**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**
**FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ**

# WOOD-PLASTIC COMPOSITE S PŘÍDAVKEM ČÁSTIC ZE STONKŮ ŘEPKY OZIMÉ A JEHO FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

**2019** **Bc. Mikuláš KLAS**

ČESKÁ ZEMĚDELSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

# WOOD-PLASTIC COMPOSITE S PŘÍDAVKEM ČÁSTIC ZE STONKŮ ŘEPKY OZIMÉ A JEHO FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

| | |
|---|---|
| Studijní program: | Dřevařské inženýrství |
| Pracoviště: | Katedra zpracování dřeva a biomateriálů |
| Vedoucí diplomové práce: | Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D. |
| Konzultant diplomové práce: | doc. Ing. Milan Gaff, PhD. |

Praha 2019

**Bc. Mikuláš KLAS**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Mikuláš Klas

Dřevařské inženýrství

Název práce

**Wood-plastic composite s přídavkem částic ze stonků řepky ozimé a jeho fyzikální vlastnosti**

Název anglicky

**Wood-plastic composite filled by particles from rapeseed stems and his physical properties**

---

**Cíle práce**

Cílem práce je stanovení vlivu přídavku částic ze stonků řepky ozimé do dřevoplastových kompozitních materiálů na fyzikální vlastnosti tohoto materiálu.

**Metodika**

Student formuluje teoretická východiska na základě studia odborné literatury a komparace výsledků jednotlivých autorů, kteří se věnují problematice výroby WPC z alternativních surovin. V praktické části budou testovány fyzikální vlastnosti dřevoplastových kompozitních materiálů a výsledky budou vyhodnoceny pomocí statistických metod.

**Doporučený rozsah práce**

60 – 80 stran

**Klíčová slova**

dřevoplast, řepka ozimá, WPC, fyzikální vlastnosti, kompozitní materiál

---

**Doporučené zdroje informací**


BERGLAND, L. a ROWELL, R.M., 2005. Wood Composites, Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton, Fla.: CRC Press, s. 279-303. ISBN 08-493-1588-3

BLEDZKI, A.K., M. LETMAN, A. VIKSNE a L. RENCE, 2005, A comparison of compounding processes and wood type for wood fibre—PP composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. roč. 36, č. 6, s. 789-797.

DICKER, M.P.M., DUCKWORTH, P.F., BAKER, A.B, FRANCOIS, G., HAZZARD, M.K. a WEAVER, P.M. 2014, Green composites: A review of material attributes and complementary applications. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, roč. 56, s. 280-289.

FRIHART, CH. 2005, Wood adhesion and adhesives, Habook of wood chemistry a wood composites. Boca Raton, Fla.: CRC Press, s. 215-279. ISBN 0-8493-1588-3.

GAJDAČOVÁ, P., HÝSEK, Š., a JARSKÝ V. 2018, Utilisation of winter rapeseed in wood-based materials as a solution of wood shortage and forest protection, BioResources, roč. 13, č. 2, s. 2546-2561.

HUANG, L., XIA, P., LIU, Y., FU, Y., JIANG, Y., LIU, S. a WANG, X. 2016, Production of biodegradable board using rape straw and analysis of mechanical properties, BioResources, roč. 11, č. 1, s. 772-785.

KLÍMEK, P., a WIMMER, R. 2017, Alternative Raw Materials for Bio-Based Composites, in: International Conference Wood Science and Engineering in the Third Millennium, Brasov.

MAHLBERG, R., NIEMI, H.E.-., DENES, F.S. a ROWELL, R.M. 1999, Application of AFM on the adhesion studies of oxygen-plasma-treated polypropylene and lignocellulosics, Langmuir, roč. 15, č. 8, s. 2985-2992.


---

**Předběžný termín obhajoby**

2018/19 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Konzultant**

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2019

**doc. Ing. Milan Gaff, PhD.**

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 13. 3. 2019

**prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.**

Děkan

V Praze dne 22. 03. 2019

## Poděkování

Rád bych své poděkování věnoval všem, kteří svými radami a připomínkami přispěli k realizaci této diplomové práce. Především bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. et Ing. Štěpánu Hýskovi, Ph.D. za velmi vstřícné a ochotné jednání při vedení práce, za jeho kvalitní a podnětné rady, a také za rychlost, jakou probíhala komunikace mezi námi. Dále bych chtěl poděkovat konzultantu práce doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD., který byl taktéž svými připomínkami a radami velmi cenným pomocníkem a nedílnou částí podpořil vznik této práce. V neposlední řadě patří mé velké díky rodičům za podporu.

**Abstrakt ve státním jazyce**

Práce se věnuje zkoumání fyzikálních vlastností WPC materiálu ze stonků řepky ozimé. Z hlediska fyzikálních vlastností byly zkoumány lesk, smáčivost, drsnost a bobtnání. Hlavním cílem je definovat vhodnost a efektivnost náhrady dřevní složky WPC materiálů jiným lignocelulózovým materiálem, v tomto případě stonky řepky ozimé. Dalším cílem je vytvoření literární rešerše pro lepší obeznámení se s danou problematikou. V té jsou zpracovány jak obecné informace o kompozitních materiálech, tak specifické informace zaměřující se na dřevoplastové materiály. Součástí rešerše je popis vlastností a jednotlivých složek dřevoplastových materiálů a popis výrobního procesu. Práce pokračuje charakteristikou metodiky práce a metod zkoumání. Následují výsledky, které jsou statisticky vyhodnoceny jak pomocí popisné statistiky, tak i pomocí analýzy rozptylu a post-hoc testů, a diskuse. V závěru se práce věnuje nejen shrnutí výsledků, ale je zde akcentováno i ekologické hledisko celého procesu, konkrétně využití odpadního materiálu, který vzniká při sklizni řepky ozimé, při výrobě WPC materiálu.

**Abstrakt v cizím jazyce**

The thesis is devoted to research of physical properties of WPC material made from stems of winter oilseed rape. Gloss, wettability, roughness and swelling are the physical properties that have been examined during the research. The main objective is to define the suitability and effectiveness of replacing the wood component of WPC with other lignocellulosic material, in this case with stems of winter oilseed rape. Another objective is to create a literature research for better understanding of the issue. It contains general information about composite materials and specific information focused on wood-plastic materials. Further it contains a description of properties of wood-plastic material, information about individual parts of wood-plastic materials and a description of the manufacturing process. The thesis continues with the characteristics of the work methodology and methods of research. The next are results, that are statistically evaluated using both descriptive statistics and variance analysis together with post-hoc tests, and discussion. In conclusion, the thesis is focused not only to the summary of the results, but also to the ecological aspect of the whole process, exactly

the use of waste material that arises during the winter oilseed rape harvest in the production of WPC material.

# Obsah

**Obsah** ..... **7**
**Seznam ilustrací** ..... **8**
**Seznam tabulek** ..... **10**
**Seznam zkratek a značek** ..... **11**
**Úvod** ..... **12**
**1 Cíl práce** ..... **14**
**2 Současný stav řešené problematiky doma a v zahraničí** ..... **15**
2.1 Kompozitní materiály ..... 15
2.1.1 Rozdělení kompozitu ..... 17
2.2 Dřevoplastové kompozity ..... 18
2.2.1 Vlastnosti ..... 20
2.2.2 Složky dřevoplastových materiálů ..... 23
2.3 Výrobní proces WPC ..... 36
2.3.1 Homogenizace ..... 37
2.3.2 Extruze do forem ..... 38
2.3.3 Vstřikování ..... 42
2.3.4 Profilace desek ..... 44
**3 Metodika práce a metody zkoumání** ..... **46**
3.1 Příprava vzorků ..... 46
3.2 Měření lesku a povrchová smáčivost ..... 48
3.3 Měření drsnosti ..... 49
3.4 Měření bobtnání ..... 50
3.5 Statistické zpracování dat ..... 51
**4 Výsledky práce a diskuse** ..... **53**
4.1 Výsledky lesku a smáčivosti povrchu ..... 53
4.2 Výsledky drsnosti ..... 55
4.3 Výsledky bobtnání ..... 58
**Závěr** ..... **64**
**Seznam použité literatury** ..... **66**
**Seznam příloh** ..... **70**
**Přílohy** ..... **71**

# Seznam ilustrací

Obr. 1: Synergické chování složek kompozitu [1] ..... 15
Obr. 2: Porovnání tahových diagramů křehké matrice a kompozitu složeného z této matrice a křehkých keramických vláken [1] ..... 16
Obr. 3: Jevy na rozhraní matrice a výztuže při porušování kompozitu [1] ..... 16
Obr. 4: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru výztuže [1] ..... 17
Obr. 5: Vylehčený podlahový dílec WPC s protiskluzovou úpravou [2] ..... 18
Obr. 6: Teplota rozkladu WPC materiálu [3] ..... 19
Obr. 7: Vliv vlhkosti na modul pružnosti v tahu Kompozity PVC/piliny [6] ..... 22
Obr. 8: Vliv vlhkosti na rázovou Kompozity PVC/piliny [6] ..... 22
Obr. 9: Dřevní moučka [21] ..... 24
Obr. 10: Dřevní vlákno [22] ..... 25
Obr. 11: Polyethylen [12] ..... 26
Obr. 12: Polypropylén [12] ..... 27
Obr. 13: Polystyren [5] ..... 27
Obr. 14: Polyethylentereftalát [5] ..... 28
Obr. 15: PVC [5] ..... 29
Obr. 16: Řepka ozimá [23] ..... 30
Obr. 17: Schéma výrobního procesu za použití extruderu [4] ..... 39
Obr. 18: Geometrie běžného šroubu extruderu [4] ..... 39
Obr. 19: Dvoušnekové elementy [3] ..... 40
Obr. 20: Dvoušnekový extruder [3] ..... 41
Obr. 21: Schéma možností umístění a pohybu při použití dvojice šroubů [4] ..... 41
Obr. 22: Planetární extruder [3] ..... 42
Obr. 23: Schéma pro in-line složení výrobní linky pro vstřikování [11] ..... 44
Obr. 24: Ukázka vzorků pro měření lesku, drsnosti a smáčivost ..... 47
Obr. 25: Ukázka měření lesku ..... 48
Obr. 26: Goniometr Krüss DSA 30E ..... 49
Obr. 27: Měření drsnosti povrchu – parametr Ra [20] ..... 50
Obr. 28: Drsnoměr Form Talysurf Series Intra 2 ..... 50
Obr. 29: Nástroje použité pro měření rozměrů a hmotnosti ..... 51
Obr. 30: Sušička Memmert ..... 51
Obr. 31: Naměřené hodnoty pro lesk v % ..... 54
Obr. 32: Naměřené hodnoty pro lesk v ° ..... 54
Obr. 33: Naměřené hodnoty pro střední aritmetickou odchylku profilu ..... 56

Obr. 34: Naměřené hodnoty pro průměrnou vzdálenost prvků profilu ..... 57
Obr. 35: Naměřené hodnoty pro nejvyšší výšku profilu..... 57
Obr. 36: Přírůstek tloušťky v mm..... 59
Obr. 37: Přírůstek šířky v mm ..... 59
Obr. 38: Přírůstek délky v mm..... 60
Obr. 39: Přírůstek hmotnosti v g..... 60
Obr. 40: Přírůstek objemu v $mm^3$ ..... 61
Obr. 41: Přírůstek hustoty v $g/mm^3$ ..... 61
Obr. 42: Přírůstek vlhkosti v % ..... 62

# Seznam tabulek

Tab. 1: Identifikace vzorků I..... 46
Tab. 2: Identifikace vzorků II..... 46
Tab. 3: Naměřené hodnoty lesk a kontaktní úhel..... 53
Tab. 4: Naměřené hodnoty pro drsnost..... 55
Tab. 5: Naměřené přírůstky všech zkoumaných materiálů..... 58

# Seznam zkratek a značek

| | |
|---|---|
| WPC | **w**ood-**p**lastic **c**omposite |
| $Al_2O_3$ | **oxid hlinitý** |
| SiC | **karbid křemíku** |
| MMCs | **m**etal **m**atrix **c**omposites |
| PMCs | **p**olymer **m**atrix **c**omposites |
| CMCs | **c**eramic **m**atrix **c**omposites |
| UV | **u**ltra**v**iolet, ultrafialové záření |
| PVC | **p**oly**v**inyl**c**hlorid |
| PE | **p**oly**e**thylen |
| PP | **p**oly**p**ropylen |
| PS | **p**oly**s**tyren |
| ABS | **a**krylonitril**b**utadien-**s**tyren |
| PA | **polyamidová vlákna** |
| PU | **p**oly**u**retan |
| PS | **p**oly**s**tyren |
| PTFE | **p**oly**t**etra**f**luor**e**thylen |
| PET | **p**oly**e**thylen**t**ereftalát |
| E | **modul pružnosti (MPa)** |
| DEHP | **Bis(2-ethylhexyl)-ftalát** |
| $CO_2$ | **oxid uhličitý** |
| VOC | **v**olatile **o**rganic **c**ompound; těkavá organická látka |
| UF | **močovinoformaldehyd** |
| MDF | **m**edium-**d**ensity **f**ibreboard; polotvrdá dřevovláknitá deska |
| $CaCO_3$ | **uhličitan vápenatý** |
| Ra | **průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti** |
| RSm | **vzdálenost prvků profilu drsnosti** |
| Rz | **největší výška profilu drsnosti** |

# Úvod

Těžko si dnes dokážeme představit život bez přítomnosti plastů. Potkáváme se s nimi každý den a v různých podobách. Výhodou plastů jsou dobré fyzikální vlastnosti, díky kterým postupně nahrazují méně odolné materiály. Jejich nevýhoda spočívá v tom, že se neřadí mezi obnovitelný materiál, někdy je nelze znovu recyklovat a občas bývají i zdravotně závadné. Přesto rozsah jejich využití každým rokem stoupá a současná celosvětová spotřeba plastů činí přibližně 300 milionů tun za rok. Až 20 % plastů z tohoto množství je využíváno ve stavebnictví.

Dřevo je odjakživa velice těsně spjato s lidskou civilizací. Již tisíce let patří mezi základní materiály, které lidstvo využívá pro své potřeby. Teprve v průběhu posledních staletí začala jeho role v důsledku technického pokroku lehce upadat a dřevo se v civilizačně vyspělých oblastech postupně dostávalo do pozadí. Jelikož se jedná o přírodní materiál, rozptyl parametrů jeho vlastností je velice široký a jeho vlastnosti jsou variabilní v důsledku nejrůznějších vlivů (např. vody). Dřevo však disponuje výbornými ekologickými vlastnostmi, neprodukuje škodlivé látky a nezatěžuje životní prostředí, což je především v dnešní době, kdy se klade velký důraz na ekologii a globální ochranu životního prostředí, velice důležité. Z tohoto důvodu se tento přírodní materiál opět dostává ke slovu a je možné se stále častěji setkávat s nejrůznějšími výrobky ze dřeva a především v souvislosti s rostoucím trendem výstavby nízkoenergetických domů i se stavbami ze dřeva.

Jak již bylo řečeno, současná doba klade vysoký důraz na ekologii, ochranu lesů jako přírodního zdroje a s tím související trvale udržitelné hospodaření v lese, a proto lidé přišli s nápadem spojit tyto dva materiály v jeden a vytvořit tak kompromis mezi moderním uměle vytvořením materiálem a tradičním přírodním materiálem. Tedy spojit dřevní hmotu, polymer a další přídavné látky.

WPC materiály (wood-plastic composite, neboli kompozitní materiály vyráběné ze dřeva a polymeru) splňují požadavek na ekologičnost a částečnou obnovitelnost. Navíc dřevní složka neklade velké nároky na kvalitu suroviny (umožnuje využití odpadních surovin, šetří se tak kvalitní dřevo) a díky polymerní složce vykazuje tento materiál dobré parametry v oblasti biodegradace, tvarové stálosti, zdravotní nezávadnosti a v mechanických či estetických vlastnostech.

S postupem vývoje dřevoplastových kompozitů docházelo k uplatnění kombinace více složek, např. přidání různých lignocelulózových materiálů, čímž bylo dosaženo větší výrobní variability. Moderní WPC materiál se tak nevyrábí čistě kombinací polymeru a dřeva, ale aplikuje se i kombinace s dalšími přírodními vláknitými materiály, jako je např. konopí, sláma nebo řepka (především z důvodu ceny, ale i kvůli zlepšení mechanických vlastností výsledného výrobku).

Cílem této práce je charakterizovat WPC materiály a stanovit vliv přídavku částic ze stonků řepky ozimé do dřevoplastových kompozitních materiálů na fyzikální vlastnosti materiálu na základě statistického vyhodnocení.

# 1 Cíl práce

Hlavním cílem mé práce je stanovení vlivu přídavku částic ze stonků řepky ozimé do dřevoplastových kompozitních materiálů na fyzikální vlastnosti tohoto materiálu.

Aby mohl být lépe stanoven celkový vliv přídavku, je potřeba daný materiál porovnat s podobnými materiály. K porovnání jsou vybrány čtyři různé komerčně vyráběné WPC materiály, které jsou vyrobeny ze dvou složek – ze dřeva a plastu. Všechny zkoumané materiály samozřejmě obsahují i další přídavné látky, které však tvoří v porovnání s dvěma hlavními složkami minoritu.

Porovnávány jsou čtyři fyzikální vlastnosti:

- lesk,
- smáčivost,
- drsnost,
- bobtnání.

Praktické části předchází literární rešerše pro získání lepšího vhledu do současného stavu problematiky doma i v zahraničí.

Každou vlastnost je nutné zvlášť naměřit, vždy postupovat dle potřebné normy a během zkoušek udržovat stálé laboratorní podmínky.

Výsledky z každé zkoušky se dále statisticky vyhodnotí a vyjádří v grafech. Následně se získaná data porovnávají a okomentují a vyvodí se konkrétní závěry. Porovnává se především WPC materiál s přídavky stonku řepky ozimé vůči ostatním materiálům.

V poslední části je potřeba zhodnotit celkové postavení zkoumaného materiálu v porovnání s ostatními materiály a vyvodit konkrétní závěry.

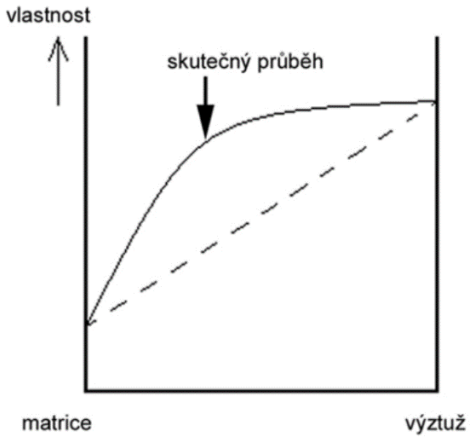
# 2 Současný stav řešené problematiky doma a v zahraničí

Pro lepší vhled do celkové problematiky jsem se rozhodl zaměřit se v teoretické rešerši nejprve na kompozitní materiály jako takové a postupně se propracovat až ke konkrétním informacím, které se týkají skutečných výsledků mé práce. Obecné porozumění problematice kompozitních materiálů je základním předpokladem pro lepší pochopení výsledků měření fyzikálních parametrů.

## 2.1 Kompozitní materiály

Pojmem kompozitní materiály (kompozity) jsou označovány heterogenní materiály, které jsou poskládané ze dvou či více fází. Tyto fáze se vzájemně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Z pravidla je jedna fáze v kompozitu spojitá, takovou fázi označujeme jako matrici, a druhá fáze, která je nespojitá, bývá označována jako výztuž či plnivo. Tato nespojitá fáze, tedy výztuž, má obvykle výrazně lepší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.) a primárním posláním vyztužení je tedy zlepšení uvedených vlastností. Jako příklad můžeme uvést nejznámější přírodní kompozit, kterým je bezesporu dřevo. Dřevo je složené z celulózových vláken uložených v ligninu.

