

Vliv recyklátu na vlastnosti plastového výrobku z PP plněného sklem

Bc. Radek Šimara

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek Šimara**
Osobní číslo: **T14556**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv recyklátu na vlastnosti plastového výrobku z PP plněného sklem**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování literární studie dané problematiky
2. Příprava recyklátu
3. Příprava zkušebních tělísek
4. Provedení zkoušek
5. Vyhodnocení výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle zadání vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vojtěch Šenkeřík

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016

Ve Zlíně dne 8. ledna 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: ...ŠIMARA RADEK.....

Obor: VÝROBNÍ INŽENÝRSTVÍ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 4.4.2016


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví unitární předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

¹¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá zkoumáním vlivu velikosti částic recyklátu na výsledné mechanické vlastnosti výrobků. Materiálem recyklátu byl polypropylen se skleněnými vlákny. Recyklát byl vyroben mechanickou metodou recyklace a následně byl roztříděn pomocí sítové analýzy. Poté byly z recyklátu zhotoveny zkušební vzorky metodou vstřikování. Následovalo provedení mechanických zkoušek na zkušebních vzorcích. Vzorky byly podrobeny zkoušce vrubové houževnatosti, tvrdosti Shore D a tahové zkoušce. Výsledky zkoušek byly zpracovány pomocí základních statistických veličin a sloupcových grafů.

Klíčová slova: Polypropylen, skleněná vlákna, recyklát, mechanické zkoušky, recyklace, polymer, vstřikování

ABSTRACT

This diploma thesis investigates the effect of recycled material particle size on the resulting mechanical properties of products. The product material was polypropylene with glass fibers. Recycled material was prepared by mechanical way of recycling, then it was categorized by sieve analysis. Test samples were made of recycled material by injection molding subsequently. After preparation, the samples were subjected to mechanical tests. The samples were subjected to impact toughness test, the hardness of Shore D test and to tensile test. Test results were processed using basic statistical concepts and bar graphs.

Keywords: Polypropylene, glass fibers, recycle, mechanical tests, recycling, polymer, injection molding

Poděkování:

Děkuji vedoucímu své diplomové práce Ing. Vojtěchovi Šenkeříkovi za pomoc, odborné vedení, rady, čas, ochotu a trpělivost, kterou mi věnoval, aby mi dopomohl zdokonalit a úspěšně dokončit tuto diplomovou práci.

Také bych rád poděkoval rodině za podporu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 POLYMERY A SKLENĚNÁ VLÁKNA	13
1.1 DĚLENÍ PLASTŮ	14
1.1.1 Makromolekulární struktura plastů	14
1.1.2 Fázové stavy polymerů.....	15
1.1.3 Amorfni termoplasty	16
1.1.4 Semikrystalické termoplasty	17
1.1.5 Plasty dle jejich aplikace	18
1.1.6 Plasty dle druhu přísad	19
1.2 POLYOLEFINY	19
1.2.1 Polypropylen	20
1.2.2 Druhy polypropylenů.....	20
1.3 SKLENĚNÁ VLÁKNA	21
1.3.1 Krátká skleněná vlákna	22
1.3.2 Dlouhá skleněná vlákna	22
1.3.3 Vliv obsahu skleněných vláken na výsledné chování	23
1.3.4 Vlastnosti skleněných vláken	23
2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	24
2.1 VÝHODY A NEVÝHODY TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	24
2.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS.....	25
2.3 VSTŘIKOVACÍ FORMA	26
2.3.1 Požadavky na vstřikovací formy	26
2.3.2 Konstrukce vstřikovací formy	27
2.4 VTOKOVÉ SYSTÉMY	28
2.4.1 Studené vtokové systémy	28
2.4.2 Zásady řešení SVS.....	29
2.4.3 Horké vtokové systémy	30
2.4.4 Výhody a nevýhody HVS	30
3 RECYKLACE PLASTŮ	32
3.1 DĚLENÍ ODPADNÍCH PLASTŮ DLE DRUHU ZNEČIŠTĚNÍ	32
3.2 ZPRACOVÁNÍ ODPADNÍCH PLASTŮ DLE DRUHU ZNEČIŠTĚNÍ	33
3.3 MATERIÁLOVÁ RECYKLACE	34
3.3.1 Primární recyklace.....	34
3.3.2 Sekundární recyklace	35
3.3.3 Zařízení na zpracování plastového odpadu – mlýny	36

3.4	SUROVINOVÁ RECYKLACE	37
3.5	CHEMICKÁ RECYKLACE	37
3.6	ENERGETICKÁ RECYKLACE	38
4	ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	39
4.1	STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM	39
4.1.1	Zkušební tělesa pro statickou zkoušku tahem	40
4.1.2	Pracovní diagram zkoušky tahem.....	41
4.2	ZKOUŠKY TVRDOSTI	43
4.2.1	Brinellova zkouška tvrdosti.....	44
4.2.2	Rockwellova zkouška tvrdosti	44
4.2.3	Vickersova zkouška tvrdosti	45
4.2.4	Shoreho zkouška tvrdosti	46
4.3	ZKOUŠKY RÁZEM.....	47
4.3.1	Zkouška rázem v ohybu	47
II	PRAKTICKÁ ČÁST	49
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	50
6	ZKOUŠENÝ MATERIÁL PP + 30 % SKLENĚNÝCH VLÁKEN	51
7	VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	53
7.1	VSTŘIKOVACÍ STROJ	53
7.2	VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK.....	55
8	RECYKLACE VSTŘIKOVANÝCH VÝROBKŮ	57
8.1	MLETÍ VSTŘIKOVANÝCH VÝROBKŮ	57
8.2	PROSÉVÁNÍ.....	59
9	VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES Z RECYKLÁTU.....	64
10	MECHANICKÉ ZKOUŠKY PP + 30 % SKLENĚNÝCH VLÁKEN	65
10.1	STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM	65
10.1.1	Modul pružnosti v tahu	66
10.1.2	Mez pevnosti v tahu	69
10.1.3	Prodloužení v tahu.....	73
10.2	ZKOUŠKA RÁZEM V OHYBU	76
10.2.1	Vyhodnocení síly při přeražení	77
10.2.2	Vyhodnocení vrubové houževnatosti	80
10.3	ZKOUŠKA TVRDOSTI SHORE D.....	84
10.3.1	Vyhodnocení tvrdosti Shore D	84
11	DISKUZE VÝSLEDKŮ	86
	ZÁVĚR	89
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	90
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	94

SEZNAM OBRÁZKŮ	97
SEZNAM TABULEK.....	100
SEZNAM PŘÍLOH.....	101

ÚVOD

V současnosti existuje na trhu s polymery až několik tisíc různých druhů plastů. Explozivní rozvoj polymerních materiálů započnul na startu 20. století a život bez polymerních materiálů si člověk téměř nedovede představit. Velký zájem o tyto materiály je způsoben velkou variabilitou jejich vlastností. Ovšem v technické praxi najde výrazné uplatnění jen několik desítek druhů plastů. Z celkového objemu světové produkce plastů představuje téměř 80 % jen šest druhů plastů. Tři druhy plastů tvoří 70 % výroby, řadí se mezi ně polyolefiny, polyvinylchlorid a styrenové hmoty.

Mimo vývoj nových druhů polymerních výrobků se také velmi často přistupuje k náhradě dříve používaného materiálu za materiál polymerní. Sortiment termoplastů se neustále zvětšuje, jednou cestou je vývoj nových polymerních materiálů a druhý směr se zaměřuje na modifikaci dosavadních polymerů. [1, 2]

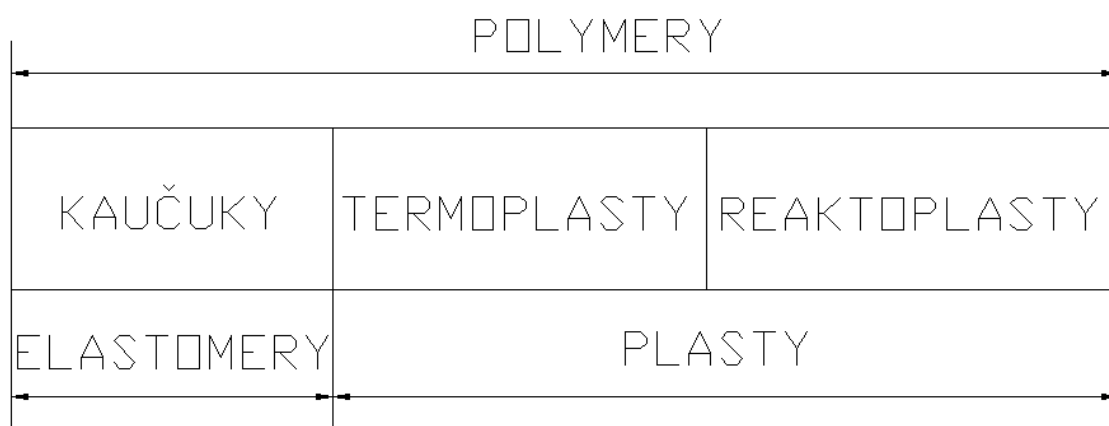
Se stoupající spotřebou polymerních materiálů se již v sedmdesátých letech 20. století začínalo více a více ukazovat, že hlavně u výrobků s krátkou životností se produkt brzy stane odpadem. Výhoda odolnosti polymerních materiálů vůči vnějším vlivům při aplikaci se stává nevýhodou, kdy materiál takzvaně doslouží a stane se odpadem. Cílem každé technicky vyspělé země je tedy předcházet vzniku negativních důsledků ekonomického vývoje na vývoj ekologický. U polymerních materiálů hovoříme hlavně o termoplastech a pryžích.

V dnešní době se mění názor na využití druhotných surovin k lepšímu a to ve smyslu řešení ekologických problémů, dříve se na tuto situaci přihlíželo hlavně jako zdroj ekonomického přínosu. Je třeba se na tuto problematiku využívání odpadů dívat především z hlediska ekologického. Je tím myšleno zachování nezbytných životních podmínek, čistoty vody, vzduchu, půdy a to vše za cenu vynaložení nezbytných prostředků. Hovoříme zde o dani, kterou je nutno platit za dosažený stupeň rozvoje společnosti. [1]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY A SKLENĚNÁ VLÁKNA

Polymery jsou chemické látky, které mají neobvyklou šíři vlastností. Polymerní látky obsahují ve svých obrovských molekulách většinou atomy uhlíku, kyslíku a vodíku, často také dusíku, chloru a jiných prvků. Ve formě výrobků jsou polymery prakticky v tuhém stavu. V určitém stádiu zpracování jsou ve stavu kapalném, který jim dovoluje za zvýšené teploty a tlaku udělit budoucímu výrobku nejrůznější tvary dle předpokládaného použití. Polymery dělíme dle jejich chování za běžné a pokojové teploty.



Obr. 1. Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [1]

Elastomery jsou vysoce elastické polymery, které jsou charakteristické schopností se malou silou značně deformovat a to bez porušení. Tato schopnost deformovat se je převážně vratná. Nejpočetnějším zástupcem elastomerů jsou kaučuky, ze kterých se vyrábí pryž.

Plasty jsou polymerní materiály, které jsou charakteristické tím, že jsou za běžných podmínek většinou tvrdé a často i křehké. Plasty se zvýšenou teplotou stávají plastickými a také tvarovatelnými. Od plastického chování je mimo jiné také odvozen název samotný. Plasty samotné můžeme dále dělit na termoplasty a reaktoplasty (termosety). Je-li změna z plastického do tuhého stavu vratně opakovatelná, hovoříme o termoplastech. Naopak jde-li o změnu nevratnou (trvalá, neopakovatelná), která je způsobena chemickou reakcí, hovoříme o reaktoplastech. [1]

1.1 Dělení plastů

Plasty lze dělit hned dle několika způsobů. Patří zde například dělení dle cílové aplikace plastických hmot, dále dělení dle nadmolekulární struktury (stupně uspořádanosti), makromolekulární struktury, druhu přísad, morfologie a dalších.

1.1.1 Makromolekulární struktura plastů

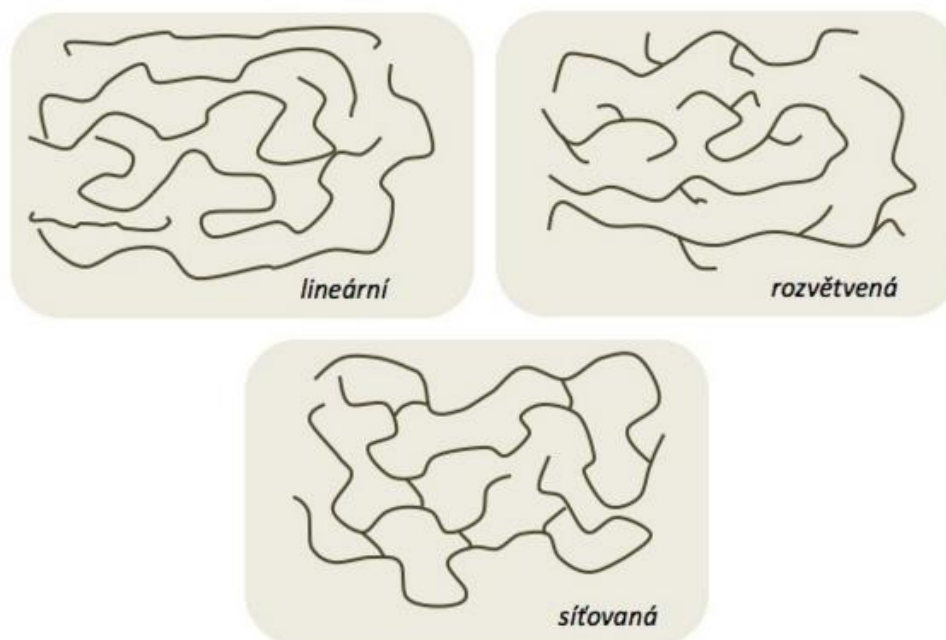
Plasty jsou makromolekulární látky o vysoké molekulové hmotnosti. Z chemického hlediska hovoříme o látkách organických. Jejich podstatou je makromolekulární látka, která je přírodního nebo syntetického původu. V makromolekule se jako článek řetězu mnohokrát opakuje její základní jednotka zvaná monomer a základním prvkem řetězce je atom uhlíku. Uhlíkové atomy vytváří dlouhé řetězce a mají schopnost se vzájemně vázat.

Existují tři druhy polymerních makromolekul:

- Lineární makromolekuly – vznikají způsobem, kdy se monomerní molekuly řadí jedna vedle druhé. Mohou se v prostoru více přiblížit jedna k druhé a jsou tak schopny vyplnit prostor kompaktněji. Z tohoto důvodu má poté polymer vyšší hustotu (HDPE). Vlivem lineárních makromolekul se jednodušeji vytváří prostorově orientované pravidelné shluky krystalických struktur, výsledkem je polymer s vyšším obsahem krystalického podílu. Plasty s těmito makromolekulami jsou charakteristické dobrou tavitelností a rozpustností právě z důvodu dobré pohyblivosti makromolekulární struktury. Další charakteristickou vlastností lineárních makromolekul je dobrá zpracovatelnost ve formě taveniny a houževnatost v tuhém stavu.
- Rozvětvené makromolekuly – Rozvětvené makromolekuly jsou typické pro termoplasty. Dále jsou charakteristické tím, že se na jejich základním řetězci nachází boční větve. Z důvodu bočních větví se nemohou rozvětvené makromolekuly přiblížit k sobě navzájem, jako tomu bylo u lineárních makromolekul. Výsledkem absence dostatečného přiblížení makromolekul je nižší výsledná hustota (LDPE). Také nastává větší neuspořádanost, která se projevuje horší krystalizací a nižším stupněm krystalinity. Rozvětvení se dále projeví na pohyblivosti makromolekul a jejich tekutosti v roztaveném stavu, které zhoršují. Další negativní vlastností bočních řetězců je oddálení sousedních makromolekul

a s tím i spojené snížení makromolekulárních sil. To má za následek zhoršení většiny mechanických vlastností.

