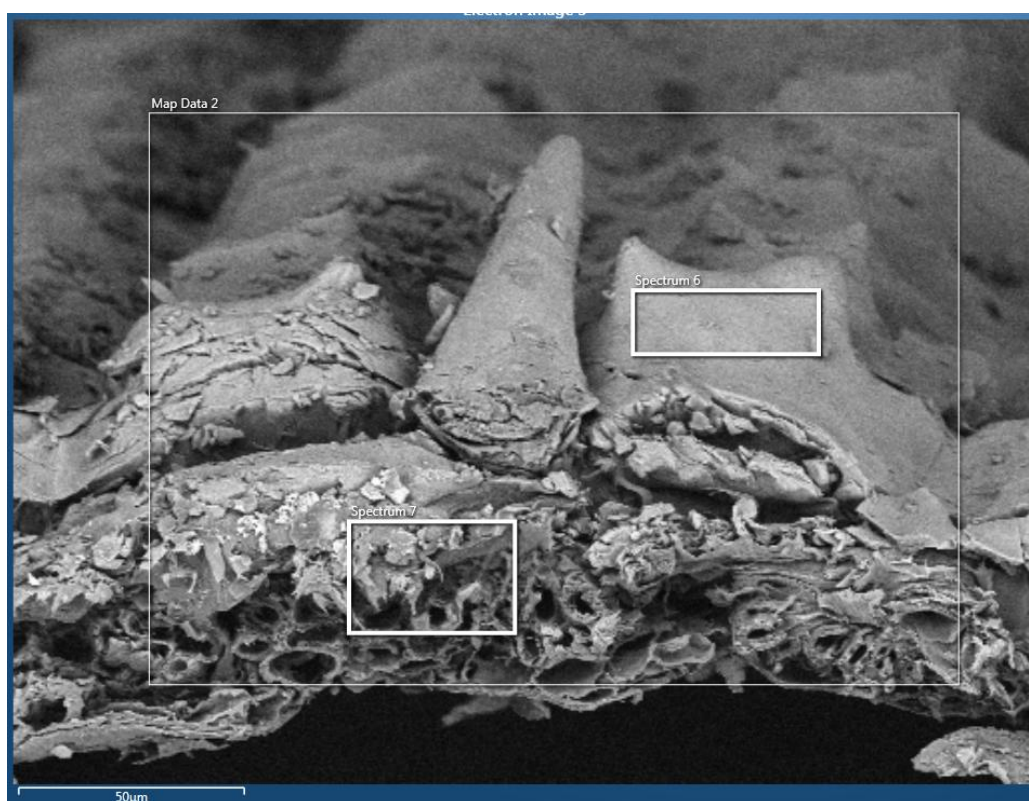


Obr. 23 Grafické znázornění výsledku energiově disperzní analýzy provedené na povrchu rýžové slupky (spektrum č. 3).

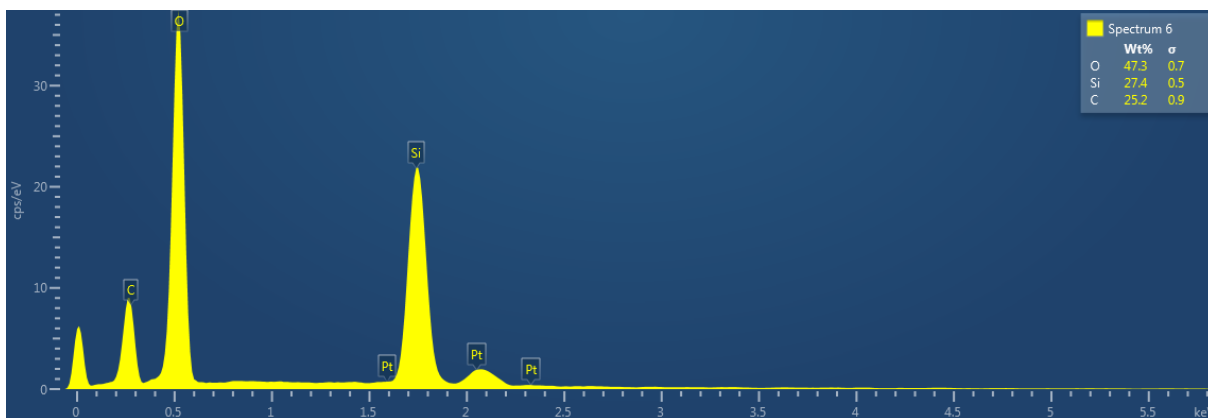
Tab. 5 Chemická analýza provedená na povrchu rýžové slupky – spektrum č 3.

Prvek	Line Type	Zastoupení prvku hmotnostní (%)	Zastoupení prvku atomová (%)
C	K series	30.78	41.09
O	K series	44.96	45.05
Si	K series	24.26	13.85
<b>Součet</b>		100.00	100.00

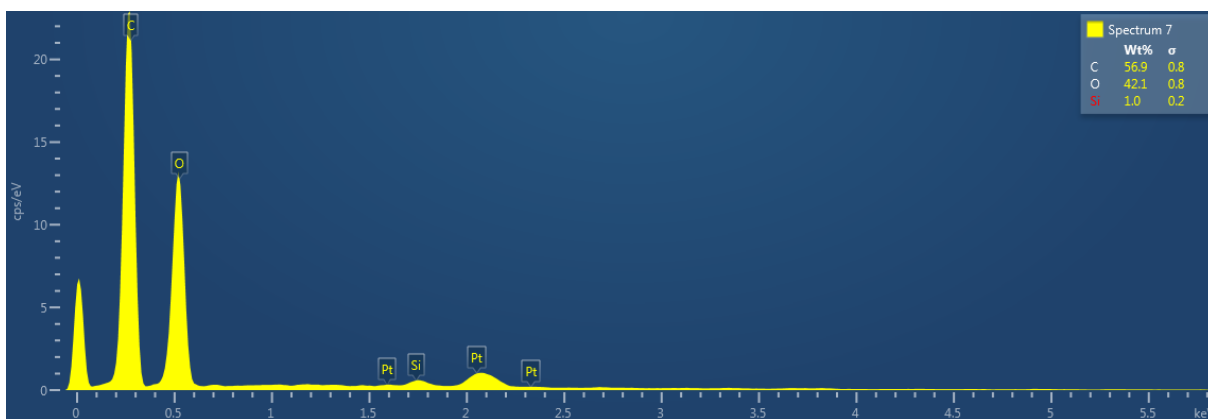
Při EDX analýze je zřejmé, že lze přesně určit, z jakého místa bylo zjišťováno rozložení a zastoupení prvků, které byly analyzovány. Spektra č. 1 a č. 2 byla mezi sebou navzájem jen mírně rozdílná, oproti spektru č. 3 se však liší. Z toho je vidět, že povrch i osten na povrchu slupky mají stejné chemické zastoupení prvků. Z tabulky č. 5 je patrné vidíme, že největší procentuální zastoupení vykazuje kyslík, který s uhlíkem tvoří organickou část povrchu a s křemíkem naopak kompaktní anorganickou část.



Obr. 24 Řez rýžovou slupkou s naznačeným ohraničením, kde byla provedena EDX analýza.



Obr. 25 Grafické znázornění výsledku energiově disperzní analýzy provedené na řezu rýžovou slupkou (spektrum č. 6).



Obr. 26 Grafické znázornění výsledku energiově disperzní analýzy provedené na řezu rýžovou slupkou (spektrum č. 7).

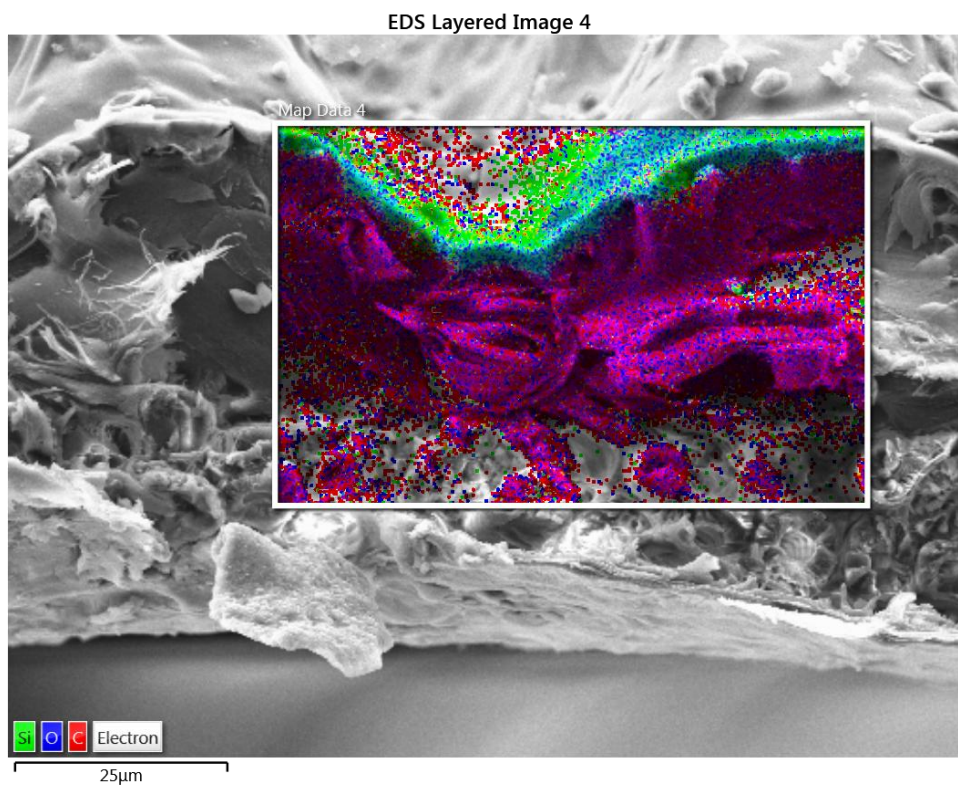
Tab. 6 Chemická analýza řezu rýžové slupky spektrum č. 6 a č. 7

Prvek	Spektrum 6 Zastoupení prvků hmotnostní (%)	Spektrum 7 Zastoupení prvků hmotnostní (%)
<b>C</b>	34.79	63.97
<b>O</b>	49.02	35.56
<b>Si</b>	16.19	0.46
<b>Součet</b>	100.00	100.00

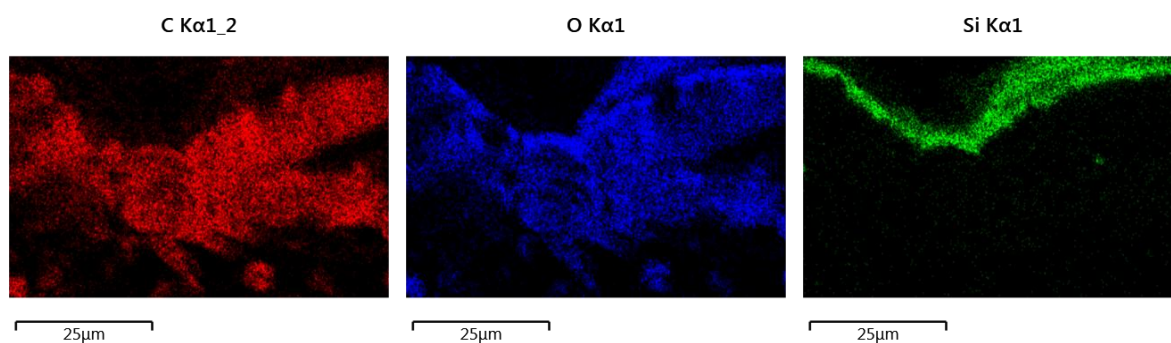
Na základě výsledků EDX analýzy bylo jednoduchou cestou zjištěno, že povrch rýžových slupek je pokryt tenkou, několik mikrometrů silnou vrstvou oxidu křemičitého. Z výsledků dalšího pozorování na řezu slupky bylo zjištěno, že kompaktní vrstva oxidu křemičitého se nachází výhradně na povrchu.



Jak je zřejmé, povrch slupky obsahuje více než 16 hmotnostních % křemíku ve sloučenině oxidu křemičitého. Pod touto vrstvou se křemík téměř nevyskytuje, bylo zjištěno pouze jeho stopové množství okolo 0,5 hmotnostních %. Na grafech se vidět také přítomnost platiny, ta byla na povrch vzorků napařena pro zajištění vodivosti vzorku. Při zpracování dat byla z výsledků odstraněna.



Obr. 27 Přehledový snímek dokumentující rozložení křemíku, respektive oxidu křemičitého ve vzorku.

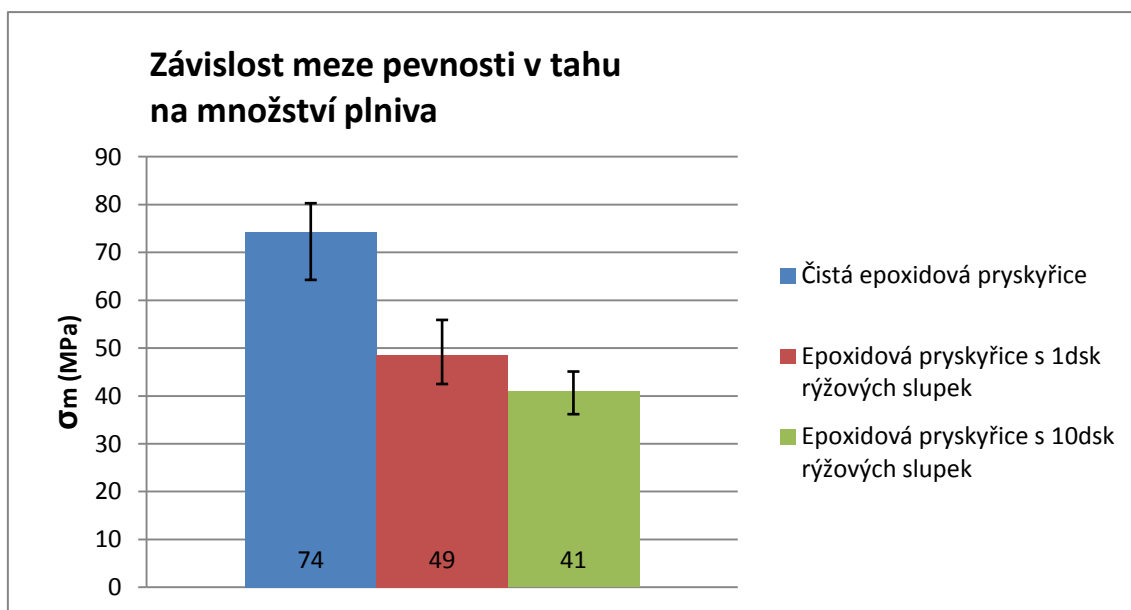


Obr. 28 Přehledový snímek dokumentující kvalitativní rozložení jednotlivých prvků v rýžové slupce.