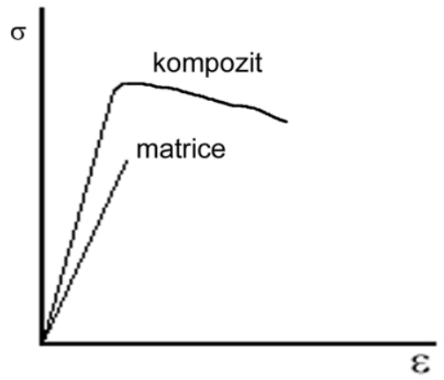
Pro umělé kompozitní materiály je charakteristické, že výrobní postupy spočívají v mísení nebo spojování jednotlivých složek. Tímto se umělé kompozitní materiály liší například od slitin, které jsou taktéž heterogenní, ovšem jednotlivé fáze vznikají fázovými přeměnami, jako je například tuhnutí, a jsou tedy blízko termodynamické rovnováze.



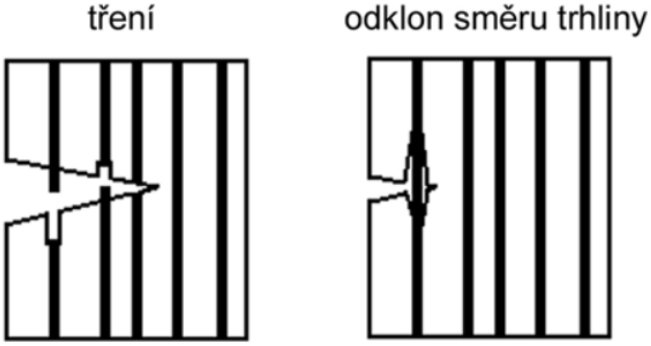

**Obr. 1: Synergické chování složek kompozitu [1]**

Při vytváření kompozitních materiálů dochází k tzv. synergismu, což má za důsledek to, že vlastnosti nového materiálu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Uplatnění principu synergismu je velice důležité, protože vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností. [1]

„*Typickým příkladem synergického chování je kompozit složený z keramické matrice ($Al_2O_3$) vyztužené keramickými vlákny (SiC). I když jsou jak matrice, tak vlákna samostatně velmi křehké, výsledný kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatosti, tzn. odolnosti proti náhlému křehkému porušení. Pro ilustraci jsou na Obr. 2 porovnány tahové diagramy křehké matrice a stejné matrice vyztužené vysoce pevnými, avšak křehkými vlákny. Uvedené chování kompozitu je způsobeno tím, že šířící se lomová trhlina je brzděna na rozhraní matrice a vláken. Dochází zde jednak k odklánění směru šíření trhliny a také k intenzivnímu vzájemnému tření mezi matricí a vytahujícími se vlákny (viz Obr. 3). Kvalita rozhraní mezi matricí a výztuží má tedy zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu*.“ [1]




**Obr. 2: Porovnání tahových diagramů křehké matrice a kompozitu složeného z této matrice a křehkých keramických vláken [1]**




**Obr. 3: Jevy na rozhraní matrice a výztuže při porušování kompozitu [1]**

### 2.1.1 Rozdělení kompozitu

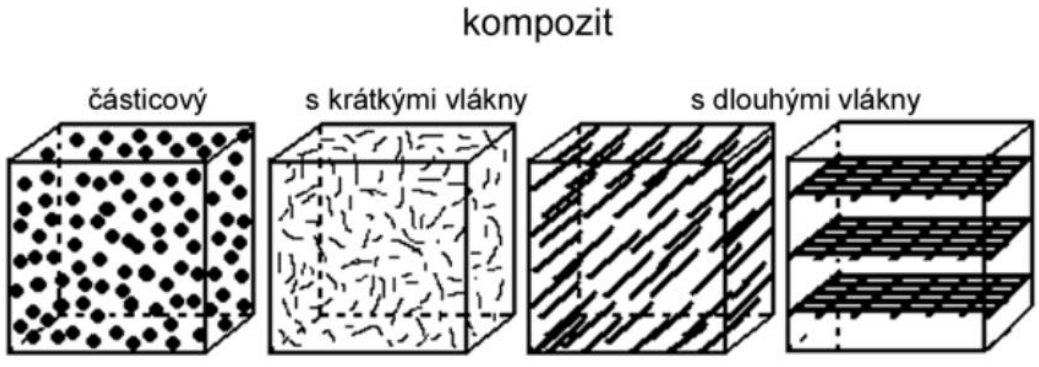
Kompozitní materiály můžeme rozdělit podle mnoha parametrů. V této práci je uvedena klasifikace podle povahy matrice a podle povahy výztuže.

Podle geometrického tvaru výztuže lze rozdělit kompozity tímto způsobem:

- částicové,
- vláknové,
    - s krátkými vlákny,
    - s dlouhými vlákny.

V případě částicových kompozitů jeden rozměr útvarů výrazně nepřesahuje ostatní rozměry. Tvar vyztužujících částic může být kulovitý, destičkovitý, tyčinkový i nepravidelný.

Odlišná situace je u vláknových kompozitů. Jejich útvary výztuže (vlákna) jsou v jednom směru výrazně větší než v ostatních směrech. Vláknové kompozity lze dělit podle délky vyztužujících vláken. V případě, že je délka vláken výrazně menší v porovnání s velikostí daného výrobku, se používá označení kompozity s krátkými vlákny. V případě, že je délka vláken srovnatelná s velikostí výrobku, používá se označení kompozity s dlouhými (kontinuálními) vlákny. Existuje řada variant, jak lze kontinuální vlákna v kompozitech uspořádat. Dvě varianty jsou ukázány na Obrázku č. 4. U první varianty jsou vlákna usměrněna v jednom směru, kdežto u druhé varianty jsou vlákna vzájemně spletena do rohoží a takto uspořádaný kompozit má poté vrstevnatou strukturu.




**Obr. 4: Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru výztuže [1]**

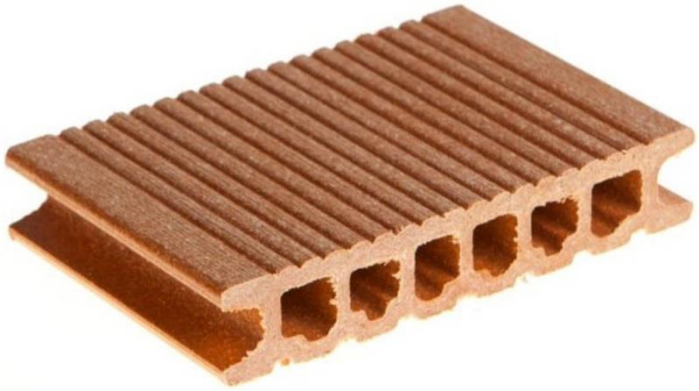
Podle povahy matrice lze dělit kompozity do tří skupin:

- s kovovou matricí (metal matrix composites – MMCs),
- s polymerní matricí (polymer matrix composites – PMCs),
- s keramickou matricí (ceramic matric composites – CMCs).

Do skupiny kompozitů s keramickou matricí jsou rovněž běžně zařazovány kompozity se skleněnými a uhlíkovými matricemi. [1]

## 2.2 Dřevoplastové kompozity

Pod pojmem dřevoplastové kompozity, které můžeme najít taktéž pod anglickým názvem Wood Plastic Composite (zkratka WPC), se označuje materiál na bázi dřeva, který se skládá ze dvou a více složek. Základními dvěma složkami je dřevo a polymer. Polymer může mít dvě podoby. Buď ve formě termosetu, který po vytvrzení nemůže být znovu roztaven, anebo ve formě termoplastu, který může být roztaven a zpracován opakovaně. Dřevo, které zastupuje další základní složku, muže mít různé formy.



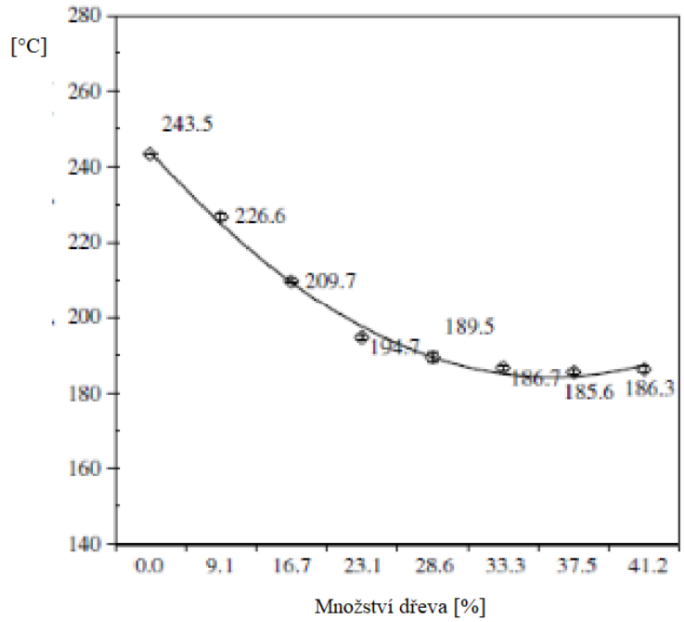
**Obr. 5: Vylehčený podlahový dílec WPC s protiskluzovou úpravou [2]**

Podíl dřevěné složky se liší podle výrobce a také závisí na tom, jakou výrobce zvolí výrobní technologii. Nejčastěji se obsah dřevních elementů pohybuje mezi 40-80 %. Jako optimální poměr bývá často uváděn poměr cca 60 % dřeva a 40 % plastového polymeru. V neposlední řadě jsou další složkou plniva, která modifikují vlastnosti dle požadavků. Jejich úkolem je zlepšit či zušlechtit proces zpracování a vlastnosti koncového produktu. Zařadit mezi ně můžeme maziva, modifikátory, smáčedla, pojiva, antioxidanty, minerály, tepelné stabilizátory, UV stabilizátory, barviva, retardéry hoření a biocidy. [2] [3]

Dřevní složka, která je používaná ve WPC směsích, může mít, jak již bylo zmíněno, různou formu. A to buď formu vláken (dlouhá nebo krátká vlákna), či dřevěné moučky

nebo celulózových vláken. Volba vybrané formy dřevní složky má přímý vliv na vlastnosti WPC. Pro příklad můžeme uvést, že při použití dřevní moučky lze získat poměrně vysokou objemovou hustotu, avšak na úkor mechanických vlastností. Dřevní moučka je poměrně levná, dostupná a kromě toho se tato forma dřevní hmoty snadno zpracovává. Z těchto důvodů bývá pro různé výrobce WPC lákavou volbou. Forma dřevních vláken místo moučky vykazuje lepší mechanické vlastnosti směsi (protažení, odolnost proti nárazu, pevnost), je však nutné brát v úvahu, že taková směs WPC se obtížněji zpracovává při kompaudaci z důvodu nízké objemové hustoty.

Jako největší omezení při zpracování WPC lze označit samotnou teplotu zpracování. Tepelná stabilita dřeva je omezená, a tak hrozí degradace dřevní složky při vyšších teplotách. Jako obecná teplota pro zpracování WPC směsi se označuje 220 °C, ale musí se brát v úvahu i to, že tato teplota klesá s vyšším obsahem dřevní složky. Pro výrobu WPC materiálů se jako nejběžnější termoplast používá polyvinylchlorid (PVC), dále také polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS) a kopolymer akrylonitril-butadien-styren (ABS). [4]




**Obr. 6: Teplota rozkladu WPC materiálu [3]**

Jednou ze základních nevýhod polymerů plněných rostlinnými vlákny je nevhodná kompatibilita mezi polymerní matricí a vlákny. To má pak za následek nerovnoměrnou disperzi, a proto i špatné mechanické vlastnosti WPC. Bohužel víme, že polymery a dřevo se chovají jako olej a voda, tzn. že je obtížné je smíchat. Tento efekt je způsobený jejich polaritou. Drtivá většina polymerů, a to především termoplastů, jsou hydrofobní (vodu

odpuzující) látky, které nejsou kompatibilní s hydrofilními (vodu absorbujícími) dřevními vláky. Kvůli těmto vlastnostem vzniká špatná přilnavost mezi polymerem a vlákny ve WPC. [3]

### 2.2.1 Vlastnosti

Jak již bylo výše zmíněno, vlastnosti WPC lze ovlivňovat volbou použitých surovin, druhem polymerů a aditiv. Celkově lze toto brát jako výhodu, neboť existují spousty různých variant, jaké suroviny výrobce může používat. WPC vyráběné s použitím recyklovaných surovin mají horší mechanické i fyzikální vlastnosti než WPC vyrobené s použitím čistých surovin a s příměsí zušlechťujících přísad.

Mezi hlavní výhody dřevoplastových kompozitů patří vysoká odolnost proti vlhkosti a velice dobrá rozměrová stálost, a to i při dlouhodobém ponoření ve vodě. Absorpce vody nebývá vyšší než 20-30 %. Další výhodou je dobrá odolnost proti atmosférické korozi a, kupříkladu v porovnání s tropickými dřevinami, které mají podobný účel použití, vyšší barevná stálost a celková odolnost.

Hlavní nevýhodou je především vyšší hustota WPC. Ale i zde již existuje řešení v podobě výroby vylehčovaných profilů a tzv. tenčení (ztráta pevnosti i tvaru) při vyšších teplotách. V minulosti byla jako jedna z větších nevýhod vnímána i vysoká křehkost WPC při mrazu, která byla způsobena nekvalitními recykláty používanými k výrobě WPC, nebo také například nevhodně provedenou montáží dutých profilů. Tato nevýhoda byla často způsobena špatným úhlem požadovaného sklonu profilů, kdy docházelo k zatékání vody a následným prasklinám vlivem rozpínání ledu. V současnosti je situace opačná a při nízkých zimních teplotách WPC materiály naopak disponují větší pevností než při běžných teplotách ve zbytku roku. [8]

*„Při ponoření dřevoplastového kompozitu do vody na 20 dní a následném testování odolnosti proti dřevokazným houbám byl hmotnostní úbytek kompozitu po třech měsících pouhých 4,6 % pro Gloeophyllum trabeum (Trámovka trámová) a 2,3 %, pro Trametes versicolor (Outkovka pestrá). Měření bylo provedeno na kompozitu tvořeném z 50 % dřevními vlákny osiky a z 50 % popropylénem. Pří aplikacích v exteriéru dochází i k zatěžování působením UV záření. Laboratorní měřená ztráta pevnosti v ohybu způsobená UV zářením po vystavení v délce 1000 a 2000 hodin je: 2,3 % a 9,0 %. Je třeba*

*připomenout, že hodnoty ztráty pevnosti UV zářením, jako i působení dřevokazných hub, jsou ve velké míře závislé na poměru jednotlivých složek kompozitu a způsobu výroby. Mechanické vlastnosti dřevoplastových kompozitů jsou závislé na použitém materiálu a technologii výroby. Jedná se především o poměr jednotlivých složek v celkovém objemu a o velikost dřevních částic.“* [5]

#### 2.2.1.1 Nasákavost

Nasákavost WPC materiálů je důležitá k udržení celkových vlastností. Pokud dochází k absorpci [3]vody, tak dochází i k negativnímu ovlivnění vlastností. Jako například v případě změny rozměrů (bobtnání) a prohnutí. S rostoucím množstvím nasycené vody se snižuje ohybový modul materiálu, a tím pádem se při zvýšenému zatížení zvyšuje i jeho degradace. Nasákavost má zásadní vliv také na vytvoření prostředí pro šíření plísní. Jak je známo, voda je nezbytnou složkou po mikrobiální život. Materiály, které disponují vlhkostí 19 % a nižší, nepodporují růst ani šíření plísní. Dále tato schopnost vede k rychlejší oxidaci materiálu (voda je katalyzátor oxidace).

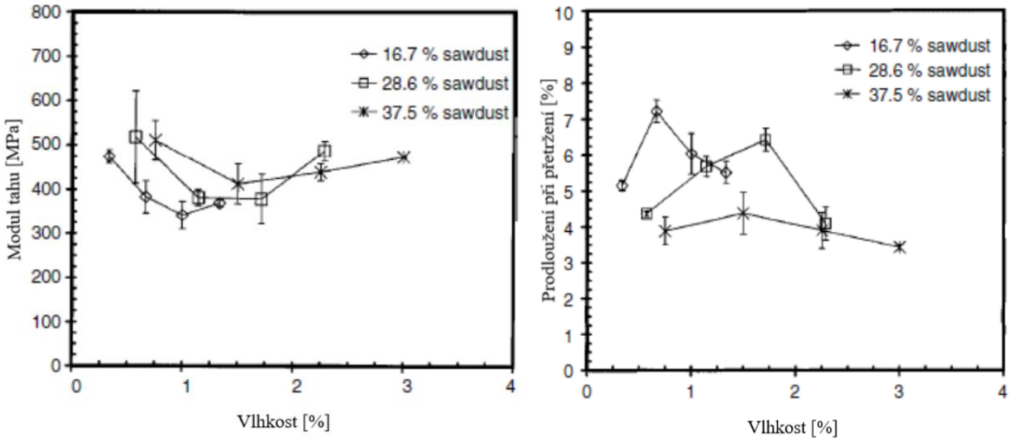
Nasákavost lze snížit anorganickými plnivy, například kaolin, křemičitá moučka nebo skleněná vlákna ve většině případů nasákavost snižují. Naopak při využití organických plniv (například celulóza) se nasákavost zvyšuje.

Jeden z hlavních důvodů absorpce vody je poréznost WPC materiálů. Celulóza, která je častou složkou WPC směsí, obsahuje vlhkost. Obsažená voda se ve zpracovávaných směsích přemění z vody na páru, a ta pak v tavenině vytvoří mikrobubliny, které zvýší napětí a sníží hustotu materiálu na 0,91-0,95 g/cm$^3$. Tato hustota poukazuje na to, že poréznost materiálu se pohybuje mezi 16-21 %. WPC materiál ponořený do vody na 24 hodin absorbuje 0,7-3 hm, % vody, kdežto u dřeva je tato hodnota až 24 %. Pokud WPC materiál ponoříme do vody na mnohem delší dobu, pak je schopen nasáknout 20-30 hm. %, ovšem přírodní dřeva za totožnou dobu nasákne až 100 hm. %. Již při ponoření na 24 hodin je zřejmé, že nasákavost u WPC materiálů je znatelně nižší než u dřeva.

Další faktor, který znatelně ovlivňuje nasákavost WPC materiálů, je velikost odolnosti polymeru proti vodě jako fyzikálně aktivnímu prostředí. Polymery polární s hydrofilními skupinami (-NH-CO-) (např. PA, PU) mají velkou sorpci vody. Polymery nepolární (např. PE, PP, PS, PTFE, PVC) mají sorpci výrazně nižší. [3]

#### 2.2.1.2 Mechanické vlastnosti WPC v závislosti na procentuální vlhkost materiálu

Stupeň vlhkosti materiálu zásadně ovlivňuje mechanické vlastnosti jak dřeva, tak i kompozitů. Přítomnost vody ve WPC materiálech způsobuje vznik vodíkových vazeb mezi vodou a dřevěnými pilinami a dochází tak ke snížení dipólových interakcí mezi polymerem a dřevními vlákny. Tím pádem zde dochází k prokluzu řetězců a zbobtnání dřevěných pilin, které mohou vyplnit mezery v kompozitu. Z Obrázků 7 až 8 lze vyvodit, že s nárůstem vlhkosti mají mechanické vlastnosti klesající tendenci. Pouze modul pružnosti pevnosti v tahu při vyšších vlhkostech může mírně stoupat díky zbobtnání vláken. Růst prodloužení a rázová pevnost při nižší vlhkosti je určena snížením dipólových interakcí mezi polymerem a dřevními vlákny. [6]




**Obr. 7: Vliv vlhkosti na modul pružnosti v tahu Kompozity PVC/piliny [6]**

**Obr. 8: Vliv vlhkosti na rázovou Kompozity PVC/piliny [6]**

#### 2.2.1.3 Kondicionování

Jak je známo, sorpce vody probíhá do tzv. rovnovážného stavu. Čím tenčí je materiál, tím rychleji nastává k rovnovážný stav. Jedná se o vratný děj. Pokud umístíme plastový dílec s obsahem vody do suchého prostředí, tak se voda začne vypařovat až opět do rovnovážného stavu v daném prostředí. Pokud dílec vodu přijímá, rozměry se poté zvětšují zhruba o objem absorbované vody, ubýváním vody se rozměry opět zmenšují.

