

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**PŘÍPRAVA KOMPOZITNÍCH VZORKŮ S POLYMERNÍ MATRICÍ
THE PREPARATION OF COMPOSITE SAMPLES WITH POLYMER
MATRIX**

AUTOR: Radek Čech

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Zdeňka Jeníková, Ph. D.

PRAHA 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čech** Jméno: **Radek** Osobní číslo: **475009**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Příprava kompozitních vzorků s polymerní maticí

Název bakalářské práce anglicky:

Preparation of composite samples with polymer matrix

Pokyny pro vypracování:

Cíl : V laboratořích ÚMI připravit vzorky, charakterizovat je a porovnat jejich vlastnosti.

Postup:

1. Studium literatury o přípravě kompozitních materiálů s termoplastickou maticí.
2. Příprava vzorků o vybraném složení.
3. Zvolení metody ke zjištění vlastností pro srovnání a testování vzorků.
4. Zpracování výsledků a diskuse.
5. Závěr.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MEISNER, B., ZILVAR, V. Fyzika polymerů - Struktura a vlastnosti polymerních materiálů, SNTL, Praha 1987.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] Normy dle použitých zkoušek.
- [4] Odborné články – vyhledání je součástí bakalářské práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **04.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D. za její nesmírnou ochotu, cenné rady při výzkumu a vlídnost, se kterou mi předávala veškeré informace potřebné pro vznik této studie.

Dále bych chtěl poděkovat mému kolegovi Bc. Ondřeji Polákovi za jeho neutuchající pomoc při výzkumu a v neposlední řadě Ing. Jakubu Antoňovi, který nám předával věcné rady potřebné ke vzniku experimentální části této práce.

Zároveň děkuji všem ostatním, kteří se na vzniku podíleli nebo mě při tvorbě podporovali.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil jsem literárních pramenů a informací, které uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon)

V Praze dne:

.....

podpis

Abstrakt

Bakalářská práce pojednává o problematice kompozitních materiálů s polymerní termoplastickou matricí, srovnáváme jejich výhody a nevýhody oproti dnes stále ještě rozšířenějším kompozitům s reaktoplastickou matricí. V experimentální části se zabýváme přípravou a následnou výrobou kompozitu s polyethylenovou matricí, kde volíme dvě různé výztuže, krátká uhlíková vlákna a bavlněnou tkaninu. Na vzorcích byly provedeny materiálové zkoušky, ze kterých jsme vyhodnotili mechanické vlastnosti vyrobených kompozitů.

Klíčová slova

termoplastický kompozit, polyethylen, uhlíkové vlákno, bavlněná tkanina, prepreg

Abstract

The bachelor's thesis deals with the issue of composite materials with a polymeric thermoplastic matrix, we compare their advantages and disadvantages with the nowadays still increasingly widespread composites with a thermosetting matrix. In the experimental part, we deal with the preparation and subsequent production of a composite with a polyethylene matrix, where we choose two different reinforcements, short carbon fibers and cotton fabric. Material tests were performed on the samples, from which we evaluated the mechanical properties of the produced composites.

Keywords

thermoplastic composite, polyethylene, carbon fiber, cotton fabric, prepreg

Seznam použitých zkratek

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CF	Uhlíková vlákna
DOW – ZS	Dowlex 2629.10UE – Nízkohustotní polyethylen v základním stavu
DOW – PL	Dowlex 2629.10UE – Nízkohustotní polyethylen po plazmované úpravě
DSC	Diferenční snímací kalorimetrie
E	Modul pružnosti v tahu
E_o	Modul pružnosti v ohybu
MFR	Melt mass-flow rate – index toku taveniny
PS – E	Expandovaný polystyren
PE – HD	Vysokohustotní polyethylen
PE – LD	Nízkohustotní polyethylen
PBT	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát
PET	Polyethylentereftalát
PMMA	Polymethylmethakrylát
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyuretan
PVC	Polyvinylchlorid
T_f	Teplota viskózního toku
T_g	Teplota skelného přechodu
T_m	Teplota tání
T_k	Teplota krystalizace
UV	Ultrafialové záření

Obsah

Úvod	10
Teoretická část	12
1. Kompozitní materiály	12
2. Matrice	13
2.1 Reaktoplastická matrice	13
2.2 Termoplastická matrice	15
2.2.1 Dělení termoplastů	15
2.2.2 Polyethylen	16
3. Vláknová výztuž.....	19
3.1 Základní dělení vláken kompozitních materiálů	19
3.2 Uhlíková vlákna	19
3.3 Organická vlákna	20
3.4 Srovnání vlastností vybraných vláken	21
3.5 Recyklované textilní vlákno	22
3.6 Srovnání vlastností vláken z e-skla a recyklovaného organického vlákna	23
4. Polotovary vláknových výztuží.....	24
4.1 Tkaniny	24
4.1.1 Plátňová vazba.....	24
5. Mezifázové rozhraní	25
5.1 Smáčivost vláken	25
6. Výroba kompozitů	26
6.1 Výroba kompozitů s reaktoplastickou matricí.....	26
6.2 Výroba kompozitů s termoplastickou matricí	28
6.2.1 Příprava polotovarů	28
6.2.2 Zpracování polotovarů	30
7. Analýza současného výzkumu polymerních kompozitů.....	32
7.1 Kompozity s textilní výztuží	32
7.2 Kompozity s uhlíkovými vlákny	36

Experimentální část	37
8. Návrh a provedení experimentu.....	37
8.1 Použité přístroje a pomůcky	37
8.2 Použité materiály	40
8.3 Charakterizace použitých matric.....	40
8.3.1 Diferenční snímací kalorimetrie	41
8.3.2 Sypná hmotnost prášku	44
8.4 Charakterizování použité výztuže	45
8.4.1 Krátká uhlíková vlákna.....	45
8.4.2 Bavlna.....	46
8.5 Zkoušky a charakterizování kompozitních vzorků	47
8.5.1 Zkouška tahem	47
8.5.2 Zkouška ohybem	48
8.5.3 Stanovení vrubové houževnatosti.....	48
9. Kompozit s uhlíkovou výztuží	49
9.1 Příprava materiálu	49
9.2 Příprava vzorků	50
9.3 Výsledky z tahové zkoušky.....	52
9.3.1 Pevnost použitých matric	52
9.3.2 Pevnost kompozitu s uhlíkovou výztuží	54
9.3.2.1 Kompozit s obsahem 5 hm. % krátkých uhlíkových vláken	54
9.3.2.2 Kompozit s obsahem 10 hm. % krátkých uhlíkových vláken	55
9.4 Ohybová zkouška	56
9.5 Vrubová houževnatost připravených vzorků	58
9.6 Hustota vzorků.....	60
10. Kompozit s bavlněnou výztuží	62
10.1 Příprava vzorků	62
10.2 Tahová zkouška vzorků s bavlněnou výztuží	65
10.3 Ohybová zkouška	66
11. Diskuze	67

12.	Závěr.....	69
13.	Bibliografie	70
14.	Seznam příloh.....	73

Úvod

Kompozitní materiály s polymerní termoplastickou matricí jsou v dnešní době velmi projednávaným tématem, a také proto vzniká velké množství výzkumů, které se snaží dosáhnout co nejlepších fyzikálních a mechanických vlastností výsledného kompozitního materiálu. Jedním z hlavních důvodů proč vznikají stále nové výzkumy je alespoň částečně proveditelná recyklace takového materiálu, neboť v případě kompozitů s reaktoplastickou matricí je recyklace velice náročná a v mnoha případech neproveditelná.

Ačkoli právě kompozity s reaktoplastickou matricí mají lepší mechanické vlastnosti, současný výzkum termoplastických kompozitů je na dobré cestě k dosažení přinejmenším podobných vlastností.

Nejprve se v teoretické části této studie zaměříme na podrobné definování kompozitního materiálu a určení jednotlivých fází. Následně si uvedeme základní rozdíly právě mezi kompozity založených na reaktoplastické a termoplastické matrici. Dále se podrobně věnujeme polyethylenu a jeho možným molekulovým strukturám, neboť v praktické části nám právě polyethylen slouží jako primární fáze zkoumaných kompozitů.

V další části si uvedeme druhy nejpoužívanějších výztuží, přičemž nejvíce se budeme věnovat uhlíkovým a organickým vláknům, která jsou pro náš experiment stěžejní. Popíšeme také možné formy výztuže od krátkých vláken po vytvoření celistvé tkaniny. Nejdůležitějším aspektem kompozitního materiálu je soudržnost výztuže a matrice, díky které dochází k požadovaným synergickým efektům a konečnému zpevnění. Z toho důvodu se zaměříme na mezifázové rozhraní, smáčivost vláken a vzájemnou adhezi.

V neposlední řadě si uvedeme současnou výrobu kompozitních materiálů a na samotném konci teoretické části se zaměříme na analyzování současného výzkumu v této oblasti materiálového inženýrství.

Jak je již výše zmíněno, v experimentální části této studie se zaměříme na kompozity, jejichž primární fází bude nízkohustotní polyethylen, ten volíme z důvodu nižší teploty tání než jaká je v případě vysokohustotního polyethyleny. V práci použijeme polyethylen v základním stavu a polyethylen s plazmovanou úpravou.

Jako výztuž v první části experimentu zvolíme recyklovaná krátká uhlíková vlákna, která mají z ekologického hlediska pozitivní vliv na životní prostředí, neboť jejich výroba spočívá v získávání vláken z už jednou vyrobených kompozitních dílů.

Druhá z použitých výztuží bude bavlněná tkanina, kterou volíme především z důvodu možného využití bavlněného odpadu v textilním průmyslu.

Veškeré vzorky budou podrobeny zkouškám pro určení meze pevnosti, modulu pružnosti v ohybu, vrubové houževnatosti a hustotě, přičemž vždy porovnáváme nenaplněnou matici s hodnotami matrice vyztužené daným obsahem plniva.

Cílem teoretické části studie je uvedení do problematiky kompozitních materiálů s termoplastickou maticí a zanalyzování současného stavu výzkumu v této oblasti.

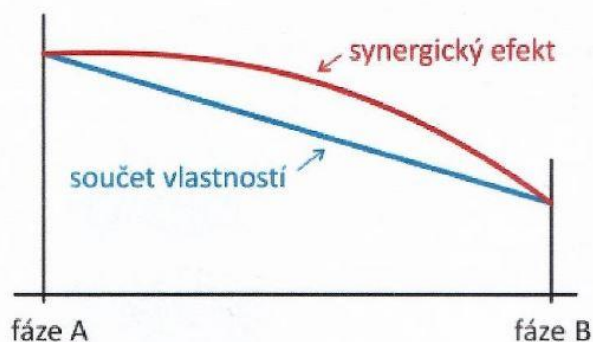
Cílem praktické části je popsat metody přípravy jednotlivých kompozitních vzorků a určit vliv uhlíkových vláken a bavlněné tkaniny v kompozitu na zkoumané vlastnosti vzorků.

Teoretická část

1. Kompozitní materiály

Definice kompozitních materiálů není zcela jednoznačná a liší se podle různých zdrojů. Nejčastější interpretace, kterou můžeme v literatuře najít je: „Jakýkoli materiál, který není čistá látka a obsahuje více než jednu složku, může být teoreticky klasifikován jako kompozitní materiál.“ [1] Pokud bychom se ovšem spokojili s touto definicí, zahrnovaly by kompozitní materiály téměř všechny přírodní, látky ať už by se jednalo o dřevo nebo kosti, ale také velké množství látek člověkem vytvořených. Jde tedy o to, že musíme v definici odlišit kombinaci běžné heterogenní materiálové směsi od kompozitního materiálu. [1]

Z toho důvodu se všeobecně přiklání k definici, že se jedná o kompozici dvou a více složek, které se vzájemně neslučují ani nijak nerozpouštějí, můžeme tedy vidět hranice jednotlivých fází. V makroměřítku se základní fáze liší svým tvarem a složením, z toho vyplývá, že výsledný materiál je heterogenní. Konečný produkt – kompozit má vlastnosti zcela odlišné od všech základních materiálů, které kompozit obsahuje, a zároveň těchto nových specifík nedosáhneme prostou sumací jednotlivých složek. Uplatňuje se zde tzv. synergický efekt, jehož princip je znázorněn na Obr. 1 [1] [2].



Obr. 1 Synergický efekt

V základu dělíme složky kompozitu do dvou fází, primární fázi nazýváme matricí, která slouží jako pojivo. Sekundární fázi označujeme jako plnivo neboli výztuž, ta může být nejrůznějších tvarů, např. ve formě destiček nebo vláken. Z mikrostrukturálního pohledu můžeme říci, že pokud je rozměr sekundární fáze (výztuže) větší než 10 nm mluvíme o heterogenní struktuře. [3]

Hranice mezi těmito fázemi ale není pouze přímý kontakt, nýbrž i tenká vrstva v okolí této plochy. Vnitřní chemické a fyzikální vazby jsou nejčastěji vazbami Van der Waalsovými, ty bývají deformovány vlivem různých tuhostí a teplotních

roztlačností jednotlivých fází. Můžeme tedy říct, že hranice matrice má jinou strukturu než její vnitřní oblasti, chemické složení je ovšem stejné.

Abychom omezili difúzi cizích molekul do oblasti hranic mezi sekundární a primární fází a zároveň dosáhli lepší soudržnosti fází, upravujeme povrch plniva apretací. Tato úprava spočívá v nanesení silanů na povrch výztuže, což má za následek zvýšení tuhosti a pevnosti kompozitu. Toto tvrzení však není vždy pravidlem a existují výjimky, například u částicových plniv, kde tato úprava může zhoršit houževnatost kompozitu [3].

2. Matrice

Jak již bylo zmíněno výše, matrice v kompozitu slouží jako pojivo pro výplň. Zároveň ji chrání před okolními vlivy a díky ní dosáhneme lepšího rozložení sil při zatížení. Z toho důvodu chceme docílit co nejlepšího rozložení souvislé vrstvy v celém objemu kompozitu. Druhy nejpoužívanějších matic jsou uvedené níže:

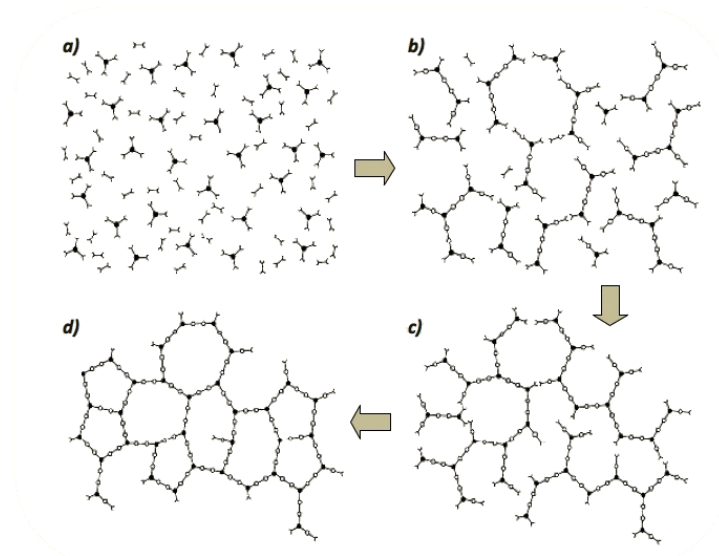
- Polymerní
- Kovová
- Keramická
- Skleněná
- Sklokeramická
- Uhlíková

V našem případě nás nejvíce zajímá polymerní matrice, které se v této práci budeme věnovat. V zásadě můžeme polymerní matrice rozdělit do dvou skupin:

- Reaktoplastické
- Termoplastické

2.1 Reaktoplastická matrice

Jak z názvu vyplývá, základním materiálem reaktoplastické matrice jsou reaktoplasty, pro něž je specifické to, že je lze zpracovávat jen po určitou dobu. Během zahřívání nebo za pomoci katalyzátorů probíhá tzv. vytvrzování, což způsobí prostorové zesíťování struktury a vznik kovalentních vazeb mezi molekulami polymeru. To má za následek vznik jedné makromolekuly, jejíž uvedení do viskózního toku již není možné. Pokud bychom po vytvrzení na reaktoplast působili dodáváním dalšího tepla, tlaku nebo záření, dojde k jeho degradaci. Znázornění mechanismu zesíťování reaktoplastů můžeme vidět na Obr. 2. [4]



Obr. 2 Postupné zesíťování reaktoplastu: a) molekuly monomerů a jejich krátké řetězce, b) růst a větvení makromolekul, c) vznik zesíťované struktury, d) vytvrzený reaktoplast (převzato z [6])

Historicky se nejdříve pro kompozitní materiály s polymerní matricí využívaly především reaktoplasty (termosety), které i v dnešní době mají hojné zastoupení a jsou využívány ve větším měřítku než termoplastické matrice. Nejběžnějším materiálem pro výrobu reaktoplastických kompozitů byly a stále jsou vyztužené nenasycené polyesterové nebo epoxidové pryskyřice [5].

Hlavním důvodem širokého spektra využití jsou zajímavé vlastnosti reaktoplastů, např.:

- Nízká viskozita nezesíťovaného polymeru
- Dobrá smáčivost vláken a díky tomu dobré prosycení vláken
- Zpracování při pokojových teplotách
- Vysoká pevnost a tuhost po vytvrzení
- Nehořlavost a odolnost proti chemickým vlivům

Samozřejmě, že využití reaktoplastické matrice pro kompozitní aplikace má i své nevýhody, které nesmíme opomenout. Hlavní z nich jsou:

- Potřeba uchování polotovarů (prepregů) v chladu
- Nízká tažnost a nízká rázová houževnatost – vznik křehkých lomů
- Nemožnost recyklace kompozitu po konci jeho životnosti
- Obtížná automatizace výroby

Jeden z hlavních důvodů pro vývoj a přechod na termoplastické matrice je právě neekologičnost reaktoplastů, kvůli jejich obtížné recyklaci, a dále snaha o přechod na automatizovanou výrobu z důvodu nižších finančních nákladů. [3] [4]

2.2 Termoplastická matrice

Termoplastické matrice se po dodání tepla dají opakovaně zpracovávat. Následně při zpětné exotermní reakci, kdy se pohybujeme pod teplotou tání T_m pro semikrystalické termoplasty, nebo pod teplotou viskózního toku T_f pro amorfní termoplasty, znovu přejdou do tuhého stavu. Jelikož při těchto přeměnách nedochází ke změně chemické struktury, je teoreticky možné tento děj provádět nespočetněkrát. Díky tomu je recyklace termoplastů o dost snazší a proveditelnější než v případě reaktoplastů. Zároveň při výrobě neprobíhá chemická reakce, která by narušila funkčnost, potažmo životnost výrobku, a proto výroba nemá takový dopad na životní prostředí [4].

Využití termoplastů v oblasti kompozitů má i své další výhody jako např.:

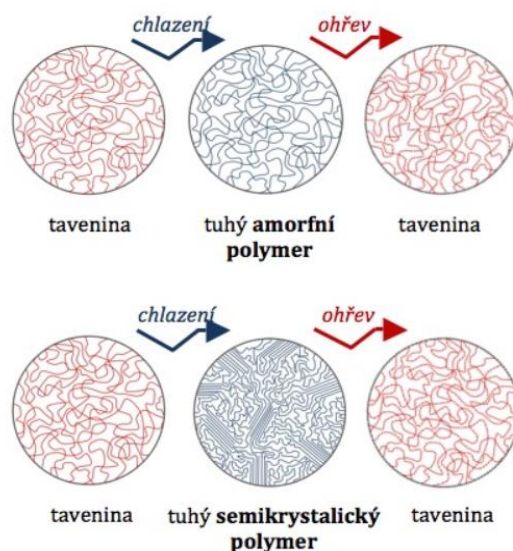
- Možnost recyklace
- Snadnější automatizace výroby
- Obvykle dobrá vrubová houževnatost

Existuje řada nevýhod, kvůli kterým přechod na termoplastické matrice není zcela jednoduchý a v mnoha oblastech využití je potřeba zdokonalit vývoj, jelikož termoplasty stále nedosahují takových vlastností jako reaktoplasty. Mezi hlavní nevýhody se řadí [4]:

- Špatná odolnost proti vysokým teplotám
- U vysokoviskózních materiálů horší smáčivost vláken v kompozitu
- Nutnost výroby za vyšších teplot
- Vysoká viskozita taveniny

2.2.1 Dělení termoplastů

Termoplasty můžeme dělit dle různých kritérií. Základní dělení je podle nadmolekulární struktury, dle které termoplasty dělíme na amorfní a semikrystalické. Na Obr. 3 vidíme přechod mezi taveninou a tuhým polymerem pro obě tyto skupiny [4].



