



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta strojní

Ústav materiálového inženýrství

# Volba alternativního polymerního materiálu pro výrobek aplikovaný v nemocničním lůžku

Diplomová práce

Autor: Vojtěch Vastl  
Vedoucí práce: Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D  
Konzultant: Ing. Vlastimil Jahoda, Linet spol. s.r.o.  
Rok: 2018

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vastl** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **419876**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Volba alternativního polymerního materiálu pro výrobek aplikovaný v nemocničním lůžku**

Název diplomové práce anglicky:

**Selection of alternative polymer material for a product applied in a hospital bed**

Pokyny pro vypracování:

Cíl: Nahrazení současně aplikovaného nevyhovujícího materiálu dle zvolených kritérií novým polymerním materiálem.  
Postup: Definování cíle - stanovení kritérií úspěchu či neúspěchu. Teoretické know-how - v teoretické části shrnout znalosti z odborných publikací. Definování rizik - vytipovat případné rizikové oblasti, které mohou nastat při nahrazení polymerního materiálu. Stanovení materiálů - dle nastudované problematiky a zadaných kritérií navrhnout max. 10 potenciálních materiálů, z nich jeden vybrat. Realizace experimentu - vytipované materiály vzorkovat v interní vstříkací lisovně a následně podrobit definovaným testům. Vyhodnocení experimentu - na základě výsledků vyvrátit či potvrdit vhodnost materiálu z hlediska zvolených kritérií. Závěr - stanovit nejvhodnější materiál pro konečnou aplikaci.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Meissner, Bohumil a Václav Zilvar. Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987. 306 s.
- [2] Mleziva, J.: Polymery: Výroba - struktura, vlastnosti a použití, Praha: Sobotáles, 1993
- [3] Gunter, E.: Design with Plastics, Carl Hansen Verlag, Munich 2006
- [4] Osswald, Tim A.: International Plastics Handbook : The resource for Plastics Engineers, Hanser Publishers, Munich, 2006
- [5] firemní literatura

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:

**Ing. Vlastimil Jahoda, LINET spol. s. r. o.**


Datum zadání diplomové práce: **03.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30.07.2018**

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.

17.4.2018  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta



## Poděkování

Rád bych vyjádřil poděkování vedoucí diplomové práce paní Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a trpělivost při vedení této diplomové práce. Rovněž bych chtěl poděkovat panu Ing. Vlastimilovi Jahodovi za ochotný přístup, poskytnutí informací a konzultace ve firmě Linet spol. s r.o.



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 1. 6. 2018

.....



# Abstract

This diploma thesis deals with the issue of selection of suitable polymer material. In particular the material for the product from Linet spol. s r.o., which is applied in the hospital bed. There are proposed five polymeric materials, based on the theoretical knowledge. According to the decision analysis is selected material, under the trade name called TABOREN-PC 72 T20. The main criteria for the selection are price, mechanical properties, cleanability, scratch resistance, internal testing. An integral part of this thesis is the optimization of the polymer blend PP and PA6, which seems to be the ideal material in terms of balancing between utility properties and price.

# Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o problematice výběru vhodného polymerního materiálu. Konkrétně je vybírán materiál pro výrobek od firmy Linet spol. s r.o., který je aplikovaný v nemocničním lůžku. Na základě znalostí teoretické rešerše je navrženo pět polymerních materiálů, ze kterých je podle rozhodovací analýzy vybrán materiál pod obchodním názvem TABOREN-PC 72 T20. Hlavními kritérii při výběru jsou cena, mechanické vlastnosti, čistitelnost, odolnost proti poškrábání a výsledky interního testování. Nedílnou součástí této práce je optimalizace polymerní směsi PP a PA6, jež se jeví jako ideální materiál z hlediska bilancování mezi užitnými vlastnostmi a cenou.





# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod a definice cíle</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická část</b>	<b>3</b>
2.1	Přehled aktuálně používaných plastů . . . . .	3
2.1.1	Standardní plasty . . . . .	3
2.1.2	Konstrukční plasty . . . . .	5
2.1.3	Vysokoteplotní plasty . . . . .	6
2.1.4	Bioplasty . . . . .	6
2.2	Charakteristika plastů . . . . .	8
2.2.1	Index toku taveniny . . . . .	8
2.2.2	Hustota . . . . .	8
2.2.3	Mez kluzu . . . . .	8
2.2.4	Prodloužení při přetržení . . . . .	9
2.2.5	Modul pružnosti . . . . .	9
2.2.6	Rázová houževnatost . . . . .	11
2.2.7	Teplota měknutí dle Vicata . . . . .	11
2.2.8	Termická analýza . . . . .	12
2.3	Modifikace plastů . . . . .	12
2.3.1	Vliv struktury na vlastnosti polymerů . . . . .	13
2.3.2	Aditiva . . . . .	14
2.3.3	Plniva . . . . .	15
2.3.4	Polymerní směsi . . . . .	19
2.4	Výběr nového polymerního materiálu . . . . .	20
2.4.1	Specifikace materiálu . . . . .	20
2.4.2	Orientace na trhu s polymerními materiály . . . . .	20
2.4.3	Poptávka u výrobce/dodavatele . . . . .	20
2.4.4	Databáze plastů . . . . .	21
2.4.5	Rozhodovací analýza . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Definování rizik</b>	<b>23</b>
3.1	Nevyhovující rozměry - smrštění . . . . .	23
3.2	Kapacita sušiček - navlhavost . . . . .	24
3.3	Dostupnost . . . . .	24
3.4	Nevyhovující rozměr - zabíhavost . . . . .	24
3.5	Nevhodný vstříkolis - teplota tavení . . . . .	24

<b>4 Stanovení materiálů</b>	<b>25</b>
4.1 Zadaná kritéria . . . . .	25
4.1.1 Vyrobitelnost . . . . .	25
4.1.2 Cena dílu . . . . .	26
4.1.3 Mechanická odolnost . . . . .	26
4.1.4 Interní testy . . . . .	26
4.1.5 Čistitelnost . . . . .	27
4.1.6 Odolnost proti poškrábání . . . . .	27
4.2 Původní materiál . . . . .	28
4.3 Výběr materiálů . . . . .	28
<b>5 Experimentální část</b>	<b>33</b>
5.1 Testování směsi PP/PA6 . . . . .	33
5.1.1 Termická analýza a mikrostruktura . . . . .	33
5.1.2 Mechanické vlastnosti . . . . .	37
5.2 Zadaná kritéria - měření . . . . .	42
5.2.1 Vyrobitelnost . . . . .	42
5.2.2 Cena dílu . . . . .	42
5.2.3 Mechanická odolnost . . . . .	43
5.2.4 Čistitelnost . . . . .	44
5.2.5 Odolnost proti poškrábání . . . . .	45
<b>6 Vyhodnocení a interní testování</b>	<b>47</b>
6.1 Rozhodovací analýza . . . . .	47
6.2 Srovnání původního a nového materiálu . . . . .	49
6.3 Interní testování . . . . .	50
<b>7 Závěr</b>	<b>53</b>
7.1 Zhodnocení splnění cílů . . . . .	54
7.2 Doporučení . . . . .	54
<b>A Seznam použitých zkratk</b>	<b>57</b>
<b>B Obsah příloženého CD</b>	<b>63</b>
<b>C Příloha</b>	<b>65</b>

# Kapitola 1

## Úvod a definice cíle

Tato diplomová práce vznikla ve spolupráci s firmou LINET spol. s r.o., jež se řadí mezi přední světové výrobce zdravotnických lůžek. Firma byla založena roku 1990 v Želevčicích u Slaného, kde rovněž provozuje svůj závod. V Želevčicích pracuje zhruba 900 zaměstnanců, kteří ročně vyrobí okolo 50 tisíc lůžek. Naprostá většina vyrobených lůžek putuje na export do více než sto zemí po celém světě.

Portfolium lůžek obsahuje přes 20 modelů, které se dále dělí podle způsobu použití na lůžka univerzální, pro pooperační a intenzivní péči, speciální, dětská, kojenecká a porodní. Mezi technicky nejvyspělejší patří např. modely Eleganza 5 a lůžko Multicare, jež dominuje na americkém trhu. (Obr. 1.1) Unikátní na společnosti Linet spol.s.r.o. je její nezávislost na subdodavatelích. Téměř vše, počínaje svařováním, vyfukováním a vstřikováním plastů až po programování informačních systémů, je vyvíjeno a vyráběno v závodě v Želevčicích.



Obrázek 1.1: Lůžka pro intenzivní péči: a) Eleganza 5, b) Multicare

V roce 2011 se stal Linet spol. s.r.o. součástí Linet Group Holding, neboli byl spojen s řadou dalších společností, jako je například německý závod GmbH sídlící ve městě Wickede. V roce 2016 Linet Group Holding koupil českou firmu BorCad medical, která vyrábí

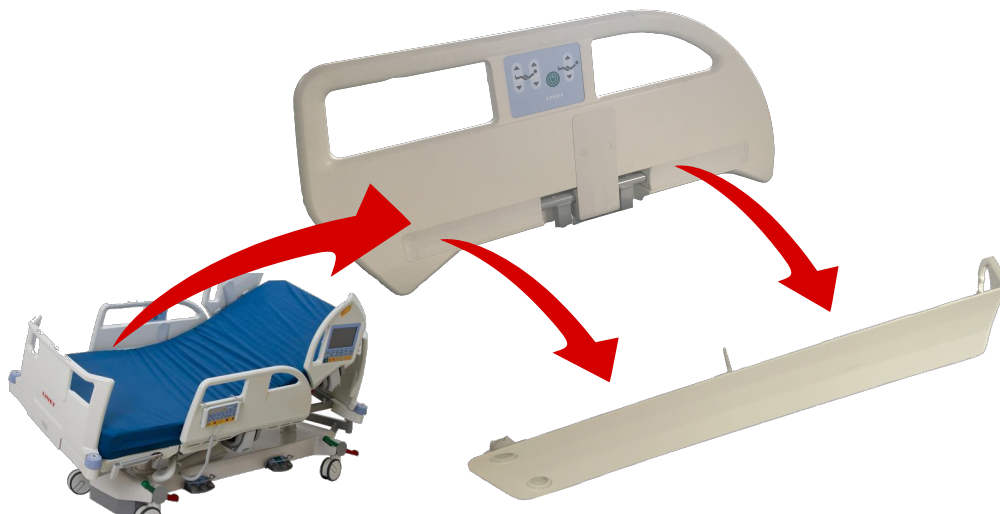
porodní a gynekologická lůžka. V současné době do Linet Group Holdingu patří 15 dceřiných společností, holding zaměstnává okolo 1300 zaměstnanců a roční produkce lůžek je přes 80 tisíc.

Současný trend napříč průmyslovými odvětvími je v nahrazování kovových materiálů plasty. Nezpochybnitelná výhoda polymerních materiálů je především v nízké hmotnosti, ceně, aplikovatelnosti na tvarově složitých dílech. Nelze opomenout ani estetický přínos, korozní odolnost, snadnou zpracovatelnost, čistitelnost, tlumení hluku a vibrací, elektroizolační vlastnosti atd. Mezi nevýhody patří např. vyšší pořizovací náklady vstřikovacích forem a nižší mechanické vlastnosti v porovnání s kovovými materiály.

Celosvětový vývoj kovových materiálů probíhá v porovnání s plasty nesrovnatelně déle. Lze říci, že odvětví plastů je stále v „raném“ stádiu vývoje, a proto není vždy lehké vyznat se v nabízeném sortimentu, případně sledovat technologické novinky v tomto oboru.

Cílem této diplomové práce je navrhnout nový polymerní materiál pro díl krytky mechaniky postranice viz obr.1.2 (příloha C.1). Nový materiál se navrhuje na základě výsledků dynamického a statického testu, které kvalifikují původní materiál jako nevyhovující. Hlavními kritérii při výběru materiálu jsou:

- funkčnost - krytí mechaniky postranice,
- pevnost - odolnost proti namáhání při pohybu, odolnost vůči interním testům,
- vzhled - díl bez vizuálních vad, čistitelný, odolný proti poškrábání,
- cena - maximální zdražení vůči původnímu materiálu 5%.



Obrázek 1.2: Eleganza 5 - umístění krytky mechaniky postranice

# Kapitola 2

## Teoretická část

### 2.1 Přehled aktuálně používaných plastů

Plasty neboli polymery s příměsí různých aditiv se standardně dělí na termoplasty a reaktoplasty. Reaktoplasty se vyznačují vysokou tuhostí, tvrdostí a teplotní odolností. Z praktického hlediska mají ovšem nevýhodu ohledně recyklování. Tyto plasty mají sesíťovanou strukturu, kde jsou uplatňovány pouze primární vazby.<sup>1</sup> Absence sekundárních vazeb,<sup>2</sup> které mají řádově nižší disociační energii způsobuje, že nelze opětovně přivést materiál do viskózního stavu. Termoplasty obsahují sekundární vazby, které se při teplotě tání poruší, a materiál lze opakovaně převést do oblasti taveniny. Nejen pro recyklovatelnost, ale i pro výsledné vlastnosti, se jako běžný konstrukční materiál volí převážně termoplasty. Schéma 2.1 znázorňuje rozdělení současně používaných termoplastů. Ty dělíme podle teploty použití a podle krystalinity na na amorfni<sup>3</sup> a semikrystalické.<sup>4</sup> [1]

#### 2.1.1 Standardní plasty

Obecně lze považovat tuto skupinu za plasty masové spotřeby, kde objem výroby a spotřeby je v porovnání s ostatními skupinami největší. Typické pro tyto materiály je nízká cena a horší mechanické vlastnosti. Mezi základní představitele patří: Polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS).[2]

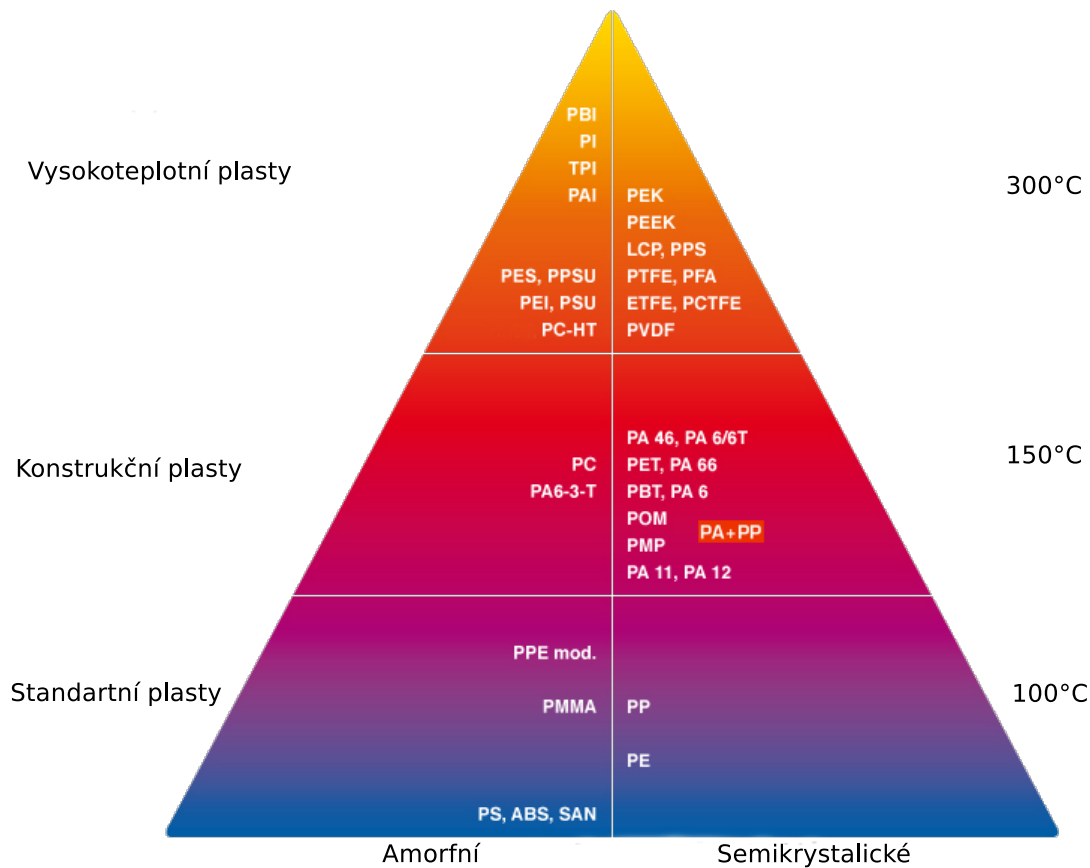
---

<sup>1</sup>Primární vazba je nejsilnější vazba, kterou lze ve struktuře polymerů nalést. Jedná se o kovalentní vazby, pro jejíž zánik je nutná disociační energie ve stovkách  $kJ \cdot mol^{-1}$

<sup>2</sup>Sekundární vazby mají řádově nižší disociační energii, než je tomu u vazeb primárních. Mezi nejčastější sekundární vazby lze zařadit např. Van der Waalsovy, vodíkové můstky atd.

<sup>3</sup>Amorfni struktura obsahuje pouze zanedbatelné množství krystalické fáze.

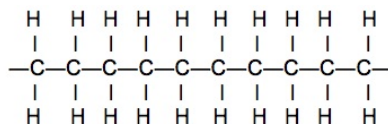
<sup>4</sup>Semikrystalická struktura je v určitém poměru složena z amorfni a krystalické fáze.



Obrázek 2.1: Rozdělení plastů [3]

## PE

Jedná se o nejpožívanější polymer a jeho výroba ročně činí zhruba 60 milionů tun za rok. Převážně se využívá jako obalový materiál. Mezi jeho výhody patří cena, chemická odolnost, vysoká elasticita. Naopak polymer vykazuje horší mechanické vlastnosti. Jedná se o chemicky „nejjednodušší“ polymer viz obr. 2.2. [4]

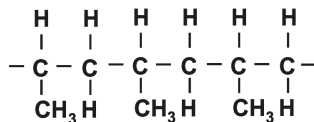


Obrázek 2.2: Strukturální jednotka PE [5]

## PP

Polypropylen je semikrystalický termoplast, který je hned za polyethylenem druhý nejpožívanější polymer. V důsledku chemické struktury (obr.2.3) je tento polymer nepolární,

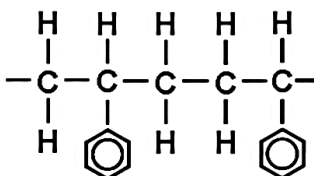
což je spojeno s téměř nulovou navlhavostí. Nenavlhavost ovlivňuje především dobrou rozměrovou stabilitu a snadnou údržbu povrchu. Dále se PP vyznačuje nízkou cenou, chemickou stabilitou, nízkou hustotou a odolností proti cyklickému namáhání.[6]



Obrázek 2.3: Strukturální jednotka PP [4]

## PS

Strukturu styrenu (obr. 2.4) obsahuje benzenové jádro. Obecně platí, že čím je struktura složitější, tím je menší pravděpodobnost krystalizace. PS je tedy amorfní polymer, který je pevný, křehký a levný. V důsledku amorfní struktury je polymer průhledný, proto se také využívá jako plastová náhrada skla. Konkrétně lze zmínit například obal od cd, kelímky... [4]



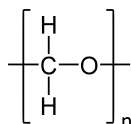
Obrázek 2.4: Strukturální jednotka PS [4]

### 2.1.2 Konstrukční plasty

Konstrukční plasty vykazují vyšší užitné vlastnosti společně s vyšší tepelnou odolností. Mezi typické představitele této skupiny patří např.: POM, PA6, PA66, PA12, PC. Vzhledem ke značným možnostem modifikace PP lze tento polymer zařadit i do této skupiny.

## POM

Polyoxymetylén se používá pro výrobu přesných dílů. Je to z důvodu nízké navlhavosti a s tím spojenou rozměrovou stabilitou. Polymer má vysokou tuhost, rázovou houževnatost a odolnost proti opotřebení. Zajímavý je pro nízký koeficient tření. Často se používá ve specifických případech jako náhrada PA.



