



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Polymerní kompozity s vláknovou a tkaninovou výztuží**

**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta strojní**

**Ústav materiálového inženýrství**

**Autor: Bc. Ondřej Polák**

**Vedoucí práce: Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.**



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Polák** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **459598**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Polymerní kompozity s vláknovou a tkaninovou výztuží**

Název diplomové práce anglicky:

**Polymer composites with fiber and fabric reinforcement**

Pokyny pro vypracování:

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

Postup:

1. Studium dostupných informací o přípravě kompozitních materiálů s termoplastickou maticí se zvláštní pozorností na recyklovanou výztuž.
2. Příprava vzorků o vybraném složení.
3. Testování vzorků.
4. Zpracování výsledků a diskuse.
5. Závěr.

Seznam doporučené literatury:

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] BAREŠ, R. Kompozitní materiály. Vyd.1. Praha: SNTL, 1988.
- [3] Odborné články – vyhledání je součástí diplomové práce.
- [4] Normy dle použitých zkoušek.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **04.04.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **25.07.2021**

Platnost zadání diplomové 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

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

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat ústavu materiálového inženýrství ze vstřícné chování všech zaměstnanců a umožnění práce na zařízeních tohoto ústavu. Mé největší díky patří paní Ing. Zdeňce Jeníkové Ph.D., za pomoc a vedení při vzniku této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jakubovi Antoňovi za pomoc a rady při práci na praktické části práce. V neposlední řadě potom panu Radku Čechovi za spolupráci na praktické části a Ing. Miladě Polákové a Bc. Daniele Valsové, B.Sc. za pomoc při korektuře.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně. V příloženém seznamu jsou uvedeny veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

## Anotace

**Autor:** Ondřej Polák

**Název DP:** Polymerní kompozity s vláknovou a tkaninovou výztuží

**Rozsah práce:** 122

**Školní rok vyhotovení:** 2020/2021

**Škola:** České Vysoké Učení Technické v Praze

**Ústav:** Materiálového inženýrství

**Vedoucí DP:** Ing. Zdeňka Jeníková Ph.D.

**Klíčová slova:** Polyetylen, Kompozit, Matrice, Vlákna, Tkanina, Termoplast, Kevlar, Čedič, Uhlíková vlákna,

**Abstrakt:** Tato práce se zabývá přípravou kompozitů s termoplastickou matricí. V praktické části jsou pak vyrobeny a porovnány vzorky s uhlíkovými vlákny, kevlarovou a čedičovou tkaninou. Vzorky jsou podrobeny tahové zkoušce, zkoušce rázem v ohybu a tříbodovému ohybu. Byla měřena jejich hustota. A struktura byla zkoumána pomocí světelného mikroskopu.

## Annotation

**Author:** Ondřej Polák

**Thesis name:** Polymer composites with fibre and fabric reinforcement

**Scope of the thesis:** 122

**School year of completion:** 2020/2021

**University:** Czech Technical University in Prague

**Department:** Material engineering

**Thesis director:** Ing. Zdeňka Jeníková Ph.D.

**Keywords:** Polyethylen, Composite, Matrix, Fibre, Fabric, Thermoplastic, Kevlar, Basalt, Carbon fibres

**Abstract:** This thesis focuses on the preparation of composites with a thermoplastic matrix. The practical part discusses the creation of samples with carbon fibers, and kevlar and basalt fabric, and comparison of the samples. The samples are then examined through a tensile test, impact flexural test and three-point flexural test. Further the density of the samples is measured. The structure is examined via a light microscope.

## Obsah

SEZNAM TABULEK .....	9
SEZNAM GRAFŮ .....	10
SEZNAM ZKRATEK A VELIČIN.....	11
<b>TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>15</b>
1. ÚVOD.....	16
2. KOMPOZITY .....	17
3. MATRICE .....	18
3.1. <i>Reaktoplasty</i> .....	18
3.2. <i>Termoplasty</i> .....	19
3.3. <i>Porovnání termoplastů a reaktoplastů</i> .....	22
4. ADHEZE .....	25
4.1. <i>Mechanické vazby</i> .....	25
4.2. <i>Fyzikální vazby</i> .....	26
4.3. <i>Chemické vazby</i> .....	27
5. SMÁČIVOST.....	29
6. POLYETHYLEN .....	30
7. PLAZMOVÁ ÚPRAVA.....	33
8. VÝPLNĚ .....	35
8.1. <i>Částicové výztuže</i> .....	35
8.2. <i>Vláknové výztuže</i> .....	35
9. PLOŠNÉ VÝZTUŽE.....	37
10. VÝROBNÍ TECHNOLOGIE KOMPOZITŮ.....	40
10.1. <i>Beztlaké technologie:</i> .....	40
10.2. <i>Tlakové technologie</i> .....	44
11. ANALÝZA SOUČASNÉHO TRHU .....	47

<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>50</b>
1. ÚVOD.....	51
2. VÝROBA FORMY .....	52
3. MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO PRAKTICKOU ČÁST .....	55
3.1. <i>Polyetylen Dowlex 2629.10UE</i> .....	55
3.2. <i>Polyethylen plazmovaný 2629.10UE</i> .....	55
3.3. <i>RPX 1001 NATUR LD/70/600<math>\mu</math> (RPX)</i> .....	55
3.4. <i>Uhlíková vlákna</i> .....	55
3.5. <i>Čedičová tkanina</i> .....	56
3.6. <i>Kevlarová tkanina</i> .....	57
4. PŘÍPRAVA VZORKŮ NA LISOVÁNÍ .....	58
5. PŘÍPRAVA VZORKŮ .....	62
6. LISOVÁNÍ.....	64
7. NÁVOD K OBSLUZE HYDRAULICKÉHO LISU .....	65
8. PŘÍPRAVA VZORKŮ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	67
8.1. <i>Postup při výrobě folií</i> .....	67
8.2. <i>Postup pro výrobu vzorku v měděné formě</i> .....	67
8.3. <i>Postup pro výrobu vzorku v silikové formě:</i> .....	67
9. VÝROBNÍ PROCES Z PRÁŠKU .....	68
10. VÝROBNÍ PROCES Z FOLIÍ.....	69
11. TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	73
11.1. <i>Vzorky z polyetylenu</i> .....	74
11.2. <i>Vzorky s uhlíkovými vlákny</i> .....	75
11.3. <i>Vzorky s čedičovou tkaninou</i> .....	78
11.4. <i>Vzorky s kevlarovou tkaninou</i> .....	80
12. ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM .....	83
13. RÁZOVÁ ZKOUŠKA.....	86
14. HUSTOTA .....	88
15. POZOROVÁNÍ STRUKTURY.....	90
16. DISKUZE .....	93
17. ZÁVĚR .....	96
18. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	97
19. PŘÍLOHY .....	100



## Seznam obrázků

Obrázek 1 Synergický efekt .....	17
Obrázek 2 Znázornění mechanické vazby .....	25
Obrázek 3 Vyznačení kontaktního úhlu .....	29
Obrázek 4 Recyklační symbol PE-HD .....	31
Obrázek 5 Recyklační symbol PE-LD.....	31
Obrázek 6 Větvení PE-HE, PE-LLD, PE-LD .....	32
Obrázek 7 a) Jednosměrně uspořádaná dlouhá vlákna, b) Jednosměrně uspořádaná krátká vlákna, c) nahodilá orientace krátkých vláken, d) Vícesměrné vyztužení, e) Dvousměrné uspořádání (tkaniny, rohože), f) Nahodilá orientace dlouhých vláken .....	36
Obrázek 8 a) Tvarovaná výztuž, b) Výztuž s el. odstíněním, c) Zpevněná výztuž .....	37
Obrázek 9 Plátňová vazba.....	38
Obrázek 10 Vazba panama .....	38
Obrázek 11 Rypsová vazba.....	39
Obrázek 12 a) Vazba kepr osnovní 5x5 levý, b) Vazba kepr osnovní 5x10 lomený c) Vazba kepr útkový 3x3 pravý .....	39
Obrázek 13 Schéma výroby ručním kladením .....	40
Obrázek 14 Výrobní proces rotačního spékání .....	41
Obrázek 15 Schéma procesu tažení .....	42
Obrázek 16 Schéma procesu odstředivé lití .....	42
Obrázek 17 Schéma procesu navíjení .....	43
Obrázek 18 Schéma procesu vstřikování .....	44
Obrázek 19 Boční stěna formy .....	52
Obrázek 20 Spodní část formy.....	53
Obrázek 21 Řez sestavenou formou .....	53
Obrázek 22 Snímek z termokamery – pozorování teploty formy.....	54

Obrázek 23 Snímek uhlíkových vláken použitých pro výrobu vzorků .....	56
Obrázek 24 Čedičová tkanina použita pro výrobu vzorků .....	56
Obrázek 25 Kevlarová tkanina použita pro výrobu vzorků .....	57
Obrázek 26 Křivka ohřevu a chlazení.....	58
Obrázek 27 DSC materiálu PEp – ohřev 1 a 2 .....	59
Obrázek 28 DSC materiálů PE – ohřev 1 a 2 .....	60
Obrázek 29 Porovnání prvních ohřevů PEp a PE .....	61
Obrázek 30 Porovnání druhých ohřevů PEp a PE .....	61
Obrázek 31 Síto používané u procesu separace vláken .....	63
Obrázek 32 Schéma lisu Holtzmann WP45H.....	64
Obrázek 33 Ukazatel tlaku u lisu Holtzmann WP 45H .....	66
Obrázek 34 Vzorek PE-CF5 vyrobený pomocí lisování folií PE-CF10 a PE .....	70
Obrázek 35 Schéma vzorku slisovaného z folií.....	70
Obrázek 36 Vzorek PE-CF5 lisování pomocí folií.....	71
Obrázek 37 Schéma vzorku lisovaného pomocí folie z prosycenou tkaninou .....	71
Obrázek 38 Schéma vzorku lisovaného pomocí více folií s prosycenou tkaninou .....	72
Obrázek 39 Příklad vzorků pro tahovou zkoušku z PEp-5CF .....	73
Obrázek 40 Špatná přilnavost vrstev u vzorku PE-ČT .....	79
Obrázek 41 Snímek řezu vzorku PEp-CF5 .....	90
Obrázek 42 Detailní snímek rozhraní mezi folií PEp a PEp-CF10 .....	91
Obrázek 43 Částečné uspořádání vláken u vzorku PE-CF10 .....	91
Obrázek 44 Detailní snímek Převážně neuspořádaných vláken u vzorku PE-CF10 .....	92

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozdíly mezi termoplasty a reaktoplasty .....	22
Tabulka 2 Rozdíly mezi termoplasty a reaktoplasty při použití na výrobu kompozitů..	23
Tabulka 3 Porovnání PE-LD, PE-HD, PE-LLD .....	31
Tabulka 4 Shrnutí současných výrobců a dostupných kompozitních materiálů na trhu	47
Tabulka 5 Základní parametry uhlíkových vláken použitých pro výrobu vzorků.....	56
Tabulka 6 Výsledky tahové zkoušky u vzorků z PE .....	74
Tabulka 7 Výsledky tahové zkoušky u vzorků s uhlíkovými vlákny .....	76
Tabulka 8 Výsledky tahové zkoušky vzorku PE-CF5 <sub>n</sub> .....	77
Tabulka 9 Výsledky tahové zkoušky u vzorků s čedičovou tkaninou (1 vrstva) .....	78
Tabulka 10 Výsledky tahové zkoušky u vzorků s kevlarovou tkaninou (1 vrstva).....	80
Tabulka 11 Výsledky tahové zkoušky u vzorků s kevlarovou tkaninou (3vrstvy).....	81
Tabulka 12 Výsledné moduly pružnosti u všech vzorků .....	84
Tabulka 13 Výsledky rázové zkoušky všech vzorků.....	86
Tabulka 14 Výsledné naměřené hodnoty hustoty .....	88

## Seznam grafů

Graf 1 Závislost rychlostí krystalizace na teplotě, upraveno .....	21
Graf 2 Porovnání výsledků tahové zkoušky u vzorků z PE.....	75
Graf 3 Porovnání výsledků tahové zkoušky u vzorků s uhlíkovými vlákny .....	76
Graf 4 Porovnání výsledků tahové zkoušky u vzorků s čedičovou tkaninou (1 vrstva). 79	
Graf 5 Porovnání výsledků tahové zkoušky u vzorků s kevlarovou tkaninou (1 vrstva)80	
Graf 6 Porovnání výsledků tahové zkoušky u vzorků s kevlarovou tkaninou (3 vrstvy)82	
Graf 7 Porovnání modulu pružnosti E u všech vzorků.....	85
Graf 8 Porovnání výsledků rázové zkoušky .....	87
Graf 9 Porovnání výsledných hustot.....	88

## Seznam zkratek a veličin

$\sigma_r$	Napětí působící kolmo na mezifázové rozhraní
$\tau_i$	Smykové mezifázové rozhraní
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AO	Atomový orbital
CF	Carbon fiber (uhlíkové vlákno)
DSC	Diferenčně skenovací kalorimetrie
E	Modul pružnosti
LCP	Polymer tekutých krystalů (Liquid crystal polymer)
MO	Molekulový orbital
PA-6	Polyamid 6
PA-66	Polyamid 66
PAI	Polyamid-imid
PBT	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PE-HD	Polyethylen s vysokou hustotou
PE-HD	Vysoko hustotní polyethylen
PEI	Polyetherimid
PE-LD	Nízko hustotní polyethylen
PE-LD	Polyethylen s nízkou hustotou
PE-LLD	Lineární nízkohustotní polyethylen
PE-ME	Středně hustotní polyethylen
PET	Polyethylentereftalát
PE-X	Zesíťovaný polyethylen

PFA	Perfluoralkoxyalkan
PLA	Kyselina polymléčná
PMMA	Polymethylmethakrylát
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PPS	Polyfenylsulfid
PPSU	Polyfenylsulfon
PS	Polystyren
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinilchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
SAN	Styren-akrylonitrilová pryskyřice
SM	C-sheet moulding compounds (směsi pro tváření plechů)
$T_c$	Teplota pece
$T_g$	Teplota skelného přechodu
$T_m$	Teplota tání
$\mu$	Koeficient tření

### **Jednotky:**

[m]	metr
[mm]	milimetr
[ $\mu\text{m}$ ]	mikrometr
[nm]	nanometr
[m <sup>2</sup> ]	metr čtvereční
[m <sup>3</sup> ]	metr krychlový
[Pa]	pascal
[MPa]	megapascal
[GPa]	gigapascal
[Nm]	newtonmetr
[N]	newton
[kN]	kilonewton
[g]	gram
[V]	volt
[min]	minuta
[°C]	stupně Celsia

### Značení vzorků:

PE-CF10	Polyetylen v základním stavu + 10 hmotnostních % karbonových vláken
PE-CF5	Polyetylen v základním stavu + 5 hmotnostních % karbonových vláken
PEp-CF10	Polyetylen plazmovaný + 10 hmotnostních % karbonových vláken
PEp-CF5	Polyetylen plazmovaný + 5 hmotnostních % karbonových vláken
PE-MW11	Polyetylen v základním stavu + čedičová tkanina (obsažena 11 hm.%)
PEz-MW11	Polyetylen v základním stavu s nižší viskozitou + čedičová tkanina (obsažena 11 hm.%)
PEp-MW11	Polyetylen plazmovaný + čedičová tkanina (obsažena 11 hm.%)
PE-AW8	Polyetylen v základním stavu + kevlarová tkanina (obsažena 8 hm.%)
PEp-AW8	Polyetylen plazmovaný + kevlarová tkanina (obsažena 8 hm.%)
PE+AW20	Polyetylen v základním stavu + tři vrstvy kevlarové tkaniny (obsažena 20hm.%)
PEp+AW20	Polyetylen plazmovaný + tři vrstvy kevlarové tkaniny (obsažena 20 hm.%)
PE-CF5 <sub>n</sub>	Polyetylen + 5hm. % uhlíkových vláken - nový tech. postup



# TEORETICKÁ ČÁST

## 1. Úvod

Tato práce se zabývá kompozity s termoplastickou matricí a výplní z vláken a tkanin. Cílem práce je ověřit mechanické vlastnosti těchto materiálů. Dále se zabývá vodivostí u kompozitů s recyklovanými uhlíkovými vlákny.

Termoplastické materiály představují rychle se rozvíjející odvětví kompozitů. Tyto materiály jsou díky svým vlastnostem recyklovatelné, a to je v dnešní době velice žádaná vlastnost. V praktické části byl využit polyetylen, který se řadí mezi levné a snadno dostupné materiály. Při správném zpracování a dobře použité metodě při výrobě kompozitu následně vykazuje výborné mechanické vlastnosti.

V teoretické části jsou charakterizovány dvě složky kompozitů. Nejprve je rozebrána matrice a její vliv na výsledný kompozitní materiál. Je zde vysvětlen pojem termoplastická matrice, která je porovnávána s reaktoplastickou matricí. Dále jsou popsány druhy termoplastických matric s větším důrazem na polyetylen, který je využíván pro praktickou část této práce.

Druhou součástí kompozitu je plnivo, v našem případě se jedná o karbonová vlákna, tkaniny kevlaru a čediče. V teorii je popsán vliv výztuže na výsledné vlastnosti kompozitu a důležitost jejího správného rozložení. Také jsou zde uvedeny výhody a nevýhody tvaru dodávané výztuže (vlákna x tkanina). Opět je hlavní část věnována materiálům, které jsou následně použity i pro praktickou část, tedy uhlíkovým vláknům, čediči (čedičové tkanině) a kevlaru (kevlarové tkanině).

Poté se práce věnuje způsobu výroby kompozitů tlakovými a beztlakovými metodami. V práci jsou popsány základní používané druhy obou metod a způsoby jejich využití. V praktické části je popsána příprava kompozitů s termoplastickou matricí, za působení tlaku lisu s vyhřívanými deskami / formou. Hlavní část tvoří popis separace uhlíkových vláken a výroby kompozitu z polyethylenu a uhlíkových vláken (PE-CF). V další části je rozebrána výroba kompozitních materiálů (sendvičů) PE-AW (polyetylen + kevlarová tkanina) a PE-MW (polyetylen + čedičová tkanina). Vyrobene vzorky byly podrobeny zkouškám pevnosti, ohybu pro zjištění modulu pružnosti E a zkoušce rázem v ohybu. Výsledné materiály i lomové plochy byly zkoumány pomocí mikroskopu.

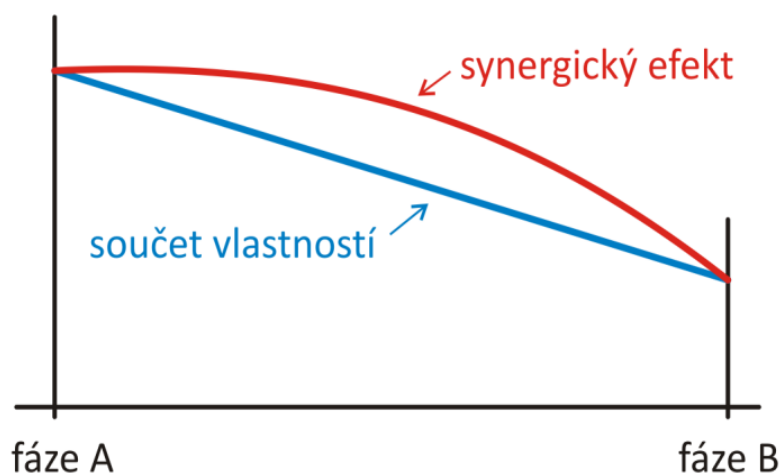
Dále je k práci přiložen návod na obsluhu lisu Holzmann-maschine, werkstattpresse WP 45H a výkresová dokumentace k výrobě vyhřívaných forem. Na závěr jsou shrnuty výsledky a jejich diskuze.

## 2. Kompozity

Kompozity jsou v dnešní době velice oblíbeným a vyhledávaným materiálem v celosvětovém průmyslu. Jedná se o materiály složené z více fází. Mezi nejznámější a nejvíce používané kompozity patří například železobeton, tedy spojení materiálů ocelových drátů a betonu, přičemž beton je opět kompozit, který vznikne spojením kamenné drti a cementu. V průmyslu se hojně využívají například kompozity s uhlíkovými, nebo aramidovými vlákny a určité pojivo.

Definování kompozitu je jednoduché, ale různé zdroje a výrobci se neshodují na přesné definici pro takovýto materiál. Zjednodušeně řečeno je kompozit jakýkoliv materiál, který je tvořen ze dvou nebo více materiálů, kde jeden plní úlohu matrice a druhý plniva. Důležitým faktorem je, že materiály musí mít rozdílné fyzikální a mechanické vlastnosti. Zpravidla je plnivo nespojitá fáze daného kompozitu, která má specifické vlastnosti (pevnost, vysoký modul pružnosti, vodivost, ...). Druhá fáze, matrice neboli pojivo, je většinou měkčí, ale spojitá fáze výsledného materiálu. Tato složka je zpravidla ve většinovém zastoupení z celkové hmotnosti. Plní důležité funkce v materiálu a ovlivňuje jeho výsledné vlastnosti a možnosti použití. Aby se spojení jednotlivých složek mohlo nazývat kompozitem, musí být zastoupena menšinová složka alespoň 5% z celkové hmotnosti.[1]

Kompozitní materiál nejen sčítá, ale díky synergickému efektu dokonce zvyšuje součet mechanických vlastností výsledného materiálu. Vlivem takzvaného synergického efektu je výsledek, jehož hodnota je vyšší než součet hodnot vlastností všech fází. [1] Grafické znázornění synergického efektu je na obrázku 1.



Obrázek 1 Synergický efekt [1]

### 3. Matrice

Matrice je výraz pro fázi kompozitu, která plní funkci pojiva. Tedy jedná se o materiál, který by měl zajistit prosycení ostatních fází kompozitu. Tato složka zajišťuje především tvarovou stálost výsledného kompozitu, přenos namáhání a odolnost proti vnějším vlivům. U polymerních materiálů existují dva druhy matic, a to reaktoplastové a termoplastové.[3]

#### 3.1. Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou materiály, které jsou před vytvrzením ve své počáteční fázi kapalné i za běžných pokojových teplot. Ale po zahřátí, nebo při přidání určité chemické složky, je tento materiál nevratně vytvrzen. Většinou bývají reaktoplasty vytvrzovány ve formě, kde probíhá celý proces tuhnutí. Při tomto procesu, který se nazývá síťování, se vytvářejí kovalentní vazby mezi atomy jednotlivých molekul. A tyto síly jsou stálé, tím pádem udržují molekuly na místě. Díky tomu materiál nemění svoji povahu a nemůže být znovu uveden do tekutého stavu, tedy nemá bod tání. Výsledkem je, že dané materiály nemohou být přivedeny opět do své počáteční fáze a proces tuhnutí je nevratný. Při zahřátí reaktoplastů nad určitou teplotu se tyto materiály nemění v tekutou fázi, ale degradují. [5]

##### 3.1.1. Síťování

Všechny mechanické rozdíly a odlišné chování mezi termoplasty a reaktoplasty vychází ze základního chemického rozdílu v jejich struktuře. Tento rozdíl spočívá v tom, že reaktoplasty mají po celé délce polymerního řetězce reaktivní místa, která lze pomocí chemických přísad aktivovat a donutit je tak vytvořit chemickou vazebnou reakci se sousedními molekulami polymeru. Tomuto procesu se říká síťování neboli vytvrzování. Při vytvrzování se vytváří zesíťovaná vazba, která omezuje pohyb polymerních molekul. Tyto vazby jsou silnější než mezimolekulové síly, kterými na sebe působí jednotlivé řetězce v polymeru (Van der Waalsovy síly, vodíkové vazby, interakce dipólu (vodíkové)).[5] [6]

Další rozdíl mezi termoplasty a reaktoplasty, který způsobuje zesíťování je molekulová hmotnost těchto polymerů. Reaktoplasty mají v základním stavu velice nízkou molekulovou hmotnost, dokonce výrazně nižší než termoplasty, ale při vytvrzování termoplastů se molekulová hmotnost výrazně zvyšuje. Při zesíťování vzniká polymerní síť o násobné molekulové hmotnosti. Jak se zvyšuje počet navázaných molekul, molekulová hmotnost stále roste a převyšuje molekulovou hmotnost termoplastů. Toto výrazné zvýšení molekulové hmotnosti způsobuje velké změny ve vlastnostech materiálu, jako je například zvýšená teplota tání/degradace. S kontinuálním zvyšováním molekulové hmotnosti v důsledku zesíťování teplota tání stoupá a dosahuje bodu, který přesahuje bod rozkladu/degradace. To definuje, proč je vytvrzení reaktoplastu nevratné. [5] [6]

## 3.2. Termoplasty

Termoplast je polymer, který je většinou tuhý při pokojové teplotě, ale při zahřívání se rychle mění jeho mechanické vlastnosti. Stává se elastickým, měkne a následně teče v důsledku překonání mezikrystalových vazeb (díky překročení teploty skelného přechodu  $T_g$ ). Při překročení teploty tání se materiál mění ve viskózní kapalinu. Významnou výhodou termoplastů je v dnešní době recyklovatelnost, tedy možnost opakovaně tyto materiály tavit a následně nechat ztuhnout. Tato vlastnost je způsobena tím, že termoplasty mají nižší teplotu tání než teplotu degradace. [5]

Termoplasty jsou rozděleny do dvou skupin, a to podle nadmolekulární struktury, tzn. podle stupně uspořádanosti na:

### 3.2.1. Amorfni

Tyto termoplasty nejsou schopné krystalizovat.

Jedná se o polymerní materiály, u kterých makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici. Většina těchto materiálů je charakteristická svou tvrdostí a křehkostí (například mimo PC). Mají nízký index lomu a jsou díky tomu průhledné nebo transparentní. Použití těchto polymerů je do teploty  $T_g$ . Mezi tyto polymery patří polyvinylchlorid (PVC), akrylonitrilbutadienstyren (ABS), polystyren (PS), styren-akrylonitril (SAN), polykarbonát (PC), polymethylmethakrylát (PMMA), polyester (PSU), polyfenylsulfon (PPSU), polyfenylen sulfid (PPS), polyethylenimin (PEI), polyamid-imid (PAI). [8] [9]

Základním útvarem této struktury jsou globuly. Ty jsou tvořeny z chaoticky stočených makromolekul a mají velikost 10–30 nm. V nadmolekulární struktuře amorfního polymeru se tedy tvoří globuly a uspořádané globuly. [9]

### 3.2.2. *Semikrystalické*

Semikrystalické termoplasty, jak již napovídá název, jsou schopné částečně krystalizovat.

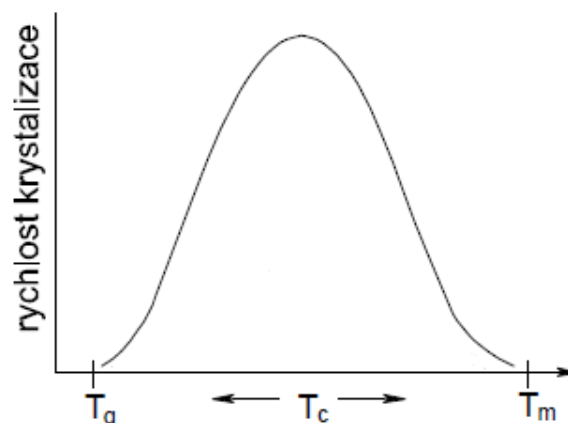
Tyto materiály se nazývají semikrystalické, protože krystalizace nikdy neproběhne na 100 %. Krystalizace probíhá maximálně do 90% celkového objemu. Jak velké množství z celkového objemu materiálu zkrystalizuje, se nazývá stupeň krystalinity a vyjadřuje tedy podíl uspořádaných (krystalických) oblastí v celkovém objemu materiálu. Semikrystalické materiály jsou většinou mléčně zakalené, mají větší index lomu a jsou převážně houževnaté. Pevnost a modul pružnosti u těchto materiálů roste se stupněm krystalinity. Použití těchto materiálů je do teploty  $T_m$ . Mezi tyto polymery patří

vysoko hustotní polyetylen (PE-HD), nízko hustotní polyetylen PE-LD, polypropylen PP, polyethyltereftalát (PET), polybutyltereftalát (PBT), polyamid 6(PA-6), polyamid 66(PA-66), polyoxymetylen (POM), polyetheretherketon (PEEK), polymer tekutých krystalů (LCP), polyvinylidenfluorid (PVDF), polytetrafluorethylen (PTFE), paraformaldehyd (PFA). [8] [9]

Základními útvary krystalizace jsou lamely, fibrily a sférolity. [9]

### 3.2.3. *Krystalizace*

U reálných materiálů může dojít ke krystalizaci pouze za podchlazeného stavu, nebo pokud je materiál ve stavu taveniny a následně je ochlazován. Krystalizace tedy probíhá mezi teplotou tání ( $T_m$ ) a teplotou skelného přechodu ( $T_g$ ) a za dané teploty pece ( $T_c$ ). Rychlost, jakou krystalizace probíhá, výrazně ovlivňuje vlastnosti materiálu a charakter sférolitů, které vznikají při krystalizaci. Sférolit je útvar, který vzniká růstem a větvením lamel. Ty vychází z jednoho středu, tedy centra sférolitu. V reálných podmínkách nikdy neprobíhá krystalizace v celém objemu materiálu, pouze část polymeru zkrystalizuje a zbytek zůstává v amorfním tvaru. Závislost mezi teplotou a rychlostí ochlazování všech semikrystalických polymerů vystihuje graf závislosti rychlosti krystalizace polymerů na teplotě. [10] [11]



*Graf 1 Závislost rychlostí krystalizace na teplotě, upraveno [10]*

Pro krystalizaci je zásadní vznik krystalizačních zárodků (nukleace). Z těchto zárodků vznikají lamely a z nich sférolity. Ochlazováním amorfní taveniny postupně získáváme nukleační zárodky, a tím pádem následně po vytvoření sférolitů krystalickou fází v polymeru. Jedná se o jeden z nejdůležitějších faktorů při krystalizaci. Pokud totiž chceme dosáhnout co nejlepších mechanických vlastností, potřebujeme co nejmenější sférolitickou strukturu. Té dosáhneme právě vytvořením co nejvíce nukleačních zárodků, jež vznikají při určité teplotě, která je pro každý polymer odlišná. Dalším důležitým faktorem je čas na krystalizaci. Pokud materiál prudce zchladíme, polymer sice ztuhne, ale nestihne se vytvořit sférolitická struktura. Pokud materiál krystalizuje mezi teplotou  $T_m$  a  $T_g$ , tedy z taveniny, hovoříme o primární krystalizaci. [10] [11]

Po tomto procesu nastává mnohem pomalejší druhá fáze, která se nazývá sekundární krystalizace. Ta může probíhat i několik měsíců po primární. Projevuje se zejména při působení vnějších vlivů na daný polymer. Mezi tyto vlivy patří například sluneční záření, teplota a chemické prostředí. Většinou je sekundární krystalizace považována za nežádoucí jev. [10] [11] [12]

### 3.3. Porovnání termoplastů a reaktoplastů

Převážná část termoplastů vykazuje vysokou pevnost, pružnost a malé smrštění, samozřejmě v závislosti na konkrétním typu polymeru. Jedná se o univerzální materiály, které mají vysokou škálu využití. Od plastových tašek až po namáhaná ložiska, nebo přesné mechanické součásti.