Obr. 3 Srovnání struktury amorfních a semikrystalických termoplastů (převzato z [6])

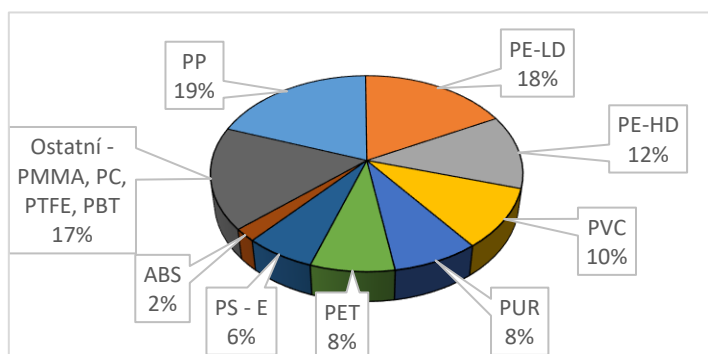
U amorfních termoplastů zaujmají makromolekuly zcela náhodnou a nepravidelnou pozici ve formě klubek, která mohou být vzájemně propletena. Jejich charakteristické vlastnosti jsou tvrdost a vysoká pevnost. Zpravidla mají nízký index lomu (1,4 až 1,6), díky kterému jsou průhledné. Teplotní roztažnost je menší než v případě semikrystalických polymerů a smrštění je obvykle do 1 % oproti formě. To je z důvodu nevytváření pravidelných útvarů – lamel, v materiálu, a proto amorfni termoplasty využíváme pro výrobu přesných dílů. Z aplikačního hlediska se nesmí přesáhnout teplota skelného přechodu T_g , nad kterou se makromolekuly rozvolní a přechází do kaučkovitého stavu, kdy materiál rapidně mění své mechanické vlastnosti. Představitelé amorfních plastů jsou např.: PS, PMMA, PC. [3; 4]

Semikrystalické termoplasty mají určitý stupeň krystalinity, což je pravidelné uspořádání makromolekul. Nikdy ovšem nemůžeme dosáhnout 100% krystalinity, vždy najdeme oblast amorfni a krystalickou v určitém vzájemném poměru, odtud název semikrystalické termoplasty. Oproti amorfním plastům mají zpravidla větší houževnatost. Pevnost a modul pružnosti závisí na stupni krystalinity, přičemž platí, že čím větší je krystalinita, tím více se tyto mechanické vlastnosti zlepšují. Jako představitele lze uvést např.: PE, PP, PA. Pro nás je podstatný především Polyethylen (PE), kterému se v této práci budeme dále věnovat. [3; 4]

2.2.2 Polyethylen

Polyethylen se řadí do skupiny tzv. polyolefinů, vyrábí se polymerací olefinového ethylenu. Tato skupina zahrnuje i polypropylen, s nímž se řadí k nejpoužívanějším syntetickým polymerům, jak dokazují statistiky produkce plastů v Evropě na Obr. 4. Společně tvoří bezmála 50% podíl všech vyrobených plastů.

Hlavním důvodem je snadná dostupnost surovin pro výrobu monomerů a následná levná výroba polymerů. [3; 4; 6]



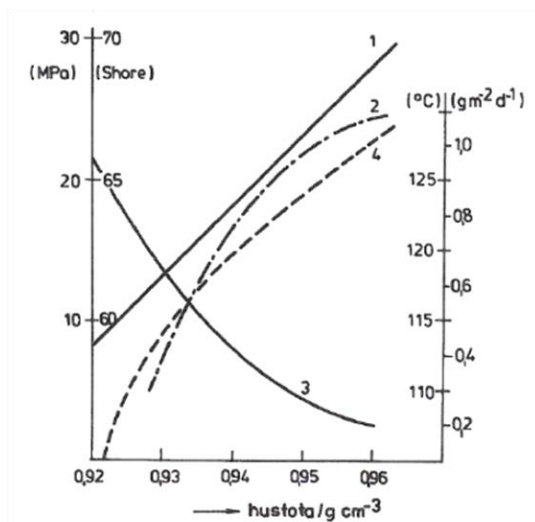
Obr. 4 Průměrná produkce plastů v Evropě pro rok 2019, data převzata z [24]

Nejčastějším rozdělením, které u Polyethylenu využíváme, je dělení dle hustoty:

- Polyethylen o nízké hustotě PE – LD, který má silně rozvětvené makromolekuly
- Polyethylen o vysoké hustotě PE – HD, který má lineární strukturu.

Oba výše zmíněné druhy mají krystalinitu od 50 % do 90 %, polyethylen dobrou houževnatost a poměrnou deformaci. Na Obr. 5 jsou znázorněny mechanické a fyzikální vlastnosti polyethylenu se zvyšující se hustotou.

Hlavní nevýhodou je jeho nízká odolnost proti slunečnímu záření, nestabilizovaný PE má vysoký sklon k fotooxidaci, avšak se zvyšující se krystalinitou se snižuje rychlost narušení materiálu vlivem UV záření, jelikož fotooxidace naruší PE hlavně v amorfních oblastech. V běžných klimatických podmínkách klesne pevnost za 10 měsíců na polovinu. Pokud se ale PE uskladní mimo venkovní podmínky, jeho mechanické vlastnosti se nezmění ani za 10 let. Nejpoužívanějším stabilizátorem, který tyto jevy dokáže z části potlačit, jsou saze. [7]



Obr. 5 Závislost vlastností polyethylenu na hustotě při teplotě 23 °C: 1 - pevnost v ohybu [MPa], 2 - tvrdost Shore, 3 – propustnost pro vodní páru fólií o tloušťce 100 μm [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$], 4 – tvarová stálost za tepla podle Vicata [°C] (převzato z [4])

Výhody Polyethylenu:

- Nízká cena
- Velmi dobrá chemická odolnost
- Snadná zpracovatelnost
- Zdravotní nezávadnost

Nevýhody Polyethylenu:

- Nízká pevnost v tahu
- Nízký bod měknutí
- Sklony k fotooxidaci
- Hořlavost

V následující Tab. 1 je shrnuto porovnání fyzikálních a mechanických vlastností PE – LD a PE – HD.

Tab. 1 Porovnání vlastností nízkohustotního a vysokohustotního polyethylenu, data převzata z [4]

Druh PE	Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	Teplota tání [°C]	Krystalinita [%]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [MPa]
PE – LD	0,915 ÷ 0,94	105 ÷ 115	50 ÷ 70	9 ÷ 15	≈290
PE – HD	0,94 ÷ 0,97	134 ÷ 136	70 ÷ 95	20 ÷ 33	≈1550

3. Vláknohá výztuž

Plnivo neboli výztuž je druhou – sekundární fází kompozitu. Jedná se o složku, která má zpravidla větší pevnost a větší modul pružnosti než matrice. Forma, tvar, materiál, obsah výztuže a způsob přípravy definují konečný charakter kompozitu. Rozeznáváme dva základní druhy výztuže [2]:

- Vláknohá – u této výztuže rozdělujeme vlákna na krátká, dlouhá a nekonečná. Dále vláknohou výztuž dělíme dle vzájemného sdružování, např. do tkanin, rohoží, pramenů či netkaných textilií
- Částicová – zde rozlišujeme, zda jsou částice pravidelné či nepravidelné a jejich tvar, ten může být kulovitý, destičkovitý apod.

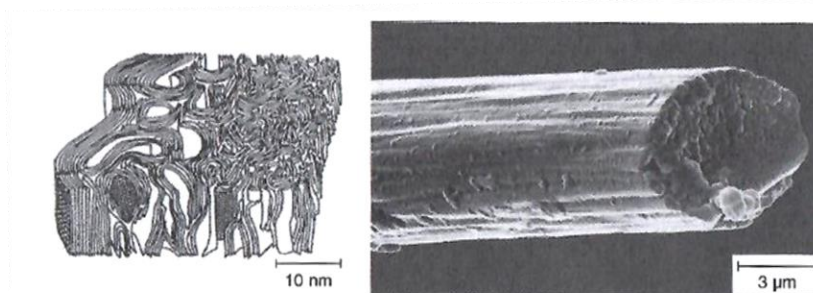
3.1 Základní dělení vláken kompozitních materiálů

U vláken pro kompozitní materiály záleží na štíhlostním poměru *délky vlákna k jeho průměru*. Pokud je poměr menší než 100, jde o krátká vlákna, a pokud je větší než 100, jedná se o dlouhá vlákna. Dále se v odborné literatuře uvádí, že pokud je poměr větší než 10 dosáhneme vyztužujícího efektu. [1; 8]

- Krátká vlákna – nejčastější využití pro termoplastické kompozity, jedná se o vlákna, která jsou namleta na různé délky od 0,1 mm do 5 mm. [5]
- Dlouhá vlákna – kompozity vykazují obvykle lepší mechanické vlastnosti než v případě použití krátkých vláken. Jejich délka se pohybuje od 5 mm do 15 mm. [5]
- Nekonečná vlákna – jsou situovaná kontinuálně v celém objemu kompozitního dílu v jednom směru. To má obvykle za následek silné anizotropní chování.

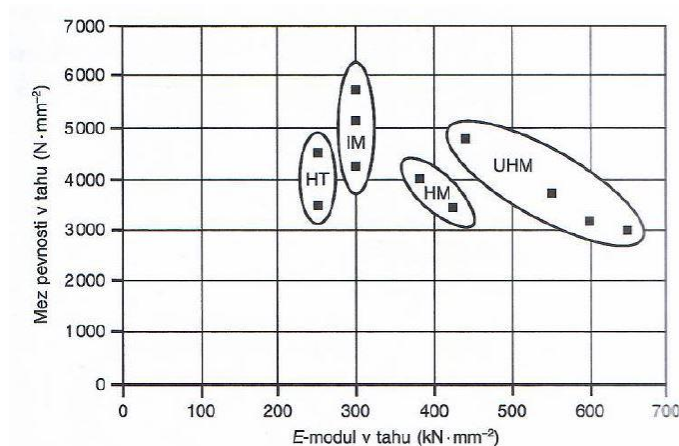
3.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna zobrazená na Obr. 6 vynikají svojí vysokou pevností, tuhostí a nízkou hustotou, ovšem na úkor malé poměrné deformace. Mimo jiné ale mají dobrou korozní odolnost. Díky své biokompatibilitě mohou být využita ve zdravotnictví. Neopomenutelnou vlastností je také jejich odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání, které je v případě kompozitu s uhlíkovými vlákny vyšší než u oceli nebo hliníku.



Obr. 6 Vnitřní struktura uhlíkového vlákna a uhlíkové vlákno zobrazené pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (převzato z [7])

Vzhledem ke složitější výrobě je hlavním negativem vláken jejich cena. Další nevýhodou je jejich silné anizotropní chování (záleží na směru namáhání). Vlákná jsou z výroby povrchově upravována apretační směsí na bázi epoxidové pryskyřice. Ta slouží jako ochrana při zpracování, protože vlákna se jinak snadno lámou, a současně zlepšuje vazbu mezi maticí a vláknem. Bohužel u dlouhodobého skladování dochází k vytvrzení apretační vrstvy a vlákna tak ztrácí svoji ohebnost. Na Obr. 7 je porovnání jednotlivých uhlíkových vláken v závislosti na modulu pružnosti a pevnosti v tahu. [7] [9]



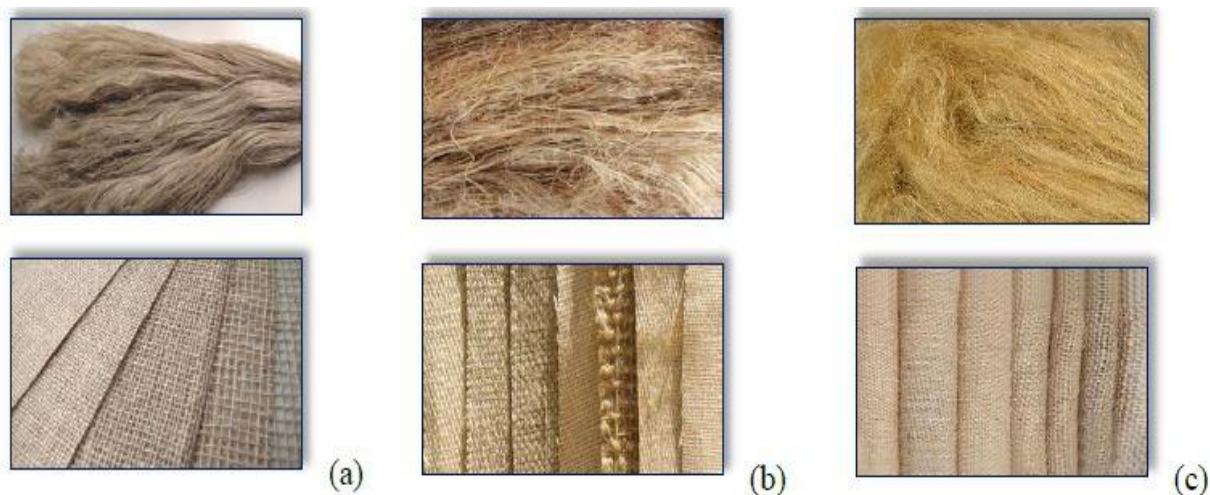
Obr. 7 Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken: HT – velká houževnatost, IM – střední modul, HM – velký modul, UHM – ultra velký modul (převzato z [7])

3.3 Organická vlákna

U vyztužování materiálu přírodními vlákny se volí pouze vlákna rostlinná, jejichž základ tvoří celulóza. Mezi tato vlákna patří např. len, juta, konopí, bavlna apod. Jednotlivá organická vlákna a textilie z nich utkané jsou na Obr. 8.

Mezi hlavní výhody patří především jejich výroba, která nespotřebovává žádný neobnovitelný zdroj, díky jejich organické struktuře jsou zdravotně nezávadná a odolná proti stárnutí. Vzhledem k nízké hustotě a celkem vysoké pevnosti v tahu jsou využívána především pro lehké konstrukce.

Nevýhodou těchto vláken je jejich různorodost, která závisí na podmínkách jejich růstu, s čímž souvisí i omezená délka vláken. Jejich zpracování je limitováno maximální teplotou, která bývá nejčastěji do 200 °C [7] [9].



Obr. 8 Příklady organických vláken a tkanin z nich vyrobených – a) len, b) konopí, c) juta (převzato z [10])

3.4 Srovnání vlastností vybraných vláken

Následující Tab. 2 poukazuje na srovnání mechanických a fyzikálních vlastností vybraných druhů vláken. Vzhledem k širokému spektru plniv, je pro každou aplikaci možné najít nejvhodnější materiál, který bude mít požadované vlastnosti. Vývoj jde ovšem neustále kupředu a jsou vyvíjeny nové výztuže a současně zdokonalovány vlastnosti již objevených výztuží.

Tab. 2 Fyzikální a mechanické vlastnosti vybraných druhů vláken (data převzata z [7])

Vlákno	Skleněné		Uhlíkové	Aramidové	Organické
Druh	E sklo	R sklo	Toray	Kevlar 49	Konopí
Průměr vláknů [μm]	5 ÷ 24	5 ÷ 24	5 ÷ 10	5 ÷ 15	15 ÷ 25
Hustota [g.cm ⁻³]	2,6	2,53	1,75 ÷ 1,95	1,45	1,48
Pevnost v tahu [GPa]	3,4	4,4	4 ÷ 5,5	3	0,6
Modul pružnosti [GPa]	73	86	230 ÷ 350	130	70
Tepelná odolnost [°C]	850	980	350	177	150
Poměrná deformace [%]	4,8	4,6	0,5 ÷ 2,2	2,4	1,6

3.5 Recyklované textilní vlákno

V posledních letech je ve většině průmyslových odvětví kladen velký důraz na recyklaci materiálů. Výjimkou samozřejmě nejsou ani kompozity, kde je jejich recyklace, a především použití recyklované výztuže, často řešeným tématem. Důvody jsou jasné, jakmile bychom dokázali efektivně a co nejehospodárněji vyrobit kompozit, který by měl požadované mechanické a fyzikální vlastnosti, mohli bychom jím postupně nahrazovat kovové materiály, kterých je i v dnešní době stále velká potřeba a jejich množství je omezené. [11; 10; 12; 13]

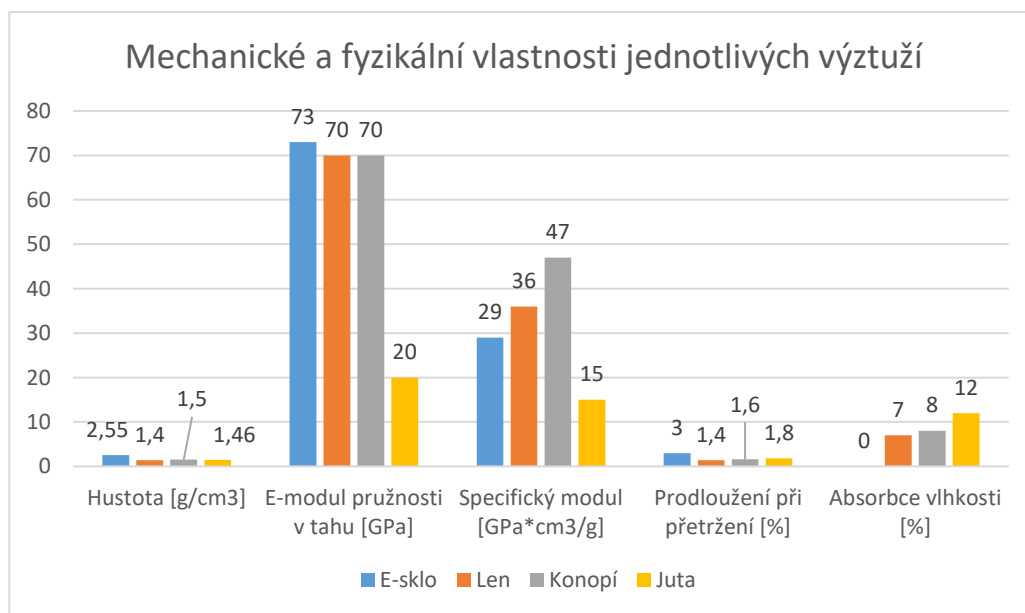
Jednou z možností je využít odpadní recyklovaný textilní materiál, pro který již není jiné využití. Druhá možnost je použití textilního odpadu přímo z průmyslu, kde se zbytků textilií, které už nejdou použít pro výrobu, zbavují. Výhodou takových vláken je fakt, že téměř jakýkoli textilní materiál jde zrecyklovat, jsou pouze dvě situace, kdy je recyklace nemožná, a to tehdy, pokud je tkanina mokrá – napadená plísní, nebo byla kontaminována rozpouštědly. Což nám dává asi 5 % textilního materiálu, který nejde zrecyklovat. U zbylých 95 % je recyklace možná.

Nabízí se tedy možnost taková vlákna využít jako výplň do polymerních maticí. Spektrum využití takových kompozitů je široké, od nábytkových materiálů přes střešní krytiny až po aplikace v automobilovém průmyslu. [11; 10; 12; 13]

3.6 Srovnání vlastností vláken z e-skla a recyklovaného organického vlákna

Recyklovaná lýková vlákna jako například len, konopí, juta apod. si pro svoji univerzálnost právem zaslouží označení „vlákna budoucnosti“.

Na Obr. 9 můžeme vidět srovnání mechanických a fyzikálních vlastností jednotlivých organických vláken oproti vláknům z e-skla. Z důvodu vyšší hustoty e-skla se zde uvádí také specifický modul pružnosti, který vznikne prostým vydělením modulu pružnosti hustotou daného materiálu. Díky tomu pak mají organická vlákna lepší poměr mezi modulem pružnosti a hustotou, než v případě e-skla. Hustota je při volbě vhodného materiálu klíčovým faktorem, jelikož nám v mnoha případech nižší hmotnost výrobku snižuje náklady. Jak ale můžeme na obrázku vidět, nevýhodou organických vláken je především jejich absorpce vlhkosti, která se v případě e-skla blíží k nule. [10; 12]



Obr. 9 Grafické srovnání mechanických a fyzikálních vlastností organických vláken s e-sklem (data převzata z [10])

4. Polotovary vláknových výztuží

Při výrobě kompozitů se vlákna používají především v upravených tvarech. Použití samostatných vláken je ve výrobě zcela výjimečné. Nejčastěji se používají následující polotovary: [2; 9]

- Roving – pramen paralelně sdružených nestočených vláken.
- Příze – spředení vláken pro následné zpracování, např. na tkaniny nebo pásy.
- Rohože ze sekaných pramenů – jsou vyráběny z neorientovaně nasekaných pramenů o délce 25 mm nebo 50 mm. Vlákna jsou vrstvena na sebe a spojena pojivem. Po vysušení jsou rohože spojeny a navíjeny do rolí, ze kterých se mohou okamžitě zpracovávat.
- Rohože z kontinuálních vláken – to samé jako v předchozím případě, jen jsou místo nasekaných vláken použita nekonečná vlákna. Rohože se lépe tvarují. [2; 9]

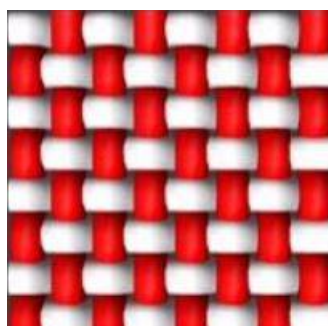
4.1 Tkaniny

Tkaniny jsou plošné útvary, které vznikají z navzájem na sebe kolmých vláken. Skládají se z osnovy, což je soustava rovnoběžně uložených vláken a útku, který se zanáší do osnovy v příčném směru. Při rozdílných typech křížení vznikají různé typy vazeb jako např. plátňová vazba, vazba panama nebo keprová vazba. [7]

V následující kapitole si popíšeme základní plátňovou vazbu, se kterou se v této studii setkáme v případě bavlněné tkaniny.