Jak již bylo zmíněno, obsah vody ovlivňují nejenom rozměry, ale zároveň i mechanické vlastnosti, jako jsou pevnost, modul pružnosti, tvrdost a elektroizolační vlastnosti. V případě houževnatosti a tažnosti se tyto hodnoty naopak zvyšují. U některých případů

dochází dokonce k vyplavování změkčovadel nebo nízkomolekulárních podílů, a to může vést k nevratným změnám.

Proto je důležité provést kondicionaci do rovnovážného stavu, neboť výrobky z plastů mají po vylisování nulový obsah vody a jsou tudíž křehké a tvrdé. Často se můžeme z tohoto důvodu setkat s tím, že pro urychlení kondicionace jsou výrobky po vylisování uloženy krátkodobě do vody. [6]

### 2.2.2 Složky dřevoplastových materiálů

Jak již bylo zmíněno, WPC materiály obsahují dvě hlavní složky, termoplastovou matrici a dřevní složku. Dřevní materiál se upravuje do podoby dřevní moučky, pilin anebo štěpky. Dle požadavků na vlastnosti materiálu jsou dávkována lignocelulózová vlákna v množství 30 až 70 %. Pro výrobu termoplastické matrice se nejčastěji využívá například: polyethylen, polypropylen, polyvinylchlorid a další druhy termoplastů. Kromě těchto dvou hlavních složek je pro dosažení finálních požadovaných vlastností výrobku potřeba použit i další přísady. [7]

#### 2.2.2.1 Dřevo

Dřevo je nepochybně nejvšestrannější surovinou, kterou má člověk k dispozici. Jedná se také o jeden z nejstarších konstrukčních materiálů. Díky svému přírodnímu původu, dostupností a chemickému složení je předurčeno pro použití ve stavebnictví a nábytkářském průmyslu. Po chemické stránce se dřevo skládá především z přírodní varianty polymerů, jako je celulóza a hemicelulóza, a z ligninu, který tvoří pojivo mezi vlákny celulózy a hemicelulózy. Hlavní složky dřeva, které tvoří 90-97 % dřeva se dělí na polysacharidickou složku (celulóza 35-55 %, hemicelulóza 20-35 %) a na fenolickou složku (lignin 15-36 %). Doprovodné složky dřeva tvoří 3-10 % dřeva (anorganické a organické).

Pomocí různých specifických přístrojů měříme jeho parametry, přestože neexistuje absolutní stupnice kvality dřevní hmoty, neboť pro různé využití dřeva jsou požadovány různé vlastnosti. Proto při kvalitativním měření dřeva zkoumáme pouze určité vlastnosti. Především se jedná o hustotu, podíl celulózy, ligninu a odlučitelných složek, vlhkost, nasákavost, nabobtnání, sesychání a další. Mezi další významné měřitelné parametry se řadí délka vlákna, tloušťka buněčné stěny, která přímo ovlivňuje schopnost penetrovat

materiál aditivy, anebo úhel mikrovláken celulózy. Tento parametr je přímým faktorem určujícím mechanické vlastnosti dřeva. Zmíněný úhel je definován jako úhel mezi nejpravděpodobnější orientací mikrovlákna s podélnou osou buňky. [8], [9]

**Dřevní moučka**

Jedna z variant dřeva, která je použitelná pro výrobu dřevoplastových kompozitů je ve formě částic, velmi krátkých vláken anebo jejich balíčků. Jejich délka je ještě menší než u jednotlivých dřevěných vláken. Oproti dřevním vláknům nebo jiným delším částicím dřevní moučka disponuje vysokou objemovou hustotou a má volně plynoucí (free-flowing) charakter. Taktéž disponuje nízkou cenou, obecnou známostí a dostupností. Všechny tyto vlastnosti dělají z dřevní moučky oblíbený materiál pro výrobu WPC. V Americe patří k běžným druhům dřevin borovice, javor, dub, zatímco v Evropě je nejpoužívanější dřevní moučka z jehličnatého dřeva, a to zejména ze smrku. Typická velikost částic se pohybuje okolo 40 mesh, přibližně 420 μm. V dnešní době existuje široký rozsah dodavatelů dřevní moučky. Jedná se o velké firmy, které mají rozsáhlé distribuční sítě a jsou schopné dodávat materiál jak do velkých podniků, tak i jednotlivým zákazníkům. Podniky, které se zabývají dřevoplastovými kompozity získávají dřevní moučku buď přímo od lesnických a dřevařských podniků, jako jsou pilnice, truhlářství, výrobny oken a dveří, které produkují dřevní moučku jako vedlejší produkt anebo od podniků, které se na výrobu dřevní moučky přímo specializují.

**Obr. 9: Dřevní moučka [21]**

S rostoucím počtem dodavatelů dřevní moučky zaměřené na odvětví dřevo-plastových kompozitů, začínají být zahrnuti i mezi zdrojové dodavatele pro plastový průmysl.

Stejně jako u většiny jiných materiálů jsou náklady na dřevní moučku variabilní a závislé na takových faktorech, jako je množství, dostupnost, složení (v tomto případě velikost částic) a dopravní vzdálenost. [10], [11]

**Dřevní vlákno**

Vzhledem k potenciálu lepších mechanických vlastností WPC při použití dřevních vláken, roste zájem o dřevní vlákno jako o výztuž v dřevoplastových kompozitech.

**Obr. 10: Dřevní vlákno [22]**

Dřevní vlákna, rozptýlená jako výztuž, zlepšují mechanické vlastnosti kompozitu, jako je pevnost v tahu, tažnost nebo odolnost proti obrusu. [7], [10]

#### 2.2.2.2 Plasty

Druhou základní složkou při výrobě dřevoplastových materiálů jsou plasty neboli syntetické a semisyntetické polymery. Plasty lze rozdělit do dvou základních skupin, a těmi jsou termoplasty a reaktoplasty. Tato práce se věnuje termoplastům, které jsou díky možnosti opětovného zpracování mnohem více rozšířené. Z materiálových vlastností termoplastů vyčnívá dobrá tvarová stabilita, odolnost proti opotřebení, vyšší pevnost, vyšší modul pružnosti nebo houževnatost. Reaktoplasty tuhnou až poté, co v nich proběhne nevratná chemická reakce za přítomnosti vytvrzovadla, navíc je u nich vysoce problematický proces opětovného zpracování. [12] [11]

Pouze ty druhy termoplastů, které se dají zpracovat pod přibližně 200 °C jsou vhodné k aplikaci v dřevoplastových kompozitech. Důvodem tohoto limitu je tepelná stabilita dřevní složky. Tento limit teploty, a tudíž i relativně úzký výběr plastů, nemusí mít absolutní hodnotu. V určitých případech se může tento limit lišit, a to v případech:

• pokud je použitá celulóza delignifikována (právě lignin je nejvíce citlivý na teplotu),

• pokud jsou celulózová vlákna částečně termoizolována smícháním vláken s minerály (například Biodac®),

• pokud je doba zdržení celulózových materiálů ve směšovadlech a extrudérech významně snížena zvýšením rychlostí zpracování anebo dochází i jinými prostředky ke zkrácení doby styku celulózy s horkou taveninou. [11]

Termoplasty mohou být makromolekulové látky s lineárním anebo rozvětveným řetězcem. Jak již bylo zmíněno, jsou tepelně tavitelné a v roztaveném stavu se pod tlakem vstřikují do forem, pomocí kterých dále vytuhnou na požadovaný tvar. Mohou být v čisté formě, to znamená bez přísad a plniv, anebo s přísadami na zlepšení fyzikálních vlastností. Snaha plniv je zvýšit odolnost vůči povětrnostním vlivům, záření, hoření, zvýšeným teplotám a podobně. V neposlední řadě plniva mají pozitivní vliv i na mechanické vlastnosti. [12]

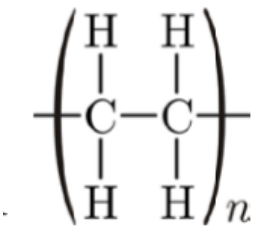
Existují dva různé chemické postupy pro výrobu syntetických polymerů:

• Polymerizace: *„Řetězová reakce, při které se molekula monomeru nejprve působením iniciátorů (případně katalyzátorů) anebo dodáním energie aktivuje a na vzniklé aktivním centrum se přidávají další molekuly monomeru. Tento děj řetězové adice se mnohonásobně opakuje velkou rychlostí, dokud se aktivní centrum nedeaktivuje. Před deaktivací může aktivní centrum přenést na novou částici, kde začne vznikat nový polymerní řetězec. Výstavba makromolekuly zahrnující uvedené reakce je velmi rychlý, většinou několik sekund trvající proces.“* [12]

• Polykondenzace: *„Spočívá také v spojování malých molekul do řetězové molekuly, ale při každém připojení monomerní jednotky dochází k uvolnění nízkomolekulových produktů (například voda, alkohol apod.). Je zajímavá také tím, že reakci lze v libovolném stádiu přerušit a opět v ní pokračovat, což je možné využít pro technické účely.“* [12]

**Polyethylen (PE)**

Jedná se o termoplast, který vzniká polymerací ethylenu. Řadí se do skupiny polyolefinů a jeho roční světová produkce činí přibližně 60 mil. tun. Podle hustoty a stupně krystalizace se určuje variace ve které se vyrábí.



**Obr. 11: Polyethylen [12]**

Nejpoužívanější jsou:

• PE-LD – s nízkou hustotou (LD = low density), ρ=0,918-0,940 g/cm3, E=600–1400 MPa,

• PE-HD – s vysokou hustotou (HD = high density), ρ=0,935-0,963 g/cm3, E=150-500 MPa,

• PE-LLD – s lineárním řetězcem a nízkou hustotou.

Výhodu PE představuje to, že při spalování s dostatkem kyslíku vzniká plynný $CO_2$ a vodní pára.

Základní vlastnosti PE:

• tepelná stálost od -85 °C do +80 °C,

• mléčně zakalený,

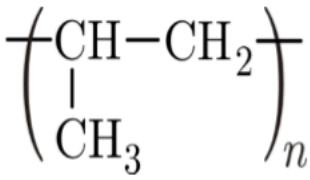
• odolný vůči většině polárních rozpouštědel,

• teplota zpracování 190 °C,

• zvýšená citlivost na UV záření a povětrnostní vlivy.

**Polypropylén (PP)**

Termoplast, který vzniká pomocí propénu a také se řadí do skupiny polyolefinů. Vyniká dobrou mechanickou a chemickou odolností a výrobky, které jsou vyrobeny z PP, mají mezinárodní označení s číslem 5: PP při hoření neprodukuje tolik kouře a žádné toxické halogenové uhlovodíky.



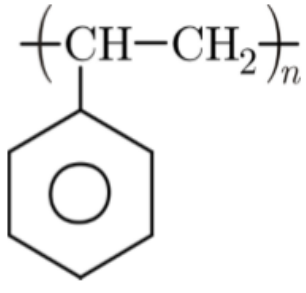
**Obr. 12: Polypropylén [12]**

Základní vlastnosti PP:

- hustota 0,900-0,910 g/cm$^3$,
- E = 1100–1600 MPa,
- teplota zpracování 230 °C,
- teplota rozkladu 286 °C,
- výrazně křehne při teplotách pod 0°C.

**Polystyren (PS)**

Jde o částečně amorfní termoplast, který je rozšířený zejména pro svoje tepelněizolační a obalové vlastnosti. Vyrábí se polymerací styrenu. Polystyren má mezinárodní identifikační číslo pro plasty 6. Produkty hoření jsou při vdechování zdraví škodlivé. Uvolňuje se z něj



**Obr. 13: Polystyren [5]**

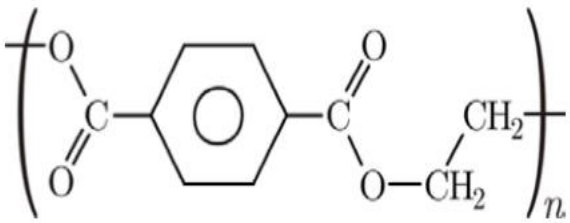
nezreagovaný monomer styren, který je toxický a je řazen mezi karcinogeny. Rozeznáváme dva základní druhy polystyrenu s jejich vlastnostmi:

- standartní termoplastický (těžký) s hustotou 1,05 g/cm3,
- E = 3200–3500 MPa,
- pěnový (lehký) s hustotou 0,04 g/cm3,
- tepelná vodivost 0,08-0,13 W/m.K,
- teplota zpracování 200 °C.

Existuje i varianta, kdy se vyrábí i speciální polystyren s příměsí skelných vláken a modulem pevnosti v tahu E = 10 000 MPa.

**Polyethylentereftalát (PET)**

Termoplast ze skupiny polyesterů. Vyrábí se polykondenzací etylenglykolu a kyseliny tereftalové. V potravinářském průmyslu je často využívaný jako obalový materiál na potraviny, nápoje a jiné kapaliny. Také se využívá v textilním průmyslu na výrobu umělých vláken. PET se uplatnil především při výrobě vláken, které vynikají nemačkavostí a malou navlhavostí. Podle výrobního procesu a způsobu chlazení lze vytvořit amorfní PET, který má všeobecně přidělené mezinárodní identifikační číslo pro plasty 1. Jedná se o chemicky stálý materiál. Životnost se odhaduje na víc než 1000 let a velkou výhodou je především jeho úplná recyklovatelnost.

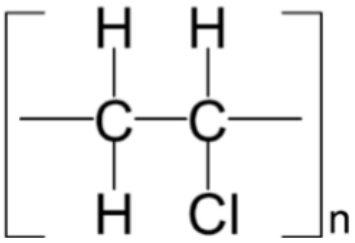


**Obr. 14: Polyethylentereftalát [5]**

Základní vlastnosti PET:

- hustota 1,37 g/cm3,
- E = 3000 MPa (polokrystalický),
- E = 1500–2000 MPa (amorfní),
- před zpracováním je nutné snížit obsah vody na 40 ppm,
- teplota,
- teplota tání 260 °C,
- při vyšších teplotách vylučuje acetaldehyd → znehodnocení obsahu.

**Polyvinylchlorid (PVC)**



**Obr. 15: PVC [5]**

Polyvinylchlorid patří do skupiny termoplastických polymerů tuhnoucí v amorfní formě. PVC je v ryzí (neměkčené) formě velmi těžko zpracovatelný, a proto se změkčuje různými přísadami, například přidáním ftalátů. Ftaláty mohou tvořit až 50 % objemu, a protože nejsou v plastech pevně vázány, časem se z něj uvolňují. Ohledně bezpečnosti ftalátů se již dlouho diskutuje a některé z nich, jako například DEHP byly zakázány při výrobě produktů ve zdravotnictví a dětských hračkách. Spalování za nízkých teplot vytváří podmínky k tvorbě toxických dioxinů.

Nejčastěji se s PVC setkáváme ve stavebnictví, kde se využívá na výrobu potrubí a plastových oken, Především díky jeho dostupnosti a mechanickým vlastnostem.

Základní vlastnosti PVC:

- hustota 1,39 g/cm3,
- E = 2900-2400 MPa,
- teplota tání 100 °C až 260 °C (podle množství přidaných ftalátů),
- 57 % hmotnostního obsahu v čistém PVC tvoří chlór,
- koeficient tepelné vodivosti 0,16W/m.K.

[5] [13] [14]

### 2.2.2.3 Další plniva a aditiva pro WPC materiály

**Lignocelulózové plniče pro WPC**

Termín "dřevoplastové kompozity" (WPC) definuje dřevo jako hlavního zástupce pro vláknité materiály rostlinného původu. Ovšem kromě dřeva mohou být součástí plniv i zbytky zemědělských rostlin, obvykle v řezané či namleté podobě, nebo jinak zpracovaný druh přírodních vláken, jako je konopí, juta, kenaf či řepka ozimá, který obvykle vzniká jako vedlejší produkt příslušného průmyslového procesu. Všechna plnidla na bázi celulózy pro WPC jsou přírodními materiály obsahujícími celulózu, hemicelulózu a lignin.

Tato kombinace různých lignocelulózových materiálů má prakticky nevyhnutelný dopad na zpracování a vlastnosti výsledného kompozitního výrobku. Stručně řečeno, celulóza má pozitivní vliv na mechanické, a i jiné vlastnosti kompozitního materiálu (jako je snížený koeficient tepelné roztažnosti-kontrakce atd.); lignin zpravidla činí výrobek slabší, lehce hoří v průběhu zpracování a uvolňuje CO2 a jiné plynné produkty, což snižuje hustotu produktu a výrazně urychluje vyblednutí WPC po expozici v exteriéru. Extrakty z dřeva (terpeny, pineny, taniny, karbonylové sloučeniny atd.) vytvářejí těkavé organické sloučeniny (VOC), což také snižuje hustotu produktu. Hemicelulóza se snadno rozkládá při teplotách tavení plastů, zejména při velkých změnách tlaku, a vytváří kyselinu octovou, což způsobuje značnou korozi výrobního zařízení. Tento účinek se projevuje zejména při určitém obsahu vlhkosti v lignocelulózovém materiálu a nazývá se "výbuchem páry" lignocelulosy. [11]

## ŘEPKA OZIMÁ

Jelikož se tato práce zaměřuje na WPC vyrobené ze stonků řepky ozimé, následují zde podrobnější informace týkající se této rostliny.

**Obr. 16: Řepka ozimá [23]**

Řepka ozimá je známa též pod názvem rukev řepka olejka ne pod latinským názvem Brassica napus. Jedná se o jednoletou nebo dvouletou rostlinu která je v celosvětovém měřítku jednou z nejdůležitějších olejnin. Existuje ve dvou formách ozimá a jarní, u nás převládá řepka ozimá. Řepka disponuje všestranným využitím, například: v potravinářském průmyslu, krmivářským průmyslu a zejména v posledních letech je hojně využívána za účelem výroby biopaliv. Podle údajů z Českého statistického úřadu se na území České republiky od roku 1990 do roku 2017 více než ztrojnásobila. V roce 2018 bylo oseto na území ČR oseto řepkou celkem 412 tis ha půdy, což je 16,7 % z celkové osevní plochy [25]

Charakteristika řepky olejné:

- výška 1-2 metry, stonek často rozvětvený,

- hustota stonku při vlhkosti 10 %, přibližně 27 kg/m$^3$, hustota substance 1550 kg/m$^3$,
- řepková vlákna více heterogenní než dřevní vlákna (více druhů buněk),
- délka vláken se pohybuje v rozmezí 0,7-2 mm, šířka 9-20 µm, tloušťka buněčné stěny 2,8-3 µm,
- stonek řepky obsahuje 41 % celulózy, 23,4 % hemicelulóz, 21,5 % ligninu, 6,8 % extraktiv, 5,8 % popelovin (při odstranění dřeně procentuální zastoupení celulózy větší, popelovin menší),
- chemické složení stonků a rozměry vláken jsou podobné jako u dřeva listnatých dřevin.