- Zesíťované makromolekuly – Tento typ makromolekul obsahuje přímé nebo rozvětvené makromolekulární řetězce, které jsou navzájem propojené vazbami. Výsledek je téměř nekonečná makromolekula, někdy hovoříme o prostorové síti. Prostorová síť má za následek ztrátu tavitelnosti a rozpustnosti polymeru. Polymery s tímto typem makromolekul jsou charakteristické vysokou tuhostí, odolností proti zvýšené teplotě a tvrdostí. Mají však nízkou odolnost proti rázovému namáhání. Zesíťované makromolekuly se vyskytují u kaučuků a reaktoplastů. U kaučuků je prostorová síť řídká a naopak u reaktoplastů je síť hustá. [2]



Obr. 2. Molekulární struktura polymerů [3]

1.1.2 Fázové stavy polymerů

Polymerní materiály se mohou vyskytovat pouze ve dvou stavech a to stavu tuhém a stavu kapalném. Z důvodu velmi vysoké molekulové hmotnosti polymerních materiálů se jejich bod varu nachází značně vysoko a vždy nad teplotou jejich rozkladu. Z tohoto důvodu tedy vyplývá, že plynný stav polymerů neexistuje. V tuhé fázi dle pravidelnosti geometrického uspořádání makromolekulárních řetězců existuje stav vysoce uspořádaný krystalický a stav sklovitý, prakticky neuspořádaný. [1, 2]

Čtyři fázové stavy polymerů:

- Krystalický (semikrystalický)
- Amorfní:
 - o Sklovitý.
 - o Kaučukovitý.
 - o Plastický. [1, 2]

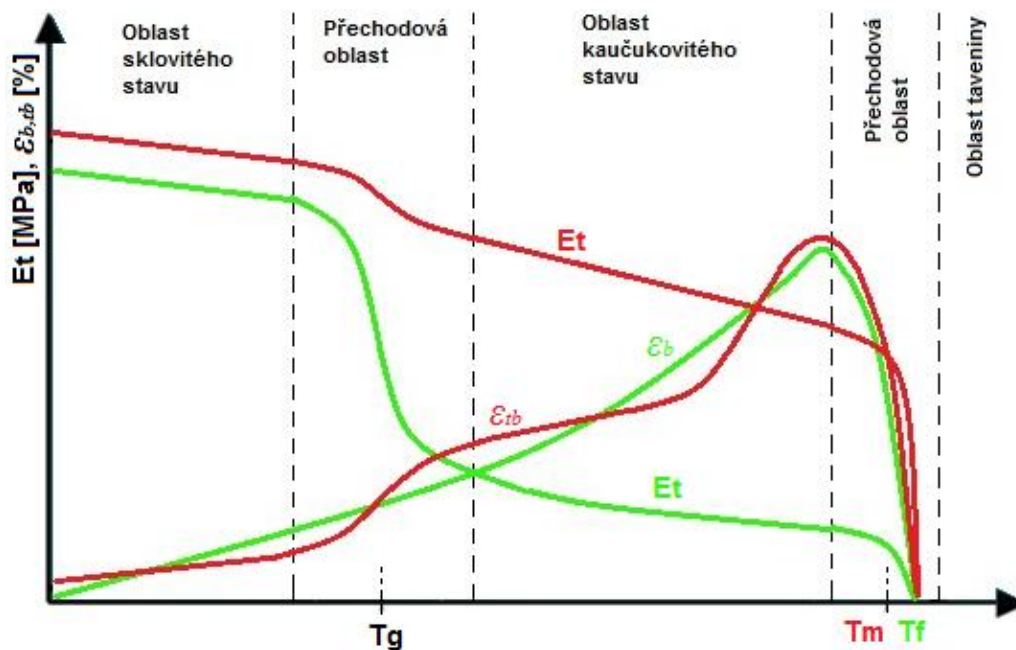
Vlastnosti polymerních materiálů jsou tak jako u jiných materiálů také závislé na teplotě. Změny v chování polymerů se však v určitých oblastech mohou zrychlovat nebo se dokonce měnit skokově. O těchto oblastech hovoříme jako o přechodových teplotách. Dle teploty se tedy polymer může vyskytovat ve stavu sklovitém, kaučukovitém anebo ve stavu kapalném. [3]

1.1.3 Amorfní termoplasty

U amorfních termoplastů rozlišujeme dvě charakteristické přechodové teploty. Hovoříme zde o teplotě skelného přechodu označovanou jako T_g a o teplotě viskózního toku T_f . Polymerní materiály se ve stavu sklovitém nachází pod teplotou skelného přechodu, nad touto teplotou pak v stavu kaučukovitém. Polymerní materiály vykazují pod teplotou T_g vysoký modul pružnosti, tvrdost a křehkost. Vyskytuje-li se polymer v přechodové oblasti okolo teploty skelného přechodu, dochází ke skokové změně amorfních termoplastů. Polymerní materiál v této oblasti získá kaučukovitou pružnost, která se např. projevuje snížením modulu pružnosti až o tři řády. Následně pak termoplasty se zvyšující se teplotou ztrácí výše zmíněné kaučukovité chování v okolí teploty viskózního toku T_f a modul pružnosti klesá na nulovou hodnotu. V této přechodové oblasti dochází k vysoce viskóznímu toku a hovoříme zde o tavenině. [3]

Amorfní plasty v porovnání se semikrystalickými mají zcela nahodilou pozici makromolekul. Mezi nejznámější zástupce amorfních plastů patří např. PC, PMMA, PS aj.

Mezi charakteristické znaky patří křehkost, tvrdost, vysoká pevnost a díky nízkému indexu lomu také průhledné. Použití těchto materiálů je do teploty zesklenění T_g . Zpracovatelská oblast amorfních termoplastů se nachází nad teplotou T_f . [1, 2, 3]



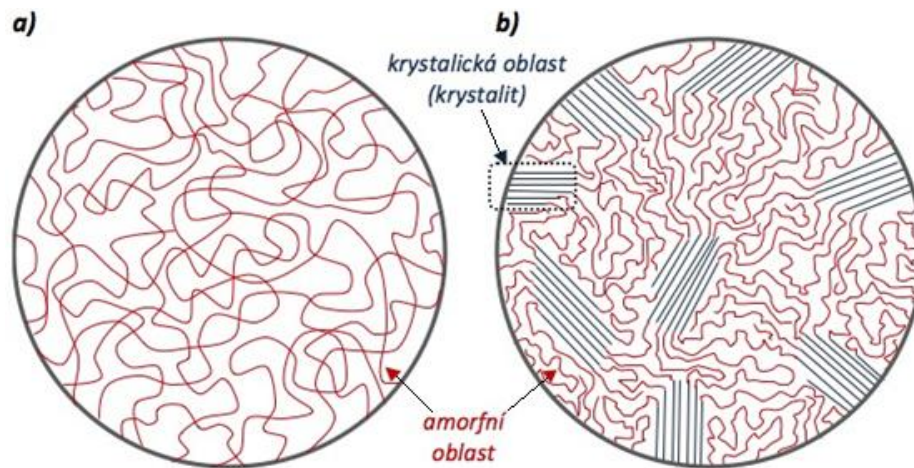
Obr. 3. Charakteristická závislost modulu pružnosti E_t a celkové tažnosti $\varepsilon_{b,tb}$, resp. poměrného prodloužení při přetržení na teplotě u amorfního a semikrystalického termoplastu [3]

1.1.4 Semikrystalické termoplasty

Také u semikrystalických termoplastů se v přechodové oblasti okolo teploty T_g mění vlastnosti skokově. Rozdíl oproti termoplastům amorfním je ovšem ten, že k nejrychlejší změně vlastností dochází až okolo teploty tání T_m . V této teplotní oblasti dochází k tání krystalů a následnému rozpadu krystalické struktury polymeru samotného. Tento stav nastává při přechodu ze stavu tuhého do stavu kapalného.

Semikrystalické plasty jsou charakteristické stupněm uspořádanosti, který je nazýván jako stupeň krystalinity. Ten se u krystalických plastů pohybuje v rozmezí 40 až 90 %. Nikdy nelze dosáhnout 100 % stupně krystalinity a proto jsou také někdy nazývány jako plasty semikrystalické. Stupeň krystalinity určuje relativní podíl uspořádaných oblastí, které se nachází mezi oblastmi amorfními. Jsou charakteristické houževnatostí, mléčným zakalením, vyšším indexem lomu oproti amorfním plastům, pružností a vzrůstajícím modulem pružnosti, který roste se stupněm krystalinity. Semikrystalické plasty jsou používány do teploty tání T_m .

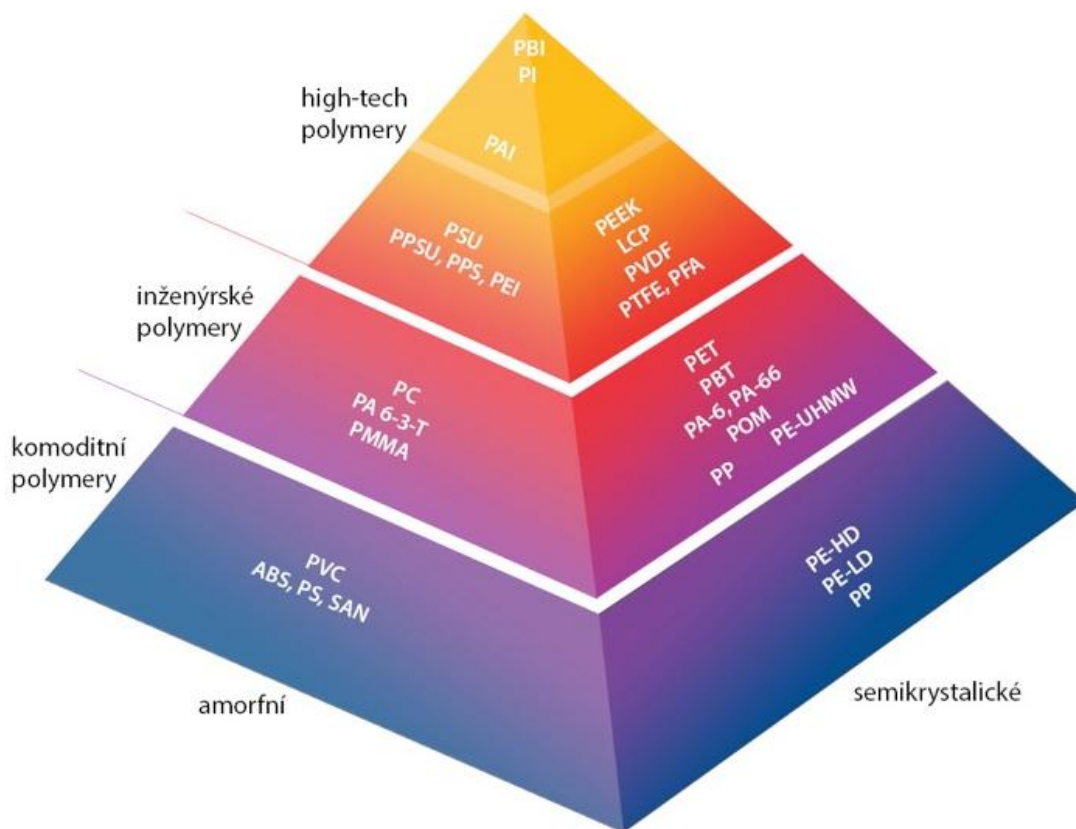
Molekulová hmotnost polymerů a chemické složení rozhodují o stavu, ve kterém se polymer nachází za běžných podmínek. Také rozhodují, jak veliký bude teplotní rozsah existence stavů. [1, 2, 3]



Obr. 4. Schéma nadmolekulární struktury polymerů a) amorfni;
 b) semikrystalické [3]

1.1.5 Plasty dle jejich aplikace

Za posledních pár let si největší spotřebu plastů drží obalový průmysl. Po něm se plasty v hojně míře používají také ve stavebnictví, automobilovém průmyslu, elektrotechnice a elektronice. [4]



Obr. 5. Rozdělení polymerů dle aplikace [3]

1.1.6 Plasty dle druhu přísad

Polymerní materiály se bez přísad neboli jinak řečeno v čistém stavu využívají jen velmi zřídka. Ve většině případů se s nimi tedy setkáme s určitým procentem přísad. Tyto přísady se přidávají s cílem získat nové vlastnosti pro konkrétní aplikace, ovšem základní vlastnosti jsou dány typem makromolekulární látky. Prací přísad je zlepšovat vlastnosti, chránit materiál proti degradačním procesům, ovlivňovat zpracovatelnost a v neposlední řadě se také dají použít ke snížení výsledné ceny materiálu.

Hlavní nedostatky, které polymery mají:

- Vznik elektrostatického náboje na povrchu polymerních materiálů.
- Nízká tvrdost a nevhodné optické vlastnosti.
- Malá odolnost vysokým teplotám a nízká houževnatost.
- Omezená odolnost chemickým vlivům, hořlavost aj.

Plasty lze dle druhu přísad dělit na plněné plasty a plasty neplněné. Rozdíl mezi nimi je ten, že u neplněného plastu množství přísad neovlivňuje vlastnosti. U plněných naopak plnivo výrazně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti. Plnivem mohou být barviva, stabilizátory, maziva, změkčovadla, tvrdidla, nadouvadla, retardéry hoření aj.