4.1.1 Plátňová vazba

Jedná se o základní vazbu s nejhustším provázáním a tvoří ji nejmenší vazba 2x2 body. Navzájem se pravidelně střídá provázání útku s osnovou. Tím se zamezuje posuvu útku a osnovy vůči sobě a vzniká tak tužší tkanina, která se vyznačuje vysokou mechanickou odolností. Vzor plátňové vazby můžeme vidět na Obr. 10. [7; 14]



Obr. 10 Plátňová vazba (převzato z [14])

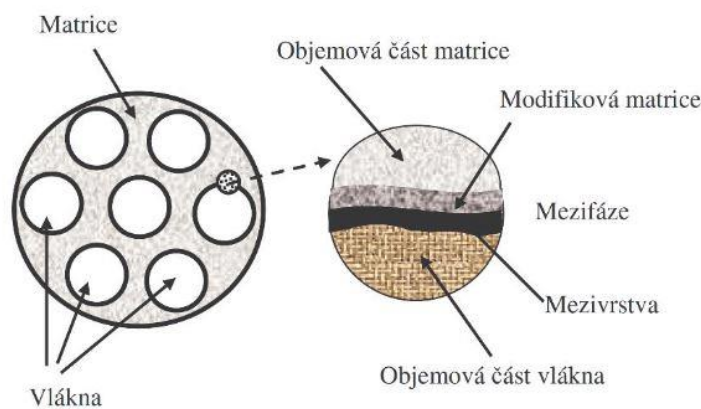
5. Mezifázové rozhraní

Základními prvky v kompozitu jsou výztuž, matrice a jejich vzájemné rozhraní. Příklad mezifázového rozhraní je znázorněn na Obr. 11., právě rozhraní mezi základními složkami je velmi důležité.

Pokud bychom brali v úvahu válcové vlákno, jeho podíl povrchu k objemu dopočítáme snadno pomocí následujícího vztahu (1), kde zanedbáváme plochu konce vláken. [8]

$$\frac{S}{V} = \frac{2\pi r l}{\pi r^2 l} = 2/r \quad (1)$$

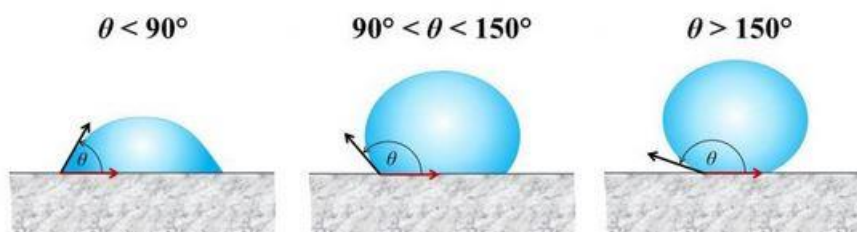
kde r je poloměr vlákna a l je jeho délka. Ze vztahu můžeme vypočítat, že čím má vlákno menší poloměr, tím je velikost mezifázového rozhraní větší. [8]



Obr. 11 Zobrazení mezifázového rozhraní (převzato z [26])

5.1 Smáčivost vláken

Dosáhnutí co největší smáčivosti vláken v matrici je největším cílem při výrobě kompozitního materiálu, čím lépe se smáčí vlákno v matrici, tím lepší jsou mechanické vlastnosti kompozitu. Smáčivost je schopnost přilnutí kapaliny k pevnému povrchu, podle způsobu přilnutí, můžeme určit, jak velkou má materiál povrchovou energii. Dle kontaktního úhlu mezi kapalinou a pevnou látkou rozpoznáme, jaké vlastnosti pevný materiál má. Příklady takových povrchů můžeme vidět níže na Obr. 12.



Obr. 12 Rozdílné druhy povrchu, dle jeho povrchového napětí (převzato z [25])

Na smáčivost vláken má také vliv jejich drsnost, ta může ovlivnit povrchovou energii, neboť na drsnějším povrchu je větší plocha, a tím pádem také větší povrchové napětí než v případě hladkého povrchu. Abychom docílili co nejlepšího kontaktu vlákna a matrice, můžeme vlákna apretovat a tím zvýšit jejich soudržnost se základní složkou, ve zvláštních případech můžeme také modifikovat složení matrice, a tím zvýšit její přilnavost na povrchu vláken. [5; 15]

6. Výroba kompozitů

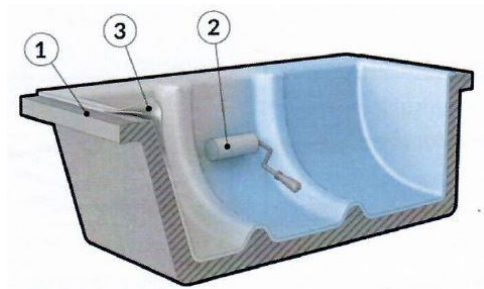
Kompozitní materiál je velice široký pojem, proto také existuje velké množství způsobů výroby polymerních kompozitů, jak s reaktoplastickou matricí tak s matricí termoplastickou, u které je jednou z hlavních výhod snadnější recyklace po uplynutí životnosti dílu. Zároveň se zde otevírají nové možnosti výroby, a s tím je spjatý postupný přechod na automatizované procesy. [16]

6.1 Výroba kompozitů s reaktoplastickou matricí

Nejprve si uvedeme několik metod výroby kompozitů s reaktoplastickou matricí, kde nejčastěji využíváme tzv. prepregy, což jsou polotovary s výztuží, zpravidla ve formě tkaniny, napuštěné požadovanou pryskyřicí. Níže si uvedeme základní principy užívaných při výrobě. [9; 16]

- Ruční kladení

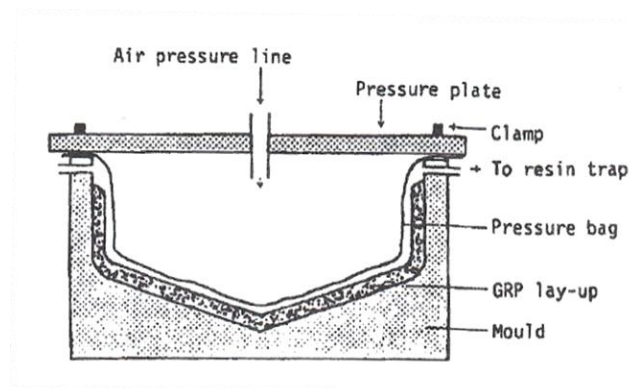
Též nazývané jako kontaktní lisování, kde nanášíme pryskyřici i výztuž ručně na povrch formy, od které se následně odvíjí jakost povrchu. Po nanesení požadovaných vrstev necháme díl vytvrdit za zvýšené teploty. Schéma metody je zobrazeno na Obr. 13. [9]



Obr. 13 Schéma postupu při ruční laminaci; 1 – forma, 2 – nanášení pryskyřice, 3 – tkanina (převzato z [9])

- Metoda tlakového vaku

Příprava kompozitu je opět založena na ručním kladení s tím rozdílem, že využijeme tlakový vzduch, který působí na blánu, která přenáší tlak na připravený kompozit. Díky tomu se vytlačí přebytečné bubliny mezi jednotlivými vrstvami. Vytvrzení může probíhat v tzv. autoklávu, kde za zvýšeného tlaku a teploty (až 300 °C), probíhá zesíťování a vznik celistvého kompozitního dílu. Tato metoda je zobrazena na Obr. 14. [9]



Obr. 14 Schéma metody tlakového vaku. Překlad: Air pressure line – přívod tlakového vzduchu, Pressure plate – přitlačná deska, Clamp – svorka, To resin trap – odvod vzduchu pod membránou, Pressure bag – tlaková membrána, GRP lay-up – kompozit, Mould – forma (převzato z [9])

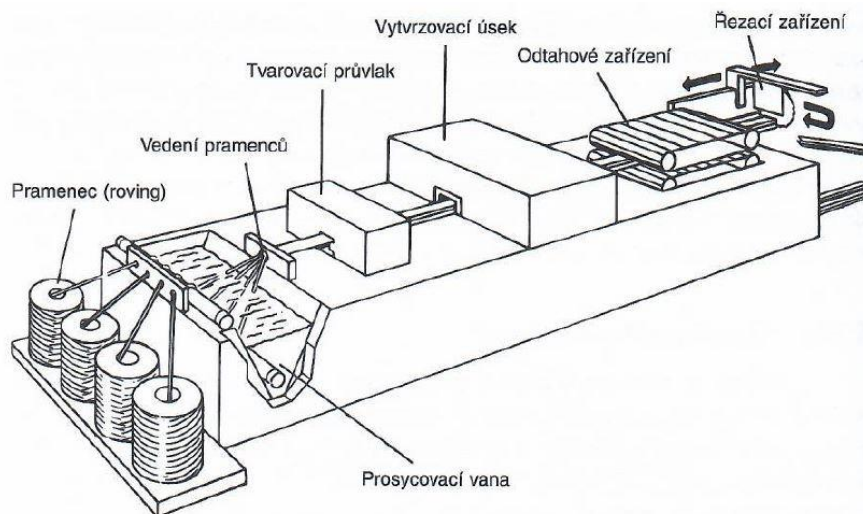
- Lisování z prepregů

Prepreg neboli preimpregnovaná vyztužující tkanina obsahuje předurčený obsah výztuže a pryskyřice. Tloušťka takového polotovaru se pohybuje okolo 0,1 – 0,5 mm.

Nastříhané polotovary (prepregy) na sebe vrstvíme do formy, dokud nedosáhneme požadované tloušťky a tím i požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností po vytvrzení. Použitím prepregů dosahujeme nejlepší reprodukovatelnosti a homogenity kompozitního dílu. Vytvrzení obvykle probíhá v autoklávu. Hlavní nevýhodou je potřeba skladování prepregů za nízkých teplot, kvůli zamezení zesíťování. [16]

- Tažení kompozitních profilů (pultruze)

Jedná se o nejrozšířenější automatizovanou technologii výroby reaktoplastických kompozitních dílů. Schéma takové výrobní linky je zobrazeno níže na Obr. 15. Princip spočívá v tažení vláken, svazků, rohoží, nebo tkanin, skrz pryskyřičnou lázeň, kde dochází k prosycení výztuže. Následně dochází k vytvrzení vzniklého polotovaru. Po vysušení se ze vzniklého profilu, pomocí pily, nařežou polotovary dle potřebných rozměrů. [16]



Obr. 15 Schéma výroby tažených profilů – pultruze (převzato z [7])

Veškeré výše uvedené metody mají alespoň jednu z následujících nevýhod:

- Velký podíl manuální práce, u které je kladen důraz na zručnost pracovníka
- Malá produktivita
- Potřeba uchovávání polotovarů v chladu
- Nemožnost dalšího využití vzniklého odpadu

Proto se v dnešní době stále častěji setkáváme s kompozity, které mají primární fázi založenou na termoplastické matrici. Díky tomu jsme schopni veškeré výše zmíněné nevýhody minimalizovat nebo je zcela vyloučit.

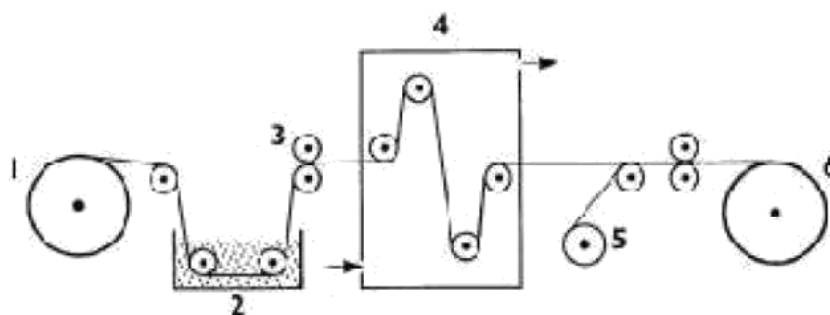
6.2 Výroba kompozitů s termoplastickou matricí

Nyní se zaměříme na způsoby výroby kompozitů s termoplastickou matricí. Nejdříve si uvedeme principy výroby prepregů a následně jejich zpracování.

6.2.1 Příprava polotovarů

- Technologie impregnace pramenců vláken v roztaveném polymeru

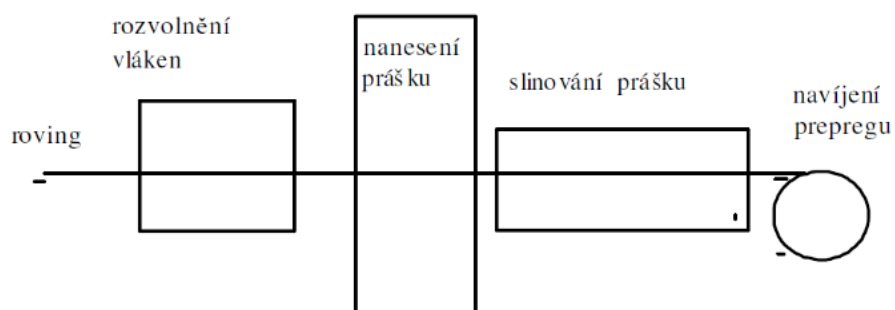
Princip této metody spočívá v tažení tkaniny skrz roztavený polymer. Pomocí vodících válců je polymer vtlačován do výztuže a zároveň se díky nim zbavujeme přebytečné matrice. Následně v sušící věži necháme nasycenou tkaninu ztuhnout a poté ji s krycí fólií navíjeme na cívku. Schématické zobrazení výroby takových prepregů je zobrazeno na Obr. 16. [16; 17]



Obr. 16 Technologie impregnace pramenců vláken v roztaveném termoplastickém polymeru, 1 – role tkaniny, 2 – vana s roztaveným polymerem, 3 – válce k prosycení výztuže, 4 – sušící věž, 5 – separační fólie, 6 – role s tkaninovým prepregem. (převzato z [17])

- Impregnace rovingu suchým práškem ve fluidním loži

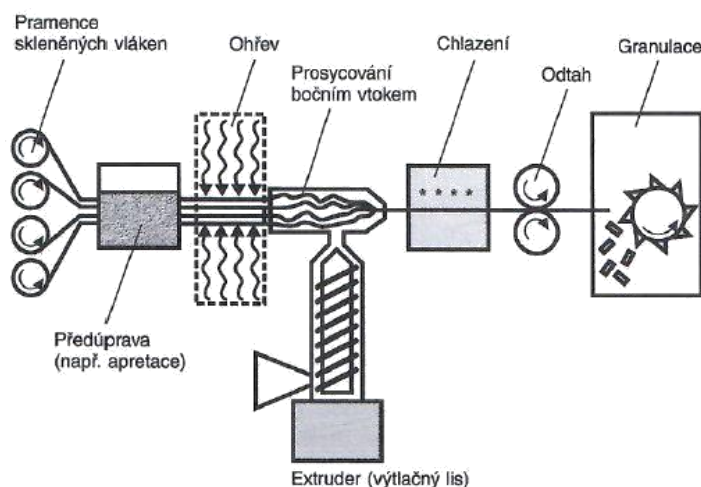
U této technologie využíváme rovingy z vláken, které před prosycením rozvolníme, a následně, namísto lázně s roztaveným polymerem, máme prášek, který nanese na vlákna a ve slinovací komoře probíhá roztavení a spojení s výztuží. Po vychladnutí prepreg opět navíjíme na cívku. Na Obr. 17 můžeme vidět blokové schéma výroby prepregů ve fluidním loži. [16; 17]



Obr. 17 Schéma metody nanášení polymerního prášku na tkaninovou výztuž (převzato z [17])

- Výroba kompozitního granulátu

Princip této metody uvedené na Obr. 18 spočívá v prosycení výztuže pomocí extruderu (výtlačný lis), který tlačí polymer do prosycovací komory, kde se kontinuálně odvíjí vlákno. Po nanesení matrice probíhá její chlazení a jako poslední krok je granulace pomocí pilových kotoučů. [7]



Obr. 18 Schéma výroby kompozitního granulátu (převzato z [7])

6.2.2 Zpracování polotovarů

Při zpracování výše popsaných polotovarů zpravidla využíváme teplo a tlak. Veškeré níže popsané metody fungují na principech, které jsou založené na těchto dvou veličinách.

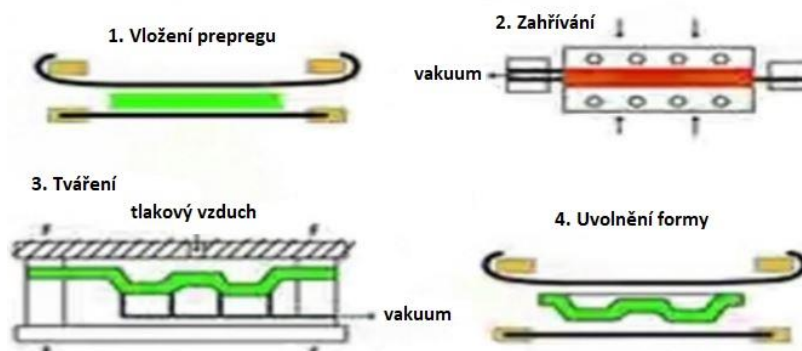
- Ruční kladení

Jako v případě reaktoplastických kompozitů, i zde může probíhat ruční kladení jednotlivých vrstev prepregů, nebo dokonce samotné tkaniny, které se prokládá fólií z polymerního materiálu. Po dosažení požadované tloušťky se za působení tepla a tlaku vytvoří konečný kompozit. [9]

- Tváření membránou

Metoda výroby kompozitních dílů, která využívá membrán, mezi které se navrství prepregy. Jakmile dosáhneme požadované tloušťky, v prostoru mezi membránami vytvoříme vakuum. Dodáme požadované teplo, které se odvíjí od použité matrice v prepregu, a na jednu z membrán vytvoříme tlak. Díky němu se nám membrány s kompozitním dílem vytvarují do formy o požadovaném tvaru. Následuje

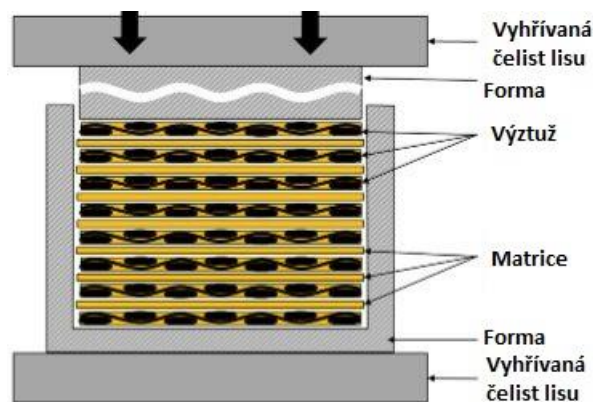
setrvání na teplotě, kvůli správnému prosycení a chlazení. Postup výroby je uvedený na Obr. 19. Nevýhodou této metody je životnost membrán. [9; 17]



Obr. 19 Tváření kompozitu pomocí membrán (převzato z [17])

- Tváření na lisu

Do formy vložíme buď granulát, který promícháme s výztuží, nebo využijeme hotové prepregy, které na sebe opět navrstvíme viz Obr. 20. Následně formu s připravenou směsí zahřejeme na teplotu, která se odvíjí od použité matrice. Jakmile dojde k roztavení primární fáze, můžeme na formu, pomocí lisu, vyvinout potřebný tlak, který nám zajistí prosycení výztuže a zbavení se přebytečných bublin. Po lisování následuje chlazení a vyjmutí hotového dílu z formy. [16]



Obr. 20 Schéma výroby kompozitu na lisu s vyhříváními čelistmi (převzato z [27])

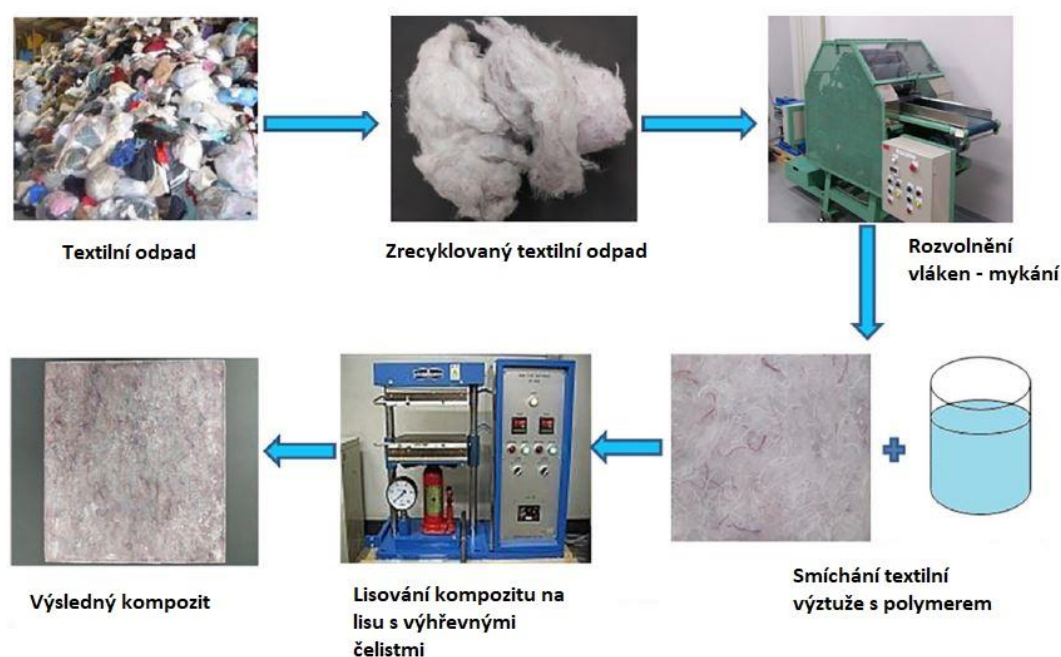
7. Analýza současného výzkumu polymerních kompozitů

7.1 Kompozity s textilní výztuží

Jak je již v této práci výše zmíněno, organická vlákna mají oproti tradičním výztužným vláknům, jako jsou skleněná a uhlíková, nižší hustotu, nízké náklady na výrobu, vysokou houževnatost, dobrou recyklovatelnost a biologickou rozložitelnost. Schéma výroby polymerních kompozitů s textilním vláknem je uvedeno na Obr. 21.