- Využití:

Nejčastější využití řepkových stonků spočívá v zaorávání a obohacení půdy o minerální látky, proto bývají jen zřídka sklízeny. Někteří zemědělci produkují řepkovou slámu či pelety z řepkové slámy pro energetické účely. Ovšem do průmyslového využití v produktech s vyšší přidanou hodnotou se řepková sláma stále nepropracovala. Přesto posklizňové zbytky mají potenciál uplatnění v mnoha směrech. Ať už se jedná o uplatnění ve výrobě kompozitních materiálů a materiálu pro konstrukční účely, nebo v papírenském a chemickém průmyslu. [15]

*„V minulosti proběhlo několik výzkumů orientovaných na využití třísek z řepkových stonků pro výrobu třískových desek. Bylo prokázáno, že třísky z řepky jsou vhodnou alternativou dřevěných desek, vyrobené desky splňovaly normované požadavky pro třískové desky pro použití v suchém prostředí P2. Dále byly vyvinuty sendvičové desky se střední vrstvou z řepkových třísek a oboustranně odýhované bukovými dýhami o tloušťce 1,7 mm. Sendvičové panely ž řepkových třísek měly lepší mechanické vlastnosti, nežli odpovídající (se stejnou hustotou) sendvičové panely z dřevěných třísek. Zlepšení mechanických vlastností bylo dosaženo tím, že při nižší hustotě řepky bylo možné do desky zalisovat větší množství třísek.*

*Další výzkum, v kterém byly vyráběny dřevotřískové desky s příměsí řepkových třísek v různých hmotnostních poměrech, ukázal, že rozlupčivost, pevnost v ohybu a odolnost proti vytažení vrutů s rostoucím obsahem řepkových třísek klesají. Na druhou stranu*

*vyprodukované desky splňovaly normované požadavky a s rostoucím obsahem řepkových třísek se zlepšovala rozměrová stabilita.*

*Cílem výzkumu prováděného v Íránu bylo zlepšení vlastností dřevotřískových desek pojených močovinoformaldehydovým lepidlem pomocí přídavku řepkových třísek a recyklovaného polyetylenu. Výsledky ukázaly, že rostoucí podíl řepkových třísek má negativní vliv na rozlupčivost, nasáklivost a bobtnání, ale pozitivní vliv na modul pružnosti v tahu a ohybu. Dále bylo prokázáno, že s rostoucím obsahem recyklovaného polyetylenu lze snižovat obsah UF (močovinoformaldehydového) lepidla.*

*V Německu byly v laboratorních podmínkách vyrobeny třívrstvé dřevotřískové desky, kdy vrchní vrstvy byly z dřevěných třísek a byly lepeny směsí UF lepidla a lepidla na bázi pšeničných bílkovin (poměr 50/50). Ve středové vrstvě byla použita směs dřevěných třísek a jednoletých rostlin (cukrová třtina, řepka a konopí). Třísky ve středové vrstvě byly lepeny pouze UF lepidlem. Bylo dosaženo snížení emise formaldehydu, vyrobené desky splňovaly normované požadavky, avšak pokud stoupl obsah řepkových třísek ve středové vrstvě na 50 %, docházelo k výraznému poklesu rozlupčivosti.*

*Výzkumné aktivity jsou patrny i u produktů s vyšší přidanou hodnotou, než mají třískové desky. Byla vyrobena tvrdá vláknitá deska mokrým způsobem, bez lepidla, pouze z vláken z řepkových stonků. Vyrobený materiál dosahoval hustoty 950–1120 kg/m3 dle lisovacího tlaku a splňoval všechny normované požadavky.*

*V Íránu byly prováděny pokusy týkající se výroby vláknité desky se střední hustotou (MDF) z řepkových vláken. Vlákna byla vyrobena podobným způsobem jako při výrobě MDF ze dřeva. Byly vyrobeny MDF desky z řepkových vláken a jmenovité hustotě 700 kg/m3. Fyzikální a mechanické vlastnosti desek byly srovnatelné s vlastnostmi MDF desek vyrobených z jiných jednoletých rostlin a byly blízké minimálním normovaným hodnotám.*

*Dalším příkladem materiálu s vysokou přidanou hodnotou je dřevoplastový kompozitní materiál vyrobený lisováním z polyetylenu s nízkou hustotou a plnidla ve formě prášku z řepkových stonků. Byly zkoumány různé poměry dřevo/plast. Zatímco pevnost v ohybu klesala s rostoucím obsahem řepkového prášku, modul pružnosti v ohybu stoupal. S rostoucím obsahem plnidla dále stoupala i nasáklivost a bobtnání.*

*Kromě fyzikálních a mechanických vlastností jsou u nově vyvíjených materiálů hodnoceny i jevy vyskytující se na rozhraní částice/adhesivum. Klímek a kol. k hodnocení rozhraní použili SEM analýzu. Pomocí elektronového mikroskopu pozorovali rozložení adhesiva na třískách jednotlivých materiálů a druh porušení spoje (adhezní/kohezní) po*

*provedení zkoušky rozlupčivosti. Jiní autoři kromě SEM analýzy používaly k hodnocení rozhraní tříska/adhesivum i goniometr k měření kontaktního úhlu mezi třískami a tekutinami.“* [15]

Díky velkému podílu celulózy ve vláknech řepky lze mechanickým způsobem vyrobit celulózová nanovlákna. Tato nanovlákna lze následně využít na výrobu nanopapíru či po jejich částečném rozpuštění je lze využít na výrobu celo-celulózového materiálu. [15]

**Minerální plniva pro WPC**

Jedná se o látky, které jsou často používány v plastikářském průmyslu. Minerální plnidla, mohou být organického či anorganického původu. V některých případech i mohou být složeny z více druhů látek. Přibližně 65 % z celkové spotřeby minerálních plniv do plastů tvoří CaCO3 (ročně asi 6 mil. tun). Díky své ceně a variabilitě se používá jako plnivo v plastech pro mnohá použití.

Kromě výdajů za dané použité plnivo musíme brát zřetel i na ostatní vlastnosti minerálního plniva, jako jsou chemické složení, hustota, velikost částic, tvar částic, schopnost absorbovat vodu, schopnost absorbovat olej, vlastnosti zpomalující hoření, účinky na mechanické vlastnosti kompozitního materiálu, vliv na viskozitu horké taveniny atd. [3] [11]

**Aditiva pro WPC**

Jedná se o činidla zvyšující přilnavost mezi vlákny celulózy a polymerem. Zároveň pozitivně ovlivňují termo-oxidační stabilitu směsi při jeho zpracování a zlepšují konečné užitné vlastnosti produktu (stálost, životnost atd.).

**Kompaktibilizátory**

Speciální aditiva, jejíchž funkce spočívá ve zlepšení přilnavosti neboli adheze na mezifázovém rozhraní polymer/plnivo. Za jejich přítomnosti dochází ke chemickému spojení s vlákny celulózy, tudíž zvyšují přilnavost polymeru k plnivu, v tomto případě ke dřevní hmotě. Kompatibilizátor ideálně obsahuje dvě části. První by měla být schopná reagovat s polymerem a má hydrofobní povahu blízkou použitému polymeru a druhá by měla být přítahová k hydrofilnímu plnivu. Ovlivní tak i mechanické vlastnosti materiálu,

například pevnost v tahu za ohybu WPC s polypropylenovou matricí se zvyšuje až o 15 MPa a pevnost vtahu až o 12 MPa. Nejpoužívanějším kompatibilizerem v dnešní době je maleátový polyolefin, který do dřevo-plastické kompozitní směsi přidáváme v množství od 2 do 5 %. [3] [16]

**Termooxidační stabilizátory**

Funkce stabilizátorů spočívá ve zpomalení degradačních procesů a zlepšení odolnosti polymerů vůči zvýšeným teplotám, které se vyskytují v průběhu výrobního procesu anebo v následném používání.

U WPC materiálů je kladen důraz především na UV stabilizátory a tepelné stabilizátory. Prvně zmiňované UV stabilizátory jsou přidávány jako ochrana před UV zářením a zároveň zabraňuje inicializaci chemických reakcí. U WPC materiálů se dosahuje dobrých výsledků právě použitím vhodných pigmentů, přičemž dávkování těchto stabilizátorů je maximálně 1 %. [3] [7]

*„Tepelné stabilizátory lze rozdělit do dvou základních tříd:*

1. *stabilizátory založené na solích anorganických a organických kyselin (obsahující kationty Pb, Sr, Zn, Mg, Li, Ca, Na a velká skupina tzv. organocíničitých stabilizátorů).*
2. *stabilizátory organické (epoxidové sloučeniny, organické fodfíty, stabilizátor na základě močoviny a jejích derivátů a esterů kyseliny ß-aminokrotonové.).“* [3]

**Modifikátory toku (Maziva)**

Účinek modifikátorů toku je pro WPC založen na tom, že maziva zabraňují lepení zpracovávané směsi na kovové součásti zpracovatelského zařízení vytvořením mazivové mezivrstvy. Zároveň pomáhají snižovat viskozitu taveniny, nadměrnou frikci, přehřívání, a následnou případnou degradaci. Tyto přísady se rozlišují na maziva vnitřní a vnější. Vnitřní maziva ovlivňují viskozitu a průtok matrice, jelikož jsou kompatibilní s pryskyřicí taveniny. Na rozdíl od toho vnější maziva ovlivňují přilnavost a vlastnosti kluzu. Jelikož jsou tyto molekuly neslučitelné s taveninou, oddělují se a vyskytují se na jejím povrchu. Jejich funkcí je tedy vytvářet kluzkou plochu mezi taveninou a výrobním zařízením. Jako příklad maziv můžeme uvést stearany nebo estery. Dávkování této látky do směsi se pohybuje v množství 3-8 %. [3] [7]

**Modifikátory rázové houževnatosti**

Využíváno jako nedílná součást formulací pro tvrdé typy PVC, a tedy i pro směsi WPC určené k extruzi. V dnešní době mezi populární modifikátory patří akrylátové modifikátory nebo modifikátory na bázi chlorovaného polyetylenu. [3]

**Přísady na snížení hustoty**

Existuje několik variant, jak můžeme snižovat hustotu. Jeden z příkladů funguje na fyzikálním principu nadouvadla (plyn se uvolňuje do matrice v průběhu zpracování). Další příklad jsou pak nadouvadla fungující na chemickém principu (pevné látky jsou rozptýleny do směsi a následně po vystavení určité teplotě se uvolňuje plyn). V tomto případě mohou nastat komplikace, neboť je potřeba speciální zařízení. Jako třetí možnost pro snížení hustoty je specifický druh aditiv. Tato aditiva patří sice mezi drahé materiály, ale jejich využití neklade žádné další nároky v podobě speciálního zařízení nebo speciálního zpracování. Obecně jsou tato aditiva známa jako tzv. mikrokuličky. Všechny tyto přísady na snížení hustoty jsou do směsi dávkovány v množství 0-5 % [11] [7]

**Biocidy**

Protože WPC materiály přijímají vlhkost velice pomalu a absorbují méně vlhkosti oproti masivnímu dřevu, disponují lepší odolností vůči napadení houbami a i při vystavení vlhkostí mají dobrou rozměrovou stabilitu. Pouze u kompozitů s vysokým obsahem složky dřeva někteří výrobci doplňují přísady, jako např. boritan zinečnatý, který slouží ke zlepšení odolnosti vůči houbám. Dávkování je maximálně do 2 % [10] [7]

**Pigmenty**

Jedná se o přísady, které ovlivňují estetiku každého výrobku. Pigmenty dělíme do dvou základních kategorií. Do první kategorie spadají ty, které mají vliv na vlastnosti povrchu dílce tím, že ovlivňují interakci mezi roztavenými sloučeninami. Do druhé kategorie spadají takové pigmenty, které mění vzhled jednoduše svou vlastní přítomností v WPC materiálu.

Konečný vzhled lze částečně ovlivnit již u počáteční fáze volbou plniva a UV aditiv, které chrání integritu pigmentu a tím zabezpečují stálý odstín barvy produktu. [7] [16]

**Retardéry hoření**

Přítomnost těchto látek ve výrobku závisí na tom, jestli hrozí v jeho budoucím používání nebezpečí, že dotyčná konstrukce může být zasažena plamenem nebo potenciálním způsobem přispět dalšímu šíření požáru a ohrozit tak lidský život. Při navrhování množství této látky je nutné zohlednit typ polymeru, který je matricí kompozitu. Stejně tak se musí zohlednit množství anorganické výplně, protože tato látka negativně přispívá do palivového obsahu kompozitu.

Hlavní látky, které tvoří ochranu, jsou fosfáty, halogeny a kovové hydroxidy. Jako nejvíce efektivní látky se považují halogenové retardéry, především jejich bromové verze. Jejich nevýhodou však je, že jsou nejvíce nákladné. Účinnost těchto halogenů bývá maximalizování kombinací s látkami působícími společně, neboli tzv. synergními látkami. Takovou nejběžnější synergní látkou je oxid antimonitý, ovšem je velmi drahý a rovněž zvyšuje nebezpečí podílu kouře. Jako nejlepší kompromis mezi retardéry hoření vychází chlorované retardéry. Mohou plnit více funkcí a v tomto pohledu se jeví také levnější. Fosfátové retardéry fungují na takovém principu, že fyzicky oddělují palivo od nezbytného kyslíku v atmosféře, a tím hasí plamen. Téměř všechny fosfáty jsou kapalné estery, které jsou ideální pro gumy, latexové matrice nebo PVC. [11] [16]

## 2.3 Výrobní proces WPC

WPC materiál se vyrábí vícestupňovou technologií. Jedná se o typickou technologii pro plastový průmysl. V prvním stupni se výrobní proces soustředí na vytvoření granulátů, které se standardně mohou vyrábět dvěma způsoby. První, častěji využívaný způsob je extruze. Druhý způsob je protlačování taveniny přes síto. Tento způsob sice není špatnou volbou z pohledu nákladů, ale zároveň není vhodný pro použití ve velkovýrobě. Druhý stupeň výroby se zaměřuje na vytváření samotného výrobku. Nejčastěji jsou využívány tyto tři technologie:

- vstřikování,
- extruze do forem,
- profilace desek.

Mezi nejvíce používané linky se řadí linka vstřikovací neboli injektážní a linka vytlačovací. Oba systémy mají svá pozitiva a negativa. Pro vytlačovací linky se primárně používá protiběžná dvojice šneků, z důvodu vynikajícího tlaku, který mezi šneky vzniká.

Dvojice souběžně rotujících šneků vyniká kvalitní míchací schopností, velkou mírou odplynění a nejvyšší flexibilitou. Právě pro tyto schopnosti zmíněné dva typy nalézají široké využití v technických článcích vícesložkových výrobních procesů. Jednosložková protiběžná dvojice šneků se často využívá pro aglomeraci dřevních vláken a termoplastů, kde je typické pravidelné střídání teplot.

V praxi se můžeme setkat se speciálním typem přístrojových systému, které se využívá pro výrobu WPC materiálů, tzv. in-line systémy (systémy v jedné řadě). Jednotlivé přístroje navazují na sebe a jsou v rámci provozu mezi sebou propojené. [11] [16]

### 2.3.1 Homogenizace

Na začátku homogenizace je nutné mít jednotlivé složky upravené tak, aby byly minimalizovány nežádoucí vlivy způsobené jejich vlastnostmi v neupraveném stavu a snížila se tím celková výrobní zmetkovitost. Homogenizace se provádí pro potřeby velkovýroby extruzí. [16] [11]

#### 2.3.1.1 Příprava a práce s dřevní složkou

Dřevní vlákna bývají často z různých zdrojů, různých zralostí nebo různých druhů dřevin. Tento fakt způsobuje nevyzpytatelnost materiálových vlastností a obsahu vlhkosti. Z toho důvodu je potřeba dopředu definovat vlastnosti použité dřevní moučky a vlákna. Další faktor, který má zásadní vliv na vlastnosti výsledného produktu, je tvar a velikost. Pohybuje se od jemného prášku až po velké třísky. Celkově je toto plnivo posuzováno jako sypký materiál.

Definované vlastnosti sypkého materiálu:

- objemová hmotnost,
- tvar a velikost částic,
- pružnost částic,
- tření částic.

Z výše uvedeného vyplývá, že vlastnosti dřevní fáze nelze zevšeobecnit, protože jsou dosti proměnlivé. Jako příklad můžeme uvést objemovou hmotnost, která se

pohybuje v rozmezí od 70-350 kg/m$^3$. Z toho důvodu se považuje za nezbytné testování a konkrétní charakterizování vláken před jejich použitím ve výrobě. [16] [11]

Zpracovaná dřevní složka je nejčastěji uskladňována v pytlech nebo silech a jako taková je specifikována jako výbušný materiál. Důvodem je vysoce vznětlivý prach, jehož částice se při manipulaci s materiálem odlučují a rozpínají se do prostoru. Proto je nutné udržovat systém a jednotlivé stroje v souladu se speciálními požadavky. V zásadě to znamená, že, je eliminována jedna ze tří složek: kyslík, hořlavý materiál a zdroj ohně.

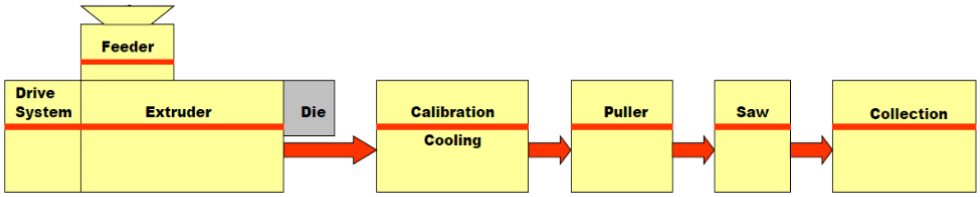
Vhodné řešení přepravy dřevního materiálu je pneumatický systém, ovšem v praxi se častěji používají i mechanické přepravníky, konkrétně pásové dopravníky nebo šnekové dopravníky. Přestože je tvorba prachu z pohledu rizika jeho vznícení stále akceptovatelná, největším omezením je limitovaná dopravní vzdálenost. [11] [16]

#### 2.3.1.2 Příprava a práce s polymerní matricí

Pro dopravu zpracované dřevní složky a termoplastů (sypké materiály) se z pravidla využívá pneumatické systémy. To znamená, že malé částice se přepravují systémem potrubí za pomoci proudu vzduchu. Při navrhování takového systému musíme brát v potaz nejen tlakové ztráty, ale i charakter daného pneumatického systému, tj. zda bude přetlakový, podtlaková či kombinovaný. Tlaková ztráta je ovlivněna především mírou propustnosti zařízení, počtem ohybů a materiálových vlastností dřevní složky a termoplastu. Volba mezi podtlakovým a přetlakovým systémem závisí na tom, jestli bude materiál odebírán z více míst na jedno místo (podtlakový systém), nebo jestli bude materiál dopravován z jednoho místa na více konečných míst. [7] [17]

### 2.3.2 Extruze do forem

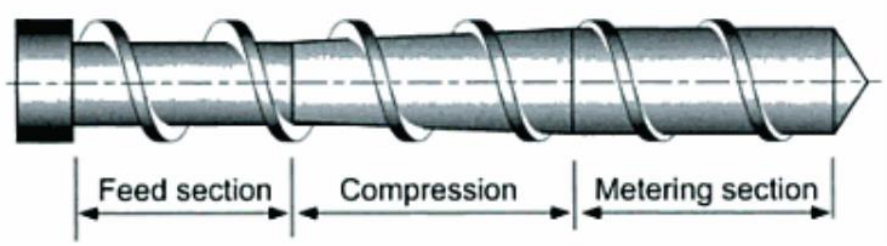
Při výběru výrobního zařízení pro extrudování výrobku z WPC materiálů musíme zohlednit nejen druh výrobku, ale i bázi polymerní matrice. Mezi hlavní rozdíly všech typů výrobních zřízení řadíme uspořádání rotujících vytlačovacích šneků, tedy uvažujeme i na způsobu posuvu taveniny. [16]




**Obr. 17: Schéma výrobního procesu za použití extruderu [4]**

### Jednotlivé šneky a dvojice šneků

Jednotlivé šnekové vytlačovače jsou využívány nejčastěji extrudéry pro všechny profily vytlačování desek a také v rámci technologie vstřikování, která se používá pro zpracování termoplastů, polymerních směsí, kompozitů atd. Materiál na výrobky je dopravován přímo z násypky, a proto zde není potřeba žádný dopravník. [7]




**Obr. 18: Geometrie běžného šroubu extruderu [4]**

Dvoušnekový výtlačný stroj, jak již název napovídá, má dva šneky. Přesto lze říci, že se jedná o velmi obecnou definici, neboť u dvoušnekových extrudérů existuje velká škála výběru. Dvoušnekové extrudery mohou mít různý směr otáčení (stejný nebo protiběžný), různý sklon drážek, kdy závity šneků do sebe zapadající nebo nezapadají apod. Pro lepší představu je rozdělení dvoušnekových extrudérů popsáno v Obrázku č. 19. Výhody dvoušnekových extrudérů oproti jednošnekovým extrudérem jsou snazší dávkování, lepší tavení, kvalitnější disperze, větší flexibilita a dobré odplyňování. [3]

| | | |
|---|---|---|
| Šnekové elementy do sebe zasahují | - Souběžné šnekové elementy | - Nízká rychlost extruderu pro vytlačování<br>- Vysoká rychlost extruderu pro míchání |
| | - Protiběžné šnekové elementy | - Kuželové extrudery pro profily<br>- Paralelní extrudery pro vytlačování<br>- Vysokorychlostní extrudery pro míchání |
| Šnekové elementy do sebe nezasahují | - Protiběžné šnekové elementy | - Stejná délka šroubů<br>- Nestejná délka šroubů |
| | - Souběžné šnekové elementy | - nepoužívá se v praxi |
| | - Koaxiální šnekové elementy | - Transport taveniny vpřed<br>- Transport taveniny zpět<br>- Transport pevných látek dozadu<br>- Transport pastu dozadu |