Plniva také rozeznáváme vyztužující a nevyztužující. Mezi vyztužující patří např. skleněná vlákna, uhlíková vlákna, také vlákna kovová a bavlněná krátká nebo dlouhá. K nevyztužujícím se řadí prášky, ty mají většinou za úkol snížit cenu materiálu. Konkrétně zde patří např. kaolin, křída, moučka z břidlice aj. [2, 3]

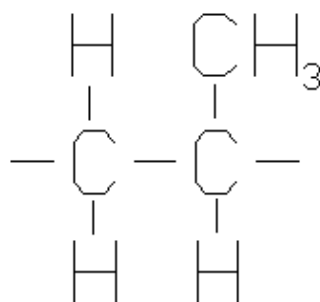
1.2 Polyolefiny

Polyolefiny jsou největší skupinou vyráběných syntetických polymerů ve světě. Zahrnují velkoobjemové polymery jako nízko-hustotní polyethylen (LDPE), vysoko-hustotní polyethylen (HDPE), lineární nízko-hustotní polyethylen (LLDPE), polypropylen (PP) a rovněž také polymery s vysokou přidanou hodnotou jako je polybuten-1 a olefinové blokové kopolymery aj. Hlavním důvodem vysoké spotřeby polyolefinů ve světě jsou jejich specifické užité vlastnosti, poměrně levné petrochemické suroviny pro získání jejich monomerů a také jednoduchá zpracovatelnost různými druhy technologických postupů. [5,6]

Vzhledem k jejich čistšímu životnímu cyklu výroby, zpracování, aplikaci a recyklaci v porovnání s jinými materiály jsou polyolefiny považovány za ideální materiály. S předností se jejich vlastností využívá k obalovým materiálům a dalším jednorázovým použitím, v zemědělství, na spotřebiče, elektroniku, ve stavebnictví, automobilovém průmyslu aj. [6]

1.2.1 Polypropylen

Polypropylen (PP) patří k jednomu z ekonomicky nejdůležitějších termoplastických materiálů. Lze ho použít ve velké škále aplikací a to v podobě průhledné, nebo zabarvené pigmenty. Jeho nejčastější aplikací je obalový průmysl, také v textilním průmyslu, automobilovém průmyslu, lékařství a také jako spotřební zboží. Dle použité polymerace a katalyzátoru jsou dány vlastnosti polypropylenu. [7]



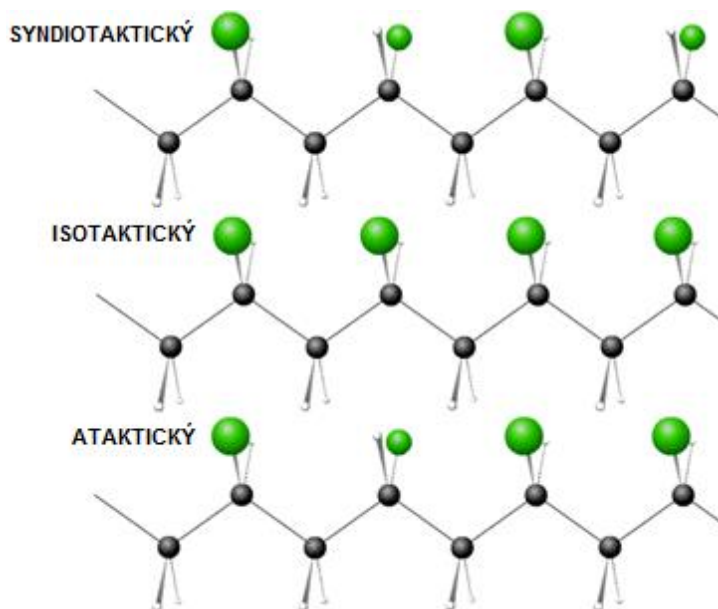
Obr. 6. Základní jednotka
polypropylenu [7]

Polypropylen nám nabízí vynikající kombinaci fyzických, chemických, mechanických, tepelných a elektrických vlastností, jakých nemůžeme nalézt u žádných jiných termoplastů. Poměr ceny a výkonu je velmi atraktivní a z tohoto důvodu je polypropylen jedním z nejrychleji se vyvíjejících termoplastů. Polypropylen se připravuje polymerací propylenu v přítomnosti katalyzátoru za současně pečlivé kontroly teploty a tlaku. [8]

1.2.2 Druhy polypropylenů

Polypropylen je lineární semikrystalický termoplast klasifikován jako polyolefin. Pomocí takticity jsme schopni pochopit spojitost mezi strukturou polypropylenu a jeho vlastnostmi. Polypropylen obsahuje charakteristickou methylovou skupinu CH_3 . Dle závislosti methylových skupiny na prostorovém uspořádání k hlavnímu uhlíkovému $-\text{C}-\text{C}-$ řetězci rozeznáváme tři druhy polypropylenů. [7, 8]

Dle výše zmíněného uspořádání rozeznáváme polypropylen ataktický (aPP), který má nepravidelně uspořádané skupiny $-CH_3$. Dále polypropylen izotaktický (i-PP), který má $-CH_3$ skupiny na stejné straně uhlíkového řetězce a také polypropylen syndiotaktický (sPP). Syndiotaktický polypropylen má střídavé uspořádání $-CH_3$ skupiny kolem hlavního řetězce.



Obr. 7. Molekulární struktura polypropylenu [9]

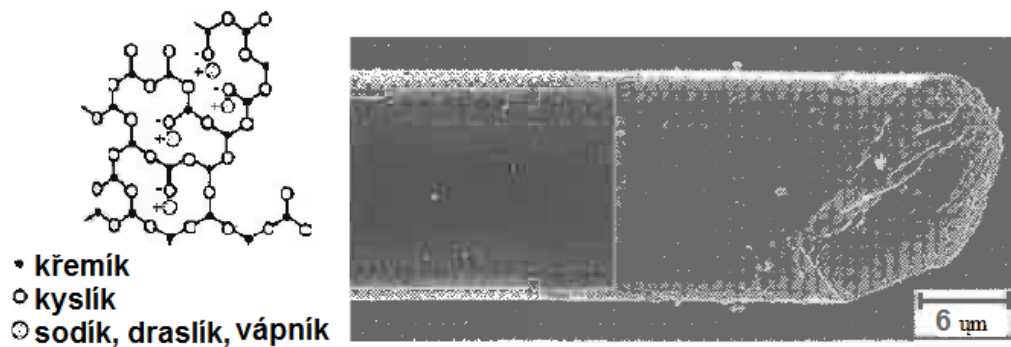
Z obchodního hlediska se hlavně používá izotaktický polypropylen. Tento typ polypropylenu může existovat v různých morfologických fázích v závislosti na podmínkách krystalizace. Hrají zde roli veličiny jako je tlak, teplota a rychlost chlazení. Různé fáze také mohou koexistovat a jedna krystalická fáze se může změnit do jiné v závislosti změny podmínek. Stupeň krystalinity se pohybuje v rozmezí 40 až 60 %.

Ataktický polypropylen je prakticky nežádoucím produktem a má velmi nízkou teplotu tání. Vyrůstajícím uspořádáním $-CH_3$ skupin (takticitou) dochází k růstu pevnosti, tvrdosti a teploty tavení. Výroba syndiotaktického polypropylenu je poměrně omezená, ale poslední dobou dochází k pokrokům ve výzkumu katalyzátorů a tak je možné, že se s ním v budoucnu setkáme častěji. [7, 8]

1.3 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna, někdy také nazývaná zkratkou GF – Glass Fiber jsou vlákna o průměru 3,5 až 24 μm . Tyto vlákna mají pravidelný kruhový průřez a vyrábí se tažením s roztavené skloviny. Existuje několik druhů skleněných vláken dle použité skloviny, ze které jsou

vyrobeny a liší se od sebe vlastnostmi a využitím. Při spojení polymerní matrice a skleněných vláken hovoříme o kompozitu. Díky skleněným vláknům dochází k výraznému zlepšení vlastností a to především odolnosti proti stárnutí i povětrnostním vlivům, nehořlavosti, chemickým vlivům, pružnosti a mechanickým vlastnostem. Polymerní materiály obsahující skleněná vlákna v dnešní době patří mezi nejdůležitější konstrukční materiály. Jejich aplikaci můžeme nalézt v automobilovém, leteckém, lodním a elektronickém průmyslu aj. [10, 11, 12, 13]



Obr. 8. Struktura skleněného vlákna (snímek pořízen rastrovacím elektronovým mikroskopem) [10]

1.3.1 Krátká skleněná vlákna

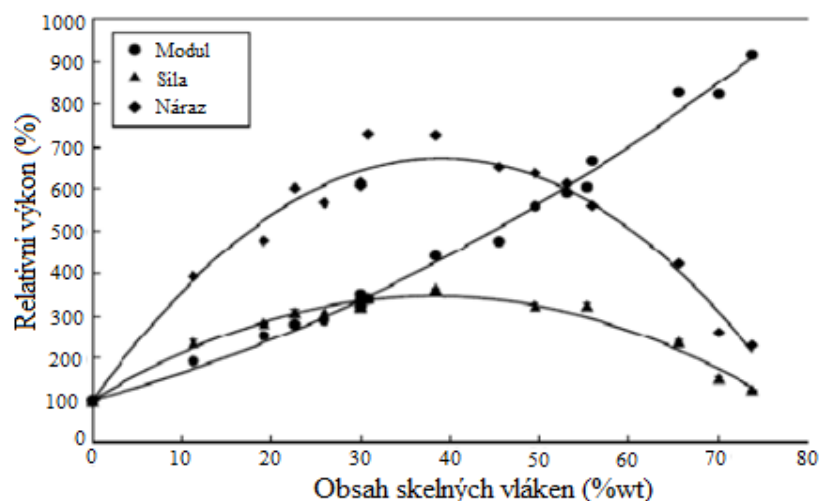
Krátká skelná vlákna, někdy označovaná také jako SGF (short glass fiber), jsou vlákna o délce přibližně 3 mm. Tento typ vláken je charakteristický svým vlivem na polymerní matrici a tedy i na finální výrobek (kompozit). Plněním polymeru skelnými vlákny dosáhneme zvýšení tepelné odolnosti a také zvýšení modulu pružnosti.

1.3.2 Dlouhá skleněná vlákna

Dlouhá skleněná vlákna jsou někdy označována také jako LGF (long glass fibers). Délka LGF vláken se pohybuje v rozmezí 4 až 10 mm, nebo dle velikosti granulátu. Tento typ vláken se vyrábí technologií nekonečného vytlačování vláken do polymerní matrice (pultruze) a následně se vlákno s polymerní matricí seká na požadovanou délku. Tímto způsobem nám vzniká granulát polymeru se skelnými vlákny. V porovnání s krátkými skleněnými vlákny nám při vstřikování polymerů s LGF nedojde k uspořádání vláken v jednom směru. Dlouhá vlákna se při vstřikování chovají odlišně a dojde k vytvoření trojrozměrné struktury. Tento rozdíl v uspořádání nám pozitivně ovlivní vlastnosti budoucího výrobku. [14]

1.3.3 Vliv obsahu skleněných vláken na výsledné chování

Obsah skleněných vláken volíme vzhledem k budoucímu použití výrobku a požadovaným vlastnostem. Neplatí zde přímá úměra, která by znamenala, čím více, tím lépe. Vliv obsahu skleněných vláken na výsledné vlastnosti můžeme pozorovat na *Obr. 9*. [15]



Obr. 9. Vliv obsahu skleněných vláken na vlastnosti kompozitu [15]

1.3.4 Vlastnosti skleněných vláken

Skleněná vlákna jsou charakteristická shodným chováním v příčném i podélném směru, tzv. izotropií, na rozdíl od aramidových a uhlíkových vláken. Díky silným kovalentním vazbám mezi kyslíkem a křemíkem také dosahují poměrně vysokých hodnot pevností a modulu pružnosti. Již zmíněný modul pružnosti v tahu (E-modul) má téměř stejnou velikost jako u hliníkového materiálu a dosahuje přibližně jedné třetiny hodnoty oceli. Pevnost v tahu mají sklená vlákna vyšší než většina organických i anorganických vláken. Skleněná vlákna vykazují přibližně 3 % mez pružnosti a také jsou charakteristické tím, že jejich deformace je téměř elastická.

Mluvíme-li o tepelných vlastnostech skleněných vláken, tak překonáváme ostatní typy materiálů. Vlákna jsou schopná dlouhodobě vydržet působení teplot až 250 °C, aniž by došlo k výraznému poklesu mechanických vlastností. Nehořlavost a tudíž i ohnivzdornost patří k dalším charakteristickým vlastnostem skleněných vláken. Skleněná vlákna mají součinitel teplotní délkové roztažnosti nižší, než je tomu tak u většiny zbylých konstrukčních materiálů. Variant kompozitů plněných skleněnými vlákny je mnoho, tudíž z toho vyplývá, že konečné vlastnosti jsou ovlivněny druhem, obsahem a orientací skleněných vláken. [10]

2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování se řadí k nejpoužívanějším způsobům výroby plastových výrobků. Vstřikování je charakteristické složitostí fyzikálního procesu. Na procesu se podílí tři činitelé, mezi nimi patří polymerní materiál, vstřikovací stroj a také vstřikovací forma. Během procesu vstřikování je roztavený plast pomocí tlaku dopravován rozvodnými kanály do dutiny formy. V dutině formy nám roztavený plast ztuhne a dostáváme hotový výrobek.

Důraz je kladen na správný výběr plastu, jeho výběr se nám totiž následně projevuje na vlastnostech hotového výrobku. Na druhou stranu je nutné si uvědomit, že dobře zvolený plast není jediný požadavek na kvalitní výrobek. Musíme dokonale znát technologický postup, správně nastavit zpracovatelské parametry (teplota, tlak, čas) a chápat děje které nastávají během vstřikování, neznalost by totiž mohla vést k následné degradaci materiálu.

Během vstřikování dochází uvnitř materiálu k orientaci makromolekul a jejich řetězce se orientují ve směru proudění taveniny. Takto orientované makromolekuly jsou poté příčinou anizotropního chování výrobku, které se např. může projevovat v podobě nepravidelného smrštění, popřípadě vzniku vnitřního pnutí. Rovněž je třeba si uvědomit, že veškeré vlastnosti materiálu obsažené v grafech a tabulkách jsou pouze průměrnými hodnotami, které jsme získali za optimálních podmínek. Pro konkrétní proces, který budeme řídit, jsou tyto hodnoty považovány pouze jako orientační.

Technologií vstřikování se vyrábějí výrobky konečného charakteru nebo polotovary, které jsou vstupním materiálem pro další operace. Hotové výrobky získané technologií vstřikování jsou charakteristické svou tvarovou přesností, rozměrovou přesností a reprodukovatelností výsledných vlastností. Vstřikováním jsme schopni zpracovávat skoro všechny druhy termoplastů, některé reaktoplasty (termosety) a také kaučuky. [16, 17]

2.1 Výhody a nevýhody technologie vstřikování

Výhody technologie vstřikování:

- Krátký čas cyklu potřebný k výrobě výrobků.
- Možnost výroby složitých výrobků.
- Dobré tolerance rozměrů (IT15 až IT9).

- Vysoká jakost povrchu.
- Konstrukční flexibilita.
- Vysoký stupeň automatizace.
- Možnost odstranění dodatečných úprav povrchů a montážních operací.

Nevýhody technologie vstřikování:

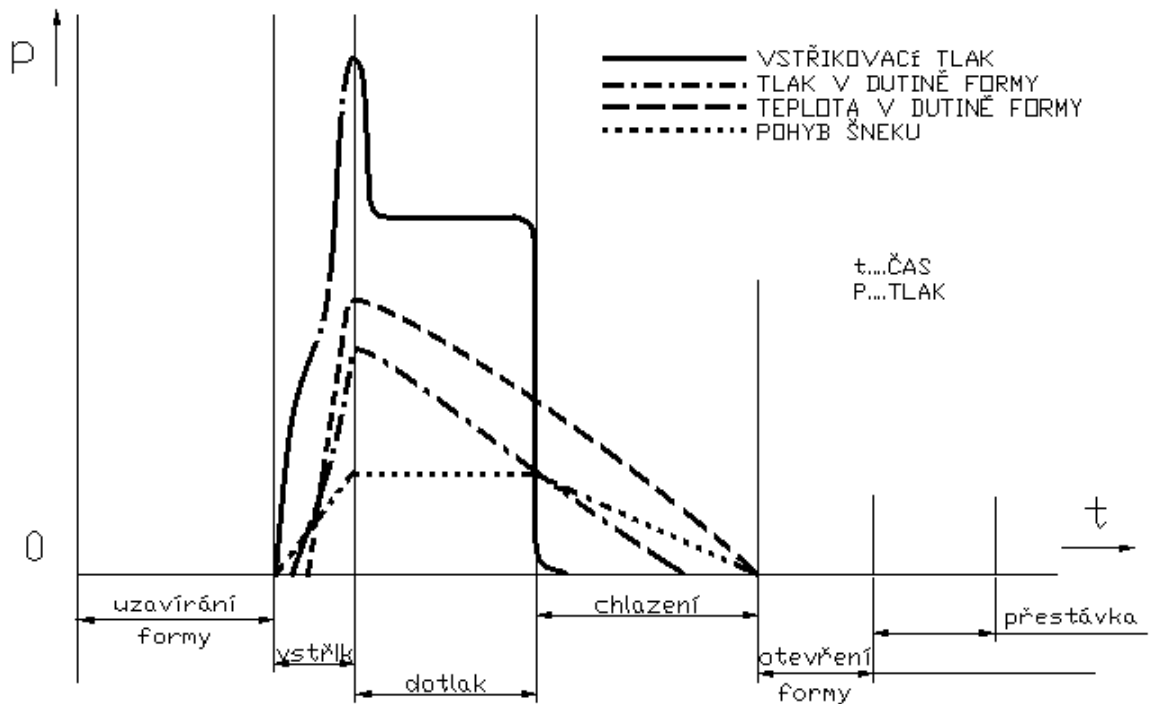
- Vysoké investiční náklady v porovnání s ostatními technologiemi pro zpracování plastů.
- Časová náročnost výroby forem.
- Nutnost využití velkých speciálních zařízení, která jsou v nepoměru s výslednou velikostí výrobku. [17]

2.2 Vstřikovací cyklus

Cyklus vstřikování je diskontinuální, neizotermický proces zahrnující sled přesně definovaných úkonů. Cyklus je realizován na vstřikovacím stroji.