Obrázek 2.5: Strukturální jednotka POM [4]

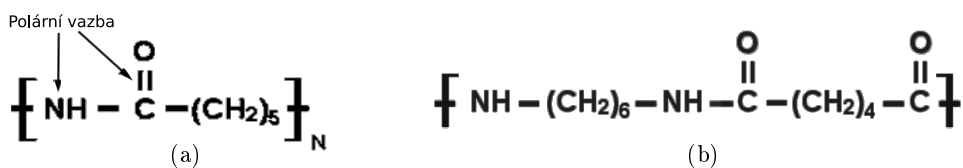
## PA - nylon

Polyamid, někdy též označován jako nylon, je nejdéle používaný a zároveň objemově nejpoužívanější konstrukční polymer v současnosti. Existuje více modifikací PA např. PA6,



PA66. Číslo 6 označuje počet uhlíků v monomeru. 66 také někdy označováno jako 6.6 znamená, že v monomeru je obsaženo 12 uhlíků. Výsledné mechanické vlastnosti jsou podobné, nicméně PA66 se vyznačuje vyšší tuhostí a otěruvzdorností na úkor nižší houževnatosti. Vzhledem k vyšší pořizovací ceně je využití PA66 určeno spíše pro specifické aplikace. Dále je zajímavý PA11, který má v porovnání s ostatními polyamidy velmi nízkou navlhavost. Je to dáno tím, že obsahuje pouze jednu polární vazbu na celou strukturální jednotku (monomer). Např. PA6 obsahuje tyto vazby dvě. [2]

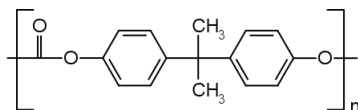
Polyamid často nacházíme jako náhradu kovových konstrukčních materiálů, konkrétním příkladem může posloužit plynový pedál u auta, který je běžně vyráběn z polyamidu se skleněnými vlákny.



Obrázek 2.6: a) Strukturální jednotka PA6, b) Strukturální jednotka PA66 [4]

## PC

Polykarbonát je složen ze složitých monomerů s dvěma benzenovými jádry (obr. 2.7). Jak již bylo zmíněno u PS, tak benzenová jádra neumožní krystalizaci. Proto jej lze použít opět jako náhradu skla a používá se např. pro výrobu nádobí, displejů, osvětlení, CD/DVD. Obecně vykazuje tento polymer vysokou odolnost vůči zvýšeným teplotám a nárazu. [4]



Obrázek 2.7: Strukturální jednotka PC [4]

### 2.1.3 Vysokoteplotní plasty

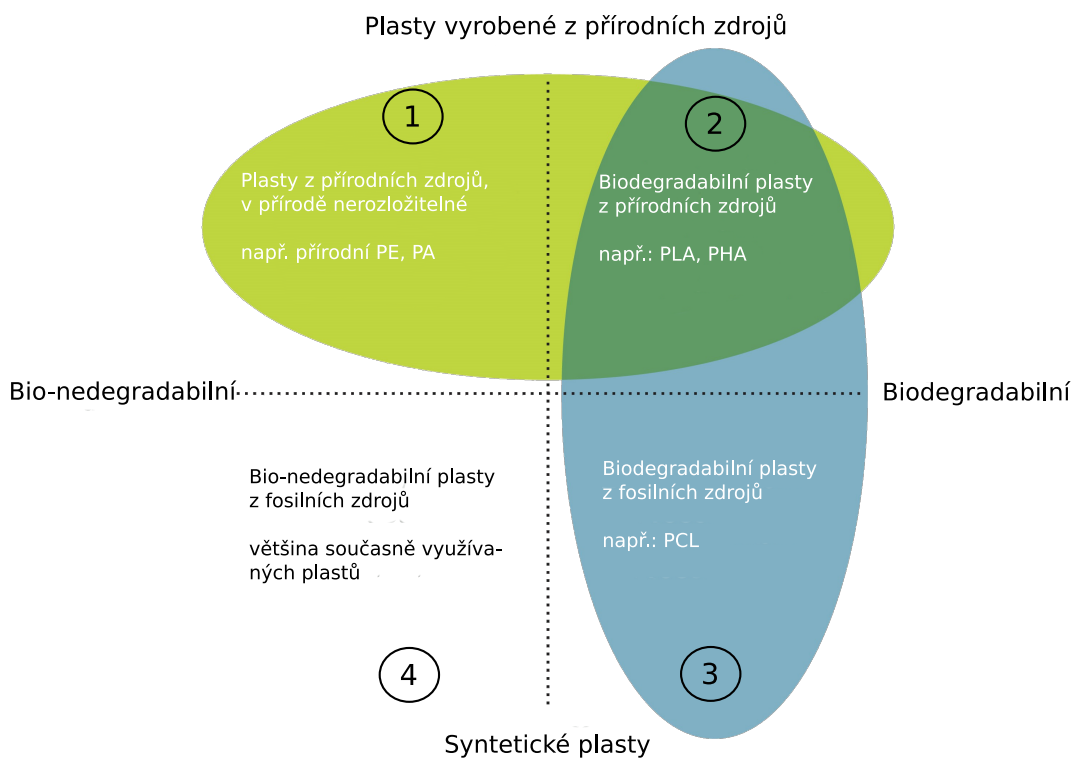
Tyto high-tech polymery nabízejí unikátní užité vlastnosti, které jsou aplikovatelné v těch nejnáročnějších podmínkách. V leteckém průmyslu se tyto plasty využívají ve formě kompozitů a postupně nahrazují konvenční konstrukční materiály. Např. Boeing 787 je z 50 % sestaven právě z těchto kompozitů. Převážně se jedná o polymerní materiál vyztužený uhlíkovými vlákny. [7]

### 2.1.4 Bioplasty

Jednoznačná definice bioplastů neexistuje. Můžeme takto označovat materiál, který je vyroben z přírodních zdrojů, nebo materiál, který je v přírodě rozložitelný za pomoci mikroorganismů či enzymů. Případně materiál, který obsahuje přírodní plnivo. Paradoxně za biomateriál lze pokládat i materiál, který je vyrobený sice z přírodních zdrojů, ale v přírodě,

v kratším časovém horizontu již nerozložitelný. Zóny 1,2 a 3, které jsou na obrázku 2.8, zobrazují materiály, které lze považovat za „bioplasty“.

Současný trend je v nahrazování tradičně používaných plastů bioplasty. Důvodů je několik. Především se jedná o legislativní opatření, cenu, která již může konkurovat syntetickým materiálům, podstatné jsou ale i vlastnosti, které jsou mnohdy srovnatelné s běžnými syntetickými polymery. Obecně lze konstatovat, že současný trend je minimalizovat závislost na fosilních zdrojích.



Obrázek 2.8: Model bioplastů [4]

Je nezpochybnitelné, že je tato problematika marketingově zneužívána. Zákazník kupující tzv. „zelený“ plast nabývá dojmu, že udělal to nejlepší z hlediska ekologie. Mnohdy je tomu ovšem naopak. Pokud se podíváme např. na tzv. uhlíkovou stopu,<sup>5</sup> zjistíme, že u bioplastů je mnohdy větší než u běžných, syntetických plastů. Do budoucna lze ale postupně nahrazení syntetických materiálů bioplasty předpokládat.

<sup>5</sup>Uhlíková stopa je ukazatel zatížení životního prostředí. Jedná se o součet skleníkových plynů (převážně oxidu uhličitého), vypuštěných do atmosféry. Vztaheno na jeden výrobek.

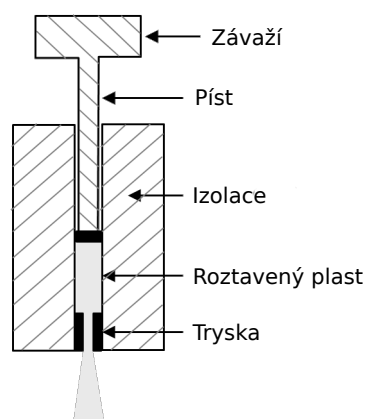
## 2.2 Charakteristika plastů

Plasty nelze charakterizovat stejně jako je tomu u kovových materiálů. Například u deformace se plasty chovají viskoelasticky, tzv. celková deformace polymerů je časově a teplotně závislá. Občas se tento děj nazývá jako „Creep za studena“. Nejčastěji popisujeme plasty pomocí následujících veličin a vlastností:

### 2.2.1 Index toku taveniny

Index toku taveniny souvisí s délkami makromolekul. Čím jsou délky makromolekul větší, tím je index nižší. V praxi lze pomocí tohoto parametru například rychle otestovat dodaný materiál a odhalit případné odlišnosti, které mohly vzniknout při výrobě, neboť u plastů se projevuje daleko větší variabilita vlastností téhož materiálu, než je tomu u kovových materiálů.

Test je definován normou ČSN EN ISO 1133-1. Zjednodušený princip metody je znázorněn na obr.2.9. Za definované teploty, hmotnosti závaží a průměru válce se měří množství taveniny protéké tryskou za 10 min.



Obrázek 2.9: Zjednodušený princip MFI [8]

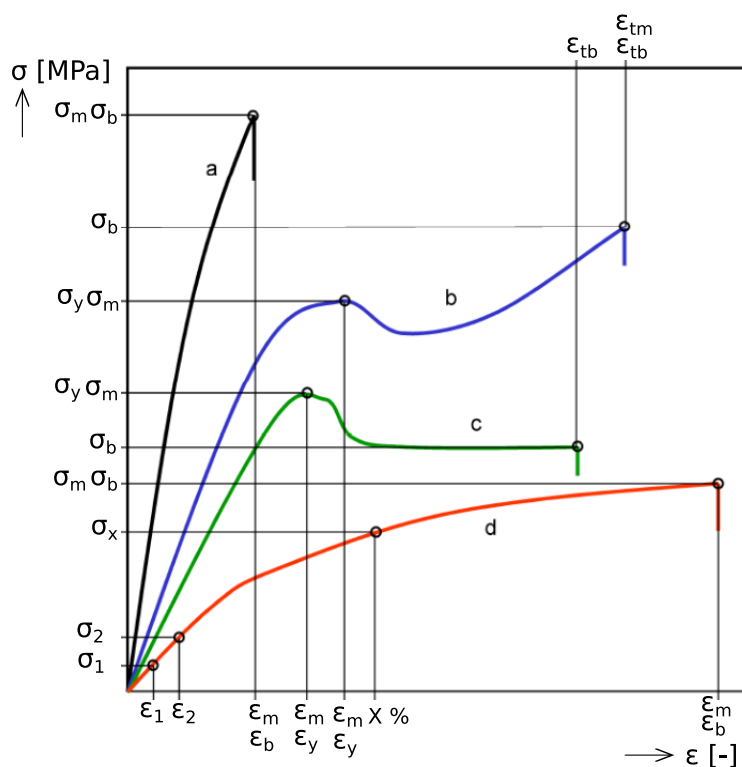
### 2.2.2 Hustota

Hustota plastů je z velké části definována chemickým složením, aditivy, plnivý, případně u reaktoplastů hustotou sesíťování. Pro snížení hustoty lze použít různá nadouvadla a změkčovadla. Naopak přidáním většiny plniv dojde ke zvýšení hustoty.

### 2.2.3 Mez kluzu

Konkrétní podmínky tahové zkoušky definuje norma ČSN EN ISO 527-1. Vzorek s přesně definovanými rozměry je podroben jednoosému namáhání v tahu. Výsledný tahový diagram může vypadat rozdílně, v závislosti na druhu polymeru (plastu) viz graf: 2.10. Jednotlivé křivky znázorňují:

- a) - Křehký polymer (reaktoplast, většina amorfních termoplastů, kompozit)
- b;c) - Termoplast s mezí kluzu
- d) - Houževnatý polymer - pryž



Obrázek 2.10: Tahový diagram [9]

Z technického hlediska je nejvýznamnější pro křehké polymery maximální napětí  $\sigma_m$ , případně napětí při přetržení  $\sigma_b$ . Pro termoplasty je směrodatná mez kluzu  $\sigma_y$  a u pryží se nejčastěji udává hodnota  $\sigma_x$ , neboli napětí, kterého je dosaženo při definovaném prodloužení  $x$ .

#### 2.2.4 Prodloužení při přetržení

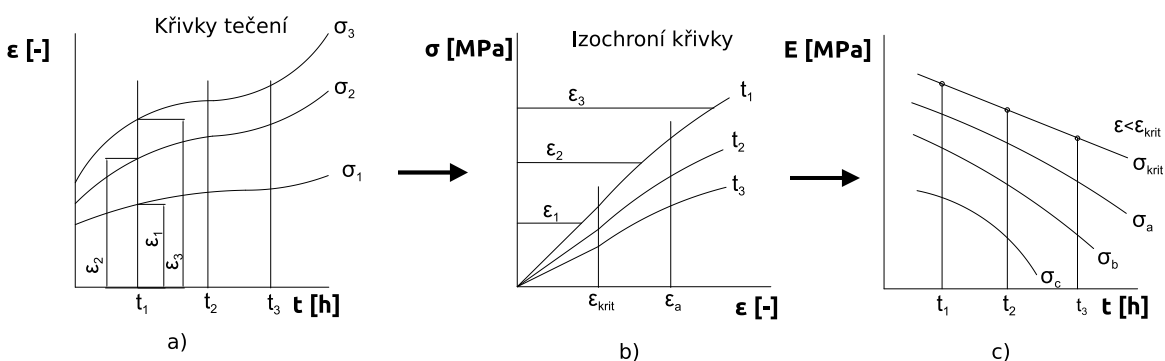
Prodloužení při přetržení opět vychází z tahového diagramu 2.10 a značí se u termoplastů  $\epsilon_b$ . Měření se provádí za pomoci průtahoměru a měří se relativní prodloužení pracovní části vzorku. V případě, že se zkušební těleso začne deformovat nehomogenně, je nutné měřit tzv. jmenovité poměrné prodloužení, které je vztaženo k původní upínací vzdálenosti mezi čelistmi. Jmenovité poměrné prodloužení se značí indexem  $t$ , v našem případě  $\epsilon_{tb}$ .

#### 2.2.5 Modul pružnosti

Modul pružnosti, neboli tuhost, je u plastických materiálů závislý na teplotě a čase. Proto lze Hookův zákon použít pouze v omezené míře. Zjednodušený princip, jakým lze

získat modul pružnosti pro plasty, je znázorněn na obr. 2.11. Nejprve se stanovuje závislost relativního prodloužení na čase - graf a). V našem případě je zatěžováno zkušební tělísko třemi rozdílnými závažími. Takto vzniklé křivky se nazývají křivky tečení a v grafu jsou označeny  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ .

Z křivek tečení sestrojíme další graf b), jenž představuje závislost napětí na relativním prodloužení. Princip sestrojení izochronní křivky je znázorněn pro čas  $t_1$ . Pro hodnoty prodloužení, pro které platí podmínka:  $\epsilon < \epsilon_{krit}$ , lze použít Hookův zákon.  $\epsilon_{krit}$  je hranice mezi lineární a obecnou křivkou. Ne vždy je tato hranice rozeznatelná, nebo se pohybujeme v prodlouženích, která nesplňují podmínku. V takovém případě dochází k částečnému zjednodušení závislosti. Např. pro relativní prodloužení  $\epsilon_a$  se v jednotlivých časech  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  udělá sečna do počátku souřadného systému a takto vzniklé přímky lze považovat s určitou chybou za aproximaci izochronních křivek, na které lze již aplikovat Hookův zákon. Výsledný modul pružnosti v závislosti na čase může vypadat přibližně jako na grafu c). Pro graf c) platí podmínka, že  $\sigma_{krit} < \sigma_a < \sigma_b < \sigma_c$ . [10]

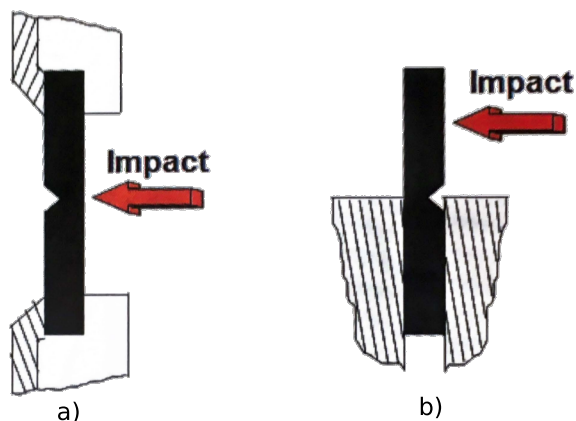


Obrázek 2.11: Princip zjištění modulu pružnosti

### 2.2.6 Rázová houževnatost

Způsobů, jakými testovat rázovou houževnatost, je více. Nejběžnější způsob je definován normou ČSN EN ISO 179-1. Normalizovaný vzorek s „V“ vrubem je upnut dle obr. 2.12 a) a následně je zaznamenána energie, která je spotřebována na přeražení.

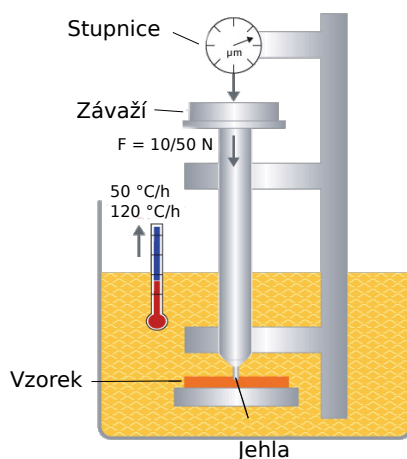
V minulosti byla používána Izodova zkouška, které je znázorněna na obr. 2.12 b). S touto metodou se lze v současnosti ještě setkat, nicméně hodnoty obou zkoušek lze vzájemně přepočítat. [4]



Obrázek 2.12: Rázová houževnatost - způsoby upnutí vzorků [4]

### 2.2.7 Teplota měknutí dle Vicata

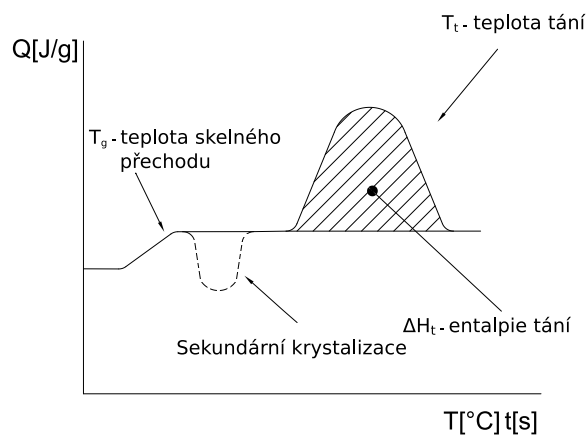
Metoda stanovení teploty měknutí dle Vicata vychází z normy ČSN EN ISO 306. Podstata metody spočívá ve vniknutí jehly s plochým hrotem o průřezu  $1 \text{ mm}^2$  s definovaným zatížením do zkušebního tělesa do hloubky  $1 \text{ mm}$ . Zaznamenává se, při jaké teplotě ke vniknutí dojde. Tento test definuje teplotní odolnost plastu.



Obrázek 2.13: Zjednodušený princip metody teploty měknutí dle Vicata [11]

### 2.2.8 Termická analýza

Diferenciální snímací kalorimetrie (DSC) je metoda termické analýzy, která se v praxi využívá především pro kontrolu kvality, případně identifikaci materiálu. V průmyslu, kde je kladen velký důraz na kvalitu dodávaného granulátu, je tato metoda vhodná především pro svoji přesnost. Princip spočívá v dodávání energie do vzorku konstantní rychlostí. V důsledku fyzikálních a chemických vlastností, unikátních pro každý materiál, je energie potřebná pro ohřev/ochlazování pro každý polymer odlišná. Příklad výstupu z měření semikrystalického termoplastu je na obr. 2.14.  $T_g$  značí teplotu skelného přechodu neboli teplotu, při níž dojde k poklesu mezimolekulárních (sekundárních) sil, což způsobí, že makromolekuly se mohou vůči sobě začít pohybovat v důsledku rotačního pohybu. Tento děj se vyskytuje u amorfních a semikrystalických polymerů. Pro tento proces je nutná energie, a proto v grafu je v této oblasti zpomaleno ohřívání vzorku, neboť energie dodávaná konstantní rychlostí je využita na porušení vazeb, nikoliv na zvyšování teploty vzorku. Stejný princip (z energetického hlediska) platí i pro sekundární krystalizaci<sup>6</sup> a teplotu tání  $T_t$ .<sup>7</sup> [2]



Obrázek 2.14: Náčrtek křivky DSC [2]

## 2.3 Modifikace plastů

Pro konkrétní aplikace se polymery modifikují, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností. Nejběžněji se setkáme s chemickou modifikací, tvorbou směsí plastů, přidáváním aditiv a plniv. Jedná se o silné „nástroje“, jimiž lze regulovat konkrétní vlastnosti plastů.