**Obr. 19: Dvoušnekové elementy [3]**

**Protiběžné dvojice šneků**

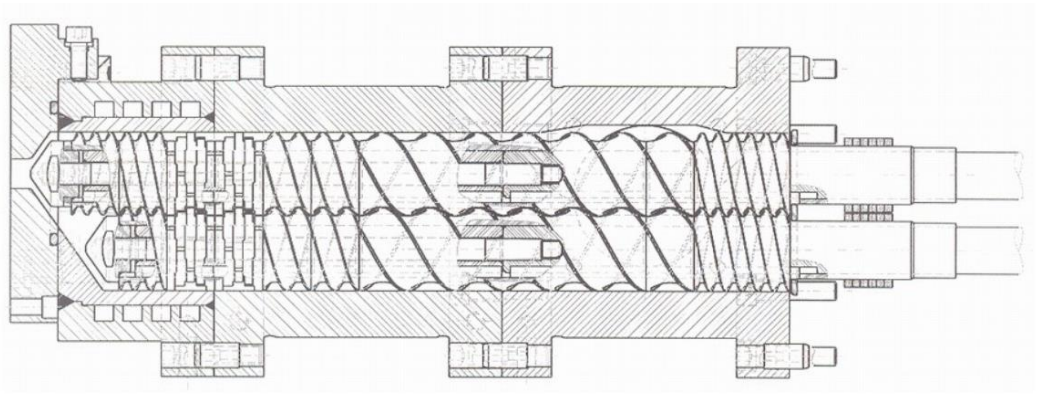
Využití protiběžných dvojic šneku lze nalézt nejčastěji u výroby PVC. Mezi procesní úkony se řadí tavení a vytlačování profilů, přičemž jsou stroje mezi sebou propojeny systémem dopravníků. U tohoto typu dvojic šneků se často využívá aglomeračního zařízení se střídáním teplot. V praxi jsou tyto zařízení (míchačky) užívány pro kompozit složený z polypropylenu (PP) a dřevních vláken. Je to z toho důvodu, že právě u této kombinace, není při využití protiběžných a jednotlivých šneků dostačující příjem a vmísení dřevního vlákna o nízké OH. Tento cyklus míchání trvá 5-10 minut a materiál musí být zahříván na 110-130 °C nebo 160-180 °C, záleží na výrobku. Všechny ostatní přísady kompozitu jsou také přidávány přímo do míchačky. [7] [16]

**Souběžné dvojice šneků**

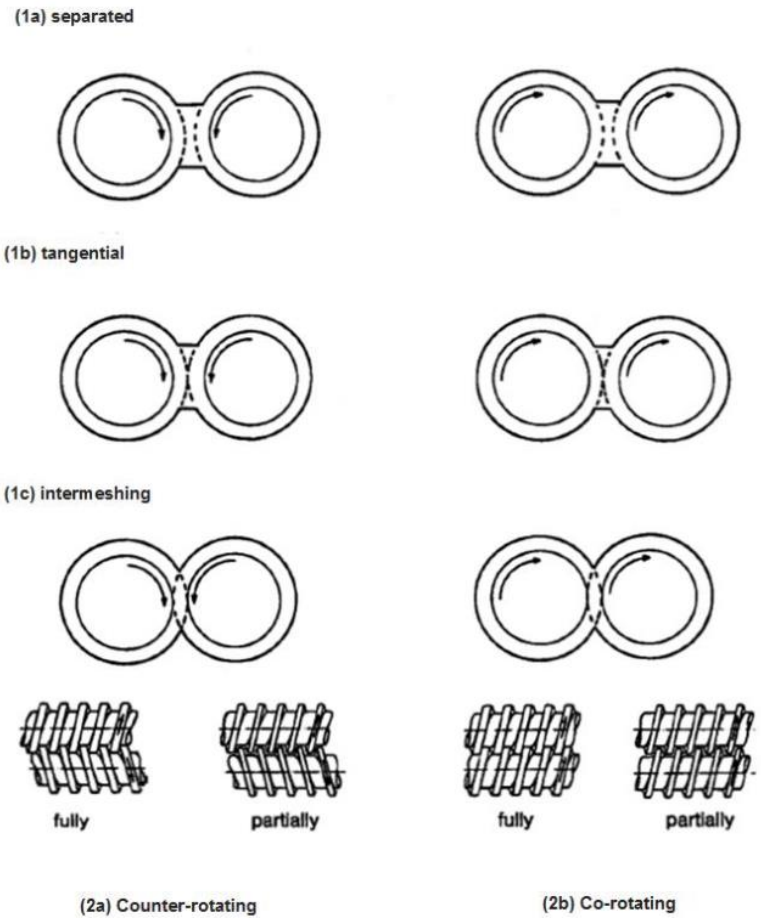
Také tento typ dvojic šneků je hojně využíván v plastovém průmyslu. Od roku 1953 můžeme stroj tohoto typu nalézt pod názvem ZSK. Dnes již existuje ZSK v mnoha podobách. Existují provedení drobná, pro laboratorní účely, nebo provedení obrovská, pro velkovýrobní účely. Tyto stroje dosahují výkonu až 100 tun směsi za hodinu. [7] [16]

*„Termoplast a přísady jsou vkládány do první násypky stroje ZSK. V další části je oblast rozpouštění, v ní jsou polymerní granule taveny pomocí smykové energie zavedené hnětacími bloky. Po zóně rozpouštění je přidáváno dřevní vlákno systémem bočního dávkování. Vlákno je včleněno do taveniny mícháním a hnětením prvku. Po vysušení vlhkosti z dřevního vlákna směs odchází do atmosférického a vakuového odvzdušňovacího portu. Zóna nárůstu tlaku se nachází na konci zpracovatelské části.“* [16]

Nesmíme opomenout, že při začlenění dřevního vlákna do výrobního procesu se do materiálu dostává i velké množství vzduchu. Z toho důvodu je důležité, aby byl dopravník na vlákna odvětráván. V případě, že tomu tak nebude hrozí zablokování zásobníku dřevní hmoty. Vzduch, který nemůže opustit systém proudí zpět proti dopravnímu směru. Jako ochrana proti tomuto jevu je instalace pravoúhlého otvoru na straně dopravního systému do zásobníku. [7] [16]



**Obr. 20: Dvoušnekový extruder [3]**

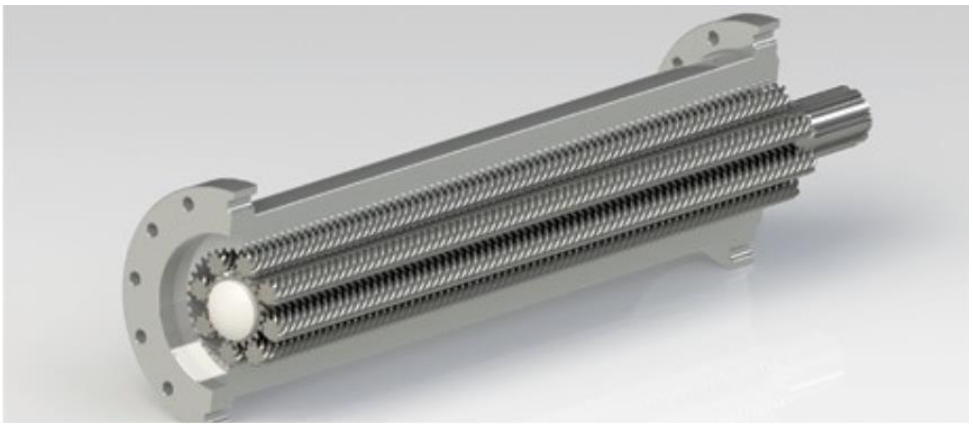



**Obr. 21: Schéma možností umístění a pohybu při použití dvojice šroubů [4]**

**Planetární extruder**

Tento druh extruderu se na první pohled může podobat zařízením s jednotlivým šnekem. Dokonce dávkovací sekce je zde stejná. Ovšem sekce pro míchání je již naprosto odlišná. Proto můžeme princip popsat jako u vícešnekového výtlačného stroje, avšak s centrálním šnekem. Popis planetárního válcového úseku je také značně specifický. Uprostřed je jeden hlavní šroub nazývaný slunce a kolem něj se točí šest a více menších šneků nazývaných planety. Planetové šrouby se prolínají se sluncem, a všechny šrouby musejí mít tudíž totožné drážkování.

V první části se materiál pohybuje stejným způsobem, jako u zařízení s jednotlivým šnekem, tedy dopředu. Jakmile se poté materiál dostane do planetového válce, je velmi intenzivně míchán pomocí valivého působení sil mezi planetovým šroubem a stěnou. Takto se vytvoří tenké vrstvy materiálu mezi planetovými šrouby a stěnou, které jsou dobré pro výměnu tepla a odstranění těkavých látek. Spirálová konstrukce slunce a planet disponuje velkou povrchovou plochou na míchání. Hlavní výhoda tohoto typu extruderu je, že materiály intenzivně citlivé na teplo mohou být zpracovány s minimem degradací. Také tento typ se často používá na výrobu PVC. [3]



**Obr. 22: Planetární extruder [3]**

### 2.3.3 Vstřikování

Jde o tzv. standartní vstřikování již předem smíšeného WPC materiálu. Většina těchto strojů disponuje samostatnými šneky. Tavenina je pomocí hydrauliky vytlačena za působení pohybů šneků do formy instalované v upínacím stroji. Jelikož má jeden šnek odplyňovací funkci, musí být v předem smíchaném WPC materiálu velmi nízký obsah vlhkosti. Minimalizuje se tak riziko povrchových vad u výrobku. [7] [16]

Faktory ovlivňující kvalitní vstřikování WPC materiálů:

*„• Kvalita plastu:*

*o homogenizace,*

*o nízký obsah vlhkosti (pod 0,15 %, měřeno pomocí infračerveného zkušebního zařízení).*

*• Jednotka vstřikování plastů a zpracování:*

*o sekce odplynění,*

*o teplotní profil přizpůsobený WPC,*

*o rychlost vstřikování přizpůsobena WPC, snížená smyková rychlost.*

*• Teplotní profil návrhu:*

*o návrh potrubí a rozložení tavných kanálků musí být upraveno tak, aby bylo nižší smykové napětí na materiálu.*

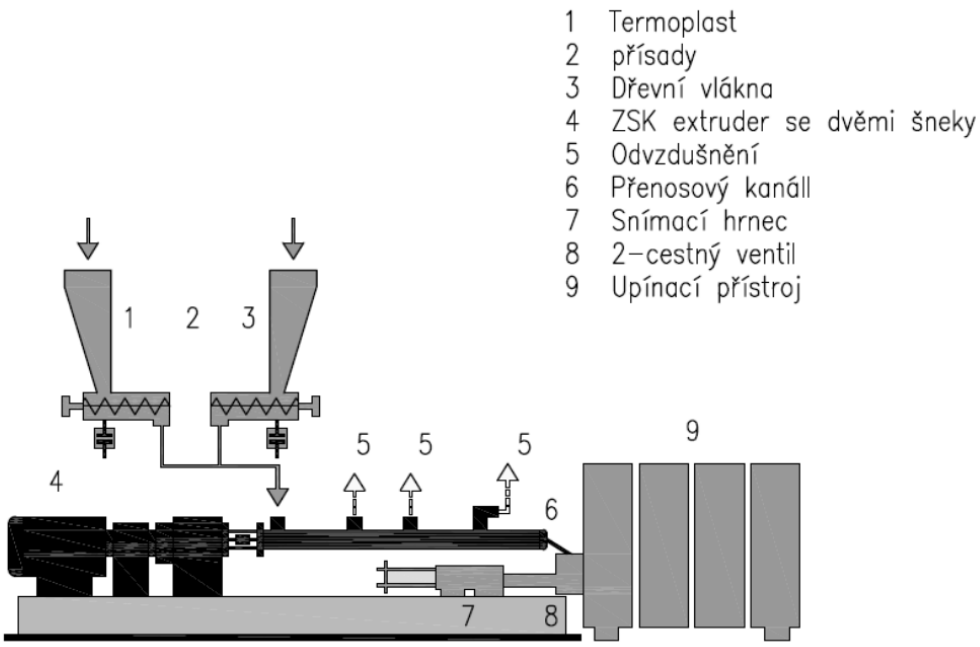
*o umístění a rozložení ohřívačů v oběžníku musí být navrženo tak, aby žádná oblast nezpůsobovala přehřátí.*

*• Návrh formy:*

*o geometrie má vliv na smykovou rychlost během vstřikování,*

*o odvzdušnění formy.“* [17]

Injektáž můžeme rozdělit do dvou částí. První část zaměřena na standardní vstřikování s dopředu smíchanými materiály. Druhá část je pak zaměřena na vícesložkové vstřikování v jednom kroku. Jedná se o velmi ekonomické systémy pro vstřikování větších dílců s dávkovou hmotností 1 kg a více. V tomto případě, kdy je termoplast roztaven pouze jednou, je sníženo i teplotní namáhaní na daný materiál. [7] [16]




**Obr. 23: Schéma pro in-line složení výrobní linky pro vstřikování [11]**

### 2.3.4 Profilace desek

Profilace desek probíhá mezi dvěma válci nebo na dvoj-pásovém lisu. Profilace mezi dvěma válci se využívá pro tloušťky desek menších než 6 mm a při tloušťkách nad 6 mm se využívá dvoupásový lis.

V prvním případě se systém skládá ze tří chlazených rolí. Tavenina prochází přímo mezerou mezi dvěma dolníma válci a poté je jedna její polovina navinuta kolem středu horní role do té doby, než se materiál ochladí. Po vychlazení přichází krácení na požadované velikosti.

V druhém případě se obvykle tavenina přivádí na stůl na začátku lisu. Systém poté nabízí dvě možné procesní varianty:

- vytápění a chlazení,
- chlazení.

Chladící dvou-pásový lis přítlakem materiál pouze ochlazuje. Při této variantě výrobního postupu (za použití topení a chlazení) je princip výroby založen na faktu, že na přední straně může být lepení provedeno udržováním taveniny při současném lisování. Dvou-pásový lis se tedy využívá při výrobě hrubších profilů WPC, jelikož desky nejsou

při ochlazování ohýbány. Tento lis se vhodný pro speciální aplikace s povrchovými vrstvami, proto je ideální pro laminování. [7] [16]

# 3 Metodika práce a metody zkoumání

## 3.1 Příprava vzorků

Předmětem zkoumání bylo pět druhů různých WPC materiálů. Jednotlivé druhy se lišily svým složením a způsobem výroby. Hlavní podnět pro zkoumání vzešel od firmy Plastic two a.s., která chtěla porovnat nově vytvořený materiál s ostatními komerčními materiály, jež jsou již běžnou součástí trhu. V Tabulce č. 1 a 2 je uvedena specifika jednotlivých materiálů.

**Tab. 1: Identifikace vzorků I**

| Pracovní označení | Lignocelulózová materiál | Plast | Podíl plastu | Podíl LC | Podíl aditiv | Barvivo | Povrch |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | stonky řepky, | PE | 50 % | 38 % | 12 % | žádné | nebroušený |
| 2 | dub | PE | 30 % | 58 % | 12 % | hnědé | nebroušený |
| 3 | dub | PE | 30 % | 58 % | 12 % | oranžové | nebroušený |
| 4 | dub | PE | 30 % | 58 % | 12 % | černé | nebroušený |
| 5 | teak | PE | 30 % | 58 % | 12 % | červené | broušený |

**Tab. 2: Identifikace vzorků II**

| Pracovní označení | Výrobce | Hustota 0 (kg/m$^3$) | Vizuální ukázka |
|---|---|---|---|
| 1 | Plastic Two a.s. | 1028.74 | |
| 2 | Plastic Two a.s. | 1351.90 | |
| 3 | Plastic Two a.s. | 1356.74 | |
| 4 | Plastic Two a.s. | 1332.57 | |
| 5 | Plastic Two a.s. | 1358.92 | |

Materiál č. 1 tedy reprezentoval hlavní předmět zkoumání, a to WPC materiál tvořený ze stonků řepky ozimé. Tento druh WPC materiálu se od ostatních lišil nejenom v LC složce, ale i v poměru hlavních složek. Plast v tomto případě nabýval hodnot 50 %, LC materiál 38 %. Ostatní druhy WPC materiálů byly složené ze dřeva a plastu v poměru 58 %:30 %. Tři materiály (č. 2, č. 3 a č. 4) vycházely z dřevní složky původem z dubu a materiál č. 5 z dřeviny teak, ten se oproti ostatním materiálům navíc lišil broušenými plochami.

Měření probíhala od nedestruktivních k destruktivním. Nejprve se zrealizovala měření na lesk, povrchovou smáčivost a drsnost a jako poslední proběhlo měření bobtnání. Po tomto měření již byly vzorky znehodnoceny, a tudíž neadekvátní k dalšímu měření. Měření probíhala v dostatečném počtu a rozměru pro danou zkoušku. Po celou dobu byla potřebná manipulace a úprava vzorků WPC materiálů prováděna ve školní truhlárně nejčastěji za pomoci kotoučové pily.

Prvotní rozměry všech pěti vzorků od každého druhu WPC materiálu byla stejná ve dvou různých směrech (viz Obrázek č. 24). Délka vzorků byla 250 mm a šířku 50 mm. Pouze tloušťka byla u každého druhu WPC různá, neboť každý materiál výrobce vyrábí v trochu jiné tloušťce.

**Obr. 24: Ukázka vzorků pro měření lesku, drsnosti a smáčivost**

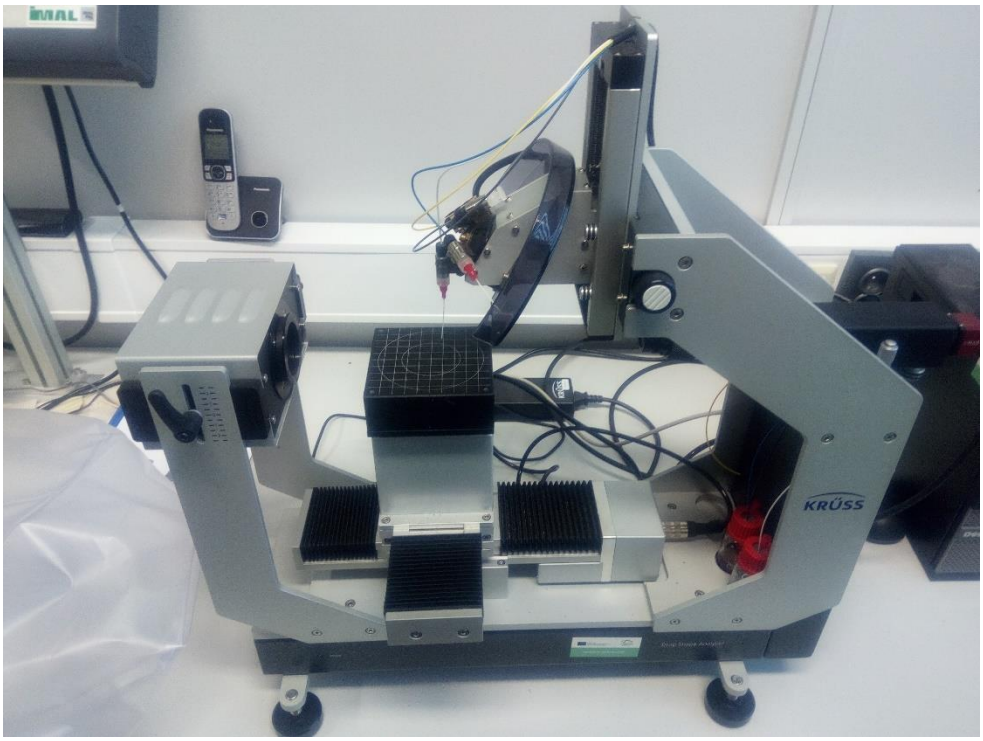
Před zkouškou bobtnání byly vzorky upraveny na potřebné rozměry, které byly odlišné od předchozích rozměrů vzorků. V tomto případě vzorky s délkou 50 mm a šířkou 15 mm. Tloušťka byla opět vázána na typu materiálu.