Délka pracovního cyklu je dána součtem všech časových průběhů technologických úkonů stroje, včetně chladícího účinku formy. Nejenom procesy během vstřikování mohou ovlivnit délku cyklu, ale také vhodně zvolená konstrukce výrobku se kladně projeví na délce vstřikovacího cyklu.

Za počátek cyklu je bráno uzavření vstřikovací formy. Následně je plastifikovaný materiál o požadované teplotě vstříknut (plnění) určitou rychlostí a tlakem do dutiny formy. Plastifikovaná hmota neboli tavenina je po určitou dobu stále dopravována pod tlakem (komprese) a následně dojde k působení dotlaku. Dotlak končí se zamrznutím vtokového ústí, zatímco teplota taveniny stále klesá. Následuje odjezd plastikační jednotky a začíná plastikace další dávky. Poté co teplota výrobku klesne v místech působení vyhazovačů na hodnotu vyhazovací teploty, je možné výrobek bezpečně vyhodit z dutiny formy. Poté, vyžaduje-li si to dutina formy, následuje očištění a příprava formy k dalšímu pracovnímu cyklu. Obsluha vstřikovacího stroje ovlivňuje trvání jednotlivých technologických faktorů. [16, 17, 18]



Obr. 10. Vstřikovací cyklus v závislosti na tlaku vstřikovacího stroje [16]

2.3 Vstřikovací forma

Nástrojem technologie vstřikování je vstřikovací forma. Funkcí formy je udělit tavenině výsledný tvar a rozměry poté, co se ochladí. Musí být schopna opakovaně odolávat vysokým tlakům, zabezpečit snadné vyhození výstřiků a umožňovat automatickou funkci po celou dobu její životnosti. Konstrukce vstřikovacích forem se odvíjí od technologického projektu daného výrobku. Je třeba respektovat hned několik faktorů, mezi ně patří hlavně vlastnosti zpracovávaného materiálu, možnosti výrobních zařízení, požadavky na kvalitu a produktivitu práce. [16, 17, 19]

2.3.1 Požadavky na vstřikovací formy

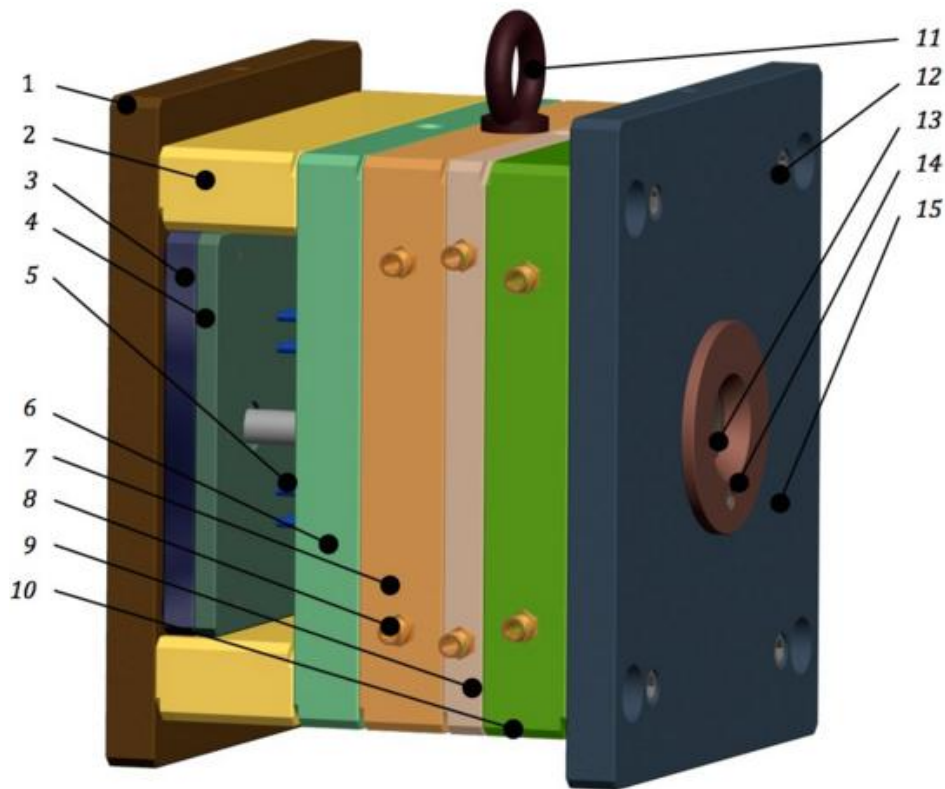
Kvalitní vstřikovací forma by měla splňovat požadavky technické, ekonomické a společensko-estetické. Technické požadavky nám mají zajistit správnou funkci vstřikovací formy. K požadavkům patří výroba daného množství výstřiků, které zároveň musejí splňovat požadovanou přesnost a kvalitu. Další podmínkou je snadná manipulace a jednoduchost obsluhy při výrobě. K ekonomickým požadavkům se řadí nízká pořizovací cena a pokud možno rychlá a jednoduchá výroba výstřiků při dosahované vysoké

produktivitě práce. Spadá zde také požadavek na vysoké využití plastu, které jde ruku v ruce s výrobním odpadem a následnou recyklací.

Požadavky společensko-estetické vyžadují vhodné pracovní prostředí a bezpečnost při práci. Je důležité splňovat všechny bezpečnostní zásady při konstrukci formy, ale také i při výrobě a provozu formy. [16]

2.3.2 Konstrukce vstřikovací formy

Použitý materiál formy je ovlivněn hned několika faktory. Mezi ně patří např. druh zpracovávaného plastu, složitost a velikost výstřiku, požadované série, tepelné odolnosti aj. [17]



Obr. 11. Uzavřená dvoudesková vstřikovací forma

(1-upínací deska levá, 2-rozpěrná deska, 3-vyhazovací deska opěrná, 4-vyhazovací deska kotevní, 5-vyhazovač, 6-opěrná deska, 7-tvarová deska B, 8-přípojka chlazení, 9-tvarová deska C, 10-tvarová deska A, 11-manipulační oko, 12-hl. montážní šrouby, 13-vtoková vložka, 14-středící kroužek pravý, 15-upínací deska pravá [20]

Konstrukce vstřikovacích forem lze dělit dle:

- Násobnost formy – jednonásobné / vícenásobné.
- Zaformování – dvou/tří deskové, čelist'ové, etážové, vytáčekí aj.
- Směru vstřikování do formy – vstřik kolmý na dělicí rovinu / do dělicí roviny.

Z konstrukčního hlediska se po formě požaduje:

- Maximální pevnost a hlavně tuhost částí formy, z důvodu zachycení velkých tlaků.
- Přesnost a jakost funkčních ploch dutiny formy a také zbylých funkčních dílů.
- Vysoká životnost, vyplývající ze správné konstrukce, materiálu a výroby.
- Ideální funkce formy, vyhazovacího, temperačního, vtokového a odvodušňovacího systému aj. [16, 17]

2.4 Vtokové systémy

Vtokové systémy jsou systémy rozvodných kanálů a ústí vtoků, které při vstřikování zajišťují vedení proudu taveniny do dutiny formy. Plnění dutiny musí proběhnout v co nejkratším čase a s pokud možno minimálními odpory proti tečení. [16]

2.4.1 Studené vtokové systémy

Studené vtokové systémy (SVS) jsou vhodné pro jednodušší výrobky a malosériovou výrobu. Při vstřikování teče tavenina SVS a dochází k poklesu teploty a nárůstu viskozity na vnějším povrchu. Takto vytvořená vnější vrstva funguje jako tepelná izolace pro stále tekutý vnitřní proud, který může dále téci a zaplnit tak dutinu formy. Vnitřní odpor prudce vzrůstá a naopak průtok poklesne ve chvíli, kdy je dutina formy zaplněna. Díky dotlaku dodatečně vrostle teplota ve vtokovém ústí a je možné po určitou chvíli dále vyvíjet tlak na chladnoucí taveninu uvnitř dutiny. Účelem dotlaku je dodatečná kompenzace smrštění výrobku při chladnutí.

Celá vtoková soustava a její složení se odvíjí od konstrukce vstřikovací formy a násobnosti. Obecnou zásadou při vstřikování do vícenásobných forem je docílit tzv. vyváženého vtokového systému. Vyvážený vtokový systém je takový, u kterého dojde k zaplnění dutiny formy ve stejnou dobu a za stejných tlaků.

Je třeba si uvědomit, že u studených vtokových systémů je vše kromě výrobku odpadním materiálem. U vstřikování běžných výrobků může procento odpadu činit až 50 % a u mikrovstřikování toto procento může dosahovat hodnoty až 90 %.

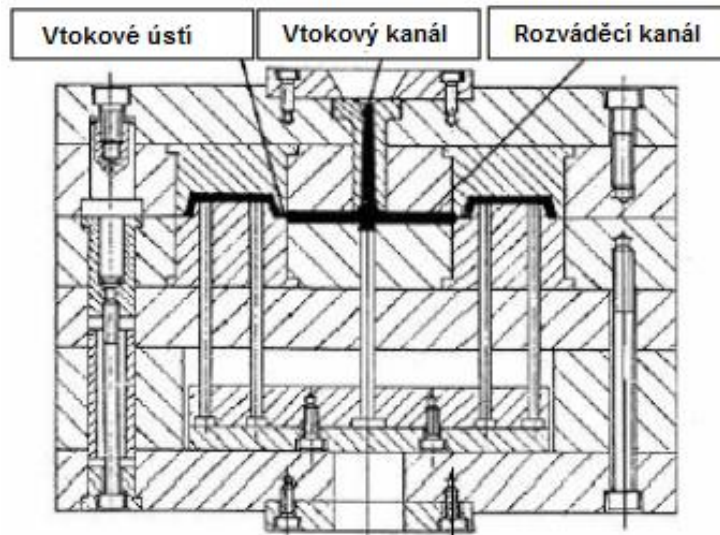
Rozměry, tvary a rozmístění vtokových kanálů a ústí mají vliv na:

- Spotřeba materiálu plastu (souvisí s množstvím odpadu).
- Vlastnosti, vzhled a rozměry výstřiku.
- Dodatečné začištění výrobků.
- Energetická náročnost technologie. [16, 20, 21]

2.4.2 Zásady řešení SVS

Je potřeba zajistit takovou konstrukci SVS, aby splňovala následující:

- Dráha toku do dutiny formy musí být co nejkratší a bez zbytečných časových a tlakových ztrát.
- Dráha toku musí být ke všem dutinám stejná.
- Dostatečně velký průřez vtokových kanálů pro zajištění plastičnosti materiálu i po zaplnění dutiny pro dodatečné působení dotlaku.
- Stejná rychlost taveniny ke všem dutinám, řešená odstupňováním kanálů.
- Zaoblení ve všech místech s ostrými hranami a tvorba úkosovitosti pro snazší odformování.
- Povrch vtokového systému leštit ve směru vyjímání.
- Konstrukce jímky pro zachycení ochlazeného čela taveniny.
- Vyvarování se míst, kde může vzniknout nahromadění materiálu (degradace).
- Větvení vtokových kanálů volit pod ostrými úhly.
- Vtokové kanály konstruovat větší pro semikrystalické polymery než pro polymery amorfní. [16, 21]



Obr. 12. Vtokový systém formy [16]

2.4.3 Horké vtokové systémy

Horkých vtokových systému se využívá v hromadné a velkosériové výrobě a převážně pro složitější typy výstřiků. Tento typ vtokových soustav vznikl z důvodu úspor materiálu a dodatečného opracování. Díky tomu, že materiál je před vstřikováním i po něm v kanálech vtokového systému stále taveninou, nevzniká nám odpadní materiál a není třeba řešit následnou recyklaci vtokových zbytků. Na druhou stranu je třeba vzít v potaz to, že cena formy s HVS je výrazně vyšší a není ekonomicky výhodné pořizovat takto vybavenou formu pro krátkodobý a přerušovaný provoz.

Současné moderní typy HVS měli své předchůdce, které se teprve s postupem času a nových technologií vyvíjely až k současnému stavu. Dříve se využívalo zesílených vtoků, izolovaných soustav s předkomůrkami atd. V současnosti hrají prim vyhřívané trysky, u kterých dochází k minimálním úbytkům tepla a tlaků, ruku v ruce s optimálním tokem taveniny. [16, 21]

2.4.4 Výhody a nevýhody HVS

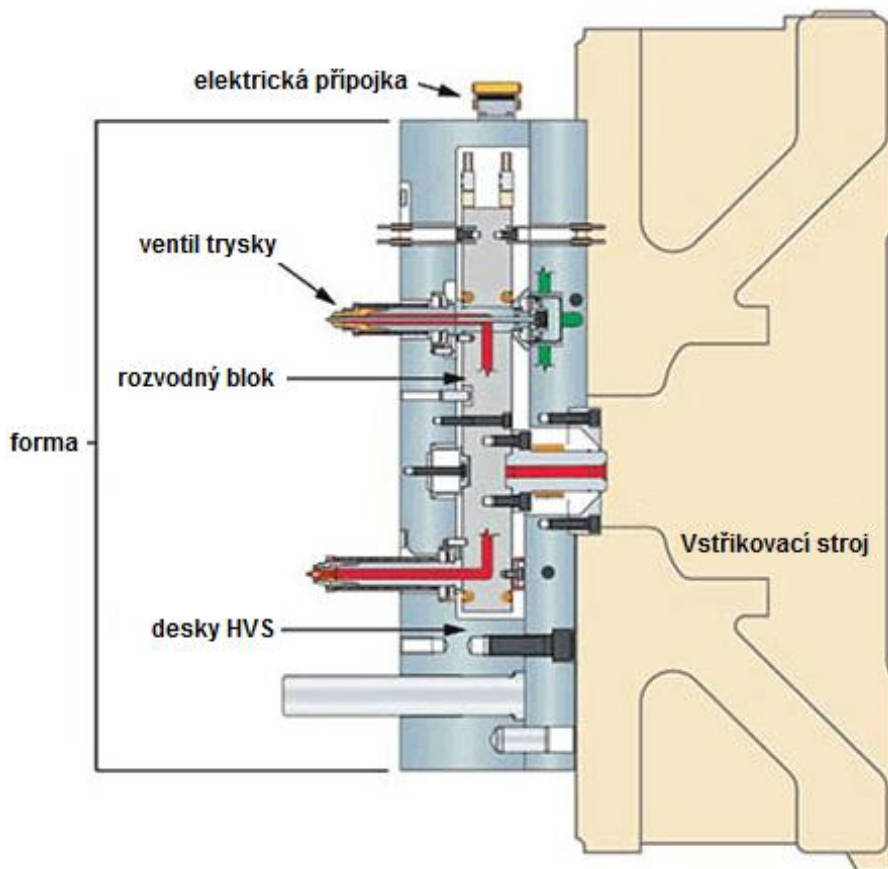
Výhody:

- Zkrácení výrobního cyklu, vyšší produktivita práce.
- Možnost automatizace výroby.
- Odpadá práce se vtokovými zbytky, následná manipulace, regenerace a problémy spojené s odstraňováním.