Doposud se výzkum zabýval především reaktoplastickými kompozity, kde díky nižší viskozitě pryskyřic dochází k lepšímu prosycení textilních vláken a díky tomu má konečný díl lepší vlastnosti než v případě použití termoplastické matrice. Přesto existuje několik experimentů, které se zabývají použitím polyethylenu, což by primární fáze kompozitu.

Níže si uvedeme popis přípravy a zhodnocení výsledků takových experimentů. [10; 11; 12; 13]



Obr. 21 Proces výroby kompozitu z recyklovaných textilních vláken (převzato z [28])

Z důvodu omezení maximální teploty (160°C) vyhřevnosti lisu, který máme k dispozici pro naši experimentální část, se budeme zabývat pouze nízkohustotním polyethylenem, který má teplotu tání T_m do 160°C . Bohužel jsme při analyzování

současného výzkumu nenašli studie zaměřující se na přípravu takovýchto kompozitních materiálů. Z toho důvodu se v rešerši zaměříme na matrice z vysokohustotního polyethylenu a polypropylenu, které mají nejpodobnější mechanické vlastnosti zapsané v níže uvedené Tab. 3 jako nízkohustotní polyethylen. [18]

Tab. 3 Mechanické a fyzikální vlastnosti polyethylenu a polypropylenu (data převzata z [3; 18])

Matrice	Hustota [g /cm ³]	Pevnost v tahu [MPa]	Index toku taveniny [g /10min]
PE – HD	0,968	28,9	5,4
PP	0,91	34,3	5

Index toku taveniny (MFR, z anglického překladu Melt Flow Rate) nám říká, kolik plastu se protlačí skrz kapiláru během 10 minut. Při zkoušce použijeme malý vzorek, který je zahřátý na předepsanou teplotu a pomocí pístu je plast tlačěn skrz kapiláru. Zatížení pístu se obvykle volí 2,16 kg nebo 5 kg. MFR úzce souvisí s viskozitou roztaveného plastu. Čím vyšší MFR je, tím nižší je viskozita taveniny. [17]

Odpadní vlákna hedvábí a bavlny byla nařezána na délky 1 mm, 2,5 mm a 5 mm. V dalším kroku proběhlo smíchaní všech délek. V Tab. 4 uvedené níže, jsou zapsány charakteristiky použitých vláken. [18]

Decitex neboli dtex je mezinárodní jednotka pro jemnost textilních vláken a vyjadřuje hmotnost v gramech na 10 000 m délky. Čím vyšší je dtex, tím je vlákno hrubší. [19]

Tab. 4 Mechanické a fyzikální vlastnosti recyklovaného hedvábí a recyklované bavlny (data převzata z [18])

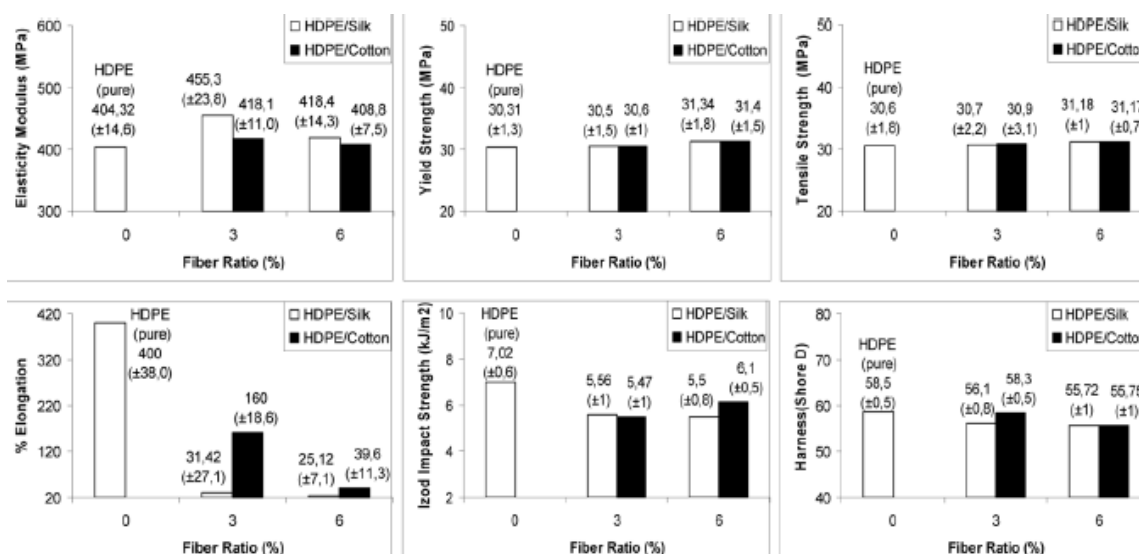
Vlastnosti	Recyklované hedvábí	Recyklovaná bavlna
Místo výroby	Turecko	Turecko
Tloušťka vlákna [μm]	15	17
Hustota [g/cm^3]	1,3 – 1,37	1,54
Absorpce vlhkosti [%]	11	8
Síla vlákna [g/tex]	30 – 50	4 – 5
Prodloužení [%]	13 – 20	5 – 6

Následující Tab. 5 uvádí veškeré zkoumané kombinace matrice a výztuže a zároveň poukazuje, v jakém procentuálním hmotnostním poměru se kompozitní směs připravovala.

Tab. 5 Veškeré zkoumané kombinace matrice a výztuže (data převzata z [18])

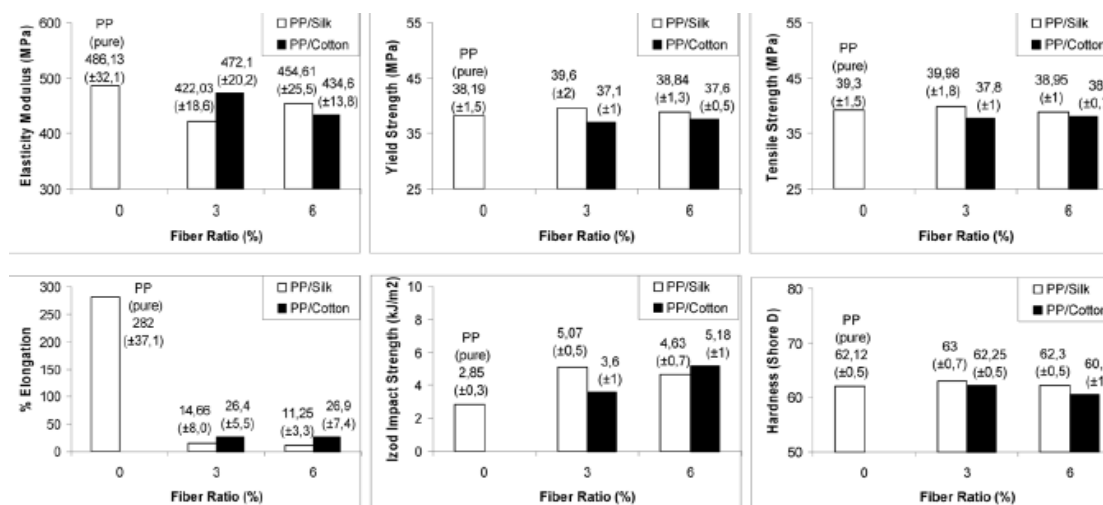
Smíchaná vlákna délek 1 mm, 2,5 mm a 5 mm	
97% polymer a 3 % výztuž	94% polymer a 6 % výztuž
PE – HD + hedvábí	
PE – HD + bavlna	
PP + hedvábí	
PP + bavlna	

Vliv textilního plniva v kompozitu je pro oba materiály zanedbatelný. Přesto z Obr. 22 můžeme vidět mírné zvýšení modulu pružnosti při využití hedvábí i bavlny. Pevnost kompozitů zůstala v obou případech srovnatelná se 100% PE – HD. Poměrné prodloužení i rázová houževnatost se s přidáním vláken snížila. V případě tvrdosti došlo ke snížení oproti čistému polyethylenu. [18]



Obr. 22 Srovnání čistého polyethylenu s polyethylenem s textilní výztuží, Překlad: Elasticity Modulus – Modul pružnosti, Fiber Ratio – Množství vláken v kompozitu, Yield Strength – Mez kluzu, Tensile Strength – Pevnost v tahu, Elongation – Poměrné prodloužení, Izod Impact Strength – Rázová houževnatost dle Izod, Hardness – tvrdost, Materiály: HDPE (pure) – čistý polyethylen, HDPE/Silk – Polyethylen s hedvábím, HDPE/Cotton – Polyethylen s bavlnou (převzato z [18])

Polypropylen vyztužený textilními vlákny vykazuje snížení modulu pružnosti, jak můžeme vidět na Obr. 23. Pevnost v tahu se s přidáním hedvábí mírně zvýšila, avšak bavlněnou výztuží došlo k poklesu pevnosti. Poměrné prodloužení se v případě kompozitů razantně snížilo oproti čistému polypropylen. Rázová houževnatost se zvýšila pro obě použité výztuže. Tvrdost zůstala stejná jako v případě 100% PP. [18]



Obr. 23 Srovnání čistého polypropylenu s polypropylenem s textilní výztuží, Překlad: Elasticity Modulus – Modul pružnosti, Fiber Ratio – Množství vláken v kompozitu, Yield Strength – Mez kluzu, Tensile Strength – Pevnost v tahu, Elongation – Poměrné prodloužení, Izod Impact Strength – Rázová houževnatost dle Izod, Hardness – tvrdost, Materiály: PP (pure) – čistý polypropylen, PP/Silk – Polypropylen s hedvábím, PP/Cotton – Polypropylen s bavlnou (převzato z [18])

7.2 Kompozity s uhlíkovými vlákny

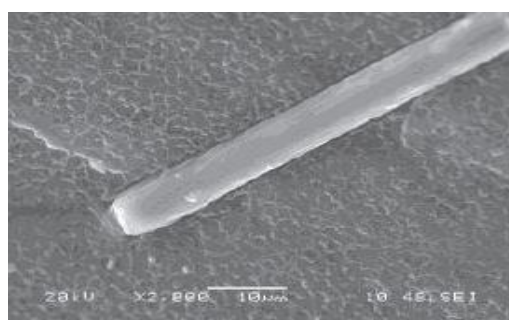
Na rozdíl od textilní výztuže zlepšuje použití uhlíkových vláken v kompozitu s termoplastickou polymerní matricí výrazně fyzikální a mechanické vlastnosti. Je ovšem nutné vlákna v kompozitu uspořádat tak, aby byla zcela separovaná a rovnoměrně rozložená po celém objemu.

I v tomto případě se zaměříme především na polyethylenovou matrici, jako výztuž zvolíme uhlíková vlákna. Kompozity byly vyrobeny smícháním roztaveného PE s vlákny při teplotě 160°C. Výsledná směs byla mechanicky rozemleta (při 80 °C–100 °C) k získání granulátu obvykle o průměru 2–5 mm. Granule byly následně zpracovány nejčastěji metodou vytlačování extrudérem při 180°C. Z většiny studií vyplývá, že nejvhodnějším množstvím uhlíkových vláken v polyethylenovém kompozitu je 10 hm. %. [15; 20]

U všech polyethylenových kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny došlo ke zvýšení meze kluzu i pevnosti a modulu pružnosti. Zároveň došlo k významnému snížení poměrného prodloužení, především při napětí na mezi kluzu. Přehledné shrnutí průměrných hodnot polyethylenu a polyethylenu vyztuženého uhlíkovými vlákny můžeme vidět v Tab. 6 níže. Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu je na Obr. 24. [15; 21]

Tab. 6 Mechanické vlastnosti čistého polyethylenu a polyethylenu vyztuženého uhlíkovými vlákny (data převzata z [21])

Materiál	σ_m [MPa]	E [MPa]	ϵ_{kt} [%]	ϵ_r [%]
PE – LD	14	320	300	550
PE – LD+10%CF	23	1675	5,4	295



Obr. 24 Snímek ze SEM – Uhlíkové vlákno s PE matricí (převzata z [21])

Experimentální část

8.Návrh a provedení experimentu

V praktické části se budeme zabývat přípravou a výrobou kompozitů s polyethylenovou matricí. Nízkohustotní polyethylen volíme z důvodu omezení výhřevnosti čelistí lisu, kde dosahujeme maximální teploty do 160 °C.

V první části jako výztuž zvolíme krátká uhlíková vlákna, u kterých se zaměříme především na vliv jejich koncentrace v kompozitu na mechanické a fyzikální vlastnosti.

Vlákna rozseparujeme pomocí ultrazvuku, za použití polypropylalkoholu a po vysušení výztuž smícháme s polyethylenem v základním stavu a s polyethylenem plazmově upraveným. Následně za pomoci tepla a tlaku vytvoříme kompozitní materiál, ze kterého budeme určovat výsledné vlastnosti, pomocí materiálových zkoušek, ty srovnáme s vlastnostmi neplněných matric.

V druhé části se zaměříme na použití textilní výztuže, kde očekáváme menší zlepšení mechanických vlastností oproti uhlíkovým vláknům. Z důvodu velkých zbytků textilního odpadu je recyklace a využití takových vláken aktuální problematikou. V experimentu proto použijeme různá textilní vlákna a tkaniny, smíchané s polyethylenem a určíme výsledné vlastnosti kompozitního materiálu, které opět srovnáme s vlastnostmi neplněných matric.

8.1 Použité přístroje a pomůcky

Při výrobě kompozitních vzorků byla použita tato zařízení:

- **Hydraulický lis**

Hydraulický lis s označením WP 45H od firmy Holzmann-Maschnen, zobrazený na Obr. 25 umožňující použít zatížení do 45 tun. Lis je ovládaný ručně pomocí páky, která je spojena s hydraulickým pístem, který vyvíjí požadovaný tlak na materiál. Po vyrobení vzorku se na hydraulickém pístu povolil ventil, díky dvěma tažným pružinám se horní čelist lisu vrátila do výchozí polohy a hydraulická kapalina se přečerpala zpět nad píst.



Obr. 25 Hydraulický lis WP 45H

- **Vyhřívání čelisti**

Pro docílení požadované teploty pro úplné roztavení matrice, musejí být čelisti lisu vyhřívány. Proto jsme při experimentu použili měděné desky, zobrazené na Obr. 26 a), ve kterých se nachází tepelná spirála z odporového drátu. Potřebnou teplotu jsme nastavovali pomocí dvou PID regulátorů Ht60B Obr. 26 b), kterými se řídil příkon pro spodní a horní desku. Zpětná vazba o konkrétní teplotě byla zjišťována pomocí implementované sondy v obou deskách. Chlazení desek je zajištěno vnitřními kanály, kterými protéká chladicí médium. V našem experimentu byla použita voda z vodovodního řadu.



a)



b)

Obr. 26 a) vyhřívání čelisti lisu b) PID regulátory Ht60B

- **Ultrazvuková čistička**

Pro výrobu kompozitní směsi – smíchání polyethylenu s uhlíkovými vlákny, a především pro rozseparování krátkých uhlíkových vláken, byla použita ultrazvuková čistička zobrazená na Obr. 27, naplněná destilovanou vodou.



Obr. 27 Ultrazvuková čistička značky Neyson

- **Forma**

Pro výrobu kompozitního vzorku byla zhotovena měděná forma, znázorněná na Obr. 28 a), která byla složena ze tří částí. Vnitřní rozměr formy byl 140 x 140 mm, výšku vzorku určoval měděný rám na Obr. 28 b), který se usadil na spodek formy. Pro náš experiment byly vyrobeny dvě různé tloušťky rámu. První byl vysoký 2 mm a druhý 4 mm, výsledný vzorek byl vždy o 0,5 mm tenčí, jelikož zde bylo uložení s mírným přesahem z důvodu utěsnění formy a předejití případnému vytečení matrice skrze dno formy.



Obr. 28 a) měděná forma pro přípravu vzorků b) měděný rám formy

8.2 Použité materiály

Pro výrobu vzorků byly použity dva základní druhy nízkohustotního polyethylenu, který nám ve všech případech sloužil jako matrice kompozitu. Podrobnější popis je uveden níže.

- **Dowlex 2629.10UE – základní stav**

Dále jen DOW – ZS je druh nízkohustotního polyethylenu, dodávaného ve formě bílého prášku. Po zpracování mají konečné výrobky vysokou houževnatost, lesk a dobrou rozměrovou stabilitu. Vykazuje dobrou houževnatost při nízkých teplotách a odolnost proti nárazu a praskání. Je stabilní při UV záření a povětrnostním vlivům. Obvykle se zpracovává pomocí vstřikovacích lisů nebo rotačním spékáním – rotomoldingem. [22]

Vlastnosti materiálu uváděné výrobcem jsou shrnuty v níže uvedené Tab. 7.

Tab. 7 Vlastnosti nízkohustotního polyethylenu uváděné výrobcem (data převzata z [22])

Mechanické a fyzikální vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Hustota	0,935	g /cm ³
Teplota tání	124	°C
Index toku taveniny	4	g /10 min
Mez pevnosti	17,5	MPa
Tažnost	650	%
Modul pružnosti v ohybu	645	MPa

- **Dowlex 2629.10UE – plazmovaný**

Materiál vzniklý plazmovou úpravou základního polyethylenu Dowlex 2629.10UE, dále jen DOW – PL. Tuto úpravu zajistila firma SurfaceTreat pomocí zařízení LA 400, které funguje na principu generování plazmatu z mikrovlnného zdroje ve vakuu. Tato úprava má zásadní vliv na konečnou adhezi materiálu, která je v případě výroby kompozitů velmi stěžejní. Mechanické a fyzikální vlastnosti se od běžného DOW – ZS výrazně neliší. Ovšem abychom mohli porovnávat zlepšení vlastností zhotovených kompozitů vůči neplněným matricím, vždy jsme daný materiál podrobili vlastním zkouškám, a to z důvodu vyloučení odchylky od materiálových listů.

8.3 Charakterizace použitých matric

Pro charakterizaci čistého polyethylenu, coby primární fáze pro naše kompozitní vzorky, využijeme metodu DSC – diferenční snímací kalorimetrie.

8.3.1 Diferenční snímací kalorimetrie

Tato metoda měření je určena pro termickou analýzu plastů. Hlavní určující charakteristiky z této zkoušky jsou teplota tání a teplota krystalizace. Zároveň nám měření vyhodnotí z endotermní reakce měrné teplo, potřebné k přechodu z pevného skupenství do kapalného neboli entalpii tání. Naopak při chladnutí vzorku DSC zachycuje exotermní reakci, která určuje potřebnou entalpii pro krystalizaci.

Průběh zkoušky spočívá ve vystavování zkoumaného vzorku, uloženého v kelímku, a referenčního (prázdného) kelímku lineárnímu ohřevu nebo ochlazování, při tom se plynule mění velikost tepelného příkonu. Výstupem je křivka zaznamenávající závislost rozdílu tepelného toku na čase či teplotě. Všeobecně se považuje endotermní reakce za kladnou a exotermní reakce za zápornou, vzhledem ke svislé ose.

Měření těchto materiálových charakteristik probíhalo na přístroji STA 409PG LUXX od společnosti Netzsch, zobrazeného na Obr. 29, který je určený pro zjišťování termických analýz polymerních materiálů.