<sup>6</sup>Krystalické a semikrystalické polymery krystalizují při přechodu z kapalného stavu do tuhého. Tento děj označujeme jako primární krystalizaci. Často ovšem tyto materiály krystalizují i v tuhé fázi, a to i v řádech měsíců po zpracování. Tuto krystalizaci nazýváme sekundární.

<sup>7</sup>Teplota tání je pouze u krystalických a semikrystalických materiálů. Jedná se o zánik sekundárních vazeb, s čímž je spojena tekutá fáze.

### 2.3.1 Vliv struktury na vlastnosti polymerů

#### Tvar makromolekuly

Dle způsobu výroby polymerních materiálů rozlišujeme makromolekuly lineární, rozvětvené a sesíťované. Jak již bylo řečeno, lineární a rozvětvená struktura je u termoplastů, síťovaná u reaktoplastů. Obecně lze tvaru makromolekuly přiřadit následující vlastnosti:

Tabulka 2.1: Závislost tvaru makromolekuly na vlastnostech polymeru [12]

Vlastnost	Lineární	Rozvětvená
pevnost	+	-
tuhost	+	-
hustota	- (vyšší)	+
zpracovatelnost	+	-

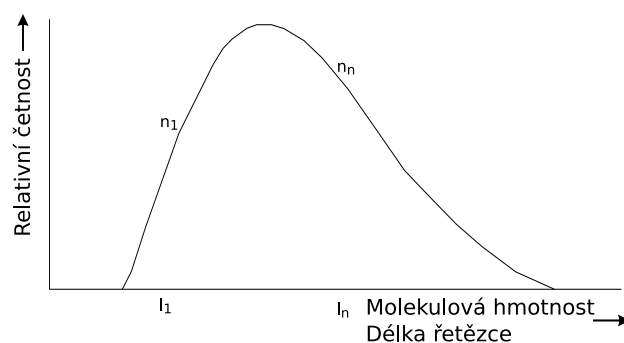
Rozvětvené makromolekuly mají na bočních řetězcích substituenty, které způsobí oddálení makromolekul vůči sobě, a tím dojde ke snížení sil mezi makromolekulami. S tím je spojen úbytek mechanických vlastností. [12]

U sesíťované struktury závisí vlastnosti převážně na hustotě „sítě“. Obecně lze ovšem konstatovat, že sesíťovaná struktura vykazuje vyšší pevnost i tuhost. Je to dáno vysokou koncentrací primárních vazeb.

#### Délka makromolekuly

Délka makromolekuly ovlivňuje tekutost taveniny a mechanické vlastnosti. S narůstající délkou makromolekuly se zvyšuje pevnost, a naopak tekutost se snižuje. Při výrobě polymerů dochází k polydisperzitě, tzv. polymer je složen z makromolekul, které mají rozdílné délky. Četnost jednotlivých délek makromolekul má vliv na výsledné mechanické vlastnosti a tekutost taveniny při zpracování. Tuto koncentraci jednotlivých makromolekul popisuje tzv. distribuční křivka. Pro konkrétní materiál může křivka vypadat např. jako v grafu 2.15. Kde  $l_1 \dots l_n$  značí délku řetězce a  $n_1 \dots n_n$  značí relativní četnost. Pro měření této problematiky v praxi využíváme veličinu index toku taveniny (MFI). Tato problematika je detailněji popsána v kapitole 2.2.1. [13]





Obrázek 2.15: Příklad distribuční křivky [13]

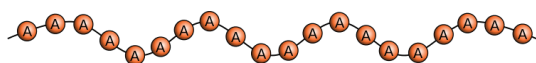
### Krystalinita

Pro semikrystalickou strukturu platí, že část struktury zaujímá krystalická fáze a zbylá část je tvořena amorfní fází. Podíl těchto dvou struktur má vliv na většinu fyzikálních i mechanických vlastností. Tyto odlišnosti jsou dány rozdílnou těsností uspořádání řetězců v krystalické a amorfní fázi. Obecně platí, že čím větší je zastoupení krystalické fáze, tím je větší pevnost. Naopak houževnatost klesá. Parametr, který popisuje objemový poměr mezi krystalickou a amorfní fází, se nazývá krystalinita. [14]

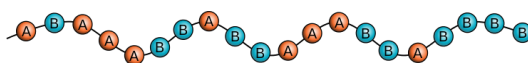
### Uspořádání strukturních jednotek v polymeru

Vzhledem k uspořádání strukturních jednotek lze polymery dělit na homopolymery a kopolymery. Makromolekula složená z jednoho druhu monomeru se nazývá homopolymer. Pokud je makromolekula složená z více druhů monomerů, potom se jedná o kopolymer. Vliv uspořádání makromolekuly na mechanické vlastnosti lze například pro PP shrnout následovně: [15]

- PP homopolymer - nižší houževnatost, vyšší pevnost
- PP kopolymer - vyšší houževnatost, nižší pevnost



Obrázek 2.16: Homopolymer



Obrázek 2.17: Kopolymer

### 2.3.2 Aditiva

Čistý polymer se v praxi nevyskytuje, neboť by zdaleka nebylo využito potenciálu, jenž nabízí. Pro dosažení požadovaných vlastností se používají různá aditiva, jejich důležitost je patrná už ze základní definice plastů, která říká, že plast je polymer s příměsí aditiv.

Nejběžnější způsob dělení aditiv je následující: [6]

- **Stabilizátory**

Úkolem stabilizátoru je ponechat stejné vlastnosti polymeru při zpracování, skladování a použití. Např. světelné stabilizátory (saze) absorbují UV záření a zamezí tak nežádoucímu procesu degradace materiálu. Obecně lze specifikovat stabilizátory podle konkrétní „ochranné“ funkce na: tepelné, světelné, radiační, biologické...

- **Změkčovadla**

Zlepšují zpracovatelnost, ohebnost a mrazuvzdornost. Jedná se o látky, které zlepší pohyb makromolekul vůči sobě. Jde především o kontroverzní látky jako jsou ftaláty, které jsou zdraví škodlivé a musí být legislativně regulovány. Do povědomí veřejnosti se dostaly jako přísada do „čínských“ dětských hraček. Průmyslově bývá tento problém řešen v podobě termoplastických elastomerů<sup>8</sup>.

- **Barviva**

Barvivo se skládá z pigmentu, pojiva a rozpouštědla. Obsažené pigmenty část světla pohltí a část odrazí v podobě elektromagnetického vlnění. Důvod aplikace barviv je spíše estetická záležitost, nicméně nelze popřít vliv barviv na výsledné vlastnosti polymeru.

- **Retardéry hoření**

Jedná se o skupinu látek, které zpomalují hoření, omezují vznik toxických zplodin a kouře při hoření. Nejčastěji tyto látky bývají na bázi bromu, chloru, fosforu a dusíku.

- **Nadouvadla**

Přidávají se z důvodu snížení hmotnosti. Tyto látky se v průběhu zpracování plastů přemění v plyny, které se ve finální struktuře projeví jako póry (bublíny). Často bývá používán dusík nebo oxid uhličitý. [12]

- **Kompatibilizátory**

Jde o látky, které zaručí vyšší kompaktnost dvou typově odlišných látek. Může se jednat např. o polymer a plnivo nebo dva odlišné polymery. Konkrétní případ „spojování“ PP s PA6 je popsán v kapitole 2.3.4.

### 2.3.3 Plniva

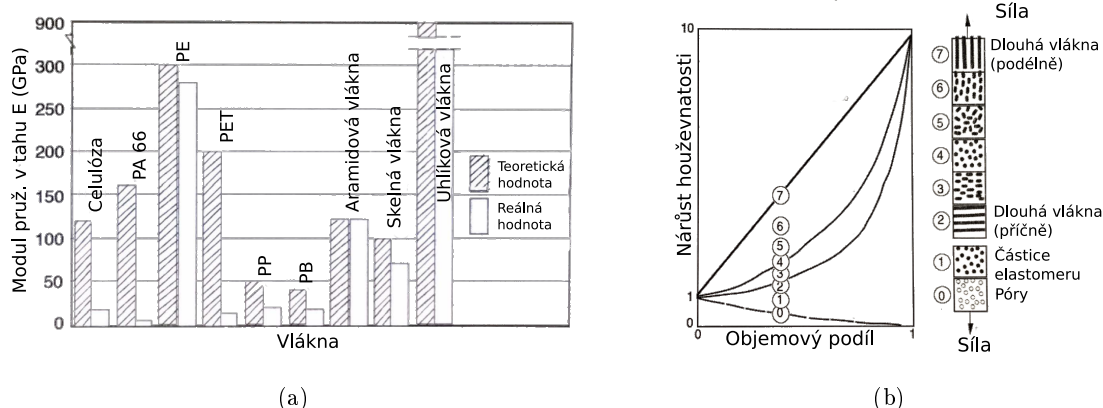
Plniva se převážně využívají ze dvou důvodů, a to z ekonomického, neboť lze vhodným plnivem příznivě ovlivnit cenu materiálu, a z důvodu zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností. Zásadní vliv mají plniva na modul pružnosti, pevnost a houževnatost. [1]

#### Typy plniv

Vlastnosti plniva závisí především na materiálu a tvaru, případně orientaci částic. Na obr. 2.18 a) jsou zobrazeny teoretické a reálně dosahované moduly pružnosti pro různé materiály. Lze vidět, že nejvyšší modul pružnosti dosahují uhlíková vlákna. [1]

Druhý parametr charakterizující chování vláken je tvar a orientace vláken. Na obr. 2.18 b) je patrné, že nejvyšší tuhosti dosahují kompozity s dlouhými vlákny orientovanými ve směru zatěžování. Nevýhodou dlouhých vláken je ovšem jejich horší zpracovatelnost. [1]

<sup>8</sup>Termoplastický elastomer obsahuje termoplast, jenž obsahuje částičky elastomeru. Zpracováním a recyklací odpovídá termoplastům. Vlastnostmi se přibližuje elastomerům (kaučukům)



Obrázek 2.18: a) Modul pružnosti pro různá vlákna, b) Vliv orientace a množství plniva na houževnatost kompozitu [6]

### Uhličitan vápenatý („křída“)

Hlavní důvod používání uhličitanu vápenatého, jakožto částicového, minerálního plniva, je především ve snížení ceny. Tento důvod řadí křídu k jednomu z nejpoužívanějších plniv. Do určitého procentuálního zastoupení zlepšuje tuhost a vrubovou houževnatost. [4]



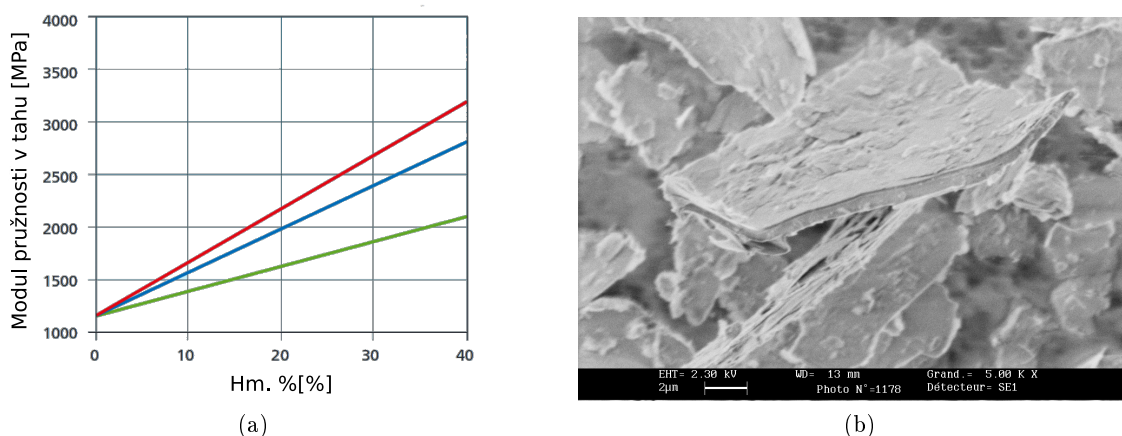
Obrázek 2.19: Uhličitan vápenatý [16]

### Talek - mastek

Opět jde o minerální, částicové plnivo, které je nepatrně dražší v porovnání s křídou, ale vykazuje lepší vlastnosti. Používá se především pro snížení ceny materiálu, zvýšení pevnosti a odolnosti proti creepu, zlepšení chemické a tepelné odolnosti. A zároveň přítomnost talku zlepšuje krystalizaci.

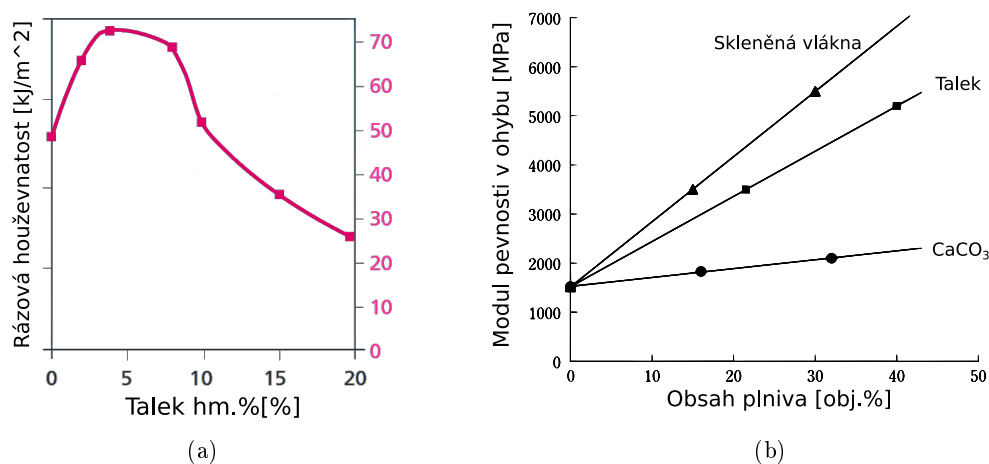
Na mechanické vlastnosti polymerních materiálů plněných talkem má vliv procentuální zastoupení talku, velikost částic a poměr hran talku.

V následujícím obr. 2.20 a) je závislost hmotnostního procentuálního zastoupení talku a uhličitanu vápenatého na modulu pružnosti. Plniva jsou použita v matici PP. Červená křivka představuje talek s vysokým poměrem hran. Modrá křivka je talek s nízkým poměrem hran. Pro porovnání slouží poslední zelená křivka, která znázorňuje uhličitan vápenatý. Je zřejmé, že nejvyššího modulu pevnosti dosáhneme u PP s 40% obsahem talku, který má vysoký poměr hran délky a šířky. Na elektronovém snímku (obr.2.20 b) je částice talku s vysokým poměrem hran délky a šířky. [4]



Obrázek 2.20: a) Závislost modulu pružnosti na procentuálním zastoupení plniva [17], b) Částice talku s vysokým poměrem hran (délka/šířka) [18]

Naopak negativní efekt má talek na rázovou houževnatost viz graf 2.21 a). Z grafu vyplývá, že nejvyšších hodnot rázové houževnatosti je dosaženo při koncentraci talku zhruba 5 hm.%. Poté dochází k poklesu. Pro porovnání talku s uhlíčanem vápenatým a skleněnými vlákny slouží graf 2.21 b). Je patrné, že pro modul pevnosti v ohybu dosahuje talek středních hodnot v porovnání se skleněnými vlákny a uhlíčanem vápenatým.



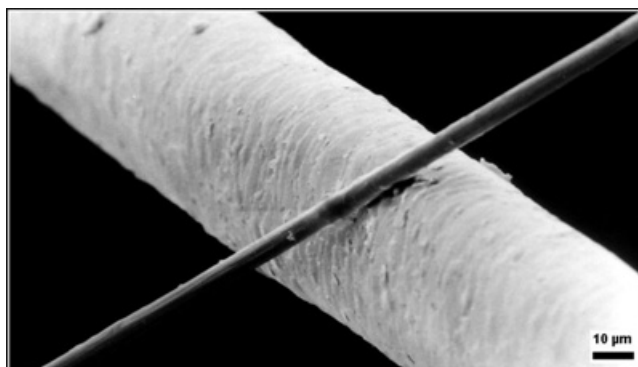
Obrázek 2.21: a) Vliv talku na rázovou houževnatost (matrice PP)[17], b) Porovnání talku s ostatními plnivý (matrice PP) [17]

### Skleněná a uhlíková vlákna

Skleněná vlákna zaručí za relativně nízkou cenu nejvyšší nárůst mechanických vlastností v porovnání s předešlými minerálními plnivý. Průměr vláken se standardně pohybuje v rozmezí 3,5 – 24  $\mu\text{m}$  a v praxi se používá plnění 20-60 hm.%. Obecně platí, že čím jsou delší vlákna, tím je dosahováno vyšší pevnosti na úkor horší zpracovatelnosti. Zároveň dochází

k nárůstu anizotropie.<sup>9</sup> Nevýhodou vláken obecně je snadnější ulpívání nečistot na povrchu, to je způsobeno nerovností povrchu.

Pro náročné aplikace je vhodnější využít uhlíkové vlákno, které lze vyrobit o tloušťkách 5–10  $\mu\text{m}$  (obr. 2.22), což je zhruba 10x méně, než je tloušťka lidského vlasu. Platí, že uhlíkové vlákno má několikanásobně vyšší modul pružnosti v tahu. Nevýhodou je vysoká cena, která ovšem v posledních letech postupně klesá a vlákna začínají být dostupná i širšímu spektru průmyslového odvětví. [19] [20]



Obrázek 2.22: Porovnání uhlíkového vlákna s lidským vlasem [19]

### Přírodní vlákna

Vlákna se získávají především z juty, kokosu, sisalu, lnu, konopí, ramie a kenafu. Nejrozšířenější jsou vlákna z juty, která jsou levná, pevná a částečně odolná k přirozené degradaci. V automobilovém průmyslu se již v omezené míře tato vlákna používají. Vlastnosti takového kompozitu jsou diskutabilní. [21]

Mechanickými vlastnostmi i cenou se lze přiblížit k tradičně používaným plnivům. Nevýhodou ovšem zůstává velká variabilita vlastností. Je to způsobeno odlišnými podmínkami pěstování rostlin. Pro zachování konstantních vlastností by bylo nutné vyrábět plast pouze z jedné sklizně. To je ovšem z dlouhodobého hlediska nerealizovatelné.

### Porovnání vláken

V následující tabulce 2.2 je srovnání vlastností vybraných vláken v matrici PP.

---

<sup>9</sup>Anizotropie - rozdílné vlastnosti v různých směrech.

Tabulka 2.2: Porovnání vybraných plniv v matrici PP [22]

Vlastnost	Bez plniva	Kenaf	Telek	„Křída“	Sklo	sklo
Hm.% plniva	0	50	40	40	30	40
Ob. % plniva	0	40	18	18	8	19
Modul pružnosti [GPa]	1,7	7,2	4	3,5	5	9
Pevnost v tahu [MPa]	33	62	35	25	83	110
Prod. při přetržení [%]	»10	2,2	–	–	2,5	2,5
Rázová houževnatost [J/m <sup>2</sup> ]	24	32	32	32	98	107
Navlhavost[% za 24 hod.]	0,02	0,95	0,02	0,02	0,02	0,06

### 2.3.4 Polymerní směsi

Smícháním dvou či více různých polymerů, lze docílit unikátních vlastností pro konkrétní aplikaci. Zároveň lze tímto způsobem dosáhnout správného poměru mezi cenou a vlastnostmi. V současné době je na trhu velké množství kompatibilizátorů<sup>10</sup> a lze již spojovat materiály za normálních podmínek nemísitelné. Například lze spojovat polymery polární a nepolární, semikrystalické a amorfní atp. Zároveň čím dál větší uplatnění nachází kombinace plastů s elastomery. Mezi nejzajímavější představitele těchto směsí patří: [12]

- PP-PBT<sup>11</sup>  
Směs má velmi dobrou chemickou odolnost, rázovou houževnatost a tuhost. Zároveň jsou tyto vlastnosti zachovány při relativně vysokých teplotách.
- PC-ABS  
Samotný PC je konstrukční materiál jednak s dobrými mechanickými vlastnostmi, ale i teplotní odolností. Nevýhodou je, že je náchylný ke korozi za napětí<sup>12</sup> a má nižší chemickou odolnost. Tyto nedostatky jsou odstraněny přidáním ABS, jež se příznivě promítne i do ceny za materiál.
- PP-EPDM<sup>13</sup>  
Tuto kombinaci je možné spatřit v automobilovém průmyslu, z tohoto materiálu se vyrábějí především nárazníky. PP je levný a dostupný materiál a EPDM přidá směsi potřebnou rázovou houževnatost i za nízkých teplot.