## 3.2 Měření lesku a povrchová smáčivost

Měření lesku bylo prováděno na základě vědeckého článku publikovaného v časopise Coatings [18] pomocí leskoměru KSJ F2 series Glossmeter (viz Obrázek č. 25). Všechna měření byla provedena při úhlu 60° a v rozsahu 0,0 – 199,9 GU. Při tomto nastavení výrobce uvádí odchylku měření stroje ± 1,5 GU. [18]

**Obr. 25: Ukázka měření lesku**

Dále byl zkoumán vliv varianty na kontaktní úhel s vodou. Úhel kontaktu vody na plochách vzorků WPC byl měřen pomocí goniometru Krüss DSA 30E (Krüss, Hamburg, Německo). Ukázce goniometru se věnuje obrázek č. 26. Existují i další metody, kterými lze měřit úhel styku vody na dřevěných plochách. Metoda měření kontaktního úhlu kapky byla použita ke srovnání smáčivosti různých druhů materiálu. Všechna měření byla provedena v laboratorních podmínkách s destilovanou vodou s dávkovacím objemem kapky 5 µl. Stejně jako v jiných studiích byla měření kontaktního úhlu provedena po 5 s po uložení vodní kapky na povrch. [18]

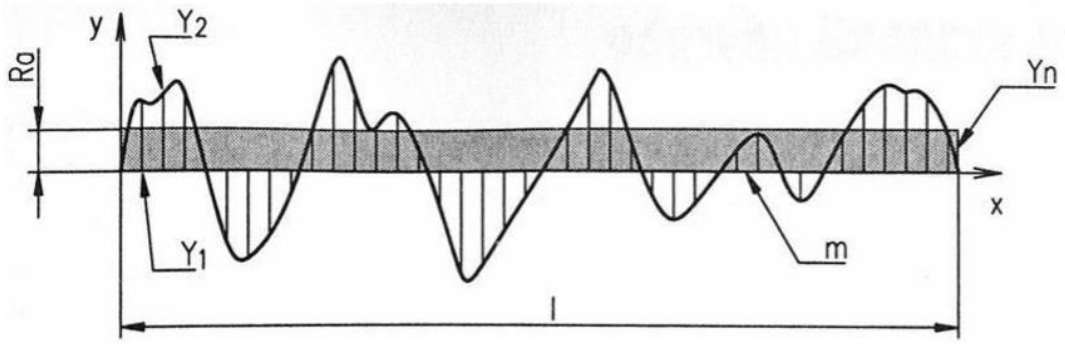



**Obr. 26: Goniometr Krüss DSA 30E**

Měření bylo provedeno ve třech různých pozicích na každém vzorku, celkem bylo naměřené 30 hodnot od každé varianty, a naměřená data byla ihned zapisována do počítačového programu Excel. Vše proběhlo v laboratorních podmínkách.

## 3.3 Měření drsnosti

Použitý měřicí přístroj byl dotykový indukční profilometr Form Talysurf Series Intra 2 (viz Obrázek č. 28). Tento přístroj má úchylku přímosti 0,4 μm na 50 mm. Výrobce uvádí, že chyba měření profilometru je ±2 %. Kvalita povrchu byla hodnocena podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999) pomocí tří veličin Ra, RSm a Rz. Délka cut off byla 2,5 mm; vyhodnocovaná délka byla 12,5 mm; rozběh a doběh raménka 0,3 mm a poloměr raménka byl 2 μm. Pro zajištění maximální stability profilometru a zajištění proti chvění byl profilometr instalován na leštěné mramorové desce, která ležela na stabilním pracovním stole. Pomocí úhelníku byla nastavena taková poloha profilometru vůči měřenému vzorku, aby snímání profilu probíhalo rovnoběžně nebo napříč výrobního směru. [19] [20]




**Obr. 27: Měření drsnosti povrchu – parametr Ra [20]**

**Obr. 28: Drsnoměr Form Talysurf Series Intra 2**

## 3.4 Měření bobtnání

Měření přírůstků objemu, váhy a rozměrů probíhalo na základě normy ČSN EN 317 (490166). Vzorky byly vysušeny na vlhkost 0 %, přeměřeny a označeny. Dále byly zcela ponořeny do nádoby s vodou a tam byly až do maximálního nasycení. Následně byly vzorky opět přeměřeny. Veškeré měření probíhalo v laboratorních podmínkách a výsledky byly zaznamenávány a vyhodnocovány pomocí počítačového programu Excel. Přístroje, které se během měření využívali, jsou vyobrazeny v Obrázku č. 29 a Obrázku č. 30.

**Obr. 29: Nástroje použité pro měření rozměrů a hmotnosti**

**Obr. 30: Sušička Memmert**

## 3.5 Statistické zpracování dat

Pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků byla použita vícefaktorová analýza rozptylu v softwaru Statistica 12. Tato analýza rozptylu hodnotí účinky jednotlivých faktorů a jejich vzájemných kombinací. K tomuto ohodnocení účinku

jednotlivých faktorů i jejich vzájemnou kombinací byl použit Fisherův F-test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. F-test na základě hladiny významnosti P stanoví, zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný. Podle hodnoty P lze testovaný faktor ohodnotit takto:

- $P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky významný,
- $P > 0,05$ vliv faktoru není statisticky významný,
- $P = 0,05$ vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti,
- $P = 0$ faktor působí,
- $P < 0,001$ vliv faktoru je statisticky velmi významný,
- $0,001 < P < 0,01$ vliv faktoru je statisticky středně významný,
- $0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný. [24]

# 4 Výsledky práce a diskuse

## 4.1 Výsledky lesku a smáčivosti povrchu

Pro lepší hodnocení výsledků byly naměřené hodnoty každého materiálu charakterizovány aritmetickým průměrem, variačním koeficientem a uvedeny v tabulce (viz Tabulka č. 3).

**Tab. 3: Naměřené hodnoty lesk a kontaktní úhel**

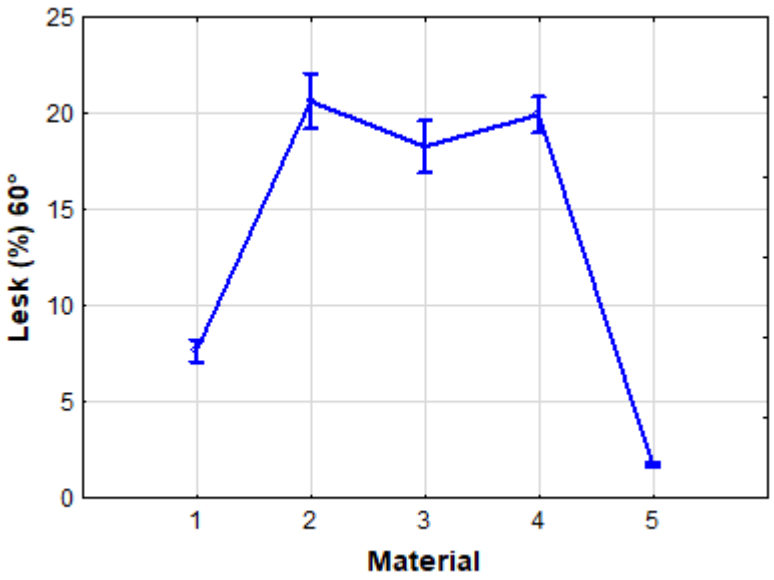
| Materiál | Lesk (%) 60° | | Kontaktní úhel (°) | |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 7,7 | (12,11) | 77,5 | (15,22) |
| **2** | 20,6 | (12,67) | 88,9 | (6,78) |
| **3** | 18,3 | (11,06) | 91,4 | (6,41) |
| **4** | 19,9 | (2,88) | 91,0 | (10,03) |
| **5** | 1,7 | (12,23) | 104,1 | (10,80) |

Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (CV) v %.

Hlavní zkoumaný WPC materiál z řepky ozimé disponuje oproti ostatním komerčním WPC materiálům nižším leskem. Díky stonkům řepky ozimé a především jejich větším částem získává povrch drsnější charakter a není tudíž tolik lesklý. Materiál č. 5 také vykazuje nižší hodnotu lesku, což je však způsobené tím, že tento WPC materiál je již od výrobce zbroušený a oproti ostatním jeho povrch tvoří drsná a matná struktura.

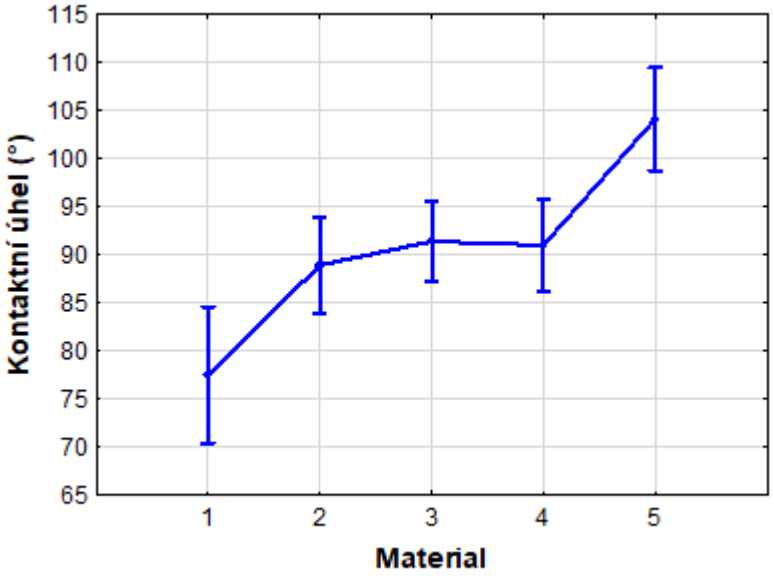
Kontaktní úhel materiálu č. 1 vykazuje nejnižší hodnoty. Tzn. že povrchová energie tohoto materiálu je nejnižší ze všech zkoumaných variant. Z toho vyplývá, že se jedná o nejméně hydrofobní materiál ze všech zkoumaných druhů. Naopak hydrofobní povrch má materiál vyrobený z dřeviny teak. To je způsobené jak dřevinou, tak i zvolenými aditivy.

Výsledky jsou pro lepší porozumění a představu převedeny i do podoby grafů. Naměřeným hodnotám pro lesk v % se věnuje Obrázek č. 31 a naměřeným hodnotám pro lesk v ° se věnuje Obrázek č. 32.




**Obr. 31: Naměřené hodnoty pro lesk v %**

Jak lze vyčíst z grafu, rozptyl lesku vzorku č. 1 a č. 5 je menší, a tak je lesk po celé zkoumané ploše všude přibližně stejně stabilní. U materiálu č. 2 a č. 4 se naměřené rozptyly hodnot překrývají, a proto jsou vůči sobě v tomto ohledu nevýznamné.




**Obr. 32: Naměřené hodnoty pro lesk v °**

Zde lze vidět, že hodnoty vzorku č.1 a vzorku č. 2 se lehce překrývají. Rozdíl mezi variantami 1 a 2 je statisticky významný (viz Příloha č. 2).

Materiály č. 2, č. 3 a č. 4 se pohybují ve stejných rozptylech a hodnotách a z toho vyplývá jejich statistická nevýznamnost mezi sebou.

Dále byla vyhodnocena statistická významnost parametrů, které měli vliv na materiály v kombinaci s danou fyzikální vlastností (viz Příloha č. 1). Všechny možné variace všech WPC materiálů a jejich statistické významnosti byli porovnány pomocí Duncanova testu (viz Příloha č. 2).

Pro lesk bylo, po zhlednutí výsledků Duncanova testu zjištěno, že rozdíly téměř mezi všemi materiály jsou navzájem statisticky významné. Pouze v jediném případě to nemůžeme říci, a to v případě kdy porovnáváme materiál č. 3 a materiálem č. 2, jak je dobře patrné z grafů.

Pro kontaktní úhel jsou rozdíly odlišné. Významnost se různorodě liší a pouze v případě, že porovnáváme jakýkoliv materiál s materiálem č. 1, jsou všechny výsledky statisticky významné, totéž platí pro materiál č. 5.

Celkově lze prohlásit, že volba lignocelulózového materiálu ze stonků řepky ozimé má negativní vliv na lesk, ale stále ne v takové míře jako by kdyby byl povrch materiálů broušený.

## 4.2 Výsledky drsnosti

Výsledky jsou opět patřičně charakterizovány a zaznamenány v tabulce (viz Tabulka č. 4). Měření proběhlo ve dvou různých směrech. První měření proběhlo podélně s výrobním směrem materiálu (v Tabulce č. 4 označeno jako „po směru“) a druhé kolmo na směr výrobního směru (v Tabulce č. 4 označeno jako „kolmo na směr“). Byly hodnoceny tři základní charakteristiky drsnosti, střední aritmetická odchylka profilu (Ra), vzdálenost prvků profilu (RSm) a největší výška profilu (Rz).

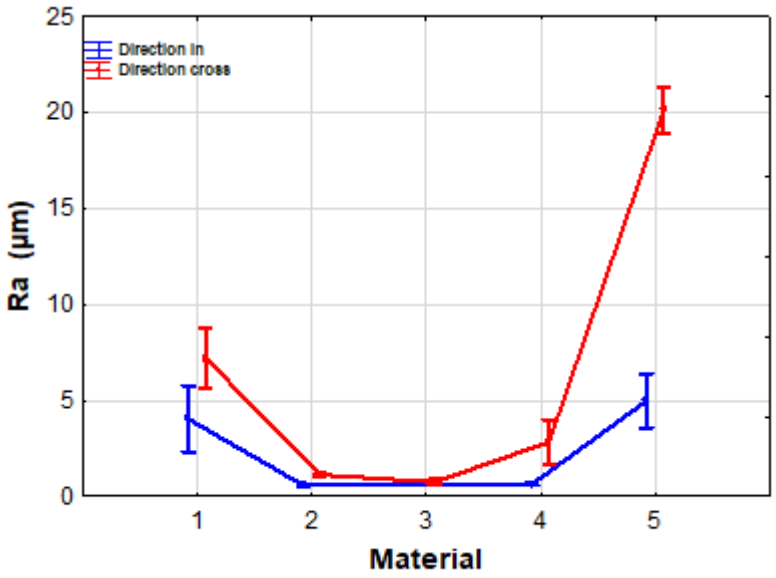
**Tab. 4: Naměřené hodnoty pro drsnost**

| Materiál | Směr | Ra (µm) | | RSm (µm) | | Rz (µm) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **po směru** | 4,0 | (20,48) | 25,5 | (8,98) | 4,7 | (12,25) |
| **2** | **po směru** | 0,6 | (10,04) | 4,7 | (11,50) | 5,1 | (15,49) |
| **3** | **po směru** | 0,7 | (10,79) | 5,1 | (5,10) | 5,2 | (10,07) |
| **4** | **po směru** | 0,7 | (9,57) | 5,2 | (12,80) | 36,0 | (9,35) |
| **5** | **po směru** | 5,0 | (16,93) | 36,0 | (19,76) | 48,3 | (12,66) |
| **1** | **kolmo na směr** | 7,2 | (20,80) | 48,3 | (16,94) | 6,6 | (10,73) |
| **2** | **kolmo na směr** | 1,1 | (5,92) | 6,6 | (21,83) | 5,9 | (7,13) |
| **3** | **kolmo na směr** | 0,8 | (19,28) | 5,9 | (19,88) | 12,9 | (19,70) |
| **4** | **kolmo na směr** | 2,8 | (19,10) | 12,9 | (15,78) | 101,9 | (17,56) |
| **5** | **kolmo na směr** | 20,1 | (5,58) | 101,9 | (13,25) | 25,5 | (4,37) |

Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (CV) v %.

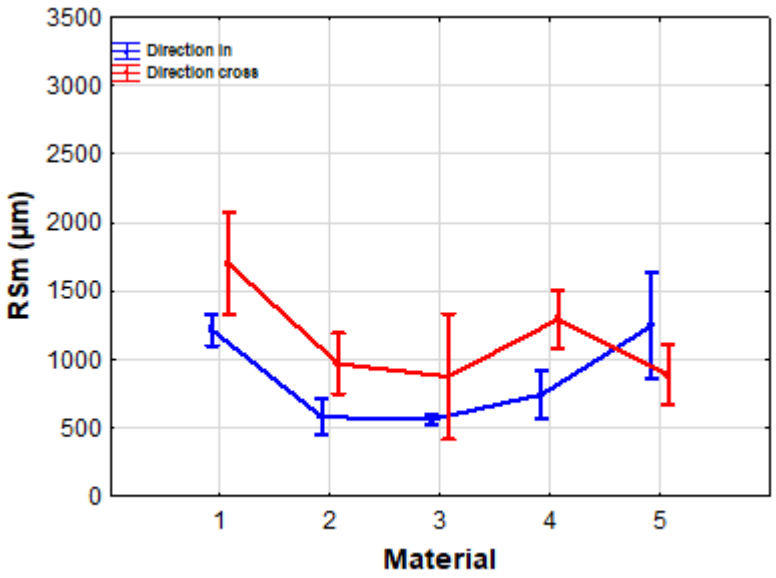
Z výsledků vyplívá, že WPC materiál tvořený řepkou ozimou, má drsnější povrch než zbytek komerčních materiálů. Pouze poslední materiál č. 5 vykazuje naměřené hodnoty ještě vyšší, ale to je způsobené broušením materiálu. Dřevní složka u komerčních materiálů se nejčastěji zpracovává z dřevního vlákna a má tedy i jemnější charakter než zpracované třísky ze stonků řepky ozimé. Z tohoto důvodu je možné prohlásit, že dřevo/plast WPC materiály mají jemnější strukturu a tím pádem i povrch materiálu je hladší a méně drsný. WPC materiálu z řepky ozimé, má povrch zdrsněn právě díky kouskům stonků řepy ozimé, které jsou jeho součástí.

Shrnutí výsledků v grafech. Naměřeným hodnotám pro střední aritmetickou odchylku profilu se věnuje Obrázek č. 33, naměřeným hodnotám pro průměrnou vzdálenost prvků profilu se věnuje Obrázek č. 34 a naměřeným hodnotám pro nejvyšší výšku profilu se věnuje Obrázek č. 35



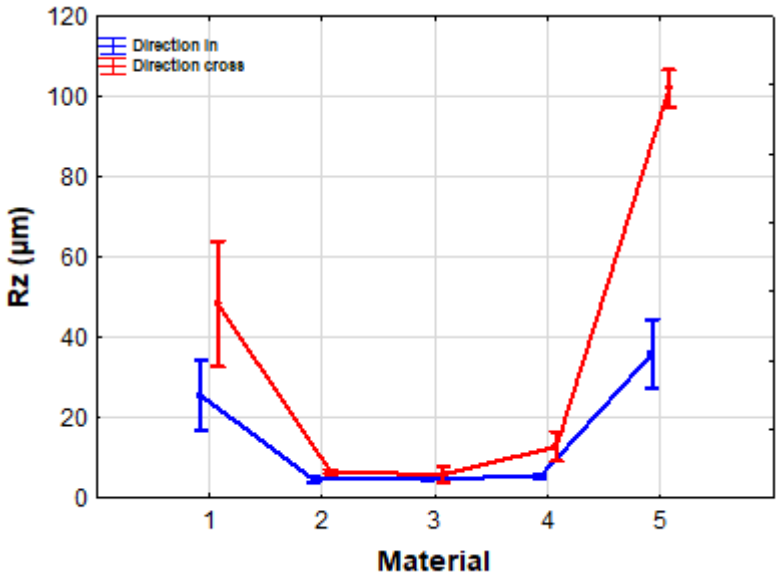

**Obr. 33: Naměřené hodnoty pro střední aritmetickou odchylku profilu**

Střední aritmetická odchylka materiálu č. 1 se v různých směrech příliš neliší, dokonce některé hodnoty se překrývají a jsou stejné. Přesto je tento celkový rozptyl největší ze všech nebroušených materiálů.