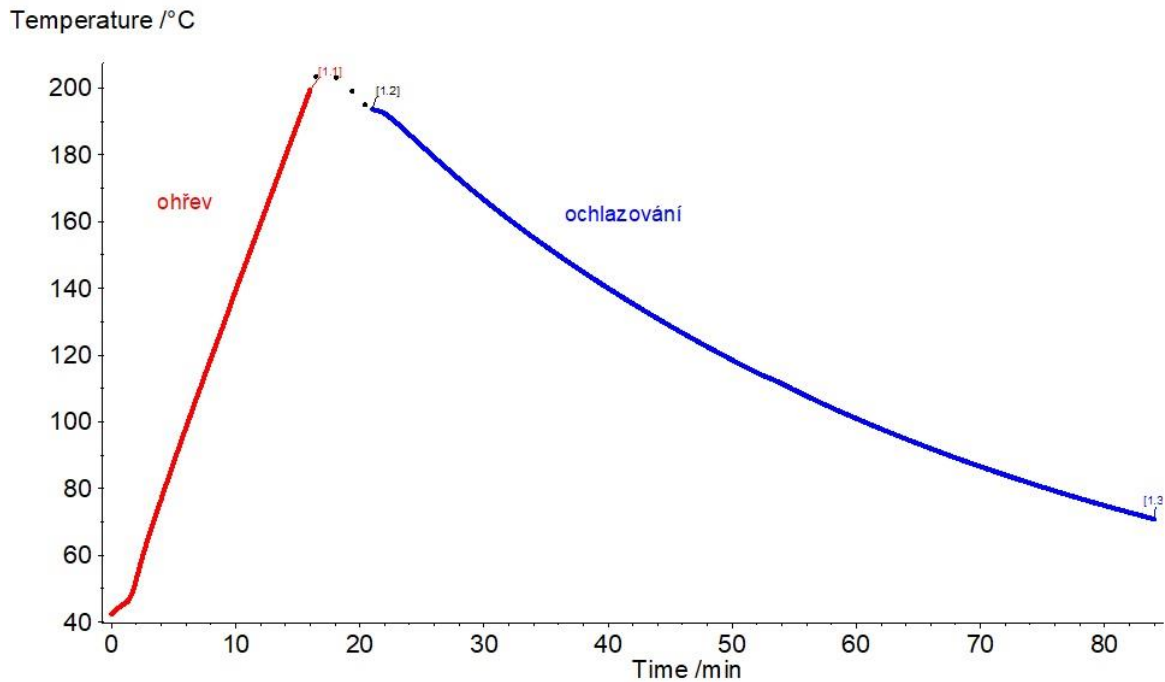


Obr. 29 Pracoviště pro zkoušku DSC

Ohřívání obou druhů PE – LD bylo prováděno na teplotu 200 °C, abychom docílili úplného roztavení vzorků. Zároveň ale také při této teplotě nedochází ke spálení, potažmo k degradování polyethylenu. Teplotní cyklus zkoušky je znázorněn na Obr. 30. Z grafu lze vyčíst, že rychlost ohřevu byla nastavena na 10 °C /min. Měření probíhalo v ochranné atmosféře za přítomnosti dusíku. Jak lze vidět na Obr. 31 a Obr. 32, při 80 °C se začínají rozvolňovat první krystalické oblasti, se zvyšující se teplotou přecházíme k postupnému roztavení všech sférolitů a v nejvyšším bodě

endotermní křivky odečteme teplotu tání, nad 150 °C se struktura materiálu už nijak výrazně nemění.

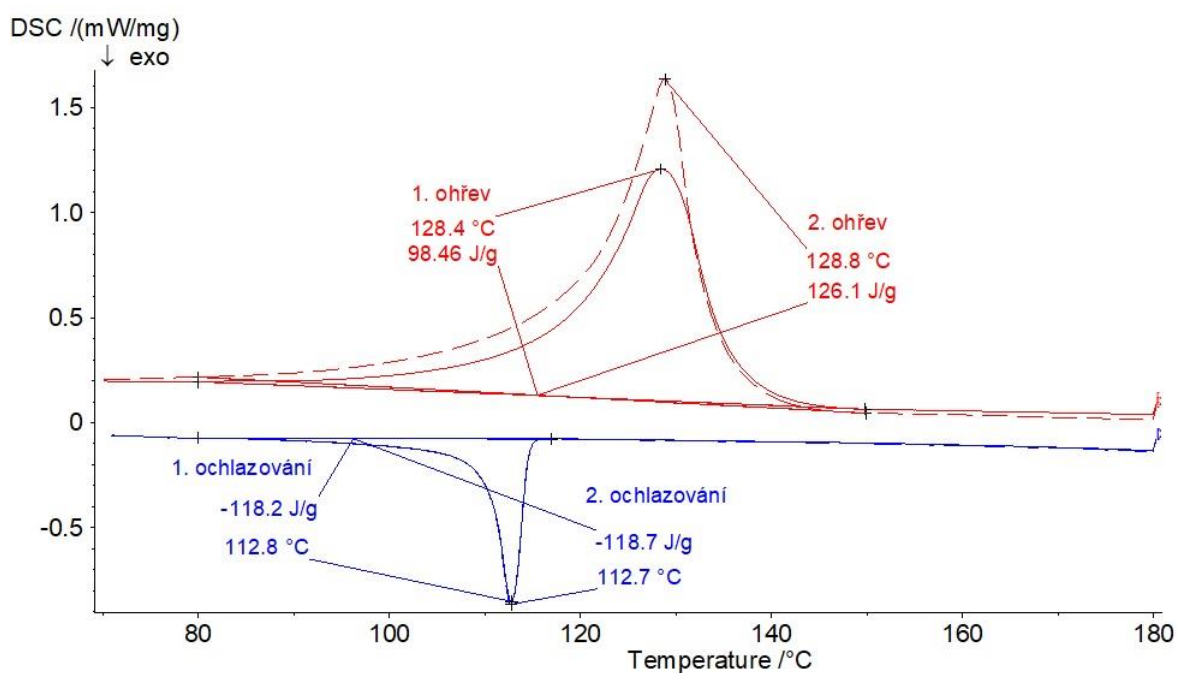
U DSC zkoušky jsme pro každý zvolený materiál učinili dva ohřevy. Abychom zjistili, jaké teploty tání a krystalizace a hodnoty entalpie bude mít materiál po prvotním ohřevu. Tento údaj je pro nás nejrelevantnější, neboť při přípravě kompozitních vzorků jsme využili vždy první ohřev pro přípravu prepregu a druhý pro konečné slisování.



Obr. 30 Křivka teplotního průběhu během DSC zkoušky, Překlad: Temperature – teplota, Time – čas

- DOW – ZS

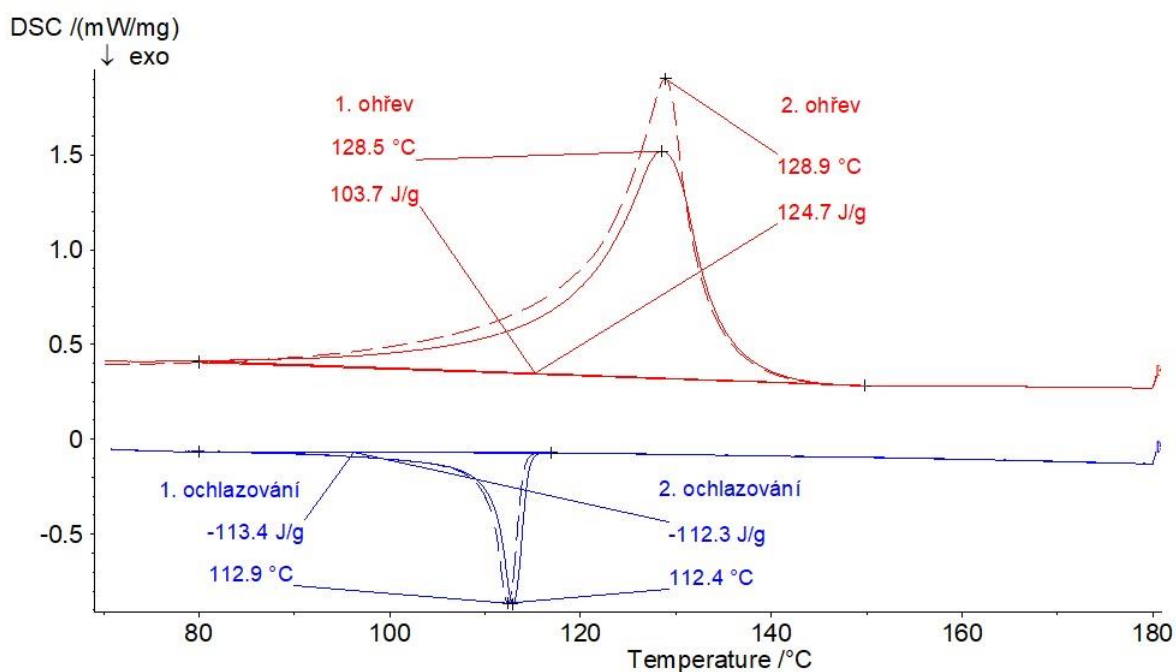
Výsledek měření materiálu DOW – ZS je zobrazen na Obr. 31. Z křivek lze vyčíst, že jsou teploty tání ($t_t = 128\text{ °C}$) a teploty krystalizace ($t_k = 113\text{ °C}$) pro první a druhý ohřev materiálu totožné. Tento údaj je pro náš experiment velice důležitý, jelikož díky tomuto zjištění nemusíme zvyšovat teploty přípravy při konečném slisování vzorků. Entalpie krystalizace ($H = -118\text{ J /g}$) je také neměnná a hodnoty pro obě křivky se příliš neliší. Ovšem u entalpie tání se nám hodnota druhým ohřevem zvedla o přibližně $\Delta H = 28\text{ J /g}$, to může být zapříčiněno zvětšením podílu krystalické fáze po prvotním ohřevu. Posledním relevantním údajem, který lze z Obr. 31 vyčíst, je, že k roztavení veškerých krystalických útvarů v materiálu dochází při teplotě 150 °C. Z toho důvodu se musíme při výrobě vzorků pohybovat nad touto teplotou.



Obr. 31 Výsledek zkoušky DSC pro DOW – ZS, plná křivka – 1. ohřev, čárkovaná křivka – 2. ohřev

- DOW – PL

U plazmovaného PE – LD se teploty tání ($t_i = 128 \text{ °C}$) a teploty krystalizace ($t_k = 112 \text{ °C}$) také nijak zásadně neliší z prvního a druhém ohřevu, jak lze vidět na Obr. 32, uvedeném níže. To samé platí i pro entalpii krystalizace ($H_k = 113 \text{ J/g}$). Stejně jako je tomu v prvním měření u materiálu DOW – ZS, entalpie tání se opět zvedla při druhém ohřevu o $\Delta H = 21 \text{ J/g}$. To může být opět zapříčiněno zvětšením krystalické fáze v materiálu po prvním ohřevu. Ke kompletnímu roztavení krystalické fáze opět dochází při cca 150 °C . Z Obr. 31 a Obr. 32 můžeme také vypořadovat, že hodnoty jsou pro polyethylen v základním stavu a pro plazmovaný polyethylen veskrze stejné. Díky tomu můžeme zvolit totožné podmínky přípravy pro oba materiály.



Obr. 32 Výsledek zkoušky DSC pro DOW – PL, plná křivka – 1. ohřev, čárkovaná křivka – 2. ohřev

8.3.2 Sypná hmotnost prášku

Pro definování sypných hmotností použitých prášků jsme použili krabičku o přesně daném objemu $V = 13,35 \text{ ml}$ a pomocí laboratorní váhy jsme určovali hmotnost před pěchováním a po pěchování. Díky zjištěné hustotě jsme mohli přesně určit jaké množství prášku je potřebné pro vyplnění měděné formy. Hodnoty pro obě použité matrice jsou zapsány v níže uvedené Tab. 8.

Tab. 8 Sypné hmotnosti a hustota prášků.

	Hmotnost [g]		Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]		
	nasypaní	upěchování	nasypaní	upěchování	tabulková
PE DOWLEX ZS	5,2724	6,0977	0,3953	0,4571	0,92
PE DOWLEX PLAZMA	4,7210	6,0429	0,3539	0,453	0,92

Pro určení přesné hmotnosti prášku dosadíme do vzorce:

$$m = V \cdot \rho \quad (2)$$

kde V je objem formy a ρ značí hustotu prášku.

Po dosazení do vztahu (2) nám vychází, že pro vyplnění formy bude potřeba $m = 63,112 \text{ g}$ prášku. Z důvodu přibližně dvakrát menší hustoty nasypaného prášku

musí být objem použitého prášku dvojnásobný. Objemy pro oba druhy prášků jsou zapsané níže:

- Dowlex ZS: $V = 159,66 \text{ cm}^3$
- Dowlex PL: $V = 178,33 \text{ cm}^3$

Z těchto výpočtů vyplývá, že při výrobě vzorku o objemu $V = 68,6 \text{ cm}^3$ musíme použít více jak dvakrát větší objem polyethylenu v práškové formě. Z toho důvodu jsme při výrobě destiček zvolili postupné lisování, kdy prvně docházelo k přiblížení čelistí, následně k předlisování a až poté k samotnému lisování. Tento postup jsme zvolili z důvodu postupného zhutňování použitého prášku.

8.4 Charakterizování použité výztuže

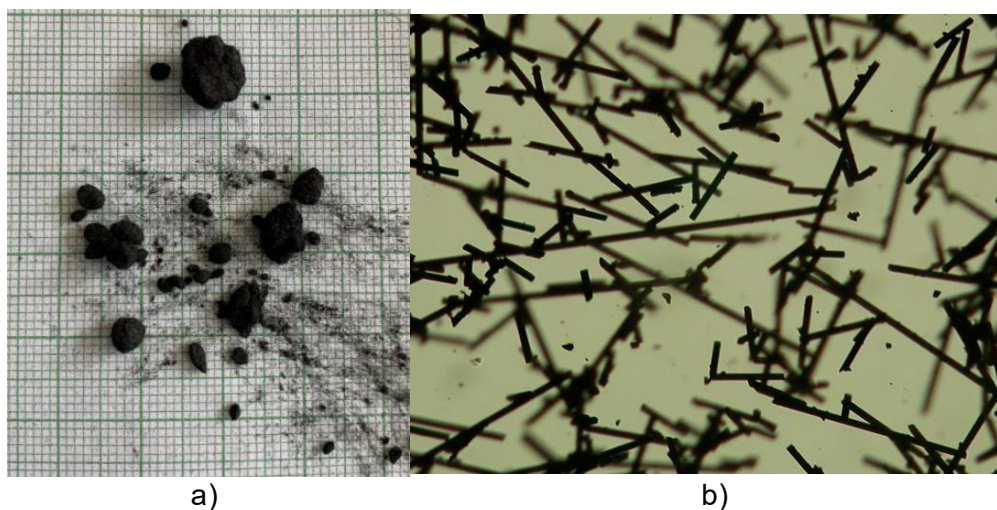
Jak je již výše uvedeno, tato práce se zabývá především použitím krátkých uhlíkových vláken a textilních vláken v kompozitu. Níže si uvedeme základní charakteristiky obou z výztuží.

8.4.1 Krátká uhlíková vlákna

Vyztužení PE – LD matrice krátkými uhlíkovými vlákny znázorněnými na Obr. 33 a) byl hlavní záměr této studie. Na Obr. 33 b) můžeme vidět snímek za použití objektivu, který nám zvětšil naši použitou výztuž v měřítku 20:1. V předchozích letech se experimenty zabíraly v první řadě použitím dlouhých uhlíkových vláken na stejném lisovacím zařízení, kdy došlo pouze k mírnému vyztužení materiálu. Nyní jsme zvolili krátká vlákna, abychom zjistili, zda mají na mechanické vlastnosti větší vliv než dlouhá vlákna. Vlastnosti naší použité výztuže jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 Vlastnosti použitých krátkých uhlíkových vláken (převzato z přílohy .č. 2)

Délka [μm]	100 – 250
Průměr [μm]	7 ± 1
Vlhkost [%]	max 0,5
Hustota [g /cm^3]	1,8
Pevnost v tahu [MPa]	>3500
Modul pružnosti [GPa]	>230
Prodloužení [%]	1,5
Objemová hustota [g /l]	250 – 550



Obr. 33 a) nerozseparovaná krátká uhlíková vlákna, b) přibližný snímek vláken z polarizačního mikroskopu Nikon Eclipse ME600 v měřítku 20:1

8.4.2 Bavlna

Hlavní myšlenkou použití bavlny, coby sekundární fáze v kompozitu, byla snaha o využití odpadní a recyklované tkaniny, která by v textilním průmyslu už neměla žádné využití. Z hlediska výztuže by stále mohla zlepšit mechanické vlastnosti polyethylenu.

Z důvodu různorodosti možného bavlněného textilního odpadu si zde uvedeme tabulkové údaje mechanických vlastností suché bavlny zapsaných v Tab. 10. Jelikož se jedná o organický materiál, vlastnosti jsou úzce spjaté, s tím za jakých podmínek byl bavlník pěstovaný a zpracovaný.

Jednotka decitex neboli dtex je popsána v teoretické části práce v kapitole 7.1.

Tab. 10 Mechanické a fyzikální vlastnosti bavlněného vlákna (data převzata z [23])

Měrný modul pružnosti [N /Tex]	3,5 – 4,8
Pevnost [N *dtex ⁻¹]	27 – 43
Tažnost [%]	3 – 10
Měrná hmotnost [g /cm ³]	1,51
Síla vlákna [μm]	10 – 21
Jemnost vlákna [dtex]	1,5 – 5

Při výrobě zkušebních těles jsme zvolili různé druhy, tvary a velikost nastříhané tkaniny.

8.5 Zkoušky a charakterizování kompozitních vzorků

Vyhotovené vzorky jsme podrobili zkouškám pro zjištění následujících mechanických vlastností: pevnost v tahu, modul pružnosti v ohybu a vrubová houževnatost.

Z fyzikálních vlastností jsme zjišťovali hustotu kompozitních vzorků, ze které jsme následně dopočítávali teoretický obsah výztuže ve vzorcích.

8.5.1 Zkouška tahem

Základní principy zkoušky tahem byly převzaty z normy ČSN EN ISO 527-1 Plasty – Stanovení tahových vlastností, avšak rozměry a tvary vzorků nemohly být dle normy zcela dodrženy z důvodu náročné výroby a přípravy. Z toho důvodu jsme pro zkoušku zvolili metodu vyřezání obdélníkových pásů z kompozitní destičky, u kterých jsme před každým měřením změřili daný průřez na třech místech a konečnou hodnotu zprůměrovali.

Hodnotu pevnosti jsme dopočítali dle následujícího vztahu (3):

$$\sigma = \frac{F_M}{A} \quad (3)$$

kde F_M je maximální dosažená síla při zkoušce tahem a A odpovídá ploše průřezu.

Rychlost zatěžování byla u všech vzorků zachována stejná a to $v = 50$ mm/min. Ovšem vzdálenost čelistí byla proměnlivá z důvodu různě dlouhých vzorků, proto jsme ji před zkouškou vždy zaevidovali.

Zkouška se prováděla na univerzálním elektromechanickém přístroji značky MTS pod označením Exceed E42, který je znázorněn na Obr. 34.

Příprava jednotlivých vzorků na zkoušku probíhala rozřezáním kompozitní destičky (140 x 140 x 4 mm) pomocí skalpele. Skalpel jsme zvolili z důvodu malého prořezu a zároveň z důvodu, zachování ostrých hran bez otřepů. Jelikož měla měděná forma zaoblené rohy, museli jsme tyto okraje odřezat, díky čemuž jsme získali z každé destičky pět použitelných vzorků na zkoušku tahem.



Obr. 34 Univerzální zkušební stroj MTS – Exceed E42

8.5.2 Zkouška ohybem

V případě ohybové zkoušky jsme se opět snažili být v souladu s normou ČSN EN ISO 178, kde se udávají potřebné parametry a popisuje se správný průběh zkoušky. Ovšem jako v předešlém případě, rozměry zkušebních těles neodpovídají. Pro náš experiment byl zvolen tříbodový ohyb, ze kterého se určil modul pružnosti v ohybu.

Dle níže uvedeného vztahu (4), převzatého z normy, jsme dopočetli modulu pružnosti materiálu:

$$E_o = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot \Delta s} \quad (4)$$

kde ΔF je rozdíl zátěžných sil, L odpovídá vzdálenosti podpěr, Δs značí rozdíl průhybu pro dané zatížení. I je moment setrvačnosti, který se pro obdélníkový průřez dopočítá dle následujícího vztahu (5):

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (5)$$

kde b je šířka a h značí výšku zkušebního tělesa.

8.5.3 Stanovení vrubové houževnatosti

Průběh zkoušky byl prováděn dle normy ČSN EN ISO 179-1. Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy. Dodržení rozměrů dle normy, by bylo pro výrobu velice náročné, proto jsme zkušební tělíska zvolili v takovém tvaru, abychom

se normovaným rozměrům co nejvíce přiblížili. Vzdálenost použitých podpěr pro zkušební těleso byla menší než udává norma a to z důvodu kratších vzorků.

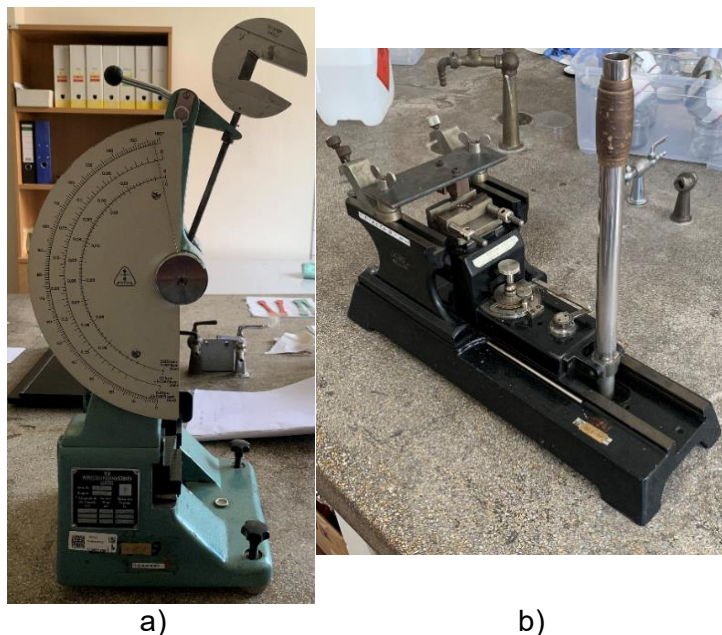
Absorbovaná energie pro přeražení vzorku se odečítá na stupnici Charpyho kladiva, které je vyobrazeno na Obr. 35 a), v kilopondmetrech (kpm), přičemž platí následující rovnost $1 \text{ kpm} = 9,8066 \text{ J}$. Energie použitého kladiva byla rovna 0,1 kpm.