- Nižší uzavírací síla díky odpadnutí vtokové soustavy.
- Snížení spotřeby plastů (velké ekologické plus).

Nevýhody:

- Vysoké pořizovací náklady.
- Náročnější konstrukce formy.
- Vyšší energetická náročnost.
- Nákup pouze od specializovaných výrobců.
- Nutná konzultace se specialisty při použití určitého systému.
- Vyšší specializace obsluhy stroje. [16]



Obr. 13. Konstrukce vstřikovací formy s HVS [22]

3 RECYKLACE PLASTŮ

Vliv lidské činnosti na stav životního prostředí se stává čím dál závažnějším celosvětovým problémem a recyklace plastů je jedním z mnoha způsobů, jak tento problém řešit. Z důvodu velice krátkého životního cyklu obalů z plastů a také díky tomu, že polymery nejsou degradovatelné, bývají zařazovány k jednomu z největších zdrojů znečištění.

Dle množství odpadu papír stále zaobírá největší část (34 %), ale plasty v současnosti dosahují také velké zastoupení a to 10 až 20 %. Ovšem je třeba vzít v potaz, že na výrobu plastů se využije méně energie než na výrobu srovnatelných výrobků z jiných materiálů. I přes další výhody při výrobě, konstrukčním využití a úspoře hmotnosti v porovnání s jinými materiály je třeba řešit i nakládání s jejich odpady. Mnoho firem a v posledních letech i legislativa klade důraz na ekonomicko-ekologické strategie podniků.

K metodám řešení problému krátké životnosti plastů patří jak preventivní opatření, tak také následné začlenění recyklovaného plastu (recyklátu) zpět do výrobního cyklu. K preventivním metodám patří omezení množství vznikajícího odpadu např. využitím horkých vtokových systémů nebo vývoj a využití snadno degradovatelných polymerů. Bio-degradovatelné polymery však nemohou nahradit hojně rozšířené typy plastů a proto se jak nezbytné řešení jeví alespoň recyklování plastů. A to recyklování plastů přeměnou přímou, na hotové výrobky, nebo využití jejich energetického, případně chemického obsahu.

Společné problémy nastávající při recyklaci:

- Cena recyklace.
- Sběr a separace odpadů.
- Nalezení budoucího využití výrobků obsahující recyklát na trhu. [5]

3.1 Dělení odpadních plastů dle druhu znečištění

Kromě plastů z komunálního odpadu je zde ještě velké množství plastového odpadu z průmyslových výrobků. Nejčastěji zde spadá plastový odpad z automobilového průmyslu, transportního průmyslu a odpad vznikající při výrobě.

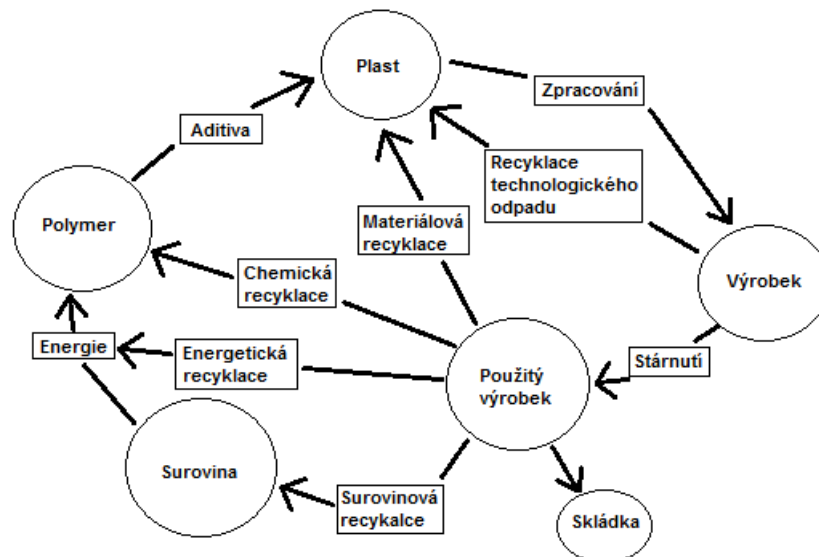
Pro snazší orientaci existuje rozdělení plastového odpadu do čtyř kategorií:

- a) Plasty jednoho druhu neznečištěné.
- b) Plasty jednoho druhu kontaminované.
- c) Směsné plasty o známém složení.
- d) Náhodně sebraný a komunální odpad.

Dle kategorie plastového odpadu je s daným odpadem i následně nakládáno. Odpad s kategorie a) může být znovu zahrnut do procesu, při kterém byl vytvořen. Naopak odpad z kategorie b) nemůžeme zahrnout do procesu, při kterém byl vytvořen. U této kategorie je nutné odpad dále zpracovat a využít v jiné aplikaci. Odpad kategorie c) neobsahuje kontamináty z plastů o neznámém složení, na rozdíl od odpadu náhodně sebraného a komunálního. [1, 5]

3.2 Zpracování odpadních plastů dle druhu znečištění

Dle toho, v jaké se odpadní plast nachází kategorii podle druhu znečištění, je s ním následně nakládáno. Rozeznáváme čtyři druhy recyklací, materiálovou, surovinovou, chemickou a také energetickou viz *Obr. 15*. [1, 5, 23]



Obr. 14. Recyklační cyklus [23]

3.3 Materiálová recyklace

Materiálová recyklace je velice vhodný způsob pro recyklování termoplastických odpadů, které mají vysokou čistotu. Na druhou stranu je nutno říci, že se jedná o jednu z nejvíce náročných způsobů recyklace. Technologie materiálové recyklace zahrnuje procesy od nejjednoduššího mletí výrobků, tepelně mechanického zpracování, až po kompatibilizační postupy v tavenině. Základem materiálové recyklace je dodání mechanické a tepelné energie s aditivami jako jsou stabilizátory, plniva a případně barviva. Dodání těchto energií a plniv se děje za účelem přetvoření odpadní suroviny na materiál nový. Tento nový materiál dosahuje mechanickými a optickými vlastnostmi velice podobné hodnoty jako panenský polymer. Dosahuje-li recyklovaný materiál podobných vlastností jako panenský plast, lze finanční bilanci recyklace nazvat jako příznivou.

Také může dojít ke smíchání recyklovaného odpadu s granulátem čistým. Při této kombinaci většinou dojde ke snížení mechanických a fyzikálních vlastností zároveň se změnou vzhledu výrobku. Jak moc se budou lišit vlastnosti a vzhled výrobku, ovlivňuje množství recyklovaného odpadu. Využití recyklovaného granulátu není možné u transparentních a silně namáhaných výrobků z důvodu nesplnění požadovaných vlastností. Přimícháme-li 15-30 % odpadu, nedochází k výraznému ovlivnění vlastností, při vyšším obsahu se vlastnosti stále více liší. Není-li výrobek uvažován používat v konstrukci a nejsou-li na něj kladeny velké nároky, můžeme k výrobě použít 100 % odpadního granulátu.

Materiálovou recyklaci nemůžeme aplikovat pro všechny typy odpadních plastů. U některých plastů by mohlo recyklací dojít k degradaci. Další a velice důležitou věcí, která může ovlivnit rozhodnutí se pro materiálovou recyklaci je čistota vstupní suroviny.

Dle čistoty vstupní suroviny dělíme materiálovou recyklaci na:

- Primární – Pro čistý nekontaminovaný odpad jediného typu plastu.
- Sekundární – Pro odpad obsahující různé plasty. [5, 16, 24]

3.3.1 Primární recyklace

Primární recyklace je určena pro zpracování čistého a nekontaminovaného odpadu jednoho plastu. Jde o nejjednodušší typ a také nejlevnější. Často se tohoto typu recyklace využívá přímo ve výrobním závodě. Výstupní produkt recyklace se může přidávat k čistému

materiálu, kdy nedojde ke snížení vlastností, případně může být použit samostatně jako druhořadý materiál pro výrobky s nízkými nároky. [5]

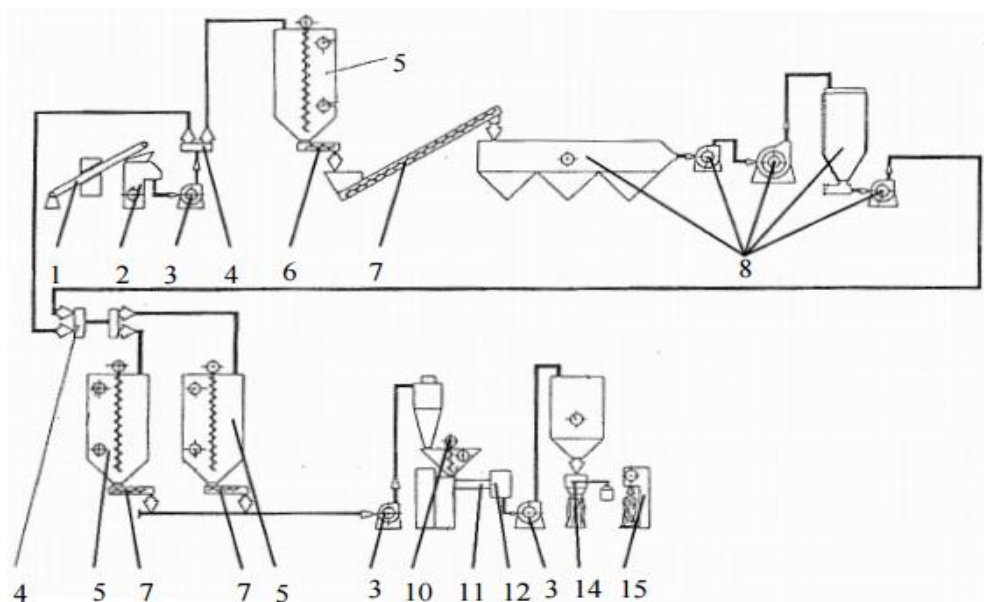
3.3.2 Sekundární recyklace

Sekundární recyklace je typ materiálové recyklace, která se využívá pro zpracování odpadu obsahujícího různé typy plastů. Ty mohou být zpracovávány několika různými operacemi, např. drcením, granulací, čištěním, sušením a případně i separací plastů navzájem.

Rozlišujeme dva přístupy k sekundární recyklaci:

- Recyklace tříděných plastů.
- Recyklace netříděných směsí.

Recyklace tříděných plastů má podstatu v separaci plastů od jejich kontaminantů. Následuje separace odpadu dle generických typů. Recyklace netříděných směsí probíhá na principu rozdílných hustot, mechanických a fyzikálních vlastnostech, barvě a rozpustnosti. [5]



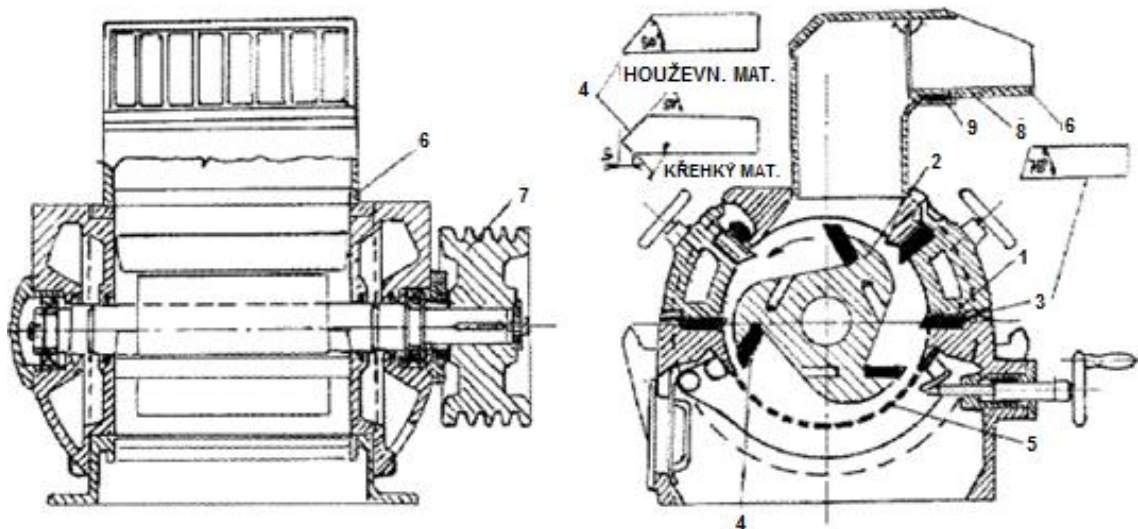
Obr. 15. Linka na zpracování tříděného plastového odpadu

1-dopravní pás, 2-mlýn, 3-transportní dmýchadlo, 4-potrubní výhybky,
5-zásobník, 6-vynášecí šnek, 7-šnekový dopravník, 8-praní a sušení,
10-násypka, 11-vytlačovací stroj, 12-granulační zařízení, 13-zásobník pytlovacího zařízení, 14-automatická pytlovací váha, 15-svařování pytlů [25]

3.3.3 Zařízení na zpracování plastového odpadu – mlýny

Linky na zpracování plastového odpadu vyžívají k rozemletí odpadu na budoucí drť mlecích zařízení. Velmi používaným zařízením je nožový a talířový mlýn.

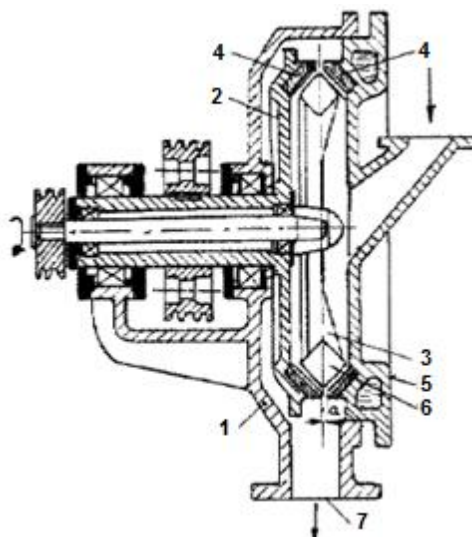
Nožový mlýn využívá řezného účinku mlecích nástrojů k rozmělnění odpadního materiálu. Materiál se nachází v prostoru mezi statorem a rotorem. Díky pevným nožům umístěným po obvodu statoru a pohyblivým nožům na obvodu rotoru dochází při otáčení k rozmělnění materiálu. Nože jsou rozmístěny tak, aby k řezu nedocházelo po celém obvodu současně. Zároveň jsme schopni měnit sklon ostří nožů dle zpracovávaných vlastností materiálu. Ve spodní části zařízení se nachází děrovaný plech (síto) a dle velikosti jeho otvorů nastavujeme výslednou jemnost pomletého materiálu. Tento typ zařízení je konstruován ve dvou provedeních dle osy rotoru a to jako horizontální nebo vertikální.