<sup>10</sup>Látka, která umožňuje smíchání (homogenizaci) dvou nemísitelných polymerních složek

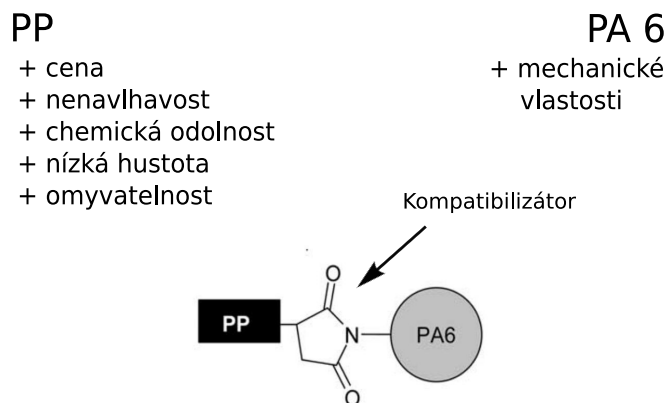
<sup>11</sup>PBT -Polybutylen tereftalát

<sup>12</sup>Koroze za napětí je jev, kdy dochází ke zhoršení odolnosti polymerů vůči chemikáliím vlivem mechanického namáhání.[12]

<sup>13</sup>EPDM - ethylen-propylen-dién terpolymerový kaučuk

- PA-PP

Zajímavá je kombinace plastů polypropylenu a polyamidu. PA zajišťuje dobré mechanické vlastnosti a PP přidá směsi na chemické odolnosti, rozměrové stálosti, nízké hustotě. Zároveň přidáním PP dojde ke zlevnění výsledného materiálu. [23]



Obrázek 2.23: Schematické znázornění směsi PP-PA6

Za normálních okolností by tyto polymery netvořily homogenní směs. Proto se přidává kompatibilizátor, který zajistí vzájemnou adhezi. Pro směs PP-PA6 je vhodné jako kompatibilizátor využít anhydrid kyseliny maleinové.

## 2.4 Výběr nového polymerního materiálu

### 2.4.1 Specifikace materiálu

Zadat požadavky na materiál z pouhého výkresu je obtížné a často dochází k bližším specifikacím až na základě zkušeností z provozu, případně testů hotového výrobku. V každém případě bychom měli u prvotního návrhu brát v úvahu požadavky trhu, očekávané vlastnosti materiálu, podmínky pro zpracování atp.

### 2.4.2 Orientace na trhu s polymerními materiály

Nabízený sortiment plastů a jejich modifikací je rozsáhlý. Řádově hovoříme o tisíci různých kombinacích. Proto není snadné umět se v nabídce orientovat.

Konkrétní informace o materiálu zpravidla nelze získat, neboť se jedná o know-how výrobce. Pro charakteristiku materiálu se používají parametry, ty základní jsou popsány v kapitole 2.2.

### 2.4.3 Poptávka u výrobce/dodavatele

Nejjednodušší cestou volby nového materiálu je zadat požadavky výrobcí, případně dodavateli. Přestože v České republice není mnoho výrobců plastů, není problém zadat konkrétní

požadavky na materiál a ten nechat vyrobit. Výhodou je úzká specializace výrobců na danou problematiku a široké zkušenosti s tzv. „vařením“<sup>14</sup> plastů. Nevýhodou jsou obchodní záležitosti. Pro výrobce není vždy výhodné hledat optimální variantu na konkrétní aplikaci pro určitý odběr materiálu, který v porovnání např. s automobilový průmyslem je často zanedbatelný.

Situace u dodavatelů, kterých jsou v České republice desítky, je lepší, neboť odebíraný objem materiálu již nehraje zásadní roli. V každém případě jsou ovšem limitováni nabízeným sortimentem.

#### 2.4.4 Databáze plastů

Další možností, jak vyhledat na základě požadovaných vlastností vhodný materiál, jsou databáze polymerních materiálů. Nejznámější databáze se jmenuje CAMPUS a obsahuje produkty více než 20 výrobců. V porovnání s konkurenčními a komerčními databázemi, je nabízené portfolio malé. Nicméně výhodou je licence, která je poskytována zdarma.

Dalšími databázemi, které můžeme zmínit, jsou např. Material Data Center, Prospector Plastics Database, ty jsou dostupné ovšem pouze v placených verzích. Výhodou je mnohem větší nabízené portfolio. Např. Material Data Center slučuje přes 300 výrobců. Prospector Plastics Database obsahuje přes 900 výrobců a 85 000 různých materiálů. [4]

The screenshot shows the CAMPUS database search interface. At the top left is the CAMPUS logo. To the right is a banner image of white plastic parts. Below the banner are navigation tabs: Search, Download, Participants, Tutorials, and About. The search bar contains the text "property (tensile modulus, MVR,...), gradename, polymer". Below the search bar is a "Selected Search Criteria (9)" section with a table of filters:

Property	Value 1	Value 2	Value 3
<input type="checkbox"/> Property: Melt volume-flow rate, MVR [cm³/10min]	100	150	2 - 2
<input checked="" type="checkbox"/> Property: Tensile modulus [MPa]	1200	3000	2100 - 2600
<input type="checkbox"/> Property: Yield stress [MPa]	22	40	76 - 80
<input checked="" type="checkbox"/> Property: Yield strain [%]	0	100	6 - 8
<input type="checkbox"/> Property: Strain at break [%]	10	50	.. *
<input type="checkbox"/> Property: Charpy impact strength, +23°C [kJ/m²]	12	70	N - N
<input checked="" type="checkbox"/> Property: Water absorption [%]	0	5	2.6 - 3.8
<input checked="" type="checkbox"/> Property: Density [kg/m³]	800	1200	1050 - 1130
<input checked="" type="checkbox"/> Polymer Family: PA* - unspecified polyamide			

Below the table is a button "Add all visible grades to Pinboard". At the bottom, there is a table with columns "Family" and "Producer":

Grade Name	Family	Producer
Grivory HT3Z black 9564	PA*	EMS-GRIVORY

Obrázek 2.24: CAMPUS - praktická ukázka filtrování polymerních materiálů na základě zadaných kritérií

<sup>14</sup>Vaření je slangové označení z prostředí výroby plastů pro jeho modifikaci.



### 2.4.5 Rozhodovací analýza

Pro výběr jedné z možných variant je vhodné využít vícekritériálního rozhodování jako nástroj manažerského rozhodování. [24]

Jednotlivé varianty se vyjadřují kvantitativně ve formě hodnotících kritérií a výsledný model může být vyjádřen ve formě rozhodovací matice viz tab.2.3.

Tabulka 2.3: Schéma rozhodovací matice

Varianta	Kritérium			
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
$V_1$	$E_{11}$	$E_{12}$	$E_{13}$	$E_{14}$
$V_2$	$E_{21}$	$E_{22}$	$E_{23}$	$E_{24}$
$V_3$	$E_{31}$	$E_{32}$	$E_{33}$	$E_{34}$
$V_4$	$E_{41}$	$E_{42}$	$E_{43}$	$E_{44}$
$V_5$	$E_{51}$	$E_{52}$	$E_{53}$	$E_{54}$

$V_i$  možné varianty

$K_j$  hodnotící kritéria

$E_{ij}$  hodnota varianty podle zvolených kritérií

Vhodné kritérium se volí na základě znalostí a požadavků kladených na varianty rozhodovací analýzy. Významnost jednotlivých kritérií je definována na základě použité metody, zvolit je možné mezi metodou pořadí, bodovací a párového srovnání. V případě, že důležitost jednotlivých kritérií vůči sobě není totožná, provede se tzv. kvantifikace preferencí jednotlivých kritérií. V praxi to znamená, že ohodnocené varianty u jednotlivých kritérií jsou vynásobeny koeficientem určujícím váhu kritéria.

# Kapitola 3

## Definování rizik

Při nahrazování polymerního materiálu mohou nastat komplikace spojené s realizací výroby konečného dílu. V této části diplomové práce analyzuji případná rizika a navrhnou, jak postupovat v případě, že tento problém nastane.

### 3.1 Nevyhovující rozměry - smrštění

Může nastat případ, kdy navržený materiál dosáhne při zpracování smrštění<sup>1</sup>, které bude mimo rozsah tolerančních polí (viz výkres dílu C.1). Opatření, které lze v tomto případě provést je následující:

#### Simulace vstřikování

Firma Linet disponuje simulačním softwarem Moldex 3D, který dokáže simulovat kompletní proces vstřikování plastů. Tento software obsahuje širokou databázi plastů a v případě, že by navržený materiál nebyl obsažen v databázi, je možné v rámci licence zažádat o jeho zařazení.

#### Úprava formy

Obecně nelze považovat žádný výstup simulačního softwaru za totožný s reálnými podmínkami. Lze se pouze přiblížit, s určitou chybou, k reálnému chování. Proto mohou nastat dvě situace.

1. Smrštění na základě simulace je vyhovující, v reálných podmínkách vyhovující není.
2. Na základě simulace má materiál nevyhovující smrštění, přesto chceme materiál použít.

V těchto případech je třeba zasáhnout do formy a změnit její rozměry. Přestože má firma Linet svoji nástrojárnu, jedná se o drahý a časově náročný úkon.

---

<sup>1</sup>Změna objemu plastového dílu, která vzniká při chladnutí.

## 3.2 Kapacita sušiček - navlhavost

Je nevýhodou polárních materiálů, že se granulát před samotným zpracováním musí vysoušet. Tento proces není technologicky náročný, ale je limitován dostupnou kapacitou sušiček, a zároveň je tato operace spojena s negativním nárůstem hmotného toku ve výrobních prostorách. Firma Linet disponuje třemi takovými sušičkami a již teď se projevují kapacitní problémy.

Před uvedením polárního materiálu do výroby je nutné zajistit volnou kapacitu sušiček, případně na základě výrobního plánu kapacitu naplánovat. To znamená, aby byl při výrobě vždy dostupný vysušený materiál.

## 3.3 Dostupnost

Portfolium polymerních materiálů je tak obsáhlé, že ne všechny jsou distribuovány v České republice. Pokud by firma Linet měla zájem využívat jeden z těchto „hůře“ dostupných materiálů, bylo by nutné provést kalkulaci, ve které by byla zahrnuta cena za dopravu a uskladnění v porovnání s alternativní materiálem dostupným v ČR.

Další možností je nechat si vyrobit konkrétní materiál na zakázku u českých výrobců. Nevýhodou výroby plastů na zakázku je vyšší cena v porovnání s komerčně prodávanými plasty.

## 3.4 Nevyhovující rozměr - zabíhavost

Konstrukce dílu nemusí odpovídat viskozitě daného materiálu. To znamená, je nutno počítat s rozdílnou viskozitou pro tenkostěnné a tlustostěnné díly. Např. při použití materiálu s nízkým indexem toku nemusí dojít k úplnému vyplnění formy u tenkostěnných dílů.

Tento problém se dá regulovat změnou teploty taveniny, formy, případně rychlostí vstřikování. Rychlost vstřikování vlivem smykových napětí souvisí s nárůstem teploty a při příliš vysokém teplotním nárůstu může dojít k degradaci materiálu.

Tomuto problému lze opět předejít simulováním výše zmíněným softwarem Moldex 3D.

## 3.5 Nevhodný vstřikolis - teplota tavení

Horní hranice teplot u vstřikolisů ve firmě Linet je  $350^{\circ}\text{C}$ . V případě zpracování materiálů přesahujících tuto teplotu by bylo nutné vyrábět díly externě, což je finančně nevýhodné. Dalším negativem v současné době by bylo zajištění takové externí výroby, a to vzhledem k velkému vytížení vstřikoven a obecně chybějícím kapacitám na jejich straně.

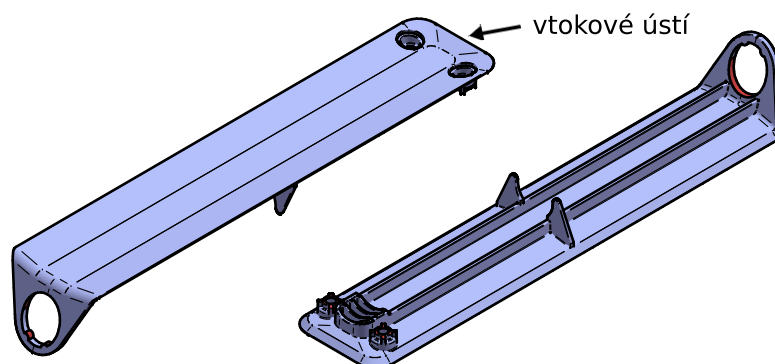
## Kapitola 4

# Stanovení materiálů

### 4.1 Zadaná kritéria

#### 4.1.1 Vyrobiteľnosť

Díl krytky mechaniky postranice obr. 4.1(příloha C.1) není konstrukčně složitý a není vystavován nadměrnému mechanickému namáhání. Jedná se o pohledový díl, který nesmí obsahovat pohledové vady a je požadována dobrá čistitelnost povrchu. Zároveň je vhodné, aby byl materiál odolný vůči poškrábání.



Obrázek 4.1: 3D model dílu

Při výběru materiálů a vstřikování dílu, je nutné zohlednit nejrizikovější oblasti, mezi které patří kruhová „objímka“ (viz foto obr. 4.2 a). Toto místo se nachází naproti vtoku a je zde riziko vzniku tzv. studeného spoje.<sup>1</sup>

Další kritické místo je u vtoku, kde jsou umístěny průchozí otvory pro šrouby. Tloušťka materiálu pod hlavami šroubů je zde zeslabena a při nadměrném zatížení postranice může dojít k destrukci dílu a k průchodu hlavy šroubu skrz materiál.

<sup>1</sup>Studený spoj - při styku více proudů taveniny ve formě vznikne nedokonalý spoj, který je náchylný na lom především při ohybu a rázu.



Obrázek 4.2: a) Studený spoj, b) Díry pro šrouby

V případě, že materiál nebude akceptovatelný z hlediska vyrobiteľnosti, nebude zahrnut do materiálů, vstupujících do rozhodovací analýzy.

#### 4.1.2 Cena dílu

Maximální zdražení výroby jednoho dílu nesmí přesáhnout 5 %. Pro účely této diplomové práce se do ceny vyrobeného dílu započítávají: Cena za 1 kg granulátu, objem materiálu, čas výrobního cyklu, minutová sazba vstřikolisu (obsluha + stroj).

#### 4.1.3 Mechanická odolnost

Pro porovnání mechanických vlastností poslouží veličiny pevnost v tahu a rázová houževnatost. Hodnoty těchto veličin budou získány od dodavatelů nebo výrobců materiálů. V případě, že tyto hodnoty nebudou k dispozici, vyrobí se normalizované vzorky a provede se testování.

#### 4.1.4 Interní testy

Hlavním kritériem při rozhodování o vhodnosti mechanických vlastností jsou testy, které jsou definovány dle normy ČSN EN 60601-2-52. Jedná se o dva testy. Prvním testem je dynamická zkouška blíže specifikovaná v čl.15.3.3. Jedná se o náraz ocelové koule o  $\phi$  50 mm a o hmotnosti 500 g, která je zavěšena na laně dlouhém 1,3 m, do dílu připevněného do postranice<sup>2</sup>. Vzdálenost počáteční pozice ocelové koule je 1,3 m od testovaného dílu. Z této pozice necháme ocelovou kouli narazit do krytky. Fotografie z testování dílů je na následujícím snímku.

---

<sup>2</sup>Postranice je označení pro postranní část lůžka. Lze vidět na obr. 4.4



Obrázek 4.3: Dynamický test



Obrázek 4.4: Statický test

Obr. 4.3 zobrazuje koncovou pozici ocelové koule po dopadu na krytku. Při testu nesmí dojít k poškození dílu. V případě vzniku praskliny je úspěšnost testu posouzena hlavním konstruktérem tohoto dílu.

Druhý test je prováděn podle normy ČSN EN 60601-2-52, čl. 9.8.3.3.3. (obr. 4.4). Zkouška spočívá ve statickém namáhání dílu. Díl je opět připevněn k postranici, která je zatížena silou 500 N po dobu 30 s. Toto zatížení se celkem opakuje 10 x. Pokud nedojde k poškození, zvýší se zatížení o 100 N. Tímto způsobem se postupuje až do zatížení 1000 N. Při každém navýšení zatížení se provádí cyklus již pouze jednou.

Kritérium druhého testu je následující. Při zatížení 500 N a opakování 10 x, nesmí dojít k žádnému poškození. V případě vzniku poškození při následném zvyšování zatížení, je přípustnost dílu posuzována hlavním konstruktérem tohoto dílu.

Vzhledem k časové náročnosti testování, bude interní test proveden pouze u materiálu, který bude nejlépe ohodnocen na základě vícekritériálního ohodnocení.

#### 4.1.5 Čistitelnost

Produkty firmy Linet jsou projektovány pro specifické, nemocniční prostředí, které vyžaduje speciální pozornost v oblasti čistitelnosti. Demonstrace zhoršené čistitelnosti bude provedena jako schopnost materiálu absorbovat vodu. V praxi, vlivem běžného používání materiálu, obsahují polární (navlhavé) materiály neestetické skvrny, které lze jen obtížně vyčistit. S roustoucí navlhavostí zároveň klesá vhodnost materiálu pro údržbu. Tento poznatek není teoreticky podložen, jedná se pouze o zkušenost z praxe.

#### 4.1.6 Odolnost proti poškrábání

U pohledových dílů je kladen důraz na vzhled, který bývá často degradován rýhami a škrábanci. Odolnost materiálu vůči tomuto poškození je aproximována pomocí povrchové tvrdosti.

## 4.2 Původní materiál

Původní nevyhovující materiál je dodáván od českého výrobce Silon, který je pod obchodním názvem označen TABOREN-PH 82 T20. Jedná se o PP homopolymer plněný 20 % talku. Vlastnosti udávané výrobcem jsou uvedeny v tabulce 4.1. Cena materiálu je 49 Kč/kg.

Tabulka 4.1: TABOREN-PH 82 T20 - vlastnosti udávané výrobcem

Vlastnosti	Norma	Hodnota	Jednotky
Index toku taveniny	ISO 1133	18	g/10min
Hustota	ISO 1183-1	1,04	g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu na mezi kluzu	ISO 527	30	MPa
Prodloužení při přetržení	ISO 527	8	%
Modul pevnosti v ohybu	ISO 178	2 600	MPa
Rázová houževnatost	ISO 179-1	2,5	kJ/m <sup>2</sup>
Teplota měknutí dle Vicata	ISO 306	151	°C

Krytka mechaniky postranice vyrobená z tohoto materiálu byla podrobena dvěma interním testům. Při prvním testu (popsáno v kapitole 4.1.4) vznikly nepřípustné praskliny.

Při druhém testu dochází k destrukci dílu v oblasti možného studeného spoje a v oblasti průchozích otvorů pro šrouby. Tato kritická místa jsou zobrazena na obr.(4.2).

Na základě těchto dvou testů byl materiál vyhodnocen jako nevyhovující. Z parametrů udávaných výrobcem je patrné, že polymerní materiál má velmi špatnou houževnatost, přičemž zásadní vliv na tuto skutečnost má jednak zvolené složení PP, která je tvořeno z homopolymeru a jednak obsah talku, který je 20 %.