Pro výpočet vrubové houževnatosti použijeme následující vztah (6):

$$a_u = \frac{E}{h_0 * (b_0 - v)} \quad (6)$$

kde E je absorbovaná energie, h_0 je výška zkušebního tělesa, b_0 uvažujeme jako šířku a v značí hloubku vrubu.

Vrub byl zhotovený do tvaru „v“, jehož rozměry byly v souladu s normou. Na Obr. 35 b) je použitá řezačka na v-vruby znázorněna.



Obr. 35 a) Charpyho kladivo b) řezačka V-vrubů

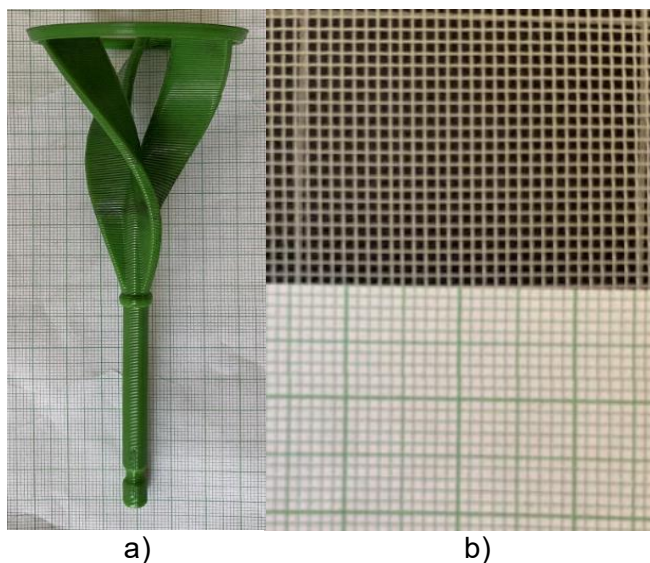
9. Kompozit s uhlíkovou výztuží

V první části experimentu se zaměříme na přípravu kompozitů s výztuží z krátkých uhlíkových vláken, dále v práci použité zkrácené označení CF.

9.1 Příprava materiálu

Z důvodu obtížné separace krátkých uhlíkových vláken jsme zvolili jako nejvýhodnější způsob přípravy smíchání plniva a matrice v poměru 10 % CF a 90 % PE – LD. Směs jsme smíchali pomocí míchadla vytištěného na 3D tiskárně viz Obr. 36 a) a za současného použití isopropylalkoholu jsme směs vložili do ultrazvukové čističky, ve které došlo k rozvolnění vláken a zároveň k lepšímu smíchání

polyethylenu s výztuží. Po vyjmutí z ultrazvukové čističky jsme směs přefiltrovali přes filtrační papír a počkali, až se celý objem vysuší. Posledním krokem přípravy bylo prosetí směsi přes síto, znázorněné na Obr. 36 b), velikost ok byla přibližně 1 mm.



Obr. 36 a) míchadlo na směs b) detail použitého síta

9.2 Příprava vzorků

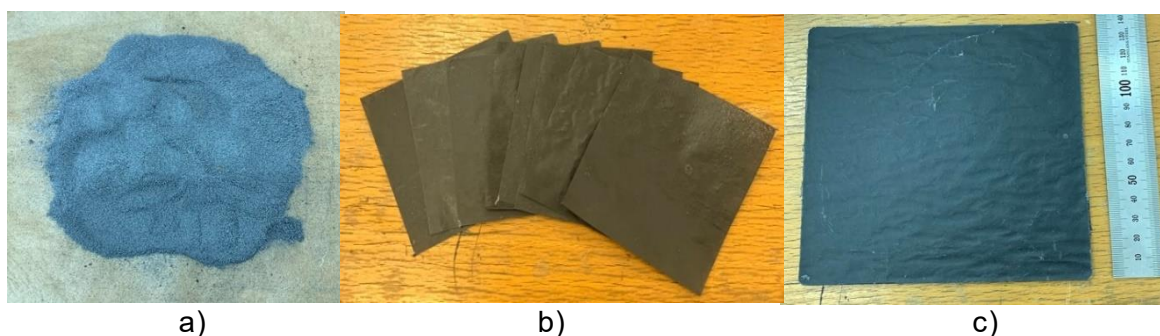
První vyrobené vzorky, zhotovené prostým nasypáním takto připravené směsi do formy, vykazovaly stále velké množství nerozseparovaných vláken, jak je vidno na Obr. 37. Kvůli tomu vznikal lom při zkoušce tahem právě v místě těchto klků, tudíž výstupní hodnoty ze zkoušky tahem nemohly být považovány za relevantní.



Obr. 37 Nerozseparovaná uhlíková vlákna

Z toho důvodu jsme aplikovali druhý způsob výroby, kdy se nejdříve na lisu vyrobily kompozitní fólie – prepregy Obr. 38 b), které díky použitému tlaku, menšímu množství směsi Obr. 38 a) a tenké vrstvě prepregu neobsahovaly nerozseparovaná vlákna.

Takto vzniklé prepregy se navrstvily do formy a znovu slisovaly, konečný kompozitní vzorek je vyobrazený na Obr. 38 c) uvedeném níže. Mechanické vlastnosti se v tomto případě přípravy zlepšily.



Obr. 38 a) směs PE – LD + 10 % CF b) slisované prepregy c) hotový kompozitní vzorek

Základní prepreg jsme stanovili jako 10 % CF a 90 % PE – LD. Výsledná kompozitní destička obsahovala tedy přesně takový hmotnostní poměr výztuže a matrice. Pro vyplnění měděné formy jsme museli pro každý vzorek navrstvit dvacet takovýchto fólií. Teplota vyhřívání desek a tlak byly pro veškeré vzorky stejné $p_{Lis} = 1,3 \text{ MPa}$ a teplota $t_{Lis} = 160 \text{ °C}$. Doby trvání přípravy prepregů jsou zapsány v Tab. 11.

Tab. 11 Doby trvání předlisování a lisování kompozitních a neplněných fólií

Materiál	DOW – ZS	DOW – PL	DOW – ZS + 10 % CF	DOW – PL + 10 % CF
Čas předehřevu [min]	1	1	2	2
Čas lisování [min]	2	2	4	4

Doby trvání předlisování a lisování konečných kompozitních vzorků jsou uvedeny v Tab. 12.

Tab. 12 Doba předlisování a lisování kompozitů s uhlíkovou výztuží

Materiál	DOW – ZS + 5 % CF	DOW – PL + 5 % CF	DOW – PL + 10 % CF	DOW – PL + 10 % CF
Čas přehřevu [min]	8	8	8	8
Čas lisování [min]	10	10	10	10

Pro určení vlastností vzorku 5 % CF a 95 % PE – LD byla použita fólie z čistého polyethylenu, která se do formy vkládala mezi dva prepregy, jak je možno vidět na Obr. 39. Tímto způsobem jsme vytvořili vzorek o nižší koncentraci výztuže než obsahoval původní prepreg. K vyplnění formy bylo opět potřeba celkem dvacet fólií.



Obr. 39 navrstvení kompozitních prepregů a fólií z čistého PE – LD pro vytvoření vzorku s 5% hmotnostním podílem uhlíkové výztuže

9.3 Výsledky z tahové zkoušky

Pevnost vyhotovených zkušebních těles jsme zjišťovali na elektromechanickém zkušebním stroji.

9.3.1 Pevnost použitých matric

Pro porovnání zlepšení mechanických vlastností se určila pevnost samotných matric DOW – ZS a DOW – PL. Zkoušku jsme provedli na vzorcích připravených metodou slisování prášku ve formě a druhým způsobem – spečením neplněných PE fólií, abychom zjistili, zda mají strukturální hranice mezi jednotlivými fóliemi vliv na pevnost materiálu. Vzdálenost čelistí byla v tomto případě měření pro všechny vzorky stejná $L_0 = 35$ mm.

Pro veškeré způsoby přípravy bylo experimentálně změřeno 10 vzorků, aby provedená pevnostní charakteristika byla co nejvíce relevantní. Doby trvání předlisování a samotného lisování neplněných matric jsou uvedeny v následující

Tab. 13. Lze si všimnout, že v případě metody nasypání prášku do formy, volíme delší časy pro předlisování a následně i pro samotné lisování než v případě spečení fólií. Časy jsme zvolili odlišné, neboť fólie už byly jednou spečené a při druhém slisování, šlo pouze o jejich vzájemné propojení.

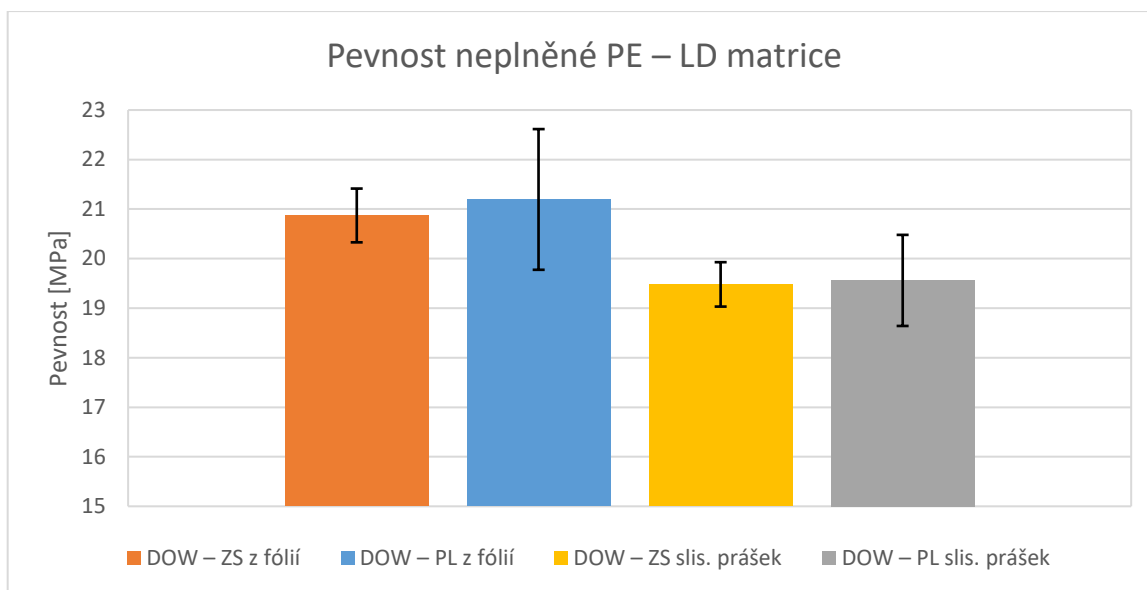
Tab. 13 Doba předlisování a lisování nenaplněných matic

Materiál	DOW – ZS – nasypaný p.	DOW – ZS – speč. fólie	DOW – PL – nasypaný p.	DOW – PL – speč. fólie
Čas předehřevu [min]	5	4	5	5
Čas lisování [min]	8	6	6	8

Pevnost pro oba druhy přípravy vzorků je zapsaná v Tab. 14 a graficky zpracovaná na Obr. 40. Z těchto dat můžeme určit, že příprava prostým spečením prášku v měděné formě vykazuje menší pevnost než v případě spečení jednotlivých fólií, kde se díky této metodě pevnost u některých vzorků zvýšila o 1,5 MPa. To může být způsobeno teoretickými hranicemi jednotlivých fólií, díky kterým došlo ke zpevnění materiálu. Zároveň si můžeme povšimnout, že u plazmově upraveného polyethylenu máme větší směrodatnou odchylku hodnot než u polyethylenu v základním stavu.

Tab. 14 Pevnost čisté PE – LD matrice

Příprava	Materiál	Pevnost [MPa]	Směr. odchylka [%]
Slis. prášek	DOW – ZS	19,5 ± 0,4	2,3
Slis. prášek	DOW – PL	19,6 ± 0,9	4,7
Slis. fólie	DOW – ZS	20,9 ± 0,5	2,6
Slis. fólie	DOW – PL	21,2 ± 1,4	6,7



Obr. 40 Grafické srovnání pevností neplněných matic

9.3.2 Pevnost kompozitu s uhlíkovou výztuží

Po změření pevnostních charakteristik čisté matrice můžeme nyní určit, zda má přidání uhlíkové výztuže pozitivní vliv na celkovou pevnost materiálu.

9.3.2.1 Kompozit s obsahem 5 hm. % krátkých uhlíkových vláken

Jak je již výše uvedeno, příprava kompozitu s 95% PE – LD a 5 % uhlíkových vláken probíhala spečením prepregů, mezi které se vložila fólie z čistého polyethylenu. Měření opět probíhalo pro oba druhy matrice DOW – PL a DOW – ZS.

Výsledky z tahové zkoušky zapsané v Tab. 15 však nebyly podle očekávání. Po přidání 5 % uhlíkové výztuže do polyethylenové matrice zhoršilo pevnost pro oba druhy základního materiálu. Výsledky lze brát jako relevantní, neboť byly vyrobeny pro každý materiál dvě kompozitní destičky, ze kterých se vytvořilo 10 vzorků určených pro tahovou zkoušku. Přesto u obou destiček došlo ke zhoršení pevnosti, ostatně jak můžeme vidět na Obr. 41., kde poslední dva sloupce značí pevnost neplněných matic, které byly také připraveny metodou spékání neplněných PE – LD fólií, jelikož tato metoda vykazovala lepší výsledky pevnosti.

Nízká pevnost 5 % vzorků může být způsobena buď nedostatečně rozseparovanými uhlíkovými vlákny nebo také z důvodu nízké adheze vláken k matrici.

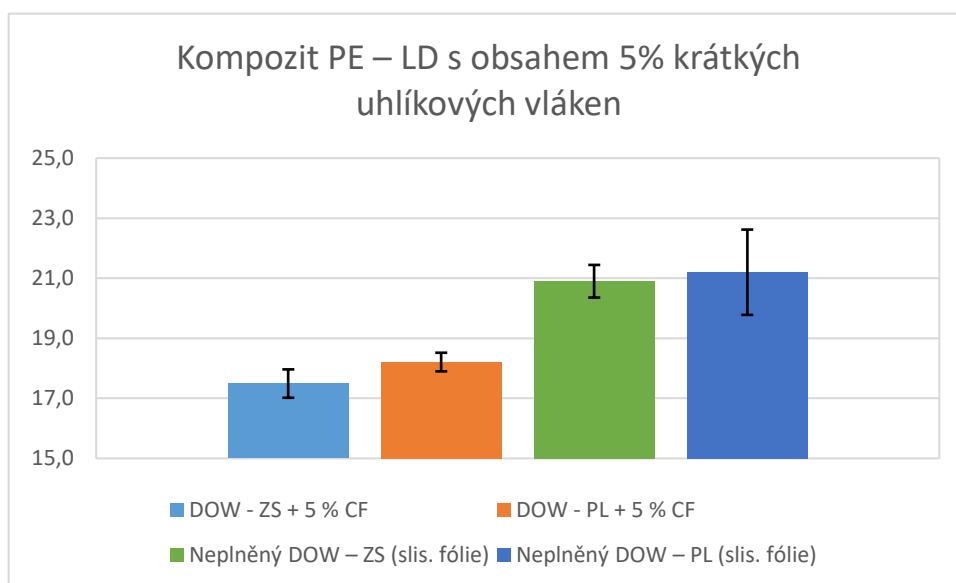
Lze si povšimnout, že plazmovaný polyethylen připravený ze spečených fólií má pozitivní vliv na hodnoty pevnosti, ať už v případě neplněných matic, jak je uvedeno

výše, tak v případě kompozitních těles, kde hodnota sice není o tolik vyšší, avšak dochází k navýšení pevnosti v tahu o přibližně 0,7 MPa.

Po tomto zjištění jsme tedy zvolili přidání více hmotnostních procent výztuže, abychom se dostali s hodnotami pevnosti alespoň k pevnosti neplněných matric, nebo ještě lépe, hodnoty převýšili.

Tab. 15 Pevnost kompozitu s obsahem 5 % krátkých uhlíkových vláken

Materiál matrice	Pevnost [MPa]	Směr. odchylka [%]
DOW – ZS + 5 % CF	17,5 ± 0,5	2,7
DOW – PL + 5 % CF	18,2 ± 0,3	1,7



Obr. 41 Grafické znázornění pevnosti kompozitu s obsahem 5 % uhlíkových vláken

9.3.2.2 Kompozit s obsahem 10 hm. % krátkých uhlíkových vláken

Kompozit byl vytvořen spečením předem připravených prepregů o hmotnostním poměru 90 % PE – LD a 10 % CF.

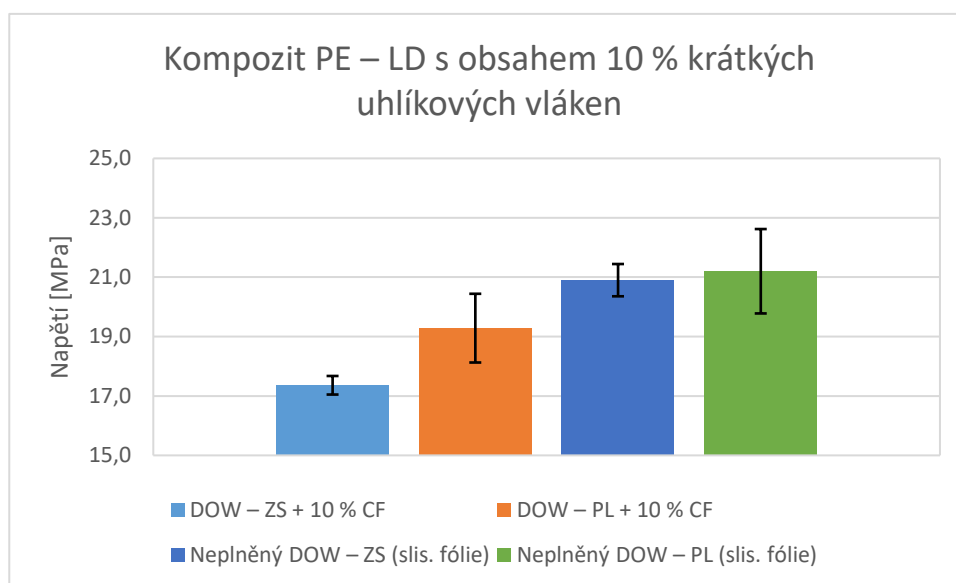
Porovnání opět probíhá s neplněnými vzorky, připravenými pomocí metody spékání fólií.

Ani v tomto případě nám uhlíková výztuž nepřevýšila hodnoty pevnosti čistého PE – LD, jak si můžeme povšimnout z grafického srovnání na Obr. 42. Z výsledků zapsaných v Tab. 16 můžeme vypočítat, že u DOW – PL došlo ke zpevnění a hodnoty pevnosti se nám přibližují alespoň k hodnotám čistého DOW – ZS. Vyšší pevnost vzorků s matricí DOW – PL je nejspíše zapříčiněna lepší adhezí vláken k matrici. Je ale také nutné říci, že plazmovaný polyetylen opět vykazuje větší

směrodatnou odchylku hodnot, stejně jako tomu bylo v případě měření pevnosti čistého DOW – PL.

Tab. 16 Pevnost kompozitu s obsahem 10 hm. % krátkých uhlíkových vláken

Materiál	Pevnost [MPa]	Směr. odchylka [%]
DOW – ZS + 10 % CF	17,4 ± 0,3	1,8
DOW – PL + 10 % CF	19,3 ± 1,1	6



Obr. 42 Grafické znázornění pevnosti kompozitu s obsahem 10 hm. % uhlíkových vláken

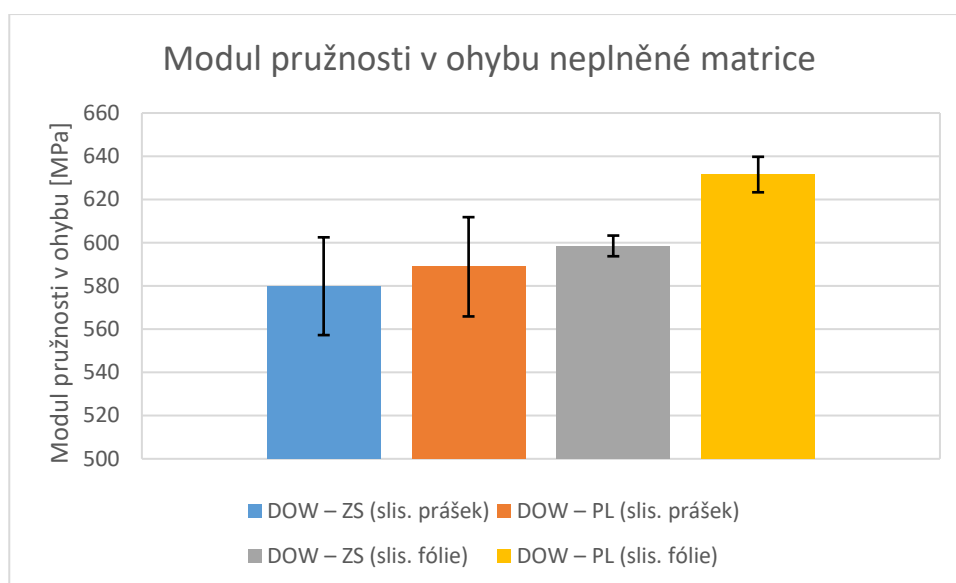
9.4 Ohybová zkouška

Ohybová zkouška byla prováděna především z důvodu pozorování změny velikosti modulu pružnosti v ohybu. Abychom mohli určit, o kolik se nám modul pružnosti změnil, provedli jsme zkoušku i u neplněných matric a následně pro kompozitní vzorky.