Reaktoplasty mají vyšší chemickou a teplotní odolnost, protože mají silnější vazby, které se nedeformují. V tabulce 1 jsou popsány základní rozdíly mezi termoplasty a reaktoplasty.

*Tabulka 1 Rozdíly mezi termoplasty a reaktoplasty [13]*

Vlastnost/ Materiál	TERMOPLAST	REAKTOPLAST
Molekulová struktura	Lineární polymer: slabé molekulární vazby ve formaci přímého řetězce	Síťové polymery: vysoká úroveň zesíťování se silnými chemickými molekulárními vazbami
Bod tání	Bod tání nižší než teplota rozkladu	Bod tání vyšší než teplota rozkladu
Mechanické vlastnosti	Pružný a elastický. Vysoká odolnost proti nárazu (10x více než u termosetů). Síla pochází z krystalinity	Nepružný a křehký. Silný a tuhý. Síla pochází ze síťování.
Polymerizace	Adiční polymerace: většinou repolymerace během výroby (před zpracováním)	Polykondenzační polymerace: polymeruje během zpracování
Mikrostruktura	Skládá se z tvrdých krystalických a elastických amorfních oblastí v pevném stavu	Skládá se z reaktoplastické pryskyřice a vyztužujícího vlákna v pevném stavu
Velikost	Velikost je vyjádřena molekulovou hmotností	Velikost je vyjádřena hustotou zesíťení
Recyklovatelnost	Recyklovatelné a opakovaně použitelné působením tepla a / nebo tlaku	Nerecyklovatelné
Chemická stálost	často chemicky odolný	Chemicky a tepelně odolný
Opravitelnost	lze snadno opravit	Obtížná oprava
Procesní tepelný aspekt	Tavení termoplastů je endotermické	Zesíťování termosetů je exotermické
Provozní teplota	Nižší teplota pro nepřetržité použití (CUT) než reaktoplasty	Vyšší než termoplasty
Rozpustnost	Může se rozpustit v organických rozpouštědlech	nerozpustitelný v organických rozpouštědlech



Jako další jsou v tabulce 2 uvedeny hlavní rozdíly těchto materiálů při průmyslovém použití na výrobu kompozitů. Tato tabulka je velmi důležitá pro pochopení průmyslového využití materiálu pro konkrétní aplikaci.

*Tabulka 2 Rozdíly mezi termoplasty a reaktoplasty při použití na výrobu kompozitů [13]*

	<b>TERMOPLASTY</b>	<b>REAKTOPLASTY</b>
Matrice	Polymerovaná, vysokoviskozní tavenina, špatně se spojuje lepením	Nevytvrzená, nízkoviskozní, dobře se spojuje lepením a opatřuje se nátěrem
Cena matrice	nízká, ale i vysoká	Nízká
Předimpegace	Obtížné smáčení a prosycování	Snadné
Cena předimpegace	Vysoká	Nízká
Skladování	Neomezeně skladovatelné (při dobrých okolních podmínkách)	Omezená skladovatelnost(v chladu), reakce pomalu pokračuje
Polotovary	Termoplasty vyztužené skleněnou rohoží(GMT), pásy	Lisovací hmoty SMC (prepregy)
Přímé zpracování	Granulát (krátká vlákna), přímo zpracovatelný dlouhovláknitý polotovar (D-LFT)	Výztuž a reaktivní pryskyřice
Teplota při zpracování	Teplota taveniny	Teplota okolí
Tvarování	Vhodné pro velké serie	Nevhodné
Ruční kladení	Nevhodné	Vhodné pro velké díly
Kladení pásů	Vysoká automatizace, malá lepivost, svařování	Vysoká automatizace, dobrá lepivost, citlivé vytvrzování
Teplota nástroje při lisování	Teplota taveniny 150 až 180C	Reakční teplota 140 až 160C
Lisovací tlak	GMT: 200 až 300 N*mm-2 D-LFT: 30 až 100 N*mm-2	SMC 20 až 50N*mm-2
Poloha povrchu	Svařitelná	Dobrá, Tvrdá, lze ji lepit a natírat
Mechanické chování	Houževnaté, sklon ke krípu	Dynamicky zatížitelné, křehký lom
Chování za tepla	Výrazné změknutí při Tg	Méně závislé na teplotě
Stárnutí	Málo odolné až odolné	Velmi odolné proti stárnutí
Možnost opravy	Omezená	Dobrá

V dnešní době jsou rozšířené především reaktoplastické matrice, protože mají dobrou smáčivost vláken, tím pádem dobrou adhezi a vysokou pevnost výsledného kompozitu. Ale tyto kompozity jsou pracné na výrobu a jsou neekologické kvůli nemožnosti je recyklovat. V současné době je velký tlak na ekologii a obnovitelné zdroje, a tudíž jsou firmy nuceny přemýšlet do budoucna. Proto dnes nastává velký rozkvět vývoje kompozitů s termoplastickou matricí, která je díky svým vlastnostem opakovaně tavitelná a znovu použitelná.

## 4. Adheze

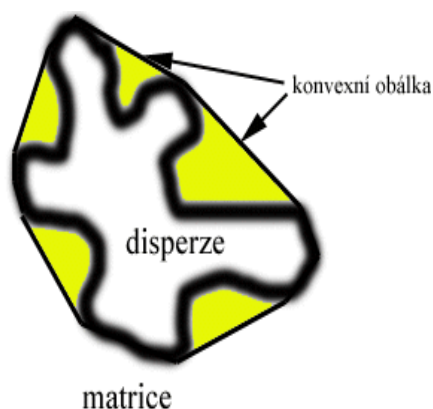
Mezi jednotlivými fázemi kompozitů je adheze podstatná vlastnost, která působí mezi jednotlivými materiály / fázemi. Čím větší je adheze, tedy čím je větší pevnost vazby jednotlivých materiálů mezi sebou, tím lepší jsou výsledné vlastnosti kompozitu. [2]

Existují tři druhy vazeb na rozhraní jednotlivých fází.[2]

- a) Mechanické vazby
- b) Fyzikální vazby
- c) Chemické vazby

### 4.1. Mechanické vazby

Velkou roli hraje povrch výztuže, neboli jeho pórovitost a drsnost povrchu. Mechanické vazby jsou takové vazby, kde výplň obklopuje nepravidelnosti na povrchu výztuže. V takovém případě se jedná o takzvanou konvexní obálku. Pro tyto vazby je důležitý hrubý povrch výztuže. Grafické znázornění této problematiky je na obrázku 2.[2]



Obrázek 2 Znázornění mechanické vazby [3]

V podstatě se v případě mechanické vazby jedná o napětí mezi povrchy/fázemi. Toto napětí je popsáno rovnicí (1). [3]

$$\tau_i = \mu * \sigma_r \quad (1)$$

kde:

$\tau_i$ -smykové mezifázové rozhraní

$\sigma_r$ - napětí působící kolmo na mezifázové rozhraní

$\mu$ - koeficient tření

## 4.2. Fyzikální vazby

Jedná se o vazby, které působí na vzdálenosti 0,3-0,5 nm, při teoretické pevnosti až 7 GPa. To odpovídá energii  $8-16 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Tyto vazby se vyjadřují pomocí povrchového napětí, nebo povrchové energie. [2] [3]

Patří sem:

- a) Van der Waalsovy síly
- b) Dipólové síly
- c) Vodíkové můstky

### 4.2.1. Van der Waalsovy síly

Van der Waalsovy síly jsou slabé interakce mezi molekulami. Tyto síly jsou slabší než síly vazební (vazební síly jsou chemické vazby, u polymerů kovalentní vazba). Působí při vzájemném přiblížení jakýchkoliv atomových uskupení. Van der Waalsovy síly jsou tvořeny třemi druhy sil. Jsou to síly coulombické, indukční a disperzní. [7]

### 4.2.2. Dipólové síly

Rozdíl mezi energiemi atomových orbitalů (dále jen AO) vstupujících do chemické vazby se projevuje na tvaru molekulového orbitalu (dále jen MO). Oblasti maximální hustoty pravděpodobnosti výskytu elektronů v MO jsou nesymetrické. Elektrony setrvávají spíše v oblasti atomu, který měl své původní AO na nižší energetické hladině. Tento atom se jeví záporně nabitý. Naproti tomu na druhém atomu převládá kladný náboj jádra. Vznikne tak dvojice vázaných elektrostatických nábojů opačného znaménka. Takovýto útvar se nazývá dipól. Dipóly jsou jednou z příčin vzniku Van der Waalsových sil. Dipólová síla je síla, která působí mezi dvěma nebo více dipóly. [7]

### 4.2.3. Vodíkové můstky

Vodíkový můstek vzniká v uskupeních, kde atom vodíku nacházíme mezi dvojicí jiných atomů, kde plní funkci můstku. Vazba vodíkovým můstkem se významně uplatňuje jen v případech, kdy atom vodíku je vázán kovalentní vazbou na silně elektronegativní atom a může vytvořit můstek směřující k nevazebnému elektronovému páru jiného silně elektronegativního atomu. Vodík je jediný prvek, který má tuto vlastnost, protože nemá žádné vnitřní elektrony. [7]

Přítomnost mezimolekulární vodíkové vazby v systému molekul se projeví zvětšením mezimolekulových přitažlivých sil. Tím jsou výrazně ovlivněny fyzikální a chemické vlastnosti takovéto látky. Sloučeniny s vodíkovým můstkem mezi svými molekulami mají oproti podobným sloučeninám, u nichž k tvorbě vodíkové vazby nedochází, vyšší body varu a tání, větší výparná tepla, větší viskozitu a tak dále. [7]

### 4.3. Chemické vazby

Při přibližování dvou atomů, působí přitažlivé síly, které donutí atomy k dalšímu přibližování. Pakliže dojde k překrytí jejich elektronových orbitalů, vzniká chemická vazba. Elektronový orbital vyjadřuje nejpravděpodobnější oblast výskytu elektronu v atomu. Popis chemické vazby znamená vždy popis elektronové konfigurace celé částice. Atomy setrvávají v kontaktu na určitou vzdálenost. Tím vzniká chemická vazba. Působí na vzdálenost 0,1-0,3 nm a jejich teoretická pevnost dosahuje až 70 GPa. To odpovídá energii 40 - 400  $kJ \cdot mol^{-1}$ . Energie vazby je definována jako práce, kterou je třeba vynaložit, aby se zrušila vazba mezi atomy a aby se atomy od sebe oddálily mimo dosah jejich vzájemného silového působení. [2] [7]

Pokud je energie vazby tak malá, že k oddálení atomů od sebe dochází již v důsledku jejich tepelného pohybu, pak takové vazby zůstávají zachovány, jen při nízkých teplotách. Naopak látky, jejichž energie vazby je vysoká, jsou tepelně velmi odolné. [7]

Mezi chemické vazby patří:[2]

- a) Kovalentní vazba
- b) Iontová vazba
- c) Kovová vazba

#### 4.3.1. Kovalentní vazba

Vzniká v případě, kdy je elektronový orbital symetrický. Se vzrůstající iontovostí (schopnost atomu přitahovat elektrony) se elektronový orbital posunuje k prvku s větší elektronegativitou. Tudíž kovalentní vazba vzniká mezi atomy s minimálním rozdílem elektronegativity.

#### 4.3.2. *Iontová vazba*

Iontová vazba vzniká u prvků s velkým rozdílem elektronegativity. Je ve sloučeninách, kde se na atomech vytvářejí elektrické náboje. Vazba získává výrazný elektrostatický charakter. Iontový model chemické vazby je založen na představě přenosu elektronů z jednoho atomu na druhý. Atomy se mění v nabitě částice - ionty. Atom, který získává jeden nebo více elektronů nabývá záporný náboj a stává se aniontem. Atom, který ztratil jeden nebo více elektronů, získává kladný náboj a stává se kationtem. Atomy, které mají sklon poskytovat elektrony, jsou elektro pozitivní. Mají malou hodnotu elektronegativity. Hodnota ionizační energie je malá. Jsou to především atomy kovů.[7]

Atomy přijímající elektrony jsou elektronegativní. Mají velkou hodnotu elektronegativity a schopnost přijímat elektrony. Jsou to především nekovy. Vždy platí, že počet poskytovaných elektronů se musí rovnat počtu přijímaných elektronů a tedy vzniklá sloučenina musí být elektroneutralní. [7]

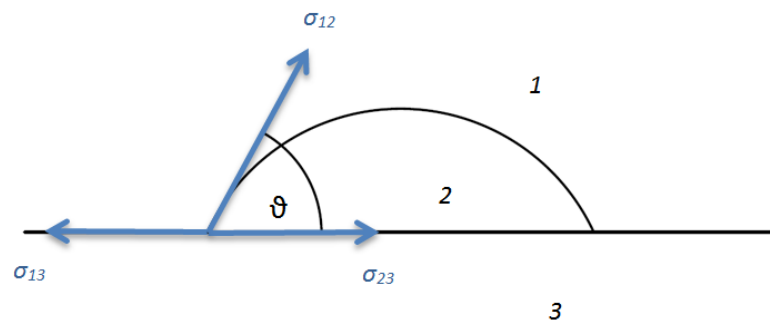
#### 4.3.3. *Kovová vazba*

Kovová vazba je charakteristická u kovových prvků. Po sdružení atomů do krystalové mřížky, přecházejí valenční elektrony do vodivostního pásu. Na mřížky kovů lze pohlížet jako na prostorové sítě, v nichž jsou uzlové body obsazeny kationty a valenční elektrony se v této mřížce pohybují jako takzvaný elektronový plyn nesoucí záporný náboj. [7]

## 5. Smáčivost

Jedná se o schopnost tekutiny/taveniny/matrice rozprostřít se po pevném povrchu/výztuži. Smáčivost je úzce spjata s adhezí. Dobrá smáčivost matrice k výztuži je základní podmínka pro budoucí kvalitní mechanické vlastnosti kompozitu.

Tato vlastnost je v literatuře popisována pomocí kontaktního úhlu, který se značí  $\vartheta$ . Jedná se o úhel mezi pevným povrchem, hranou kapky tekutiny a plynným prostředím. Schéma, jak odečíst kontaktní úhel, je na obrázku 3. [4]



Obrázek 3 Vyznačení kontaktního úhlu [4]

Na obrázku C je vyobrazeno, kromě kontaktního úhlu  $\vartheta$ , také plynné prostředí 1, kapalina 2, pevná látka 3.  $\sigma$  na obrázku vyjadřuje rozložené složky povrchového napětí.

Pokud je kontaktní úhel  $\vartheta < 90^\circ$ , je smáčivost dobrá, tedy kapalina povrch smáčí.

Pokud je kontaktní úhel  $\vartheta > 90^\circ$ , je smáčivost špatná, tedy kapalina povrch nesmáčí.

Z toho vyplývá, že čím menší je kontaktní úhel, tím lepší je smáčivost. Lepší smáčivosti lze dosáhnout snížením povrchového napětí kapaliny, nebo zvýšením povrchového napětí povrchu pevné látky. [4]

## 6. Polyethylen

Polyethylen má nejjednodušší základní strukturu z termoplastů viz rovnice (2). To ovšem nic nemění na tom, že je to nejrozšířenější polymer v průmyslu. A to především díky své nízké ceně a poměrově k tomuto faktu i dobrými mechanickými vlastnostmi.



Jedná se o semikrystalický termoplast, kterého bylo v roce 2017 vyrobeno 100 milionů tun a to představuje 34% celkového trhu s plasty. Jedná se o nejrozšířenější obalový materiál, ale používá se také pro průmyslové využití, například izolace kabelů, potrubí pro zavlažování, fólie, kanystry, přepravky, potrubí pro rozvod plynů a vody a mnoho dalších použití. [9] [14]



Mezi jeho hlavní výhody a důvody, proč je ve velkém průmyslově využíván, patří nízká pořizovací cena, velmi dobrá chemická odolnost, lehká zpracovatelnost, pružnost, houževnatost a vynikající elektrická izolace. Při tvorbě tenkých vrstev jsou dokonce některé druhy průhledné. Je to nepolární a tedy nenavlhavý polymer. Jeho mechanické vlastnosti se odvíjejí od větvení v daném PE. Tedy jeho vlastnosti jsou závislé na tvaru makromolekul, jejich délce a uspořádání merů v řetězci. Dále pak na stupni krystalinity. [9] [14]

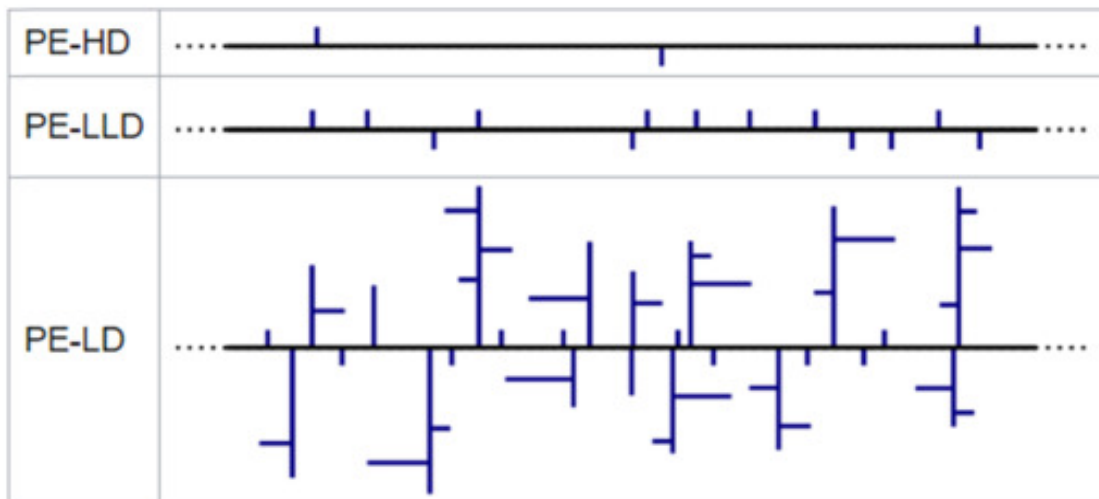
Dnes se pro průmysl využívá hned několik druhů PE: PE s velmi vysokou molekulovou hmotností, PE s velmi nízkou molekulovou hmotností, zesíťovaný PE (PE-X), PE s vysokou hustotou (PE-HD), zesíťovaný PE s vysokou hustotou, PE se střední hustotou (PE-MD), velmi nízkohustotní PE (PE-LD), lineární nízkohustotní PE (PE-LLD), chlorovaný PE a další. [9] [14] [15]

Ovšem mezi nejvíce rozšířené, tím pádem i nejvíce vyráběné a využívané, patří následující tři druhy: [9] [15]



Tabulka 3 Porovnání PE-LD, PE-HD, PE-LLD

Charakteristika / Materiál	Vysokohustotní PE	Nízkohustotní PE	Lineární nízkohustotní PE
Označení	PE-HD	PE-LD	PE-LLD
Stupeň krystalinity [%]	65-90	50-70	-
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	0,940-0,970	0,914-0,928	0,914-0,928
Smrštění [%]	1,5-4	2-4	2-4
Teplota skelného přechodu [°C]	T <sub>g</sub> = -125	T <sub>g</sub> = -125	T <sub>g</sub> = -125
Teplota tání [°C]	T <sub>m</sub> = 130-135	T <sub>m</sub> = 105-115	T <sub>m</sub> = 122-124
Modul pružnosti [MPa]	700-1400	200-500	270-520
Mez pevnosti [MPa]	18-35	8-23	-
Aplikace	sudy na vodu a chemikálie, víčka PET lahví, vodovodní potrubí, rozvody plynů, izolační pásy	průhledné plastové folie, izolace kabelů, přepravky, hračky	vodovodní potrubí, odpadní potrubí, zahradní zavlažování, nádrže na dešťovou vodu, jímky
Další charakteristika	Vhodný pro přímý styk s potravinami Působením UV záření časem degraduje	-	Lepší mechanické vlastnosti než PE-LD Odolnost proti křípu, odolnost proti vyšším teplotám
Recyklovatelnost	Ano - recyklační symbol je vyobrazen na obrázku 4	Ano - recyklační symbol je vyobrazen na obrázku 5	-
Recyklační symbol	 <b>PE-HD</b> <i>Obrázek 4 Recyklační symbol PE-HD</i>	 <b>PE-LD</b> <i>Obrázek 5 Recyklační symbol PE-LD</i>	-



*Obrázek 6 Větvení PE-HE, PE-LLD, PE-LD [14]*

V praktické části byl použit kromě polyethylenu v základním stavu, také plazmově upravený PE. Proto je tento jev popsán v následující kapitole.

## 7. Plazmová úprava

Plazma je čtvrté skupenství hmoty. V přírodě se plazma vyskytuje v podobě blesku, slunce, slunečního záření, hvězd, mlhoviny ve vesmíru, polární záře. Odhaduje se, že až 99% hmoty ve vesmíru je v podobě plazmy.

Plazma je buď částečně, nebo plně ionizovaný plyn. V technických aplikacích se jedná o takzvanou technickou plazmu. V průmyslu se tak lze s plazmatem setkat například při řezání či rozprašování, leptání, nebo naprašování tenkých vrstev. Dále se plazma vyskytuje ve svařovacích obloucích, nebo neonových trubicích. [17]

V praktické části pracujeme s práškem z PE, který je plazmově upravený, proto jsou zde uvedeny základní informace k této plazmové úpravě. Tato úprava by měla zaručit změnu základního řetězce a díky tomu by měla být následně větší adheze matrice k přidanému plnivu.

Jedná se rychlý proces, který trvá řádově milisekundy, sekundy, maximálně minuty. Je považován za ekologický, protože nejsou potřeba žádná rozpouštědla. Dále je to reprodukovatelný proces, u kterého je minimální spotřeba chemikálií i energií. Mezi další výhody plazmových procesů patří snadnost řízení, nízké náklady a vysoká účinnost. Výsledné vlastnosti závisí na použitém plynu a chemikálii.[18]

Prášek musí projít takzvaným plazmovým reaktorem. Zde proběhne plazmová úprava za určitých podmínek (čas, teplota, s použitím dané chemikálie, konkrétního plynu a podobně).

Seznam polymerních práškových materiálů upravených plazmou je univerzální a zahrnuje PE (LDPE, HDPE), PP, PS, PA, PMMA, PTFE, PET, POM, ABS a silikon. PE a PP získaly největší pozornost díky jednoduchosti své struktury a jejich širokému rozšíření.[18]

Širokou oblastí využití plazmy jsou kompozity. Zde se upravené polymerní prášky používají pro kompozity s vláknovou výztuží (například uhlíková nebo sisalová vlákna). Dále jako prášek na výrobu PUR pěny pro výrobu sedadel v automobilovém průmyslu, nebo v potravinářském průmyslu pro výrobu termoboxů (lépe izolují).[18]

Výhody plazmové úpravy ve srovnání s jinými technologiemi:[18]

- Jedná se o rychlý proces (jen několik sekund až minut)
- Reprodukovatelné
- Snadné použití (kontrolovatelné, bez zpoždění)
- Nízké náklady
- Proces šetrný k životnímu prostředí (bez použití nebezpečných chemikálií)
- Úpravy povrchu beze změny struktury sypkého materiálu
- Velká variabilita aplikací
- Plazmová polymerace umožňuje vytváření povlaků

## 8. Výplně

Výplně, nebo v některých případech výztuže, jsou další fází kompozitů. Jedná se o nespojitou fázi kompozitů. Jsou to materiály, které zastávají převážně zpevňující, vytvrzovací či vyplňující funkci. Jako výztuže se používají různé materiály v různých tvarech. Vždy záleží především na požadovaných vlastnostech výsledného materiálu. Hlavní tvary používané pro výztuže v kompozitech jsou vlákna, tkaniny, kuličky, jehlice, disky a destičky. [19] [20]

Některé druhy výplní slouží jako výztuž a mají zpevňující vlastnosti. Základní rozdělení výztuží je podle tvaru, a to na částicové a vláknové.

### 8.1. Částicové výztuže

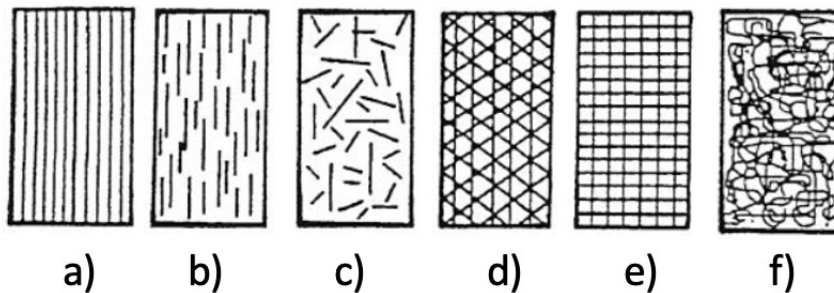
Jako většina výztuží i částicové se používají především za účelem zvýšení pevnosti. V dnešní době již existuje mnoho druhů výztuží. Rozdíly nejsou pouze v materiálech, ale především ve tvaru a velikosti částic. Materiál, tedy především jeho povrch rozhoduje o adhezi k matici, dále jsou důležité mechanické vlastnosti, které později částečně přejímá kompozit z těchto částic vytvořený. Velikost částic má tedy také výrazný vliv na výsledné vlastnosti zhotoveného materiálu. Nejčastější velikosti používaných částic se pohybují v rozmezí 1-10  $\mu\text{m}$ . Tvarově se nejčastěji používají anizometrické tvary (jehlice, disky a destičky), ty totiž vykazují nejlepší výsledky. [21]

### 8.2. Vlákenné výztuže

Vlákna jsou nespojitou fází v kompozitu. Dosahují násobně vyšší pevnosti, než jakou má materiál vlákna v původní podobě ve větších rozměrech. Čím více zmenšujeme průměr vlákna, tím více roste pevnost. Je to způsobeno přirozenými defekty, které u vláken s malými průřezy klesají. Další pozitivní účinek na pevnost vláken je ten, že defekty jsou většinou orientovány ve směru osy vlákna. Pevnost tedy závisí na délce daného vlákna.

Průmyslově se vlákna vyrábí především o kruhovém průřezu s průměrem 5-25  $\mu\text{m}$ . Menší průřezy sice není problém vyrobit, co se týká technologie, ale ze zdravotních důvodů se nepoužívají. Vlákna totiž u tak malých rozměrů pronikají do tkáně a plic, kde mohou způsobit zdravotní potíže. Dalším důvodem je, že takto vlákna o tak malém průměru nejdou často dobře prosytit maticí, výsledkem je špatná adheze mezi fázemi. [20] [21]

Důležité je rozložení vláken uvnitř matrice. Vláknové kompozity mají následující základní rozdělení podle orientace výztuže:[21]



Obrázek 7 a) Jednosměrně uspořádaná dlouhá vlákna, b) Jednosměrně uspořádaná krátká vlákna, c) nahodilá orientace krátkých vláken, d) Vícesměrné vyztužení, e) Dvousměrné uspořádání (tkaniny, rohože), f) Nahodilá orientace dlouhých vláken [21]

Nejčastěji používané vláknové výztuže:

#### **Anorganická vlákna:**

- Kovová
- Skleněná
- Uhlíková

#### **Organická syntetická vlákna:**

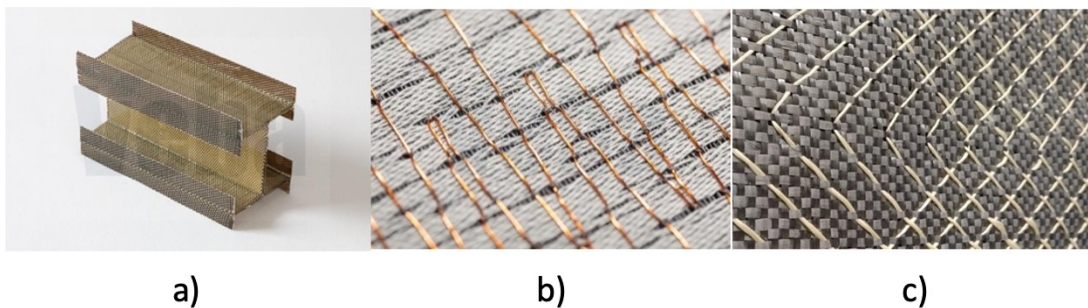
- Aramidová
- Polyamidová
- Jiná polymerní PP, PE

#### **Organická přírodní vlákna:**

- Vlna, hedvábí, celulóza, bavlna, sisal, juta atd.

## 9. Plošné výztuže

Jedná se o dlouhá až nekonečná vlákna, která jsou různými způsoby a technologiemi splétána do sebe, tím vznikají tkaniny, nebo rohože, které se následně používají pro výrobu kompozitů. Tyto tkaniny jsou často speciálně uzpůsobené pro konkrétní použití. Jsou například tvarované pro speciální použití (obr. 8a), vyplněné odstíněním pro elektrické využití, nebo jsou propleteny vodivými komponenty (obr. 8b). Dále jsou tkaniny zpevňovány v určitém směru, ve kterém bude následně díl namáhán (obr. 8c). [22]



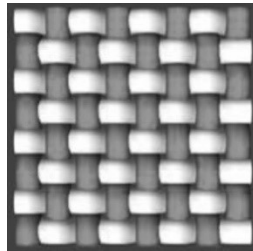
Obrázek 8 a) Tvarovaná výztuž, b) Výztuž s el. odstíněním, c) Zpevněná výztuž [22]

Všechny tyto tkaniny vždy vychází ze základních typů tkanin a do nich se později pomocí dalších technologií vplétají další materiály, nebo se základní tvar tkaniny ve formě desky upravuje do jiných tvarů a rozměrů. Veškeré tyto tkaniny se tkají na speciálních tkalcovských stavech.

Mezi základní tvary tkanin patří: [22]

### **Plátnová vazba**

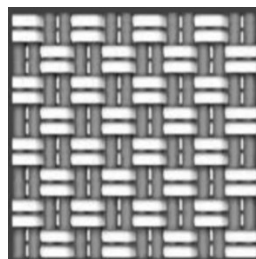
Plátnová vazba je nejzákladnější a nejjednodušší vazba. Tkanina je hustě provázaná, a tedy tuhá a díky tomu není vhodná pro tvarování. Používá se pouze ve formě desky, nebo lehce zahnutého „U“ profilu. Má velkou odolnost proti vniknutí cizího tělesa. V praktické části jsou obě použité tkaniny utkány do plátnové vazby.



*Obrázek 9 Plátnová vazba*

### **Vazba panama**

Tato vazba je odvozena od plátnové vazby. Jedná se o stejný styl tkání, ale vždy je použito více vláken vedle sebe. Tedy proplétají se 2 vlákna vedle sebe místo jednoho. Může být použito i více vláken, počet však musí být vždy sudý, aby se zachoval stejný poměr ve vazbě. Tento druh vazby je díky umožněnému pohybu mezi dvěma či více sousedními vlákny pružný, a tak se používá pro výplň různě tvarovaných forem.

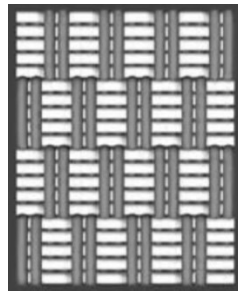


*Obrázek 10 Vazba panama*



## Rypsová vazba

I tato vazba a její technika pro výrobu je odvozená od základní plátnové vazby. Vzniká vždy ze základní plátnové vazby, pouze je zesílena v osnově či útku (horizontálně či vertikálně). Tedy poměr vláken je nesourodý pro osnovu a útek. Podle počtu vláken v daných směrech výsledná tkanina disponuje danou pružností, a tedy tvarovou přizpůsobivostí. Touto vazbou se dá snadno dosáhnout zesílení materiálu proti namáhání v konkrétním směru.