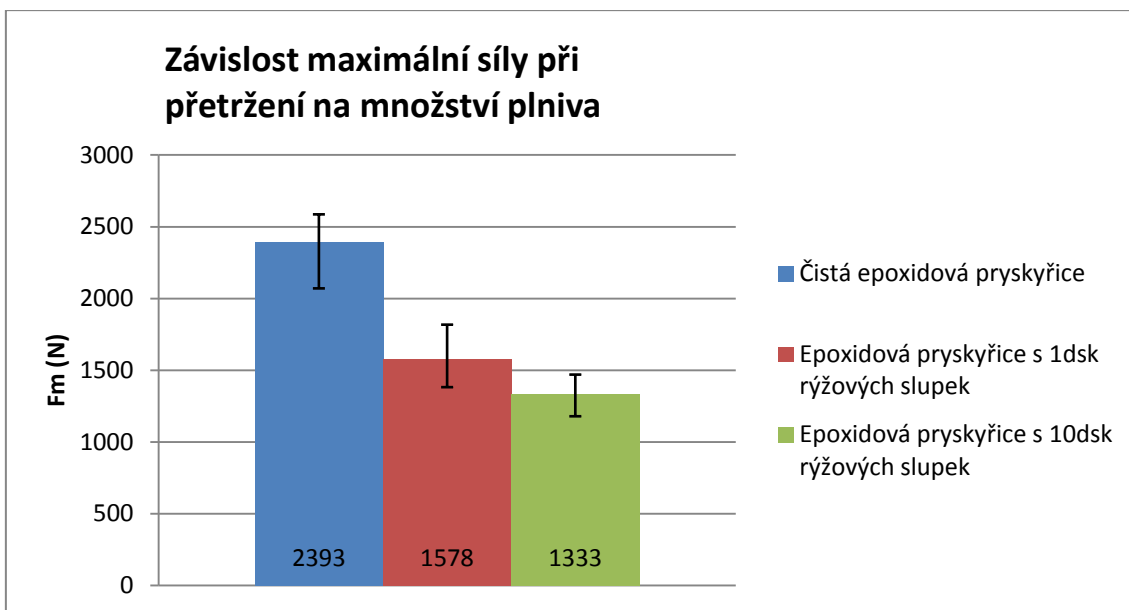
Z výsledků kvalitativní analýzy provedené na řezu rýžové slupky je dobře vidět, že kyslík se nachází jak na povrchu slupky, tak v celém průřezu. Uhlík tvoří spolu s kyslíkem „kostru slupky“ – organickou fázi. Na povrchu slupky se vyskytuje křemík společně s kyslíkem ve formě oxidu křemičitého. Křemík na povrchu ve formě oxidu chrání slupku před okolními vlivy a povrch tak plní ochranou funkci.

### 3. 3. 3 Zkouška tahem

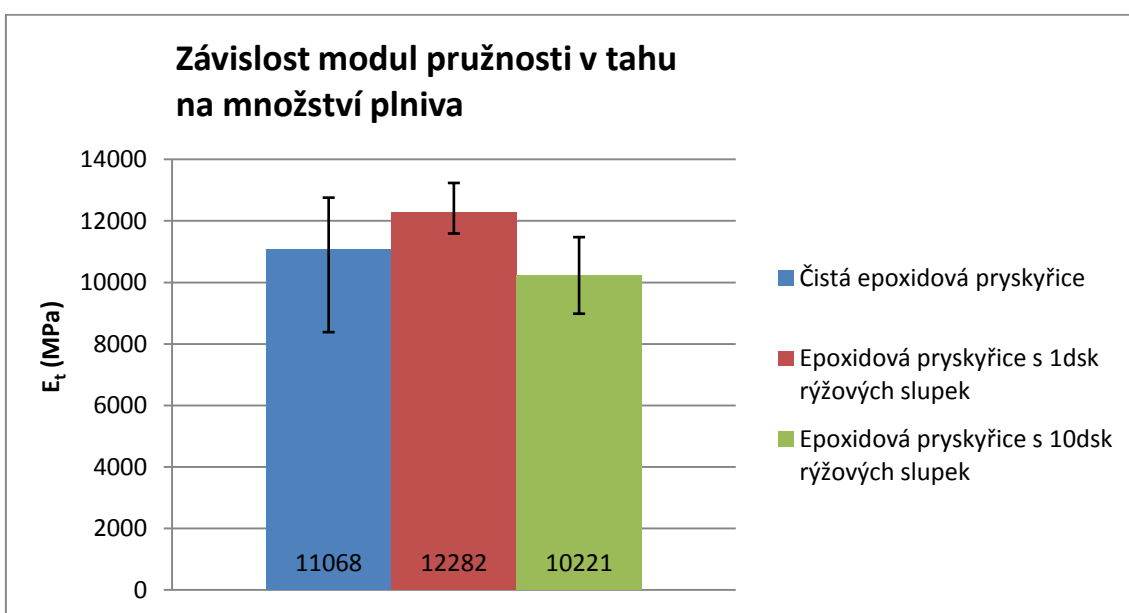
Zkouška tahem všech připravených vzorků byla provedena na zkušebním stroji P 100 - LabTest II. Teplota okolí, při níž měření probíhalo, byla  $23 \pm 2$  °C, relativní vlhkost cca 60%. U vzorků ve tvaru lopatiček byla vyhodnocena mez pevnosti, maximální síla při přetržení vzorku a modul pružnosti v tahu. Předpětí při zkoušce bylo nastaveno na 50 N a rychlost zatěžování byla 6 mm/min. Naměřené hodnoty  $\sigma_m$  mez pevnosti v tahu,  $F_m$  maximální síla při přetržení vzorku a  $E_t$  modul pružnosti v tahu jsou vyjádřeny v následujících grafech – viz obr. 29 až 34.



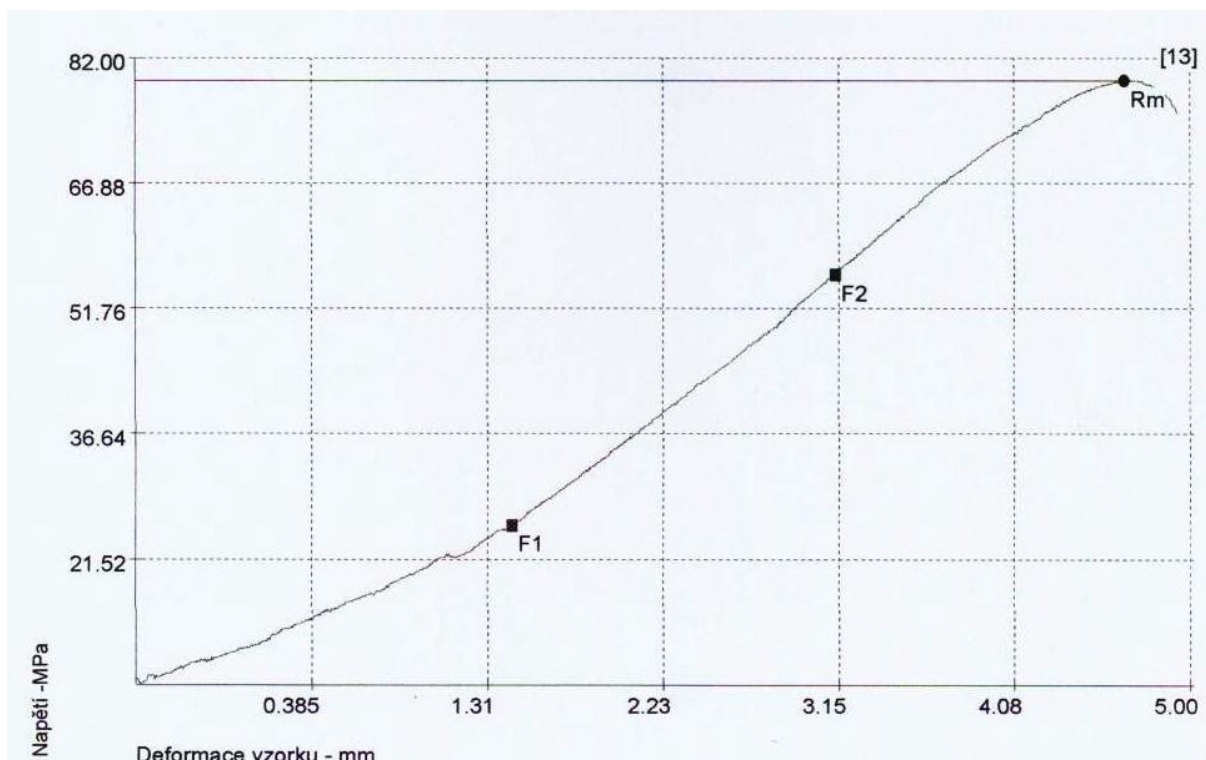
Obr. 29 Graf závislosti meze pevnosti v tahu na množství použitého plniva v dsk.



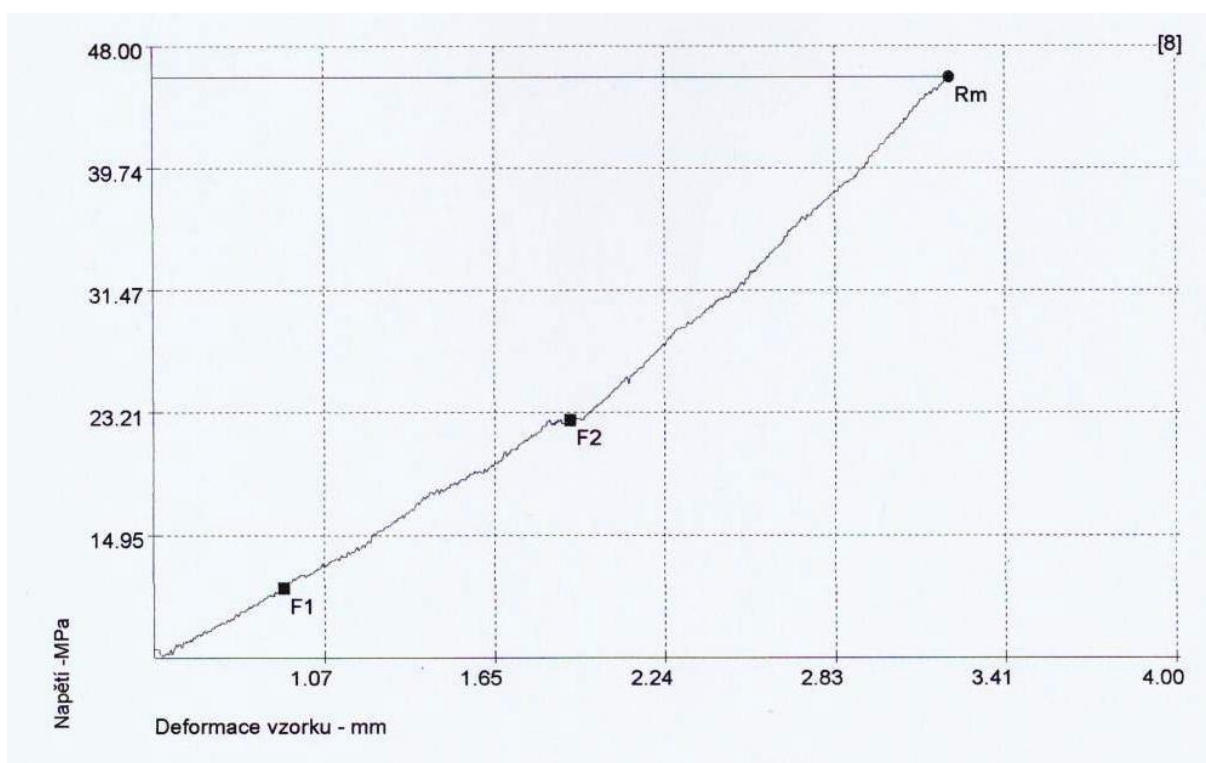
Obr. 30 Graf závislosti maximální síly při přetržení vzorků při zkoušce v tahu na množství použitého plniva v dsk.



Obr. 31 Graf závislosti modulu pružnosti v tahu na množství použitého plniva v dsk.

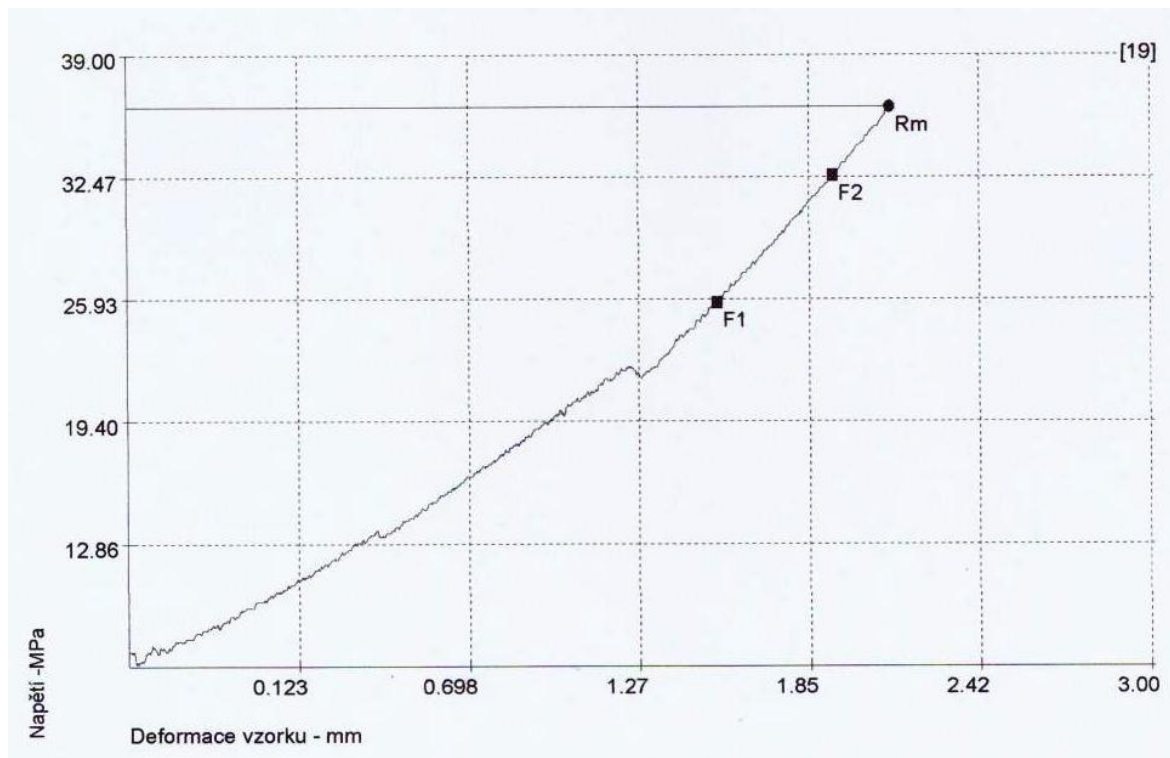


Obr. 32 Grafické znázornění průběhu zkoušky tahem pro čistou epoxidovou pryskyřici.



Obr. 33 Grafické znázornění průběhu zkoušky tahem pro epoxidovou pryskyřici s obsahem plniva 10 dsk.





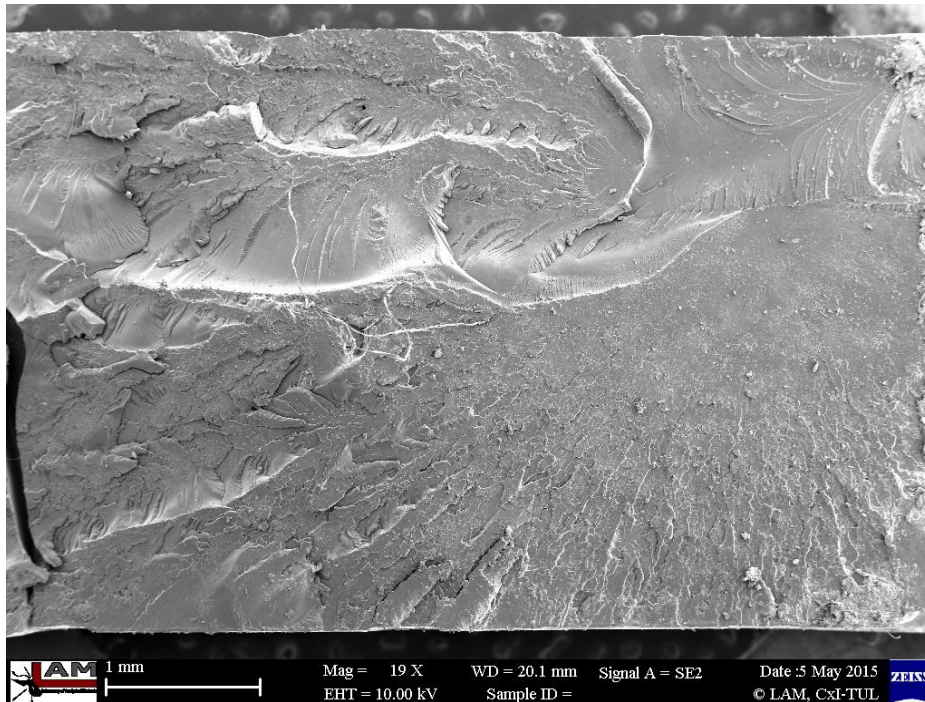
Obr. 34 Grafické znázornění průběhu zkoušky tahem pro epoxidovou pryskyřici s obsahem plniva 10 dsk.

Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že mez pevnosti v tahu pro čistou epoxidovou pryskyřici je 74 MPa, síla při přetržení 2393 N a modul pružnosti 11068 MPa (ve všech případech se jedná o průměrné hodnoty stanovené minimálně z 5 hodnot). Pro vzorky s 1 dsk plniva jsou hodnoty následující: mez pevnosti 49 MPa, síla při přetržení 1578 N a modul pružnosti 12282 MPa. Vzorky s 10 dsk plniva dávají hodnoty: mez pevnosti 41 MPa, síla při přetržení 1333 N a modul pružnosti 10221 MPa.

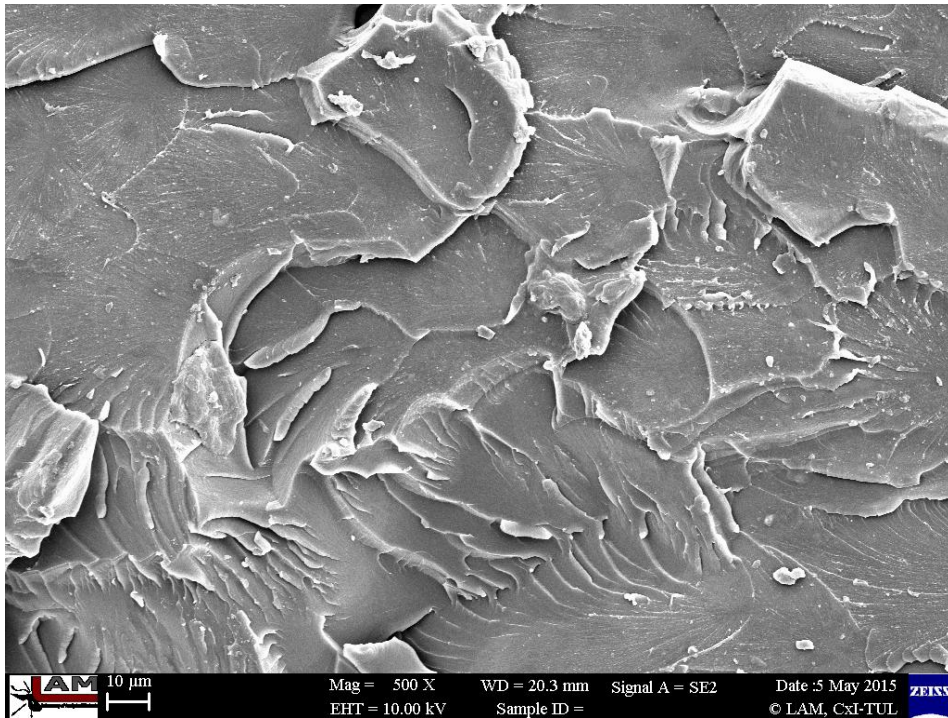
Z výše uvedených hodnot je patrné, že přítomnost namletých rýžových slupek výrazně ovlivňuje mez pevnosti v tahu epoxidové pryskyřice. Již při 1 dsk dochází k poklesu meze pevnosti v tahu o 34% oproti čisté epoxidové pryskyřici a při 10 dsk je rozdíl 45%. Podobné rozdíly jsou i u hodnot pro sílu při přetržení. U modulu pružnosti je situace rozdílná. Při 1 dsk plniva dochází k mírnému nárůstu o 10%, při 10 dsk plniva je zde však patrný pokles oproti čisté epoxidové pryskyřici o 9%.

### 3. 3. 3. 1 Hodnocení lomové plochy vzorků po tahové zkoušce

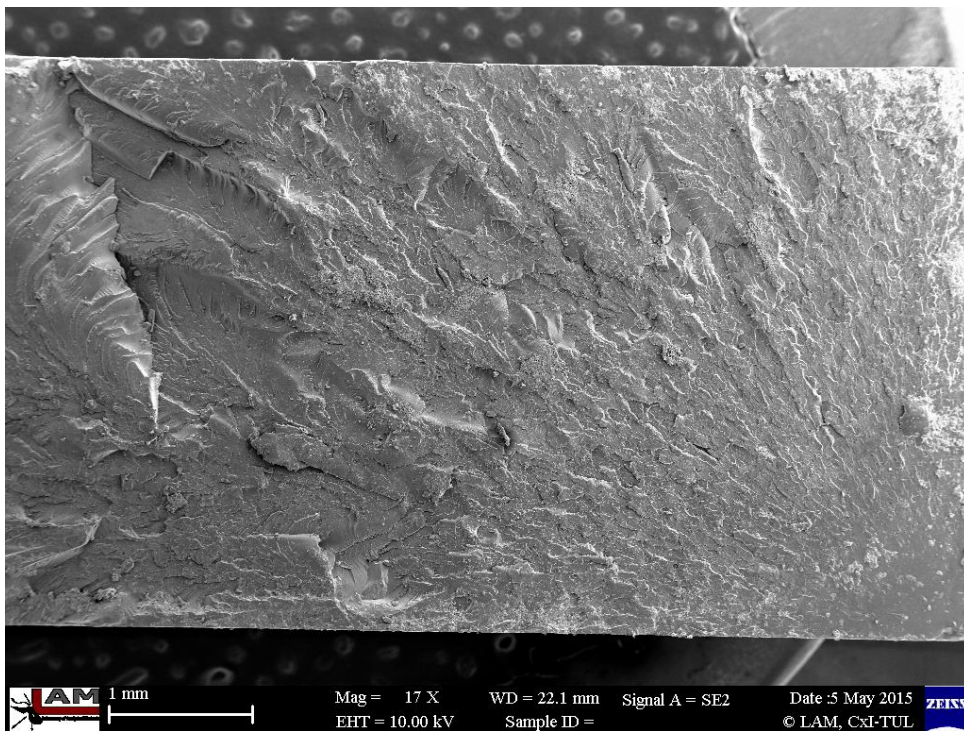
Po tahové zkoušce bylo provedeno hodnocení lomové plochy jednotlivých typů vzorků lišících se množstvím plniva. Pro posouzení byla použita rastrovací elektronová mikroskopie. Vzorky byly upraveny tak, aby bylo možné umístit je do držáku v mikroskopu a lomy vhodně pozorovat. Nevodivé lomové plochy byly napařeny vrstvou zlata o tloušťce 3nm.



Obr. 35 Přehledový snímek lomové plochy čisté epoxidové pryskyřice – rastrovací elektronová mikroskopie.

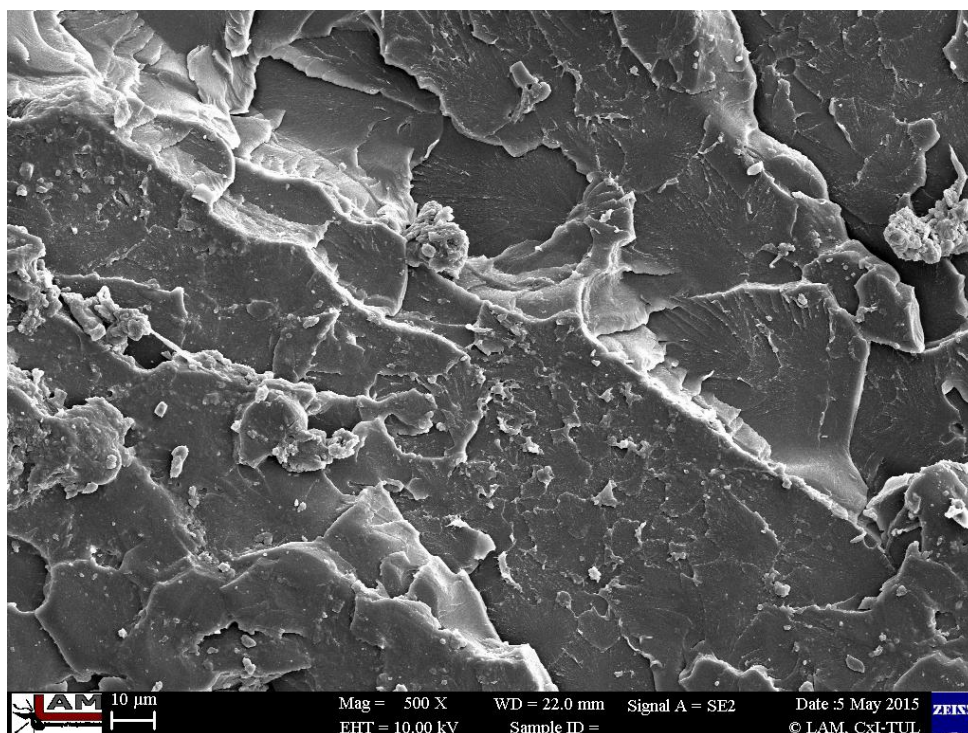


Obr. 36 Detailní snímek lomové plochy čisté epoxidové pryskyřice  
– rastrovací elektronová mikroskopie.

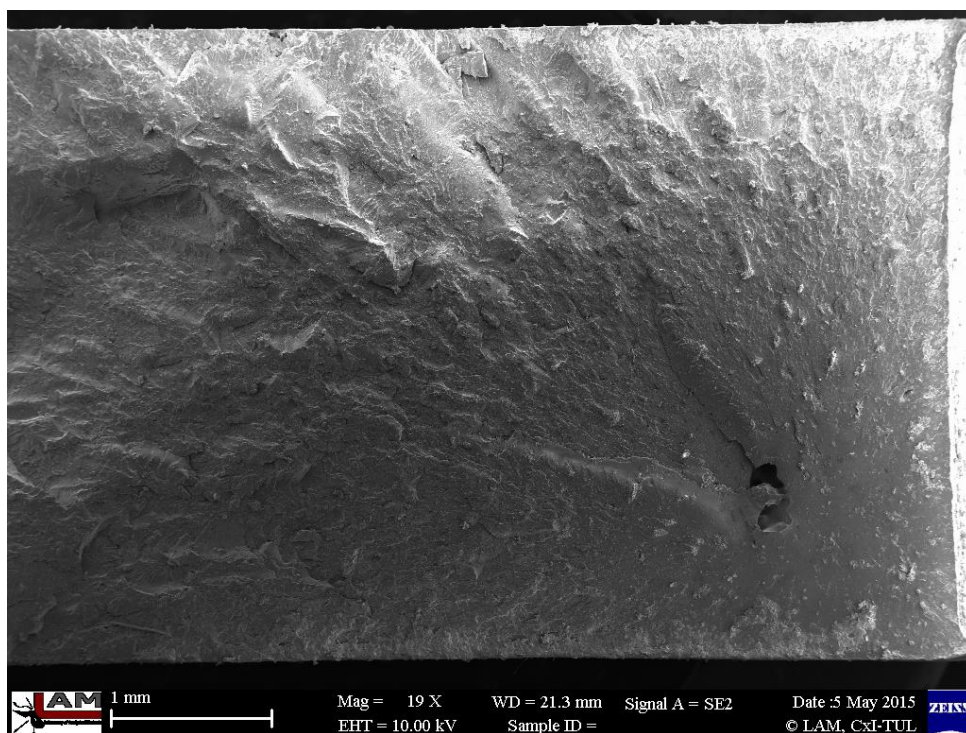


Obr. 37 Přehledový snímek lomové plochy epoxidové pryskyřice s 1dsk plniva  
– rastrovací elektronová mikroskopie.

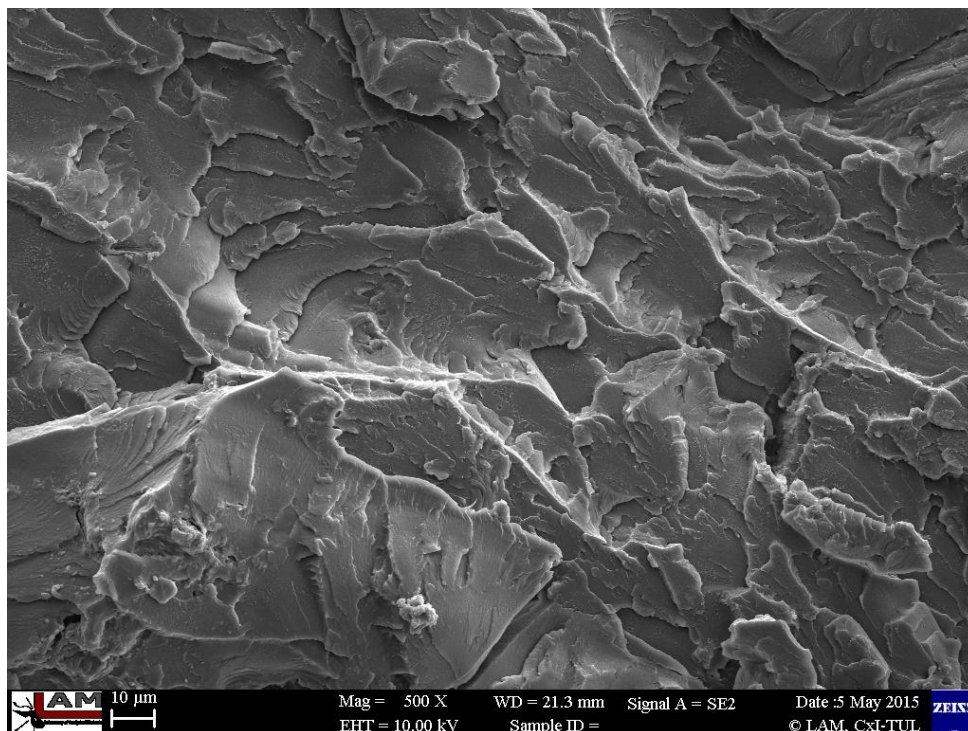




Obr. 38 Detailní snímek lomové plochy epoxidové pryskyřice s 1dsk plniva  
– rastrovací elektronová mikroskopie.



Obr. 39 Přehledový snímek lomové plochy epoxidové pryskyřice s 10 dsk plniva  
– rastrovací elektronová mikroskopie.