**Obr. 34: Naměřené hodnoty pro průměrnou vzdálenost prvků profilu**

Téměř všechny vzorky mají zpravidla průměrnou vzdálenost prvků vetší ve směru kolmo na směr materiálu. Rozptyly jsou také větší v tomto směru. Jedinou výjimku reprezentuje materiál č. 5. Zde jsou výsledky odlišné, pravděpodobně opět z důvodů obroušených stran, a tudíž jiného povrchu.




**Obr. 35: Naměřené hodnoty pro nejvyšší výšku profilu**

Výška profilů materiálu č. 1 je vyšší než u komerčních materiálů. Je to způsobeno použitím lignocelulózového materiálu v podobě stonků řepky ozimé a přítomností jejich částic na povrchu. Také jeho velký rozptyl je tímto ovlivněn. Materiál č. 5 má opět zcela

jiné výsledky. Lze tedy tvrdit, že úprava povrchu finálního materiálu má zásadní vliv na drsnost.

Vyhodnocení faktorů statistické významnosti pro Ra je věnována Příloha č. 3. Porovnání rozdílů pro všechny druhy naměřené drsnosti a všech variant materiálů pomocí Duncanova testu je věnována Příloha č. 4:

## 4.3 Výsledky bobtnání

Celkové shrnutí naměřených výsledků, v tomto případě přírůstků, lze nalézt v Tabulce č. 5. Výsledky jsou opět charakterizovány aritmetickou hodnotou a variačním koeficientem (hodnoty v závorkách).

**Tab. 5: Naměřené přírůstky všech zkoumaných materiálů**

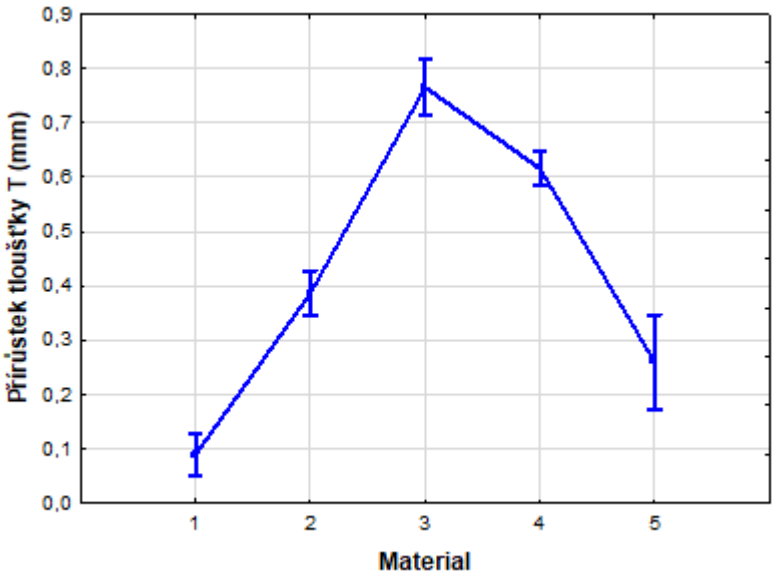
| Materiál | Přírůstek tloušťky T (mm) | Přírůstek šířky Š (mm) | Přírůstek délky L (mm) | Přírůstek hmotnosti H (g) | Přírůstek objemu V (mm3) | Přírůstek hustoty Ro (g/mm3) | Přírůstek vlhkosti Wa (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 0,1 (12,9) | 0,0 (141,9) | 0,0 (341,2) | 0,1 (6,5) | 38,1 (3,9) | 8,9 (8,1) | 1,7 (6,6) |
| **2** | 0,4 (22,8) | 0,2 (15,4) | 0,1 (79,4) | 0,3 (6,4) | 192,8 (14,8) | 5,4 (4,9) | 4,8 (6,4) |
| **3** | 0,8 (14,4) | 0,3 (11,4) | 0,1 (57,7) | 0,5 (4,8) | 364,8 (8,0) | -4,4 (3,5) | 7,6 (4,9) |
| **4** | 0,6 (11,3) | 0,3 (9,8) | 0,1 (55,7) | 0,4 (4,4) | 312,8 (8,3) | 2,7 (2,7) | 7,0 (4,8) |
| **5** | 0,3 (71,5) | 0,5 (18,9) | 0,2 (29,3) | 0,1 (6,5) | 38,1 (3,9) | 8,9 (8,1) | 1,7 (6,6) |

Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (CV) v %.

Výsledky měření indikují pozitiva a výhody pro hlavní zkoumaný materiál č. 1. Ze srovnání všech možných druhů přírůstků je patrné, že kromě přírůstku hustoty disponuje WPC materiál z řepky ozimé nejmenšími přírůstky. Důvody lepší odolnosti vůči vlhkosti jsou dva. První je, že materiál č. 1 obsahuje procentuálně více plastů a plast v kontaktu s vodou absorbuje vodu výrazně méně než dřevo, a druhý důvod je, že řepka ozimá jako lignocelulózový materiál díky voskovým substancím na povrchu méně přijímá vlhkost, a proto WPC materiály hlavních složek dřevo/plast bez dalších různých lignocelulózových plniv více bobtnají. Jako alternativa pro ekologičtější řešení, při použití menší plastové složky, by bylo využití více lignocelulózové složky ovšem s efektivnější volbou aditiv nebo zvýšením jejich podílu.

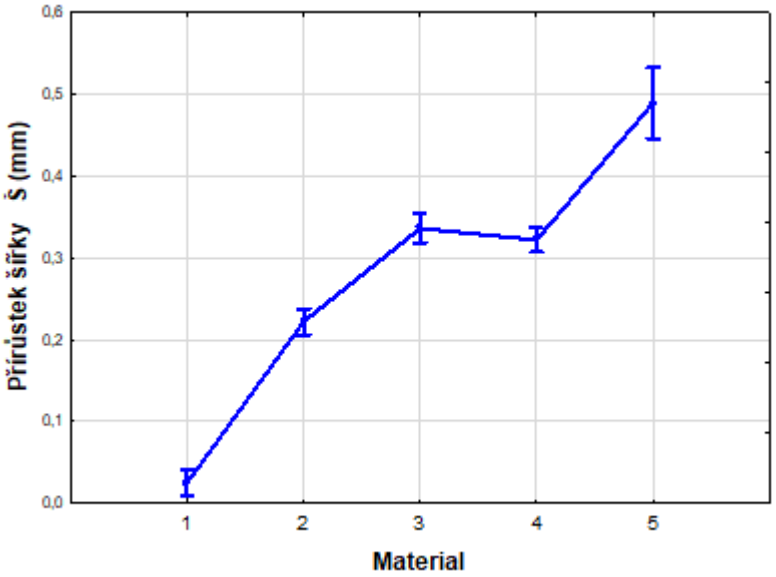
Pro lepší vizuální představu slouží následující grafické zpracování výsledků. Přírůstku tloušťky v mm se věnuje Obrázek č. 36, přírůstku šířky v mm se věnuje Obrázek č. 37, přírůstku délky v mm se věnuje Obrázek č. 37, přírůstku hmotnosti v g se věnuje Obrázek č. 38, přírůstku objemu v $mm^3$ se věnuje Obrázek č. 39, přírůstku hustoty v

g/mm$^3$ se věnuje Obrázek č. 40, přírůstku objemu v mm$^3$ se věnuje Obrázek č. 41 a přírůstku hustoty v g/mm$^3$ se věnuje Obrázek č. 42.



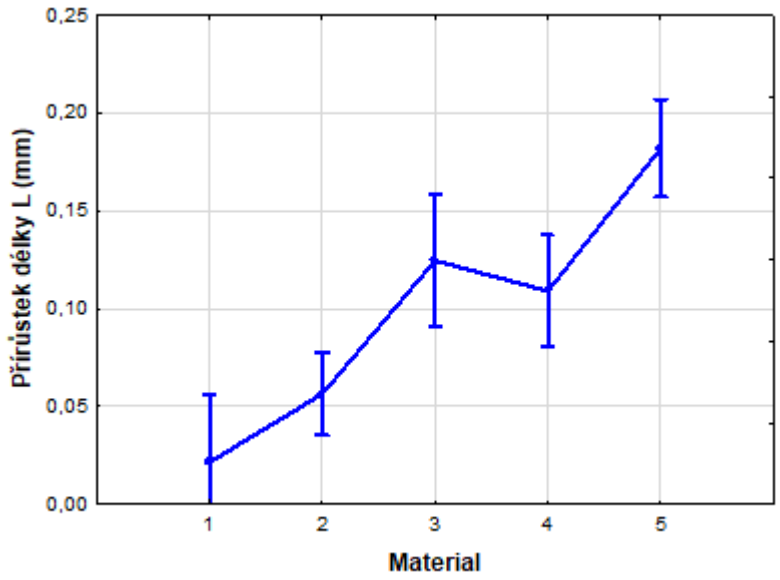

**Obr. 36: Přírůstek tloušťky v mm**

Statistická významnost je zde na první pohled jasná u všech zkoumaných vzorků. U materiálu č. 5 lze vidět největší rozptyl způsobený volbou dřeviny teak. Ostatní dřeviny disponují rozptylem téměř dvojnásobně menším.



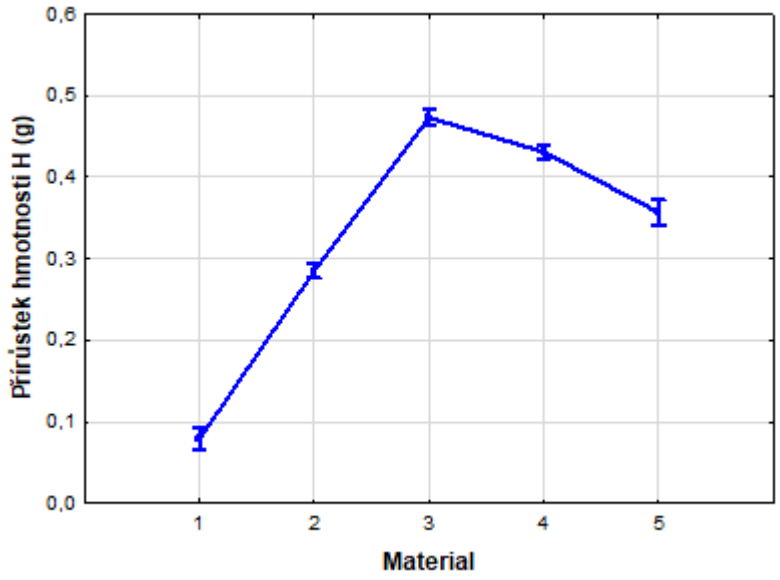

**Obr. 37: Přírůstek šířky v mm**

Opět lze vidět větší rozptyl, a tedy větší nestabilita u materiálu s lignocelulózovým materiálem v podobě teaku.



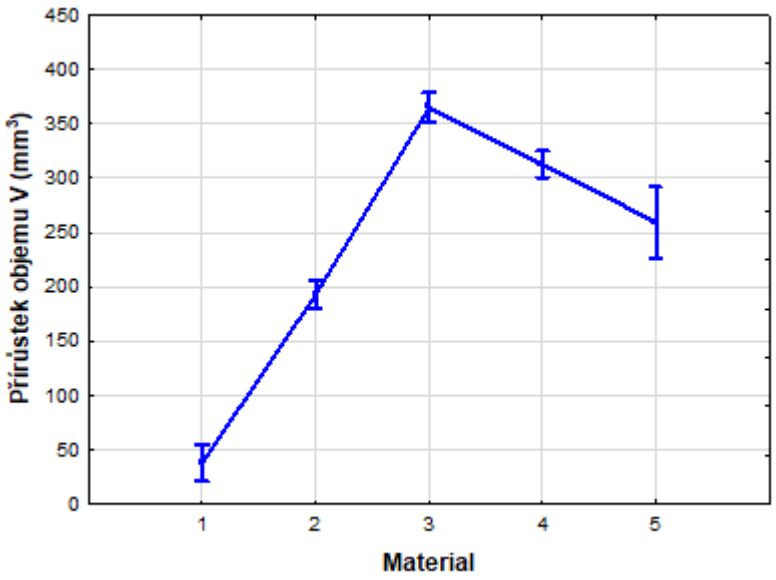

**Obr. 38: Přírůstek délky v mm**

Zde jsou již rozptyly dost podobné a podruhé v řadě má materiál č. 5 největší přírůstek. Proto lze prohlásit, že materiály vyrobené z dřevin teaku nedosahují takových výsledků jako materiály z dubu.



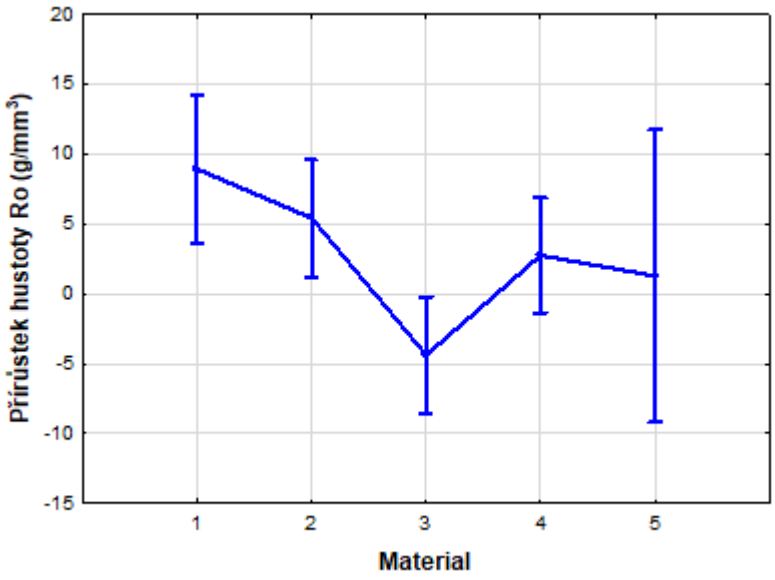

**Obr. 39: Přírůstek hmotnosti v g**

Jak je známo plast přijímá méně vody než dřevo, a proto materiál č. 1 vykazuje nejmenší nárůst hmotnosti. V našem případě dále podpořené lignocelulózovým materiálem v podobě stonků řepky ozimé.



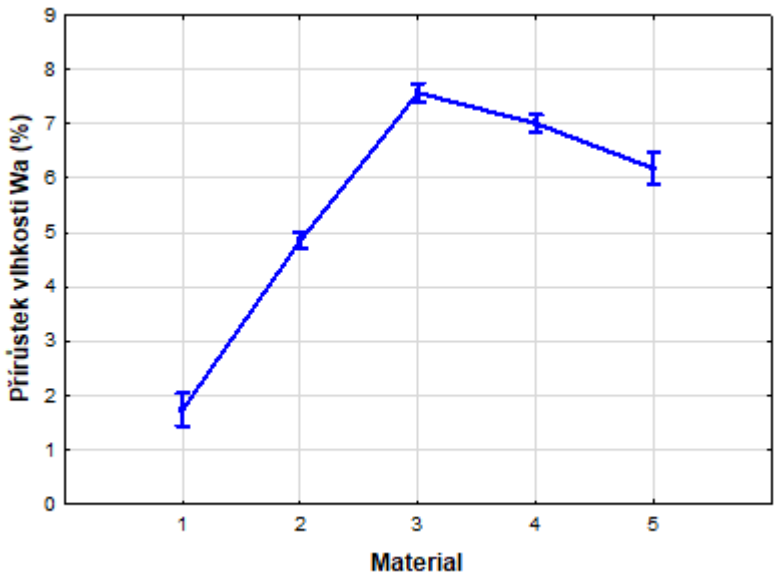

**Obr. 40: Přírůstek objemu v mm$^3$**

Velice podobné předchozímu grafu, a proto i důvody lze prohlásit za stejné.




**Obr. 41: Přírůstek hustoty v g/mm$^3$**

Rozptyl materiálu tvořeného dřevinou teak je opravdu velký a obsahuje téměř celý rozptyl všech ostatních a opět nám potvrzuje jeho velkou nevyzpytatelnost. Zajímavé je, že i u materiálu č. 3, který jako jediný zástupce vykazuje pouze záporné hodnoty, hustota klesla.




**Obr. 42: Přírůstek vlhkosti v %**

Opět se potvrzuje, že WPC s vyšším obsahem plastu a z jiných lignocelulózových materiálů lepé odolává vlhkosti. Zajímavé je, že materiál č. 2, který je vyrobený ze stejné dřeviny jako materiál č. 3 a č. 4, má v porovnání s ostatními dvěma vzorky přírůstek vlhkosti menší. Příčinou je volba více hydrofobních aditiv.

Vyhodnocení faktorů statistické významnosti pro přírůstek objemu, přírůstek hustoty a přírůstek vlhkosti je věnována Příloha č. 5.

Porovnáním pomocí Duncanova testu se věnují Přílohy č. 6–12.

Z porovnání nám vychází, že každý výrobek reagoval odlišně na přírůstek tloušťky a statistická významnost se vyskytuje mezi všemi materiály (viz Příloha č. 6). Totéž platí i u přírůstku šířky. Pouze kombinace materiálu č. 3 a materiálu č. 4 jsou vůči sobě nevýznamné a i jejich přírůstky jsou si podobné (viz Příloha č. 7). Stejná situace se poté opakuje u přírůstku délky (viz Příloha č. 8). Z porovnání přírůstku hmotnosti vychází opět statistická významnost mezi všemi materiály a každý materiál reaguje jinak (viz Příloha č. 9). Situace se opakuje i pro porovnání objemu, tedy každý materiál vykazuje rozdílné přírůstky a u všech se vyskytuje statistická významnost (viz Příloha č. 10). Pouze u porovnání přírůstků hustoty se situace otáčí. Téměř všude vychází z porovnání statistická nevýznamnost, přírůstky jsou si tudíž podobné a jejich rozptyly se překrývají. Jelikož toto vychází u porovnání pěti různých materiálů, lze prohlásit, že hustotu WPC materiálů lze těžko ovlivnit (viz Příloha č. 11). V porovnání přírůstku vlhkosti se výsledky vrací zpět

do předešlého trendu a statistická významnost existuje mezi všemi materiály a to s P hladinou téměř nulovou. Každý materiál reaguje na přírůstek vlhkosti zcela odlišně (viz Příloha č. 12).

# Závěr

Závěr lze rozdělit do 5 částí, z nichž 4 části se věnují jednotlivým zkoumaným fyzikálním vlastnostem. Každá vlastnost byla zkoumána zvlášť a vyhodnocována také zvlášť. Součástí závěru je i celkové shrnutí výsledků zkoumání.

**Lesk**

Výsledné hodnoty pro WPC materiál ze stonků řepky ozimé nejsou příliš vysoké a na první pohled povzbudivé. Lesk vykazuje nižší hodnoty, a to v porovnání s komerčními materiály více než o 100 %. Výjimku tvoří materiál, který je ovšem broušený, a je tedy zcela jasné bez jakéhokoliv měření, že v tomto případě je lesk vždy nízký. Je však otázkou, zda má zásadní vliv na výsledné využití. Vždy je potřeba se dopředu zamyslet, k jakému účelu bude daný materiál bude sloužit. Pokud se jedná o konstrukční či určitým způsobem skrytý materiál, v těchto případech je kategorie lesku zcela irelevantní. Zároveň je potřeba vzít úvahu i konkrétní požadavky koncového uživatele. Ani u materiálů využívaných například jako obklad, kde se obecně klade velký důraz na vizuální stránku, nemusí konečný uživatel nutně jeho lesklou úpravu vyžadovat a naopak může priorovat matný povrch.