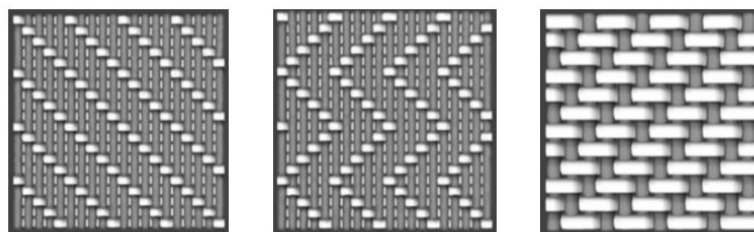


Obrázek 11 Rypsová vazba

## Keprová vazba

Existuje několik druhů keprové vazby. Principem této vazby je posunutí vazby vždy o jednu niť doleva, či doprava. Tím se rozlišuje označení levý/pravý kepr. Díky tomuto posunu se vytváří vzhledový efekt šikmých řádků, kde je vždy jeden (osnovní, útkový) širší než ten druhý. Podle toho je potom pojmenovaná vazba jako osnovní, nebo útková.

Mezi základní keprové vazby patří útkový kepr 3x3 pravý (obr. 12c), osnovní kepr 5x5 levý (obr. 12a), osnovní kepr 5x10 lomený (obr. 12b).



a)

b)

c)

Obrázek 12 a) Vazba kepr osnovní 5x5 levý, b) Vazba kepr osnovní 5x10 lomený  
c) Vazba kepr útkový 3x3 pravý

## 10. Výrobní technologie kompozitů

### 10.1. Beztlaké technologie:

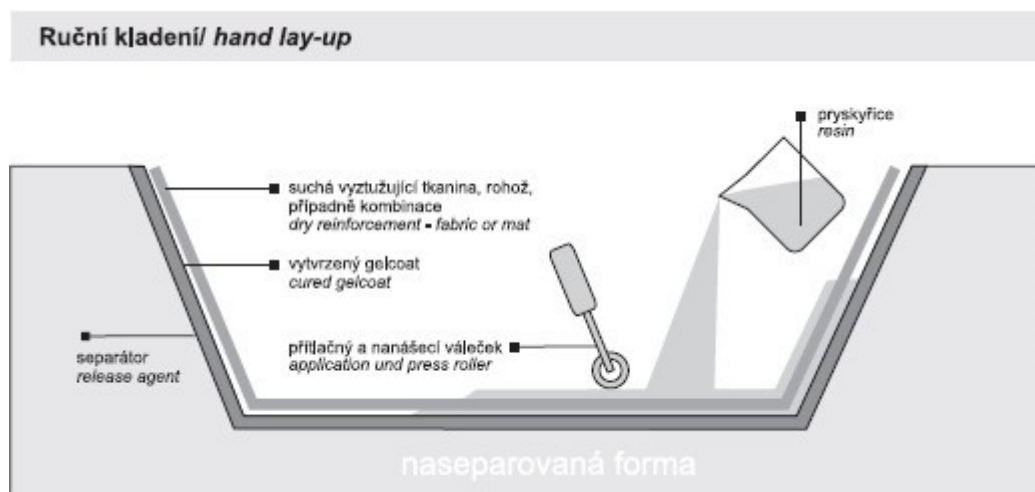
#### 10.1.1. Ruční kladení – hand lay-up

Jedná se o nejstarší technologii, při které je zapotřebí mít formu pro daný díl, který se vyrábí. Tato forma se většinou nastříká separačním povlakem a poté první ochrannou a estetickou vrstvou, které se říká gelcoat. Tato vrstva nejen chrání kompozit před okolním prostředím, ale také zajišťuje estetickou stránku výrobku. Následně se kladou jednotlivé vrstvy výztuže, které se prosycují pojivem pomocí válečku, nebo štětce.

Mezi tyto metody lze zařadit i stříkání. Jedná se o totožnou metodu, ale pryskyřice je nanášena pomocí pneumatické pistole. Následně se pomocí speciálního vytlačovacího válce přebytečná pryskyřice odstraní a z taveniny se tím vytlačí bublinky. [23]

**Materiály:** Jako výztuž se nejčastěji používají tkaniny a rohože především ze skleněných, uhlíkových, aramidových či jiných syntetických nebo přírodních vláken. Jako matrice se pak využívají především polyesterové nebo epoxidové pryskyřice. [23]

**Použití:** Často na výrobu prototypů, nebo malých sérií. Lze použít i pro tvarově složitější součásti. [23]



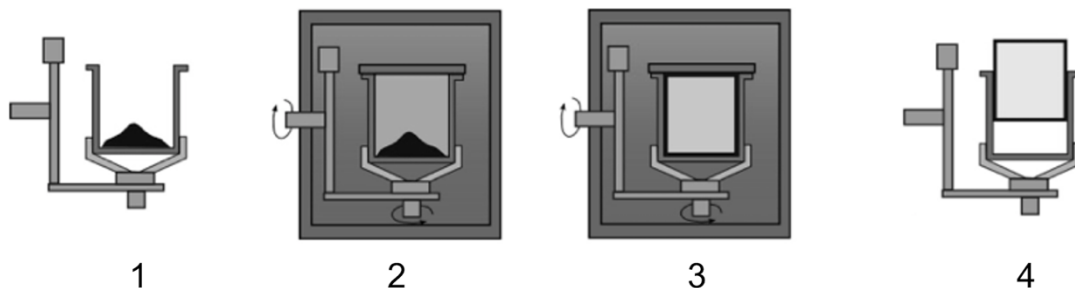
Obrázek 13 Schéma výroby ručním kladením [23]

### 10.1.2. Rotomolding

Rotomolding je beztlaková technologie, u které se materiál nasype do formy, která je vyhřívána. Po zahájení procesu forma rotuje kolem jedné osy a kolem druhé osy. Ta osa, která je kolmá k rotaci, se kýve. Případně je forma rotována pomocí dvou rotačních pohybů, které jsou na sebe také kolmé. Tím je zajištěno rovnoměrné natavování materiálu na stěny formy. Po rovnoměrném natavení veškerého materiálu začne forma chladnout. Na konci procesu se z formy vytahuje již ztuhlý hotový díl. [9]

**Materiály:** Omezené množství použitelných materiálů. Většinou PP, PE, PA. [9]

**Použití:** Především pro nádrže všech velikostí a typů. Ale také na odpadkové koše, plováky, hračky, houpačky, studny. [9]



Obrázek 14 Výrobní proces rotačního spékání [9]

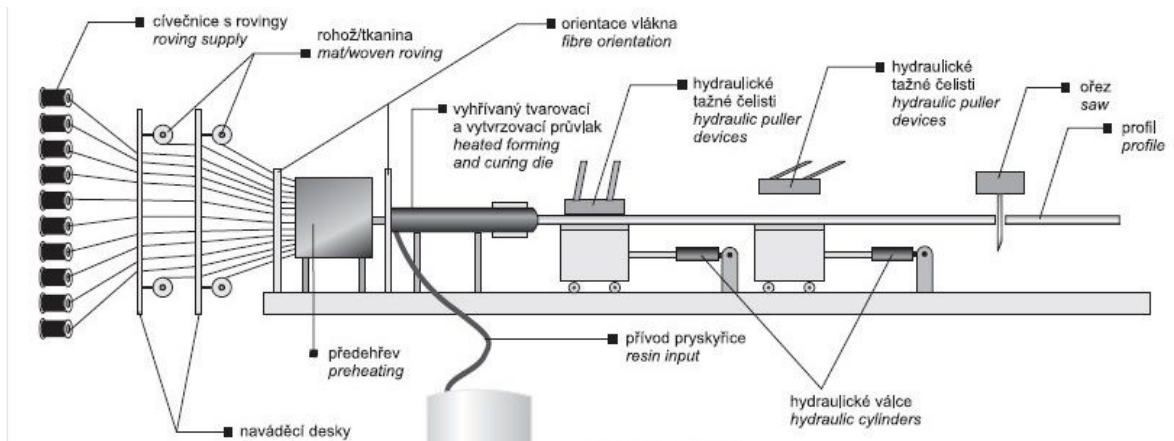
Proces na obrázku 14:

- 1) Plnění formy
- 2) Ohřev
- 3) Chlazení
- 4) Vyjmutí výrobku

### 10.1.3. Tažení – pultruze

Jedná se o metodu, s jejíž pomocí se kontinuálním způsobem vyrábí různé plné či duté, ale i tvarové profily, které mohou mít vysoký obsah plniva (až 80 %). Výztuž je protahována kádí s pryskyřicí a následně je takto prosycená výztuž protahovaná skrz formu, tzv. tvarovacími průvlaky. V těchto formách dochází k vytvrzení pojiva. Tažné čelisti posouvají materiál směrem ke střižným čelistem, kde je kompozit dělen na požadovanou délku.

Tato metoda je beztlaková, nutno však podotknout, že existují modifikace, kdy je pojivo prosycováno tlakově až po prvním tvarovacím průchodu skrz formu. [24]



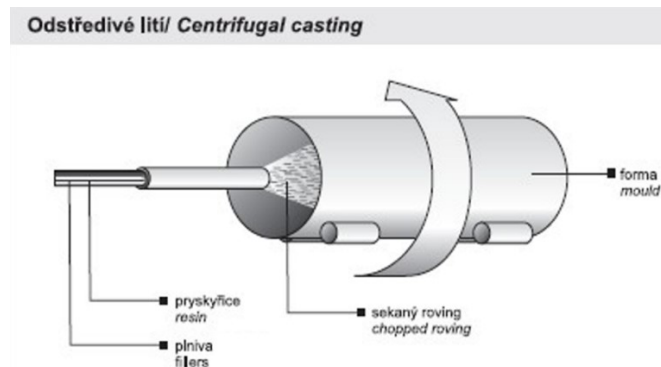
Obrázek 15 Schéma procesu tažení [24]

**Materiály:** Nejčastěji se používá skleněný roving, případně uhlíkové pramence, tkané stuhly a pásy z různých vláken. A jako pojiva se u této technologii používají nízkoviskozní polyesterové, vinylesterové nebo epoxidové pryskyřice. [24]

**Použití:** Touto metodou se vyrábí velká škála dílů. Od úzkých pásků na vyztužení hokejek (1 mm), až po silné a tvarově složité vlnité desky, tyče a trubky o síle stěny až 15 mm a šířce několik desítek cm. [24]

#### 10.1.4. Odstředivé lití – Centrifugal casting

Je způsob nástřiku, kdy se ve formě válcovitého tvaru pohybuje stříkací hlava v ose formy, která rovnoměrně nanáší směs. Celá forma rotuje, a tak se postupně nanášené vrstvy zhutňují pomocí odstředivé síly. Tento proces je znázorněn na obrázku 16. [25]



Obrázek 16 Schéma procesu odstředivé lití [25]

**Materiály:** Převážně sekaný skleněný roving s polyesterovou pryskyřicí. [25]

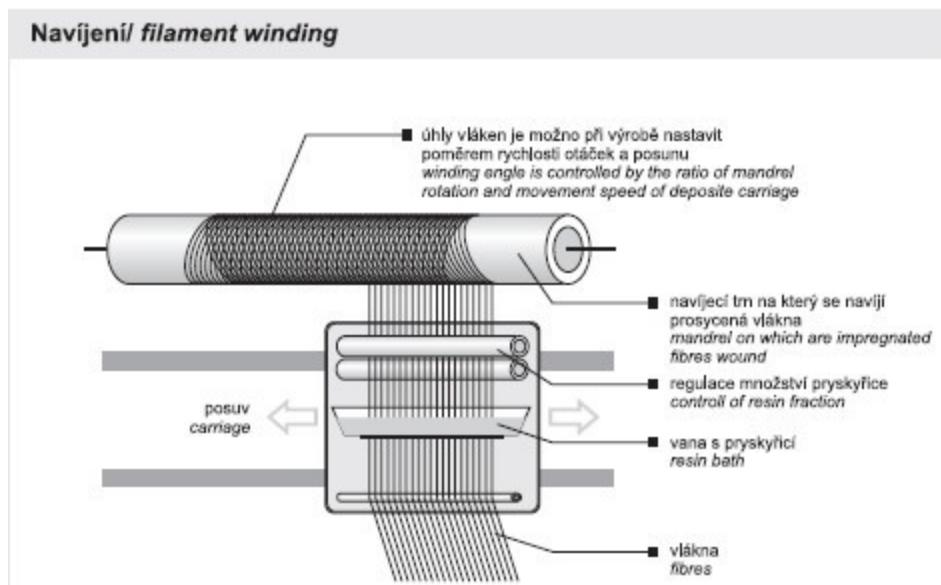
**Použití:** Tímto způsobem se zhotovují především silnostěnné trubky. Potrubí se touto metodou vyrábí od světlosti 250 do 1500 mm. [25]

### 10.1.5. Navíjení

Výztuž prosycená pojivem se navíjí na trn, který má tvar výsledného výrobku. Touto technologií se vyrábí především trubky průměrů 150–3000 mm a nádrže na vodu o obsahu až 100 m<sup>3</sup>. [26]

Vlákna jsou protahována vanou s pojivem a potom procházejí přes regulační válce, které odstraní přebytečné pojivo a prosycená vlákna jsou navíjena na trn, který plní roli formy.

Vlákna jsou neustále v předpětí, díky tomu je možné velice přesné kladení vláken na trn. Úhel, který je mezi jednotlivými vlákny ve vrstvách na sobě se nastavuje pomocí posunu ukládacího zařízení. [26]



Obrázek 17 Schéma procesu navíjení [26]

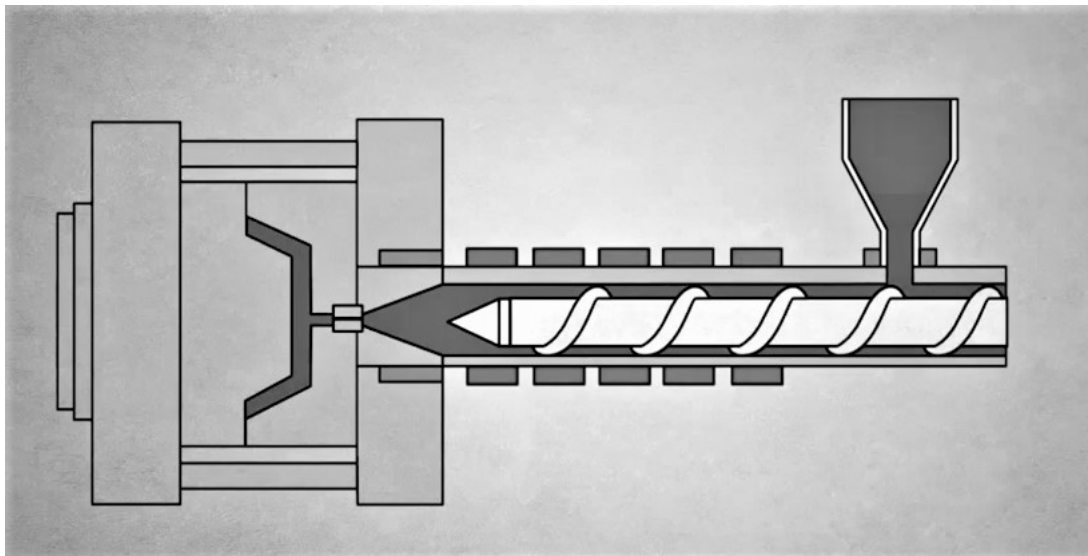
**Materiály:** Převážně se využívá skleněný roving, při výrobě materiálů pro náročné aplikace se využívají uhlíkové a aramidové pramence. Jako pojivo se využívají polyesterové pryskyřice, vinylestery a epoxidy. [26]

**Použití:** Tímto způsobem se vyrábí trubky a nádrže. A to od malých průměrů řádově 100 mm až po 3000 mm. Nádrže pak přibližně od 1 do 100 m<sup>3</sup>. [26]

## 10.2. Tlakové technologie

### 10.2.1. Vstřikování

Vstřikovací proces probíhá nepřetržitě, tedy je zcela zautomatizován. Materiál je dosypáván do zásobníku neboli plastikační komory, kde je rozehríván a odtud je pomocí šneku, nebo pístu vstříknut pod velkým tlakem a rychlostí do většinou kovové formy. Zde je materiál ochlazen a následně vyjmut z formy. K jednomu lisu je vždy použita vícenásobná forma pro větší sériovost výroby. [9]



Obrázek 18 Schéma procesu vstřikování [9]

**Materiály:** Termoplasty, termoplastické elastomery s příměsí velké škály částicových, nebo vyztužujících plniv. Případně lze použít i nanoplniva. [9]

**Použití:** Nejširší škála použití v průmyslu. Od malých technických komponentů o hmotnosti jednotek gramů až po nádoby, či autodíly o hmotnosti několika kilogramů. [9]

### 10.2.2. Lisování

Jedná se o proces, při kterém se využívá především tlaku mezi dvěma čelistmi. Součástí těchto čelistí je forma, do které se vkládá materiálová směs. [27]

- *Za studena*

Lisování za studena je jeden z nejjednodušších způsobů pro výrobu kompozitních materiálů. Jelikož se formy nevyhřívají, tak mohou být vyrobeny z levných materiálů, jako je laminát, plech či dřevo. Proto je tento způsob navíc finančně nenákladný.

Tlak je zajištěn pomocí jednoduchého hydraulického lisu, nebo pomocí šroubových svěrek. Z těchto důvodů se tato technologie hodí spíše pro menší série. Tlak vyvozený při lisování za studena je 30 – 90 kPa. [27]

**Materiály:** Nejčastěji se používají vláknové tkaniny a polyesterové, či epoxidové pryskyřice. [27]

- *Za tepla a tlaku*

Jak napovídá název, tak tato technologie probíhá za zvýšených teplot a tlaků. Využívá se především hydraulických lisů, které vyvíjí tlak 0,1-29 MPa. Dále je důležitá vyhřívaná forma. Většinou jsou formy vyhřívané pomocí elektrického odporu, nebo topným médiem. [27]

**Materiály:** Zde se využívají lisovací rohože SMC (sheet moulding compounds - směsi pro lisování plechů), lisovací směsi, nebo těsta. Nejčastěji se používají sekaná vlákna a polyesterové nebo vinylesterové pryskyřice, polyetylen, polypropylen. [27]

- *Pomocí vakua*

Jedná se téměř o ruční kladení, ale přebytečné pojivo je z formy odstraněno pomocí podtlaku, který vyvolá vakuum (0,3-0,9 MPa). Další využití, kdy se volí použití vakua je vhodné, pokud je zapotřebí zlepšit mechanické vlastnosti nebo zakomponovat do kompozitu pěny a voštiny. [27]

**Materiály** se zde dají využít stejné jako u ručního kladení. [27]

- *V autoklávu*

Tato metoda je nejnáročnější a nejnákladnější způsob lisování. Jde o velice složitou technologii, u které se výhradně používají prepregy. Nejprve se uvnitř formy, v tomto případě vyhřívaný autokláv, vytvoří podtlak okolo 0,8 MPa a následně se autokláv natlakuje na 8 MPa. Obsah výztuže může být až 60 %. [27]

Prepregy se kladou ručně. Pouze u větších sérií pro letecký a kosmický průmysl, kde je nutná přesnost se prepregy kladou pomocí automatizační počítačem řízené techniky. [27]

### *10.2.3. Extrudování*

Extruze neboli vytlačování, je proces kdy se počáteční materiál, který je většinou ve formě granulátu, vytlačuje za určité teploty a tlaku do finální podoby. Vytlačování probíhá kontinuálně, takže na konci procesu je již zpracovaný materiál chlazen a následně dělen na požadovanou délku. [28]

Výrobní proces je jednoduchý. Do násypky/zásobníku se nasype granulát či jiný tvar počátečního materiálu. Ten je za pomoci gravitace přiváděn do šnekové vyhřívané hřídele, která materiál postupně natavuje a posouvá k trysce, kde je materiál vytlačován ven ze stroje. [28]

**Použití:** Typickým příkladem extruze je dnes výroba filamentů (strun) pro 3D tisk, do kterých se přidávají různá plniva ať již na vizuální efekt, nebo mají zpevňující funkci. [28]

**Materiály:** Termoplastické materiály (převážně pak PE, PP, PETG, ABS, PLA, ASA). A dále kovy, keramika, EPDM guma. [28]

### *10.2.4. Vakuové tvarování*

Jedná se o výrobní proces, kdy je kompozitní směs vložena do formy (většinou ve tvaru desky) ve které se rozehřeje do plastického stavu. Poté je vakuově vytvarován do tvaru formy a ochlazen. Z principu vlastností termoplastů po vyjmutí z formy drží tvar. Formy nejsou namáhané na velké tlaky jako na příklad u vstřikování, takže jsou vyráběny především z hliníku nebo duralu. [29]

**Materiály:** Termoplasty, a především skleněná vlákna. [29]



## 11. Analýza současného trhu

V této analýze jsou shrnuty základní výrobci kompozitů. Konkrétně se jedná pouze o materiály, které byli následně používány v praktické části. Jedná se tedy o kompozity s polymerní matricí s příměsí karbonových vláken, kevlarové tkaniny či čedičové tkaniny.

V práci je uveden pouze stručný přehled výrobců. Kompletní rešerše je příloze 1, kde jsou uvedeny i všechny zdroje a citace. Jsou v ní shrnuty převážně mechanické vlastnosti těchto materiálů.

*Tabulka 4 Shrnutí současných výrobců a dostupných kompozitních materiálů na trhu*

Výrobce, sídlo	Produktové portfolio	Kompozitní materiály a využitá vlákna	Konkrétní produkty
<p><b>PlastiComp</b></p> <p>Minnesota, USA</p>	<p>Specializované polymerní materiály, termoplastické kompozitní materiály, specializované služby a řešení na míru</p>	<p>termoplastické kompozity vyztužené dlouhými karbonovými vlákny a tzv. hybridní kompozity vyztužené dlouhými karbonovými a skleněnými vlákny</p>	<p><b>Řada Complet® s dlouhými vlákny:</b></p> <p>Long Glass PA66</p> <p>Long Glass + Carbon PA66</p> <p>Long Carbon PA66</p> <p>PP 50% LCF</p> <p>PP 50% LGF</p> <p>TPU 50% LGF</p> <p>PA6 50% LGF</p> <p>PA66 50% LGF</p> <p>TPU 50% LCF</p> <p>PA6 50% LCF</p> <p>PA66 50% LCF</p>

Výrobce, sídlo	Produktové portfolio	Kompozitní materiály a využitá vlákna	Konkrétní produkty
<p><b>Avient Corporation</b></p> <p>Ohio, USA</p>	<p>udržitelné a recyklovatelné materiály, kompozity, technologie užívající vlákna, polymerní formulace, inkousty, polymerní aditiva, polymerní barviva, termoplastické elastomery a vinylové formulace</p>	<p>termoplasty s dlouhými vlákny a s krátkými vlákny</p> <p><b>využitá vlákna:</b></p> <p>skleněná a karbonová vlákna</p>	<p><b>Comple<sup>TM</sup> LCF</b>, který využívá příměs čistě karbonu</p> <p><b>Comple<sup>TM</sup> Hybrid</b>, jež kombinuje karbonová a skleněná vlákna</p> <p><b>Edgetek<sup>TM</sup></b> je kombinací amorfních a semi-krystalických pryskyřic a karbonová vlákna</p>
<p><b>Ensigner</b></p> <p>Nufringen, Německo</p>	<p>hluboký záběr v oblasti plastových řešení od vstřikování, přes přídavné obrábění, výrobu slitin, sinterovaných plastů či izolačních profilů, až po kompozity</p>	<p>Termoplastické kompozitní materiály zahrnující semipregy, prepregy, organosheety</p> <p><b>využitá vlákna:</b></p> <p>skleněná a karbonová vlákna</p>	<p><b>Prepregy:</b> TECATEC PEEK MT CF50 IP, TECATEC PEEK CF50 IP, TECATEC PC CF50 IP, TECATEC PPS GF50 IP a TECATEC PA66 GF43 IP</p> <p><b>Organosheety:</b> TECATEC PEEK MT CF50 OS, TECATEC PEEK CF50 OS, TECATEC PC CF50 OS, TECATEC PPS GF50 OS TECATEC PA66 GF43OS</p>
<p><b>Evonik</b></p> <p>Essen, Německo</p>	<p>aditiva, produkty pro výživu a péči o lidi a zvířata, tzv. chytré materiály, materiály pro výkon („performance materials“) a také technologie a infrastruktura chemické výroby</p>	<p>matricové systémy, termoplastické UD pásy, strukturální pěny, potahy a gelové nátěry a v neposlední řadě aditiva</p> <p><b>využitá vlákna:</b></p> <p>skleněná, karbonová a aramidová vlákna</p>	<p>polyetheretherketon <b>VESTAKEEP®</b>, který je vhodný jako matrice se skleněnými, uhlíkovými nebo aramidovými vlákny</p> <p>polyamid <b>VESTAMID® PA12</b>, se kterým je možné pracovat při nižších teplotách</p>

Výrobce, sídlo	Produktové portfolio	Kompozitní materiály a využitá vlákna	Konkrétní produkty
<p><b>Covestro</b></p> <p>Leverkuse, Německo</p>	<p>materiály pro 3D tisk, adhesiva, povlakové materiály, kompozity, elastomery, fólie, pěny, plasty a termoplastický polyuretan</p>	<p>termosety na bázi PU, technologie na dimenzování vláken a termoplastické kompozity</p> <p><b>využitá vlákna:</b> skleněná a karbonová vlákna</p>	<p>Termoplastické kompozity <b>Maezio®</b>, které Covestro vyrábí, jsou primárně vytvořené výkon a možnost škálování, lze je velice efektivně zpracovat při krátkých dobách jednotlivých výrobních cyklů</p>
<p><b>Mitsui Chemicals</b></p> <p>Minato, Japonsko</p>	<p>produkty pro automobilové a dopravní odvětví, zdravotní péče, jídlo a balení jídla a vývoj materiálů</p>	<p>kompozity s termoplastickou matricí a karbonem primárně vyvinuty pro automobilový průmysl</p> <p><b>využitá vlákna:</b> karbonová vlákna</p>	<p><b>TAFNEX™ CF / PP</b> je jednosměrná páska (UD páska) složená z uhlíkových vláken a polypropylenu (PP)</p> <p><b>TAFNEX™ CF/PP</b> sendvičový panel z pěnového PP je materiál vyrobený sendvičováním pěnových polypropylenových desek v UD páskách</p> <p><b>TAFNEX™ CF / PP - UD</b> navíjecí trubice má stejné vlastnosti a výhody jako TAFNEX™ CF/PP, je ale rozdílný tím, že může být zpracován do tvaru trubice navíjením vlákna</p>

# PRAKTICKÁ ČÁST

## 1. Úvod

Praktická část diplomové práce se zabývá kompozity s termoplastickou matricí, konkrétně polyetylenem s různými druhy výztuže. Cílem praktické části bylo naleznout způsob přípravy kompozitních materiálů na bázi termoplastické matrice z PE, pomocí lisování. Jako výztuže byla použita recyklovaná karbonová vlákna, kevlarová a čedičová tkanina. Dále byl pozorován rozdíl mezi matricí základní a s plazmovou úpravou. Celý proces byl vytvářen tlakovou technologií pomocí hydraulického lisu s vyhřívanými měděnými čelistmi, do kterých se vkládala měděná forma. Následně byly všechny druhy vzorků podrobeny zkoušce tříbodového ohybu pro zjištění modulu pružnosti, pevnosti v tahu, vrubové houževnatosti a struktura byla zkoumána pomocí mikroskopu.

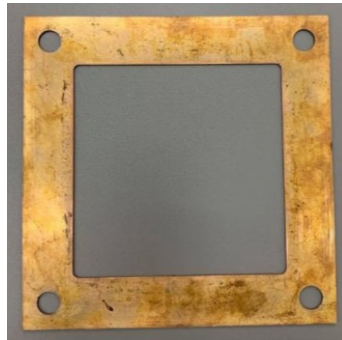
## 2. Výroba formy

Forma je vyrobena z více částí. Jelikož jsou vyhřívané přítlačné desky lisu, a ne samotná forma, která dává výsledný tvar materiálu, bylo zapotřebí vybrat materiál s dobrou tepelnou vodivostí. Tento materiál zaručí dobré prohřívání formy od vyhřívaných desek, které na formu dosedají z obou stran. Další věc, kterou bylo třeba zvážit, byl tlak, který byl vyvíjen při výrobě vzorků. Na první vzorky byla vymodelována skořepina, tedy forma na formu v 3D programu a vytisknuta na 3D tiskárně Creality ender 3 pomocí materiálu PLA(kyselina polymléčná). Následně se forma odlila do 3D tištěného modelu na formu, pomocí silikonu Essil 291 resin a vytvrzovadla Esil 292 catalyst.

Tento materiál není na opakované zatížení tlakem 2,5 tun na 0,02m<sup>2</sup> (plocha formy) dostatečně pevný. Jedná se o tlak 1,25 MPa. A tak kvůli opakovatelnosti a vidině budoucího výzkumu s větším tlakem byla zvolena měď jako materiál pro výrobu formy. Tato forma se skládá z více částí, všechny jsou vyrobeny z mědi.

Jako první byly vyrobeny boční stěny formy, ty jsou ve dvou výškách a to 4 a 2 mm.

Dvě výšky jsou vyrobeny pro předlisování vzorku. Tvar formy je na obrázku 19.



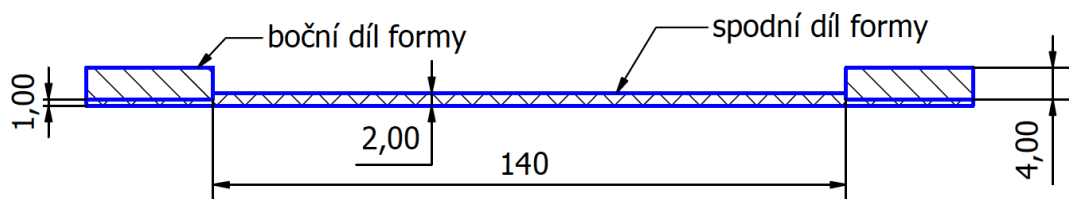
*Obrázek 19 Boční stěna formy*

Jako podložka neboli spodní část formy se používal nerezový plech o tloušťce 0,5 mm. Při vyšším tlaku, nebo později po více opakováních došlo ke zkroucení plechu a následnému vytékání materiálu mezi formou a spodním plechem. Z toho důvodu jsem navrhl spodní část formy s výstupkem pro utěsnění formy. Kompletní forma je na obrázku.