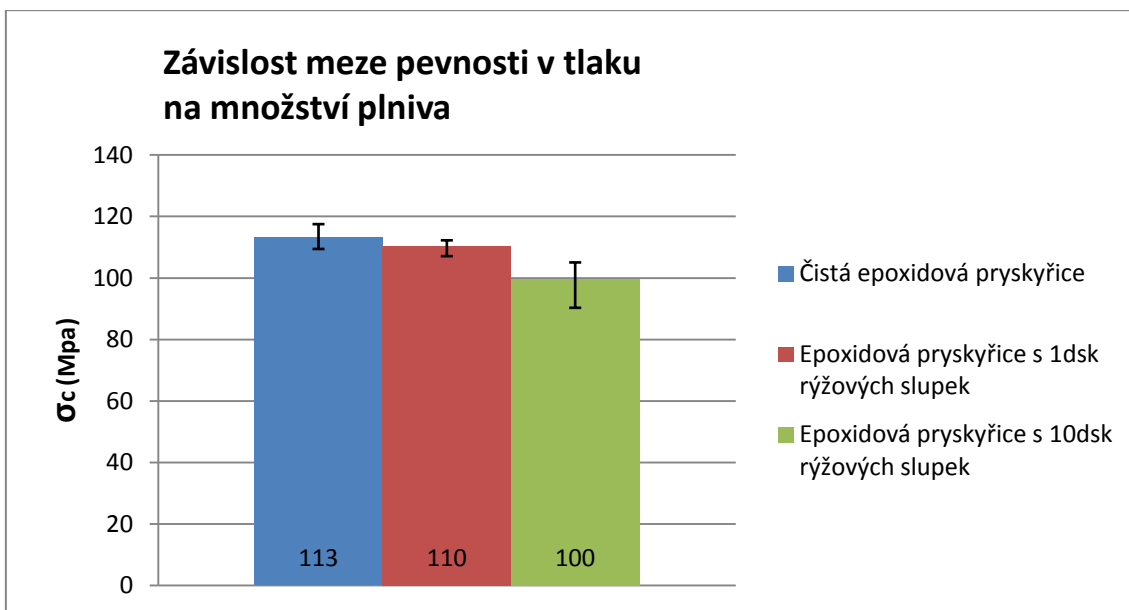


Obr. 40 Detailní snímek lomové plochy epoxidové pryskyřice s 10 dsK plniva  
– rastrovací elektronová mikroskopie.

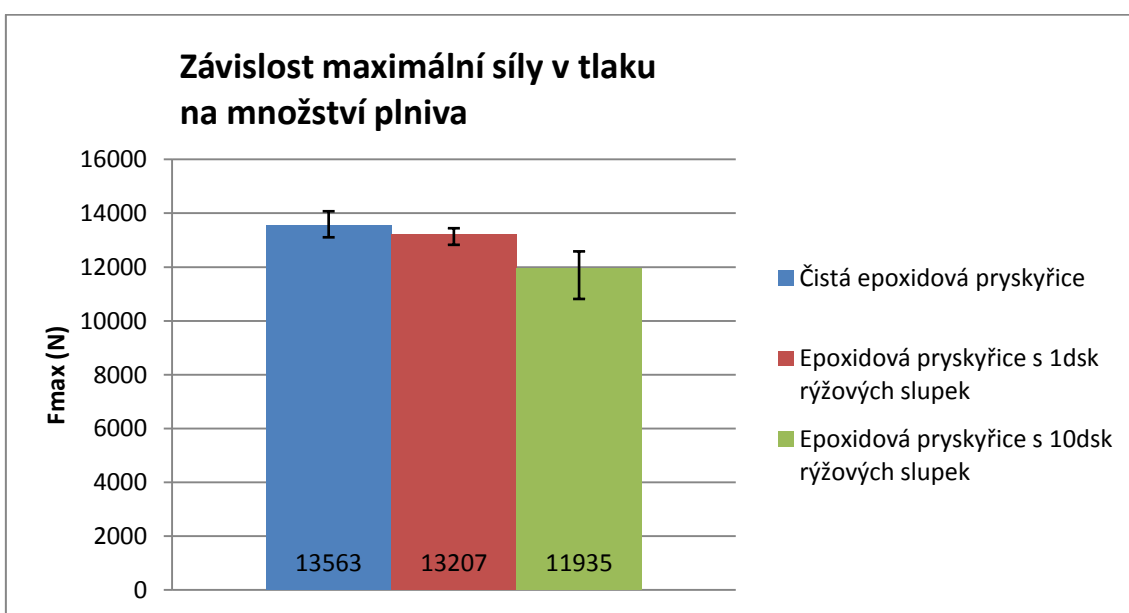
Ze všech výše uvedených obrázků v této kapitole je patrná změna charakteru lomu v závislosti na množství plniva v epoxidové matrici. Ve všech případech je vidět kombinace tvárného a křehkého lomu, které souvisejí jak s přítomností plniva, tak s vadami v materiálu. Podstatným faktem je, že v případě plněných vzorků nebyla nalezena místa, kde by bylo patrné rozhraní fází plniva a pojiva. Z toho lze usuzovat na velmi dobrou adhezi mezi plnivem a epoxidovou matricí.

### 3. 3. 4 Zkouška tlakem

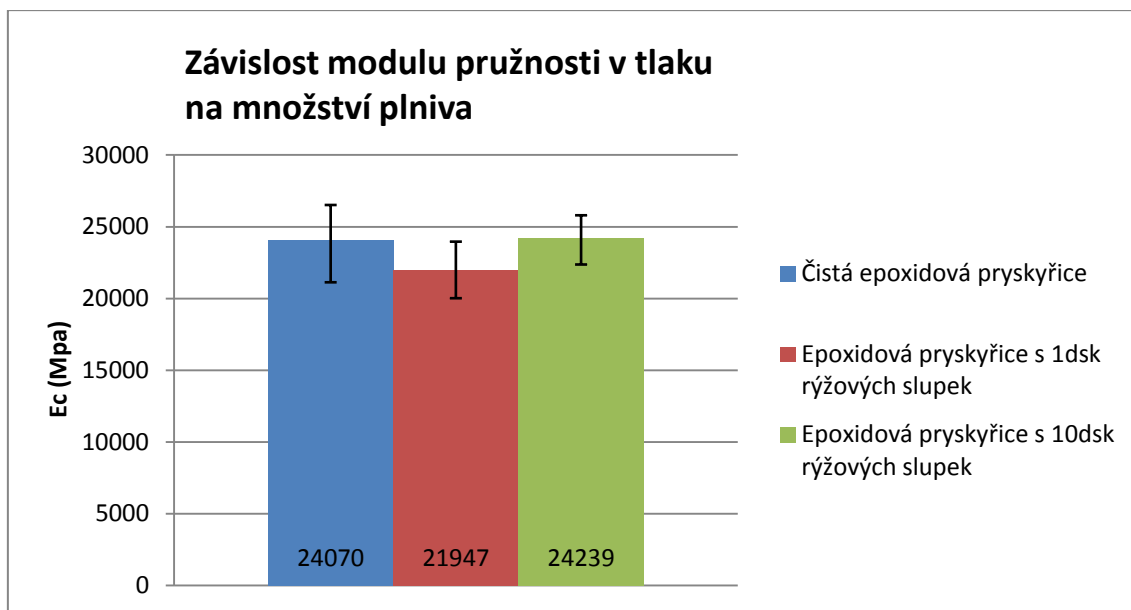
Zkouška tlakem všech připravených vzorků byla provedena na zkušebním stroji P 100 - LabTest II. Teplota okolí, při níž měření probíhalo, byla  $23 \pm 2$  °C, relativní vlhkost cca 60%. U vzorků ve tvaru válečků byla vyhodnocena mez pevnosti v tlaku, maximální síla a modul pružnosti v tlaku. Rychlost zatěžování byla 6 mm/min. Naměřené hodnoty  $\sigma_c$  mez pevnosti v tlaku,  $F_{\max}$  maximální síla a  $E_c$  modul pružnosti v tahu jsou vyjádřeny v následujících grafech – viz obr. 41 až 43.



Obr. 41 Graf závislosti meze pevnosti v tlaku  
na množství použitého plniva v dsk.



Obr. 42 Graf závislosti maximální síly v tlaku  
na množství použitého plniva v dsk.



Obr. 43 Graf závislosti modulu pružnosti v tlaku  
na množství použitého plniva v dsk.

Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že mez pevnosti v tlaku pro čistou epoxidovou pryskyřici je 113 MPa, maximální síla 13563 N a modul pružnosti 24070 MPa (ve všech případech se jedná o průměrné hodnoty stanovené minimálně z 5 hodnot). Pro vzorky s 1 dsk plniva jsou hodnoty následující: mez pevnosti v tlaku 110 MPa, maximální síla 13207 N a modul pružnosti v tlaku 21947 MPa. Vzorky s 10 dsk plniva dávají hodnoty: mez pevnosti v tlaku 100 MPa, maximální síly 11935 N a modul pružnosti v tlaku 24239 MPa.

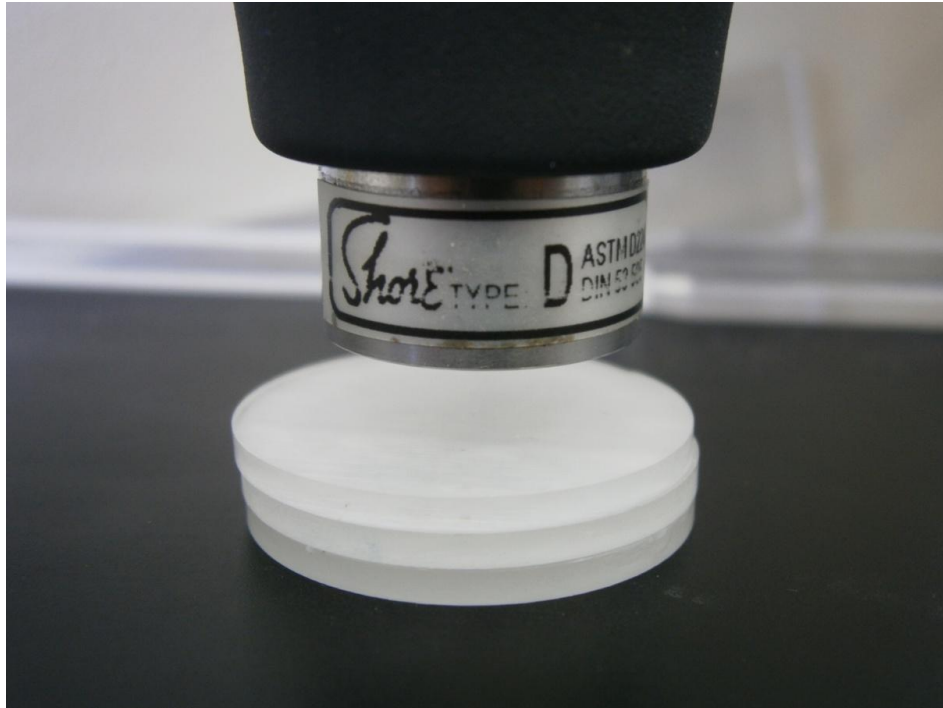
Z výše uvedených hodnot je patrné, že přítomnost namletých rýžových slupek výrazně neovlivňuje mez pevnosti v tlaku epoxidové pryskyřice. Při 1 dsk dochází k poklesu meze pevnosti v tlaku o 2,8% oproti čisté epoxidové pryskyřici a při 10 dsk je rozdíl 12%. Analogická situace nastává i pro maximální sílu při přetržení. V případě modulu pružnosti v tlaku dochází v případě přítomnosti 1 dsk plniva k jeho poklesu o 8,8%, v případě přítomnosti 10 dsk plniva v epoxidové matrici je naopak patrné mírné zvýšení modulu pružnosti a to o 1%.

### 3. 3. 5 Zkouška tvrdosti Shore

Zkouška tvrdosti Shore byla provedena dle normy ČSN EN ISO 868:2003. Pro hodnocené vzorky byla zvolena metoda Shore D, která je vhodná pro tvrdší materiály. Přítlačná síla je



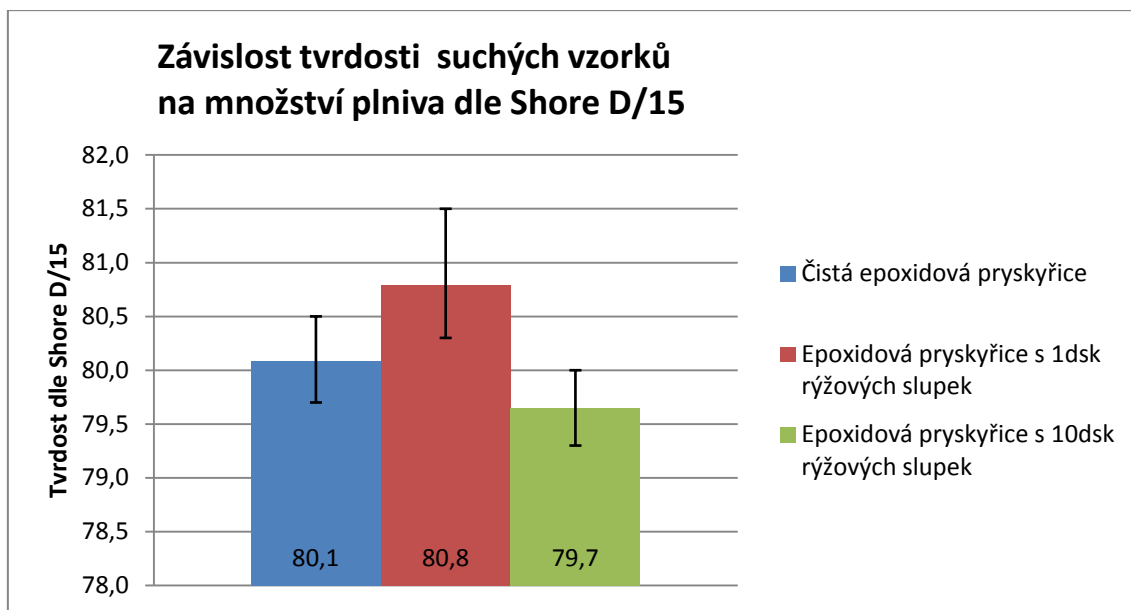
v tomto případě 50 N, indentor má tvar kužele. Tloušťka měřeného dílu musí být podle normy alespoň 6mm. Tato podmínka byla splněna navrstvením tří vzorku na sebe - viz obr. 44. Hodnota tvrdosti byla odečítána po uplynutí 15 s.



Obr. 44 Stanovení tvrdosti dle Shore D / 15 – navrstvení vzorků.

Pro zkoušku tvrdosti Shore D byly použity vzorky ve tvaru placiček o průměru 26 mm a tloušťce 2 mm. Byly hodnoceny jak vzorky čisté epoxidové pryskyřice, tak vzorky plněné, dále byla provedena měření pro vzorky suché a vzorky, které byly po určitou dobu (144 hodin) namočené ve vodě. Výsledky pro suché vzorky i vzorky nasáklé vodou jsou uvedeny v grafech na následujících obrázcích.

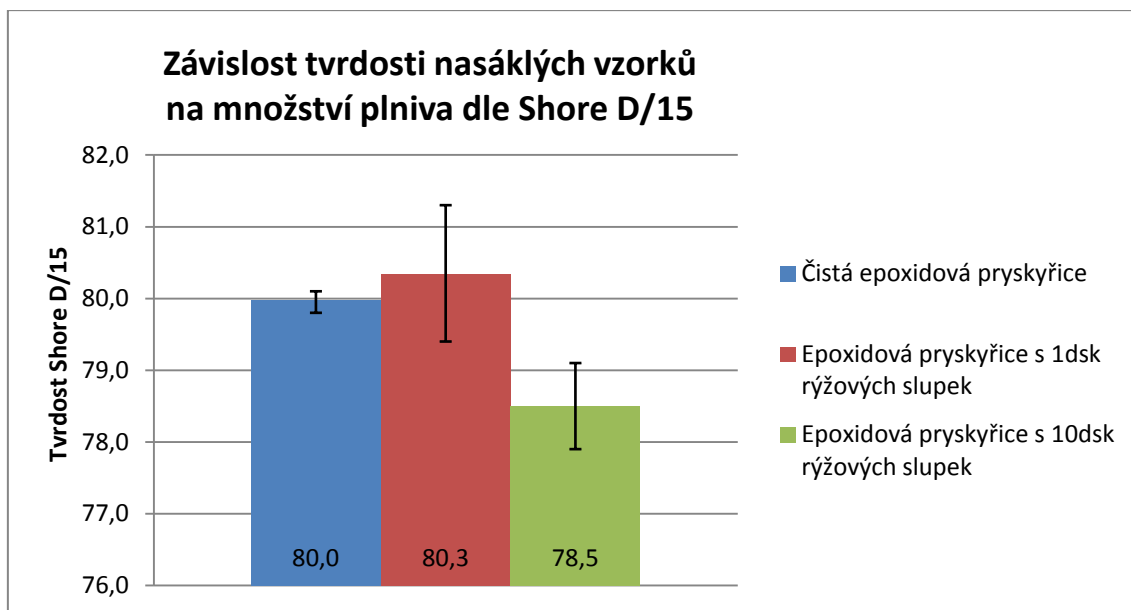




Obr. 45 Graf závislosti tvrdosti suchých vzorků na množství plniva v dsk  
– stanoveno dle Shore D/15.