## 4.3 Výběr materiálů

### 1. PPC5TF2 Natural HI

Jedná se o PP s 20 % talku s uspořádáním strukturních jednotek kopolymeru. Důvodem tohoto výběru je velký odběr materiálu od dodavatele Audia Plastics. Materiál je tudíž skladově dostupný a dosahuje vyšší rázové houževnatosti než původní nevyhovující materiál. Vyšší rázová houževnatost je zde ovšem na úkor nižší pevnosti v tahu. Cena materiálu je 50,64 Kč/kg.

Tabulka 4.2: PPC5TF2 Natural HI - vlastnosti udávané výrobcem

Vlastnosti	Norma	Hodnota	Jednotky
Index toku taveniny	ISO 1133	15	g/10min
Hustota	ISO 1183-1	1,03	g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	ISO 527	20	MPa
Prodloužení při přetržení	ISO 9	–	%
Modul pevnosti v ohybu	ISO 178	1400	MPa
Rázová houževnatost	ISO 179-1	12	kJ/m <sup>2</sup>
Teplota měknutí dle Vicata	ISO 306	–	°C

## 2. Taboren-PC72 T20

Dodavatelem tohoto PP plněného 20 % talku je český výrobce polymerních materiálů Silon, tedy totožný dodavatel jako u původního, nevyhovujícího materiálu. Jedná se tedy o nejjednodušší formu změny materiálu, kdy dodavateli jsou zadány konkrétní nevyhovující vlastnosti a očekávané požadavky. V našem konkrétním případě byl zadán požadavek pro zvýšení rázové houževnatosti.

Výrobce zaměnil homopolymer za kopolymer, čímž došlo k požadované změně. Současně došlo ke snížení ceny a zhoršení pevnosti v tahu. Cena materiálu je 48,23 Kč/kg.

Tabulka 4.3: TABOREN-PC 72 T20 - vlastnosti udávané výrobcem

Vlastnosti	Norma	Hodnota	Jednotky
Index toku taveniny	ISO 1133	13	g/10min
Hustota	ISO 1183-1	1,04	g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	ISO 527	24	MPa
Prodloužení při přetržení	ISO 9	8	%
Modul pevnosti v ohybu	ISO 178	2 200	MPa
Rázová houževnatost	ISO 179-1	6	kJ/m <sup>2</sup>
Teplota měknutí dle Vicata	ISO 306	150	°C



### 3. Promyde B30 P

Mechanické vlastnosti PP s minerálním plnivem jsou omezené, přestože jdou do určité míry modifikovat. Materiál, který Linet využívá pro mechanicky náročné aplikace, je PA6 (Promide B30 P). Použitím tohoto materiálu by ovšem došlo k neúměrnému zdražení a zároveň k dalšímu využití kapacity sušiček.

Výběr tohoto materiálu je zajímavý v porovnání mechanických vlastností výsledného dílu. Cena materiálu je 67,58 Kč/kg.

Tabulka 4.4: Promide B30 P - vlastnosti udávané výrobcem

Vlastnosti	Norma	Hodnota*	Jednotky
Index toku taveniny	ISO 1133	–	g/10min
Hustota	ISO 1183-1	1,13	g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	ISO 527	85/40	MPa
Prodloužení při přetržení	ISO 9	16/>50	%
Modul pevnosti v ohybu	ISO 178	2 800/1 100	MPa
Rázová houževnatost	ISO 179-1	5/30	kJ/m <sup>2</sup>
Teplota měknutí dle Vicata	ISO 306	–	°C

\* Tento materiál je polární a má rozdílné vlastnosti v závislosti na vlhkosti. Hodnoty udávané v tabulce: Suchý/mokrý.

### 4. Starex VH-0800

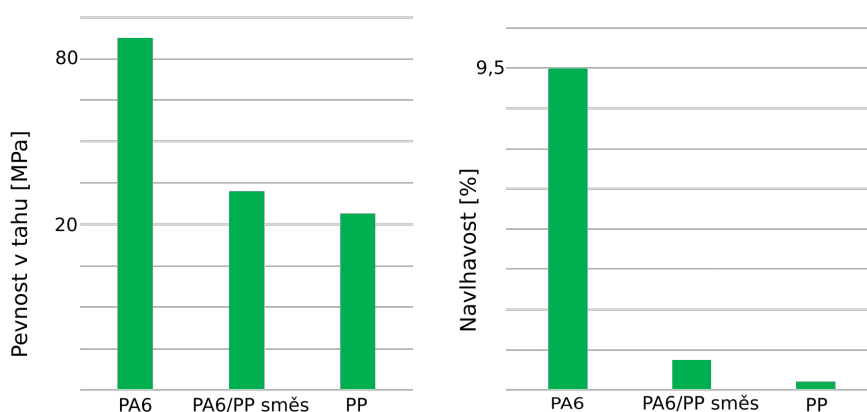
Starex VH-0800 je akrylonitril butadién styrén (ABS). Opět není splněna podmínka max. zdražení 5%, ovšem polymerní materiál ABS se vyznačuje vysokou tuhostí, houževnatostí, používá se i pro potravinářské výrobky, splňoval by tedy i požadavky kladené pro účely v medicíně. Vzhledem k dostupnosti tohoto materiálu na skladu firmy Linet, bude tento materiál opět vhodný pro porovnání s ostatními materiály převážně z mechanických vlastností. Cena materiálu je 79,24 Kč/kg.

Tabulka 4.5: Starex VH-0800 - vlastnosti udávané výrobcem

Vlastnosti	Norma	Hodnota	Jednotky
Index toku taveniny	ISO 1133	6	g/10min
Hustota	ISO 1183-1	–	g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	ISO 527	41	MPa
Prodloužení při přetržení	ISO 9	–	%
Modul pevnosti v ohybu	ISO 178	2 200	MPa
Rázová houževnatost	ISO 179-1	20	kJ/m <sup>2</sup>
Teplota měknutí dle Vicata	ISO 306	86	°C

## 5. Směs PP/PA6

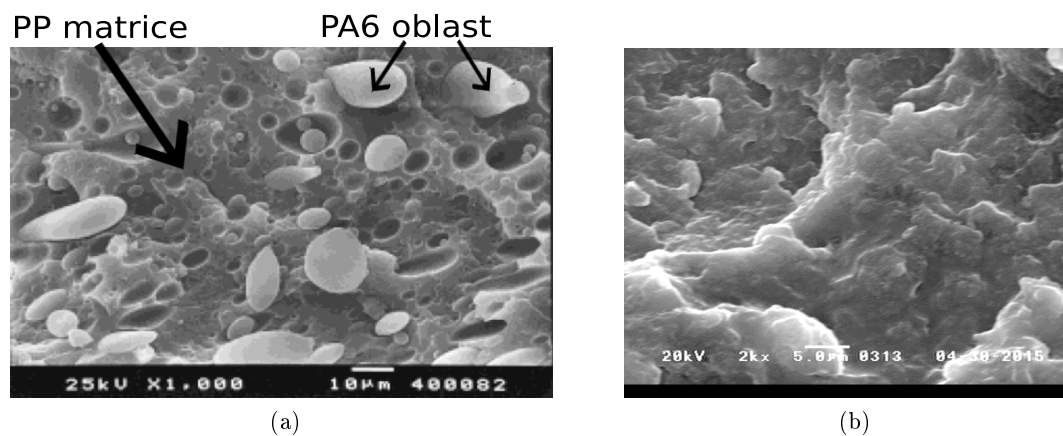
Samotný PA6 má pro naši aplikaci až zbytečně vysoké mechanické vlastnosti a je příliš drahý. Zároveň je polární, je tedy nevhodným materiálem pro pohledový díl. Přidáním PP dojde ke snížení ceny a navlhavosti. Vedlejším efektem je snížení mechanických vlastností, nikoliv však pod požadované hodnoty. Příklady předpokládaných vlastností této směsi jsou zobrazeny v grafu 4.5.



Obrázek 4.5: Předpokládané vlastnosti směsi [25]

Dalším důvodem navržení této směsi je skladová dostupnost obou materiálů, firma Linet oba materiály využívá běžně v jiných aplikacích. Konkrétně se jedná o standardní PA6 pod obchodním názvem Promyde B30 P a PP s obsahem 20% talku, který je označován pod obchodním názvem PPC5TF2 Natural HI, který je vhodný především pro svoji vysokou rázovou houževnatost.

Aby směs měla očekávané vlastnosti, je nutné, aby z chemického hlediska došlo ke vhodnému spojení obou materiálů. Rozdíl homogenity je znázorněn na snímku z elektronového mikroskopu (4.6)



Obrázek 4.6: a) Nehomogenní směs [25] , b) Homogenní směs [25]

# Kapitola 5

## Experimentální část

Experimentální část je rozdělena na dvě kapitoly. V první testujeme chování směsi PP/PA6, jež byla navržena společně s dalšími materiály. Testování probíhá z důvodu vlastní výroby směsi, tudíž nejsou k dispozici podmínky pro vstřikování ani výsledné chování směsi. V druhé části testujeme navržené materiály na základě zadaných kritérií.

### 5.1 Testování směsi PP/PA6

#### 5.1.1 Termická analýza a mikrostruktura

V této fázi testování jsme zjišťovali, zda lze díl v reálných podmínkách ze směsi vyrobit, jaké je chování směsi z hlediska termiky, jaký vliv na směr má rozdílné procentuální zastoupení PP a PA6 a vliv rozdílných kompatibilizátorů na homogenitu směsi.

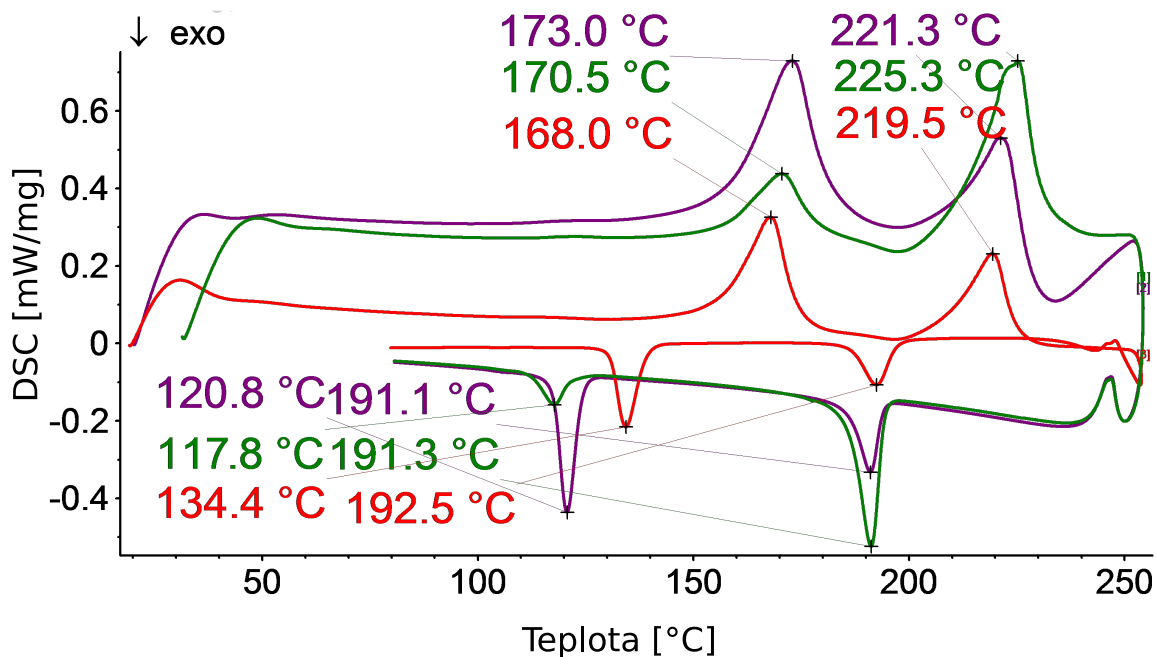
Výchozími materiály pro výrobu směsi jsou PA6 (Promyde B30), PP s obsahem 20% talku (PPC5TF2 Natural HI) a „čistý“ PP. Testovanými kompatibilizátory je TABOND 2002 od českého výrobce Silon a G-3003 od firmy Eastman, který byl poskytnut od polského dodavatele. Byly vyrobeny tyto materiálové varianty:

Tabulka 5.1: Testované varianty

Varianta	PP[ob.%]	PP-20% talk [ob.%]	PA6 [ob.%]	Komp. [2 ob.%]
1.	30	–	70	Tabond 2002
2.	50	–	50	Tabond 2002
3.	70	–	30	Tabond 2002
4.	–	50	50	Tabond 2002
5.	–	70	30	Tabond 2002
6.	–	50	50	G 3003
7.	–	70	30	G 3003

## Termická analýza

Následující graf 5.1 popisuje rozdílné chování směsí z termického hlediska. Fialová křivka představuje směs s obsahem 70 % „čistého“ PP a 30 % PA6. Zelená křivka představuje stejnou směs, ovšem o koncentracích 30 % PP a 70 % PA6, a poslední, červená křivka, představuje směs o koncentraci 70 % PP s obsahem 20 % talku a 30 % PA6.



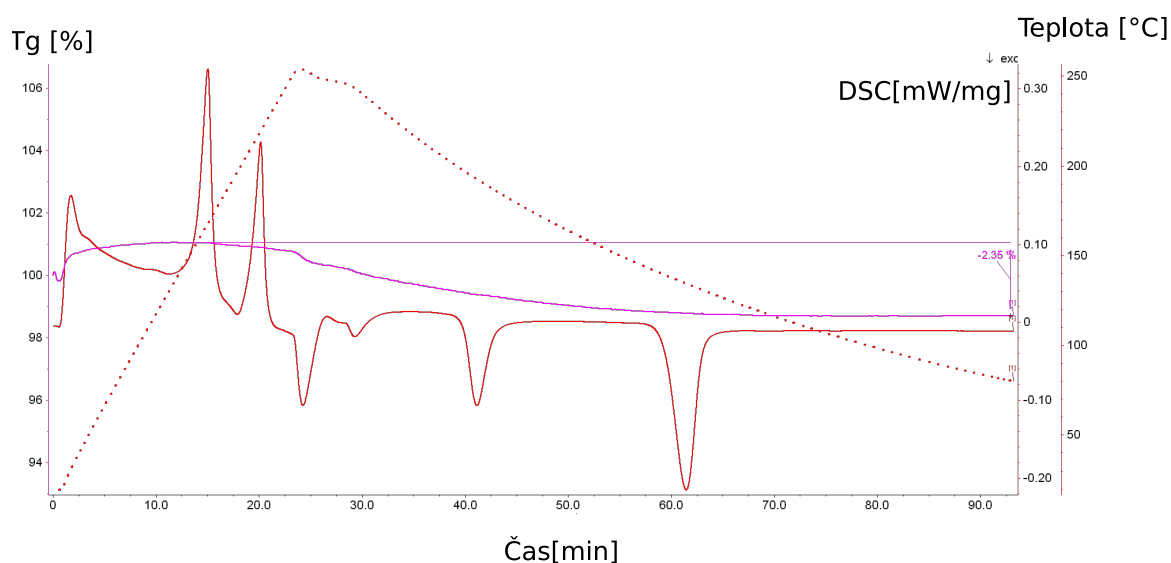
Obrázek 5.1: Termická analýza směsí PP/PA6

Teplota tání u PP je 160 °C a u PA6 220 °C. Z měření vyplývá, že tato teplota je u PP ovlivněna přítomností PA6.

Teplota tavení a tuhnutí směsi závisí na poměru jednotlivých složek PP/PA6 a na přítomnosti minerálního plniva.

Rozbor křivek je následující (vysvětleno na fialové křivce): V oblasti ohřevu první peak 173 °C znamená teplotu tavení PP. Druhý peak 221,3 °C představuje teplotu tání PA6. Dále v oblasti ochlazování peak 191,1 °C představuje teplotu krystalizace PA6 a poslední peak 120,8 °C udává, při jaké teplotě tuhne PP.

V grafu 5.2 je křivka DSC, teplotní průběh a hmotnostní úbytek, který představuje úbytek vody. Výsledek měření je zobrazen pro variantu 7 (tabulka 5.1).

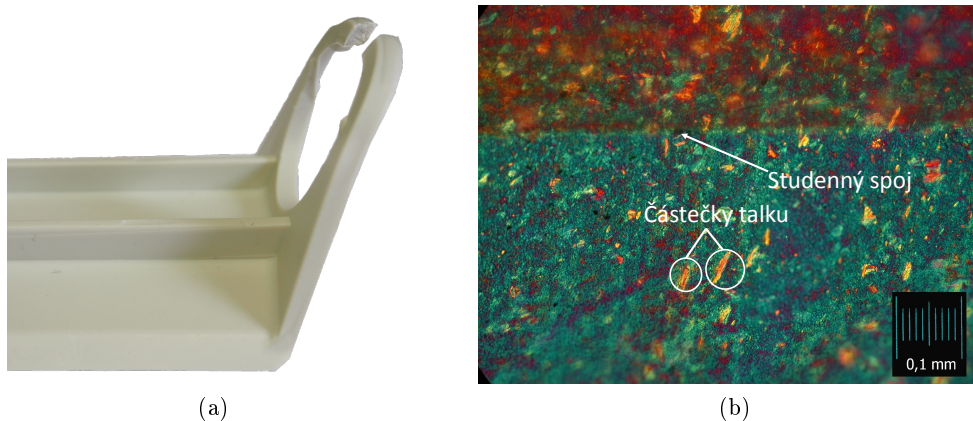


Obrázek 5.2: Termická analýza

Z hmotnostního úbytku vyplývá, že navlhavost směsi je 2,35 %. Jedná se množství vody, které bylo absorbováno materiálem z okolní atmosféry. (Měření nebylo opakováno, naměřená hodnota není statisticky podložena.)

### Mikrostruktura

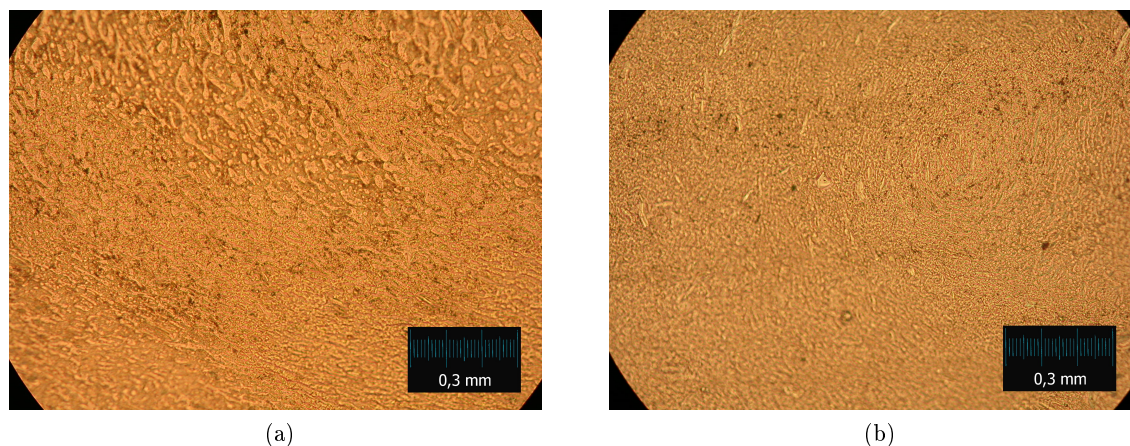
Při výrobě dílu podle varianty č.7 vznikl studený spoj. Na obrázku 5.3 a) je místo vzniku studeného spoje a na obr. 5.3 b) je snímek studeného spoje pořízený na mikroskopu.