Obrázek 20 Spodní část formy

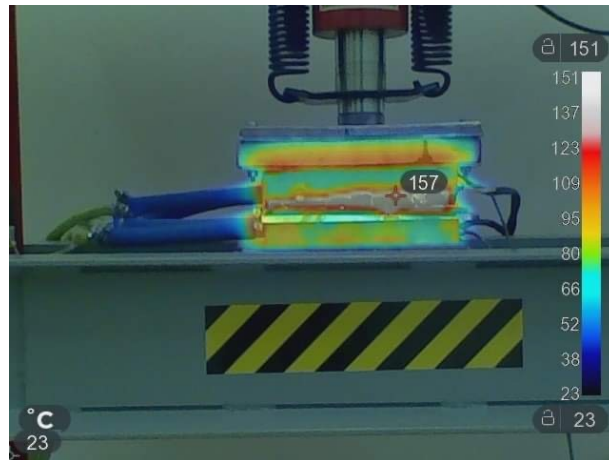
V praktické části bylo využíváno spodního dílu a okraje o výšce 4 mm. Tím pádem měl výsledný vzorek výšku 3 mm. Detail takto sestavené formy v řezu je na obrázku 21.



Obrázek 21 Řez sestavenou formou

Výkresy pro výrobu formy jsou vloženy jako příloha 2 a 3.

Pomocí termokamery Seek therma shot byla zkoumána teplota všech částí forem. Hlavním důvodem byla otázka, zda je forma prohřátá ve všech bodech na požadovanou teplotu.



*Obrázek 22 Snímek z termokamery – pozorování teploty formy*

Výrobní proces probíhal při nahřátí formy na 160°C. Po dosažení nahřátí ve všech viditelných bodech byl proces spuštěn. Úplné prohřátí formy nastává po 5-7 minutách od dosažení nastavené teploty na řídicích jednotkách.



### 3. Materiály používané pro praktickou část

#### 3.1. Polyetylen Dowlex 2629.10UE

Nízkohustotní polyetylen ve formě prášku. Materiál je plně teplotně i UV stabilizován.

Základní údaje udávané výrobcem:

Hustota materiálu:  $0,935 \text{ g.cm}^{-3}$ . Index toku taveniny (MFR) 4,0 g/10min. Pevnost v tahu 17,5 MPa. Teplota tání  $124 \text{ }^\circ\text{C}$ . Elastický modul v ohybu 0,645 GPa. Veškeré informace o materiálu jsou uvedeny v datasheetu, který je přiložen jako příloha 4.

#### 3.2. Polyethylen plazmovaný 2629.10UE

Polyetylen douwlex 2629.10 byl podroben plazmové úpravě v zařízení LA 400 od firmy SurfaceTreat. Jedná se o zařízení generující plazmu pomocí mikrovlnného zdroje ve vakuu. Proces plazmování trval 120 sekund a průtok kyslíku byl nastaven na hodnotu 100 sccm.

#### 3.3. RPX 1001 NATUR LD/70/600 $\mu$ (RPX)

Nízkohustotní polyetylen ve formě prášku. Materiál určený pro výrobu, kde se požadují dobré tokové vlastnosti. Základní údaje udávané výrobcem:

Hustota materiálu  $0,919 \text{ g.cm}^{-3}$ . Indexu toku taveniny (MFR) 70 g/10 min. Teplota tání  $104 \text{ }^\circ\text{C}$ . Veškeré informace o materiálu jsou uvedeny v datasheetu, který je přiložen jako příloha 5.

#### 3.4. Uhlíková vlákna

Vlákna recyklovaná sekaná.

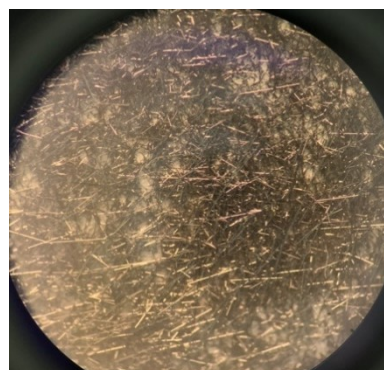
Hlavní výhody vláken udávaná výrobcem:

- Vysoká pružnost a pevnost
- Vysoká odolnost proti nárazu
- Nízká hustota
- Elektrická vodivost
- Korozní a tepelná odolnost
- Odolnost proti otěru

Základní parametry těchto vláken jsou shrnuty v tabulce 5. [datasheet výrobce]

Tabulka 5 Základní parametry uhlíkových vláken použitých pro výrobu vzorků

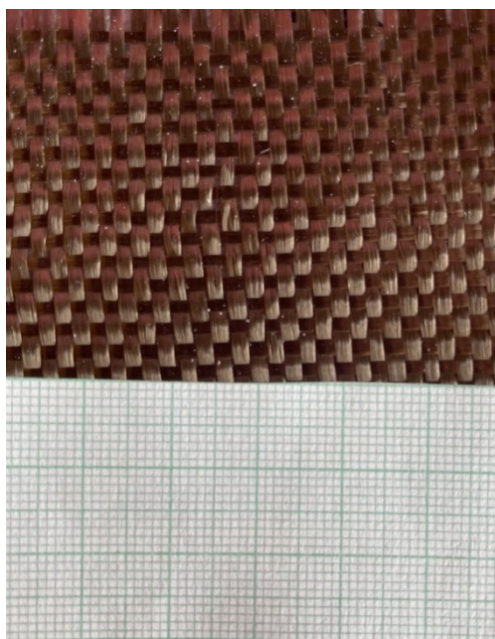
Vlastnosti	Parametry
Délka	120-250 $\mu\text{m}$
Průměr	7 $\mu\text{m}$ ( $\pm 1 \mu\text{m}$ max)
Obsah vláken	>95%
Vlhkost	max 0,5%
Hustota	1,8 g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	>3500 MPa
Modul pružnosti	>230 GPa
Prodloužení	1,50%
Objemová hustota	250-550 g/l



Obrázek 23 Snímek uhlíkových vláken použitých pro výrobu vzorků

### 3.5. Čedičová tkanina

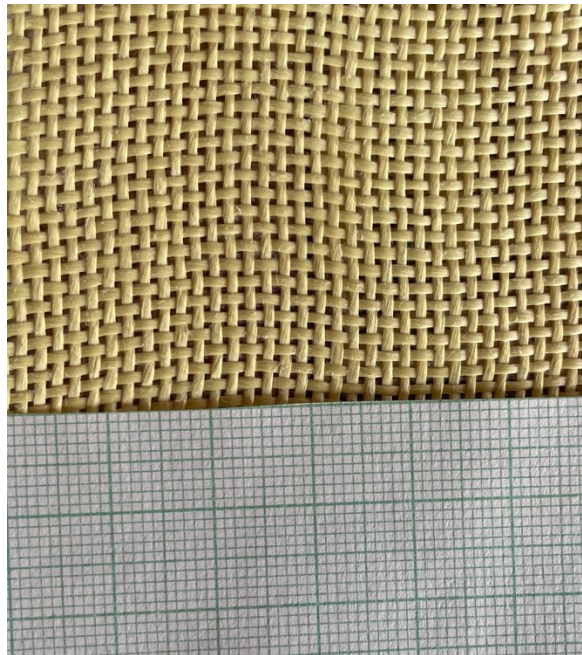
Jak již bylo zmíněno, pro praktickou část byla použita čedičová tkanina splétaná plátňovou vazbou. Na obrázku 24 je vidět velikost této tkaniny.



Obrázek 24 Čedičová tkanina použita pro výrobu vzorků

### 3.6. Kevlarová tkanina

I použitá kevlarová tkanina má vazbu plátňovou. Na obrázku 25 je zobrazena její velikost.



*Obrázek 25 Kevlarová tkanina použita pro výrobu vzorků*

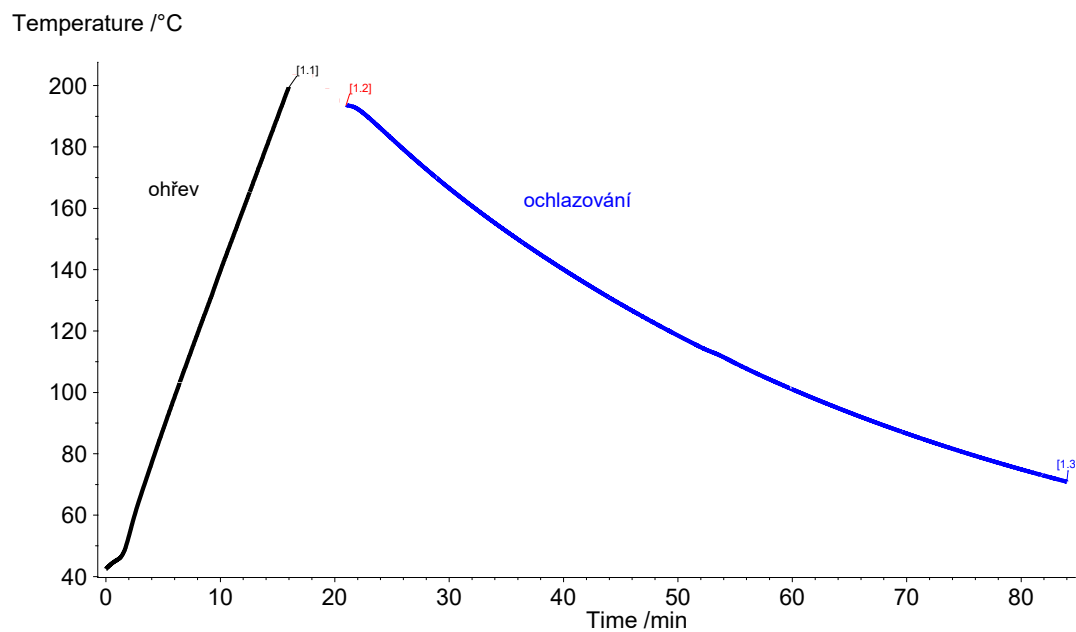
## 4. Příprava vzorků na lisování

Všechny vzorky byly vyrobeny z PE matrice. A to buď v základním stavu, nebo s plazmovou úpravou. Konkrétně z polyetylenu Douwlex 2629.10UE.

Jako výztuž byla použita převážně uhlíková recyklovaná vlákna o rozměrech od 120 do 250  $\mu\text{m}$  a průměru 7  $\mu\text{m}$  ( $\pm 1\mu\text{m}$ ), (hodnoty z datasheetu materiálu). Dále pak čedičová a kevlarová tkanina s plátňovou vazbou.

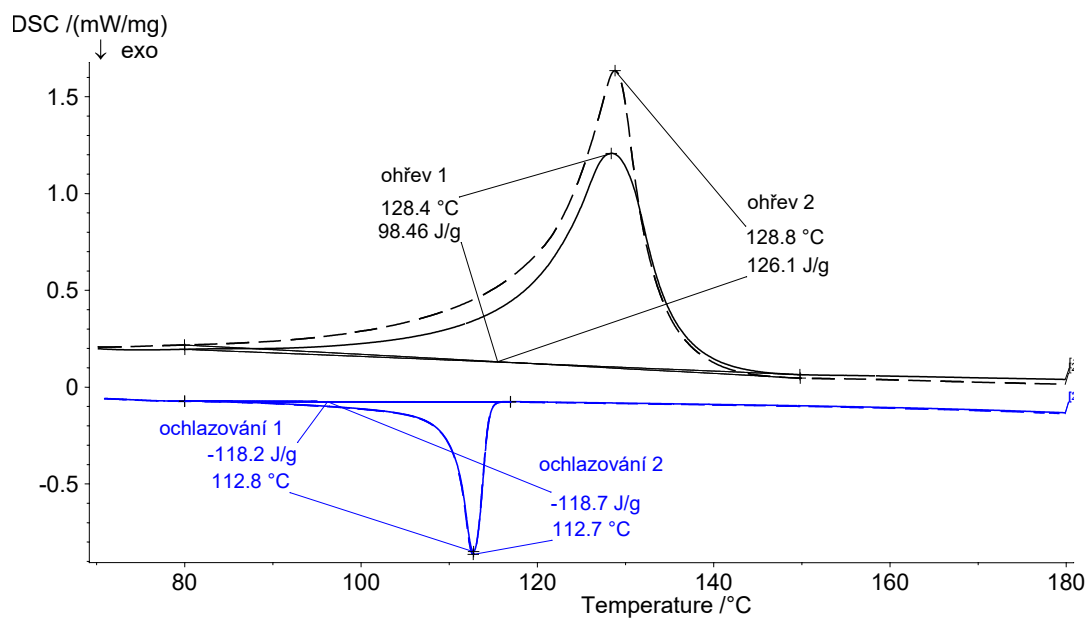
Polyetylen, který byl použit pro výrobu kompozitů byl analyzován pomocí DSC (diferenčně skenovací kalorimetrie) metody. Všechny ohřevy byly realizovány na teplotu 180°C.

Důležitá je pro úplnost vyhodnocení křivka ohřevu a chlazení na obrázku 26. Podle této křivky probíhala všechna měření.



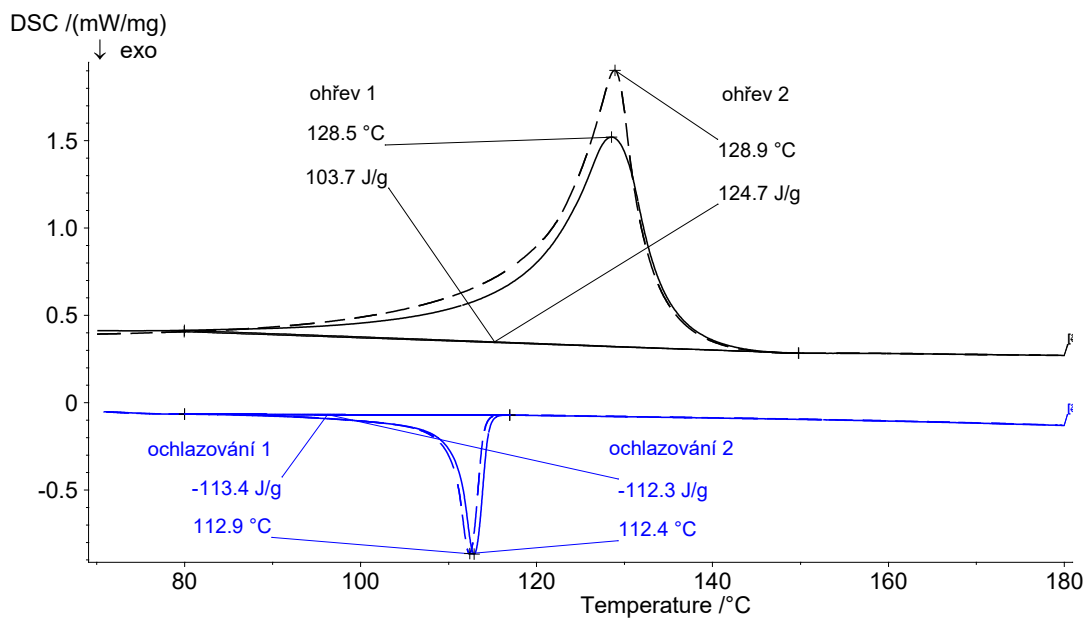
Obrázek 26 Křivka ohřevu a chlazení

Jako první je porovnán průběh prvního a druhého ohřevu PE s plazmovou úpravou. Toto porovnání je důležité z hlediska výroby našich kompozitů proto, že byl materiál lisován na dvakrát a tedy byl dvakrát zahříván. Jak je vidět na obrázku 27, tak se průběh těchto ohřevů významně nemění, jediná hodnota s výraznější odchylkou je energie spotřebovaná na druhý ohřev, lze tedy předpokládat, že na druhou část zpracování je potřeba delší čas lisování. U výroby byl tento fakt zohledněn.



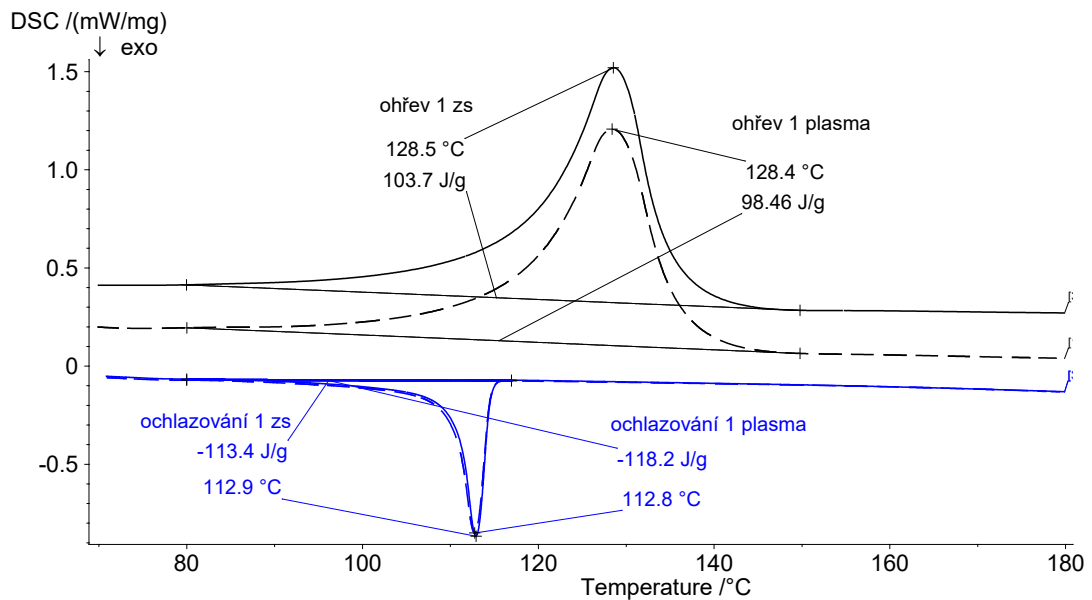
Obrázek 27 DSC materiálu PEp – ohřev 1 a 2

U PE v základním stavu, tedy bez plazmové úpravy je průběh dvou ohřevů také stejný a rozdíl je opět v energii potřebné na druhý ohřev. I v tomto případě byl v praktické části pro vzorky s PE v základním stavu tento fakt vyvážen delším časem lisování. Nutno však přihlídnout i k tomu, že v praktické části jsme používali jinou rychlost ohřevu i ochlazování, tedy křivka ohřevu i ochlazování nebyla shodná s křivkou na obrázku 28.

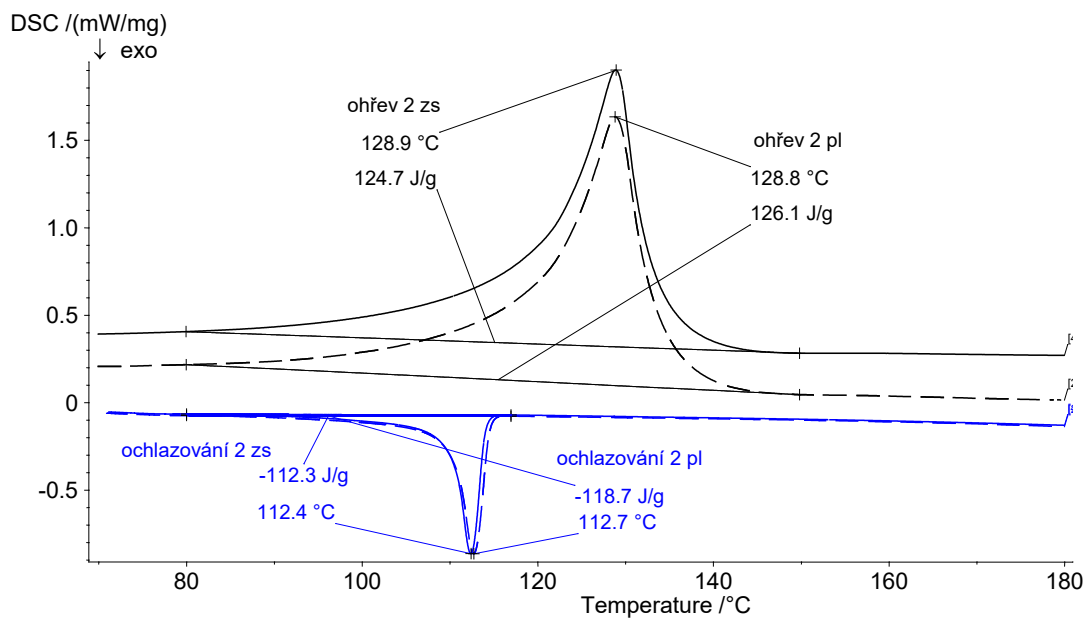


Obrázek 28 DSC materiálů PE – ohřev 1 a 2

Na obrázcích 29 a 30 jsou k porovnání první ohřevy pro PE s plazmovou úpravou a PE v základním stavu. To samé potom pro druhé ohřevy. Dle předpokladů by neměla mít plazmová úprava vliv na vlastnosti samotného materiálu a to se potvrdilo těmito srovnáními, kde je rozdíl mezi jednotlivými materiály zanedbatelný.



Obrázek 29 Porovnání prvních ohřevů PE<sub>p</sub> a PE



Obrázek 30 Porovnání druhých ohřevů PE<sub>p</sub> a PE

## 5. Příprava vzorků

### Separace vláken:

Hned v první etapě procesu nastal největší problém celé práce. Recyklovaná uhlíková vlákna dodávaná firmou MSV Studénka vytvářela shluky a tak musela být rozseparována. Bylo zkoušeno oddělit vlákna rotačním pohybem pomocí míchadla vytisknutého na 3D tiskárně Creality Ender 3. Tato metoda byla ovšem extrémně neúčinná a vlákna zůstávala téměř beze změny shluknutá v sobě.

Jako další metoda separace vláken byl zvolen vibrační pohyb, kdy se vlákna vložila a uzavřela do nádoby, kterou byl prováděn pohyb pouze ve svisle ose. Ani po tomto procesu se vzhled shluků vláken výrazně nezměnil.

Jako další byl zkoušen pohyb v jedné ose, kdy se vlákna třela mezi dvěma zdrsněnými plochami. V tomto případě se vlákna částečně rozseparovala, ale při dalších pohybech se opět shlukovala do válcových tvarů.

Jelikož všechny tyto základní metody nepřinesly žádný výsledek a nikde, v dosavadních výzkumech, se nám nepodařilo najít řešení této problematiky, přistoupilo se k složitějším postupům, u kterých se očekával lepší výsledek.

V prvním pokusu se vlákna vložila do nádoby s izopropylalkoholem a následně se umístila do ultrazvukové čističky Neyson na 20 minut. Vlákna byla velice dobře rozseparovaná a tak byla umístěna na filtrační papír, kde se nechala vyschnout. Při vysychání se vlákna opět začala částečně spojovat. Při přidání PE prášku a následném míchání obou fází, se opět vlákna shlukovala k sobě.

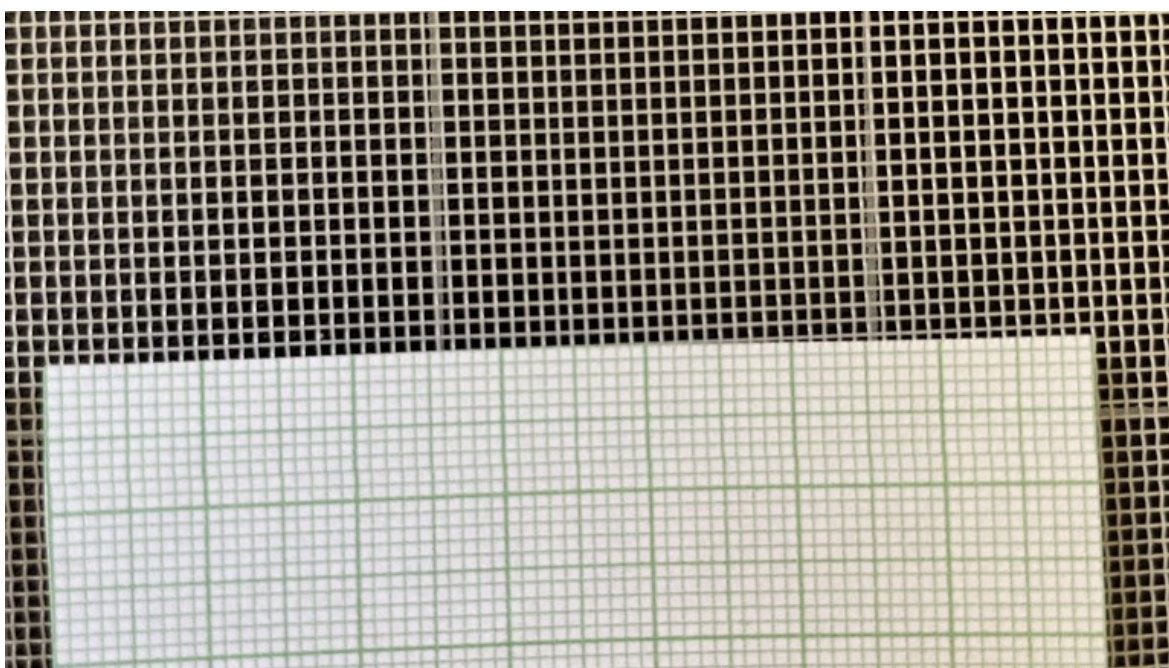
Všechny nezdařené pokusy naznačovaly, že jsou vlákna nabitá statickou elektřinou, a proto se při vzájemném střetnutí opět shlukují. Proto jsem vlákna zkoušel „vybít“. Bohužel i tento proces proběhl bez zdařilého výsledku.

Začala se tedy aplikovat a postupně vyvíjet metoda suspenze. První krok byl stejný, tedy rozseparovat vlákna pomocí namočení do izopropylalkoholu, vložení těchto skleněných uzavřených nádob do ultrazvuku (na 20 minut). Následně se rozseparovaná vlákna vyjmula a do nádoby se přidala požadovaná hmotnost PE prášku. Tato směs se vložila do ultrazvuku typicky na 20 minut a poté se opět nechala vyschnout. Objevil se zde ale úplně stejný problém jako při vysychání samotných vláken. A tedy že se vlákna při vysychání a následném míchání směsi začala shlukovat.



Muselo se tedy docílit rovnoměrného rozmíchání již v procesu suspenze před vysycháním. Do procesu se tedy přidaly další dva kroky, a to konkrétně míchání samostatných vláken po prvním projití ultrazvukem a potom v druhém kroku stejné míchání směsi po vyjmutí z ultrazvuku.

Tato metoda se nakonec ukázala jako nejvíce zdařilá, a začala se využívat. Při tahové zkoušce se v první sérii vzorků objevily skryté shluky neprosycených vláken a tak se musel přidat poslední krok do procesu a to přesítování směsi pomocí velice jemného síta. Toto síto je vyobrazeno na obrázku 31. Díky milimetrovému papíru vloženému na síto je vidět zrnitost síta.



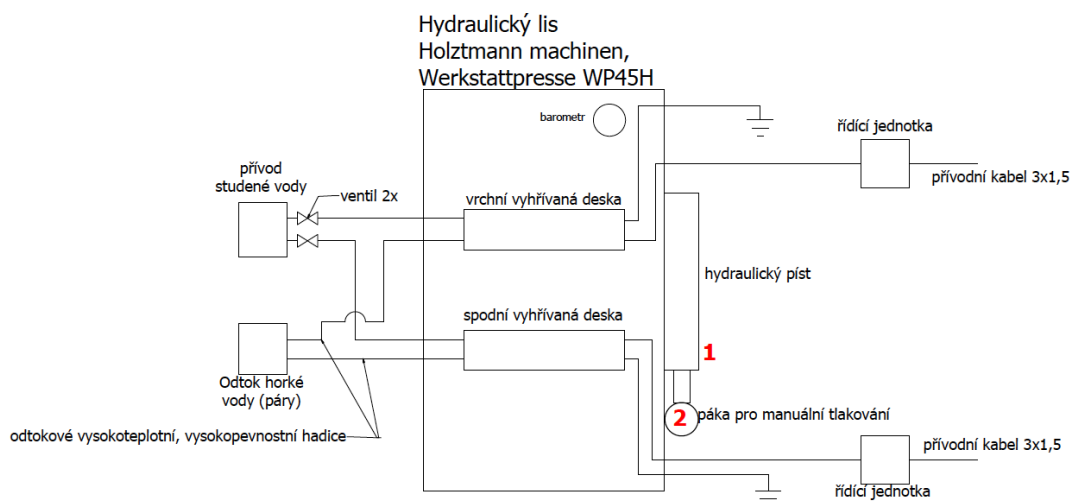
*Obrázek 31 Síto používané u procesu separace vláken*

Tímto krokem byl proces dostatečně zdokonalen. Sice se stále při pozorování mikroskopem objevovaly miniaturní neprosycené shluky vláken, ale to bylo následně vyřešeno výrobním procesem.

## 6. Lisování

Jako proces pro zhotovení vzorků byl zvolen proces lisování.

Veškerý postup byl proveden na lisu HOLZMANN WP45H - jedná se o hydraulický lis, který byl upraven pro práci s vyhřívanými deskami na lisování termoplastů. Čelisti jsou nahrazeny deskami, které jsou elektricky vyhřívané a vodou chlazené. Celý systém je znázorněn na obrázku 32.



Obrázek 32 Schéma lisu Holtzmann WP45H

Jelikož tato práce slouží jako základ pro budoucí práci v této problematice, byl sepsán pracovní postup, který jsme vyladili při zhotovení praktické části na této diplomové práci. Optimalizovaný pracovní postup byl sepsán a je součástí vytvořeného návodu na obsluhu lisu.

## 7. Návod k obsluze hydraulického lisu

Hydraulický lis Holzmann-maschine, Werkstattpresse WP 45H

- 1) Nejprve zajistěte odstranění všech překážek z okolí lisu. Je potřeba zajistit bezpečné pracoviště okolo lisu a volný průchod k přívodu chladicí kapaliny a k vyústění hadic do odpadu.
- 2) Odstraňte pojistný box mezi čelistmi, který zabraňuje při poruše uchycení, v době kdy je stroj mimo provoz, samovolnému pádu horní desky (pouze vysunout z prostoru mezi čelistmi).
- 3) Očistěte stykové plochy vyhřívaných desek
- 4) Zkontrolujte stahovací hadicové spony. Musí být dostatečně utažené, aby se zabránilo úniku přívodní chladicí kapaliny, nebo případně páry vzniklé při vyhřívání/chlazení formy.
- 5) Zkontrolujte vývody obou hadic, ze spodní i horní formy. Při chlazení vzniká pára, která musí být odvedena přímo do odpadu, aby se zabránilo opaření obsluhy. Proto musí být oba konce pevně upevněny k odpadu.
- 6) Zapojte obě řídicí jednotky Ht60B do elektrické sítě 220V.
- 7) Zapněte řídicí jednotky Ht60B pomocí přepínacího tlačítka na čelní straně jednotek.
- 8) Nastavte pracovní teplotu - na displeji svítí vždy poslední použitá teplota, lze ji snadno změnit pomocí tlačítek nahoru (↑) a dolů (↓), kterými se zvyšuje, nebo snižuje aktuální nastavená teplota.

### Ovládání hydraulické části

- 9) Na boční straně hydraulického válce utáhněte tlakový ventil (označen číslem 1)
- 10) Do prostoru označeným číslem 2 vsuňte páku, pomocí které pumpováním vzniká přiblížení desek a následně tlak.
- 11) Pro rychlejší nahřátí desek přiblížte stykové plochy na dotek k sobě.
- 12) Po dosažení požadované teploty, povolte tlakový ventil a tím se desky opět oddálí od sebe. Aktuální teplota desek svítí na ovládacích jednotkách. Pro přesné sledování teploty je zapotřebí využít externích přístrojů (například termokamery).
- 13) Vložte příslušnou formu s připravenou směsí mezi desky. Pozor! Vždy používat kleště! Nikdy nevkládejte ruce mezi desky!