Z měření tvrdosti suchých vzorků dle Shore D/15 byly zjištěny následující průměrné hodnoty: pro čistou epoxidovou pryskyřici tvrdost Shore D/15: 80,1 pro epoxidovou pryskyřici s 1 dsk plniva Shore D/15: 80,8 a pro vzorky s 10 dsk plniva Shore D/15: 79,7.

Z výsledků je vidět, že množství plniva výrazně neovlivňuje tvrdost zkušebních těles. Rozdíly v naměřených hodnotách se pohybují v desetinách procent. U zkušebních těles s 1 dsk plniva je zvýšení tvrdosti od 0,9 % oproti čisté epoxidové pryskyřici, naopak u vzorků s 10 dsk plniva je zmenšení tvrdosti od 0,5 %.



Obr. 46 Graf závislosti tvrdosti nasáklých vzorků na množství plniva v dsk – stanoveno dle Shore D/15.

Z výsledků měření vzorků ponořených po dobu 144 hodin v destilované vodě byly zjištěny následující hodnoty tvrdosti Shore D/15 (vždy se jedná o průměrné hodnoty). Pro čistou epoxidovou pryskyřici Shore D/15: 80, pro epoxidovou pryskyřici plněnou 1 dsk plniva Shore D/15: 80,3 a pro vzorky s 10 dsk plniva Shore D/15: 78,5.

Z výsledků je zřejmé, že u suchých vzorků i u vzorků, které byly ponořeny ve vodě, jsou výsledky v podobném poměru. U vzorků s 1 dsk plniva je tvrdost mírně vyšší a u vzorků s 10 dsk plniva naopak nižší. Pro přehledné srovnání tvrdostí vzorků před a po vystavení působení destilované vody jsou hodnoty včetně vyjádření v procentech uvedeny v tabulce 7.

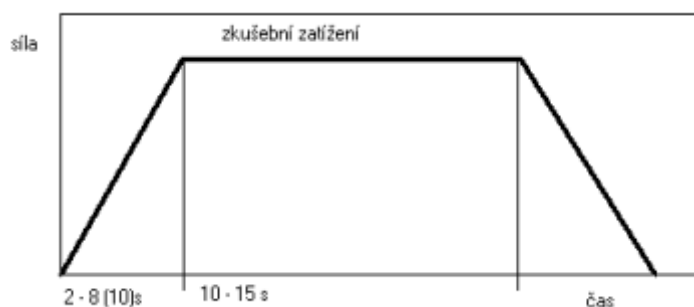
Tab. 7 Rozdíl tvrdostí Shore D/15 suchých a nasáklých vzorků.

<b>Rozdíly v tvrdosti dle Shore D/15 mezi suchými na nasáklými vzorky</b>			
Typ vzorku	Tvrdość suchých vzorků	Tvrdość nasáklých vzorků	Rozdíl [%]
Čistá epoxidová pryskyřice	80,1	80,0	0,12%
Plnění 1 dsk	80,8	80,3	0,62%
Plnění 10 dsk	79,7	78,5	1,51%

Jak je patrné z výše uvedené tabulky, rozdíly mezi suchými vzorky a vzorky vystavenými účinkům destilované vody nejsou příliš odlišné. U čisté epoxidové pryskyřice je rozdíl zanedbatelný - zmenšení tvrdosti bylo zaznamenáno pouze o 0,12%. U vzorků s plnivem je rozdíl více patrný, ačkoli není zásadní. V případě plnění 1 dsk byl rozdíl mezi tvrdostí suchého a nasáklého vzorku 0,62%, při plnění 10 dsk se tvrdost zmenšila o 1,51%. U žádného typu vzorků není změna tvrdosti významná.

### 3. 3. 6 Zkouška tvrdosti - mikrotvrdost

Pro všechny typy vzorků lišících se množstvím plniva o průměru 26 mm a tloušťce 2,6 mm byla provedena zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse. Indentorem zatlačujícím se do povrchu vzorku byl dle normy pravidelný čtyřboký jehlan s čtvercovou základnou a daným vrcholovým úhlem 136°. Pro zatížení bylo použito 0,4903 N (50 g) - označení zkoušky HV 0,05. Zkouška byla provedena při laboratorní teplotě  $23 \pm 2$  °C a relativní vlhkosti vzduchu cca 60%. Měření probíhalo dle přiloženého schématu na obr. 47.



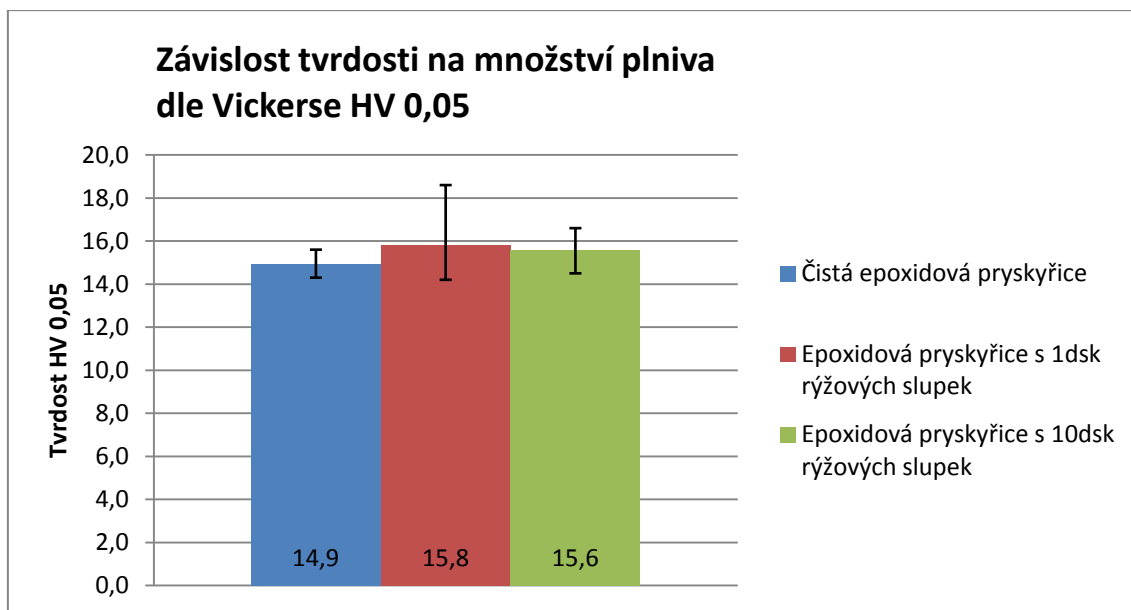
Obr. 47 Průběh zkušebního zatížení pro zkoušku mikrotvrdosti dle Vickerse.

U vtisků bylo provedeno měření úhlopříček  $d_1$  a  $d_2$  s nichž se aritmetickým průměrem vypočítala hodnota  $d$ . Následná tvrdost HV 0,05 byla vypočtena dle vztahu:

$$HV\ 0,05 = 0,1891 \frac{F}{d^2},$$

kde  $F$  je zatěžující síla (0,4903 N),  $d$  je aritmetický průměr úhlopříček.

Hodnoty tvrdosti HV 0,05 pro jednotlivé typy vzorků jsou vyjádřeny v grafu na obr. 48.



Obr. 48 Graf závislosti tvrdosti na množství plniva v dsk dle Vickerse HV 0,05

Průměrné hodnoty pro jednotlivé typy vzorků jsou: čistá epoxidová pryskyřice 14,9 HV 0,05, vzorky s 1 dsk plniva 15,8 HV 0,05 a vzorky s 10 dsk plniva 15,6 HV 0,05.

Z výsledků uvedených v grafu jsou vidět poněkud větší rozdíly v tvrdostech jednotlivých typů vzorků než při metodě měření tvrdosti dle Shore D/15, avšak ani zde nejsou rozdíly hodnot zásadní. U obou typů vzorků plněných namletými rýžovými slupkami pozorujeme zvýšení tvrdosti proti čisté epoxidové pryskyřici. U vzorků s 1dsk plniva se jedná o zvýšení mikrotvrdości o 6% v případě vzorků s 10 dsk plniva se mikrotvrdość zvýšila o 4,7%. Opět zde nemáme velké rozdíly v hodnotách tvrdosti. Lze tedy uvést, že přítomnost plniva na bázi mletých rýžových slupek nemá významný vliv na mikrotvrdość vzorků.

### 3. 3. 7 Hustota

Pro měření hustoty vzorků s různým obsahem plniva byla zvolena imerzní metoda. Tato metoda je založena na principu hydrostatických vah. Hustotu zjišťujeme z úbytkem na váze při vážení na vzduchu a v temperované kapalině. V tomto případě byl kapalinou metanol o hustotě 0,791 g/cm<sup>3</sup>.

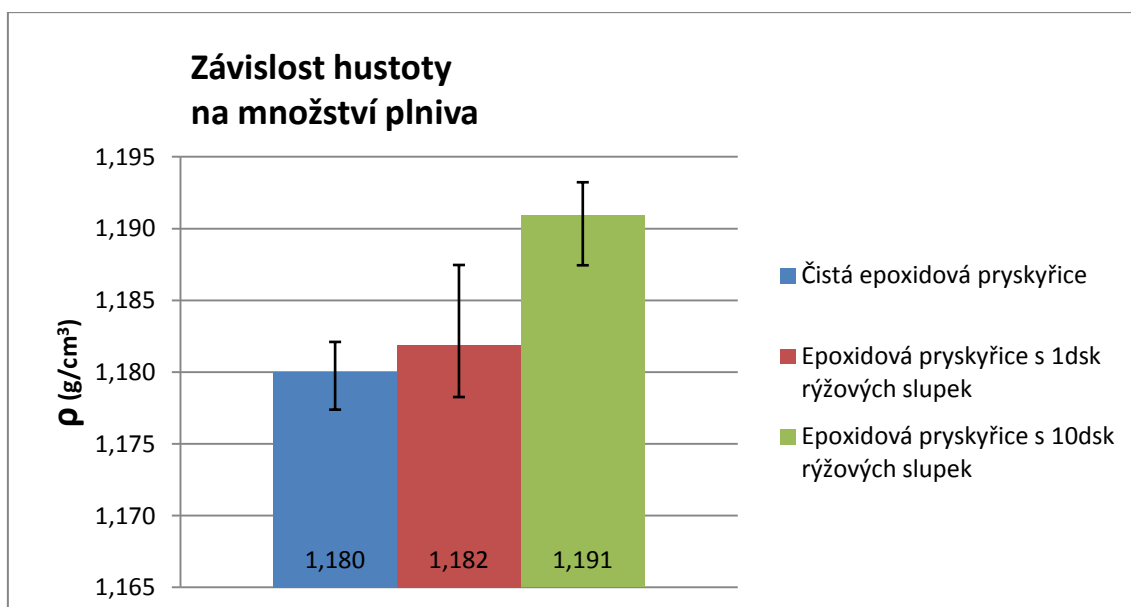
Hustota se následně vypočte dle vztahu:

$$\rho_{vz} = \frac{m_{vz} \cdot \rho_{ik}}{m_{vz} - m_{vz/ik}}$$

kde  $\rho_{vz}$  je hustota vzorku,  $m_{vz}$  hmotnost vzorku na vzduchu,  $\rho_{ik}$  hustota imerzní kapaliny a  $m_{vz/ik}$  je hmotnost vzorku v imerzní kapalině. Vypočtené hodnoty hustoty pro jednotlivé typy vzorků jsou uvedeny v grafu na obr. 50.



Obr. 49 Vážení zkušebních těles při zjišťování hustoty vzorků.



Obr. 50 Graf závislosti hustoty jednotlivých typů vzorků na množství plniva v dsk.

Z vypočtených hodnot hustot byly získány aritmetické průměry pro jednotlivé druhy vzorků: čistá epoxidová pryskyřice 1,180 g/cm<sup>3</sup>, epoxidová pryskyřice s 1 dsk plniva 1,182 g/cm<sup>3</sup> a epoxidová pryskyřice s 10 dsk plniva 1,191 g/cm<sup>3</sup>.

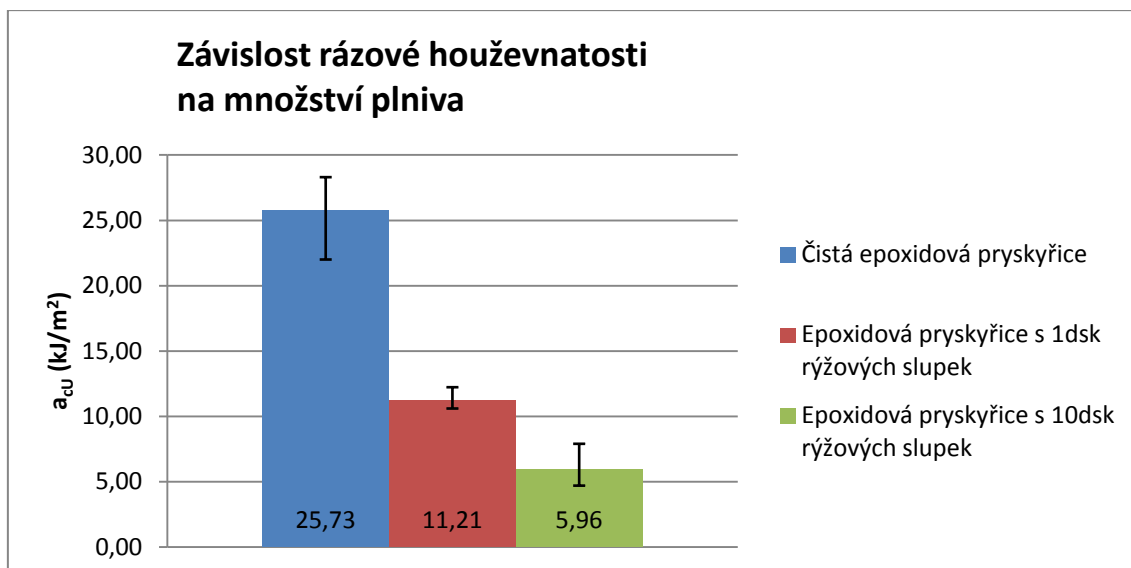
Z výsledků získaných měření a následným výpočtem je patrné, že hustota se při plnění epoxidové pryskyřice mletými rýžovými slupkami mění velmi málo a to směrem vzhůru. U vzorků s 1 dsk plniva byl rozdíl v hustotě oproti čisté epoxidové pryskyřici jen 0,2 % a u vzorků s 10 dsk byl nárůst hustoty o 0,9%.