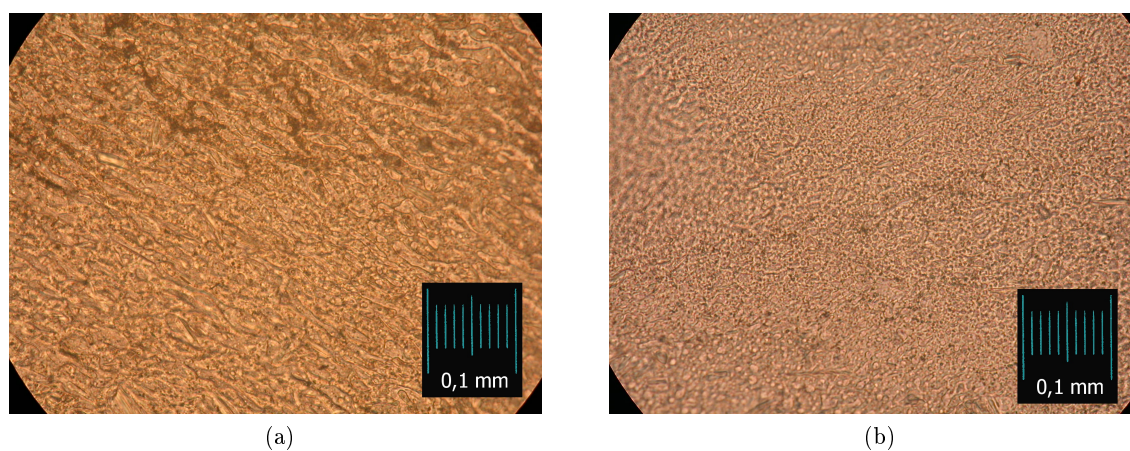
Obrázek 5.3: a) Oblast výskytu studeného spoje, b) Studený spoj (50x zvětšení, s polarizátorem)

Na základě snímku z mikroskopu lze konstatovat, že parametry vstřikování nebyly dostatečně optimalizovány, neboť došlo k nedostatečnému spojení materiálu v oblasti zobrazené

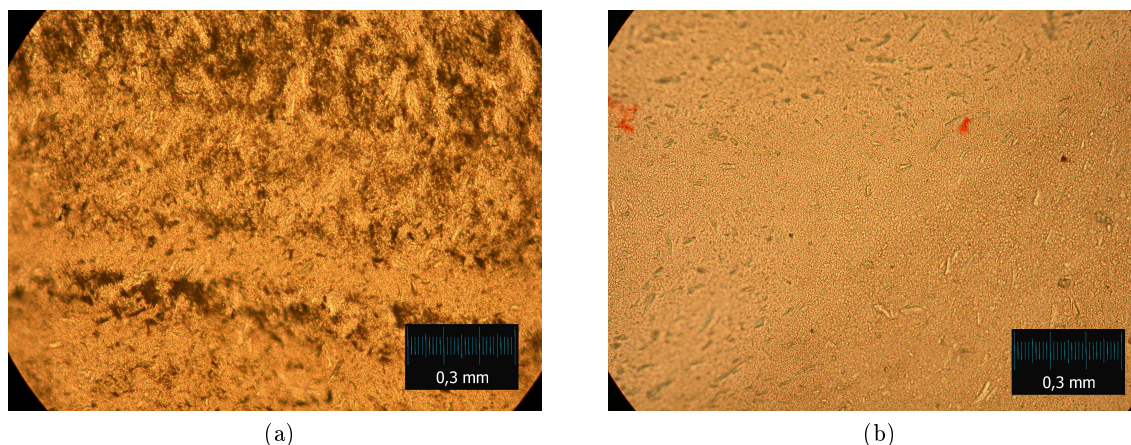
na obr. 5.3 a). Z makroskopického hlediska došlo ke spojení všech materiálových variant. Na snímcích z optického mikroskopu je ovšem patrné, že materiály o stejných koncentracích složek směsi mají rozdílnou homogenitu. Na snímcích z mikroskopu (obr. 5.4, 5.5, 5.6) lze vidět, že kompatibilizátor G-3003 od firmy Eastman daleko lépe „spojí“ jednotlivé složky směsi.



Obrázek 5.4: Struktura směsi (PP-T20)50+(PA)50 (20x zvětšení) s odlišnými kompatibilizátory a) TABOND 2002 b) Eastman G-3003



Obrázek 5.5: Struktura směsi (PP-T20)50+(PA)50 (50x zvětšení) s odlišnými kompatibilizátory a) TABOND 2002 b) Eastman G-3003



Obrázek 5.6: Struktura směsi (PP-T20)70+(PA)30 (20x zvětšení) s odlišnými kompatibilizátory a) TABOND 2002 b) Eastman G-3003

### Rekapitulace výsledků

Experimentem bylo potvrzeno, že díl lze ze směsi PP/PA6 v reálných podmínkách vyrobit. Na základě termické analýzy zjišťujeme, že při rozdílných koncentracích směsi, se vyskytují rozdílné teploty tání jednotlivých složek. To znamená, při zpracování jsou zapotřebí rozdílné parametry při vstřikování pro jednotlivé koncentrace. Dále zjišťujeme nezanedbatelné rozdíly dvou kompatibilizátorů dodávaných od různých výrobců.

### 5.1.2 Mechanické vlastnosti

V této experimentální části jsou vyrobeny normalizované díly pro tahovou a rázovou zkoušku. Jako kompatibilizátory budou použity G-3003, který v minulém testu dopadl lépe, a nově poskytnutý Bondyram 101LE od českého distributora Velox. Cílem experimentu je zjistit, jaký vliv má poměr polypropylenu a polyamidu 6 na výsledné mechanické vlastnosti, jaké jsou rozdíly v použití kompatibilizátorů od různých výrobců a jaký vliv má obsah kompatibilizátoru ve směsi. Každé měření obsahuje statistický soubor pěti vzorků.

V tabulce 5.2 jsou vypsány zkoumané varianty směsí. Obsah PA6 byl zvolen od 10-30 hm.% a obsah kompatibilizátoru byl zkoumán od 2-10 hm.%.

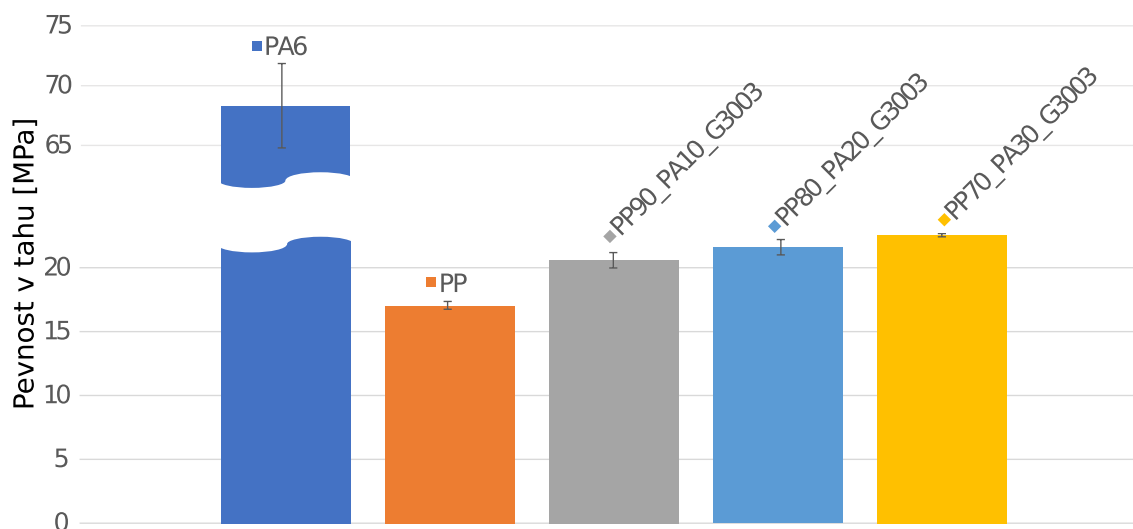


Tabulka 5.2: Vysvětlení použitého značení v [hm. %]

Označení	PP-20% talek	PA6	Komp.
PA6	0	100	–
PP	100	0	–
PP90_PA10_G3003	90	10	2% Eastman G3003
PP80_PA20_G3003	80	20	2% Eastman G3003
PP70_PA30_G3003	70	30	2% Eastman G3003
PP90_PA10_BONDYRAM	90	10	2% Bondyram 101LE
PP80_PA20_BONDYRAM	80	20	2% Bondyram 101LE
PP70_PA30_BONDYRAM	70	30	2% Bondyram 101LE
PP70_PA30_5%G3003	70	30	5% Eastman G3003
PP70_PA30_10%G3003	70	30	10% Eastman G3003

### Tahová zkouška

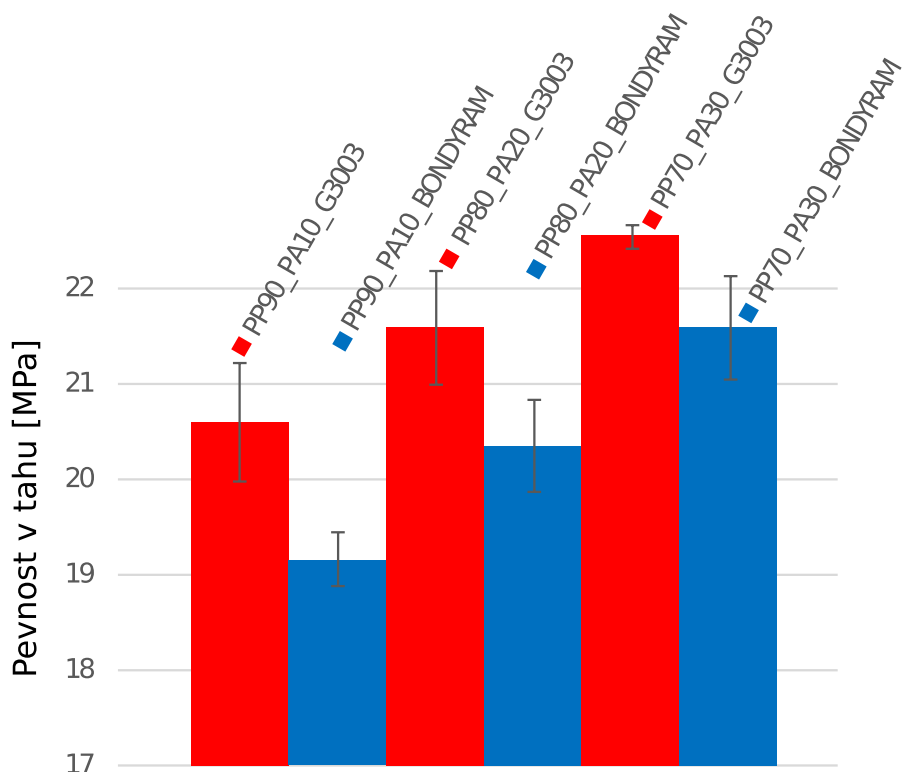
V grafu 5.7 jsou znázorněny dosahované pevnosti na mezi kluzu pro „čisté“ materiály a zvolené směsi.



Obrázek 5.7: Závislost poměru směsi na pevnosti

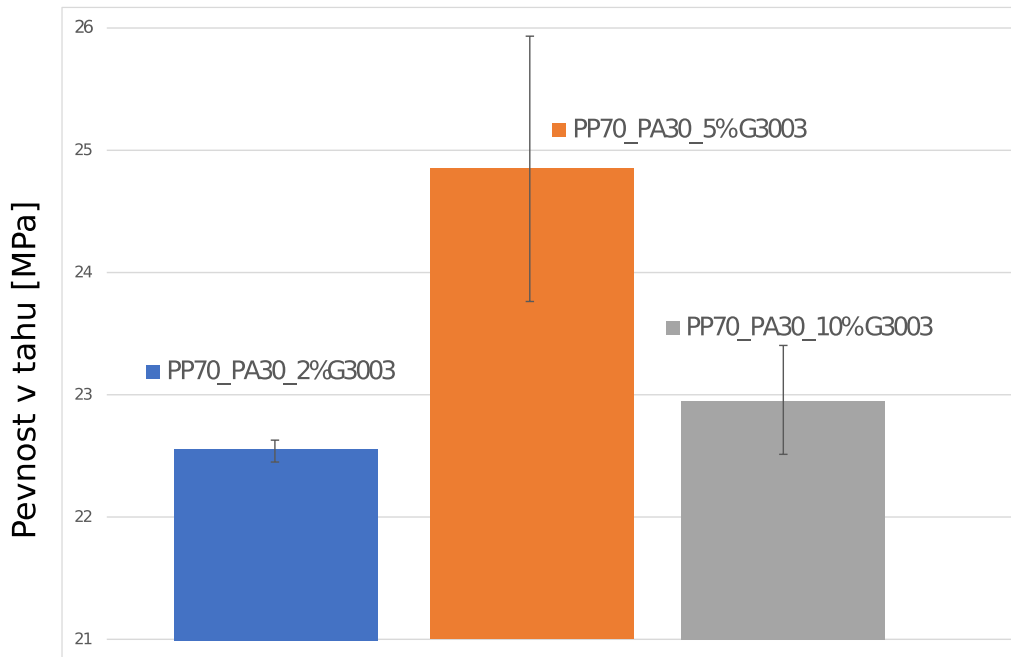
Z měření vyplývá, že nejvyšší pevnosti dosahuje čistý PA6. Postupným zvyšováním poměru PA6 ve směsi s PP, dochází k lineárnímu nárůstu pevnosti.

Zajímavým zjištěním je rozdílné chování kompatibilizátorů, které by na základě údajů, udávaných výrobcí, měly být totožné. U obou případů se jedná o PP s anhydridem kyseliny maleinové. Z grafu 5.8 ovšem vyplývá, že vyšší pevnosti dosahujeme za použití kompatibilizátoru Eastman G3003. Toto zjištění může být vysvětleno např. odlišnou koncentrací aktivní látky (anhydridu kyseliny maleinové) v nosiči, kterým je blíže nespecifikovaný PP, který obdobně může mít vliv na výsledné chování.



Obrázek 5.8: Porovnání kompatibilizátorů G-3003, Bondyram

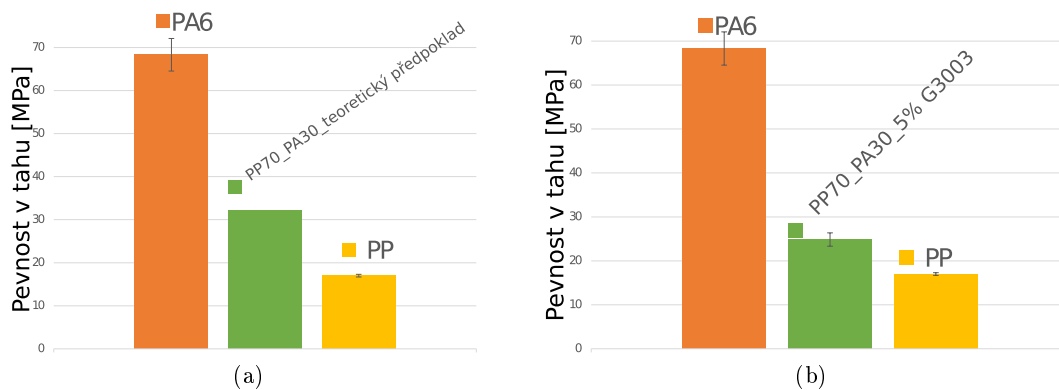
Pro všechny směsi byla použita koncentrace kompatibilizátoru 2 hm.%. Tato koncentrace není empiricky ani teoreticky podložena. Proto byl změřen vliv množství kompatibilizátoru na chování směsi (graf 5.9).



Obrázek 5.9: Vliv obsahu kompatibilizátoru na pevnost

Při koncentraci 5% je dosahováno nejvyšší pevnosti. Pro vyvozování závěrů je ovšem nedostačující počet testovaných koncentrací. Není zřejmé, zda při obsahu kompatibilizátoru 5% se pohybujeme v oblasti tendence růstu, či poklesu.

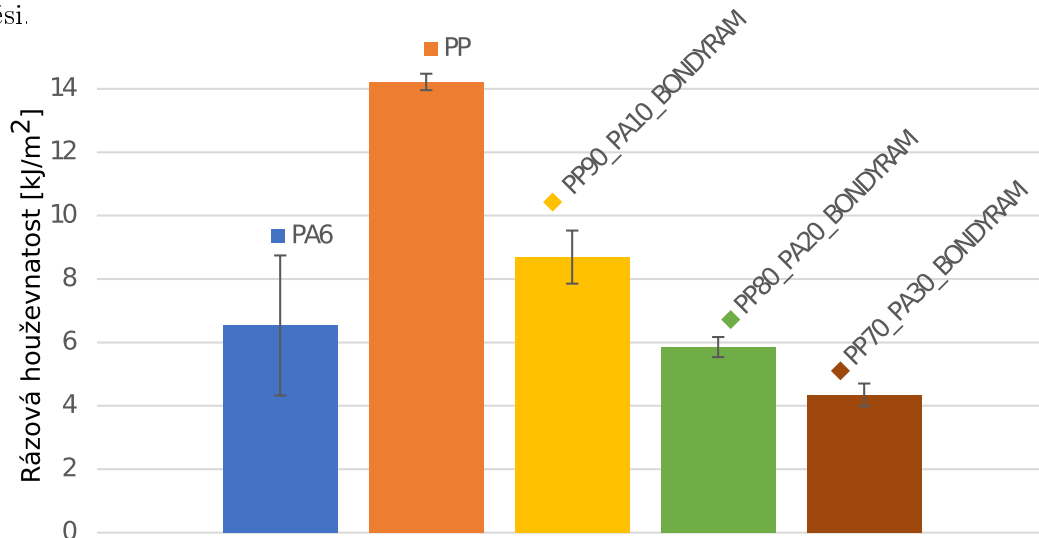
Z naměřených hodnot vyplývá, že přidáním 30% PA6 do PP a obsahem kompatibilizátoru 5% se zvýší pevnost PP přibližně 1,5 x. Dle teoretických předpokladů by se pevnost měla zvýšit zhruba 1,9 x (viz graf 5.10). Vypočteno na základě poměru pevností v tahu.



Obrázek 5.10: Porovnání vybrané směsi s původními materiály a) Teoretická pevnost, b) naměřená pevnost

### Rázová zkouška

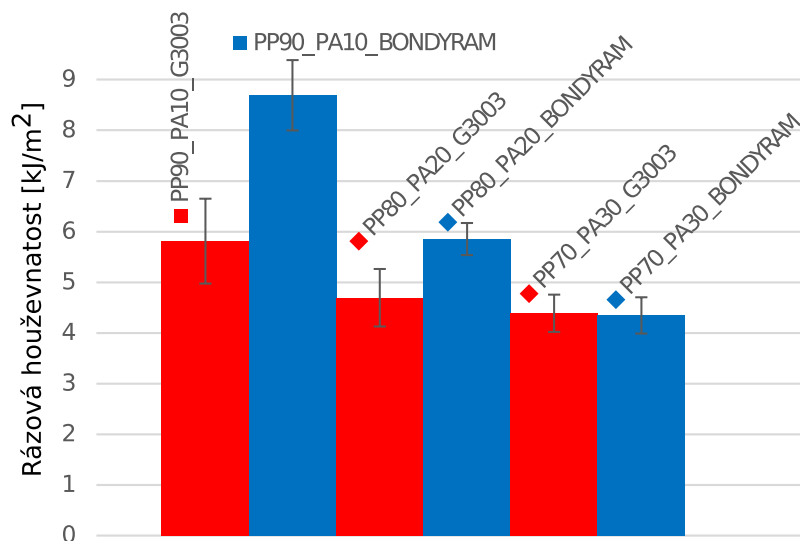
Rázová houževnatost je u PP (PPC5TF2 Natural HI) vyšší než u PA6 (Promyde B30 P). Tendence je tudíž opačná. Se zvyšující se koncentrací PA6 se snižuje rázová houževnatost směsi.



Obrázek 5.11: Závislost poměru směsi na rázové houževnatosti

Takto nízká houževnatost u materiálu Promyde B30 P (polární materiál PA6) může být vysvětlena nízkým obsahem vody. Vzorek po vstřikovacím procesu byl vyjmut a vložen do sáčku, kde byl ponechán až do testování rázové houževnatosti. Tímto přístupem bylo zamezeno vodě, obsažené v okolní atmosféře, aby ovlivnila polární materiál.

Porovnání kompatibilizátorů z hlediska rázové houževnatosti je uvedeno v grafu 5.12. Vyšší rázové houževnatosti je dosahováno u kompatibilizátoru značky Bondyram. Je tomu tedy obráceně, než u pevnosti v tahu.