- 14) Je potřeba nechat nahřát formu, proto opět přiblížte vrchní desku nad formu, která je uložena na spodní desce. Stejný postup jako v bodě 10 a 11.
- 15) Po nahřátí formy, může začít předlisovací / lisovací proces. Nahřátí formy je potřeba sledovat vždy externím přístrojem. Řídící jednotky ukazují pouze aktuální teplotu desek, ne formy!
- 16) Při použití silikové formy nepřekračujte tlak 2,5 Metric-tons (1,25MPa)!!!

$$\text{přepočet ... } \frac{2500 * 9,81}{140 * 140} = 1,25\text{MPa}$$



*Obrázek 33 Ukazatel tlaku u lisu Holtzmann WP 45H*

- 17) Po uplynutí dané doby (která se liší podle použitých materiálů, formy a objemu materiálu), je potřeba spustit proces chlazení. U obou desek! Začněte vypnutím řídicích jednotek (konec vyhřívání).
- 18) Poté pomalu otáčejte ventilem pro spuštění vody do oběhu chlazení. Je potřeba vodu spouštět pomalu, aby nejdříve odešla pára z oběhu chladicího okruhu a až potom spusťte chlazení naplno. Tento proces proveďte pro oběh spodní i horní desky.
- 19) Po vychlazení vypněte vodu.
- 20) Otočte tlakový ventil pro oddálení čelistí a vyjměte formu.
- 21) Pro další vzorek opakujte celý proces.

## 8. Příprava vzorků kompozitních materiálů

### 8.1. Postup při výrobě folií

Maximální hmotnost směsi či prášku pro výrobu folie byla 5 gramů. Folie se vyráběla pomocí dvou rovných plechů, které zajistily rovný povrch folie (čelisti nejsou dokonale hladké). Mimo lis byl připraven vzorek: na rovný plech byl položen pečicí papír (pro snadnější oddělení vzorku od plechu), rozprostřena směs prášku s vlákny, položen pečicí papír, druhý plech. Poté byl tento sendvič vložen na rozehřátou spodní desku formy a 5 minut lisován.

Pokud je zapotřebí vyrobit větší množství folií, dá se přeskočit proces chlazení a následného opětovného nahřívání desek. Folie se vyjme rozehřátá a nechá se vychladnout mimo stroj. Při tomto postupu je nutné folii zatížit, aby se při chladnutí nekroutila.

### 8.2. Postup pro výrobu vzorku v měděné formě

Celý proces je popsán v návodu. Hlavní je správně sesadit díly formy do sebe a použít separátor na plochy formy, které jsou v kontaktu se směsí (zvláště při používání plazmově upravených polymerů). Separátor je zapotřebí nechat vyschnout předtím, než do formy vložíme kompozitní směs. Dále je důležité správně si vypočítat hmotnost prášku/směsi do formy podle hustoty a velikosti použité formy.

Pro naše potřeby, kdy jsme využívaly formu o výšce 4 mm, byly použity následující parametry. Forma byla rozehřátá na 160 °C pomocí přiblížení čelistí (tedy forma na sebe pouze dosedla bez tlaku). Na rozehřátí bylo potřeba 10 minut (sledováno pomocí termokamery). Poté byl vzorek lisován po dobu 20 minut za tlaku 1,25 MPa. Výsledný vzorek měl výšku 3 mm, díky milimetrovému přesahu spodního dílu formy.

### 8.3. Postup pro výrobu vzorku v silikové formě:

Postup je stejný jako u výroby ve formě měděné. Nesmí se překračovat síla 2,5 metrických tun (1,25 MPa) na rozměr vyhříváných desek (140 x 140 mm).

Pro delší životnost silikonové formy vsaďte silikonovou formu do měděné. Pokud je forma takto ohraničena vydrží více opakování, než dojde k porušení celistvosti formy.

## 9. Výrobní proces z prášku

Příprava směsi z PE prášku a karbonových vláken, či kevlarové, nebo čedičové tkaniny a její následné lisování, je značně jednodušší, než příprava a lisování vzorků z folií, ale časem ukázalo, že lze tento proces použít pouze pro kompozity s tkaninami. Pro tento postup se nám nepodařilo dostatečně účinně rozseparovat karbonová vlákna.

K výrobě vzorků byla použita měděná forma o rozměrech 3 x 140 x 140 mm (4 mm okraj + spodní díl).

Dále bylo zapotřebí vypočítat hmotnost směsi, která je potřeba k výrobě jednoho vzorku. Tato hmotnost se liší podle koncentrace fází v kompozitu. A případně i pro čistý PE.

Již připravená směs se podle postupu práce nasypala do formy a důkladně rozprostřela. Poté už následoval postup podle manuálu k ovládání hydraulického lisu. V případě této formy byl použit desetiminutový předehřev a následné 15minutové lisování vzorku.

## 10. Výrobní proces z folií

Při zdokonalování výrobního procesu nastal problém, kdy se v kompozitu i po proběhnutí celého procesu separace vláken při pozorování mikroskopem stále objevovaly shluky vláken v lomové ploše po tahové zkoušce. Proto musel být navržen nový postup výroby, jak se těchto shluků zbavit. Žádný další postup na separaci vláken již nebyl k dispozici a tak se přešlo k tomu, že se těchto shluků vláken pokusíme zbavit pomocí jiného výrobního procesu.

Po několika pokusech jsme začali připravovat kompozitní folie.

Směs fázi byla připravena pomocí procesu separace a míchání, který je popsán výše. Abychom se zbavili shluků, nebo je spíše eliminovali, tak jsme z této směsi lisovali folie. Každá folie byla lisována z 5 gramů směsi.

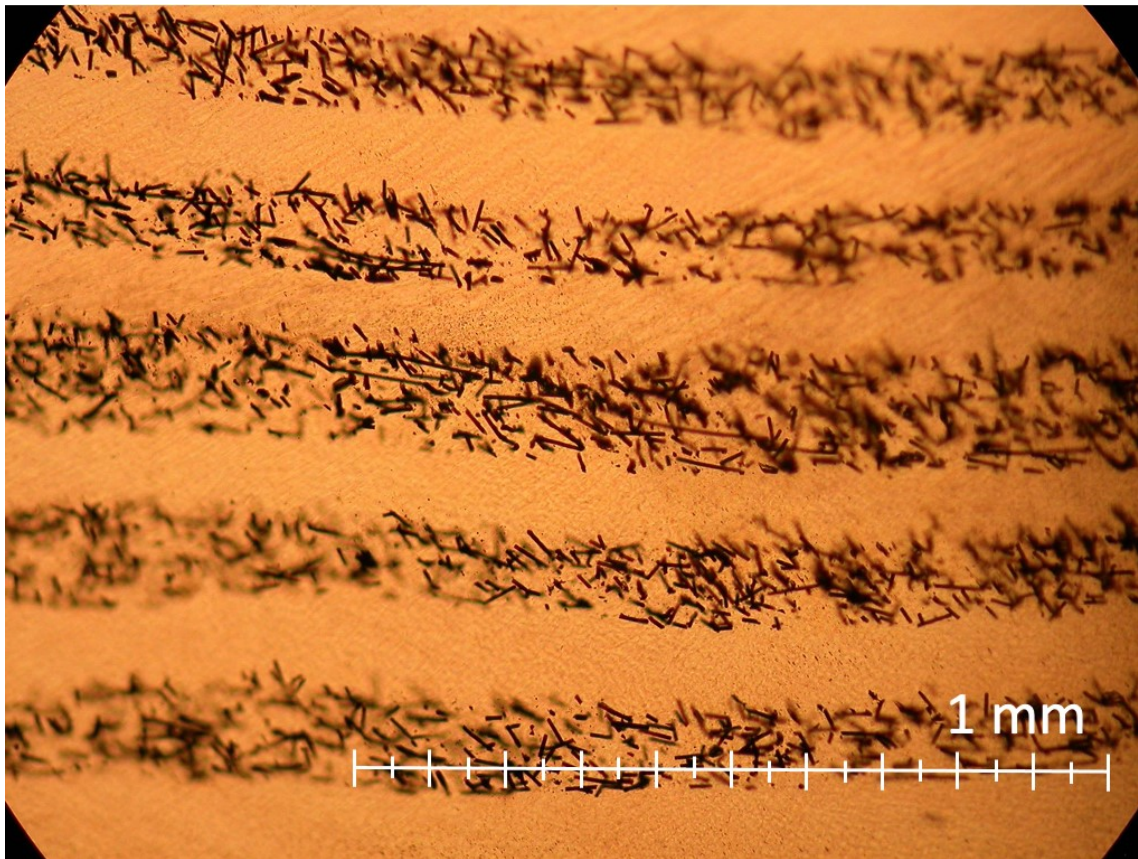
Vycházeli jsme z předpokladu, že i kdyby se ve směsi opět objevil shluk vláken, bude vylišován do velice tenké folie (tloušťka folie byla měřena mikrometrem na 0,15mm), a tím se shluk alespoň částečně prosytí matricí. Prosycení by pak mělo být dokonalé, když se folie v dalším kroku naskládají na sebe a slisují se do jednoho velkého vzorku.

Jinak řečeno výrazně se snižuje možnost výskytu shluků vláken uvnitř materiálu, protože se případně jednotlivé shluky vláken rozlisují a následně prosytí matricí z folie pod a nad sebou. Pravděpodobnost, že by se objevilo více slisovaných shluků přesně nad sebou a tím by opět vznikl shluk vláken, je tedy velice malá.

Vzorky pak byly v první fázi vyráběny z folií, které obsahovaly 10 % uhlíkových vláken. Při výrobě kompozitu s 10 % vláken se pouze naskládal požadovaný počet folií do formy a folie se opět lisovaly a při výrobě kompozitu s 5 % vláken se každá folie s 10% karbonových vláken proložila folií z čistého polyetyleny a tím se koncentrace vláken snížila na polovinu. Předpoklad byl takový, že se opětovným lisováním folie propojí a vznikne kompozit s 5% vláken distribuovaných do celého objemu vzorku. Tato domněnka, jak je vidět na obrázku 34, se nepotvrdila.

Nejen díky tomu, ale také kvůli nejednoznačným výsledkům z tahové zkoušky, kde vyšla hodnota mezi pevnosti v tahu stejná pro 5% i 10% koncentraci, byla ještě vyrobena další série vzorků z 5% folií s 5% koncentrací. Kdy se 5% folie naskládaly na sebe a slisovaly.

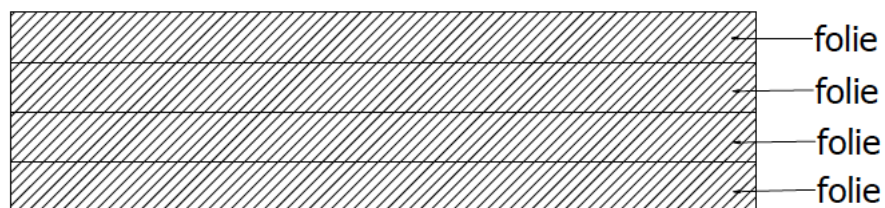




*Obrázek 34 Vzorek PE-CF5 vyrobený pomocí lisování folií PE-CF10 a PE*

Při předpokladu že bude vzorek namáhán v určitých směrech, není toto rozložení vláken zcela špatné.

Na obrázcích 35, 37 a 38 jsou vyobrazeny schéma tří různých postupů při výrobě v praktické části.



*Obrázek 35 Schéma vzorku slisovaného z folií*

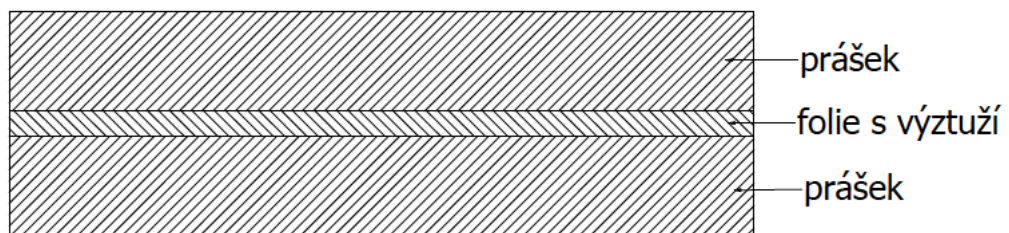
Tento způsob byl používán pro výrobu vzorků PE-CF5, PE-CF10, PEp-CF5, PEp-CF10. Dále pak pro výrobu vzorků na porovnání, které neobsahovali vlákna, PE a PEp.



Ilustrativní příklad, jak vypadá zhotovený vzorek z folií v měděné formě 140 x140 x 3 mm je na obrázku 36.

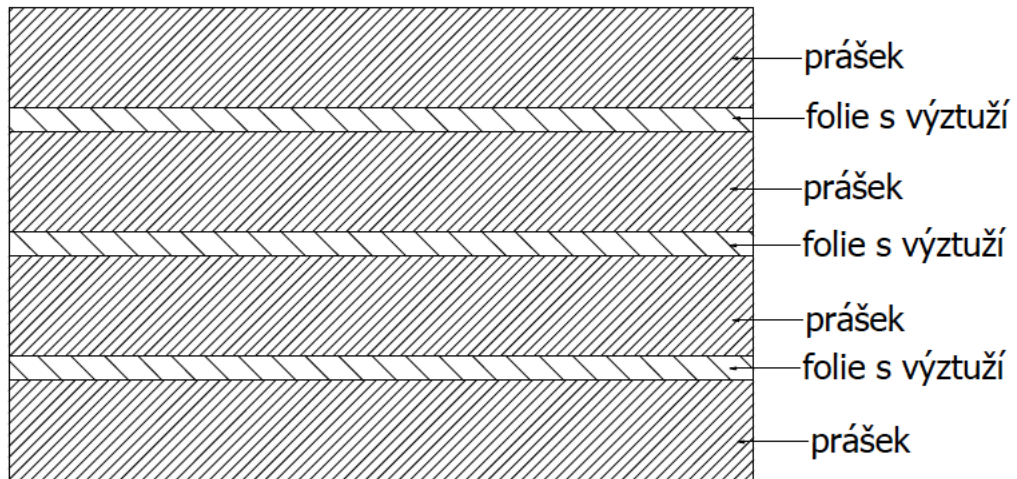


*Obrázek 36 Vzorek PE-CF5 lisování pomocí folií*



*Obrázek 37 Schéma vzorku lisovaného pomocí folie z prosycenou tkaninou*

Tento způsob výroby byl používán pro vzorky s jednou vrstvou tkanin. Tedy PE-AW8, PEp-AW8, PE-MW11 a PEp-MW11.



*Obrázek 38 Schéma vzorku lisovaného pomocí více folií s prosycenou tkaninou*

Tento způsob výroby byl používán pro vzorky s více vrstvami tkanin. Tedy PE-AW20 a PEp-AW20.

## 11. Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na stroji Exceed E42. Jedná se víceúčelový stroj, který má maximální sílu 5 kN a proto se hodí převážně pro plastové materiály, či kompozity z nich vyrobené. U kompozitního materiálu, kde je navrstven kevlar do 3 řad, musel být použit stroj ZD 10 Walter, kvůli nedostatečné síle prvního stroje.

Zkoušce byly podrobeny všechny vyrobené vzorky.

Vzorky byly vyřezávány skalpelem na šířku 10 mm, výška se pohybovala mezi 2,8-3,2 mm a délka mezi 70–140 mm. Jako další metody přípravy vzorků se nabízely ruční či rotační pila, ale při těchto metodách dělení mají plochy v řezu nehomogenní strukturu a tyto mikro řezy/zuby mohou nepříznivě ovlivnit výsledky. Tyto vzorky, díky možnostem výroby, ne vždy splňovaly rozměry podle normy ČSN EN ISO 527-1. Proto byl vzorek vždy důkladně přeměřen na 3 místech a pro výpočet výsledného napětí (podle vzorce 3) byl použit vždy nejmenší z těchto průměrů. Tato metoda je využívána kvůli předpokladu, že vzorek je přetržen v části nejmenšího průřezu. A jak je na vzorci 3 vidět napětí ( $\sigma$ ) je počítáno jako maximální síla ( $F_{max}$ ) / průřezem (A). Pro určení pevnosti se odečte síla z prvního maxima na křivce.

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

Zkouška probíhala za rychlosti oddalování čelistí 50 mm/min. Maximální síla byla automaticky odečtena přístrojem z grafu průběhu zkoušky.



Obrázek 39 Příklad vzorků pro tahovou zkoušku z PEp-5CF

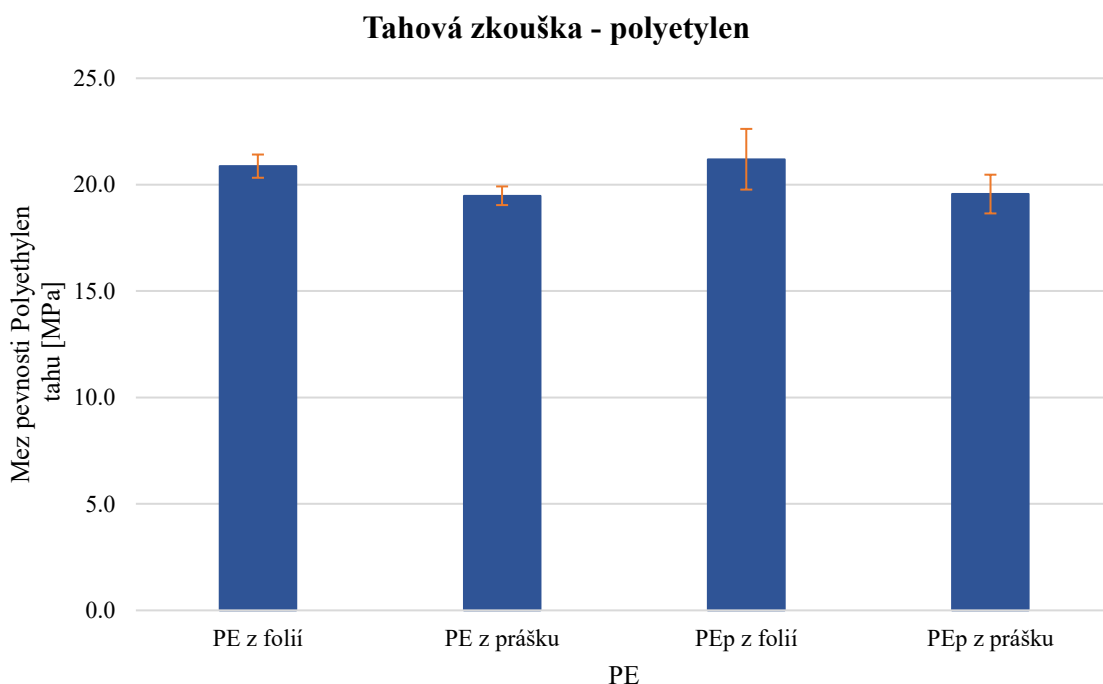
V následných kapitolách jsou porovnány výsledky tahové zkoušky.

## 11.1. Vzorky z polyetylenu

Nejdříve je pro porovnání uvedena tabulka 6, kde jsou shrnuty výsledky čistého polyetylenu připraveného oběma způsoby. Tedy lisovaného z prášku i z folií.

*Tabulka 6 Výsledky tahové zkoušky u vzorků z PE*

	PE základní stav z folií	PE základní stav z prášku	PE plazmovaný z folií	PE plazmovaný z prášku
vzorek	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	21,2	18,8	19,5	19,7
2	20,4	19,9	19,4	18,9
3	20,4	19,0	19,6	19,4
4	21,3	19,9	21,4	20,4
5	21,0	19,3	22,9	19,3
6	21,0	19,5	23,9	18,2
7	20,3	19,8	21,8	19,2
8	19,9	19,1	21,8	19,6
9	21,7	19,5	20,6	19,2
10	21,4	20,2	21,1	21,8
<b>průměrná hodnota</b>	<b>20,9</b>	<b>19,5</b>	<b>21,2</b>	<b>19,6</b>



*Graf 2 Porovnání výsledků tahové zkoušky u vzorků z PE*

Jak je z tabulky 5 vidět, mez pevnosti je lehce vyšší u vzorků lisovaných z folií. To může být dáno tím, že je materiál lisovaný dvakrát. Jako hlavní potenciální důvod zvýšení pevnosti u lisovaného PE z folií uvádím tlak hlavně proto, že klasická hodnota tohoto PE se pohybuje okolo 17MPa, jedná se však o hodnoty, které jsou naměřeny na vzorcích po výrobě beztlakovými technologiemi (pečení, rotomolding).

Malé zlepšení pevnosti vykazují i oba vzorky s plazmovou úpravou v porovnání se vzorkem bez ní. To může působit polárnost prášku po plazmové úpravě.

## 11.2. Vzorky s uhlíkovými vlákny

V tabulce 7 jsou porovnány všechny kompozity s uhlíkovými vlákny, které byly vyrobeny pomocí první technologie. Tedy vše z 10% folií, které byly u 5% vzorků prokládány foliemi z čistého PE, případně PEp (plazmově upravený PE).

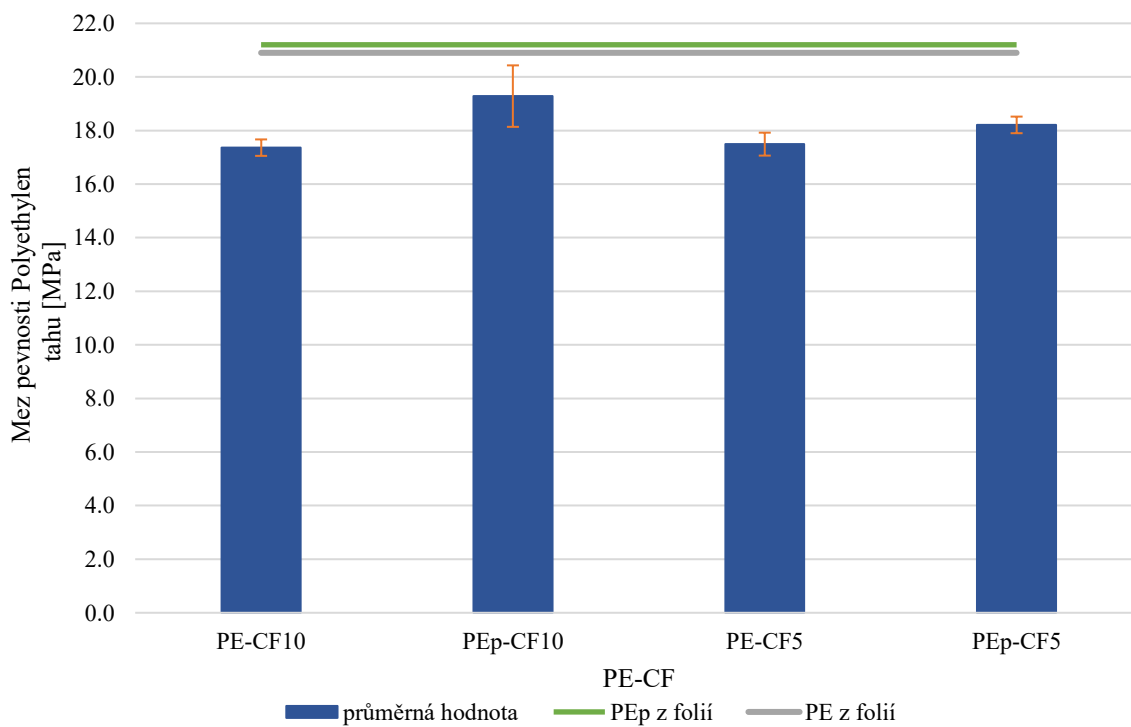
Byly vyrobeny a zkoumány dvě koncentrace uhlíkových vláken a to konkrétně 5 a 10%.

A to jak s plazmově upravenou maticí, tak i v základním stavu.

Tabulka 7 Výsledky tahové zkoušky u vzorků s uhlíkovými vlákny

	PE-10CF	PEp-10CF	PE-5CF	PEp-5CF
<b>vzorek</b>	<b>[MPa]</b>	<b>[MPa]</b>	<b>[MPa]</b>	<b>[MPa]</b>
1	18,1	17,6	17,7	18,1
2	17,3	18,1	17,4	18,2
3	17,4	20,4	17,5	18,8
4	17,3	19,1	17,4	17,8
5	17,4	19,1	17,5	18,4
6	17,6	18,6	16,5	18,5
7	16,9	20,5	17,3	17,7
8	17,4	20,6	17,3	18,3
9	17,2	20,9	18,2	18,1
10	17,1	18,0	18,0	18,2
<b>průměrná hodnota</b>	<b>17,4</b>	<b>19,3</b>	<b>17,5</b>	<b>18,2</b>

### Tahová zkouška - uhlíková vlákna + polyetylen



Graf 3 Porovnání výsledků tahové zkoušky u vzorků s uhlíkovými vlákny

PE-CF10 – Polyetylen v základním stavu + 10% karbonových vláken

PE-CF5 - Polyetylen v základním stavu + 5% karbonových vláken

PEp-CF10 - Polyetylen plazmovaný + 10% karbonových vláken

PEp-CF5 – Polyetylen plazmovaný + 5% karbonových vláken

Značení vzorků je v souladu s normou ČSN EN ISO 1043-2.

Jak je vidět z tabulky 7 a grafu 3 kompozity s plazmově upravenou maticí mají vyšší mez pevnosti než kompozit bez této úpravy matrice. Co je ovšem zvláštní, že u základního stavu nám vychází pevnost stejná pro 5 i 10% koncentraci karbonových vláken. Může to být způsobeno tím, že není dostatečná adheze mezi maticí a vláknem a tím pádem pevnost kompozitu klesá až na pevnost čistého PE v beztlakových technologiích, což je 17 MPa. Vlákná totiž, pokud je špatná adheze k matici, pouze zmenšují průřez v místě přetržení a neplní tak svou zpevňující funkci.

Proto byla dodatečně připravena další série vzorků, kde byl zachovaný stejný postup výroby vzorku, tedy z folií, ale pro 5% koncentraci byly použity na výrobu 5% folie. Tímto se zajistilo rovnoměrné rozložení vláken v celém průřezu vzorku. Výsledky těchto vzorků PE-CF5<sub>n</sub> (polyetylen + 5hm. % uhlíkových vláken – nový tech. postup) z folií jsou v tabulce 8.

*Tabulka 8 Výsledky tahové zkoušky vzorku PE-CF5<sub>n</sub>*

	<b>PE-5CF</b>
<b>vzorek</b>	<b>[Mpa]</b>
1	16,6
2	17,3
3	18,6
4	17,8
5	17,6
6	17,7
7	18,0
8	19,4
9	18,9
10	19,4
<b>průměrná hodnota</b>	<b>18,1</b>

Jak je vidět průměrná hodnota dosahuje téměř stejného výsledku jako při výrobě pomocí první technologie u vzorku PEp-5CF. Dá se tedy předpokládat, že při výrobě touto technologií by nám vzrostla i hodnota u vzorku s plazmově upravenou maticí. Především díky lepšímu rozložení vláken ve vzorku a pravděpodobnou lepší adhezí matrice k vláknům. Při porovnání vzorků s 10% CF nám plazmová úprava zvedla mez pevnosti v tahu o 1,9 MPa což je v tomto případě 10,9%.

Technologie na výrobu PE-CF<sub>5n</sub>, je shodná s postupem výroby u vzorků s 10 hm% uhlíkových vláken. Tedy skládání folií se stejnými % jako má výsledný vzorek nám vyšla pevnost o 3,5% vyšší. Proto je do budoucna potřeba používat tuto metodu!

### 11.3. Vzorky s čedičovou tkaninou

Jako další byly na tah zkoušeny vzorky s čedičovou tkaninou. V tomto případě byl jedinkrát použit jiný PE než na celou práci a to z důvodu nedostatečného prosycení matrice. Na jednu sadu vzorků byl tedy použit PEz (RPX 1001 NATUR LD/70/600μ (RPX)), který má větší zabíhavost v tekutém stavu.

Vzorky byly připravovány pomocí lisování na jeden cyklus. Tedy na jeden ohřev.

Do formy byl nasypán prášek (polovina vypočtené potřebné hmotnosti), zde byl důkladně rozprostřen. Na tuto vrstvu byla položena tkanina, která se zasypala druhou polovinou prášku. Poté došlo k lisování.

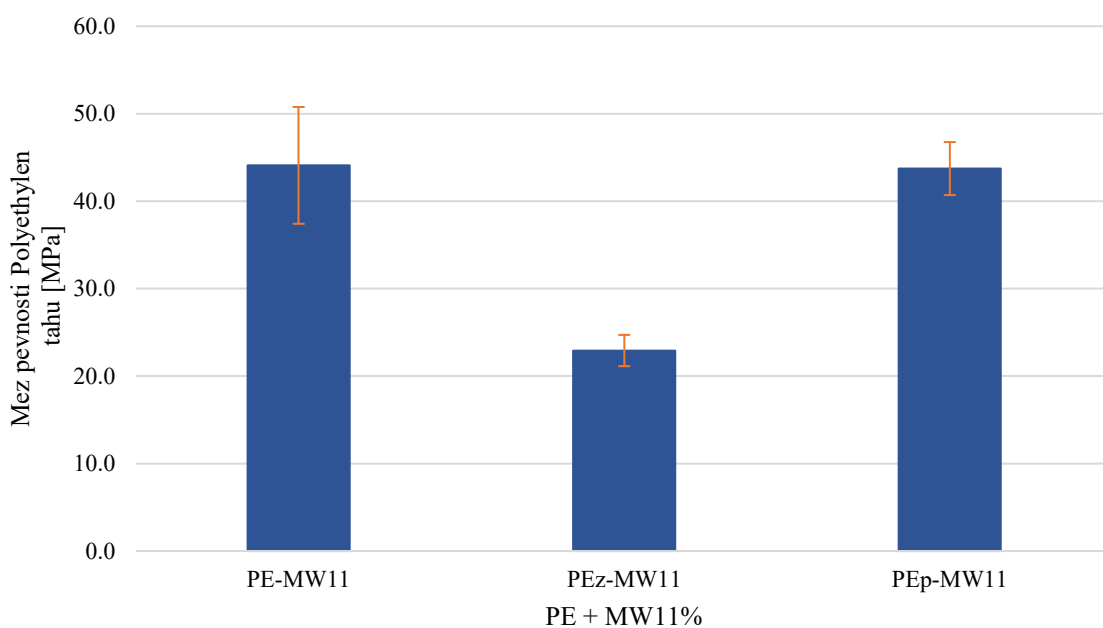
Výsledky z tahové zkoušky u těchto vzorků jsou v tabulce 9.