### 3. 3. 6 Rázová houževnatost

Pro vyhodnocení rázové houževnatosti vzorků byla použita metoda CHARPY. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 179-1/1 e. Rychlost zatěžování byla nastavena na 2,9 m/s, laboratorní teplota byla 23 ± 2 °C a relativní vlhkost vzduchu cca 60%. Pro hodnocené materiály bylo určeno kyvadlo 2 J a test byl prováděn na stroji CEAST Resil 5.5 se softwarem WINMFT. Zkušební tělesa měla rozměry: délka 80 mm, šířka 10 mm a tloušťka 4 mm. Rozpětí podpěr bylo ve vzdálenosti 62 mm. Směr rázu byl veden na užší stranu, směr "e". Po provedeném testu byla odečtena hodnota spotřebované energie E<sub>c</sub>, z níž byla vypočtena rázová houževnatost pomocí vztahu:

$$a_{cU} = \frac{E_c}{b \times h} 10^3,$$

kde a<sub>cU</sub> rázová houževnatost, E<sub>c</sub> spotřebovaná energie, b šířka a h tloušťka zkušebního tělesa. Vypočítané hodnoty rázové houževnatosti a<sub>cU</sub> pro jednotlivé typy zkušebních těles jsou uvedeny v grafu na obr. 51.



Obr. 51 Graf závislosti rázové houževnatosti metodou stanovené metodou CHARPY na množství plniva v dsk.

Hodnoty rázové houževnatosti pro jednotlivé typy vzorků jsou následující: čistá epoxidová pryskyřice 25,73 kJ/m<sup>2</sup>, epoxidová pryskyřice 1 dsk plniva 11,21 kJ/m<sup>2</sup> a epoxidová pryskyřice s 10 dsk plniva 5,96 kJ/m<sup>2</sup>. Z výsledků je zřejmé, že i při malém množství plniva tohoto typu dochází ke snižování hodnot rázové houževnatosti. Při 1 dsk plniva v epoxidové pryskyřici dochází ke snížení houževnatosti o 56,5%, při 10 dsk plniva dochází ke snížení houževnatosti dokonce o 77 %.

### 3. 3. 7 Absorpce vody

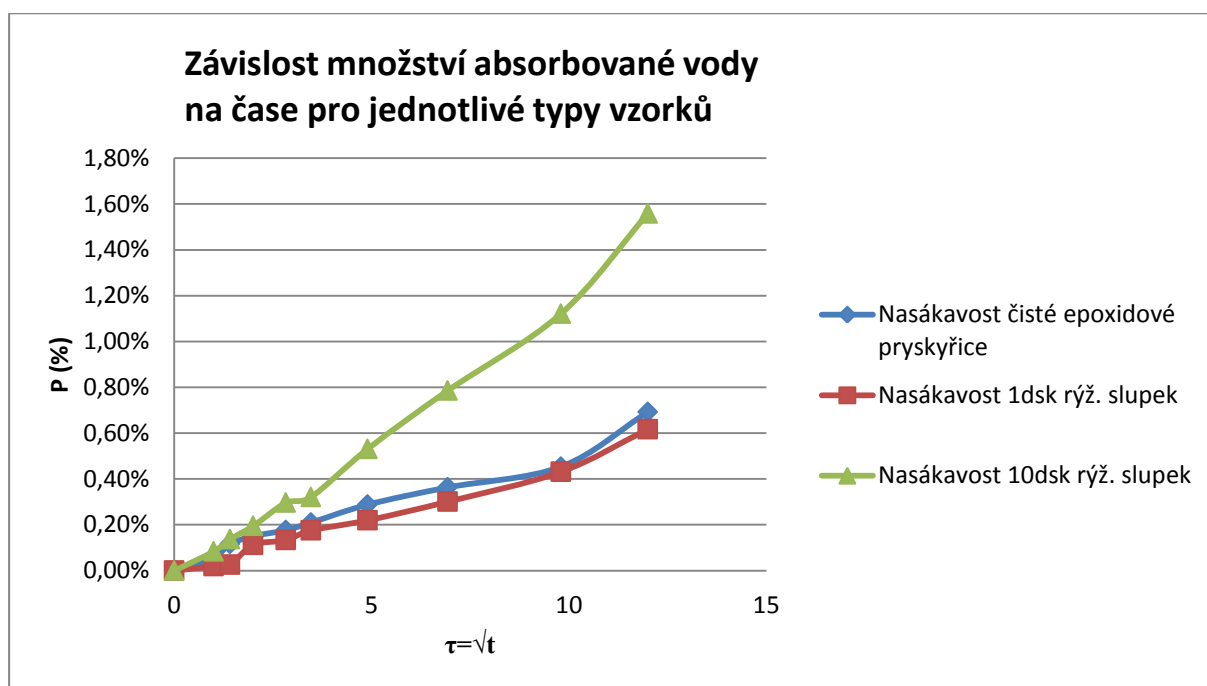
Vzorky byly podrobeny procesu, při kterém docházelo k absorpci vody jejich povrchem. Pro hodnocení nasákavosti byly použity vzorky ve tvaru placiček o průmětu 26 mm a tloušťce 2 mm, které byly ponořeny v destilované vodě o laboratorní teplotě  $23 \pm 2$  °C. Každý vzorek byl před měřením zvážen na laboratorních vahách. Po zvážení byla zkušební tělesa umístěna do Petriho misky, kde byla ponořena do destilované vody tak, aby voda obklopila daná zkušební tělesa a ta se vzájemně nedotýkala. Po určených časových intervalech byly vzorky z nádoby vyjmuty, opláchnuty technickým lihem, osušeny filtračním papírem a proudem vzduchu. Poté byly vzorky na laboratorních vahách opět zváženy a opět ponořeny do destilované vody.

Pro vzorky bylo vypočteno procento pohlcené vody  $P(t)$  pro každou dobu ponoření ( $t$ ) dle vztahu:

$$P(t) = \frac{m_{vz}(t) - m_0}{m_0} \cdot 100,$$

kde  $P(t)$  je procento pohlcené vody v určitém čas,  $m_{vz}(t)$  hmotnost vzorku v určitém čase,  $m_0$  počáteční hmotnost vzorku.

Výsledky zkoušky pro jednotlivé typy zkušebních těles jsou znázorněny v grafu na obr. 52.



Obr. 52 Graf závislosti množství absorbované vody na čase pro jednotlivé typy vzorků lišící se množstvím plniva v dsk.

Z výsledků zkoušky je zřejmé, že nasákavost vzorků pro čistou epoxidovou pryskyřici a epoxidovou pryskyřici s 1dsk plniva je prakticky stejná a rozdíly mezi hodnotami lze považovat za zanedbatelné. Při větším zastoupení plniva v epoxidové pryskyřici – 10 dsk – však dochází k výrazné absorpci vody vzorkem a je patrné, že nasákavost s časem roste výrazněji než u obou výše zmíněných typů. U epoxidové pryskyřice obsahem plniva 10 dsk vzrostla nasákavost oproti čisté epoxidové pryskyřici o 126%.



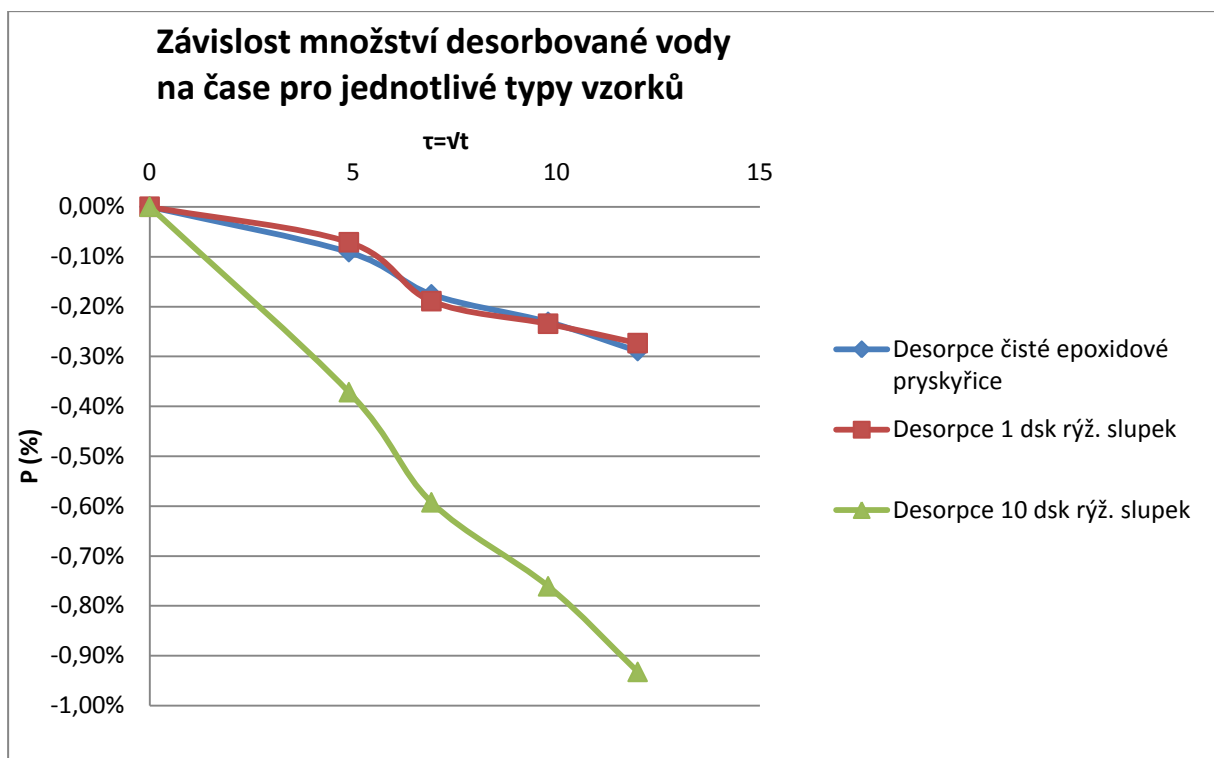
### 3. 3. 8 Desorpce vody

Pro hodnocení desorpce byly použity vzorky, které byly vystaveny působení destilované vody po dobu 144 hodin z předchozí zkoušky nasákavosti. Vzorky byly položeny na papír a byl měřen jejich hmotnostní úbytek v určitých časových intervalech. Zkouška probíhala při stálé laboratorní teplotě  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti vzduchu cca 60%. Pro vzorky bylo vypočteno procento odpařené vody  $P(t)$  pro každou dobu ponoření ( $t$ ) dle vzorce:

$$P(t) = \frac{m_{vz}(t) - m_0}{m_0} \cdot 100,$$

kde  $P(t)$  je procento pohlcené vody v určitém čas,  $m_{vz}(t)$  hmotnost vzorku v určitém čase,  $m_0$  počáteční hmotnost vzorku.

Výsledky zkoušky pro jednotlivé typy zkušebních těles jsou zaznamenány grafu na obr. 53.



Obr. 53 Graf závislosti množství desorbované vody na čase pro jednotlivé typy vzorků lišící se množstvím plniva v dsk.

Z výsledků je vidět, že desorpce vody, podobně jako absorpce vody je jak u čisté epoxidové pryskyřice, tak u epoxidové pryskyřice s množstvím plniva 1 dsk téměř totožná - rozdíly mezi nimi jsou zanedbatelné. U epoxidové pryskyřice s 10 dsk plniva je vypařování vody ze zkušebních těles významnější. U všech typů zkušebních těles bylo pozorováno, že materiály absorbovaly více vody, než se z nich následně vypařilo za dané časové období. Rozdíly mezi

nasákavostí a vypařením vody ze vzorků po uplynutí 144 hodin jsou přehledně uvedeny v následující tabulce 8.

Tab. 8 Rozdíl mezi absorpcí a desorpcí vody ze vzorků za 144 hodin.

<b>Rozdíl mezi absorpcí a desorpcí vody po 144 hodinách</b>			
Absorpce	Čistá epoxidová pryskyřice	1 dsk plniva	10 dsk plniva
Pohlčeno vody [%]	0,69%	0,62%	1,56%
Desorpce	Čistá epoxidová pryskyřice	1 dsk plniva	10 dsk plniva
Vypařeno vody [%]	-0,29%	-0,27%	-0,93%

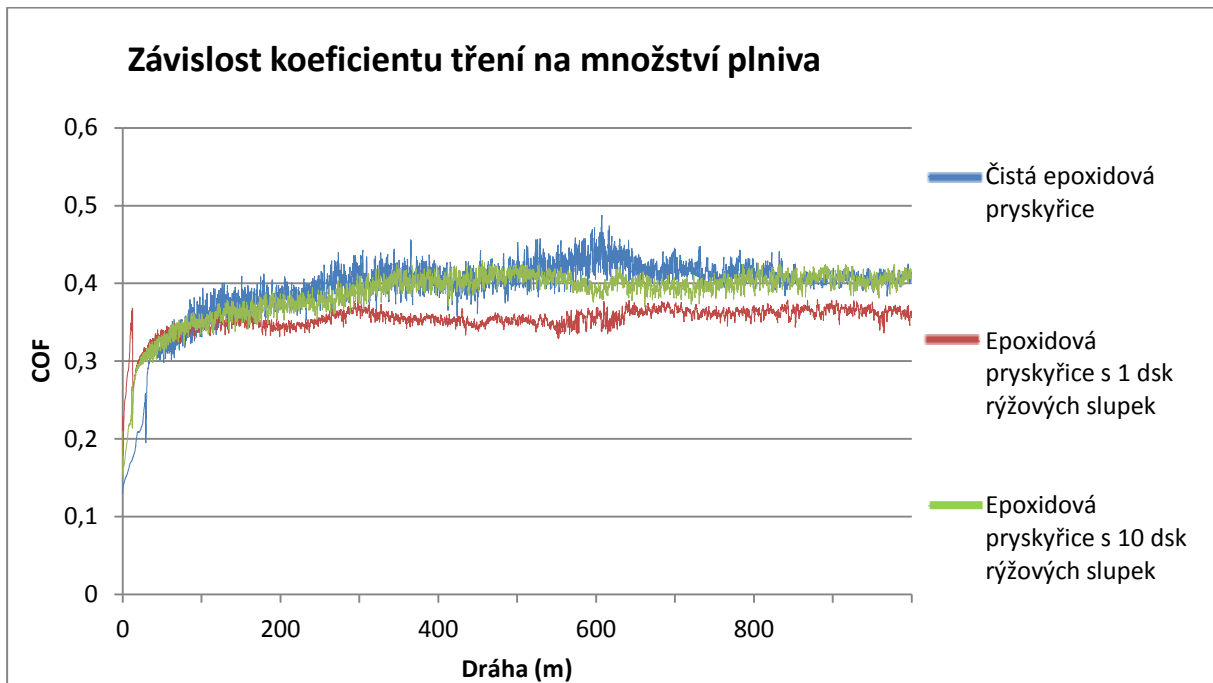
### 3. 3. 10 Tribologické chování

Na základě původních citovaných výsledků uvedených v teoretické části práce byla provedena opakovaná měření pro stejné kompozitní systémy a doplňující měření, která zahrnovala jak tribologická hodnocení vzorků s vyšším obsahem plniva na úrovni 10 dsk, tak chování organicko-anorganického plniva v přítomnosti dalších plniv v epoxidové pryskyřici – konkrétně malého množství nejběžnějších barviv dvou typů – hliníkového bronzu a titanové běloby.