Stejně jako tomu bylo u pevnostní charakteristiky, vzorky z čistého PE – LD mají opět lepší vlastnosti při přípravě spečením neplněných fólií než spečením z prášku. Moduly pružnosti zapsané v Tab. 17 a graficky zpracovány na Obr. 43 se sice nezvýšily nijak markantně, ale k pozorovatelnému navýšení došlo. To může být opět způsobeno vlivem hranic jednotlivých fólií, kdy pro celek tyto hranice dodají materiálu větší pevnost a zvýší modul pružnosti.

Tab. 17 Modul pružnosti čisté primární fáze kompozitu

Materiál	Modul pružnosti [MPa]	Směr. Odchylka [%]
DOW – ZS (slis. prášek)	580 ± 23	3,9
DOW – PL (slis. prášek)	589 ± 23	3,9
DOW – ZS (slis. fólie)	599 ± 5	0,8
DOW – PL (slis. fólie)	632 ± 8	1,3



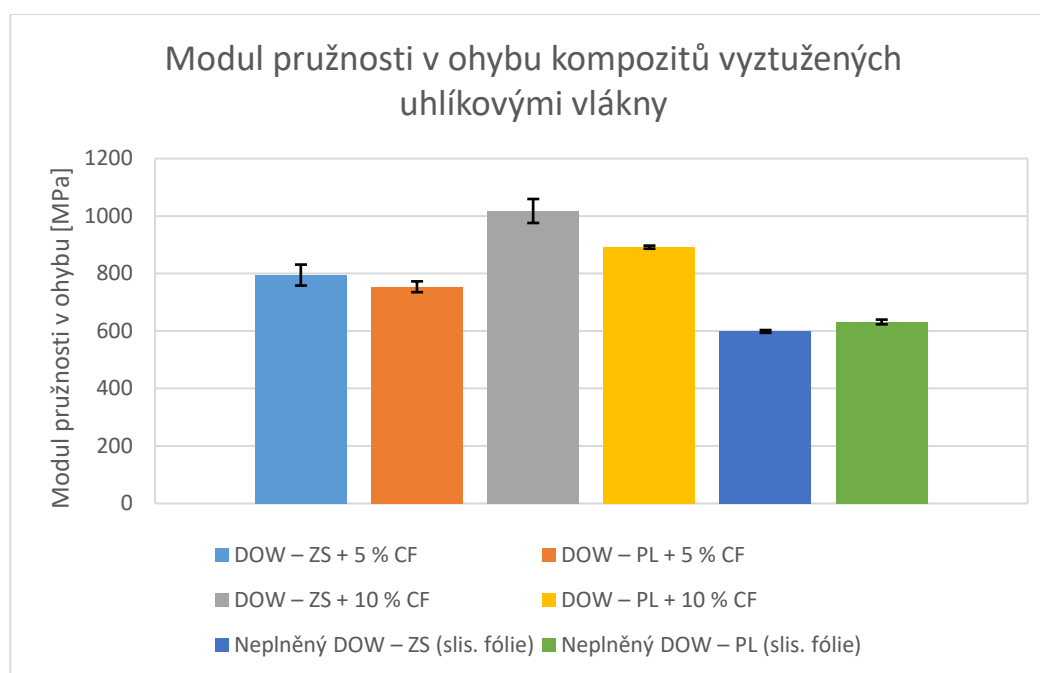
Obr. 43 Grafické znázornění modulu pružnosti neplněné matrice

Při porovnání kompozitních vzorků s neplněným PE – LD dochází u modulu pružnosti zjištěného z tříbodového ohybu k pozorovatelnému zlepšení, jak je možné si povšimnout z grafického znázornění na Obr. 44. U DOW – ZS + 10 % CF došlo dokonce k navýšení přibližně o $E_o = 200$ MPa. Tudíž v případě modulu pružnosti mají krátká uhlíková vlákna v kompozitu své opodstatnění, i když ke zvýšení pevnosti nedošlo.

Zajímavým jevem, který lze ze zapsaných hodnot v Tab. 18 vypočítat, je vyšší modul pružnosti pro DOW – ZS než pro DOW – PL. Tedy zcela obráceně než jak tomu bylo při určování modulu pružnosti neplněných matric anebo při pevnostních charakteristikách v předešlé kapitole, kde DOW – PL měl ze zkoušky vždy lepší výsledek.

Tab. 18 Modul pružnosti kompozitu s daným obsahem uhlíkového vlákna

Materiál	Modul pružnosti [MPa]	Směr. Odchylka [%]
DOW – ZS + 5 % CF	795 ± 37	4,6
DOW – PL + 5 % CF	754 ± 19	2,5
DOW – ZS + 10 % CF	1 018 ± 42	4,1
DOW – PL + 10 % CF	892 ± 5	0,6



Obr. 44 Grafické znázornění modulu pružnosti kompozitu s uhlíkovými vlákny

9.5 Vrubová houževnatost připravených vzorků

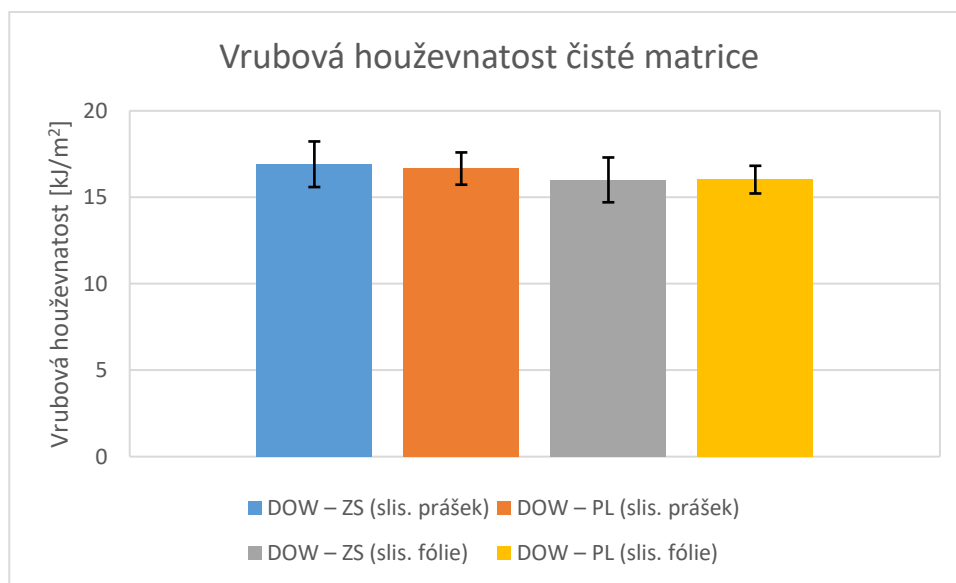
Pro určení absorbované energie, která je potřebná k vytvoření lomu v materiálu, jsme použili zkoušku vrubové houževnatosti dle Charpyho metody. Jak je již výše zmíněno, kinetická energie kladiva byla $E_k = 0,1$ kpm, což odpovídá přibližně $E_k = 0,98$ J.

Pro porovnání hodnot jsme opět určili potřebnou absorbovanou energii vztahenou k ploše pod vrubem neplněné matrice a následně vytvořených kompozitních vzorků. Abychom mohli stanovit statistický závěr z naměřených hodnot, vždy bylo pro každý druh materiálu přeraženo 10 vzorků. V Tab. 19 můžeme vidět, že větší energie potřebná k vytvoření lomu je pro vzorky vytvořené prostým slisováním prášku. Energie pro tělíska vytvořená spečením neplněných PE – LD fólií je o několik desetin menší. To může být dáno větší homogenitou materiálu v případě slisovaného prášku. Avšak i z grafického znázornění na Obr. 45 je vidno, že hodnoty

absorbovaných energií vztahených k ploše pod vrubem jsou až na malou odchylku stejné.

Tab. 19 Absorbovaná energie potřebná pro přeražení vzorku z čisté matrice

Materiál	Vrubová houževnatost [kJ/m ²]	Směr. Odchylka [%]
DOW – ZS (slis. prášek)	16,9 ± 1,3	7,8
DOW – PL (slis. prášek)	16,7 ± 0,9	5,6
DOW – ZS (slis. fólie)	16,0 ± 1,3	8,1
DOW – PL (slis. fólie)	16,0 ± 0,8	5



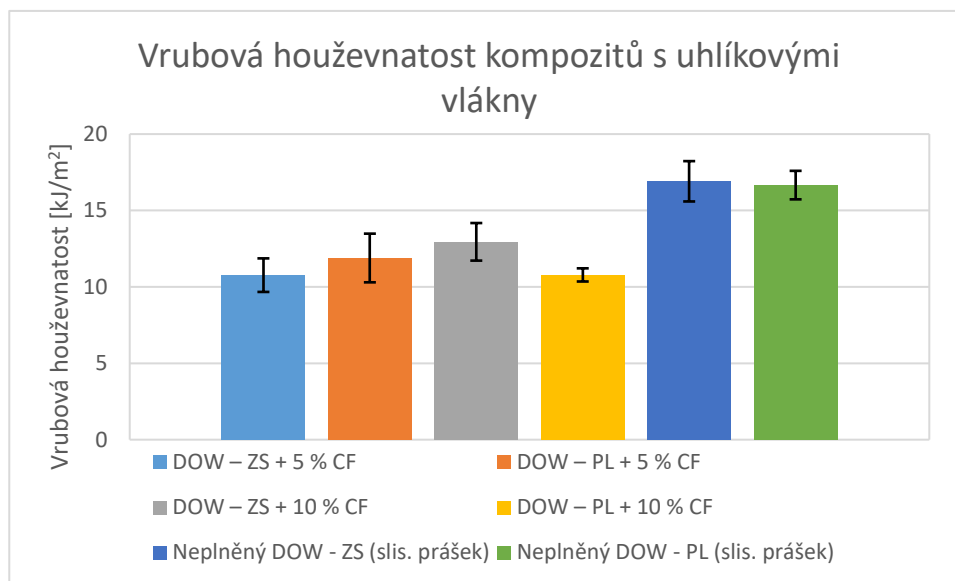
Obr. 45 Grafické znázornění vrubové houževnatosti čisté matrice

Při porovnání hodnot kompozitních vzorků uvedených v Tab. 20, si můžeme povšimnout, že s přidáním vyššího procenta výztuže do kompozitu klesá potřebná absorbovaná energie pro přeražení vzorku, tudíž se nám tělíska stávají křehčími. Ve výsledcích však máme jednu anomálii, kdy má kompozitní vzorek DOW – ZS + 10 % CF vyšší hodnoty energie než vzorky s 5 % výztuží. To by mohlo být způsobeno lepší soudržností primární a sekundární fáze v kompozitu. Ačkoli jsme postup přípravy měli u všech tělísek stejný, tak tato kombinace materiálu vykazuje větší houževnatost.

Na Obr. 46 máme názorné srovnání neplněných matic s kompozitními vzorky. Jak si můžeme povšimnout, čistý PE – LD má větší houževnatost než v případě vyztužení vláknou.

Tab. 20 Absorbovaná energie potřebná pro přeražení kompozitního vzorku s daným obsahem uhlíkového vlákna

Materiál	Vrubová houževnatost [kJ/m ²]	Směr. odchylka [%]
DOW – ZS + 5 % CF	10,8 ± 1,1	10,2
DOW – PL + 5 % CF	11,9 ± 1,6	13,4
DOW – ZS + 10 % CF	13,0 ± 1,2	9,5
DOW – PL + 10 % CF	10,8 ± 0,4	4,0



Obr. 46 Grafické znázornění vrubové houževnatosti pro dané hmotnostní poměry uhlíkového vlákna a matrice

9.6 Hustota vzorků

Pro určení hustoty vzorku jsme použili hustoměr značky Mirage s označením SD 200L, znázorněný na Obr. 47, který funguje na principu Archimedova zákona. Princip zařízení spočívá ve změření hmotnosti vzorku na vzduchu a v kapalině o známé hustotě, v našem případě se jedná o destilovanou vodu. Z rozdílu těchto dvou hmotností přístroj určí hustotu vzorku.

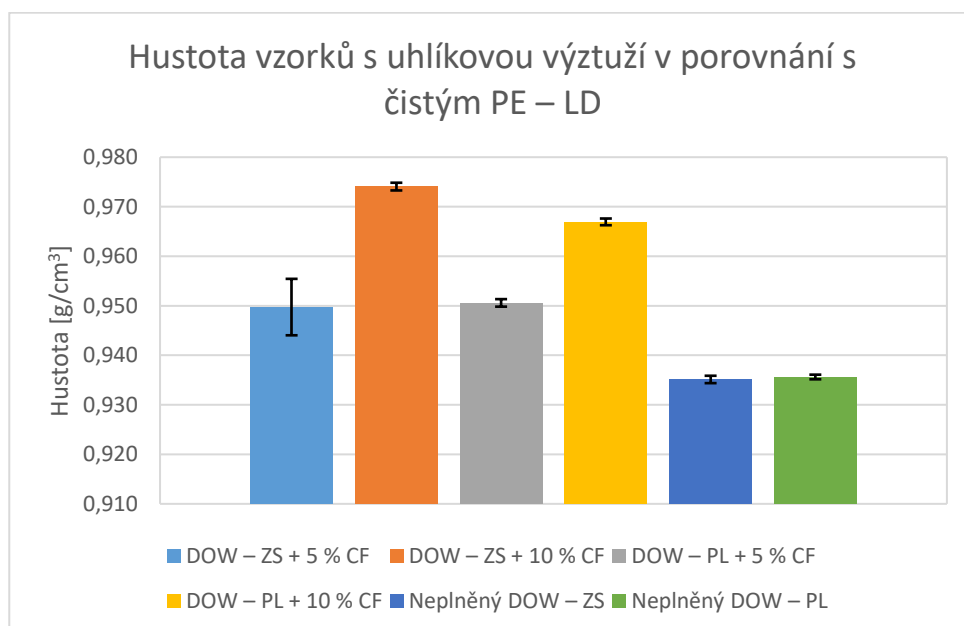
Změřené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 21 a graficky znázorněny na Obr. 48.



Obr. 47 Hustoměr Mirage – SD 200L

Tab. 21 Hustoty čisté matrice a kompozitních vzorků

Materiál	Hustota [g /cm ³]	Směr. odchylka [%]
DOW – ZS + 5 % CF	0,950	0,56
DOW – ZS + 10 % CF	0,974	0,08
DOW – PL + 5 % CF	0,951	0,08
DOW – PL + 10 % CF	0,967	0,07
Neplněný DOW – ZS	0,935	0,08
Neplněný DOW – PL	0,936	0,05



Obr. 48 Grafické porovnání hustoty vzorků s uhlíkovou výztuží a neplněnou maticí

Toto měření jsme prováděli z důvodu vypočtení teoretického množství výztuže v kompozitních vzorcích. Pro výpočet použijeme následující vztah (7) uvedený níže:

$$X_{Vm} = \frac{V_m}{V} = \frac{\rho_c - \rho_{PE-LD}}{\rho_{CF} - \rho_{PE-LD}} \quad (7)$$

kde ρ_c uvažujeme jako celkovou hustotu vzorku, ρ_{PE-LD} značí hustotu čisté matrice a ρ_{CF} je hustota uhlíkové výztuže.

Spočtené procentuální poměry výztuže v kompozitních vzorcích jsou uvedené v Tab. 22. Z výsledků je možné vidět, že spočtené hmotnostní procento krátkých uhlíkových vláken v tělískách je zhruba 2x – 3x menší, než jaké jsme přidávali do matrice během přípravy vzorků. Tam jsme každý prepreg připravovali ve stejném hmotnostním poměru 4,5 gramu matrice PE – LD a 0,5 gramu uhlíkových vláken. Na odůvodnění takto markantního rozdílu mezi skutečnou a vypočtenou koncentrací výztuže se zaměříme v diskuzi.

Tab. 22 Spočtené procentuální poměry uhlíkové výztuže v kompozitu

Materiál	Spočtený procentuální poměr výztuže [%]
DOW – ZS + 5 % CF	1,7
DOW – ZS + 10 % CF	4,5
DOW – PL + 5 % CF	1,7
DOW – PL + 10 % CF	3,6

10. Kompozit s bavlněnou výztuží

V druhé části experimentu se zaměříme na přípravu kompozitů s bavlněnou výztuží

10.1 Příprava vzorků

Kompozitní vzorky s bavlněnou výztuží byly připraveny třemi různými způsoby, přičemž teplota a tlak byl ve všech případech přípravy stejný. Teplota byla na vyhřívaných deskách vždy nastavena na $t_{Lis} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlak na lisu $p_{Lis} = 1,3 \text{ MPa}$.

V níže uvedené Tab. 23 jsou zaznamenány časy předlisování a samotného lisování kompozitních fólií a konečných vzorků.

Tab. 23 Doba přípravy předlisování a lisování pro jednotlivé kompozitní vzorky s bavlněnou výplní

Materiál	Čas předlisování [min]	Čas lisování [min]
DOW – ZS + 1vrstvá tkanina	6	10
DOW – PL + 1vrstvá tkanina	6	10
DOW – ZS + 15 % bavl. odstřížků	8	10
DOW – PL + 15 % bavl. odstřížků	8	10
Prepreg DOW – ZS + 15 % bavlny	2	5
Prepreg DOW – ZS + 15 % bavlny	2	5
DOW – ZS + 3vrstvý prepreg	5	8
DOW – PL + 3vrstvý prepreg	5	8

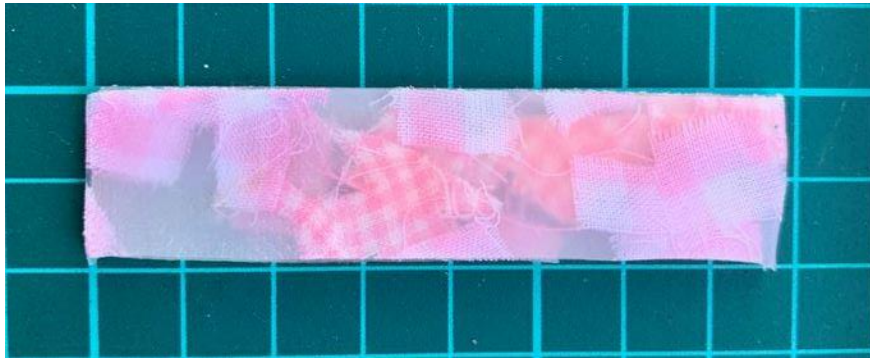
V následujících bodech si uvedeme tři způsoby přípravy jednotlivých kompozitních vzorků, při použití polyethylenové matrice a bavlněné tkaniny jako plniva:

- V prvním případě byl do půlky výšky formy nasypáný základní materiál – PE, na který se položila bavlněná tkanina a ta se opět zasypala polyethylenem. Tím vznikla sendvičová kompozitní destička, ze které se následně připravily pomocí skalpelu menší zkušební vzorky, které byly podrobeny mechanickým zkouškám. Hotový kompozitní vzorek je znázorněný na Obr. 49.



Obr. 49 sendvičový vzorek s použitím kontinuální bavlněné tkaniny

- Druhá příprava spočívala ve smíchání nastříhaných bavlněných útvarů, které měly průměrně rozměr 5 x 5 mm s matricí. Tato příprava byla použita především z důvodu nepravidelnosti rozměrů bavlněného odpadu. Zhotovený vzorek určený pro zkoušku tahem je na Obr. 50.



Obr. 50 Vzorek připravený smícháním polyethylenu a bavlněných odštívků

- Poslední variantou byla příprava kompozitního vzorku pomocí připravených prepregů. Prepregy se opět vytvořily na lisu smícháním polyethylenu s nepravidelnými kusy bavlněné tkaniny, tato směs je znázorněna na Obr. 51 a). Po vyrobení třech takovýchto prepregů následovalo konečné slisování ve formě za současného přidávání dalšího polyethylenu ve formě prášku, jak je možné vidět na Obr. 51 b), vždy mezi dvě fólie. Nasypání dalšího polyethylenu jsme zvolili z důvodu lepšího propojení matrice s tkaninou a také z důvodu nízké výšky bavlněných prepregů. Konečný vzorek určený pro zkoušku tahem je zobrazený na Obr. 52.