Obr. 16. Nožový mlýn

1-skříň, 2-rotor, 3-statorový nůž, 4-rotorový nůž, 5-rošt, 6-násypka, 7-řemenice,
8-závěs, 9-magnetický odlučovač [26]

Pro výrobu ještě jemnějšího recyklátu se využívá speciálních nožových mlýnů. Speciální mlýny obsahují na rotoru a víku segmenty s mnoha břity. Konstrukce je dále tvořena metacím kolem, které obsahuje šest ramen osazených noži. Metací kolo se otáčí v opačném směru, než je pohyb rotoru. Výstupní jemnost pomletého materiálu lze nastavit vzdáleností mezi segmenty. [25, 26]



Obr. 17. Speciální nožový mlýn

1-fréma, 2-rotor, 3-metací kolo, 4-nožový segment, 5-víko, 6-nůž, 7-výstup [26]

3.4 Surovinová recyklace

Principem surovinové recyklace je přeměna plastového odpadu chemickou cestou (hydrogenace, pyrolýza) na výrobní surovinu. Je využíváno termicky destruktivních procesů, tyto procesy mají za úkol rozložit polymerní složky odpadního plastu na směs plyných a kapalných uhlovodíků. Využití surovinové recyklace je u silně znečištěných směsí netříděných plastů, jako je komunální odpad.

Výstupní surovinou surovinové recyklace při použití hydrogenace a pyrolýzy jsou kapalné uhlovodíky (topný olej, petrochemická surovina), plynné produkty a koks.

Hydrogenace – Vysokotlaký katalytický proces.

Pyrolýza – Nízkotlaký proces, za vyšších teplot. [5, 24]

3.5 Chemická recyklace

Princip chemické recyklace je založen na chemickém rozkladu polymeru. Cílem je získat produkty o podstatně nižší molární hmotnosti, případně až monomerní jednotky. Chemické recyklace je s výhodou využíváno u polymerů, které by při recyklaci mohli degradovat a také těch, které nemají vysokou čistotu. Výhodou je totiž fakt, že nároky na čistotu vstupní suroviny jsou malé. Na druhou stranu jsou zde i nevýhody a tou největší je vysoká investice na technologické zařízení. Někdy je chemická recyklace nazývána jako terciární.

Solvolýza – Procesy založené na získávání monomerů procesem opačným polykondenzaci.

Tepelná depolymerace – Nejjednodušší typ chemické recyklace, ale není příliš rozšířený. Založen na principu odštěpování monomerů z řetězců vlivem vysokých teplot. [5, 24]

3.6 Energetická recyklace

Energetická, někdy označovaná jako kvarterní, je způsob recyklace, při které se snažíme získat energetický obsah z odpadních plastů metodou spalování. Principem je naplnění speciálních topenišť uhlím s odpadním plastem a následné spalování. Výstupem energetické recyklace je tepelná energie. Někdy je energetická recyklace nazývána jako ekologicky neakceptovatelná, ale díky správné konstrukci topenišť a správným technologickým podmínkám procesu spalování, jsme schopni zamezit vzniku toxických plynů při spalování.

Tento typ recyklace je v dnešní době nejefektivnějším způsobem vedoucím k odstraňování odpadu, na který nelze použít jiných typů recyklací výše zmíněných. Odpadní plasty mají vysokou energetickou hodnotu, díky tomu jsou důležitou složkou spalovaného odpadu. [5, 24]

4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Mechanickými vlastnostmi jsme schopni kvantitativně hodnotit chování materiálu při působení vnějších mechanických sil. K základním mechanickým vlastnostem patří pevnost, pružnost, houževnatost a plasticita. Od těchto vlastností jsou poté další vlastnosti považovány jako odvozené, patří k nim např. tvrdost, odolnost proti tečení (creep), odolnost proti únavě atd.

K zjištění mechanických vlastností materiálů a následnému porovnání využíváme zkoušek mechanických vlastností. Důraz je kladen na jednotnost a přesné definice, dle kterých jsou zkoušky prováděny a proto je přesný postup provádění zkoušek normalizován.

Zkoušky mechanických vlastností lze členit dle způsobu působení síly na zkušební vzorek a to následovně:

- Zkoušky statické – U těchto zkoušek je síla na zkušební vzorek vyvozena pozvolným způsobem. Čas trvání krátkodobých zkoušek je v řádech minut, v případě dlouhodobých až několika dnů, případně týdnů. Nejznámější zástupce krátkodobé statické zkoušky je tahová zkouška.
- Zkoušky dynamické – U těchto zkoušek je síla na zkušební vzorek vyvozena během zlomků vteřin (nárazově).

Jak zkoušky statické, tak i dynamické lze provádět za běžných, tak i zvýšených teplot. Během těchto zkoušek dochází k poškození zkušebního tělesa, z tohoto důvodu zkoušky probíhají na zkušebních vzorcích a ne na samotných výrobcích. Vlastnosti zkušebních vzorků a také jejich tepelné, případně chemicky tepelné zpracování jsou však shodné jako u skutečných výrobků. [27, 28]

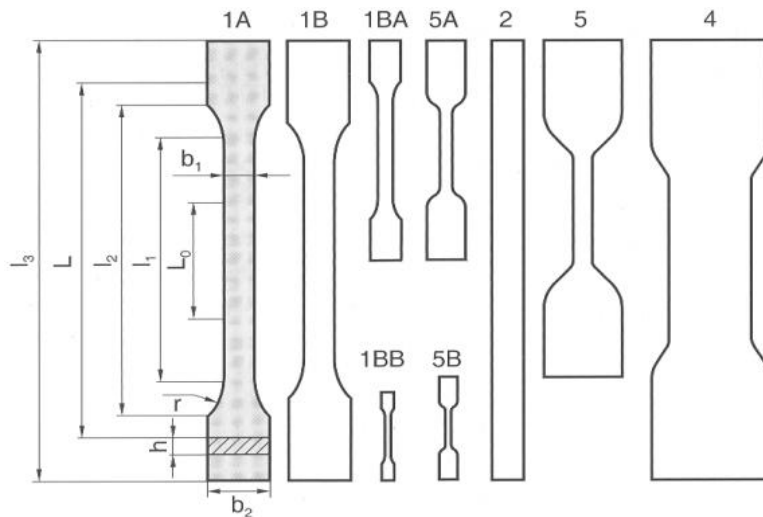
4.1 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem patří k nejčastěji používaným zkouškám k zjištění mechanických vlastností materiálu a provádí se na univerzálním zkušebním stroji. Zkouška se řídí normou ČSN EN 10002-1 (42 0310):1994 a provádí se téměř u všech materiálů, kde je potřeba zjistit veličiny pro výpočet konstrukčních prvků, případně určit vhodný materiál. Principem zkoušky je upnutí zkušební tyče a vyvolání statické jednoosé síly až do přetržení.

Rozměry a tvary zkušební tyče jsou normalizovány. K identifikaci prodloužení se využívají rysky na zkušebních tyčích, případně extenzometry, které jsou v dnešní době více zastoupené. Tahovou zkouškou se určuje pevnost v tahu, poměrné prodloužení, kontrakce a také tažnost. [27, 29, 30, 31]

4.1.1 Zkušební tělesa pro statickou zkoušku tahem

Zkušební tyče pro zkoušku tahem jsou definovány dle normy ČSN EN ISO 527-1. Existuje několik druhů zkušebních tyčí, které se liší jak tvarem, tak i velikostí. Ve většině případů se používá tvar oboustranných lopatek. Rozšířený tvar lopatek na obou koncích slouží k dostatečně velké styčné ploše pro upínání do čelistí stroje. [29]



Obr. 18. Různé tvary zkušebních těles pro tahové zkoušky [32]

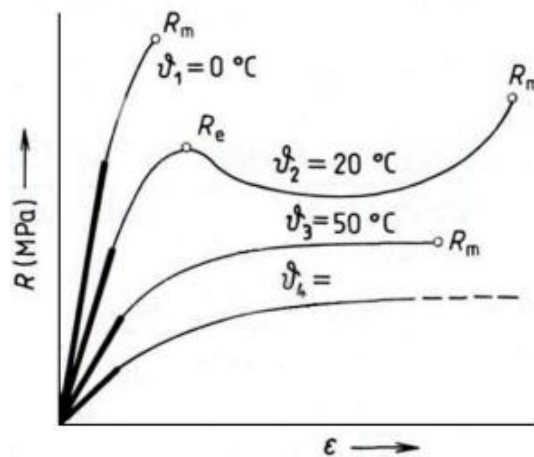
Tab. 1. Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku plastů [33]

Označení rozměru	Druh rozměru	Rozměry v [mm]	
		Typ 1A	Typ 1B
b1	Šířka pracovní části	10	10
b2	Šířka upínací části	20	20
l1	Délka pracovní části	80	60
l2	Vzdálenost mezi širokými částmi	104-113	106-120
l3	Celková vzdálenost	150	150
Lo	Počáteční měřená délka	50	50
L	Vzdálenost čelistí na počátku	115	106-120
h	Tloušťka tělesa	4	4
R	Poloměr	20-25	60

4.1.2 Pracovní diagram zkoušky tahem

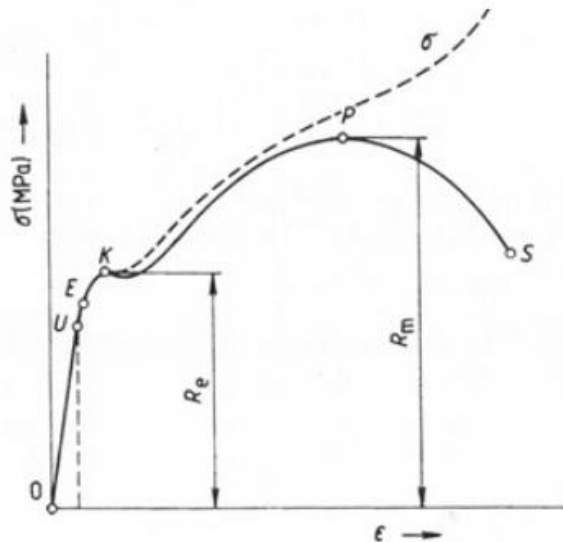
Plastové materiály vykazují při tahové zkoušce rozdílné závislosti mezi napětím a deformací než materiály kovové. Tyto rozdíly nastávají z toho důvodu, že jejich mechanické vlastnosti jsou značně závislé na teplotě a čase zkoušky.

U všech statických zkoušek vzniká v zatížené součásti napětí, hovoříme zde o míře vnitřních sil, které vznikají v materiálu vlivem působení sil vnějších. U tahové zkoušky nám podíl síly a skutečné plochy průřezu v jakémkoliv stadiu zkoušky udává skutečné napětí. Ovšem z důvodu obtížného odečítání plochy průřezu v kterémkoliv stadiu zkoušky se používá napětí smluvní, které neuvažuje změnu průřezu. Smluvní napětí je vztaženo na původní průřez S_0 .



Obr. 19. Pracovní diagram polyamidu při různých teplotách a konstantním čase [31]

Na Obr. 20. můžeme vidět, jak se liší průběhy pracovních diagramů pro materiál polyamid při různých teplotách a stejném čase (0,5 až 3 minuty). Tlustou čarou jsou vyznačena místa, kde se materiál stále chová pružně. To znamená, že kdybychom na materiál přestali vyvíjet sílu, vrátil by se do původní polohy. Dále je z diagramu patrné, že průběh křivky je silně závislý na teplotě, při které zkouška probíhá. U vyšších teplot dochází k větší deformaci už při mírných napětích. S rostoucí teplotou se také zkracuje přímková část, daný materiál se tedy stává méně pružným, ale zato u něj roste houževnatost a tažnost. [31]



Obr. 20. Pracovní diagram zkoušky tahem [31]

Na pracovním diagramu zkoušky tahem se nacházejí důležité body a ty jsou následující:

- U – mez úměrnosti.
- E – mez elasticity.
- K – mez kluzu v tahu.
- P – mez pevnosti (pevnost v tahu).
- S – napětí při přetržení. [29]

Smluvní napětí R – Lze ho vypočítat v každém bodě diagramu. Je definováno jako podíl velikosti zatěžující síly F k původnímu průřezu zkušební tyče. [28]

$$R = \frac{F}{S_0} \quad [MPa] \quad (1)$$

Pevnost v tahu R_m – Jde o smluvní hodnotu napětí, která je dána jako podíl nejvyšší zatěžující síly F_m , kterou je schopna zkušební tyč snést, a počátečního průřezu S_0 .

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [MPa] \quad (2)$$

Celkové prodloužení ΔL – Výpočtem určíme absolutní změnu délky zkušební tyče. Rozdíl konečné délky L_u a počáteční délky zkušební tyče L_0 . [31]

$$\Delta L = L_u - L_0 \quad [mm] \quad (3)$$

Poměrné prodloužení ε - Podíl celkového prodloužení ΔL k celkové délce tyče L_0 .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad [1] \quad (4)$$

Tažnost A – Je charakterizována jako podíl poměrného prodloužení ε k počáteční délce tyče, vyjádřená v procentech.

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

Kontrakce Z – Také nazývaná jako zúžení, je podíl rozdílu počátečního průřezu S_0 a nejmenšího průřezu S_u zkušební tyče po skončení zkoušky k počáteční ploše průřezu.

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (6)$$

Pevnost v kluzu R_e - Charakterizována jako napětí, při kterém se tyč začne značně deformovat, bez zvětšení zatěžující síly.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [MPa] \quad (7)$$

Existují i materiály, u kterých není mez kluzu tak výrazná a nejde ji identifikovat vizuálně. Pro tyto případy byla zavedena smluvní mez kluzu.

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ - Jde o napětí, díky kterému trvalá deformace tyče dosáhne předepsané hodnoty, která je vyjádřena v procentech počáteční délky. [31]

$$R_{p0,2} = \frac{F_p \cdot 0,2}{S_0} \quad [MPa] \quad (8)$$

4.2 Zkoušky tvrdosti

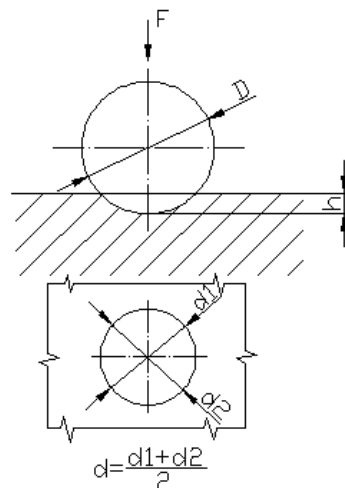
Tvrдость je charakterizována jako míra vnitřní energie materiálu, která klade odpor proti vnikání cizího tělesa. Většina přístrojů k měření tvrdosti je založena na tomto principu. Tato vlastnost má mimořádnou důležitost z toho důvodu, že zkoušku tvrdosti lze provést velice rychle, levně a také na předmětech malých rozměrů. Z hodnoty tvrdosti se dále dají usuzovat vlastnosti jako obrobiteľnosť, pevnost v tahu aj. Při zjišťování tvrdosti kovů je zjišťována tvrdost dle stopy po indentoru, případně dle hloubky vtisku. Naopak je tomu u zjišťování tvrdosti polymerů, zde se měří rovnovážná hloubka vniknutí daného tvaru. Zkoušky tvrdosti pro polymery byly upraveny ze zkoušek pro kovové materiály. [31, 34]

Metodika zkoušek tvrdosti plastů je dána normami ČSN EN ISO 2039-1 a ČSN EN ISO 2039-2. Zkoušky tvrdosti lze dělit na vnikací, vrypové a odrazové a podle charakteru zatěžující síly na zkoušky statické a dynamické [34, 35]

4.2.1 Brinellova zkouška tvrdosti

Podstata Brinellovy zkoušky je založena na vlačování indentoru (ocelová/tvrdo-kovová kulička) do povrchu zkušební vzorku. Následuje změření vtisku, zde se měří dva na sebe kolmé rozměry, z nichž se spočte průměr. Výsledná tvrdost je určena z poměru zatěžující síly a povrchu vtisku. Tvrdost je poté dle výsledku zjištěna v normách a označuje se jednotkou HBW.