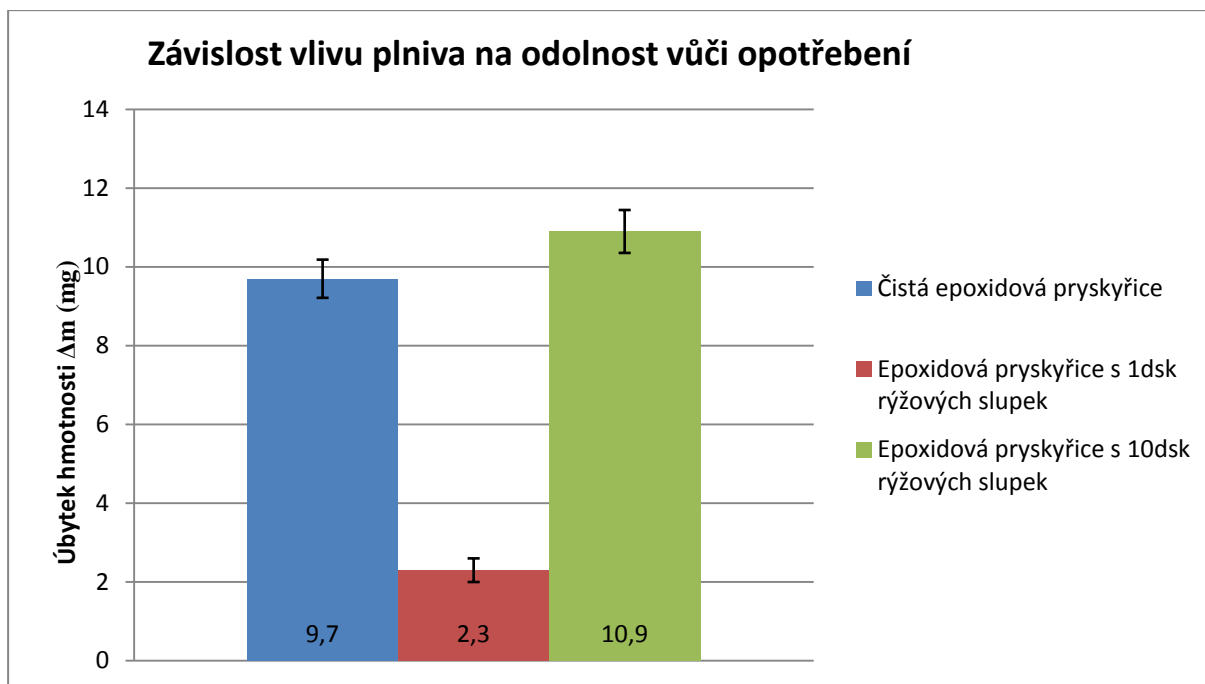
Hodnocení koeficientu tření bylo provedeno na tribometru CSM metodou měření ball-on-disc, s ocelovou kuličkou 100Cr6 (C-kolem 1%; Mn-kolem 0,3%; Si-kolem 0,25%; Cu-max 0,3%; Cr-1,6%), při zatížení 15 N, na dráze 1000 m při 20 000 cyklech, při lineární rychlosti 0,1 m/s a při běžných laboratorních podmínkách. Opotřebením hodnocených vzorků bylo určeno jako úbytek hmotnosti vzorku po tribologickém měření po 20 000 cyklech. Výsledky jsou vyneseny v grafech na následujících obrázcích 55 a 56.



Obr. 54 Tribometr CSM, pracoviště TU Lodž.



Obr. 55 Graf závislosti koeficientu tření na množství plniva v dsk za výše specifikovaných parametrů.

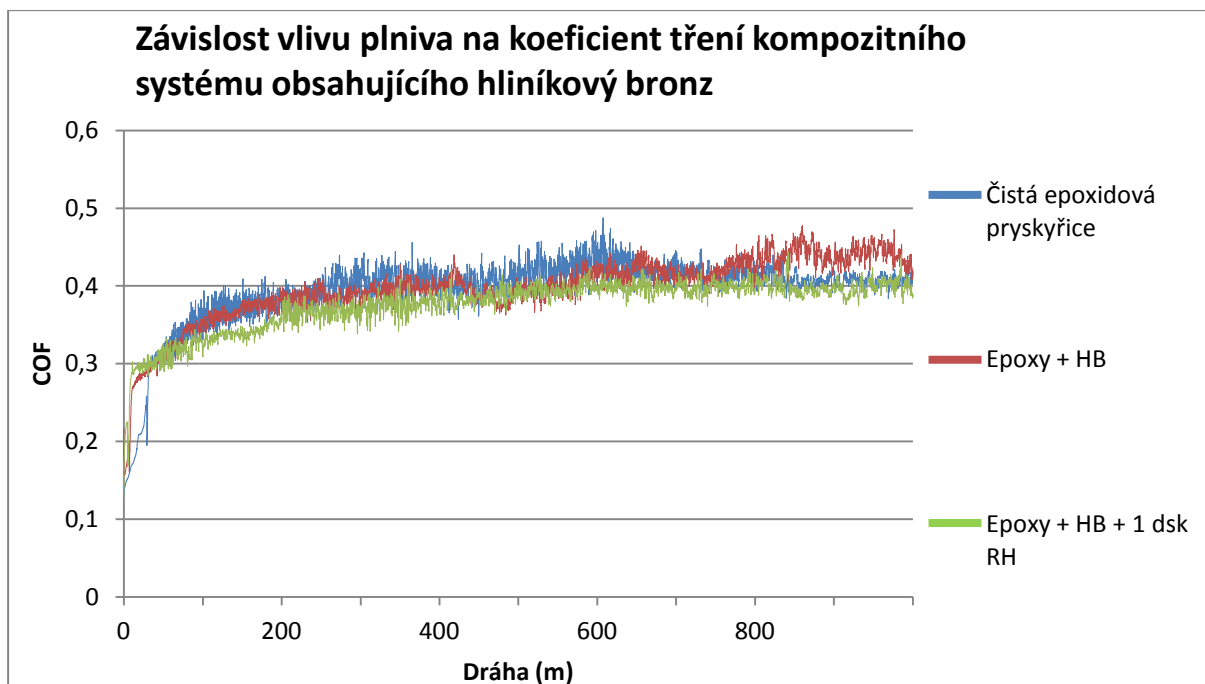


Obr. 56 Graf závislosti vlivu plniva na odolnost vůči opotřebení.

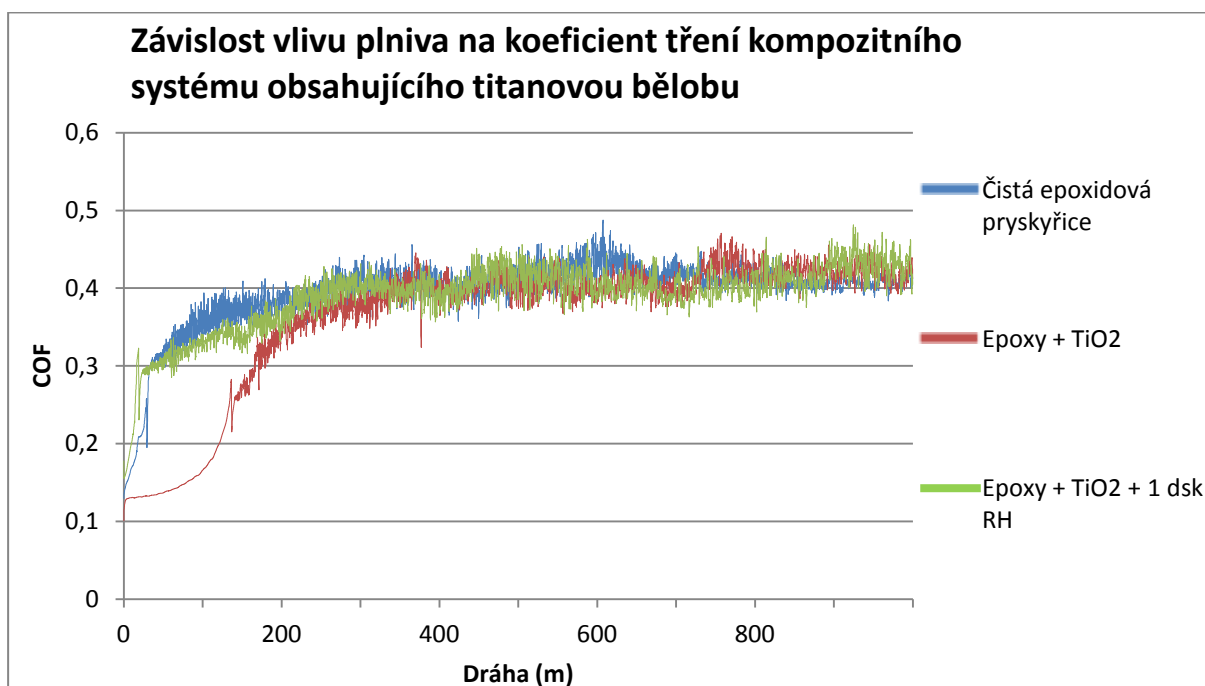
Na základě výsledků získaných tribologickým měřením a následným hodnocením úbytku hmotnosti vzorků po tribologickém měření po 20 000 cyklech bylo zjištěno, že vliv plniva je nejmarkantnější v případě plnění 1dsk, kdy snižuje koeficient tření a zároveň o 75% zvyšuje odolnost materiálu vůči opotřebení. Při plnění 10 dsk se koeficient tření oproti čisté epoxidové pryskyřici výrazně nemění, ale odolnost vůči opotřebení materiálu se snižuje.

Pro ilustraci, zda se bude chovat organicko-anorganické plnivo stejným způsobem v komplikovanějších systémech, byla provedena srovnávací měření. Do epoxidové pryskyřice byla přidána běžně používaná anorganická barviva – titanová běloba a hliníkový bronz v množství 1dsk. Byla provedena tribologická měření a stanovení úbytku hmotnosti vzorku deklarující velikost opotřebení. Bylo zjištěno, že i v případě, že epoxidová pryskyřice obsahuje další anorganické částice, chová se organicko-anorganické plnivo podobným způsobem, tedy zajišťuje snížení koeficientu tření a zvyšuje odolnost materiálu proti opotřebení – obr. 57 až 59.

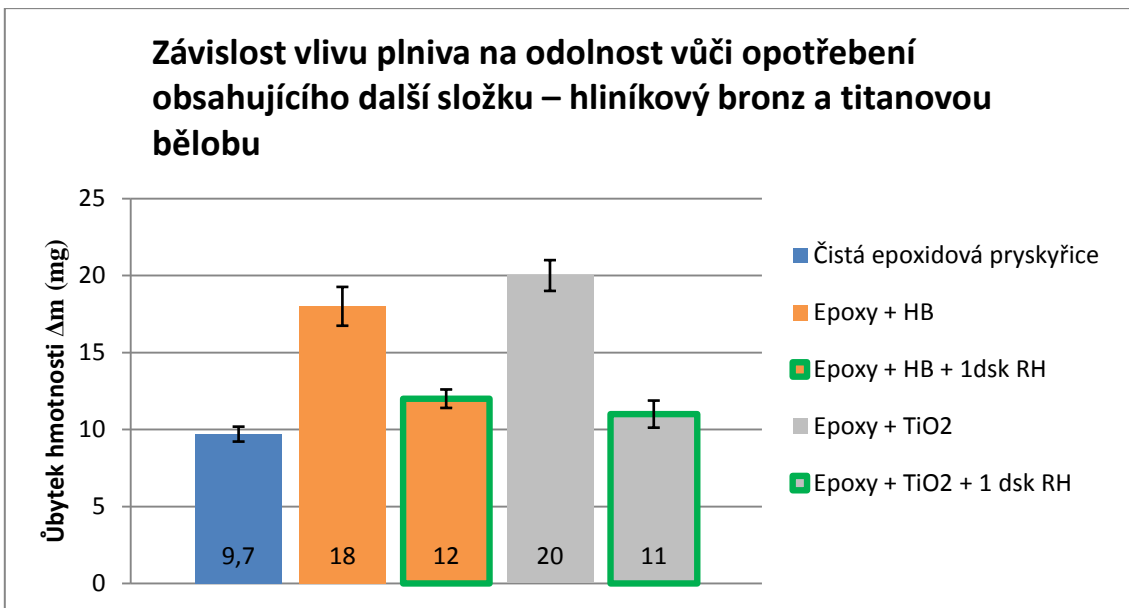
Titanová běloba měla složení 92%  $\text{TiO}_2$ , 4%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 3%  $\text{SiO}_2$ , 1%  $\text{ZrO}_2$ , agregáty částic měly kulovitý tvar o velikosti v rozmezí 20 až 100  $\mu\text{m}$ . Hliníkový prášek, často nesprávně označován jako hliníkový bronz, se využívá při barvení a při výrobě barev. Jeho složení bylo 99% Al a 1%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , tvar plniva byl šupinkovitý [37].



Obr. 57 Graf závislosti vlivu plniva na koeficient tření kompozitního systému obsahujícího další složku – hliníkový bronz.



Obr. 58 Graf závislosti vlivu plniva na koeficient tření kompozitního systému obsahujícího další složku – titanovou bělobu.



Obr. 59 Graf závislosti vlivu plniva na odolnost vůči opotřebení kompozitního systému obsahujícího další složku – hliníkový bronz a titanovou bělobu.

## 4. Diskuse výsledků

Rastrovací elektronová mikroskopie a energiově disperzní analýza byly využity ke studiu distribuce oxidu křemičitého v rýžových slupkách. Bylo zjištěno, že maximální množství oxidu křemičitého se nachází na povrchu slupek (až 24 hmotnostních %), uvnitř slupky oxid křemičitý prakticky není. Oxid křemičitý vytváří na povrchu slupky kompaktní vrstvu, která má ochrannou funkci.

Rastrovací elektronová mikroskopie byla využita také při hodnocení charakteru lomů jednotlivých typů vzorků. Lomy vzorků se liší podle množství použitého plniva, nelze však zcela jednoznačně rozlišit, zda se jedná o lom křehký nebo tvárný. Dále bylo zjištěno, že nelze identifikovat mezifázové rozhraní mezi plnivem a polymerní matricí, z čehož vyplývá, že adheze mezi částicemi namletých rýžových slupek a epoxidovou matricí je velmi dobrá.

Zkouška tahem a zkouška tlakem byly využity ke studiu základních materiálových parametrů jednotlivých typů vzorků. Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, vliv organicko-anorganického částicového plniva je v souladu s chováním částicových plniv v kompozitních systémech. Drobné odchylky mohou být vysvětleny na základě přítomnosti tvrdého anorganického plniva v organické matrici na bázi celulózy, která je navíc umístěna v křehkém polymeru – epoxidové pryskyřici.

Zkouška tvrdosti – Shore D/15 a zkouška tvrdosti – mikrotvrdość byly použity jednak jako doplňující zkoušky ke zkouškám tahem a tlakem, ale také jako rychlá metoda ke stanovení změny vlastností související s procesem absorpce vody vzorkem. S využitím obou metod bylo zjištěno, že nedochází k zásadním změnám hodnot tvrdosti, je-li do základní polymerní matrice umístěno výše popsané plnivo a to v menší či větší míře. Oběma měřicími metodami bylo zjištěno, že při plnění 1 dsk je hodnota tvrdosti nepatrně vyšší než při plnění 10 dsk. Tento rozdíl není z hlediska globálního posouzení materiálových vlastností významný, ale zasloužil by si podrobnější experimentální rozbor.

Hustota plněných typů vzorků je vyšší než hustota čisté epoxidové pryskyřice ačkoli nárůst není významný.

V případě rázové houževnatosti byl zjištěn významný vliv plniva na její změnu, respektive pokles. Vysvětlení zřejmě souvisí s přítomností částic organicko-anorganického plniva, které mohou v epoxidové matrici působit jako koncentrátoři napětí.