Obr. 51 a) příprava kompozitního prepregu s nastříhanou bavlnou, b) navrstvení jednotlivých prepregů za současného prosycení matricí



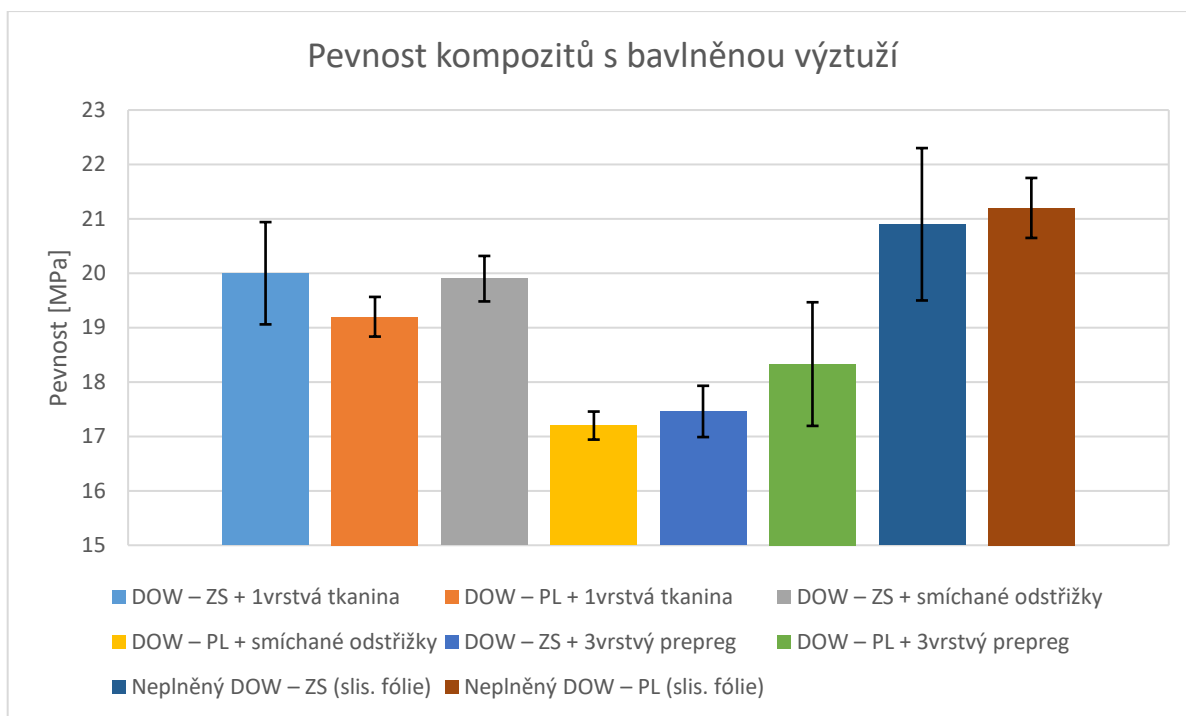
Obr. 52 Vzorek připravený spečením prepregů obsahující bavlněnou tkaninu

10.2 Tahová zkouška vzorků s bavlněnou výztuží

Tahová zkouška prokázala, že nejpevnější variantou je sendvičový kompozit, jak lze vidět v Tab. 24, kde je tkanina v celém vzorku kontinuální. Z pevnostních charakteristik můžeme dále vypočítat, že přidáním odstřížků bavlny a následné smíchání a spečení má pro nás větší význam než vyrábět kompozitní fólie s obsaženou bavlnou a ty opět slisovávat, jelikož u této poslední metody nám pevnost výrazně klesla a nacházíme se pod pevností čisté matrice. To může být způsobeno nedostatečným prosycením vláken nebo malého poměru matrice a výztuže, kdy nedošlo ke zpevnění tělesa, jako spíše k narušení jeho celistvosti. Přehledné grafické shrnutí výsledků pevnosti je znázorněno na Obr. 53.

Tab. 24 Pevnost kompozitu plněného bavlněnou výztuží

Materiál	Pevnost [MPa]	Směr. Odchylka [%]
DOW – ZS + 1vrstvá tkanina	20 ± 0,9	4,7
DOW – PL + 1vrstvá tkanina	19,2 ± 0,4	1,9
DOW – ZS + smíchané odstřížky	19,9 ± 0,4	2,1
DOW – PL + smíchané odstřížky	17,2 ± 0,3	1,5
DOW – ZS + 3vrstvý prepreg	17,5 ± 0,5	2,7
DOW – PL + 3vrstvý prepreg	18,3 ± 1,1	6,2



Obr. 53 Grafické znázornění pevnosti kompozitu s bavlněnou výztuží

10.3 Ohybová zkouška

Určení modulu pružnosti z tříbodového ohybu pro kompozity obsahující bavlněnou výztuž dopadlo následovně:

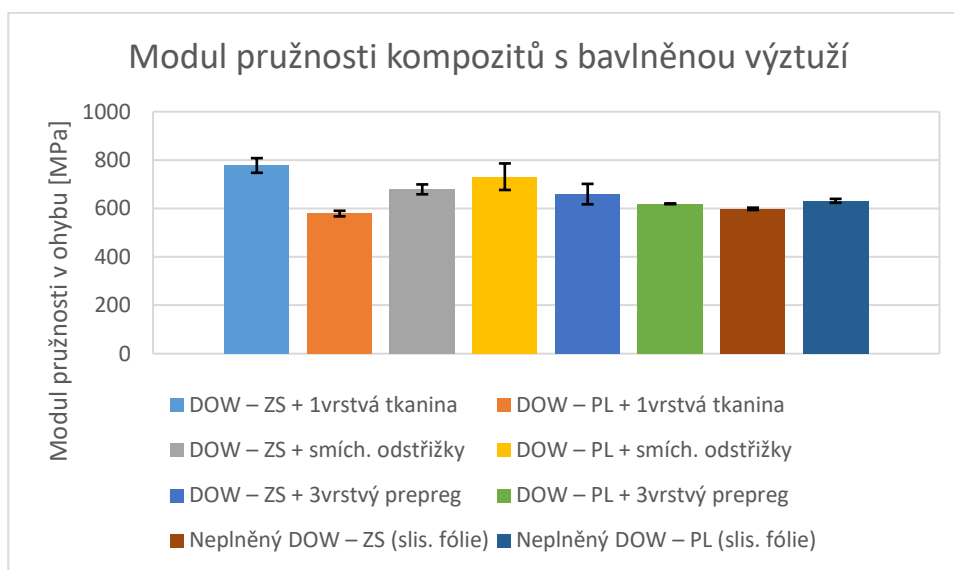
- První varianta přípravy jeví velké zlepšení modulu pružnosti, vezmeme-li v potaz, že se jedná pouze o sendvičovou strukturu s jednovrstvou kontinuální bavlněnou látkou. Lepší výsledky jsme zaznamenali u DOW – ZS než v případě plazmovaného PE – LD, u kterého se pohybuje modul pružnosti v hodnotách čisté matrice. To může být způsobeno lepším prosycením látky u DOW – ZS a tím pádem k většímu zpevnění vzorku.
- U druhé varianty přípravy se nám moduly pružnosti opět zvýšily oproti neplněným matricím. Tato varianta vykazuje zpevnění jak u DOW – ZS, tak u DOW – PL, kdy se moduly liší jen minimálně. K lepším hodnotám jsme tentokrát došli v případě plazmovaného polyethylenu, u DOW – PL máme větší směrodatnou odchylku a díky tomu můžeme prohlásit, že se moduly takřka rovnají.
- Poslední variantou přípravy, spečením kompozitních prepregů, jsme se s modulem pružnosti pohybovali spíše v hodnotách neplněných matric. Ovšem i v tomto případě jsme se nedostali pod úroveň modulu pružnosti čistého PE – LD.

Veškeré údaje modulů pružnosti i s jejich směrodatnou odchylkou jsou zapsány v Tab. 25 a graficky znázorněny na Obr. 54. Výše uvedené porovnání výsledků opět

proběhlo s čistým polyethylenem připraveným metodou spečených fólií, jelikož u této metody jsme došli k lepším hodnotám.

Tab. 25 Modul pružnosti kompozitu s bavlněnou výztuží

Materiál	Modul pružnosti [MPa]	Směr. Odchylka [%]
DOW – ZS + 1vrstvá tkanina	777,7 ± 30,2	3,9
DOW – PL + 1vrstvá tkanina	578,9 ± 11,6	2,0
DOW – ZS + smích. odstřížky	679,0 ± 20,1	3,0
DOW – PL + smích. odstřížky	731,4 ± 55,2	7,5
DOW – ZS + 3vrstvý prepreg	659,4 ± 42,0	6,4
DOW – PL + 3vrstvý prepreg	619 ± 1,3	0,2



Obr. 54 Grafické znázornění modulu pružnosti s bavlněnou výztuží

11. Diskuze

V první části experimentu jsme se zaměřili na přípravu kompozitních vzorků vyztuženými krátkými recyklovanými uhlíkovými vlákny o dvou odlišných hmotnostních poměrech. U těchto zhotovených vzorků jsme následně určili jejich mechanické vlastnosti. Ty porovnáváme s neplněnou polyethylenovou matricí, výsledky a zhodnocení jednotlivých vlastností jsou uvedeny v následujících bodech:

- Ze zkoušky tahem musíme konstatovat, že použitých 5 hm. % výztuže nedosahuje takové pevnosti, jakou jsme očekávali. Vzorky se zdály být spíše křehčími než pevnějšími.

V případě zvýšení hmotnostního poměru výztuže na 10 hm. % se přibližujeme k pevnosti neplněné matrice, ačkoli stále ji nepřevyšujeme.

Nízká pevnost může být způsobena nedostatečnou adhezí výztuže k matici a zároveň mohlo dojít k nižší koncentraci vláken v matici, než udáváme, k tomu se ale ještě dostaneme v další části diskuze.

Při dalším zvyšování procenta výztuže se nám při vysoušení směsi polyethylenu s uhlíkovými vlákny začaly opět tvořit shluky nerozseparovaných vláken, které by měly negativní vliv na pevnost, proto jsme zvolili maximální koncentraci 10 hm. % výztuže v materiálu. Z výsledků můžeme také zhodnotit, že plazmovaná úprava polyethylenu má pozitivní vliv na pevnost vzorků, nejspíš díky lepší adhezi vláken k matici.

- Modul pružnosti určený z tříbodového ohybu se nám pro obě použítá procenta výplně zvýšil, přitom platí, že čím více vláken vzorek obsahuje, tím vyšší je modul pružnosti. Avšak při této zkoušce platí opačné tvrzení než v případě tahové zkoušky, kdy polyethylen v základním stavu vykazoval vyšší hodnoty modulu pružnosti než v jeho plazmované úpravě.
- Z vrubové zkoušky houževnatosti jsme došli k očekávaným hodnotám, kdy nenaplněná matrice jevila větší potřebnou absorbovanou energii pro vznik lomu než v případě kompozitních vzorků, které se s přidáním vláken staly křehčími.
- Poslední zkouškou bylo zjištění hustoty jednotlivých kompozitních těles, z té jsme dopočetali teoretický obsah výztuže, kdy se nám koncentrace vláken zmenšila v průměru 2x – 3x. Takto velké snížení výplně je samozřejmě nereálné, část může být způsobena ulpěním vláken na filtračním papíru nebo ve sklenicích, ve kterých jsme směs připravovali. Nepředpokládáme ale, že by nám z kompozitní směsi takovýmto způsobem zmizela více jak polovina výztuže. Při výpočtu koncentrace uvažujeme s hustotou vláken, která byla uvedena v materiálových listech. Hustota vláken tedy není nijak empiricky ověřena a mohla být ve skutečnosti nižší, což by v konečném výpočtu zapříčinilo vyšší koncentraci výplně v kompozitu. Další úvahou je možnost vzduchových mezer mezi maticí a vlákny nebo jen mezi samotnými vlákny, kdy by se nám zvětšil objem zkoumaného vzorku, ale snížila by se jeho hustota, která má na výpočet koncentrace velký vliv. Pro lepší určení skutečného poměru vláken s maticí bychom zvolili elektronovou rastrovací mikroskopii, pomocí které by se dále dala zjistit adheze mezi maticí a vlákny, správné rozseparování uhlíkových vláken a popřípadě vysvětlit snížení pevnosti vyztužených vzorků.

- Snímky mikroskopické struktury vybraných vzorků, jsou uvedené v Diplomové práci – Polymerní kompozity s vláknovou a tkaninovou výztuží, mého kolegy Bc. Ondřeje Poláka.
- Pro další experimentální výzkum bychom doporučili zlepšení separace vláken k dosažení větších koncentrací a tím i zlepšení vlastností materiálu.

V druhé části experimentu jsme se zaměřili na popis přípravy a následné zkoušení základních mechanických vlastností kompozitních vzorků za použití bavlněné tkaniny jako plniva. Jednotlivé závěry z provedených zkoušek jsou sepsány v následujících bodech:

- Tahová zkouška prokázala snížení pevnosti kompozitních vzorků, avšak stále se pohybujeme v hodnotách, které jsou velice blízké neplněným matricím. Největší pevnost vykazovaly vzorky, ve kterých byla tkanina kontinuálně rozložena, a díky tomu vznikla sendvičová struktura, avšak ani při prostém smíchání bavlněných odstřížků s polyethylenem jsme nedošli k výrazně nižším hodnotám pevnosti.
- Modul pružnosti kompozitních vzorků se také pohybuje v oblasti hodnot pro neplněnou matici, některé připravené vzorky vykazovaly zlepšení modulu o $E_0 = 200 \text{ MPa}$, což není zanedbatelná hodnota.

Ačkoli cílem druhé části experimentu nebylo dosáhnout enormního zlepšení mechanických vlastností, musíme konstatovat, že u většiny kompozitních vzorků ke zlepšení skutečně došlo, což je pro nás velice příznivé. Nicméně hlavním cílem bylo určit, zda přidání bavlněné tkaniny nezhorší mechanické vlastnosti a můžeme ji teoreticky využít pro snížení obsahu polyethylenu ve struktuře. Z měření vyplývá, že bychom mohli dále zpracovávat odpadní tkaniny z textilního průmyslu, pro které už není využití.

12. Závěr

V první části výzkumu kompozitních **vzorků s polyethylenovou maticí** vyztuženou **uhlíkovými vlákny** jsme po provedení materiálových zkoušek došli k závěru, že připravené vzorky nejevily tak výrazné zlepšení vlastností, jaké jsme předpokládali. Pevnost v tahu se nám oproti neplněné matici snížila, **zvýšil se modul pružnosti v ohybu** a dle očekávání nám u vzorků se zvyšujícím se procentem výztuže klesala vrubová houževnatost.

Druhá část experimentu, zaměřující se na využití **bavlněné tkaniny** jako plniva v polyethylenové matici, nám vykazala v některých případech **zlepšení** vlastností

oproti neplněné matici, a to především při určení **modulu pružnosti v ohybu**, ovšem ani hodnoty pevnosti v tahu nejsou nízké a v některých případech vzorků převyšují neplněnou polyethylenovou matici.

- Lisováním byly připraveny vzorky různými způsoby.
- Byla změřena pevnost, modul pružnosti, vrubová houževnatost a hustota.
- Jednalo se o pilotní studii, kdy se vzorky připravovaly tímto způsobem.
- Pro potvrzení výsledků je třeba vytvořit vzorky s přesným obsahem výztuže.
- Byl navržen další postup prací pro pokračování výzkumu.

Cíle bakalářské práce byly splněny.

13. Bibliografie

- [1] BAREŠ, Richar A. *Kompozitní materiály*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1988. ISBN 04-734-88.
- [2] KREBS, Stefan, Ladislav KOLAŘÍK a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie zpracování plastů a kompozitů*. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [3] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1987. ISBN 04-634-87.
- [4] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 1. vydání. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901-5704-1.
- [5] AGARWAL, Bhagwan a Lawrence BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1980. ISBN 531,8 :677.499.004.12(075.8).
- [6] Polymery. <https://publi.cz/> [online]. Liberec: <https://publi.cz>, 2014 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z : <https://publi.cz/books/180/Uvod.html>
- [7] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [8] CHAWLA, Krishan K. *Composite materials: Science and engineering*. 2. ed. New York: Springer, 1998. ISBN 03-879-8409-7.
- [9] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [10] TODOR, M, C BULEI, I KISS a V CIOATă. Recycling of textile wastes into textile composites based on natural fibres: the reinforcement type and the architecture.

- IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2019, 477(012055), 8 [cit. 2021-04-04]. ISSN 1757-899X. Dostupné z : doi:10.1088/1757-899X/477/1 /012055
- [11] BARTL, A., A. HACKL, B. MIHALYI, M. WISTUBA a I. MARINI. Recycling of Fibre Materials. *Process Safety and Environmental Protection* [online]. 2005, 83(4), 351-358 [cit. 2021-04-04]. ISSN 09575820. Dostupné z : doi:10.1205/psep.04392
- [12] TODOR, M, C BULEI, I KISS a V ALEXA. Recycling of textile wastes into textile composites based on natural fibres: the valorisation potential. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2019, 477(2) [cit. 2021-04-04]. ISSN 1757-899X. Dostupné z : doi:10.1088/1757-899X/477/1 /012004
- [13] RAMAMOORTHY, Sunil, Anders PERSSON a Mikael SKRIFVARSS. Reusing textile waste as reinforcements in composites. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2014, 131(17), 35 [cit. 2021-04-04]. ISSN 00218995. Dostupné z : doi:10.1002/app.40687
- [14] Technické textilie. *Veba.cz* [online]. Broumov: -, 2016 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z : <http://www.veba.cz/cs/2d-tkaniny>
- [15] KHANAM, P. a Mariam ALMAADEED. *Processing and characterization of polyethylene-based composites* [online]. 2015, 1 (2), 63-79 [cit. 2021-04-04]. ISSN 2055-0340. Dostupné z : doi:10.1179/2055035915Y.0000000002
- [16] ÅSTRÖM, B. Tomas. *Manufacturing of Polymer Composites*. 1. vydání. United Kingdom: Chapman & Hall, 1997. ISBN 0748770763.
- [17] *Kompozity s termoplastickou maticí*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta strojní. Vedoucí práce Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
- [18] TAŞDEMİR, Münir, Mehmet AKALIN, Dilara KOÇAK, İsmail USTA a Nigar MERDAN. Investigation of Properties of Polymer/Textile Fiber Composites. *International Journal of Polymeric Materials* [online]. 2010, 59(3), 200-214 [cit. 2021-04-04]. ISSN 0091-4037. Dostupné z : doi:10.1080/00914030903231415
- [19] Číslování nití a příze. *Bedimex.eu* [online]. Hronov: bedimex, - [cit. 2021-04-07]. Dostupné z : <https://www.bedimex.eu/cislovani-niti-a-prize-cl8.php>
- [20] SAVAS, Lemiye, Umit TAYFUN a Mehmet DOGAN. The use of polyethylene copolymers as compatibilizers in carbon fiber reinforced high density polyethylene composites. *Composites Part B : Engineering* [online]. 2016, 99(1359-8368), 188-195 [cit. 2021-04-04]. ISSN 13598368. Dostupné z : doi:10.1016/j.compositesb.2016.06.043

- [21] PETUKHOVA, E. a I. KRASNIKOVA. The effect of surface nanostructuring on the behavior of a fiber-reinforced polyethylene composite. *AIP Conference Proceedings* [online]. 2016, 2016(1), 5 [cit. 2021-04-04]. ISSN 1785-030021. Dostupné z : doi:10.1063/1.4967042
- [22] *Vlastnosti polyethylenu DOW 2629.10UE* [online]. -: materialdatacenter, - [cit. 2021-06-30]. Dostupné z : <https://www.materialdatacenter.com/ms/en/Dowlex/The+Dow+Chemical+Company/DOWLEX%E2%84%A2+2629%252E10UE/e76242af/699>
- [23] *Vlastnosti bavlněného vlákna. Havel Composites* [online]. Olomouc: -, 2018-2021 [cit. 2021-06-15]. Dostupné z : <https://www.havel-composites.com/uploads/files/products/540/ac85d9f505a42b7b39d7e97978bd21080ca40fd8.pdf>
- [24] PlasticsEurope. *PlasticsEurope* [online]. Europe: Plastics Europe, 2006 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z : <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>
- [25] Smáčivost povrchu. *Ih.cas.cz* [online]. Praha 6 : ÚSTAV PRO HYDRODYNAMIKU Akademie věd České republiky, - [cit. 2021-04-04]. Dostupné z : <https://www.ih.cas.cz/reologie-vytvorili-jsme-nanovlakennou-membranu-se-superhydrofobnim-povrchem/>
- [26] *Odolnost FRP kompozitních materiálů vůči působení vybraných agresivních prostředí*. Brno, 2017. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta stavebního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [27] KIM, Jong a Joon LEE. *Influence of Interleaved Films on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Fabric/Polypropylene Thermoplastic Composites* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z : doi:10.3390/ma9050344
- [28] KAMBLE, Zunjarrao a Bijoya BEHERA. Mechanical properties and water absorption characteristics of composites reinforced with cotton fibres recovered from textile waste. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* [online]. 2020, 15(5) [cit. 2021-04-07]. ISSN 1558-9250. Dostupné z : doi:10.1177/1558925020901530

14. Seznam příloh

Příloha č. 1 Materiálový list DOWLEX 2629.10UE

Příloha č. 2 UHLÍKOVÁ VLÁKNA C