**Smáčivost**

Z pohledu smáčivosti se jeví lignocelulózový materiál v podobě stonků řepky ozimé ve WPC materiálu jako neúčinný. Výsledky vykazují tento materiál jako nejméně hydrofobní. Naskýtá se otázka, zda by se hydrofobie nedala zvýšit jiným lignocelulózovým materiálem, který je méně hydrofilní, nebo tento efekt snížit dalšími účinnějšími aditivy jako je například parafín.

**Drsnost**

Jelikož se lignocelulózová složka ze stonků řepky ozimé v materiálu nacházejí i v podobě malých částic, ovšem větších než umělé polymery a dřevní složka, tak je drsnost povrchu zvýšena. A to jak souběžně s výrobním směrem, tak i kolmo na výrobní směr.

**Bobtnání**

Zde přichází hlavní účinek všech různých substitučních lignocelulózových materiálů a aditiv. Smysl všech WPC materiálů je především co nejvíce minimalizovat vliv vody na materiál. Přidáním správných aditiv může být tato výhoda ještě více podpořena, proto je potřeba jejich roli při výrobě WPC materiálů. nepodceňovat

Z výsledků dále vyplývá, že po substituci dřeva stonky řepky ozimé a volbě účinných aditiv se tento faktor zlepšuje.

Pokud se podíváme na výsledky z celkového hlediska, lze konstatovat, že zlepšení WPC materiálů s přídavkem částic ze stonků řepky ozimé oproti dřevo/plast WPC není skokové, v některých ohledech jsou měřené hodnoty dokonce lehce horší. Je však nutné mít na zřeteli i skutečnost, že tyto nové kompozitní materiály nám nabízejí způsob, jak využít nejrůznější odpadní materiál, například právě stonky řepky ozimé. V dnešní době, kdy je kladen důraz na ochranu životního prostředí a s tím úzce spjatý požadavek na maximální využití všech dostupných materiálů a recyklovatelnost, se právě cesta tímto směrem jeví jako smysluplná a správná.

# Seznam použité literatury

## 1. Knihy / Monografie

[1] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.

[2] BÖHM, Martin, Jan REISNER a Jan BOMBA. Materiály na bázi dřeva. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra zpracování dřeva, 2012. ISBN 978-80-213-2251-6.

[7] NISKA, Kristiina Oksman a Mohini SAIN, ed. Wood-Polymer Composites. Cambridge, United Kingdom: Woodhead Publishing, 2008. ISBN 9781845692728.

[8] BARNETT, John R. a George JERONIMIDIS. Wood quality and its biological basis. Boca Raton, FL: Published in the USA/Canada by CRC Press, 2003. Biological sciences series (Oxford, England). ISBN 1–84127–319–8.

[10] ROWELL, Roger M., ed. Handbook of wood chemistry and wood composites. Druhé vydání. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 9781439853801.

[11] KLYOSOV, Anatole A. Wood-plastic composites. Hoboken, N.J., USA: John Wiley, 2007. ISBN 0470148918.

[13] KOLOUCH, Jan. Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.

[14] ŠUTA, Miroslav. Chemické látky v životním prostředí a zdraví. Brno: ZO ČSOP Veronica, 2008. ISBN 978-80-87308-00-4.

[17] GAŠPARÍK, Miroslav a Milan GAFF. Manipulační a dopravní technika I. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2016. ISBN 978-80-213-2619-4.

[24] GAFF, Milan a Jozef GÁBORÍK, DUDAS, Juraj a Anna ŠÚRIKOVÁ, ed. Vlastnosti povrchu dreva modifikovaného reliéfovaním. Zvolen: Technická univerzita ve Zvolenu, 2009. ISBN 978-80-228-2035-6.

### 2. Elektronické dokumenty – monografie

[6] A.R. Peissig-Dolder GmbH [online produktový list]. ARP-MOD-A/FF impact modifier. ©2016 [cit. 20. 2. 2019] Dostupné z: https://www.fineorganics.com/additives-for-plastic/additives-for-rigid-pvc-products/finawax-c

[9] CHEMICKÉ SLOŽENÍ DŘEVA A KŮRY. [online prezentace k výuce] Lesnická xylologie. [cit. 20. 2. 2019] Dostupné z: https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/inovace/Lesnicka_xylologie/LEX_pr04-chemicke_slozeni.pdf

### 3. Články v elektronických časopisech a jiné příspěvky

[5] NOVÁK, Petr. Drevoplastové kompozity. In: www.abs.sk [online]. Bratislava: JAGA GROUP, 2008, 8. září 2008 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: https://www.asb.sk/architektura/rodinne-domy-architektura/drevostavby/drevoplastove-kompozity

[18] Efficacy of Hydrophobic Coatings in Protecting Oak Wood Surfaces during Accelerated Weathering. Coatings. 2017, 7(10), 15. DOI: 10.3390/coatings7100172. ISSN 2079-6412. Dostupné také z: http://www.mdpi.com/2079-6412/7/10/172

[21] Beky: Dřevní moučka [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: http://beky.eu/cs/drevni-moucka-brikety/drevni-moucka/

[23] Agro Bystřice a.s.: Řepka ozimá [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: http://www.agrobystrice.cz/index.php/gallery-categories/first-gallery/27-repka-ozima

[25] Soupis ploch osevů – k 31. 5. 2018. Český statistický úřad [online]. ČSÚ, 2018 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/soupis-ploch-osevu-k-31-5-2018

### 4. Vědecko-kvalifikační práce

[3] JEŽ, Libor. *WPC kompozity na bázi PVC* [online]. Zlín, 2018 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42660/je%C5%BE_2018_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati.

[4] LANGE, Herman. Improving the process efficiency of WPC extrusion by a production loss monitoring system [online]. Lahti, 2013 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/60713/Lange_Herman.pdf?sequence=2. Bakalářská práce. Lahti university of applied sciencies.

[12] VOJČÍK, Michal. Konštrukčný návrh experimentálneho zariadenia na výrobu drevoplastového kompozitu [online]. Bratislava, 2010 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwi_yuSN8P7gAhUN1-AKHclkDNcQFjAAegQIBxAC&url=https%3A%2F%2Fis.stuba.sk%2Flide%2Fclovek.pl%3Fzalozka%3D13%3Bid%3D38318%3Bstudium%3D74489%3Bzp%3D19342%3Bdownload_prace%3D1%3Bquick%3D1&usg=AOvVaw2KjYc10kVVplLE5nrEdxyz. Diplomová práce. Slovenská technická univerzita.

[15] ŠTĚPÁN, Hýsek. Zhodnocení vlivu vazby lignocelulózový materiál/adhesivum na vlastnosti materiálů na bázi ligninu a celulózy a hodnocení parametrů ovlivňujících kvalitu lepeného spoje u těchto materiálů. v Praze, 2018. Disertační práce. ČZU.

[16] POKORNÁ, Sofie. Metodika zkoušení obkladového výrobku z modifikovaného dřevoplastového kompozitu (WPC) [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2013 [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/29203.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Jan Vaněrek.

[19] HÝSEK, Štěpán. Česká Zemědělská univerzita v Praze Fakulta lesnická a d řevařská Katedra dřevěných výrobků a konstrukcí Návrh metodiky pro měření drsnosti povrchu DTD, kde je na povrchu DTD nanesené dané množství vody. v Praze, 2014. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita.

[20] OBERHOFNEROVÁ, Eliška. Barevné změny a povrchové degradace vybraných druhů dřeva po expozici v exteriéru. v Praze, 2018. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita.

[22] URBÁNEK, Tomáš. Studium možností modifikace izolantů na bázi přírodních vláken pro zlepšení jejich reakce na oheň [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=156081. Bakalářská práce. Vysoké učení technické.

# Seznam příloh

Příloha 1: Statistické vyhodnocování vlivů pro lesk a kontaktní úhel ..... 71
Příloha 2: Porovnání lesku a kontaktního úhlu pomocí Duncanova testu ..... 72
Příloha 3: Statistické vyhodnocení vlivů pro Ra ..... 73
Příloha 4: Porovnávání všech druhů WPC materiálů a jejich statistické významnosti Ra, RSm a Rz za pomoci Duncanova testu ..... 74
Příloha 5: Statistické vyhodnocování vlivů pro přírůstek objemu, přírůstek hustoty a přírůstek vlhkosti ..... 75
Příloha 6: Porovnání přírůstků tloušťky prostřednictvím Duncanova testu ..... 76
Příloha 7: Porovnání přírůstků šířky prostřednictvím Duncanova testu ..... 77
Příloha 8: Porovnání přírůstků délky prostřednictvím Duncanova testu ..... 78
Příloha 9: Porovnání přírůstků hmotnosti prostřednictvím Duncanova testu ..... 79
Příloha 10: Porovnání přírůstků objemu prostřednictvím Duncanova testu ..... 80
Příloha 11: Porovnání přírůstků hustoty prostřednictvím Duncanova testu ..... 81
Příloha 12: Porovnání přírůstků vlhkosti prostřednictvím Duncanova testu ..... 82

# Přílohy

**Příloha 1: Statistické vyhodnocování vlivů pro lesk a kontaktní úhel**

| Faktor | Součet čtverců | Stupně volnosti | Odchylka | Fisherův F - Test | P hladina |
|---|---|---|---|---|---|
| **Lesk (%) 60°** | | | | | |
| **Intercept** | 13959,18 | 1 | 13959,18 | 4209,788 | *** |
| **Materiál** | 4303,77 | 4 | 1075,94 | 324,481 | *** |
| **Error** | 232,11 | 70 | 3,32 | | |
| **Kontaktní úhel (°)** | | | | | |
| **Intercept** | 61058568 | 1 | 61058568 | 274,2964 | *** |
| **Materiál** | 4124313 | 4 | 1031078 | 4,6320 | *** |
| **Error** | 11130036 | 50 | 222601 | | |

NS – statisticky nevýznamné, *** - statisticky významné, hladina statistické významnosti $P < 0.05$.

## Příloha 2: Porovnání lesku a kontaktního úhlu pomocí Duncanova testu

| Lesk (%) 60° | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Materiál** | **(1) 7,65** | **(2) 20,62** | **(3) 18,27** | **(4) 19,92** | **(5) 1,74** |
| **1** | X | | | | |
| **2** | 0,000 | X | | | |
| **3** | 0,000 | 0,001 | X | | |
| **4** | 0,000 | 0,296 | 0,016 | X | |
| **5** | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | X |

| Kontaktní úhel (°) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Materiál** | **(1) 77,5** | **(2) 88,9** | **(3) 91,39** | **(4) 90,99** | **(5) 104,08** |
| **1** | X | | | | |
| **2** | 0,002 | X | | | |
| **3** | 0,000 | 0,515 | X | | |
| **4** | 0,000 | 0,560 | 0,911 | X | |
| **5** | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | X |

**Příloha 3: Statistické vyhodnocení vlivů pro Ra**

| Faktor | Součet čtverců | Stupně volnosti | Odchylka | Fisherův F - Test | P hladina |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Ra (µm) | | | |
| **Intercept** | 1108,446 | 1 | 1108,446 | 1197,708 | *** |
| **Materiál** | 1211,435 | 4 | 302,859 | 327,248 | *** |
| **Směr** | 267,952 | 1 | 267,952 | 289,529 | *** |
| **Materiál*Směr** | 463,817 | 4 | 115,954 | 125,292 | *** |
| **Error** | 46,274 | 50 | 0,925 | | |

NS – statisticky nevýznamné, *** - statisticky významné, hladina statistické významnosti $P < 0.05$.

## Příloha 4: Porovnávání všech druhů WPC materiálů a jejich statistické významnosti Ra, RSm a Rz za pomoci Duncanova testu

| Ra (µm) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Materiál** | **Směr** | **1 4,03** | **(1) 7,19** | **2 0,59** | **(2) 1,14** | **3 0,65** | **(3) 0,75** | **4 0,65** | **(4) 2,84** | **5 4,98** | **(5) 20,11** |
| **1** | **po směru** | X | | | | | | | | | |
| **(1)** | **proti směru** | 0,00 | X | | | | | | | | |
| **2** | **po směru** | 0,00 | 0,00 | X | | | | | | | |
| **(2)** | **proti směru** | 0,00 | 0,00 | 0,39 | X | | | | | | |
| **3** | **po směru** | 0,00 | 0,00 | 0,93 | 0,41 | X | | | | | |
| **(3)** | **proti směru** | 0,00 | 0,00 | 0,80 | 0,49 | 0,85 | X | | | | |
| **4** | **po směru** | 0,00 | 0,00 | 0,92 | 0,43 | 1,00 | 0,86 | X | | | |
| **(4)** | **proti směru** | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | X | | |
| **5** | **po směru** | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | X | |
| **(5)** | **proti směru** | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | X |

| RSm (µm) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Materiál** | **Směr** | **1 1217** | **(1) 1699** | **2 582** | **(2) 970** | **3 562** | **(3) 876** | **4 747** | **(4) 1294** | **5 1247** | **(5) 889** |
| **1** | **po směru** | X | | | | | | | | | |
| **(1)** | **proti směru** | 0,112 | X | | | | | | | | |
| **2** | **po směru** | 0,044 | 0,001 | X | | | | | | | |
| **(2)** | **proti směru** | 0,369 | 0,018 | 0,213 | X | | | | | | |
| **3** | **po směru** | 0,040 | 0,000 | 0,944 | 0,199 | X | | | | | |
| **(3)** | **proti směru** | 0,262 | 0,010 | 0,315 | 0,749 | 0,302 | X | | | | |
| **4** | **po směru** | 0,130 | 0,003 | 0,548 | 0,464 | 0,529 | 0,638 | X | | | |
| **(4)** | **proti směru** | 0,792 | 0,143 | 0,027 | 0,286 | 0,024 | 0,187 | 0,087 | X | | |
| **5** | **po směru** | 0,912 | 0,123 | 0,037 | 0,343 | 0,034 | 0,233 | 0,113 | 0,864 | X | |
| **(5)** | **proti směru** | 0,263 | 0,010 | 0,312 | 0,769 | 0,294 | 0,962 | 0,627 | 0,193 | 0,238 | X |

| Rz (µm) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Materiál** | **Směr** | **1 25,52** | **(1) 48,32** | **2 4,66** | **(2) 6,58** | **3 5,13** | **(3) 5,88** | **4 5,24** | **(4) 12,89** | **5 36,02** | **(5) 101,86** |
| **1** | **po směru** | X | | | | | | | | | |
| **(1)** | **proti směru** | 0,000 | X | | | | | | | | |
| **2** | **po směru** | 0,000 | 0,000 | X | | | | | | | |
| **(2)** | **proti směru** | 0,000 | 0,000 | 0,643 | X | | | | | | |
| **3** | **po směru** | 0,000 | 0,000 | 0,897 | 0,719 | X | | | | | |
| **(3)** | **proti směru** | 0,000 | 0,000 | 0,763 | 0,846 | 0,847 | X | | | | |
| **4** | **po směru** | 0,000 | 0,000 | 0,888 | 0,724 | 0,983 | 0,854 | X | | | |
| **(4)** | **proti směru** | 0,001 | 0,000 | 0,049 | 0,087 | 0,059 | 0,072 | 0,056 | X | | |
| **5** | **po směru** | 0,006 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | X | |
| **(5)** | **proti směru** | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | X |

**Příloha 5: Statistické vyhodnocování vlivů pro přírůstek objemu, přírůstek hustoty a přírůstek vlhkosti**

| Faktor | Součet čtverců | Stupně volnosti | Odchylka | Fisherův F - Test | P hladina |
|---|---|---|---|---|---|
| **Přírůstek objemu V ($mm^3$)** | | | | | |
| **Intercept** | 5456353 | 1 | 5456353 | 3253.986 | *** |
| **Materiál** | 1281060 | 4 | 320265 | 190.995 | *** |
| **Error** | 159298 | 95 | 1677 | | |
| **Faktor** | **Součet čtverců** | **Stupně volnosti** | **Odchylka** | **Fisherův F - Test** | **P hladina** |
| **Přírůstek hustoty Ro ($g/mm^3$)** | | | | | |
| **Intercept** | 773.71 | 1 | 773.7095 | 4.469441 | *** |
| **Materiál** | 1961.90 | 4 | 490.4754 | 2.833300 | *** |
| **Error** | 16445.55 | 95 | 173.1110 | | |
| **Faktor** | **Součet čtverců** | **Stupně volnosti** | **Odchylka** | **Fisherův F - Test** | **P hladina** |
| **Přírůstek vlhkosti Wa (%)** | | | | | |
| **Intercept** | 2988.834 | 1 | 2988.834 | 12968.42 | *** |
| **Materiál** | 430.929 | 4 | 107.732 | 467.45 | *** |
| **Error** | 21.895 | 95 | 0.230 | | |

NS – statisticky nevýznamné, *** - statisticky významné, hladina statistické významnosti $P < 0.05$.

## Příloha 6: Porovnání přírůstků tloušťky prostřednictvím Duncanova testu

| Přírůstek tloušťky T (mm) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Materiál** | **(1) ,089** | **(2) ,38** | **(3) ,76** | **(4) ,61** | **(5) ,29** |
| **1** | X | | | | |
| **2** | 0,000 | X | | | |
| **3** | 0,000 | 0,000 | X | | |
| **4** | 0,000 | 0,000 | 0,000 | X | |
| **5** | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | X |

## Příloha 7: Porovnání přírůstků šířky prostřednictvím Duncanova testu

| Přírůstek šířky Š (mm) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Materiál** | **(1)<br>,02** | **(2)<br>,22** | **(3)<br>,33** | **(4)<br>,32** | **(5)<br>,48** |
| **1** | X | | | | |
| **2** | 0,000 | X | | | |
| **3** | 0,000 | 0,000 | X | | |
| **4** | 0,000 | 0,000 | 0,379 | X | |
| **5** | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | X |

## Příloha 8: Porovnání přírůstků délky prostřednictvím Duncanova testu

| Přírůstek šířky Š (mm) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Materiál** | **(1) ,02** | **(2) ,22** | **(3) ,33** | **(4) ,32** | **(5) ,48** |
| **1** | X | | | | |
| **2** | 0,000 | X | | | |
| **3** | 0,000 | 0,000 | X | | |
| **4** | 0,000 | 0,000 | 0,379 | X | |
| **5** | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | X |

## Příloha 9: Porovnání přírůstků hmotnosti prostřednictvím Duncanova testu

| Přírůstek hmotnosti H (g) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Materiál** | **(1) ,07** | **(2) ,28** | **(3) ,47** | **(4) ,43** | **(5) ,35** |
| **1** | X | | | | |
| **2** | 0,000 | X | | | |
| **3** | 0,000 | 0,000 | X | | |
| **4** | 0,000 | 0,000 | 0,000 | X | |
| **5** | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | X |

## Příloha 10: Porovnání přírůstků objemu prostřednictvím Duncanova testu

| Přírůstek objemu V ($mm^3$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Materiál** | **(1) 38,08** | **(2) 192,84** | **(3) 367,80** | **(4) 312,82** | **(5) 259,32** |
| **1** | X | | | | |
| **2** | 0,000 | X | | | |
| **3** | 0,000 | 0,000 | X | | |
| **4** | 0,000 | 0,000 | 0,000 | X | |
| **5** | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | X |

## Příloha 11: Porovnání přírůstků hustoty prostřednictvím Duncanova testu

| Přírůstek hustoty Ro (g/mm$^3$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Materiál** | **(1) 8,90** | **(2) 5,38** | **(3) -4,39** | **(4) 2,73** | **(5) 1,26** |
| **1** | X | | | | |
| **2** | 0,400 | X | | | |
| **3** | 0,004 | 0,032 | X | | |
| **4** | 0,166 | 0,526 | 0,108 | X | |
| **5** | 0,097 | 0,356 | 0,177 | 0,725 | X |

**Příloha 12: Porovnání přírůstků vlhkosti prostřednictvím Duncanova testu**

| Přírůstek vlhkosti Wa (%) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Materiál** | **(1)<br>1,74** | **(2)<br>4,84** | **(3)<br>7,56** | **(4)<br>7,00** | **(5)<br>6,17** |
| **1** | X | | | | |
| **2** | 0,000 | X | | | |
| **3** | 0,000 | 0,000 | X | | |
| **4** | 0,000 | 0,000 | 0,000 | X | |
| **5** | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | X |