Zkouška nasákavosti - absorpce a desorpce vody – byla provedena s cílem posoudit vliv přítomného plniva na nasákavost vody v porovnání s nasákavostí vody neplněnou epoxidovou pryskyřicí. V případě optimálního plnění, posuzováno z hlediska tribologického chování a odolnosti vůči opotřebením materiálu, tedy 1 dsk, je vliv plniva zanedbatelný a plněná epoxidová pryskyřice s 1 dsk se chová stejně jako neplněná epoxidová pryskyřice. Při vyšším plnění – 10 dsk dochází již k patrnému procesu absorpce vody, což lze vysvětlit vyšším podílem plniva. Tento výsledek však nekoresponduje s původním tvrzením, že adheze mezi epoxidovou maticí a částicemi plniva je dobrá. Tato část experimentu však nebyla podrobněji rozpracována.

Tribologické chování – stanovení koeficientu tření a odolnost vůči opotřebením materiálu jsou nejzajímavějším experimentálním výsledkem. Při plnění 1 dsk bylo dosaženo optimální vlastností kompozitního systému. Je pravděpodobné, že použité a popsané plnivo získané z rýžových slupek s vysokým obsahem anorganické fáze a malou velikostí částic se uplatňuje v polymerním systému ze dvou hledisek. Anorganická fáze – oxid křemičitý působí jako tvrdá částice, která přispívá ke snížení koeficientu tření a zároveň ke zvýšení odolnosti vůči opotřebením. Organické fáze – celulóza, hemicelulóza a lignin, které jsou s oxidem křemičitým pevně spojeny, ale jsou proti němu měkké, nezvyšují modul pružnosti a nezvyšují tvrdost systému. Vysvětlení chování tohoto netradičního plniva je v souladu s výkladem vlivu tvrdých částic v polymeru. Tvrdé částice přenášejí část zatížení a chrání tak měkký polymer před opotřebením. Vysvětlení naměřených hodnot je v souladu s pracemi, jejichž výsledky jsou shrnuty a diskutovány v rozsáhlé publikaci věnující se tribologii polymerů [36].

V souladu s vysvětlením chování organicko-anorganického plniva v polymerních systémech lze posuzovat i chování tohoto plniva při výše uvedených mechanických zkouškách. Je nutné přihlídnout také k množství oxidu křemičitého jako tvrdé anorganické fáze, která je do polymerní matrice vnášena spolu s organickou fází na bázi celulózy a aktuálnímu hmotnostnímu poměru obou fází.

Přírodní organicko-anorganická plniva jsou dosud málo prozkoumané systémy, které by mohly najít další potenciální využití související s jejich chemickým složením.

## 5. Závěr

Zadáním diplomové práce bylo seznámit se s problematikou využití přírodních plniv v polymerních materiálech, navrhnout přípravu vzorků a zvolit vhodnou metodiku k posouzení vlivu plniva v polymerním systému, provést navržené experimenty, vyhodnotit a diskutovat výsledky a následně formulovat závěry.

Jako přírodní plnivo bylo zvoleno organicko-anorganické plnivo s vysokým podílem oxidu křemičitého, které bylo ve formě částic (maximální rozměr 100 $\mu$ m) vmícháváno do epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 520. Pro určení vlivu plniva na polymerní matrici byly navrženy vzorky tří typů – neplněná epoxidová pryskyřice, plněná epoxidová pryskyřice s obsahem plniva 1 dsk a plněná epoxidová pryskyřice s obsahem plniva 10 dsk.

Pro hodnocení chování plniva v polymerní matrici byly navrženy následující zkoušky: zkouška tahem, zkouška tlakem, zkouška tvrdosti Shore D/15, zkouška mikrotvrdosti, zkouška nasákavosti zahrnující jak absorpci, tak desorpci vody, stanovení hustoty a tribologické chování vedoucí k určení koeficientu tření a odolnosti materiálu vůči opotřebení.

Na základě provedených experimentů a vyhodnocených měření byly zformulovány následující závěry týkající se charakterizace organicko-anorganického plniva a jeho chování v epoxidové pryskyřici:

- 1) Rýžové slupky, jako potenciálně technicky využitelné organicko-anorganické plnivo, vykazují nerovnoměrnou distribuci oxidu křemičitého. Nejvyšší zastoupení oxidu stanovené na základě SEM a EDX analýzy je na povrchu slupky (cca 24 hmotn. %), uvnitř slupky se oxid křemičitý prakticky nenachází.
- 2) Přítomnost plniva výrazně ovlivňuje mez pevnosti v tahu epoxidové pryskyřice. Při 1 dsk dochází k poklesu meze pevnosti v tahu o 34% oproti čisté epoxidové pryskyřici a při 10 dsk je rozdíl 45%. Toto plnivo se chová jako standardní částicové plnivo v polymerním kompozitním systému.

V případě modulu pružnosti v tahu při plnění 1 dsk dochází k mírnému nárůstu hodnot cca o 10%, při 10 dsk plniva je však patrný pokles oproti čisté epoxidové pryskyřici o 9%.

Na základě SEM analýzy nebyla v případě plněných vzorků nalezena místa, kde by bylo patrné rozhraní fází plniva a pojiva. Z toho lze usuzovat na velmi dobrou adhezi mezi plnivem a epoxidovou matricí.

- 3) Přítomnost plniva výrazně neovlivňuje mez pevnosti v tlaku epoxidové pryskyřice. Při 1 dsk dochází k poklesu meze pevnosti v tlaku o 2,8% oproti čisté epoxidové pryskyřici a při 10 dsk je rozdíl 12%. V případě modulu pružnosti v tlaku dochází v případě přítomnosti 1 dsk plniva k jeho poklesu o 8,8%, v případě přítomnosti 10 dsk plniva v epoxidové matici je naopak patrné mírné zvýšení modulu pružnosti a to o 1%.
- 4) Množství plniva výrazně neovlivňuje tvrdost zkušebních těles stanovených dle Shore D/15. Rozdíly v naměřených hodnotách se pohybují v desetinách procent.
- 5) V případě měření mikrotvrdosti podle Vickerse jsou vidět poněkud větší rozdíly v hodnotách tvrdostí jednotlivých typů vzorků než při metodě měření tvrdosti dle Shore D/15, avšak ani zde nejsou rozdíly hodnot zásadní.
- 6) Hustota se při plnění epoxidové pryskyřice mletými rýžovými slupkami mění velmi málo a to směrem vzhůru. U vzorků s 1 dsk plniva byl rozdíl v hustotě oproti čisté epoxidové pryskyřici jen 0,2 % a u vzorků s 10 dsk byl nárůst hustoty o 0,9%.
- 7) Při přítomnosti plniva tohoto typu dochází ke snižování hodnot rázové houževnatosti. Při 1 dsk plniva v epoxidové pryskyřici dochází ke snížení houževnatosti o 56,5%, při 10 dsk plniva dochází ke snížení houževnatosti dokonce o 77 %.
- 8) Z výsledků zkoušky je zřejmé, že nasákavost vzorků pro čistou epoxidovou pryskyřici a epoxidovou pryskyřici s 1 dsk plniva je prakticky stejná a rozdíly mezi hodnotami lze považovat za zanedbatelné. Při větším zastoupení plniva v epoxidové pryskyřici – 10 dsk – však dochází k výrazné absorpci vody vzorkem a je patrné, že nasákavost s časem roste výrazněji než u obou výše zmíněných typů.
- 9) Desorpce vody, podobně jako absorpce vody je jak u čisté epoxidové pryskyřice, tak u epoxidové pryskyřice s množstvím plniva 1 dsk téměř totožná. U epoxidové pryskyřice s 10 dsk plniva je vypařování vody ze zkušebních těles významnější. U všech typů zkušebních těles bylo pozorováno, že materiály absorbovaly více vody, než se z nich následně vypařilo za dané časové období.
- 10) Přítomnost plniva v případě 1 dsk snižuje mírně koeficient tření a o 75% zvyšuje odolnost vůči opotřebení materiálu. Tuto hodnotu plnění je možné považovat za optimální, nižší ani vyšší hodnoty plnění takové výsledky nedávají. V případě, že epoxidová pryskyřice obsahuje další anorganické částice, chová se organicko-anorganické plnivo podobným způsobem jako v čisté pryskyřici - zajišťuje snížení koeficientu tření a zvyšuje odolnost materiálu proti opotřebení.

Přínos práce:

Organicko-anorganická plniva jsou dosud málo používaným typem plniv. V případě použitého surovinového zdroje, kterým byly rýžové slupky, se jedná o celosvětově největší zemědělský odpad, který dosud nenalezl praktického využití.

Organicko-anorganické plnivo z mletých rýžových slupek poskytuje původnímu polymernímu materiálu – použité epoxidové pryskyřici výhodu v tom, že zvyšuje významnou měrou odolnost vůči opotřebení. Zvýšení odolnosti vůči opotřebení zprostředkované přítomností částic plniva je doloženo i v případě, že je původní materiál probarven anorganickými pigmenty.

Přítomností malého množství plniva – 1dsk, které je v případě této materiálové kombinace považováno za optimální, zásadním způsobem nemění materiálové vlastnosti epoxidové pryskyřice, které byly původně navrženy výrobcem pryskyřice.

Přítomností plniva na úrovni 1 dsk, které je na základě experimentů považováno za optimální množství, nedochází ke zvýšení nasákavosti kompozitního systému v porovnání s nasákavostí neplněné epoxidové pryskyřice.

## 6. Literatura

- [1] BAREŠ, Antonín. *Kompozitní materiály*. 1. vydání Praha: Nakladatelství technické literatury, 1988. 325s.
- [2] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. 1. vydání Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. 114s. ISBN 978-80.7372-279-1.
- [3] NELEŠOVSKÝ, Tomáš. *Výzkum a hodnocení hořlavosti plněných kompozitních systémů*: [Diplomová práce]. Zlín: Universita Tomáše Bati ve Zlíně, 2014. 113s.
- [4] EHRENSTEIN, W. G. *Polymerní kompozitní materiály*. 1 vydání. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Definice a historie kompozitů* [online]. [cit. 9.3.2015]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [6] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. 1. vydání. Brno: Technický dozorčí spolek BRno - Sekce materiálů a svařování, 2003. 81s. ISBN 80-903386-0-7.
- [7] STRONG, A. B. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications*. USA: Society of Manufacturing Engineers, 2008. 625s. ISBN 0-87263-854-5.
- [8] MUKHOPADHYAY, M. *Mechanics of Composite Materials and Structures*. India: universities Press Private limited, 2004. 369s. ISBN 81-7371-477-0.
- [9] *Technologie II - tváření kovů, -zpracování plastů*. [online]. [cit. 9.3.2015]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm)
- [10] KREBS, Josef. *Teorie zpracování nekovových materiálů část I. Zpracování plastů*. 1. vydání. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1991. 250s. ISBN 80-7083-074-3.
- [11] LAŠTOVKA, Jakub. *Kompozitní materiály s plnivý na bázi polyanilinu: [Diplomová práce]*. Plzeň: Západočeská universita v Plzni, 2013. 60s.
- [12] CAMPBELL, F. *Structural composite materials*. 2 vydání. Ohio: ASM International, 2010. 612s. ISBN 16-150-3037-9.

- [13] JANČÁR, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství kompozitů*. 1. vydání. Brno: VUT, 2003. 194s. ISBN 05-213-8855-4.
- [14] HULL, D., CLYNE, T. W. *An introduction to composite materials*. 2. vydání. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 426s. ISBN 05-213-8855-4.
- [15] XANTHOS, Marino. *Functional fillers for plastics*. 2. vydání. Weinheim : Wiley-VCH, 2010. 507s. ISBN 978-527-32361-6.
- [16] TOLINSKI, Michael. *Additives for polyolefins > getting the most out of polypropylene, polyethylene and TPO*. 1. vydání. Oxford: William Andrew, 2009. 278s. ISBN 978-0-8155-2051-1.
- [17] CHOVANEC, Tomáš. *Srovnání aktivního a neaktivního plniva a jeho vliv na výsledné vlastnosti isotaktického polybutenu: [Diplomová práce]*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013. 90s.
- [18] JANOVEC, J., CEJP, J., STEIDL, J. *Perspektivní materiály*. 3. vydání. Praha: České vysoké učení technické, 2008. 143s. ISBN 20090422.
- [19] REYNE, M., MUTEL, P. *Flax and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry*. 1. vydání. Paris: JEX, 2012. ISBN 978-2-95262776-1-0.
- [20] HAHN, F. *Kompozity na bázi přírodních vláken: [Diplomová práce]*. Brno: VUT, 2013. 67s.
- [21] KALIA, S., KAITH, B. S., KAUR, I. *Cellulose fibers: bio- and nano-polymer composites*. New York: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-17369-1.
- [22] KROISOVÁ, Dora. *Kompozitní materiály II. [Přednáška]*. Liberec: TU v Liberci, 2014.
- [23] HYNČOVÁ, J., KOVAČIČ, V., STANĚK, J. *Nauka o textilních materiálech*. 1. vydání. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1986. 212s.
- [24] ROKOS, D. *Výzkum polymerních kompozitů vyztužených přírodními vlákny: [Bakalářská práce]*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2014. 97s.
- [25] Juta - Wikipedie. [online]. [cit.2013-01-08]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Juta>

- [26] MUSSIG, J. *Industrial application of natural fibres: structure, properties, and technical applications*. Wiley, 2010, 538S. ISBN 978-047-0695-081.
- [27] Rostlinná textilní vlákna - Wikipedie. [online]. [cit.2013-01-08]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Rostlinn%C3%A1\\_textiln%C3%AD\\_vl%C3%A1kna](http://cs.wikipedia.org/wiki/Rostlinn%C3%A1_textiln%C3%AD_vl%C3%A1kna)
- [28] WALLENBERGER, F., T., WESTON, N., E. *Natural Fibers, Plastics and Composites*. 1. vydání. USA: Kluwer Academic Publishers, 2004. 370s. ISBN 1-4020-7643-6.
- [29] Co je to bambus? [online]. [cit.2013-01-08]. Dostupné z: <http://www.bambusy.cz/>
- [30] MILITKÝ, J. *Textilní vlákna - Klasická a speciální*. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002. 238s. ISBN 80-7083-644-X
- [31] CHS-EPOXY 520 DATASHEET. [online]. [cit.2013-01-08]. Dostupné z: <http://www.spolchemie.cz/eDoc/dts/F8670A93-FAC8-4264-905F-46BBBFF247ED.pdf>
- [32] *Rýže setá*. [online]. [cit. 2011-12-20]. Dostupné z: <http://vodni-bahenni.atlasrostlin.cz/ryze-seta>
- [33] *Materiálový list- CHS-EPOXY 520 plněná organicko-anorganickým plnivem*. [online]. [cit.2013-01-08]. Dostupné z: [http://exi.tul.cz/projekty-vav/Preseed\\_ENVITECH.html](http://exi.tul.cz/projekty-vav/Preseed_ENVITECH.html)
- [34] EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. *Ann of App Biol*. 2009. 155:155-160
- [35] KROISOVÁ, D., ADACH, K., FIJALKOWSKI, M. *Natural Organic - Inorganic Material Utilized as a Filler in Polymer Systems* In: NANOCON Conference Proceedings, 5<sup>th</sup> – 7<sup>th</sup> 2014, Brno, Czech Republic, Tanger Ltd. ISBN 978-80-87294-55-0
- [36] SINHA, S. K., BRISCOE, B. J. *Polymer Tribology*. London: Imperial College Press, 2009.
- [37] KROISOVÁ, DORA. *Vnitřní tlumení v kompozitních materiálech. [kvalifikační práce]*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. 116s.