*Tabulka 9 Výsledky tahové zkoušky u vzorků s čedičovou tkaninou (1 vrstva)*

	PE-MW11	PEz-MW11	PEp-MW11
vzorek	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	41,2	26,3	47,2
2	57,3	23,0	47,5
3	39,9	22,0	40,4
4	42,4	21,0	41,6
5	39,7	22,3	41,9
<b>průměr</b>	<b>44,1</b>	<b>22,9</b>	<b>43,7</b>



## Tahová zkouška - polyetylen + čedičová tkanina



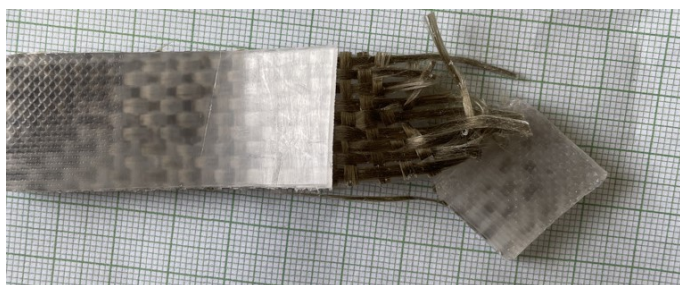
Graf 4 Porovnání výsledků tahové zkoušky u vzorků s čedičovou tkaninou (1 vrstva)

PE-MW11 – Polyetylen v základním stavu + čedičová tkanina

PEz-MW11 – Polyetylen v základním stavu s nižší viskozitou + čedičová tkanina

PEp-MW11 – Polyetylen plazmovaný + čedičová tkanina

U PEz, tedy prášku s vyšší zabíhavostí byla téměř nulová adheze k tkanině. Tento problém byl viditelný již při prvním pohledu na vzorek, kde se od sebe doslova odlupovaly jednotlivé vrstvy. A tak jsou výsledky s tímto materiálem špatné. Druhé dva vzorky vyšly sice výrazně lépe, ale adheze ke tkanině byla také velice špatná. Plátňová vazba čedičové tkaniny byla velice hustá, a tak se materiál nedostal skrz vazbu tak, aby byla tkanina správně prosycena. Zřejmě by bylo za potřebí použití většího tlaku, což nám ale laboratorní podmínky nedovolily. Ukázka vzorku PE-ČT po tahové zkoušce je na obrázku 40.



Obrázek 40 Špatná přilnavost vrstev u vzorku PE-ČT

## 11.4. Vzorky s kevlarovou tkaninou

Další tkaninou, která byla využita na výrobu vzorků, byla tkanina kevlarová. U této tkaniny byla vazba méně utažená a tím pádem bylo snazší prosycení výztuže matricí.

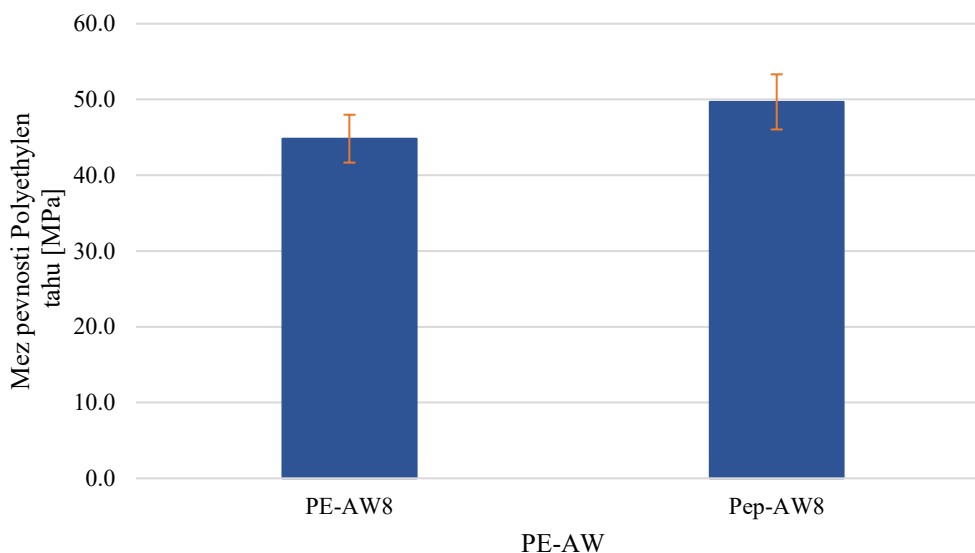
Postup výroby byl stejný jako u vzorků s čedičovou tkaninou.

Pevnosti těchto vzorků jsou vshrnuty v tabulce 10 a grafu 5.

Tabulka 10 Výsledky tahové zkoušky u vzorků s kevlarovou tkaninou (1 vrstva)

	PE-AW8	PEp-AW8
vzorek	[MPa]	[MPa]
1	49,7	45,2
2	47,2	55,2
3	42,4	52,1
4	43,4	49,4
5	41,3	46,6
<b>průměr</b>	<b>44,8</b>	<b>49,7</b>

Tahová zkouška - polyetylen + kevlarová tkanina



Graf 5 Porovnání výsledků tahové zkoušky u vzorků s kevlarovou tkaninou (1 vrstva)

PE-AW8 – Polyetylen v základním stavu + kevlarová tkanina

PEp-AW8 – Polyetylen plazmovaný + kevlarová tkanina

Plazmová úprava matrice zvedla výslednou pevnost tohoto materiálu o 10,94%. Jelikož byl postup výroby stejný pro všechny vzorky, můžeme s jistotou říci, že právě plazmová úprava je důvod navýšení pevnosti materiálu.

Díky dobrým výsledkům mezi PE-AW8 a PE<sub>p</sub>-AW8 byl vyroben ještě vzorek materiálu se třemi vrstvami kevlarové tkaniny. Kvůli obavám, aby se tkanina při výrobě dobře prosytila, byl stanoven nový postup výroby.

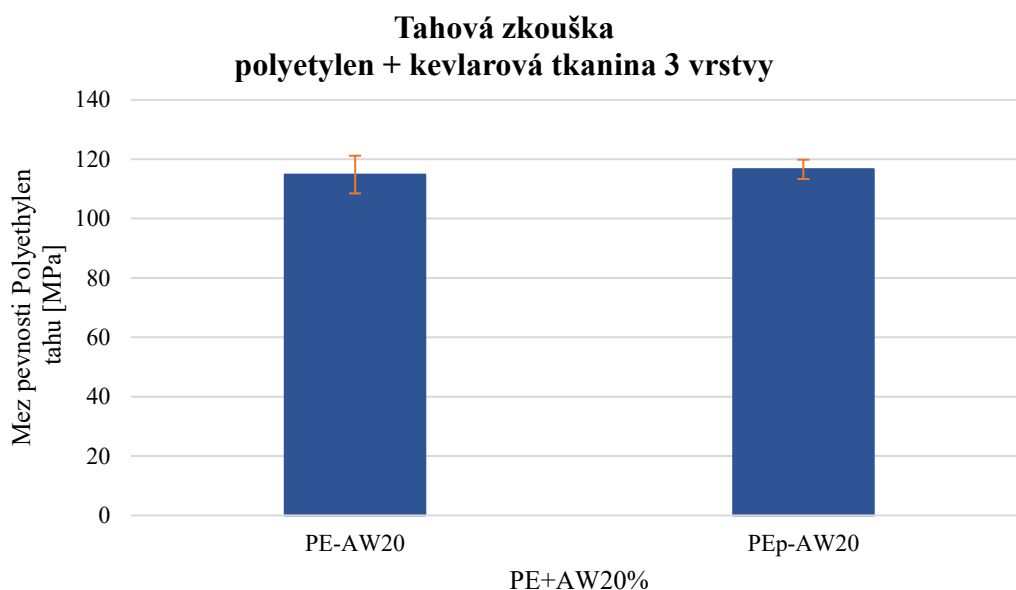
Vzorky byly připravovány pomocí dvojího lisování, aby se zajistilo dostatečné prosycení tkaniny. Konkrétní pracovní postup pak byl následující. Nejprve se vyrobila folie z 10gramů PE, případně PE<sub>p</sub>, do které byla vlisována uprostřed výšky tkanina. Tedy na desku pro přípravu folií byl položen pečicí papír, následně nasypáno 5gramů prášku, položena tkanina, zasypáno opět 5gramy prášku a překryto pečicím papírem.

Tato folie se poté podsypala ve formě polovinou potřebné hmotnosti prášku, vložila se na tento rozprostřený prášek a zasypala se druhou polovinou. Takto vyplněná forma byla opět slisována. Tím byly získány tyto vzorky.

Výsledné hodnoty z tahové zkoušky při použití 3 vrstev kevlaru, tedy materiálu PE-AW20, jsou v tabulce 11.

*Tabulka 11 Výsledky tahové zkoušky u vzorků s kevlarovou tkaninou (3vrstvy)*

	<b>PE-AW20</b>	<b>PE<sub>p</sub>-AW20</b>
<b>vzorek</b>	<b>[MPa]</b>	<b>[MPa]</b>
1	122,7	116,9
2	115,7	112,2
3	103,3	120,6
4	117,3	113,7
5	115,2	119,6
<b>průměr</b>	<b>114,84</b>	<b>116,6</b>



*Graf 6 Porovnání výsledků tahové zkoušky u vzorků s kevlarovou tkaninou (3 vrstvy)*

PE+AW20 – Polyetylen v základním stavu + tři vrstvy kevlarové tkaniny

PEp+AW20 – Polyetylen plazmovaný + tři vrstvy kevlarové tkaniny

Zde se již plazmová úprava neprojevila, zřejmě u tří vrstev kevlaru slouží PE už pouze jako pojivo těchto vrstev a případná ochrana výztuže, ale na pevnost již nemá díky obrovské pevnosti samotného třívrstvého kevlaru vliv. Pevnost kompozitu s plazmově upravenou maticí je pouze o 1,5% vyšší. To je vzhledem k odchylce měření zanedbatelné číslo.

U tohoto materiálu se neprojevil synergický efekt, dle hmotnostních procent měla pevnost materiálů vzrůst na minimálně 2,5 násobek hodnoty od vzorku PE-AW8. výsledná hodnota vzrostla pouze na 2,35 násobek. Toto může být způsobeno především tím, že tkaniny nejsou ve všech vrstvách stejně vypnuté a tím pádem při tahové zkoušce nejsou v záběru všechny současně. Další věc, která může mít na tento výsledek vliv, je možné pootočení tkanin vůči sobě. Tedy že ne všechny vazby jsou rovnoběžné.

## 12. Zkouška tříbodovým ohybem

Ohybová zkouška probíhala podle normy EN ISO 178.

Výpočet modulu pružnosti E.

$$E = \frac{\Delta F * L^3}{48 * l * \Delta s} \quad (4)$$

kde  $\Delta F$  je přírůstek síly,  $\Delta s$  je přírůstek průhybu zkušební vzorku a L je vzdálenost podpor, která se vypočítá jako:  $L = (16 \pm 1) * h$  a vždy se zaokrouhluje na celé sudé číslo, aby byly podpěry umístěny vzhledem k ose ohybu symetricky.

Dále je pro výpočet zapotřebí vypočítat  $\Delta s$ , které se vypočítá pomocí  $s_1$  a  $s_2$ .

$$s_1 = \frac{0,0025 * L^2}{6 * h} \quad (5)$$

$$s_2 = \frac{0,0005 * L^2}{6 * h} \quad (6)$$

$$\Delta s = s_1 - s_2 \quad (7)$$

Byly připraveny vzorečky na obdélníkový průřez 3 x 10 mm. Způsob přípravy vzorků pro ohybovou zkoušku probíhal pomocí skalpelu, stejně jako u zkoušky tahové.

Pro obdélníkový průřez se počítá I, tedy moment setrvačnosti jako:

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (8)$$

kde b je šířka a h výška zkoušeného tělesa.

Zkouška probíhala za použitím opěr s rádiem 5mm.

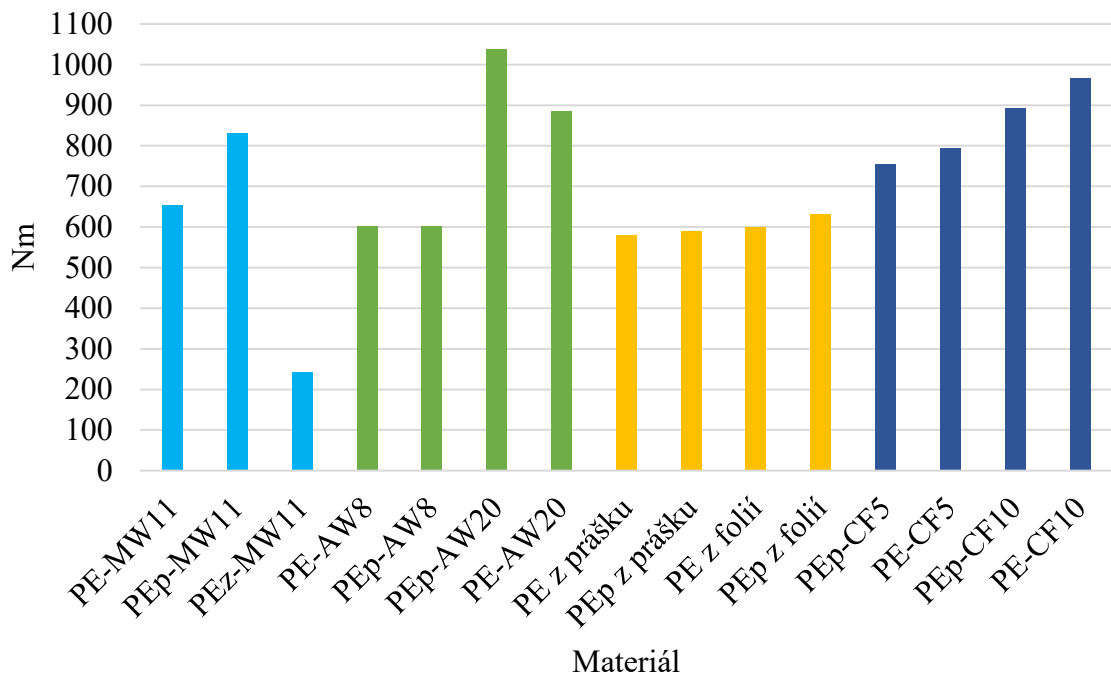
Jelikož jsme zjišťovali pouze modul pružnosti tělesa, celá zkouška probíhala jako zkouška nedestruktivní a tedy pouze v oblasti elastických deformací.

Zkouškou tříbodovým ohybem byly z časových důvodů vždy podrobeny pouze dva vzorečky. Jejich zprůměrovaná hodnota je v tabulce 12.

*Tabulka 12 Výsledné moduly pružnosti u všech vzorků*

<b>Materiál</b>	<b>Průměrná hodnota E [Nm]</b>
PE-MW11	654
PEp-MW11	832
PEz-MW11	243
PE-AW8	602
PEp-AW8	602
PEp-AW20	1038
PE-AW20	884
PE z prášku	580
PEp z prášku	589
PE z folií	599
PEp z folií	632
PEp-CF5	754
PE-CF5	795
PEp-CF10	892
PE-CF10	968

### Zkouška třibodovým ohybem



Graf 7 Porovnání modulu pružnosti E u všech vzorků

Série vzorků, které byly zkoušené na třibodový ohyb, nedosahovaly dostatečných kusů, aby mohla být zhotovena statistika, a tak jsou výsledky pouze orientační a uvádím je zde pouze pro zajímavost. Z dosavadních naměřených výsledků je vidět především to, že s větším hmotnostním poměrem uhlíkových vláken ve vzorku nám roste ohybový modul pružnosti E.

### 13. Rázová zkouška

Zkouška rázem byla provedena na přístroji Veb Werkstoffprüfmaschinen PS V 30, podle normy EN ISO 179-1.

Plocha vzorku byla podle normy 8mm pod vrubem V.

Výpočet vrubové houževnatosti probíhal podle vzorce:

$$a_{CN} = \frac{A_s}{S_0} \quad (9)$$

,kde  $A_s$  je energie spotřebovaná na přeražení vzorku a  $S_0$  je průřez v místě vrubu.

Všechny zkoušky probíhaly za pomoci kyvadlového kladiva o energii 0,1kpm.

U rázové zkoušky se vzorky se všemi tkaninami nepodařilo přerazit, a tak v souladu a normou EN ISO 179-1, byly vzorky vyhodnoceny jako nepřeraženy při daných podmínkách.

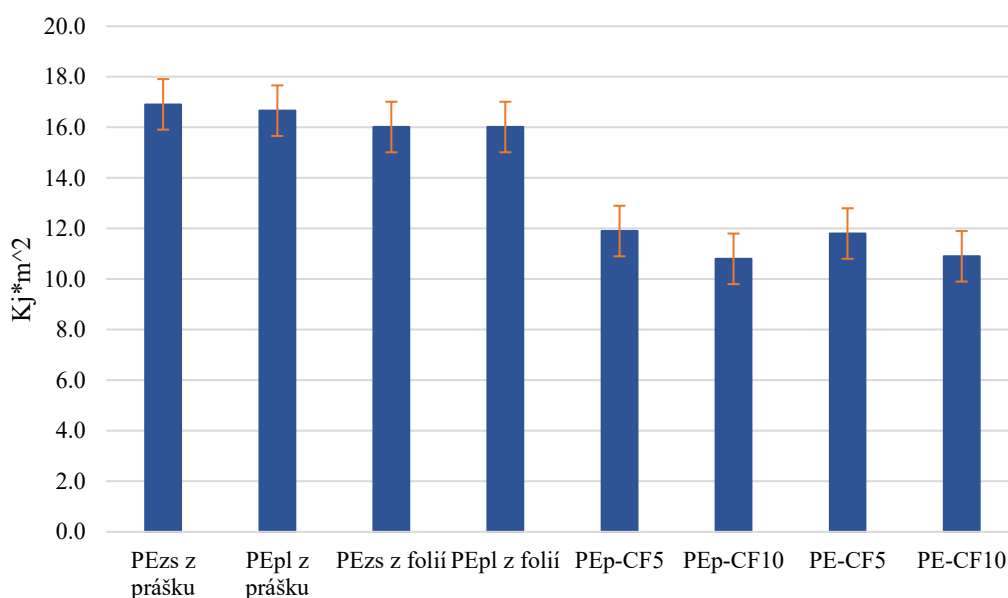
Od všech druhů kompozitů, které byly podrobeny této zkoušce, bylo testováno pět kusů, výsledky byly zprůměrovány a zapsány do tabulky 13.

*Tabulka 13 Výsledky rázové zkoušky všech vzorků*

Vzorek	$Kj * m^2$
PE z prášku	16,9
PEp z prášku	16,7
PE z folií	16,0
PEp z folií	16,0
PEp-5CF	11,9
PEp-10CF	10,8
PE-5CF	11,8
PE-10CF	10,9



## Rázová zkouška



*Graf 8 Porovnání výsledků rázové zkoušky*

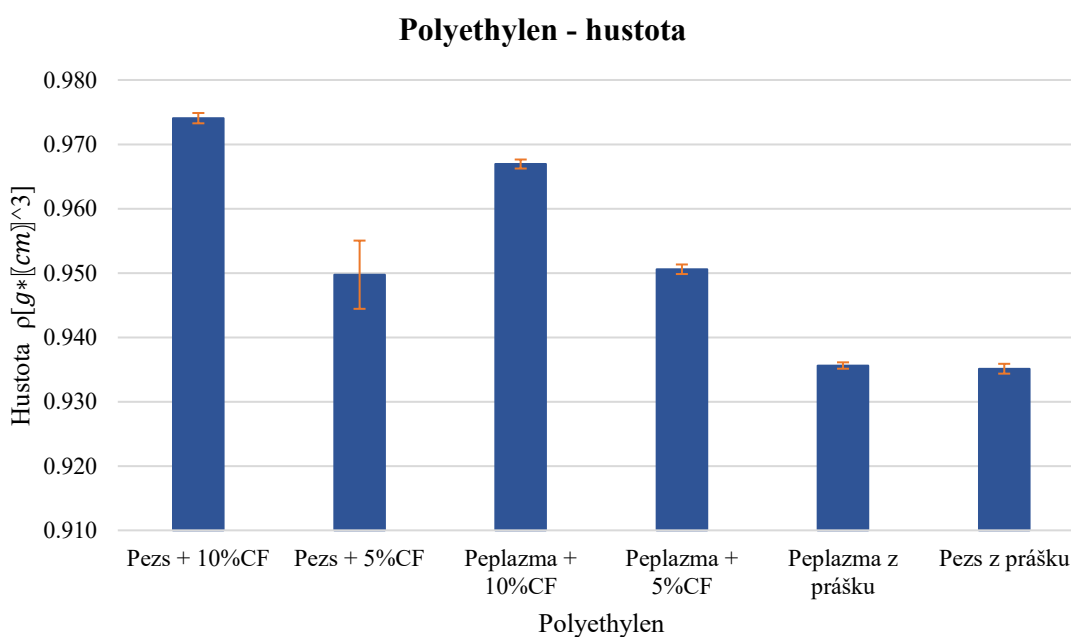
Porovnání v grafu 8 nám ukazuje, že největší rázovou odolnost vykazuje samostatný PE, dokonce lisovaný vykazuje tuto odolnost menší. Rozdíl mezi kompozitem, či samotným PE, s plazmově upravenou/neupravenou matricí je téměř nulový a tedy zanedbatelný. U kompozitů nám s rostoucím podílem karbonových vláken v materiálu rázová odolnost klesá. Tento fakt je daný tím, že vlákna jsou oproti PE výrazně křehčí a tím pádem zeslabují celkový materiál proti tomuto namáhání.

## 14. Hustota

Hustota PE dowlex 2629.10UE, který byl použit pro vzorky z praktické části této práce je uvedena v datasheet listu. Jedná se o hustotu 0,935 g/cm<sup>3</sup>. Taktéž hustota karbonových vláken je vyjmuta z datasheetu k materiálu od dodavatele.

Tabulka 14 Výsledné naměřené hodnoty hustoty

Materiál	Hustota [g * cm <sup>3</sup> ]
PE-CF10	0,974
PE-CF5	0,950
PEp-CF10	0,967
Pep-CF5	0,951
PE z folií	0,935
PEp z folií	0,936
PEp z prášku	0,936
PE z prášku	0,935
PE tabulková	0,935
Uhlíková vlákna	1,800



Graf 9 Porovnání výsledných hustot

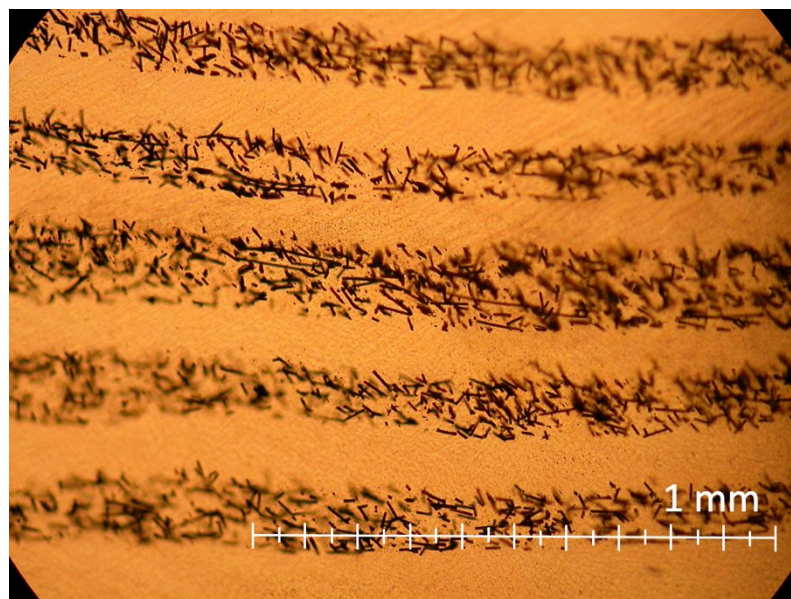
Od všech vzorků bylo měřeno 5 kusů a v tabulce 14 jsou zobrazeny průměrné hodnoty těchto měření.

Se zvyšující se koncentrací vláken se zvyšuje hustota, což je způsobeno tím, že uhlíková vlákna mají větší hustotu než PE. U 10 % vzorků je značný rozdíl mezi průměrnou hustotou, tento rozdíl je způsobený zřejmě úbytkem karbonových vláken při procesu separace. Vlákna se částečně zachytávají na filtrační papír a při shluku vláken na sítu je shluk odstraněn. Proto jsou koncentrace pouze orientační a mohou se lišit. Jelikož je tato hodnota hustoty měřena ze všech vzorků, které byly vyrobeny, můžeme tedy říci, že s největší pravděpodobností byla koncentrace vláken u vzorků PEp-CF10, menší než 10%. A to díky úbytku vláken při pracovním postupu.

## 15. Pozorování struktury

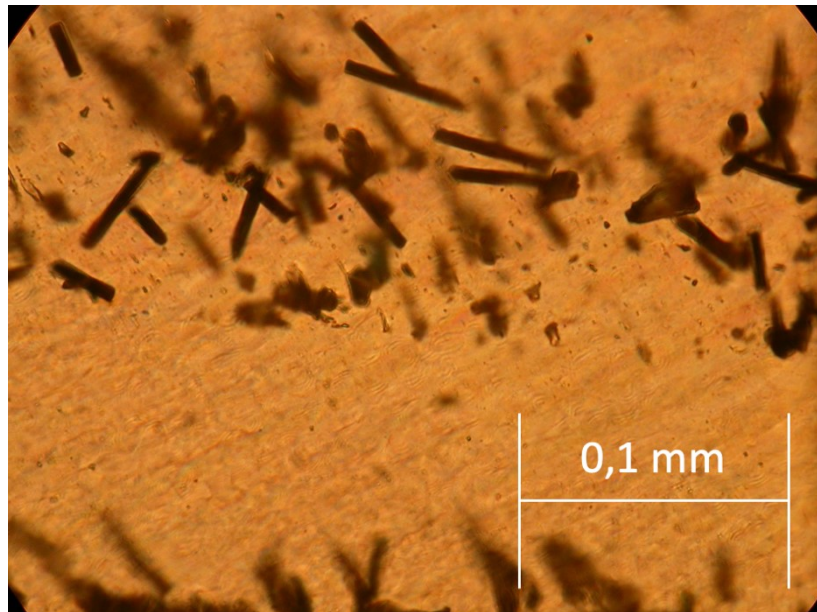
Bylo pozorováno především rozprostření vláken v materiálu.

Na obrázku 41 je vzorek PEp-CF5, který byl vyroben pomocí technologie skládání folií z PEp-CF10 a folií čistého PE. Jak je na obrázku vidět, vrstvy se nepromísily, a tak je vidět struktura jednotlivých folií téměř odděleně. Toto byl zřejmě důvod, snížené pevnosti u PEp-CF5. Tato domněnka se následně potvrdila po dodělení další sady vzorku PE-CF5 pomocí technologie skládání z folií PE-CF5.



*Obrázek 41 Snímek řezu vzorku PEp-CF5*

Na dalším snímku (Obrázek 42) je vidět detailně při 50násobném zvětšení rozhraní mezi těmito vrstvami. Kde uhlíková vlákna drží v jedné linii a nevykazují žádnou známku prosycení do folie z PE.



*Obrázek 42 Detailní snímek rozhraní mezi folií PEp a PEp-CF10*

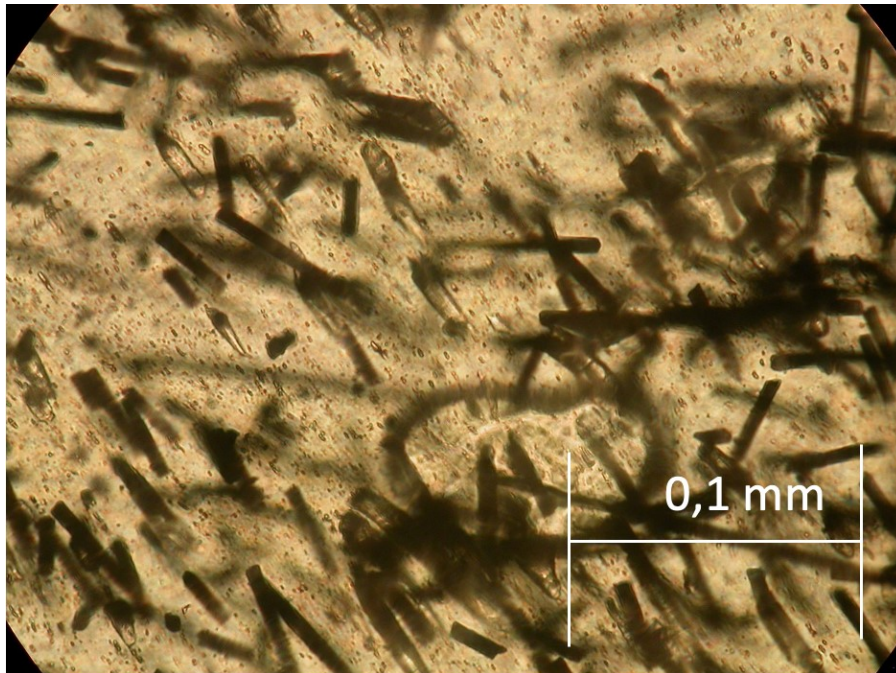
Na snímku 43 je zachyceno uspořádání vláken u vzorku PE-CF10, kde jsou také částečně vidět linie jednotlivých folií, ale prosycení vláken je díky použití všech folií s vlákny rovnoměrné v celém objemu materiálu.



*Obrázek 43 Částečné uspořádání vláken u vzorku PE-CF10*



Na dalším obrázku (obr. 44) je detailní snímek rozložení vláken. Vlákná jsou převážně neuspořádaná.



*Obrázek 44 Detailní snímek Převážně neuspořádaných vláken u vzorku PE-CF10*

Při pozorování pomocí světelného mikroskopu nebyly objeveny žádné mikro bublinky ani vměstky, které by narušovaly celistvost vzorku. Jako další velice důležitý faktor je zapotřebí podrobit vzorky zkoumání pomocí elektronového mikroskopu. Zde je potřeba se soustředit především na adhezi mezi vlákny a matricí.

## 16. Diskuze

První mechanickou zkouškou, které byly podrobeny všechny vzorky, je pevnost v tahu, ze které byla zjišťována pevnost materiálu v tahu. Vzorky z čistého PE vyšly o 7% lépe, pokud byly připravovány pomocí dvojího lisování, tedy z folií. U plazmově upraveného PEp dokonce o 8% lépe. Toto zlepšení je připisováno především dvojímu lisování. Měření hustoty nepotvrdilo jednoznačně tuto myšlenku, ale ani nevyvrátilo. Nyní je zapotřebí vzorky podrobit testu DSC a zhodnotit výsledky jestli je větší krystalinita u vzorků se dvojnásobným lisováním.

U vzorků s uhlíkovými vlákny jsme museli pro lepší porovnání i pozměnit proces výroby. A to konkrétně u vzorků PE-CF5. Ukázalo se, že u materiálů, které mají matici bez plazmové úpravy, klesá pevnost s rostoucím hmotnostním poměrem vláken. Naopak však u vzorků s plazmově upravenou maticí pevnost roste. Nárůst mezi PEp-CF5 a PEp-CF10 je 6% pevnosti. Pravděpodobně je tedy adheze mezi vláknem a maticí výrazně lepší u těchto vzorků. Toto tvrzení je potřeba potvrdit pomocí pozorování vzorků elektronovým mikroskopem.

U čedičové tkaniny se při pozorování pouhým okem (bylo vidět i bez mikroskopického pozorování) prokázalo velice špatné prosycení mezi tkaninou a PE. Výsledky neodpovídají předpokladům a u PEp-MW11 i PE-MW11 je pevnost téměř stejná. Jako další byl zkoušen vzorek s PEz-MW11, kde byla použita matrice s lepším indexem toku taveniny, ale i tento vzorek byl bez jakéhokoliv prosycení matrice mezi tkaninu. Nakonec dokonce pevnost vyšla horší než u PE-MW11 a PEp-MW11 (téměř o 50%). Pravděpodobně nedošlo ani zde k lepšímu prosycení a tento prášek má obecně horší mechanické vlastnosti než používaný PE Dowlex.