Obrázek 5.12: Porovnání kompatibilizátorů G-3003, Bondyram

### Rekapitulace výsledků

V této fázi testování směsi bylo vyzorováno, že pevnost v tahu s přibývajícím obsahem PA6 lineárně roste. Nárůst pevnosti však neodpovídá teoreticky předpokládaným hodnotám při ideální homogenitě směsi. Tento fakt je pravděpodobně způsoben nedostatečnou optimalizací výroby směsi.

V testování pevnosti v tahu vychází lépe kompatibilizátor Eastman G-3003, pro rázovou houževnatost je tomu naopak. Z testování procentuálního zastoupení kompatibilizátoru ve směsi vychází, že zde existuje potenciál pro zjištění přesné závislosti. Ideálně by bylo vhodné vyrobit vzorky od 3-7 hm.% kompatibilizátoru a ty podrobit jednoosému namáhání, případně rázové houževnatosti. Z našeho měření vychází nejlépe koncentrace 5%.

## 5.2 Zadaná kritéria - měření

Pokud nebude uvedeno jinak, v následujícím textu bude značením PP/PA6 myšleno 90% PP s 20 % talku (PPC5TF2 Natural HI) a 10 % PA6 (Promyde B30 P). Tato koncentrace je vybrána na základě předpokládaných, optimálních vlastností a ceny. Jako nejvhodnější kompatibilizátor byl zvolen Eastman G3003, který dopadl v testování nejlépe. Do ceny dílu vyrobeného z této směsi nebyla započítána částka za kompatibilizátor, a to z toho důvodu, že byl kompatibilizátor pro účely testování poskytnut zdarma, tudíž není k dispozici nabídková cena. Vzhledem k malému používanému množství a nosiči aktivní látky, kterým je PP, bude tato cena ovšem zanedbatelná.

### 5.2.1 Vyrobitelnost

V této části experimentální práce jsme vyrobili zadaný díl ze všech navržených materiálů. Výhodou všech navržených, komerčně prodávaných materiálů jsou poskytnutá doporučení pro parametry vstřikování od výrobců a zkušenosti zaměstnanců firmy Linet s těmito polymerními materiály. Při takto optimalizovaném procesu vstřikování nedochází problémům v oblasti výroby.

Experimentální výroba různých druhů směsi je popsána v kapitole 5.1.1.

### 5.2.2 Cena dílu

Cena dílu se vypočítá jako součet ceny materiálu použitého na výrobu jednoho dílu a paušální ceny za využívání vstřikolisu (viz tabulka 5.3). Čas cyklu je pro všechny materiály shodný, přestože v reálných podmínkách vyžaduje každý materiál jiné parametry vstřikování, s čímž souvisí i jiné časy cyklů. Tyto časové rozdíly jsou ovšem v porovnání např. s výměnou formy zanedbatelné, a proto se s nimi nepočítá. Pro vstřikolis Zhafir 90 Demag 50/80 je vypočtena paušální cena za minutu 3,16 Kč.

Tabulka 5.3: Výpočet ceny dílu

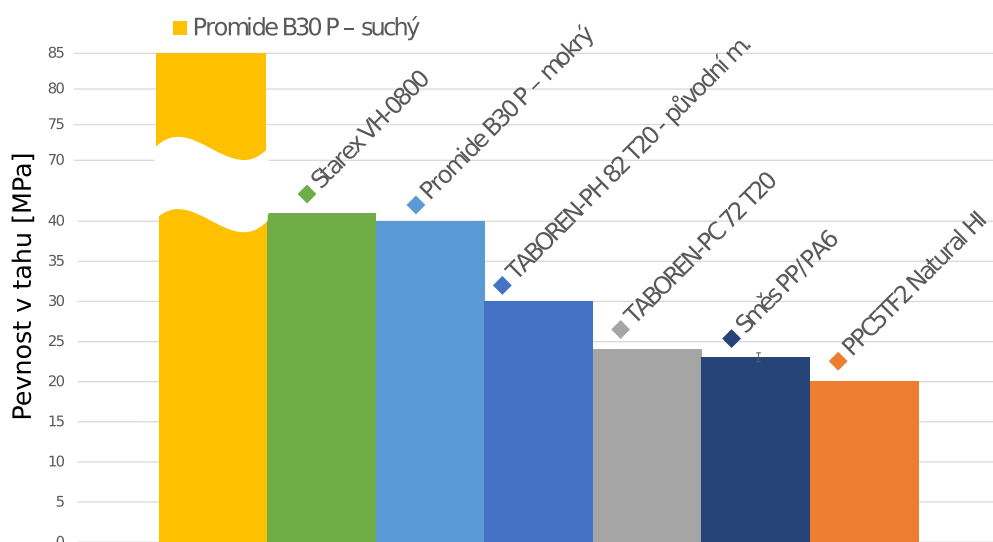
Název materiálu	Skl.cena [Kč/kg]	Váha dílu [kg]	Cena mat. na kus [Kč]	Čas cyklu(S)	Sazba 3,15kč/ min Zhařir 90 Demag 50/80	Konečná cena dílu	Splněna podmínka 5%
TABOREX-PH 82 T20 -původní materiál	49,00	0,0540	2,646	22,5	3,15	3,827	ANO
PPC5TF2 Natural HI	50,64	0,0535	2,708	22,5	3,15	3,890	ANO
Taboren-PC72 P20	48,23	0,0540	2,604	22,5	3,15	3,786	ANO
Promide B30 P	67,58	0,0587	3,965	22,5	3,15	5,146	NE
StarexVH-0800	79,24	0,0608	4,814	22,5	3,15	5,995	NE
Směs PP/PA6 (90/10 hm.%)	52,33	0,0540	2,83395	22,5	3,15	4,015	ANO

Ze zadání jsme limitováni maximálním zdražením nového materiálu o 5 %. Tohoto kritéria nebylo dosaženo u materiálů Promide B 30 P a Starexu VH-0800. Ke zlevnění v porovnání s původním materiálem došlo pouze u materiálu Taboren-PC72 P20, a to o 1,3 %.

### 5.2.3 Mechanická odolnost

Téměř všechny hodnoty mechanických vlastností byly převzaty od výrobce. Pouze pro směs PP/PA6 jsme vyrobili normalizované vzorky a ty jsme podrobili testování viz kapitola 5.1.2. Pro porovnání jsme zařadili do grafu i původní, nevyhovující materiál TABOREN-PH 82 T20.

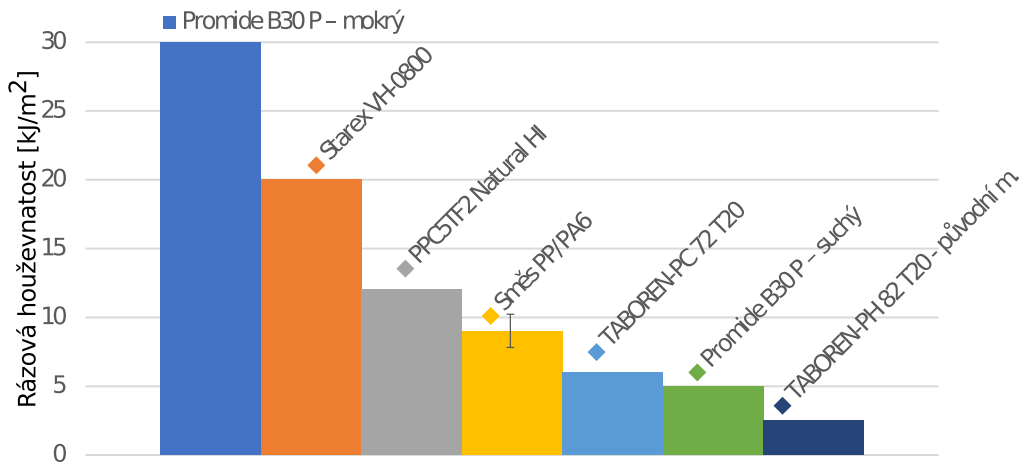
V následujícím grafu 5.13 jsou porovnány všechny materiály z hlediska pevnosti v tahu. Nejvyšší pevnosti dosahuje „čistý“ PA6 (Promide B30 P) v suchém stavu. Naopak nejnižších hodnot dosahuje PP s 20 % talku PPC5TF2 Natural HI.



Obrázek 5.13: Pevnost v tahu - všechny materiály

Graf 5.14 zobrazuje porovnání rázové houževnatosti pro všechny vybrané materiály. Opět hodnoty rázových houževnatostí byly poskytnuty od výrobců materiálů, kromě směsi

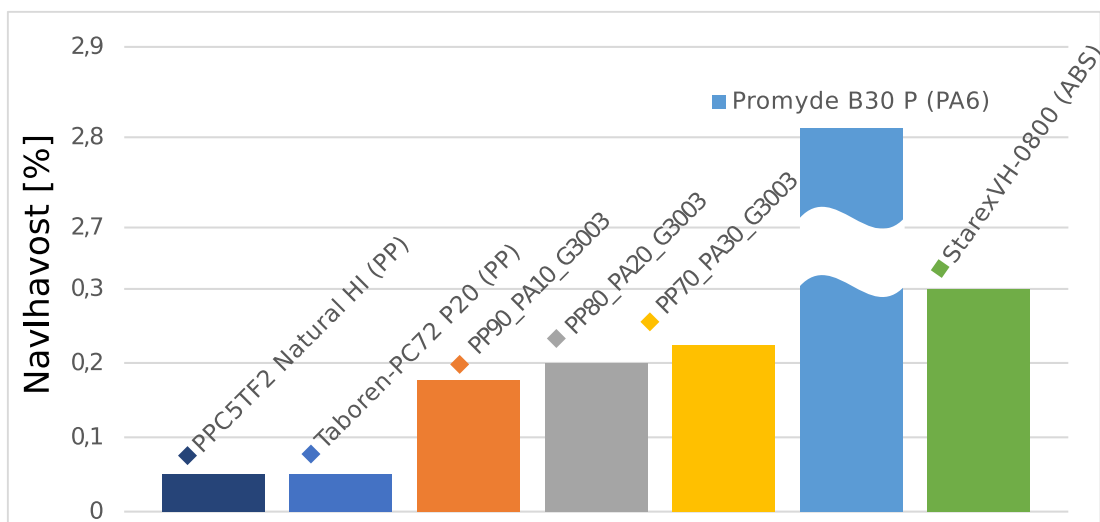
PP/PA6. Ta byla podrobena vlastnímu testu na rázovou houževnatost. Nejvyšší hodnoty dosahuje „mokrý“ PA6 (Promyde B30 P). Naopak výrazně nejnižší hodnot dosahuje původní, nevyhovující materiál TABOREN-PH 82 T20.



Obrázek 5.14: Rázová houževnatost - všechny materiály

#### 5.2.4 Čistitelnost

V následujícím experimentu byly vzorky vystaveny vodnímu prostředí po 3 dny. Po tomto časovém úseku jsme provedli hmotnostní rozdíl materiálu vystaveného běžným atmosférickým podmínkám a vodnímu prostředí. Srovnání navlhavosti jednotlivých materiálů je provedeno v grafu 5.15. Z výzkumných účelů byly do experimentu zahrnuty i vzorky s rozdílnou koncentrací složek PP a PA6. Ze statistických důvodů je navlhavost měřena pro každý materiál na pěti vzorcích.



Obrázek 5.15: Navlhavost jednotlivých materiálů

Z testu je patrné, že nejnižší navlhavost mají nepolární materiály, mezi které patří PP. Naopak nejvyšší navlhavost má polární polymerní materiál PA6 (Promyde B30). S narůstající koncentrací PA6 ve směsi, zároveň stoupá schopnost materiálu absorbovat vodu.

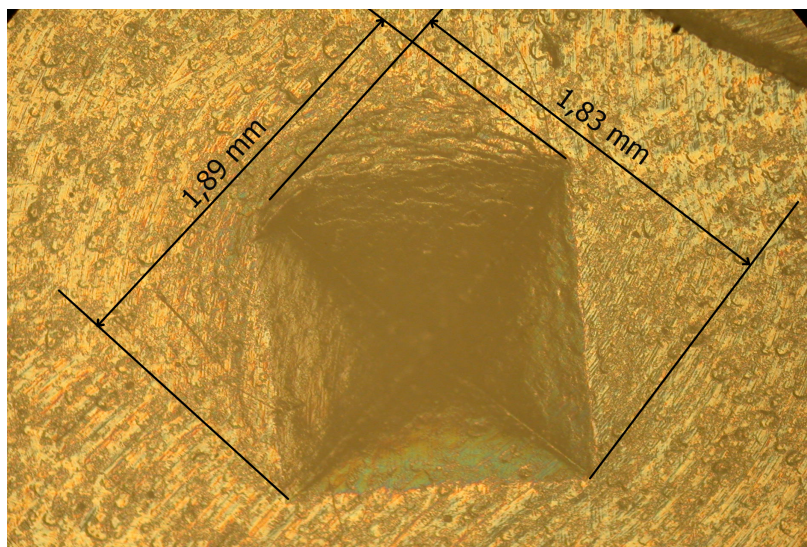
Výsledky tohoto experimentu nelze porovnávat s výsledky měření navlhavosti z termické analýzy, která měří obsah vody na bázi tavenina - rovnovážný stav v atmosféře, tento experiment porovnává rovnovážný stav v atmosféře - vodní prostředí.

### 5.2.5 Odolnost proti poškrábání

Odolnost proti poškrábání úzce souvisí s tvrdostí materiálu. Jelikož plast se chová viskoelasticky, nelze měřit tvrdost standardním způsobem, jak je tomu obvyklé u kovů, neboť při vtlačení a následném vyjmutí indentoru hrozí vlivem elastické deformace změna rozměrů vtisku. Proto se u polymerních materiálů měří i hloubka vtisku souběžně s vnikáním indentoru do materiálu.

Pro „porovnávací“ účely je dostačující tradiční způsob měření. Tzn. použijeme tvrdoměr pro zkoušku tvrdosti dle Vickerse při zatížení 30 kp. Doba působení indentoru po ustálení pozice je 15 s a měření velikosti vtisku se provádí 10 min. po uvolnění vniklého indentoru.

Příklad vyhodnocování velikosti vtisku je znázorněn na obrázku 5.16. Jedná se o vzorek ze směsi s 90% PP a 10% PA6.



Obrázek 5.16: Příklad vyhodnocení velikosti vtisku - směs PP/PA6

Tímto způsobem jsme vyhodnotili všechny navržené materiály. Velikosti vtisků jsou shrnuty v tabulce 5.4. Tímto experimentem je zjištěno, že nejvyšší povrchové tvrdosti je dosaženo u materiálů Taboren-PC72 P20 a StarexVH-0800. To znamená, že u těchto materiálů je předpoklad, že budou vykazovat nejvyšší odolnost proti poškrábání.



Tabulka 5.4: Velikosti úhlopříček vtisků pro jednotlivé materiály

Označení materiálu	Velikost úhlopříčky [mm]
PPC5TF2 Natural HI	2,3
Taboren-PC72 P20	2,3
Promyde B30 P	1,7
StarexVH-0800	1,8
Směs PP/PA6 (90/10 hm.%)	1,9

Tímto experimentem je zjištěno, že nejvyšší povrchové tvrdosti je dosaženo u materiálů Taboren-PC72 P20 a StarexVH-0800. To znamená, že u těchto materiálů je předpoklad, že budou vykazovat nejvyšší odolnost proti poškrábání.

## Kapitola 6

# Vyhodnocení a interní testování

### 6.1 Rozhodovací analýza

Celkem je navrženo pět materiálů, ze kterých se na základě rozhodovací analýzy vybere jeden. Hodnotící kritéria pro rozhodovací analýzu jsou: Cena, pevnost v tahu, rázová houževnatost, čistitelnost a odolnost proti poškrábání.

V oblasti vyrobitelnosti lze konstatovat, že polymerní směs PP/PA6 není dostatečně optimalizována pro výrobu, přesto splňuje veškerá kritéria a tudíž byla zařazena do materiálů vstupujících do rozhodovací analýzy.

Cenově nejlépe vychází Taboren PC72 T20, který je o 1 % levnější, než původní, nevyhovující materiál (počítáno z konečné ceny dílu). Naopak materiály Promide B30 P a Starex VH-0800 podmínku maximálního zdražení 5 % nesplňují. Z hlediska mechanických vlastností ovšem tyto cenově nevyhovující materiály dosahují nejlepších výsledků. Nutno podotknout, že pro naši aplikaci jsou tyto hodnoty zbytečně vysoké. Výsledky čistitelnosti vyšly dle předpokládání, neboli nepolární materiály vykazují lepší čistitelnost. Na základě povrchové tvrdosti lze říci, že nejlepší odolnost proti poškrábání dosahuje materiál Promyde B30 P.

Pro určení významnosti jednotlivých kritérií, je zvolena bodovací metoda. To znamená, že každé kritérium může být ohodnoceno body od 1 do 10, přičemž nejvyšším hodnocením je 10 bodů. Body jsou uděleny na základě provedených testů a výpočtů, testy byly uskutečněny ve firmě Linet a na Ústavu materiálového inženýrství Fakulty strojní, ČVUT.

Protože jednotlivá rozhodovací kritéria nemají shodnou důležitost, provede se kvantifikace preferencí, neboli se stanoví váha kritérií od 1 do 5.

Tabulka 6.1: Váha kritérií

Kritérium	Váha
Cena	5
Pevnost v tahu	2
Rázová houževnatost	2
Čistitelnost	4
Odolnost proti poškrábání	1

Nejprve obodujeme jednotlivé materiály dle zadaných kritérií bez kvantifikace preferencí (tabulka 6.2).

Tabulka 6.2: Rozhodovací matice - bez kvantifikace preferencí

Varianta	Kritérium				
	Cena	Pevnost v tahu	Rázová houževnatost,	Čistitelnost	Odolnost proti poškrábání
VPPC5TF2 Natural HI	9	5	9	10	7
Taboren-PC72 T20	10	8	7	10	7
Promyde B30 P	0	10	6	1	10
Starex VH-0800	0	10	10	3	9
Směs PP/PA6	8	7	8	9	8

Jednotlivá kritéria nemají shodnou váhu. Např. kritérium ceny má vyšší váhu než odolnost proti poškrábání. Pro kvantifikaci jednotlivých kritérií je nutné vynásobit body příslušnou vahou kritéria (tab. 6.3).

Tabulka 6.3: Rozhodovací matice - s kvantifikací preferencí

Varianta	Kritérium				
	Cena	Pevnost v tahu	Rázová houževnatost,	Čistitelnost	Odolnost proti poškrábání
VPPC5TF2 Natural HI	45	10	18	40	7
Taboren-PC72 T20	50	16	14	40	7
Promyde B30 P	0	20	12	4	10
Starex VH-0800	0	20	20	12	9
Směs PP/PA6	40	14	16	36	8

Tabulka 6.4: Výsledky rozhodovací analýzy

Pořadí	Materiál	Počet bodů
1.	TABOREN-PC 72 T20	127
2.	VPPC5TF2 Natural HI	120
3.	Směs PP/PA6	114
4.	Starex VH-0800	61
5.	Promyde B30 P	46

Nejvíce bodů z vícekritériálního rozhodování získává materiál TABOREN-PC 72 T20, který má o 7 bodů více, než materiál VPPC5TF2 Natural HI, jenž se umístil na druhém místě.

## 6.2 Srovnání původního a nového materiálu

Tabulka 6.5: Srovnání vlastností původního/**nového** polymerního materiálu (TABOREN-PH 82 T20/**TABOREN-PC 72 T20**)

Vlastnosti	Norma	Hodnota	Jednotky
Index toku taveniny	ISO 1133	18/ <b>13</b>	g/10 min
Hustota	ISO 1183-1	1,04/ <b>1,04</b>	g/cm <sup>3</sup>
Pevnost v tahu na mezi kluzu	ISO 527	30/ <b>24</b>	MPa
Prodloužení při přetržení	ISO 527	8/ <b>8</b>	%
Modul pevnosti v ohybu	ISO 178	2 600/ <b>2200</b>	MPa
Rázová houževnatost	ISO 179-1	2,5/ <b>6</b>	kJ/m <sup>2</sup>
Teplota měknutí dle Vicata	ISO 306	151/ <b>150</b>	°C

Zvolený materiál má téměř srovnatelné vlastnosti s původním nevyhovujícím materiálem, zásadní rozdíl je ale v nárůstu houževnatosti. To je patrné jednak z parametru rázové houževnatosti, která je o  $3,5 \text{ kJ/m}^2$  vyšší, a zároveň z modulu pevnosti v ohybu, který je o  $400 \text{ MPa}$  nižší.