Zkušební vzorek by měl mít tloušťku osminásobku hloubky vtisku h . Zkušební zatížení spolu s velikostí kuličky je voleno dle materiálu a jeho tvrdosti. Metoda Brinell je vhodná pro měření tvrdosti měkkých a středně tvrdých materiálů. [27, 31, 36]

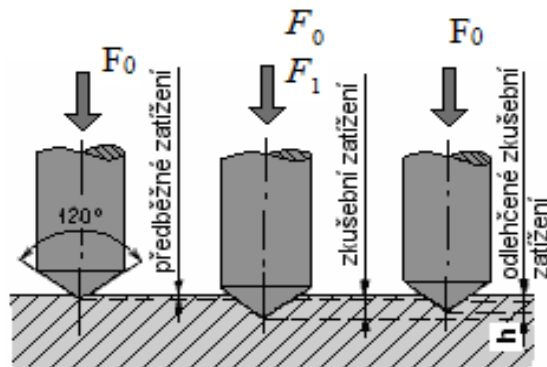


Obr. 21. Zkouška tvrdosti
podle Brinella [31]

4.2.2 Rockwellova zkouška tvrdosti

Zkouška Rockwellovy tvrdosti se řídí normou ČSN EN ISO 6508. Podstatou zkoušky je postupné vlačování indentoru, kterým je diamantový kužel o vrcholovém úhlu 120° nebo kulička z tvrdokovu, do povrchu zkušební tělesa. Výsledná tvrdost je určena jako rozdíl hloubky vtisku mezi předběžným a celkovým zatížením. Předběžného zatížení je využito z toho důvodu, že pronikne povrchovou vrstvičkou materiálu, díky které by mohlo dojít k ovlivnění měření. Celkové zkušební zatížení je tedy složeno ze dvou

zatížení, předběžného a přidavného. Poté co je indentor vtačen do materiálu, dojde k měření hloubky vtisku h (jednotka měření $h=0,002$ mm).

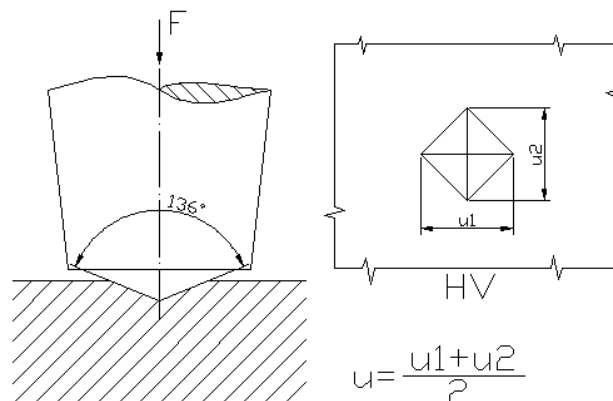


Obr. 22. Zkouška tvrdosti dle Rockwella [31]

Hodnota tvrdosti dle Rockwella se dá vypočítat z hloubky vtisku h a konstant N (dle stupnice) a S (jednotková stupnice). Tvrdost má jednotku HRC, HRA nebo HRB dle metody měření. Měření tvrdosti metodou Rockwell se využívá pro běžnou kontrolu ve velkosériové výrobě nebo tam, kde už nelze použít Brinellovu metodu. [31]

4.2.3 Vickersova zkouška tvrdosti

Vickersova zkouška tvrdosti patří k velice přesným metodám měření tvrdosti a často využívaným. Metodika měření se řídí normou ČSN EN ISO 6507. Vickersovu metodu lze využít u materiálů všech typů tvrdostí. Principem této zkoušky je vlačování indentoru do povrchu zkoušeného materiálu. Indentor má tvar čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° . Na materiál je působeno konstantní silou dle dané metody měření. U této metody se vyhodnocuje vtisk po působení čtyřbokého jehlanu, konkrétně měříme úhlopříčky u_1 a u_2 , u nichž určíme aritmetický průměr.



Obr. 23. Vickersova metoda [31]

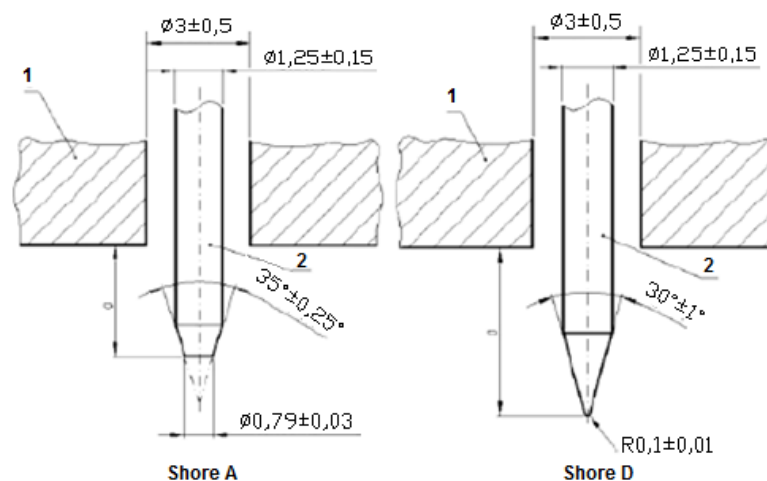
Tvrdotost dle Vickerse se určuje z velikosti zkušebního zatížení a plochy povrchu vtisku. Zkoušky lze uplatnit pro materiály všech tvrdostí. Jejich výhodou je vysoká přesnost a nezávislost na zatěžující síle. Hojně se Vickersových zkoušek používá ve velkých závodech, kde se měření provádí na diatestorech (Vickersův tvrdoměr využívající promítnutí zvětšeného vtisku). [31, 34, 36, 37]

4.2.4 Shoreho zkouška tvrdosti

Zkoušky tvrdosti dle Shoreho se řadí k nejrozšířenějším metodám měření polymerních materiálů v praxi. K metodám patří měření tvrdosti Shore A a Shore D. Tyto metody se od sebe liší tvarem indentoru a také použitelností dle tvrdosti materiálu.

Metoda Shore A se využívá pro měření tvrdosti velmi měkkých plastů a indentor má tvar komolého kužele. Naopak pro měření tvrdosti středně tvrdých materiálů je vhodná metoda Shore D, u které je tvar indentoru kužel s kulatým vrchlíkem.

Tvrdotost materiálu je nepřímo úměrná hloubce vniknutí indentoru do povrchu zkušebního tělesa. Hodnota tvrdosti je závislá na modulu pružnosti materiálu a také na visko-elastických vlastnostech materiálu.



Obr. 24. Schematické zobrazení zkušebních hrotů [38]

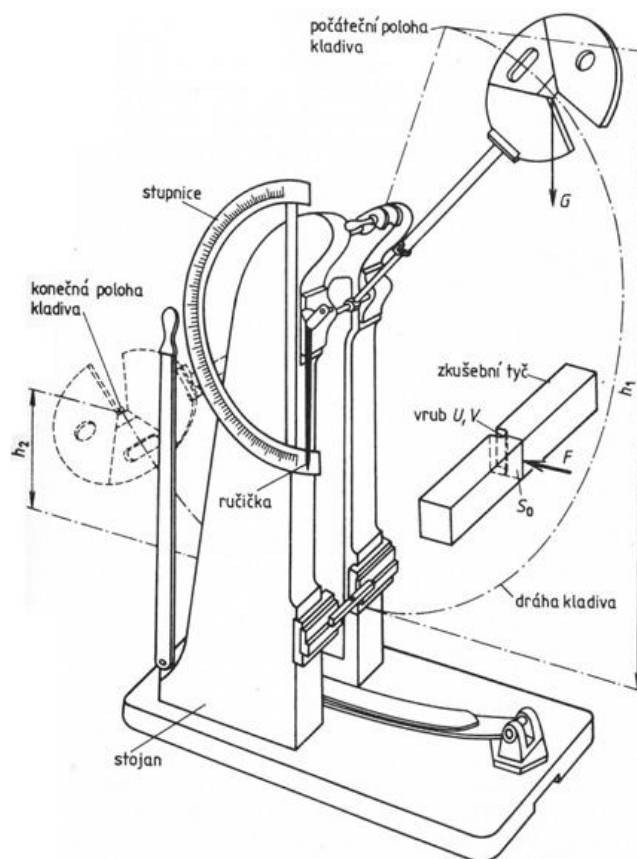
Tloušťka zkušebního tělesa pro obě metody by měla být minimálně 6 mm. U metody Shore A dochází k odečtení tvrdosti po uplynutí 3 s od dotyku hrotu s povrchem zkušebního vzorku. Dochází-li ke změně tvrdosti i po uplynutí doby 3 s, odečítáme hodnotu tvrdosti opětovně po 15 s. U metody Shore D se hodnota tvrdosti odečítá po uplynutí 15 s od dotyku hrotu s povrchem zkušebního vzorku. [31, 32, 38]

4.3 Zkoušky rázem

Zkouška rázem patří k rázovým zkouškám, u kterých se vyhodnocuje, kolik práce, případně energie je potřeba na porušení zkušební vzorku. U zkoušek se nejčastěji zkouší pouze jedním rázem. Pokud energie není dostatečná na porušení zkušební vzorku, provádí se zkouška více rázy a energie se sečte. [31]

4.3.1 Zkouška rázem v ohybu

Nejpoužívanější metodou rázových zkoušek je zkouška rázem v ohybu. Touto metodou jsme schopni určit, je-li zkoušený materiál křehký, nebo naopak houževnatý. Zkouška rázem v ohybu, neboli zkouška vrubové houževnatosti se provádí na stroji nazvaném Charpyho kladivo. Postup provádění zkoušky se řídí normou ČSN EN ISO 179-1. [31]



Obr. 25. Zkouška rázem v ohybu – Charpyho kyvadlové kladivo [31]

Postup zkoušky je následující:

- Upevnění kladiva v počáteční poloze.
- Zkušební tyč se umístí do místa pro něj určeného.
- Uvolnění kladiva z počáteční polohy.
- Zaznamenání překmitu (konečná poloha kladiva).
- Výpočet spotřebované práce a vrubové houževnatosti.

Z důvodu spotřebování práce na přeražení zkušební tyče je konečná poloha kladiva vždy nižší, než poloha počátku. Spotřebovaná práce na přeražení zkušební tyče se následně vypočítá ze vztahu 9.

$$K = G \cdot (h_1 - h_2) \quad [J] \quad (9)$$

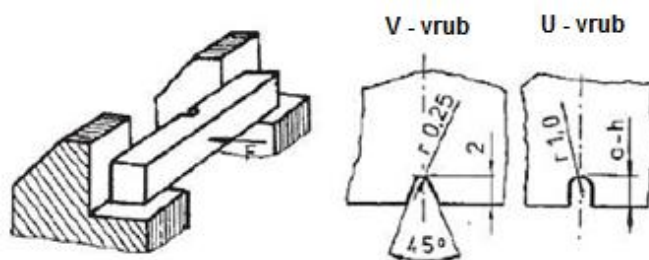
G – tíhová síla [N], h_1 – počáteční výška kladiva [m], h_2 – konečná výška kladiva [m]

Po vypočtení spotřebované práce se vrubová houževnatost vypočítá jako podíl spotřebované nárazové práce a plochy průřezu zkušební tyče v místě vrubu.

$$KCU = \frac{KU}{S_0} \quad KCV = \frac{KV}{S_0} \quad [J \cdot cm^{-2}] \quad (10)$$

KU (KV) – spotřebovaná nárazová práce [J], S_0 – plocha průřezu tyče v místě vrubu [cm]

Se zvyšující se teplotou nám vrubová houževnatost stoupá. Změna vrubové houževnatosti může být také ovlivněna modifikací plastů a změnou technologických podmínek při výrobě.



Obr. 26. Typy používaných vrubů [28]

Zkušební tyč může být bez vrubu nebo s vruby tvaru „U“ a „C“. Tyče bez vrubů se využívají pro křehčí materiály a tyčí s vruby se využívá pro materiály více houževnaté. Tyč může mít šířku 5, 7,5 nebo 10 mm. Hloubka vrubu je u tvaru „U“ 2, 3 nebo 5 mm a u tvaru „V“ je hloubka 2 mm. [31]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo prozkoumání vlivu recyklovaného materiálu na mechanické vlastnosti dle velikosti částic recyklátu. Materiálem byl Polypropylen obsahující 30 % skleněných vláken. Nejprve byly na vstřikovacím stroji vyrobeny zkušební tělesa z originálního materiálu a následně došlo k jejich zpracování na drť pomocí nožového mlýnu. Následovalo rozdělení recyklátu dle velikosti částic využitím laboratorní prosévačky. V dalším kroku byly opětovně vystříknuty zkušební vzorky, nyní již z různě velkých částic recyklátu. Na takto vyrobených zkušebních vzorcích byly prováděny mechanické zkoušky (tahová zkouška, zkouška rázem v ohybu a zkouška tvrdosti) za různých teplot. Naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cílem diplomové práce bylo:

- Vyrobení zkušebních těles technologií vstřikování.
- Drcení všech zkušebních těles využitím nožového mlýnu.
- Prosévání využitím prosévačky pro roztřídění recyklátu dle velikosti částic.
- Vyrobení zkušebních těles technologií vstřikování z roztříděného recyklátu.
- Provedení mechanických zkoušek na vyrobených vzorcích.
- Interpretace výsledků mechanických zkoušek.

6 ZKOUŠENÝ MATERIÁL PP + 30 % SKLENĚNÝCH VLÁKEN

Polypropylen (PP) patří k jednomu z ekonomicky nejdůležitějších termoplastických materiálů a spadá pod skupinu polyolefinů. Polypropylen je semikrystalický polymer, který je charakteristický stupněm krystalinity dosahující 60 až 75 %. Dosahuje také poměrně široké distribuce molekulových hmotností. Díky vyšší hodnotě krystalinity je PP neprůhledný polymer. Je také charakteristický nízkou hustotou dosahující hodnot 0,90 až 0,92 g.cm⁻³.

Polypropylen má podobně jako PE v podstatě nepolární strukturu, která se projevuje výbornými elektroizolačními vlastnostmi. Chemická odolnost PP také dobrá, botná v ketonech, uhlovodících a esterech. PP má dobrou schopnost odolávat vroucí vodě a sterilizaci vodní parou. Jeho tepelné využití je možné krátkodobě do 135 °C a dlouhodobě do 100 °C.

Obecně vlastnosti polypropylenů závisí na izotakticitě, stupni disperzity a molekulové hmotnosti. Mají dobrou odolnost vůči korozi za napětí, vyšší tvrdost, odolnost proti oděru a vyšší pevnost v tahu a tlaku. Při teplotách pod 0 °C jsou charakteristické křehkostí, jejich aplikace je proto vhodná za teplot přesahující 10 °C. Modifikací lze docílit využití již od -7 °C.