U vzorků s kevlarovou tkaninou je nárůst pevnosti u vzorků s plazmově upravenou tkaninou 11%. Ale ani u těchto vzorků není adheze mezi maticí a tkaninou dobrá. Je potřeba kvalitnějších nástrojů, aby se mohlo využít větších tlaků při výrobě. U vzorků se třemi vrstvami kevlarové tkaniny (tedy PE-AW20, PEp-AW20) se nepotvrdil synergický efekt a pevnost nevzrostla minimálně na 2,5násobnou hodnotu. Tato hodnota byla předpokládána vzhledem k % tkaniny obsažené ve vzorcích. Důvodem může být pootočení (natočení) tkanin vůči sobě či nedostatečné vypnutí těchto tkanin v různých vrstvách.

Jako další mechanická zkouška byla provedena zkouška tříbodovým ohybem. Tato zkouška byla pouze orientační, jelikož nebyl zhotoven dostatek vzorků pro statistické zhodnocení každého druhu. Byl měřen pouze modul pružnosti, tedy zkouška byla prováděna jako nedestruktivní. Obecně modul pružnosti E roste s rostoucím obsahem uhlíkových vláken a klesá při přidání kevlarové a čedičové tkaniny.

Následovala zkouška rázem v ohybu. V této zkoušce nakonec byly pozorovány pouze vzorky bez přidání tkaninové výztuže a to tedy kompozity s uhlíkovými vlákny. Důvodem byla větší vrubová houževnatost kompozitů s čedičovou a kevlarovou tkaninou, než co jsme dokázali přerazit. Tedy nedokázali jsme vyvinout za daných podmínek dostatečnou energii. Zkouška probíhala podle normy EN ISO 179-1 s kladivem o energii 0,1 kpm.

U rázové zkoušky houževnatost klesá s procentuálním růstem uhlíkových vláken. Rozdíl mezi vzorky s plazmově upravenou maticí a s maticí bez této úpravy je téměř nulový a tedy zanedbatelný. U PE-CF5 klesá rázová odolnost na 73% oproti čistému PE vyrobenému z folií. U PE-CF10 potom klesla na 68 %. Z těchto výsledků je snadno vidět předešlá tvrzení poklesu vrubové houževnatosti při přidání uhlíkových vláken k matici PE.

Při pozorování struktury světelným mikroskopem se u vzorků s uhlíkovými vlákny ukázalo, že je zapotřebí při dalším výzkumu dodržovat postup, kdy je každá folie přímo připravena ve složení v jakém má být i finální vzorek. My jsme u vzorků PE-CF5 prokládali folie PE-CF10 foliemi pouze z PE. Tímto způsobem se nám nepodařilo vytvořit homogenní materiál. Tedy vlákna nebyla rozdistributeda do celého průřezu vzorku. Za daných podmínek v laboratoři jsme nemohli vyzkoušet ani použití vyšších teplot či vyšších tlaků, abychom ověřili, zda by byla metoda účinnější právě při použití vyšší teploty a tlaku.

Struktura je celistvá bez známky vměstků a bublin. Rozložení vláken je částečně usměrněno po okrajích folií díky procesu lisování z folií. Ale převážně jsou vlákna v celkovém objemu neuspořádaná.



Pro budoucí výzkum je zapotřebí podrobit vzorky zkoumání na elektronovém mikroskopu. Zde je zapotřebí zaměřit se především na adhezi vláken k matrici. Všechny výsledky napovídají tomu, že je adheze vláken k matrici výrazně lepší u kompozitů s plazmově upravenou matricí. Dále je zapotřebí zkonstruovat a použít vrchní díl formy pro vylepšení procesu lisování.

Celý proces by mohl mít v praxi využití na přípravu prepregů. Ty jsou následně snadno uskladnitelné a použitelné pro širokou škálu výrobků.

## 17. Závěr

- V teoretické části práce byly shrnuty poznatky o přípravě kompozitů s ohledem na termoplastickou matici
- Byly vyzkoušeny různé způsoby přípravy kompozitních vzorků za použití hydraulického lisu
- Byl vytvořen návod pro práci na lisu
- Byla navržena a vyrobena forma pro lisování
- Pro přípravu vzorků byly použity matrice z polyethylenu a jako výztuž byla použita recyklovaná uhlíková vlákna a tkaniny z čediče a kevlaru
- Bylo zhotoveno 16 druhů vzorků (PE z folií, PEp z folií, PE z prášku, PEp z prášku, PE-CF5, PEp-CF5, PE-CF10, PEp-CF10, PE-AW8, PEp-AW8, PE-MW11, PEp-MW11, PEz-MW11, PE-AW20, PEp-AW20, PE-CF5<sub>n</sub>)
- Byly změřeny vlastnosti vzorků (pevnost, vrubová houževnatost, modul pružnosti v ohybu, hustota)
- Data byla vyhodnocena
- Byl doporučen postup pro další výzkum
- Je předpoklad, že výsledky práce mohou být využity v praxi (byly připraveny prepregy)
- Cíle práce byly splněny

## 18. Seznam použité literatury

- [1] Macháň, L. (2015). *Využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou maticí*. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=111135](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=111135)
- [2] Daňourek, K. (2010). Adhezní síly v kompozitech. *Fakulta mechatroniky, Katedra materiálu Strojní fakulty, Technická univerzita v Liberci*. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/NKM/02adheze.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NKM/02adheze.pdf)
- [3] Chawla, K., K. (2012). *Composites Materials: Science and Engineering*. Londýn: Springer, 3. vydání. ISBN 978-0-387-74364-6.
- [4] Fiala, J. & Kraus, I. (2016). *Povrchy a rozhraní*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2. přepracované vydání. ISBN 9788001058817.
- [5] Strong, A., B. (2008). Thermoplastic Composites, *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications*. Society of Manufacturing Engineers.
- [6] Červinka, O., Dědek, V., & Ferles, M. (1969). *Organická chemie*. STNL – Nakladatelství technické literatury, Praha & Nakladatelstvo ALFA, Bratislava. 1. vydání, str. 97,98,443,144,145,148,149
- [7] Klikorka, J., Hájek, B., & Votinský, J. (1989). *Obecná a anorganická chemie*. STNL – Nakladatelství technické literatury, Praha & Nakladatelstvo ALFA, Bratislava. 2. vydání, str. 986-988
- [8] Krebs, J. (1991). *Teorie zpracování nekovových materiálů* (skripta). VŠST Liberec.
- [9] Běhálek, L. (2016). *Polymery*. Code Creator, s.r.o. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [10] Kotula, O. (2015). Kinetika krystalizace etylen-oktenových kopolymerů. *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická*. Dostupné na: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/30972/kotula\\_2015\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/30972/kotula_2015_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- [11] Technická univerzita Liberec. (n/a). Technologie II: Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. *Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní*. Dostupné na: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm)
- [12] Slížová, M. (2015). Studium kinetiky krystalizace polymerů. [online]. *Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická*. Dostupné na: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika\\_pol/FP1\\_lab\\_03.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP1_lab_03.pdf)
- [13] Matmatch. (n.d.). *Thermoplastics vs. Thermosetting Polymers: Properties, Processing and Applications*. Dostupné na: <https://matmatch.com/learn/material/thermoplastics-vs-thermosetting-polymers>.
- [14] Gilbert, M. (2017). *Brydson's Plastics Materials*. Elsevier, Amsterdam. 8. vyd., str. 247–278. ISBN: 9780323370226. Dostupné na: <https://www.sciencedirect-com.ucd.idm.oclc.org/book/9780323358248/brydsons-plastics-materials#book-description>
- [15] Hashmi, S., & Choudhury, I. A. (2020). *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. Elsevier. ISBN 978-0-12-813196-1. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780128131961/encyclopedia-of-renewable-and-sustainable-materials#book-info>
- [16] Evropský fond pro regionální rozvoj. (2020). *Vlastnosti plastů a jejich aplikace (prezentace k projektu „Přeshraniční kooperativní výuka zpracování plastů Zittau-Liberec (GreK)“)*. Evropská unie, Technická univerzita v Liberci & Technická univerzita v Drážďanech.
- [17] Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova. (n.d.). Plazma: Úvod do fyziky plazmatu. Dostupné na: <https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/plazma/>
- [18] Arpagaus, C., Oberbossel, G., & von Rohr, P. R. (2018). Plasma treatment of polymer powders – from laboratory research to industrial application. *Plasma Process Polym.* Dostupné na: <https://doi.org/10.1002/ppap.201800133>
- [19] Vnouček, M. (n.n.). Kompozitní materiál. *Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni, Oddělení povrchového inženýrství pro předmět SMA*. Dostupné na: [https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09\\_10.pdf](https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf)

- [20] Daďourek, K. (2007). Kompozitní materiály – druhy a jejich užití. *Liberec: Technická univerzita v Liberci*, 1. vydání. ISBN 80-737-2279-8.
- [21] Ústav materiálového inženýrství. (2014). Kompozitní materiály. *České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní*. Dostupné na: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6\\_kompozitni-materialy.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf)
- [22] Matysík, J. (n.d.). *2D tkaniny*. Veba.  
Dostupné na: <http://www.veba.cz/cs/2d-tkaniny>
- [23] Arcs. (2017). *Ruční kladení*. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů.  
Dostupné na: <https://polymer-composites.cz/hand-lay-up/>
- [24] Arcs. (2017). *Pultruze (tažení)*. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů. Dostupné na: <https://polymer-composites.cz/pultrusion/>.
- [25] Arcs. (2017). *Odstředivé lití*. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů.  
Dostupné na: <https://polymer-composites.cz/centrifugal-casting/>.
- [26] Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů. (2021).  
Navíjení (Filament winding).  
Dostupné na: <https://polymer-composites.cz/filament-winding/>
- [27] Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů. (2021).  
Lisování (Press moulding).  
Dostupné na: <https://polymer-composites.cz/press-moulding/>
- [28] Krebs, S. (2020). Technologie zpracování plastů a kompozitů: Přednáška č. 3 – Extruze plastů. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.  
Dostupné na: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/116/Pedmt-2331507-c-3-2016-03-08.pdf>
- [29] UV Star Printing Company. (n.d.). Vakuové tvarování plastů.  
Dostupné na: <https://www.uvstar.cz/vice-o-tisku/vakuove-tvarovani-plastu/>

## 19. Přílohy

### Seznam příloh

Příloha 1: Rešerše – Přehled současných výrobců kompozitů s termoplastickou maticí a karbonem, kevlarem či čedičem.....	101
Příloha 2: Boční díl formy .....	118
Příloha 3: Spodní díl formy .....	119
Příloha 4: Data sheet PE .....	120
Příloha 5: Data sheet PEz.....	122

## Příloha 1: Rešerše – Přehled současných výrobců kompozitů s termoplastickou maticí a karbonem, kevlarem či čedičem

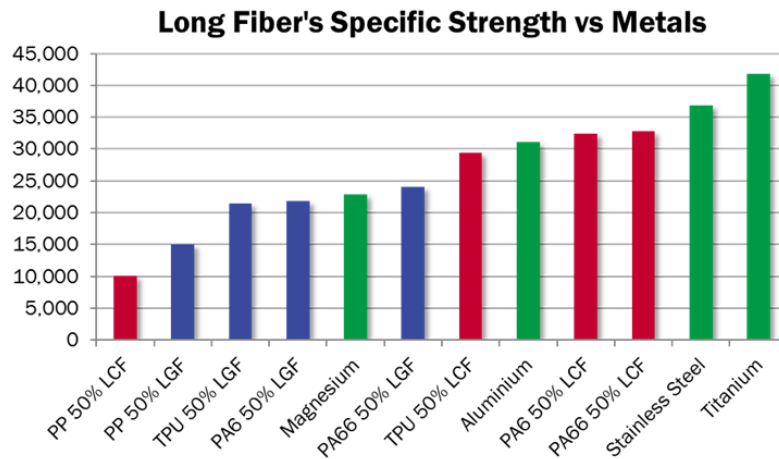
Následující sekce této práce nabízí přehled současných výrobců kompozitů s termoplastickou maticí a karbonem, kevlarem či čedičem a zohledňuje celosvětový trh. Jsou zde shrnuty informace jako název a sídlo firmy, délka působení na trhu, typ produktu, vlastnosti produktů uváděné výrobcem a případné primární využití, je-li uvedeno. Další relevantní informací by byla technologie výroby těchto kompozitů, tu se ale nepodařilo dohledat z veřejně dostupných zdrojů (webové stránky výrobců), pravděpodobně kvůli snaze výrobců bránit svoje „know-how“. V přehledu jsou obsaženy následující společnosti: **PlastiComp, Avient Corporation, Ensigner, Covestro a Mitsui Chemicals**, které vyrábí kompozity s karbonovými vlákny, popř. s kombinací karbonových a skleněných vláken. Dále **Evonik** vyrábí kompozity se se skleněnými, uhlíkovými nebo aramidovými vlákny, ale přesné složení nijak nespecifikuje.

### PlastiComp

Základní informace	
<b>Produktové portfolio</b>	specializované polymerní materiály, termoplastické kompozitní materiály, specializované služby a řešení na míru
<b>Kompozitní materiály a využitá vlákna</b>	termoplastické kompozity vyztužené dlouhými karbonovými vlákny a tzv. hybridní kompozity vyztužené dlouhými karbonovými a skleněnými vlákny

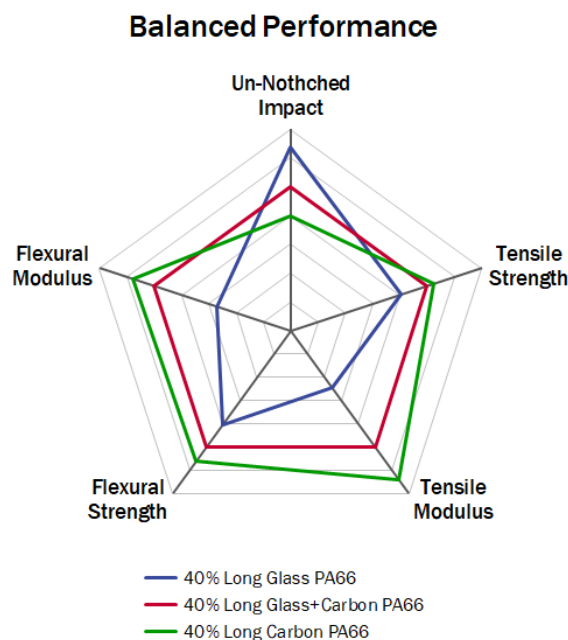
Jedním z předních výrobců kompozitů s termoplastickou maticí je americká společnost **PlastiComp, Inc.** založená v roce 2003 se sídlem ve Winoně v Minnesotě. Firma pracuje s **technologii vyztužení dlouhými vlákny za účelem vytváření silnějších, pevnějších a lehčích materiálů**. Primárně jsou využívána skleněná a karbonová vlákna. [A] Z pohledu této práce jsou relevantní dva materiály: termoplastické kompozity vyztužené dlouhými karbonovými vlákny a tzv. hybridní kompozity vyztužené dlouhými karbonovými a skleněnými vlákny.

U **termoplastických kompozitů vyztužených dlouhými karbonovými vlákny** výrobce uvádí následující výhody: vysoký poměr pevnosti k hmotnosti, tlumení vibrací a zvuku, odolnost vůči cyklické únavě, deformaci a šíření trhlin, nebo udržení výkonu nejen při nízkých, ale i vysokých teplotách. [B] Následující graf zobrazuje sílu materiálů vyztužených karbonovým vláknem oproti kovům.



Obrázek 1, zdroj: [B]

Oproti tomu nabízí **hybridní kompozity vyztužené dlouhými karbonovými a skleněnými vlákny** cenově efektivní variantu kompozitu obsahující karbonová vlákna a vysokou adaptabilitu. Na základě konkrétního poměru skleněných a karbonových vláken lze přizpůsobit vlastnosti a cenu kompozitu pro specifická využití. Vyvážení jednotlivých funkcí při využití různých materiálů je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obrázek 2, zdroj: [C]



## Avient Corporation

Základní informace	
<b>Produktové portfolio</b>	udržitelné a recyklovatelné materiály, kompozity, technologie užívající vlákna, polymerní formulace, inkousty, polymerní aditiva, polymerní barviva, termoplastické elastomery a vinylové formulace
<b>Kompozitní materiály a využitá vlákna</b>	termoplasty s dlouhými vlákny a s krátkými vlákny, využitá vlákna: skleněná a karbonová vlákna

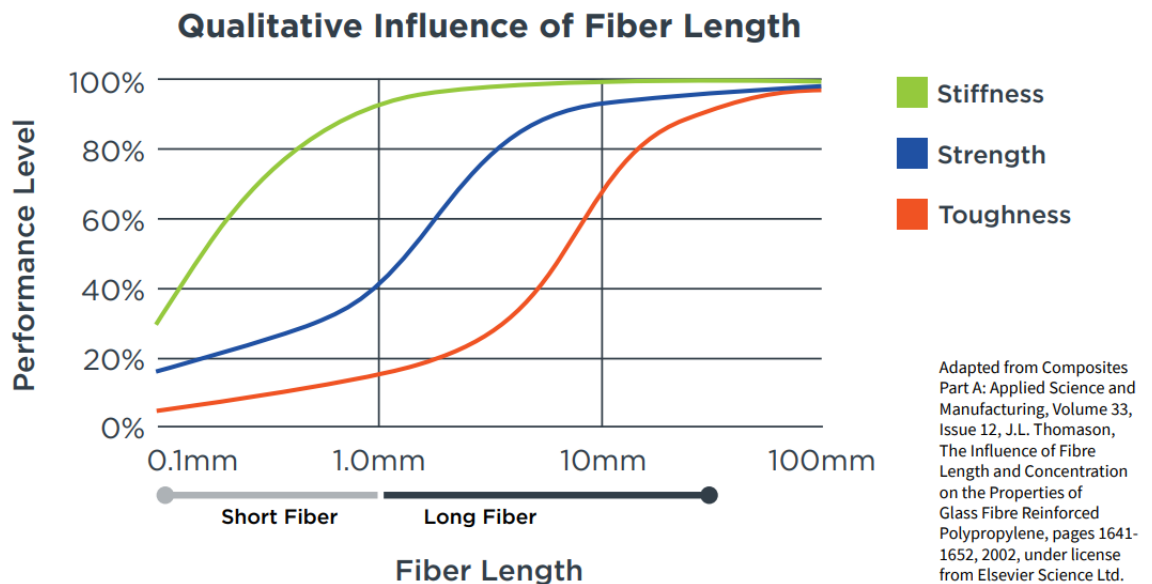
PlastiComp je od roku 2018 součástí PolyOne globální korporace založené roku 2002, která od roku 2020 nese název **Avient Corporation** a sdružuje výrobce polymerních materiálů z celého světa. Avient Corporation se primárně se **soustředí na udržitelné a recyklovatelné materiály, kompozity, technologie využívající vlákna, polymerní formulace, polymerní aditiva, polymerní barviva, inkousty, termoplastické elastomery a vinylové formulace.** [D]

Co se týče kompozitů s termoplastickou matricí s příměsí vláken, Avient Corporation nabízí termoplasty s dlouhými vlákny a s krátkými vlákny. **Termoplasty s dlouhými vlákny** slouží dle výrobce primárně k optimalizaci tvrdosti, pevnosti a houževnatosti při současném udržení nízké váhy materiálu. Strukturální výkon takovýchto kompozitů je pak srovnatelný s výkonem kovů. Avient vyrábí **dva produkty využívající karbon** a to Complet<sup>TM</sup> LCF, který využívá příměs čistě karbonu, a Complet<sup>TM</sup> Hybrid, jež kombinuje karbonová a skleněná vlákna. [E]

**Termoplasty s krátkými vlákny** jsou ideální kombinací zlepšených mechanických vlastností ale nižších nákladů než u termoplastů s dlouhými vlákny. Tyto materiály mají lepší poměr pevnosti k hmotnosti než běžně používané kovy jako jsou např. hliník nebo ocel, a zároveň nabízí lepší vlastnosti jako je odolnost vůči poškrábání, izolační schopnosti nebo odolnost vůči korozi. [F]

Avient Corporation vyrábí kompozity s 10-50% podílem vláken. Produktem, ve kterém lze využít příměs **karbonových vláken** je řada amorfních a semi-krystalických pryskyřic Edgetek™, jež je využitelná v mnoha odvětvích. [G]

Následující obrázek poskytuje porovnání kompozitů s krátkými vlákny a dlouhými vlákny.



Obrázek 3, zdroj: [E]

## Ensigner

Základní informace	
<b>Produktové portfolio</b>	hluboký záběr v oblasti plastových řešení od vstřikování, přes přídatné obrábění, výrobu slitin, sinterovaných plastů či izolačních profilů, až po kompozity
<b>Kompozitní materiály a využitá vlákna</b>	termoplastické kompozitní materiály zahrnující semipregy, prepregy, organosheety, využitá vlákna: skleněná a karbonová vlákna

Dalším důležitým výrobcem na trhu je firma **Ensigner** založená roku 1966. Společnost sídlí ve městě Nufringen v Bádensku-Württembersku v Německu, ale působí v celé Evropě, Severní Americe, Jižní Americe a Asii. [H] Ensigner má **hluboký záběr v oblasti plastových řešení od vstřikování, přes přídatné obrábění, výrobu slitin, sinterovaných plastů či izolačních profilů, až po kompozity**. Její výrobky jsou využívány v oblastech jako letectví a kosmonautika, strojírenství, stavebnictví, ale i potravinářství či zdravotnictví.

V oblasti kompozitů se firma zabývá **vývojem technologií pro produkci termoplastických kompozitních materiálů zahrnujících semipregy, prepregy, organosheety**. [I, J] Stejně jako u předchozích výrobců patří k předním výhodám těchto materiálů vyšší poměr tuhosti k hmotnosti a pevnosti k hmotnosti, vyšší odolnosti proti nárazu, chemickou a tepelnou odolnost, a v neposlední řadě také možnost přizpůsobit poměr vláken konkrétním požadavkům na mechanické vlastnosti. [J]

Z pohledu této práce jsou nejzajímavější prepregy a organosheety. Charakteristikou těchto **prepregů** je, že se jedná o plně impregnované a plně zpevněné jednovrstvé desky vyrobené z uhlíkových, nebo skleněných vláken s použitím široké škály termoplastických materiálů jako matrice.

Jako **matrice jsou využívány technické polymery jako polykarbonáty**, vysoce výkonné plasty jako PEI, PEEK a PEKK nebo polyamidy. Ensigner ale také vyrábí prepregy na míru pro konkrétní využití. Mezi konkrétní produkty patří TECATEC PEEK MT CF50 IP, TECATEC PEEK CF50 IP, TECATEC PC CF50 IP, TECATEC PPS GF50 IP a TECATEC PA66 GF43 IP. [K] Oproti epoxidovým materiálům jsou tyto prepregy odolnější vůči nárazu, teplotě a mají vyšší chemickou odolnost. **Prepregy** se dají použít k výrobě organických listů, termoplastických kompozitních dílů, tvarů pažby nebo tepelně tvarovaných dílů. Tyto produkty se pak využívají např. ve sportovním, automobilovém, či petrochemickém průmyslu. Alternativně je lze využít i v letectví nebo lékařství. [K]

**Termoplastické organosheety** jsou plně impregnované a zpevněné vícevrstvé prepregové desky **vyrobené z uhlíkových nebo skleněných vláken a široké škály termoplastických materiálů** jako matrice. Organické listy se skládají z několika vrstev předpřipraveného, nebo polopřipraveného materiálu, kde jsou naskládány podle specifikací zákazníka a poté konsolidovány, aby vytvořily polotovar o tloušťce až 5 mm. [L] Vlastnosti se pak odvíjí od použitých semipregů a prepregů, výhody prepregů byly zmíněny v předchozím odstavci a průmyslová využití jsou taktéž stejná. Ensigner vyrábí tyto základní organosheety TECATEC PEEK MT CF50 OS, TECATEC PEEK CF50 OS, TECATEC PC CF50 OS, TECATEC PPS GF50 OS a TECATEC PA66 GF43 OS. [L]

## Evonik

Základní informace	
<b>Produktové portfolio</b>	aditiva, produkty pro výživu a péči o lidi a zvířata, tzv. chytré materiály, materiály pro výkon („performance materials“), a také technologie a infrastruktura chemické výroby
<b>Kompozitní materiály a využitá vlákna</b>	matricové systémy, termoplastické UD pásy, strukturální pěny, potahy a gelové nátěry a v neposlední řadě aditiva, využitá vlákna: skleněná, karbonová a aramidová vlákna

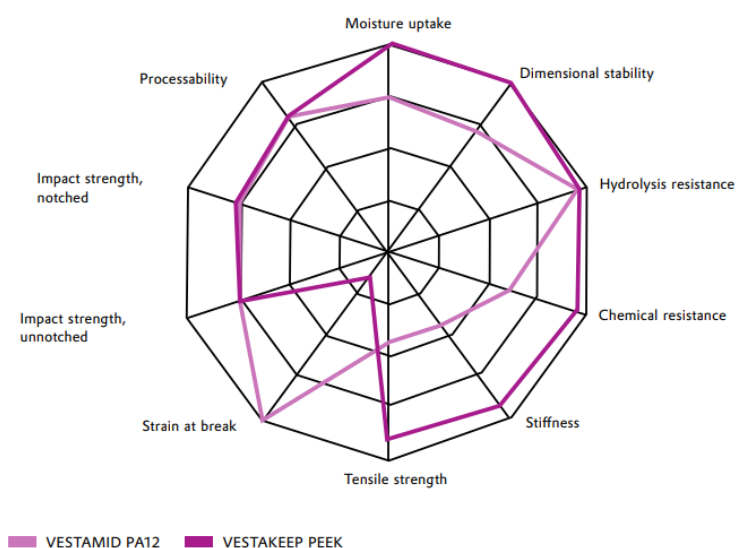
Dalším výrobcem zabývajícím se výrobou kompozitů je německá společnost **Evonik** sídlící v Essenu v Severním Porýní-Vestfálsku patřící pod konglomerát RAG-Stiftung. Jedná se o druhou největší chemickou společnost v Německu a jednu z největších na celém světě, která je také veřejně obchodovaná na burzách MDAX a STOXX Europe 600. [M] Firma Evonik má **široké produktové portfolio, zabývá se výrobou speciálních aditiv, produktů pro výživu a péči o lidi a zvířata, tzv. chytrých materiálů, materiálů pro výkon („performance materials“) a zároveň technologií a infrastrukturou chemické výroby.** [N]

Součástí výroby materiálů pro výkon je i výroba **kompozitů**. I zde je portfolio široké, zahrnuje **matricové systémy** (termosety, epoxidové kompozity, methakrylátové monomery, bismaleimidy, formulace epoxidových a PU pryskyřic, polyuretanové kompozity, termoplasty a matricové systémy, polyetheretherketon a polyamidy), **termoplastické UD pásy, strukturální pěny** (polymethakrylimid), potahy a gelové nátěry (polyisokyanáty, diaminy) a v neposlední řadě **aditiva** (kompozity vyztužené skleněnými vlákny, aditiva pro lepení past). [O]

Podobně jako ostatní výrobci, uvádí Evonik u termoplastických matricových kompozitů při vyztužení vláknou mnohé výhody jako zkrácení doby na výrobu komponent, absorpce menšího množství vody (závisí na použité matrici) a také možnost skladovat je neomezeně, je-li zajištěna pokojová výroba. Dále je vyzdvižena snazší technika spojování (fúze), vyšší pracovní teplota až do 200 stupňů Celsia a vyšší odolnost vůči nárazu. Evonik doporučuje využití takovýchto kompozitů hlavně pro střední a velkou výrobu.

Z kompozitů s termoplastickou maticí je z pohledu této práce nejrelevantnější produkt polyetheretherketon VESTAKEEP®, který je vhodný jako matrice se skleněnými, uhlíkovými nebo aramidovými vlákny. [O] Dále také polyamid VESTAMID® PA12, se kterým je možné pracovat při nižších teplotách a je tudíž vhodný pro využití v automobilovém, sportovním, petrochemickém odvětví a v neposlední radě v ortopedii. [O] Následující obrázky poskytují srovnání obou materiálů:

Relative comparison of PA12 and PEEK recommended for composites



Obrázek 4, zdroj: [O]

Properties of PA12 and PEEK matrix materials for UD tapes					
PROPERTIES		UNIT	VESTAMID* PA12	VESTAKEEP* PEEK	TEST METHOD
Polymer		-	Polyamide 12	Polyetheretherketone	-
Density	23°C	g/cm <sup>3</sup>	1.01	1.30	ISO 1183
Melting temperature DSC	2nd heating	°C	178	340	ISO 11357
Tensile test					ISO 527-1
Stress at yield		MPa	46	100	ISO 527-2
Strain at yield		%	5	5	ISO 527-2
Strain at break		%	>200	30	ISO 527-2
Tensile Modulus		MPa	1400	3700	ISO 527-1
CHARPY notched impact strength	23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	5C <sup>1</sup>	6C <sup>1</sup>	ISO 179/1eA
CHARPY notched impact strength	-30°C	kJ/m <sup>2</sup>	4C <sup>1</sup>	6C <sup>1</sup>	ISO 179/1eA

C<sup>1</sup>: complete break

Obrázek 5, zdroj: [O]

## Covestro

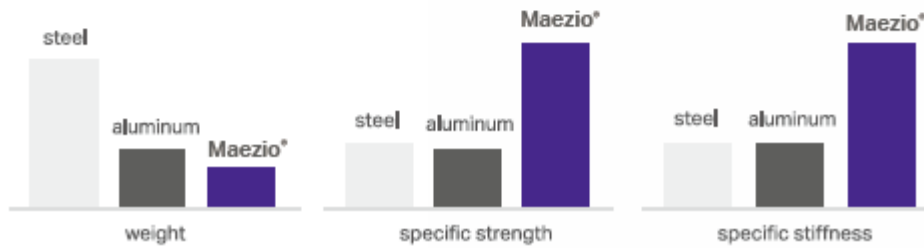
Základní informace	
<b>Produktové portfolio</b>	materiály pro 3D tisk, adhesiva, povlakové materiály, kompozity, elastomery, fólie, pěny, plasty a termoplastický polyuretan
<b>Kompozitní materiály a využitá vlákna</b>	termosety na bázi PU, technologie na dimenzování vláken a termoplastické kompozity, využitá vlákna: skleněná a karbonová vlákna

Dalším důležitým hráčem na trhu s kompozity je **Covestro**, jeden z předních světových výrobců polymerních materiálů. Firma sídlí v Leverkusen v Německu, ale působí na všech kontinentech. [P] Covestro má **široké portfolio produktů** zahrnující **materiály pro 3D tisk, adhesiva, povlakové materiály, kompozity, elastomery, fólie, pěny, plasty a termoplastický polyuretan**. [R] Tyto materiály jsou pak využívány v mnoha odvětvích, například v automobilovém průmyslu, stavebnictví, kosmetice a zdravotní péči, ale i v energetickém, dopravním či námořním průmyslu. [S]

V rámci této práce jsou nejvíce relevantní **kompozity**. Zde se firma zabývá **termosety na bázi PU, technologiemi na dimenzování vláken a termoplastickými kompozity**. [T] **Termoplastické kompozity** Maezio®, které Covestro vyrábí, jsou primárně vytvořené pro výkon a možnost škálování, a to díky kombinaci vysoké mechanické pevnosti, výdrži, lehkosti materiálu a estetičnosti. Tyto kompozity kombinují sílu karbonových či skleněných vláken s výkonem a flexibilitou termoplastů. Výhodou Maezio® materiálů je, že je lze velice efektivně zpracovat při krátkých dobách jednotlivých výrobních cyklů a že jsou recyklovatelné. Jsou **kompatibilní s několika výrobními technologiemi** včetně lisování za tepla, automatizovaného pokládání pásky (automated tape laying - ATL), automatického ukládání vláken (automated fiber placement - AFP) a funkční integrace vstřikováním. Výsledné materiály mají kovově vypadající povrch, který je kompatibilní s celou řadou možností potahování a zdobení. Covestro primárně dodává tyto materiály jako pásky a listy. [U] Následující obrázky poskytují porovnání vlastností Maezio® materiálů oproti slitinám kovů jako je např. slitina hořčíku a hliníku.