Index toku taveniny nového materiálu je o  $13 \text{ g/10min}$  nižší, což se projeví mírně horší zpracovatelností ve smyslu menší tekutosti.

### 6.3 Interní testování

Závěrečná etapa procesu výběru nového polymerního materiálu je testování dílu dle interních testů. Princip interních testů je podrobněji popsán v kapitole 4.1.4. Protokol o interní zkoušce je evidován pod číslem ZU\_2017\_3666 a je dostupný na datovém CD, které je součástí této práce.

Průběh testu je zachycen na následujících fotografiích:

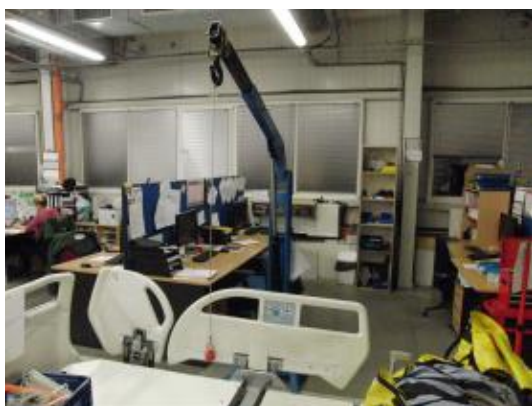


Obrázek 6.1: Použité lůžko - Eleganza 5



Obrázek 6.2: Testované díly z materiálu TABOREN-PC 72 T20

#### Dynamická zkouška



Obrázek 6.3: Hydraulický jeřáb ABUS WZK0006



Obrázek 6.4: Detail nárazu ocelové koule do dílu



Obrázek 6.5: Detail poškození - mírná prasklina



Obrázek 6.6: Detail poškození - mírná prasklina

Při dynamickém testu vznikají mírné praskliny viz obr. 6.5 a 6.6. Dle kritéria úspěchu zkoušky v případě výskytu praskliny posuzuje přípustnost hlavní konstruktér. V tomto případě jsou praskliny posouzeny jako vyhovující.

#### Statická zkouška

Při druhém, statickém testu je díl připevněn k postranici, která je zatížena silou 500 N po dobu 30 s. Toto zatížení se celkem opakuje 10 x. Pokud nedojde k poškození, zvýší se zatížení o 100 N. Tímto způsobem se postupuje až do zatížení 1000 N. Při každém navýšení zatížení se provádí cyklus již pouze jednou.



Obrázek 6.7: Zatížení postranice silou 500 N vně lůžka



Obrázek 6.8: Detail postranice při zatížení silou 500 N



Obrázek 6.9: Zátížení postranice silon 900 N vně lůžka



Obrázek 6.10: Zátížení postranice silon 1000 N vně lůžka



Obrázek 6.11: Detail dílu při zatížení postranice silou 1000 N



Obrázek 6.12: Detail dílu při zatížení postranice silou 1000 N

Dle kritéria úspěchu nesmí dojít k porušení dílu při zatížení 500 N. V našem případě nedošlo k poškození dílu ani při zatížení silou 1000 N.

### **Rekapitulace interního testování**

Před zástavbou (montáží) dílu do lůžka, jsme změřili rozměry vyrobených dílů, které jsou v tolerančním poli dle výkresu C.1. Při dynamickém testování vznikají drobné praskliny, které jsou ovšem hlavním konstruktérem dílu posouzeny jako vyhovující. Při druhém, statickém namáhání nedochází k žádné destrukci dílu. Na základě testování lze považovat materiál za vyhovující.

# Kapitola 7

## Závěr

V této diplomové práci byl na základě provedených experimentů a rozhodovací analýzy vybrán polymerní materiál pro krytku mechaniky postranice (obr. 4.1). Konkrétně se jedná o PP plněný 20% talku, který je označován obchodním názvem TABOREN-PC 72 T20. Tento materiál byl navržen na základě komunikace s českým výrobcem polymerních materiálů Silon. Oproti původnímu materiálu došlo ke zlepšení rázové houževnatosti a k mírnému snížení ceny. Nevýhodou tohoto materiálu je, že při dynamickém testování vznikají mírné praskliny. Tyto praskliny sice splňují, po důkladném prozkoumání hlavním konstruktérem dílu, kritérium úspěchu testu, pohybují se však na hraně tolerančního pole.

Z velké části se tato diplomová práce zabývá směsí PP a PA6, jež se umístila ve více-kriteriálním rozhodování na 3. místě. Jedná se o materiál s velkým potenciálem pro široký sortiment vyráběných dílů, jehož výhodou je velká variabilita. Pokud máme přesné zadání, to znamená, že dokážeme pojmenovat, co od výsledného materiálu očekáváme, je možné vytvořit takový poměr polymerních materiálů PP a PA6, který bude vykazovat požadované vlastnosti, je tedy v podstatě možné si ho tzv. „ušít na míru“, a to buď v rámci vlastní společnosti zabývající se výrobou vstřikovaných dílů (např. Linet), nebo externím zadáním u výrobců granulátů. Složení směsi bude odpovídat výsledkům empirických a vypočtených závislostí, které určují výsledné očekávané vlastnosti. Pokud by např. nastala podobná situace jako v této diplomové práci, neboli pokud bychom se při testech pohybovali na hraně tolerančního pole, stačila by pro vyřešení problému drobná úprava procentuálního zastoupení složek směsi.

Toto řešení má několik velkých výhod. Jednoznačně dochází k minimalizaci skladovaného používaného sortimentu polymerních materiálů. Namísto v současné době používaných, a tudíž i skladovaných mnoha druhů materiálů, je možné tento stav několikanásobně omezit. Další podstatnou výhodou je omezení používání drahých materiálů s převyšujícími, nevyužitými vlastnostmi, veškerý sortiment tak bude vyráběn z materiálu naceněného s množstevní slevou. Odpadá tak proces komunikace a vyjednávání s výrobcem a dodavatelem při výběru nového polymerního materiálu.

Je nutné podotknout, že pro aplikaci směsi v reálných podmínkách nejsou dosud vyřešeny veškeré otázky spojené s touto problematikou a je zde prostor pro další zkoumání.



## 7.1 Zhodnocení splnění cílů

Cíle vytyčené zadavatelem této diplomové práce byly splněny dle očekávání. Z důvodu nevyhovujících mechanických vlastností původního materiálu byl realizován proces výběru nového materiálu, na jehož konci byl na základě rozhodovací analýzy vybrán materiál TABOREN-PC 72 T20, který byl následně doporučen pro výrobu krytky mechaniky postranice.

## 7.2 Doporučení

V případě pokračování, navázání na problematiku této diplomové práce, především na realizaci směsi PP/PA6, by bylo vhodné zaměřit se na optimalizaci tohoto materiálu. Především empiricky zjistit ideální koncentraci kompatibilizátoru. Zjistit, proč se zdánlivě totožný kompatibilizátor od různých výrobců chová odlišně, a tyto poznatky aplikovat pro zvýšení homogenity směsi. Dále je prostor pro zlepšení zpracování. Např. na základě výsledků termické analýzy zjišťujeme rozdílné teploty tavení jednotlivých složek směsi v závislosti na jejich poměru. To např. znamená, že teploty zpracování budou rozdílné pro různé koncentrace.

Další otázka nastává, jestli bude z ekonomického hlediska pro firmu Linet výhodnější vyrábět tuto směs samostatně, nebo zadat tuto operaci externě. Výhodou varianty vlastní výroby je ovšem pružná realizace směsi „na míru“. V případě zadání výroby směsi externímu výrobcí odpadají zase problémy s její optimalizací. Výrobci polymerních materiálů mají větší zkušenosti v oblasti experimentování s plasty a zároveň disponují experimentálním zázemím. Tímto způsobem by ovšem nebyl využit zásadní potenciál, neboli již zmiňovaná pružná realizace směsi na míru.

# Literatura

- [1] Bohumil Meissner, Zilvar, and Václav. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. Nakladatelství technické literatury, Praha, sntl edition, 1987.
- [2] Josef Mleziva. *Polymery: Výroba - struktura, vlastnosti a použití*. SOBOTÁLES, Praha, 1993. ISBN 80-901570-4-1.
- [3] Ensinger. *Materiály*, 2003. URL <<http://www.ensinger.cz/cz/materialy/>>.
- [4] Ulf Bruder. *User's Guide to Plastics*. Hanser Publisher, Karlskrona, 2015. ISBN 978-91-981956-1-3.
- [5] Carnegie Mellon University. *Sample Chemical Structure*, 2018. URL <<https://www.cmu.edu/gelfand/education/k12-teachers/polymers/what-is-polymer/chemical-structure.html>>.
- [6] Osswald, Baur, Brinkmann, Oberbach, and Schmachtenberg. *International Plastics Handbook*. Carl Hanser Verlag, Munich, 2006. ISBN 10:3-446-22905-1.
- [7] Guy Norris and Mark Wagner. *Boeing 787 Dreamliner*, 2009. URL <<http://www.boeing.com/commercial/787/>>.
- [8] ČSN EN ISO 1133-1. *Plasty - Stanovení hmotnostního (MFR) a objemového (MVR) indexu toku taveniny termoplastů*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2012.
- [9] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2012.
- [10] Hattotuwa G.B. Premalal, H. Ismail, and A. Baharin. Comparison of the mechanical properties of rice husk powder filled polypropylene composites with talc filled polypropylene composites. *Polymer Testing*, 21(7):833 – 839, 2002. ISSN 0142-9418. doi: [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(02\)00018-1](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(02)00018-1). URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941802000181>>.
- [11] VICAT. *UL Thermoplastics Testing Center - Vicat*, 2008. URL <[https://www.ulttc.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=404&Itemid=335&lang=en](https://www.ulttc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=404&Itemid=335&lang=en)>.
- [12] Ph.D. Ing. Luboš Běhálek. *Polymery*. Code Creator, s.r.o., Pardubice, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7. URL <<https://publi.cz/books/180/Cover.html>>.

- [13] Doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld. Katedra tváření kovů a plastů - Skripta, 2008. URL <[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/12.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm)>.
- [14] Luděk a kolektiv Ptáček. *Nauka o Materiálu II*. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [15] Erhard Gunter. *Designing with Plastics*. Hanser Publisher, Munich, 2006. ISBN 10:1-56990-386-7.
- [16] Nguyen, Jandy. Limestone calcium carbonate powder, 2018. URL <[https://www.alibaba.com/product-detail/limestone-CaCO3-calcium-carbonate-powder\\_150411098.html](https://www.alibaba.com/product-detail/limestone-CaCO3-calcium-carbonate-powder_150411098.html)>.
- [17] Mondo Minerals BV. Talc in Plastics. *Technical Bulletin 1301*, 2003. doi: TechnicalBulletin1301. URL <[http://www.mondominerals.com/uploads/media/mondo\\_bulletin\\_plastics.pdf](http://www.mondominerals.com/uploads/media/mondo_bulletin_plastics.pdf)>.
- [18] S Moritomi, T Watanabe, and Susumu Kanzaki. Polypropylene Compounds for Automotive Applications. *SUMITOMO KAGAKU: R&D Report 1*, pages 1–16, 2010. URL <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.469.6035&rep=rep1&type=pdf>>.
- [19] PrinceEngineering. Learn About the Best Carbon Fiber used for FRP Reinforcement and Strengthening, 2018. URL <<http://www.build-on-prince.com/carbon-fiber.html#sthash.N2cq5BaB.NOGgsHK0.dpbs>>.
- [20] Infogram. Carbon fiber vs. fiberglass by llmn460 - Infogram, 2017. URL <<https://infogram.com/carbon-fiber-vs-fiberglass-1gdk8pd471dvpq0>>.
- [21] W. D. Brouwer. Natural Fibre Composites Saving Weight and Cost with Renewable Materials. *Centre of Lightweight Structures TUD-TNO*, page 9, 2013. URL <<http://iccm-central.org/Proceedings/ICCM13proceedings/SITE/PAPERS/Paper-1414.pdf>>.
- [22] Paul Skillicorn and Garry Balthes. Jute and kenaf fiber composite materials and methods for producing same. *Reinforced structures comprising a thermoplastic polymer*, aug 1995. URL <<https://patents.google.com/patent/W01996005347A1/en>>.
- [23] JMATPROTEC. Investigation on PA/PP mixture properties by means of DMTA method. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1-3):212–217, jun 2006. ISSN 0924-0136. doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2005.04.020. URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605004292>>.
- [24] Doc.Ing. Zralý, Martin, CSc. a kolektiv. *Management a ekonomika podniku*. Nakladatelství ČVUT, Praha, 2009. ISBN 978-80-01-04401-8.
- [25] Pentac. The alloy of polyamide and polypropylene is close to picture perfect. *A dream team – PENTALLOY BP*, 2018.

## Příloha A

# Seznam použitých zkratek

EPDM Ethylen-propylen-dién terpolymerový kaučuk

MFI Melt flow index

MFI Melt flow index

PA Polyamid

PA12 Polyamid 12

PA6 Polyamid 6

PA66 Polyamid 66

PBT Polybutylen tereftalát

PC Polykarbonát

PE Polyethylen

POM Polyoxymetylen

PS Polystyren



# Seznam obrázků

1.1	Lůžka pro intenzivní péči: a) Eleganza 5, b) Multicare . . . . .	1
1.2	Eleganza 5 - umístění krytky mechaniky postranice . . . . .	2
2.1	Rozdělení plastů [3] . . . . .	4
2.2	Strukturní jednotka PE [5] . . . . .	4
2.3	Strukturní jednotka PP [4] . . . . .	5
2.4	Strukturní jednotka PS [4] . . . . .	5
2.5	Strukturní jednotka POM [4] . . . . .	5
2.6	a) Strukturní jednotka PA6, b) Strukturní jednotka PA66 [4] . . . . .	6
2.7	Strukturní jednotka PC [4] . . . . .	6
2.8	Model bioplastů [4] . . . . .	7
2.9	Zjednodušený princip MFI [8] . . . . .	8
2.10	Tahový diagram [9] . . . . .	9
2.11	Princip zjištění modulu pružnosti . . . . .	10
2.12	Rázová houževnatost - způsoby upnutí vzorků [4] . . . . .	11
2.13	Zjednodušený princip metody teploty měknutí dle Vicata [11] . . . . .	11
2.14	Náčrtek křivky DSC [2] . . . . .	12
2.15	Příklad distribuční křivky [13] . . . . .	14
2.16	Homopolymer . . . . .	14
2.17	Kopolymer . . . . .	14
2.18	a) Modul pružnosti pro různá vlákna, b) Vliv orientace a množství plniva na houževnatost kompozitu [6] . . . . .	16
2.19	Uhličitan vápenatý [16] . . . . .	16
2.20	a) Závislost modulu pružnosti na procentuálním zastoupení plniva [17], b) Částice talku s vysokým poměrem hran (délka/šířka) [18] . . . . .	17
2.21	a) Vliv talku na rázovou houževnatost (matrice PP)[17], b) Porovnání talku s ostatními plnivými (matrice PP) [17] . . . . .	17
2.22	Porovnání uhlíkového vlákna s lidským vlasem [19] . . . . .	18
2.23	Schematické znázornění směsi PP-PA6 . . . . .	20
2.24	CAMPUS - praktická ukáзка filtrování polymerních materiálů na základě zadaných kritérií . . . . .	21

4.1	3D model dílu . . . . .	25
4.2	a) Studený spoj, b) Díry pro šrouby . . . . .	26
4.3	Dynamický test . . . . .	27
4.4	Statický test . . . . .	27
4.5	Předpokládané vlastnosti směsi [25] . . . . .	31
4.6	a) Nehomogenní směs [25] , b) Homogenní směs [25] . . . . .	32
5.1	Termická analýza směsi PP/PA6 . . . . .	34
5.2	Termická analýza . . . . .	35
5.3	a) Oblast výskytu studeného spoje, b) Studený spoj (50x zvětšení, s polarizátorem) . . . . .	35
5.4	Struktura směsi (PP-T20)50+(PA)50 (20x zvětšení) s odlišnými kompatibilizátory a) TABOND 2002 b) Eastman G-3003 . . . . .	36
5.5	Struktura směsi (PP-T20)50+(PA)50 (50x zvětšení) s odlišnými kompatibilizátory a) TABOND 2002 b) Eastman G-3003 . . . . .	36
5.6	Struktura směsi (PP-T20)70+(PA)30 (20x zvětšení) s odlišnými kompatibilizátory a) TABOND 2002 b) Eastman G-3003 . . . . .	37
5.7	Závislost poměru směsi na pevnosti . . . . .	38
5.8	Porovnání kompatibilizátorů G-3003, Bondyram . . . . .	39
5.9	Vliv obsahu kompatibilizátoru na pevnost . . . . .	40
5.10	Porovnání vybrané směsi s původními materiály a) Teoretická pevnost, b) naměřená pevnost . . . . .	40
5.11	Závislost poměru směsi na rázové houževnatosti . . . . .	41
5.12	Porovnání kompatibilizátorů G-3003, Bondyram . . . . .	41
5.13	Pevnost v tahu - všechny materiály . . . . .	43
5.14	Rázová houževnatost - všechny materiály . . . . .	44
5.15	Navlhavost jednotlivých materiálů . . . . .	44
5.16	Příklad vyhodnocení velikosti vtisku - směs PP/PA6 . . . . .	45
6.1	Použité lůžko - Eleganza 5 . . . . .	50
6.2	Testované díly z materiálu TABOREN-PC 72 T20 . . . . .	50
6.3	Hydraulický jeřáb ABUS WZK0006 . . . . .	50
6.4	Detail nárazu ocelové koule do dílu . . . . .	50
6.5	Detail poškození - mírná prasklina . . . . .	51
6.6	Detail poškození - mírná prasklina . . . . .	51
6.7	Zatížení postranice silou 500 N vně lůžka . . . . .	51
6.8	Detail postranice při zatížení silou 500 N . . . . .	51
6.9	Zatížení postranice silou 900 N vně lůžka . . . . .	52
6.10	Zatížení postranice silou 1000 N vně lůžka . . . . .	52
6.11	Detail dílu při zatížení postranice silou 1000 N . . . . .	52
6.12	Detail dílu při zatížení postranice silou 1000 N . . . . .	52
C.1	Zadaný díl . . . . .	66

# Seznam tabulek

2.1	Závislost tvaru makromolekuly na vlastnostech polymeru [12]	13
2.2	Porovnání vybraných plniv v matrici PP [22]	19
2.3	Schéma rozhodovací matice	22
4.1	TABOREN-PH 82 T20 - vlastnosti udávané výrobcem	28
4.2	PPC5TF2 Natural HI - vlastnosti udávané výrobcem	29
4.3	TABOREN-PC 72 T20 - vlastnosti udávané výrobcem	29
4.4	Promide B30 P - vlastnosti udávané výrobcem	30
4.5	Starex VH-0800 - vlastnosti udávané výrobcem	31
5.1	Testované varianty	33
5.2	Vysvětlení použitého značení v [hm.%]	38
5.3	Výpočet ceny dílu	43
5.4	Velikosti úhlopříček vtisků pro jednotlivé materiály	46
6.1	Váha kritérií	48
6.2	Rozhodovací matice - bez kvantifikace preferencí	48
6.3	Rozhodovací matice - s kvantifikací preferencí	48
6.4	Výsledky rozhodovací analýzy	49
6.5	Srovnání vlastností původního/ <b>nového</b> polymerního materiálu (TABOREN-PH 82 T20/ <b>TABOREN-PC 72 T20</b> )	49





## Příloha B

### Obsah přiloženého CD

- Přiložené CD obsahuje adresář, text s elektronickou verzí a zdrojovým kódem této práce, tabulky naměřených hodnot a snímky z mikroskopu, které nebyly použity v této práci.



Příloha C

Příloha