Properties	Maezio <sup>®</sup> Composite Carbon Fiber	Magnesium Alloy Aluminum
Specific Stiffness	+++	+
Specific Strength	+++	+
Warpage Resistance	++	+++
Light Weight	+++	+
Fatigue Strength	+++	+
Corrosion Resistant	++	-
Transparent to X-Rays	+++	-
Fire Resistant	++	+++

Property comparison of metals and CFRTP composites.



Obrázek 6, zdroj: [V]

	Maezio <sup>®</sup> Composites Carbon Fiber	Thermoset Composites Carbon Fiber	Magnesium & Aluminum Alloy	Aluminum CNC
Processing Temperature	Medium	Low	Very High	Low
Shelf-life	Long (store at room temp.)	Short (store at low temp.)	Long (store at room temp.)	Long (store at room temp.)
Recyclability	Recyclable	Difficult	Recyclable	Recyclable
Cycle Time	Short	Long	Normal	Very Long
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.5	1.5	1.8	2.7
Total cost of finished parts	Low	High	Medium	Very High
Surface	'A class' achievable	'A class' proven	'A class' achievable	'A class' proven

Obrázek 7, zdroj: [V]



## Mitsui Chemicals

Základní informace	
<b>Produktové portfolio</b>	produkty pro automobilové a dopravní odvětví, zdravotní péče, jídlo a balení jídla a vývoj materiálů
<b>Kompozitní materiály a využitá vlákna</b>	kompozity s termoplastickou maticí a karbonem primárně vyvinuty pro automobilový průmysl, využitá vlákna: karbonová vlákna

Poslední firma, která bude v této práci rozebrána, je japonská společnost **Mitsui Chemicals**, která vznikla roku 1997 spojením Mitsui Petrochemical Industries a Mitsui Toatsu Chemicals. Celková historie mateřských firem ovšem sahá až do roku 1912. Dnes už velký konglomerát působí primárně v Asii, Evropě a Americe, a mimo Japonsko vyváží 45 % svých výrobků. Výroba se soustředí především na **produkty pro automobilové a dopravní odvětví, zdravotní péči, jídlo a balení jídla a v neposlední řadě také na vývoj materiálů**. [W]

V roce 2019 Mitsui Chemicals ve spolupráci s ARRK (součást Mitsui Chemicals Group) představila **kompozity s termoplastickou maticí a karbonem**, které byly vyvinuty primárně pro automobilový průmysl, a to kvůli vzrůstající poptávce po možnosti vyrábět součástky, které jsou geometricky komplexní, mají vysokou pevnost, tuhost, ale zároveň nízkou hmotnost. Takovéto vlastnosti jsou ovšem využitelné i v mnoha dalších odvětvích, což je důvod, proč do vývoje kompozitů firma expanduje. Mitsui Chemicals Group tak vyrábí a vyvíjí **jednosměrně vyztužené termoplastické pásy na bázi CF-PP** se speciálně vyvinutou přilnavostí vláken a modifikovanou PP maticí (TAFNEX CF-PP UD), čímž dodává polotovary pro vývoj inovativních komponentů. [X]

Je to právě **skupina výrobků TAFNEX™**, která je z hlediska této práce nejzajímavější, jelikož **využívá karbonových vláken**, a zahrnuje: TAFNEX™ CF/PP, TAFNEX™ CF/PP sendvičový panel z pěnového PP a TAFNEX™ CF / PP - UD navíjecí trubice.

**TAFNEX™ CF / PP je jednosměrná páska (UD páska) složená z uhlíkových vláken a polypropylenu [PP], může být aplikována na lokální vyztužení vstřikovaných, nebo lisovaných dílů. A také na výrobu dílů ve formě trubek nebo, laminovaného plechu. Použitím tohoto materiálu lze snížit hmotnost dílu, ale současně zachovat jeho pevnost. Zároveň ale nabízí vynikající zpracovatelnost díky krátké době zpracování a možnosti sekundárního zpracování. V oblasti automobilů a jízdních kol může TAFNEX™ CF / PP přispět ke snížení hmotnosti dílu, zlepšení odolnosti proti nárazu a tlumení vibrací. [Y] Následující obrázky poskytují detailnější charakteristiku tohoto materiálu.**

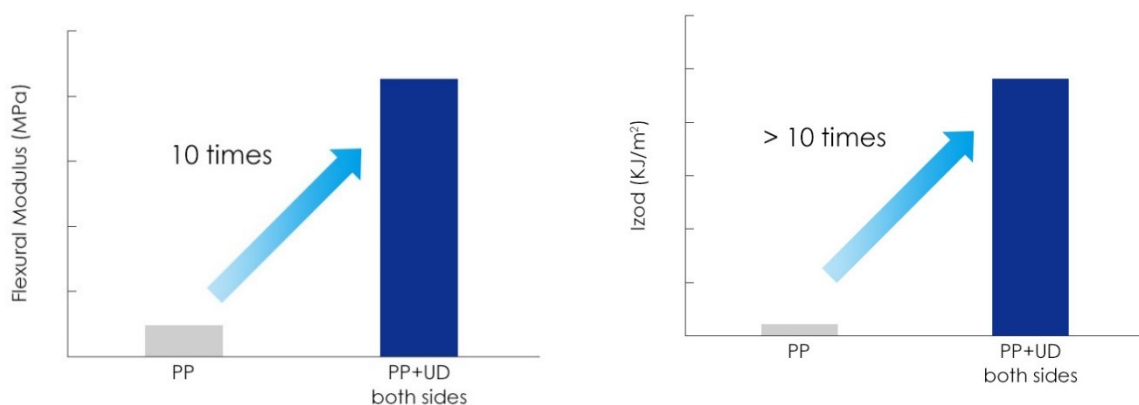
		Method	TAFNEX™ CF/PP	
Fiber Volume	%	JIS K7075	40	50
Density	Kg/m <sup>3</sup>	Mitsui Chemicals method	1.27	1.31
Tensile Strength	MPa	ASTM D3039	1200	1420
Tensile Modulus	GPa	ASTM D3039	100	110
Flexural Strength	MPa	ASTM D790	900	960
Flexural Modulus	GPa	ASTM D790	85	90
Specific strength	kNm/kg		945	1145
Specific modulus	10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>		79	92

NOTICE TO USERS: The information contained is based on Mitsui Chemicals's present knowledge and experience, however, Mitsui Chemicals does not assume any liability for the accuracy and completeness of such information.

\* Cited by catalog value as a reference

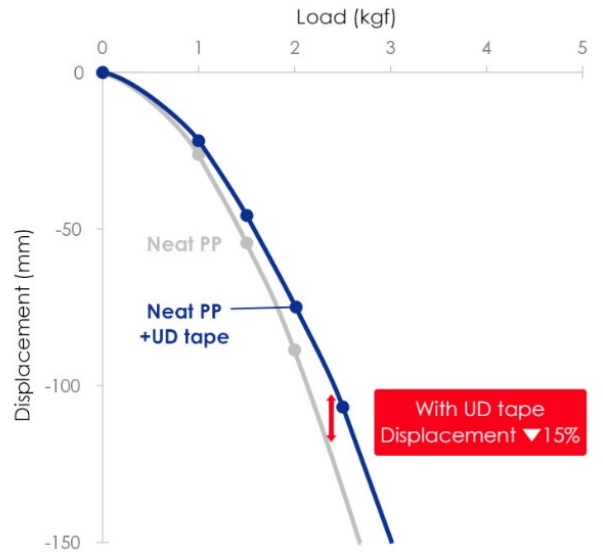
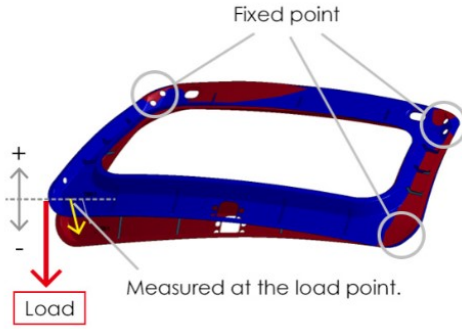
\* Figures are representative values, not guaranteed.

Obrázek 8, zdroj: [Y]



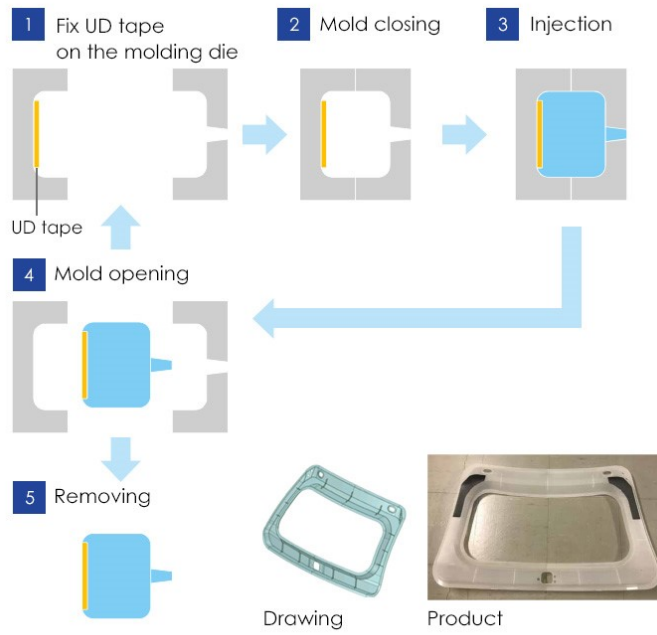
Obrázek 9, zdroj: [Y]

Blue: Before (initial shape)  
 Red: After (load 10kgf)



\* Figures are representative values, not guaranteed.

Obrázek 10, zdroj: [Y]



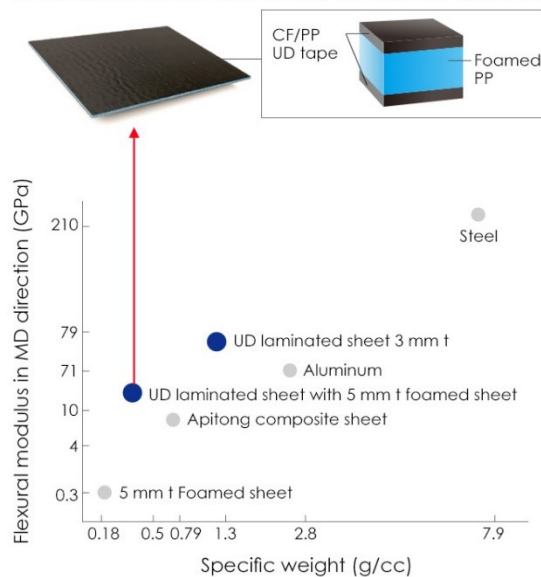
Obrázek 11, zdroj: [Y]

**TAFNEX™ CF/PP sendvičový panel z pěnového PP je materiál vyrobený skládáním sendvičů pěnových polypropylenových desek v UD páskách.**

Je lehký a tvrdý, pomáhá snižovat hmotnost dílu při zachování pevnosti. Díky tepelně-izolačním vlastnostem pěnového PP lze materiál použít jako izolaci s vysokou pevností. [Z] Následující obrázky ukazují vyztužení tvrdých pěnových plechů páskou UD.

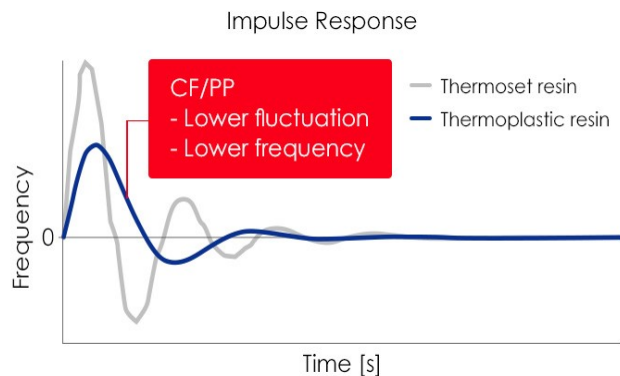
Obrázek 12, zdroj: [Z]

Hard foamed sheet reinforced by UD tape on double side

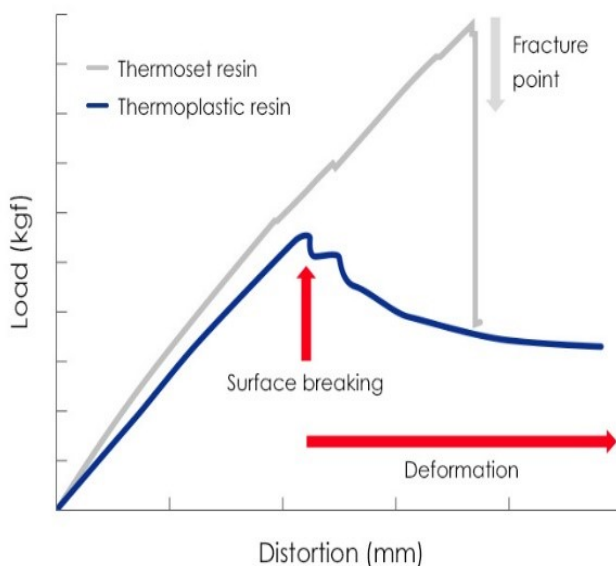


\* Figures are representative values, not guaranteed.

**TAFNEX™ CF / PP - UD navíjecí trubice** má stejné vlastnosti a výhody jako TAFNEX™ CF/PP, je ale rozdílný tím, že může být zpracován do tvaru trubice pomocí navíjení vlákna. [ZZ] Následující obrázky ukazují CF/PP -UD v porovnání s dalšími materiály:



Obrázek 13, zdroj: [ZZ]



Obrázek 14, zdroj: [ZZ]

## Zdroje k příloze 1:

- [A] Wollan, E. (2020, September 23). *About PlastiComp - Long Fiber Innovation Made-to-Order*. PlastiComp. Dostupné na: <https://www.plasticomp.com/about-plasticomp/>.
- [B] PlastiComp. (2019, April 18). *Long Carbon Fiber - Lightweighting and Mass Reduction*. Dostupné na: <https://www.plasticomp.com/mass-reduction-lightweighting-carbon-fiber/>.
- [C] PlastiComp. (2019, April 18). *Complēt Hybrid – Long Carbon + Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composites*. Dostupné na: <https://www.plasticomp.com/hybrid-long-glass-carbon-fiber/>.
- [D] Avient Corporation. (n.d.). *Avient Technologies*. Polymer Products: Colorants, Additives & Formulations. Dostupné na: <https://www.avient.com/products>.
- [E] Avient Corporation. (2020). *Long Fiber Technologies Brochure*. Dostupné na: <https://www.avient.com/sites/default/files/2020-09/comple-t-onforce-lft-overview-brand-brochure.pdf>
- [F] Avient Corporation. (n.d.). *Short Fiber Reinforced Formulations*. Dostupné na: <https://www.avient.com/products/engineered-polymer-formulations/structural-fiber-reinforced-formulations/short-fiber-reinforced-formulations>.
- [G] Avient Corporation. (n.d.). *High-Performing Thermoplastics*. Dostupné na: <https://www.avient.com/products/engineered-polymer-formulations/general-engineered-formulations/edgetek-engineered-polymer-formulations>.
- [H] Ensinger. (2021). *O nás: Ensinger - High performance plastic solutions*. Dostupné na: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/o-nas>.
- [I] Ensinger. (2021). *High performance plastic solutions: Ensinger*. Dostupné na: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz>.
- [J] Ensinger. (2021). *Thermoplastic composite materials*. Dostupné na: <https://www.ensingerplastics.com/en/composites/composite-materials>.
- [K] Ensinger. (2021). *Thermoplastic prepreg composites*. Dostupné na: <https://www.ensingerplastics.com/en/composites/composite-materials/prepreg>.

- [L] Ensinger. (2021). *Thermoplastic organosheet composites*. Dostupné na: <https://www.ensingerplastics.com/en/composites/composite-materials/organosheet>.
- [M] Evonik Industries. (2020, March 20). *Evonik at a glance*. Dostupné na: <https://corporate.evonik.com/en/media/evonik-at-a-glance-618.html>.
- [N] Evonik Industries. (2020, December 14). *Operative Divisions*. Dostupné na: <https://corporate.evonik.com/en/company/divisions>.
- [O] Evonik Industries. (2018). *Evonik for composites: Products for efficiency and performance*. pp. 27 – 30. Dostupné na: <https://tp-composites.com/wp-content/uploads/sites/3/2019/11/Composite-10-2018.pdf>
- [P] Covestro. (2020). *Solution Center Covestro*. Covestro AG. Dostupné na: <https://solutions.covestro.com/en>.
- [R] Covestro. (2020). *Materials that make the world a brighter place*. Dostupné na: <https://solutions.covestro.com/en/materials>.
- [S] Covestro. (2020). *Solutions for every day life*. Dostupné na: <https://solutions.covestro.com/en/industries>.
- [T] Covestro. (2020). *Composites*. Dostupné na: <https://solutions.covestro.com/en/materials/composites>.
- [U] Covestro. (2020). *Maezio®: lightweight composites by Covestro*. Dostupné na: <https://solutions.covestro.com/en/brands/maezio>.
- [V] Covestro. (n.d.). *Maezio®: Continuous fiber-reinforced thermoplastic composites - brochure*. Dostupné na: <https://solutions.covestro.com/en/brands/maezio>.
- [W] Mitsui Chemicals. (2020). *About Mitsui Chemicals: MITSUI CHEMICALS, INC.* Dostupné na: <https://jp.mitsuichemicals.com/en/corporate/number/>.
- [X] Mitsui Chemicals. (2020). *ARRK and Mitsui Chemicals: Composite Solutions*. Dostupné na: [https://eu.mitsuichemicals.com/mce/2019/2019\\_0717\\_02.htm](https://eu.mitsuichemicals.com/mce/2019/2019_0717_02.htm).

[Y] Mitsui Chemicals. (2020). *TAFNEX™ CF/PP*. Dostupné na:

<https://jp.mitsuichemicals.com/en/service/product/tafnex.htm>.

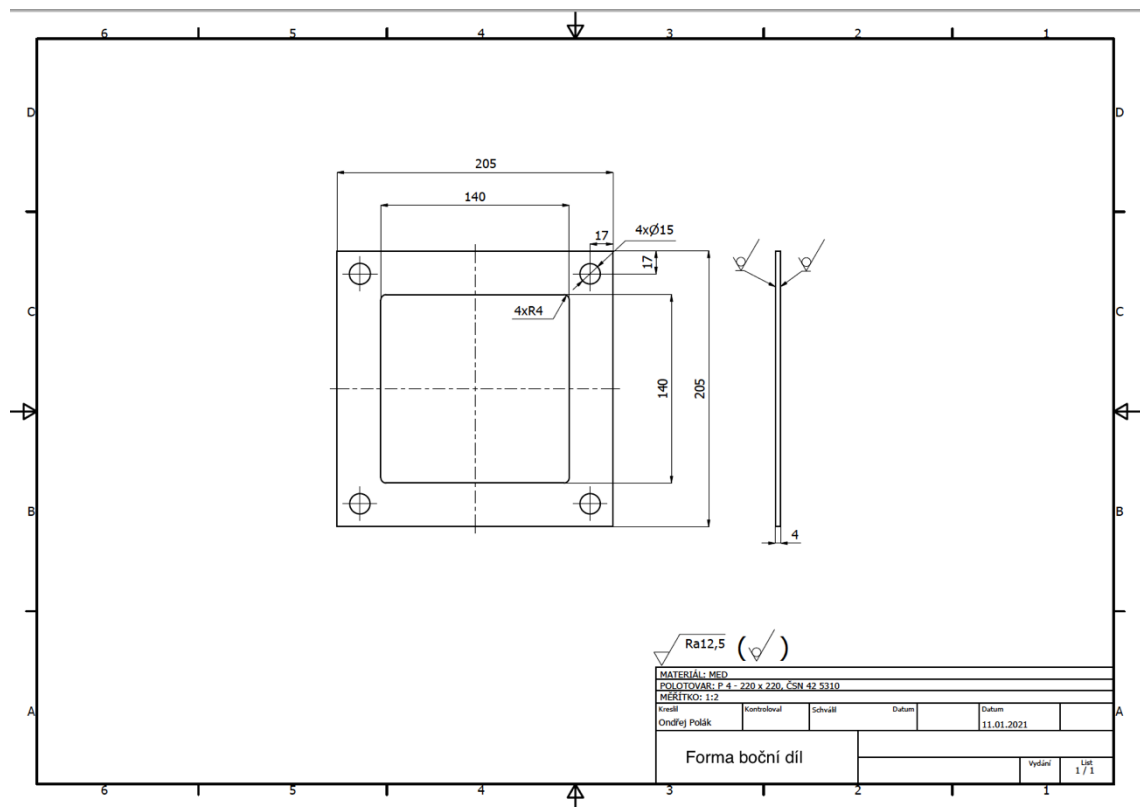
[Z] Mitsui Chemicals. (2020). *TAFNEX™ CF/PP - Foamed PP Sandwich Panel*.

Dostupné na: <https://jp.mitsuichemicals.com/en/service/product/tafnex-paulownia.htm>.

[Z] Mitsui Chemicals. (2020). *TAFNEX™ CF/PP - UD Winding Tube*. Dostupné na:

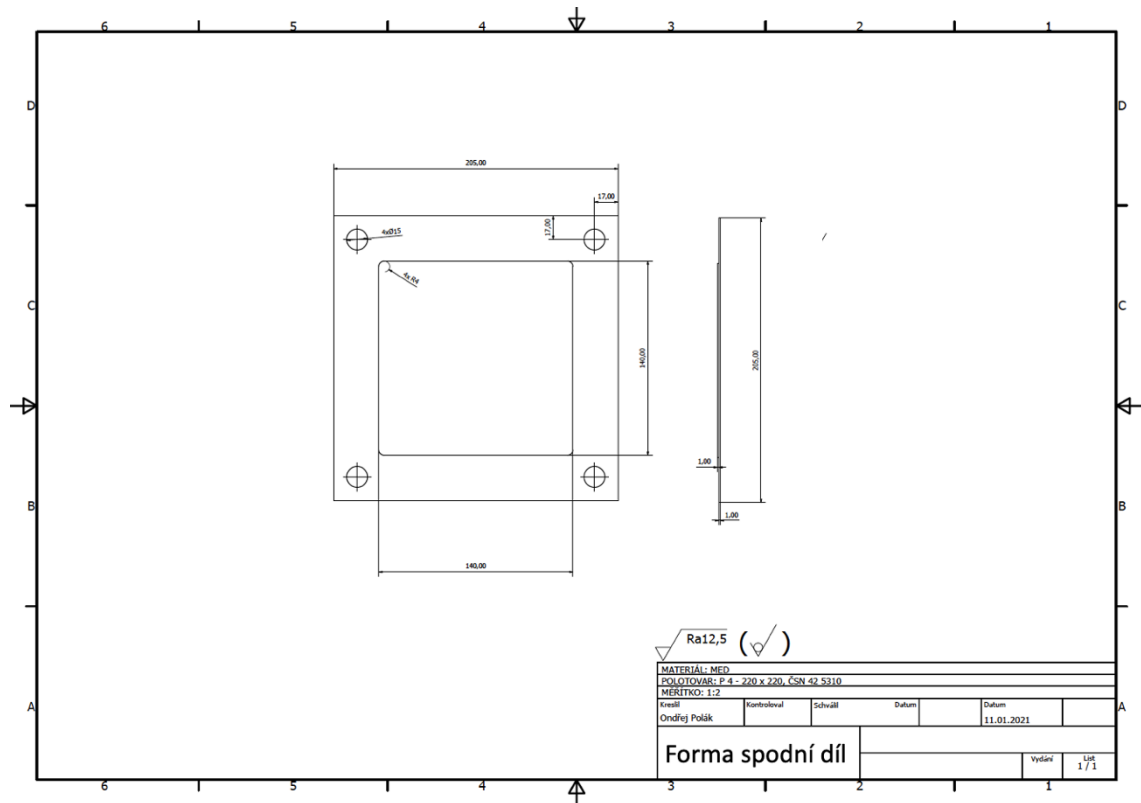
<https://jp.mitsuichemicals.com/en/service/product/tafnex-tube.htm>.

## Příloha 2: Boční díl formy





### Příloha 3: Spodní díl formy



## Příloha 4: Data sheet PE

### Technical Information



## DOWLEX™ 2629.10UE Polyethylene Resin

### Overview

DOWLEX™ 2629UE Polyethylene Resin for rotational and injection moulding is specifically designed for applications requiring excellent environmental stress crack resistance and impact strength combined with low warpage and good processing. Processing and Stabilisation: DOWLEX™ 2629UE Polyethylene Resin is fully heat and UV stabilised resulting in a wide processing latitude, good colour retention and long life expectancy. The powder version is named DOWLEX™ 2629.10UE Polyethylene Resin.

#### Applications:

- Intermediate bulk containers
- Drums for chemicals
- Boats
- Freezer containers
- Fish crates
- Small tanks

#### Complies with:

- Europe EU-Directive 2002/72/EC
- U.S. FDA CFR 177.1520(c)3.1a

Consult the regulations for complete details.]

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density	0.935 g/cm <sup>3</sup>	0.935 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (190°C/2.16 kg)	4.0 g/10 min	4.0 g/10 min	ISO 1133
Environmental Stress-Cracking Resistance			ASTM D1693
122°F (50°C), 10% Antarox, Compression Molded	400 hr	400 hr	
122°F (50°C), 100% Antarox, Compression Molded	> 1000 hr	> 1000 hr	
Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Stress (Yield, Compression Molded)	2540 psi	17.5 MPa	ISO 527-2
Tensile Strain (Break, Compression Molded)	650 %	650 %	ISO 527-2
Flexural Modulus (Compression Molded)	93500 psi	645 MPa	ISO 178
Impact	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Multi-Axial Instrumented Impact Energy			ISO 6603-2 <sup>1</sup>
-4°F (-20°C), Rotational Molded	48.7 to 64.9 ft-lb	66.0 to 88.0 J	
73°F (23°C), Rotational Molded	39.8 to 53.1 ft-lb	54.0 to 72.0 J	
Hardness	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Shore Hardness (Shore D, Compression Molded)	57	57	ISO 868
Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Heat Deflection Temperature			ISO 75-2/B
66 psi (0.45 MPa), Unannealed	126 °F	52.0 °C	
Vicat Softening Temperature	246 °F	119 °C	ASTM D1525 <sup>2</sup>
Melting Temperature	255 °F	124 °C	DSC
Peak Crystallization Temperature (DSC)	230 °F	110 °C	DSC

### Notes

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

<sup>1</sup> Plates of 3-4 mm thickness.

<sup>2</sup> Rate B (120°C/h), Loading 1 (10 N)

## Product Stewardship

The Dow Chemical Company and its subsidiaries ("Dow") has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our Product Stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our Product Stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products — from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

## Customer Notice

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that Dow products are not used in ways for which they are not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

## Medical Applications Policy

**NOTICE REGARDING MEDICAL APPLICATION RESTRICTIONS:** Dow will not knowingly sell or sample any product or service ("Product") into any commercial or developmental application that is intended for:

- long-term or permanent contact with internal bodily fluids or tissues. "Long-term" is contact which exceeds 72 continuous hours;
- use in cardiac prosthetic devices regardless of the length of time involved ("cardiac prosthetic devices" include, but are not limited to, pacemaker leads and devices, artificial hearts, heart valves, intra-aortic balloons and control systems, and ventricular bypass-assisted devices);
- use as a critical component in medical devices that support or sustain human life; or
- use specifically by pregnant women or in applications designed specifically to promote or interfere with human reproduction.

Dow requests that customers considering use of Dow products in medical applications notify Dow so that appropriate assessments may be conducted. Dow does not endorse or claim suitability of its products for specific medical applications. It is the responsibility of the medical device or pharmaceutical manufacturer to determine that the Dow product is safe, lawful, and technically suitable for the intended use. **DOW MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING THE SUITABILITY OF ANY DOW PRODUCT FOR USE IN MEDICAL APPLICATIONS.**

## Disclaimer

**NOTICE:** No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, the Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for the Customer's use and for ensuring that the Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

**NOTICE:** If products are described as "experimental" or "developmental": (1) product specifications may not be fully determined; (2) analysis of hazards and caution in handling and use are required; (3) there is greater potential for Dow to change specifications and/or discontinue production; and (4) although Dow may from time to time provide samples of such products, Dow is not obligated to supply or otherwise commercialize such products for any use or application whatsoever.

## Additional Information

<b>North America</b>		<b>Europe/Middle East</b>	+800-3694-6367
U.S. & Canada:	1-800-441-4369		+32-3-450-2240
	1-989-832-1426	Italy:	+800-783-825
Mexico:	+1-800-441-4369		
<b>Latin America</b>		<b>South Africa</b>	+800-99-5078
Argentina:	+54-11-4319-0100		
Brazil:	+55-11-5188-9000		
Colombia:	+57-1-219-6000	<b>Asia Pacific</b>	+800-7776-7776
Mexico:	+52-55-5201-4700		+603-7965-5392

[www.dowplastics.com](http://www.dowplastics.com)

This document is intended for use within Europe

Published: 2006-02-17

© 2009 The Dow Chemical Company





## RXP 1001 NATURAL (LD/70/600 $\mu$ )

Low Density PolyEthylene powder

### Description:

RXP 1001 NATURAL (LD/70/600 $\mu$ ) is a Low Density Polyethylene (LDPE) powder suitable for applications where high filler acceptance, low viscosity and good flow properties are required.

### General

MFI (190°C / 2.16kg)	ISO 1133	70	g/10min
Density	ISO 1183	0.919	g/cm <sup>3</sup>

### Thermal

Melting Point (DSC)	ISO 3146	104	°C
Vicat Softening Temperature (Condition A120)	ISO 306	75	°C

Datasheet

The data and information contained within this datasheet are based upon experiments and tests which RESINEX believes to be reliable and are only intended as indicative values. This datasheet does not constitute any specification limits. RESINEX advocates the testing of the product for suitability in the final application. Unless specifically mentioned, all values quoted relate to the base resin.

### Resinex Group Headquarters

Moerenstraat 85A  
B - 2370 Arendonk

Tel: +32 (0)14 67 25 11  
Fax: +32 (0)14 67 20 12

www.resinex.com  
resinex@resinexgroup.com

Issue Date:  
Mar 2015

Page 1 of 1