Použitý materiál byl v našem případě PP Syntegum 1030 AFV obsahující 30 % skleněných vláken. Materiál je dodáván ve formě granulátu a balen do pytlů, které se dodávají v balení po 25 kg. Granulát má válečkovitý tvar a jeho délka je 3,5 mm. Na *Obr. 27* můžeme vidět granulát PP s 30% skleněných vláken. [5, 7]



Obr. 27. Granulát PP s 30% skleněných vláken

V Tab. 2. jsou zobrazeny základní vlastnosti materiálu PP Syntegum 1030 AFV, obsahujícího 30 % skleněných vláken dle dodaného materiálového listu.

Tab. 2. Vlastnosti PP Syntegum 1030 AFV

PP Syntegum 1030 AFV			
Vlastnost	Metoda měření	Jednotky	Hodnota
Typ polymeru:			semikrystalický
Hustota (23 °C):	ISO 1183	g/cm ³	1,14
Index toku taveniny (2,16 kg a 230 °C):	ISO 1133	g/10min	3
Vrubová houževnatost Izod:	ISO 180	kJ/m ²	8
Teplota měknutí dle Vicata:	ISO 306	°C	130
Obsah plnění (750 °C/30 min):	ISO 3451	%	30
Pevnost v tahu na mezi kluzu:	ISO 527	kg/cm ²	800
Modul pružnosti v ohybu (23 °C):	ISO 178	kg/cm ²	55000

7 VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Technologie vstřikování bylo využito v úvodu experimentální části diplomové práce k výrobě zkušebních těles. Této technologii bylo využito pro výrobu těles určených k výrobě recyklátu a následně také k výrobě zkušebních těles pro provedení mechanických zkoušek. PP není nasákový a z důvodu minimálního příjmu vlhkosti z okolí nebylo nutné materiál před naplněním do násypky zbavovat nízkomolekulárních látek.

7.1 Vstřikovací stroj

Pro výrobu zkušebních těles bylo využito vstřikovacího stroje firmy Arburg. Tato firma se zabývá výrobou a servisem nejen vstřikovacích strojů, ale také mnoha dalších strojů plastikářského průmyslu včetně velkého množství příslušenství. Zkušební vzorky byly konkrétně vyrobeny na vstřikovacím stroji, nesoucí označení Arburg Allrounder 470 H. Tento typ patří k hybridním vstřikovacím strojům, u kterých je využito hydraulické a také elektrické techniky. Díky tomu je schopný dosahovat vysokých výkonů a zkrácení výrobních cyklů. Použitý vstřikovací stroj je zobrazen na *Obr. 28*.



Obr. 28. Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 H

Stroje značky Arburg jsou známé pro svou vysokou adaptabilitu, kdy je možné provést velké množství úprav stroje a vyhovět tak co nejvíce požadavkům zákazníka. Uživatelské prostředí je velice přehledné a práce se strojem je pro obsluhu tedy velice vhodná skrze dotekový panel. Stroje jsou taktéž proslulé díky dlouhé a spolehlivé životnosti.

V Tab. 3. jsou vyobrazeny základní parametry vstřikovacího stroje, dle kterých lze stroj dostatečně identifikovat, a pro účel této práce jsou dostatečně vyhovující.

Tab. 3. Základní parametry vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 470 H

Technické údaje	
Vlastnost	Arburg Allrounder 470 H
Uzavírací síla:	1000 [kN]
Vzdálenost mezi vodícími sloupy:	470 x 470 [mm]
Průměr šneku:	40 [mm]

Pro výrobu kvalitních zkušebních vzorků je potřeba správně nastavit vstřikovací podmínky. Nesprávné zvolení procesních podmínek může vést k výrobě nekvalitních výstřiků, které by nám ovlivnily výsledky mechanických zkoušek. V Tab. 4. lze vidět nastavení procesních podmínek, které byly použity při výrobě zkušebních vzorků.

Tab. 4. Nastavení procesních podmínek

Procesní podmínky							
Teplota taveniny/trysky	240 °C						
Teplota formy	30 °C						
Vstřikovací tlak	70 MPa						
Vstřikovací rychlost	100 mm/s						
Doba chlazení	15 s						
Velikost dotlaku	60 MPa						
Doba dotlaku	20 s						
Dráha dávkování	25 mm						
Čas cyklu	42 s						
Teploty jednotlivých pásem	240 °C	235 °C	230 °C	225 °C	220 °C	215 °C	40 °C - vstup

Teplotu pod násypkou je třeba držet na nižších hodnotách, než je tomu tak u ostatních pásem. Teplota je zde nižší z toho důvodu, abychom zamezili natavování materiálu pod násypkou. To by způsobilo problémy s dopravou materiálu dále do pracovního prostoru válce a také možnou degradaci. Delší doba dotlaku je nastavena z důvodu minimalizace smrštění a možným vznikům propadlin na výrobcích.

7.2 Vstříkovaný výrobek

Výrobkem technologie vstříkování byly zkušební tělesa pro mechanické zkoušky. Konkrétně šlo o zkušební tělesa pro statickou zkoušku tahem a dynamickou zkoušku rázem v ohybu (zkouška vrubové houževnatosti). Na *Obr. 29.* můžeme vidět zkušební tělesa pro mechanické zkoušky včetně vtokového systému.



*Obr. 29. Zkušební tělesa pro mechanické zkoušky
včetně vtokového systému*

Z *Obr. 29.* je patrné, že vtokový systém tvoří velkou část výstříku. V *Tab. 5.* můžeme vidět hmotnosti a procentuální zastoupení částí výstříků.

Tab. 5. Procentuální zastoupení a hmotnosti částí výstříků

Číslo měření	Hmotnost		
	Výstřík [g]	Vtok [g]	Výrobek [g]
1.	23,32	10,21	13,11
2.	23,27	10,10	13,17
3.	23,28	10,15	13,12
4.	23,29	10,19	13,10
5.	23,30	10,20	13,09
6.	23,30	10,20	13,10
7.	23,38	10,27	13,11
8.	23,34	10,26	13,08
9.	23,32	10,23	13,08
10.	23,33	10,14	13,19
Aritmetický průměr	23,31	10,20	13,12
Směrodatná odchylka	0,03	0,05	0,03
Procentuální zastoupení [%]	100,00	43,74	56,26

Celková hmotnost výstřiku činí 23,31 gramů, z toho zkušební tělesa váží 13,12 gramů (56,26 %) a vtoková soustava 10,20 gramů (43,74%). Jde téměř o polovinu celkové hmotnosti a v sériové výrobě by docházelo k velkým ztrátám materiálu, což by se projevilo na ceně výrobku a nutnosti následné recyklace vtokových zbytků. Nicméně ne vždy lze u studeného vtokového systému řešit vtokovou soustavu jiným způsobem a vyšší procento ztrát materiálu na vtok je cenou za toto konstrukční řešení.

8 RECYKLACE VSTŘIKOVANÝCH VÝROBKŮ

Dalším bodem experimentální části této diplomové práce bylo zpracování vstřikovaných výrobků na recyklát. K recyklaci bylo použito nožového mlýnu a následně prosévačky pro roztřídění recyklátu dle velikosti částic.

8.1 Mletí vstřikovaných výrobků

Abychom mohli vstřikovat zkušební výrobky z recyklátu, muselo napřed proběhnout mletí vstřikovaných výrobků. Mletí výrobků bylo provedeno na nožovém mlýnu výrobce Maskin AB Rapid, který nese označení GK 2218. Nožový mlýn je možno vidět na *Obr. 30* a základní technické údaje stroje jsou zaznamenány v *Tab. 6*.



Obr. 30. Nožový mlýn Maskin AB Rapid

Tab. 6. Základní parametry nožového mlýnu Maskin AB Rapid

Technické údaje	
Vlastnost	Maskin AB Rapid GK 2218
Výkon:	3 [kW]
Hmotnost:	150 [kg]
Průměr děr v sítu:	4 [mm]

Síto nožového mlýnu se nachází pod pracovním prostorem, ve kterém se nachází dva rotující nože. Materiál vstupuje do nožového mlýnu násypkou a padá do pracovního prostoru. Zde dochází k rozrušení výrobků nárazy a stříhy mezi břity nožů. Jakmile je materiál podrcen na velikost menší, než je velikost děr v sítu, začne propadávat skrze síto do sběrné nádoby. V pracovním prostoru se zároveň nacházejí různé velikosti částic drti, některé zde setrvávají déle a stane se z nich takřka prach. Výstupním produktem je tedy polydisperzní drť. Na *Obr. 31.* a *Obr. 32.* můžeme vidět pracovní prostor nožového mlýnu a také síto samotné.



Obr. 31. Pracovní prostor nožového mlýnu



Obr. 32. Síto nožového mlýnu

Polydisperzní drť lze vidět na *Obr. 33*. Můžeme zde vidět různou velikost částic, od prachu až po velké částice, které vznikly mletím vstřikovaných výrobků.



Obr. 33. Nepřesetá polydisperzní drť

8.2 Prosévání

K vystříknutí zkušebních těles z recyklátu o dané velikosti částic bylo nutné polydisperzní drť přesít na prosévacím zařízení. K tomuto kroku bylo využito laboratorní prosévačky nesoucí označení AS 200 Basic, kterou lze vidět na *Obr. 34*.



Obr. 34. Prosévací stroj AS 200 Basic

V Tab. 7. jsou uvedeny základní parametry prosévacího stroje AS 200 Basic. Váha navážky činila 300 gramů, zvolená amplituda byla nastavena na 70 % a čas prosévání byl zvolen na 120 sekund.

Tab. 7. Základní parametry prosévacího stroje AS 200 Basic

Technické údaje	
Vlastnost	AS 200 Basic
Typ stroje:	vibrační; 3D efekt
Rozsah amplitudy:	0-3 [mm]
Rozměry Š x V x H:	400 x 230 x 350 [mm]

Součástí prosévacího zařízení jsou síta o velikostech děr 4 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm a miska na drť menší, než je 1 mm. Po sítové analýze bylo zjištěno, že na sítu o velikosti děr 4 mm a ve spodní misce se usazovalo nejméně drtě. Nicméně jí bylo dostatečné množství a mohli jsme z ní také vyrobit zkušební vzorky. U nejjemnější drtě docházelo k horší dopravě materiálu do plastikační jednotky. Na Obr. 35. můžeme vidět jedno ze sít.



Obr. 35. Síto prosévacího stroje



Obr. 36. Recyklát velikosti 5- 4 mm

Na *Obr. 36.* můžeme vidět recyklát o velikosti částic 5 - 4 mm. Téměř všechny částice jsou shodného tvaru s ostrými hranami. Drť byla větší než 4 mm, po přeměření se zjistilo, že částice nebyly větší než 5 mm.



Obr. 37. Recyklát velikosti 4-3 mm

Na *Obr. 37.* můžeme vidět recyklát o velikosti částic 4 - 3 mm. Částice jsou zde různých tvarů s ostrými hranami.



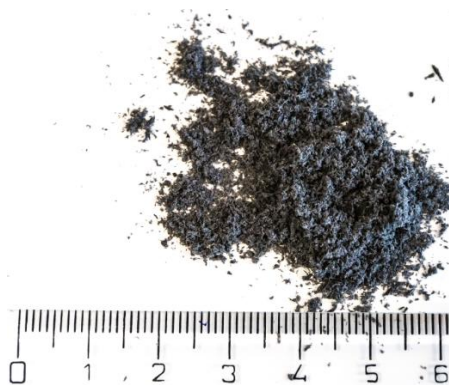
Obr. 38. Recyklát velikosti 3-2 mm

Na *Obr. 38.* můžeme vidět recyklát o velikosti částic 3 - 2 mm. Lze konstatovat, že částice mají téměř stejný tvar.



Obr. 39. Recyklát velikosti 2-1 mm

Na Obr. 39. můžeme vidět recyklát o velikosti částic 2 - 1 mm. Lze říci, že částice mají téměř stejný tvar s ostrými hranami.



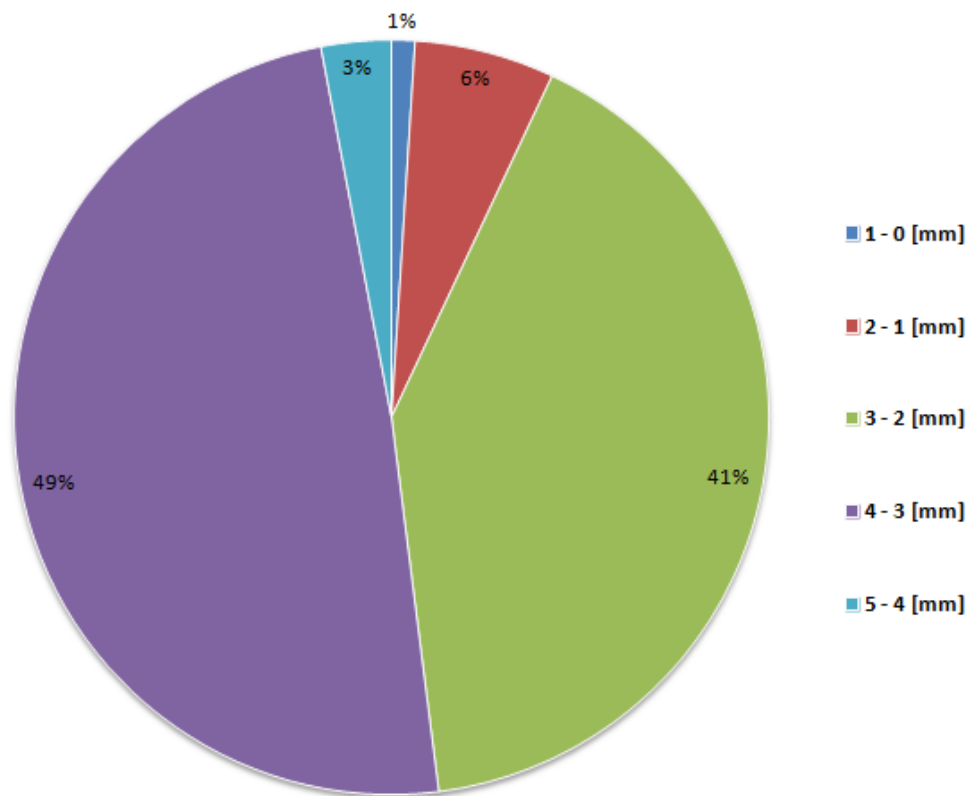
Obr. 40. Recyklát velikosti 1-0 mm

Na Obr. 40. lze vidět recyklát o nejmenší velikosti částic 1 - 0 mm. Lze říci, že částice jsou téměř prachového charakteru a mohou nastat problémy při dopravě recyklátu do plastikační jednotky. Díky malé velikosti částic jsou i skleněná vlákna velice krátká.

Tab. 8. Poměr hmotností různých velikostí částic recyklátu

Číslo měření:	1 - 0 [mm]	2 - 1 [mm]	3 - 2 [mm]	4 - 3 [mm]	5 - 4 [mm]
1.	3,40	25,70	156,90	106,60	7,40
2.	3,50	21,00	141,00	128,80	5,70
3.	1,90	19,70	123,10	147,40	7,90
4.	3,40	17,40	120,70	148,90	9,60
5.	2,30	17,10	116,50	155,80	8,30
6.	3,30	16,10	112,10	161,50	7,00
7.	2,60	14,50	114,80	158,50	9,60
8.	2,40	15,90	115,30	157,10	9,30
9.	1,80	15,20	119,40	154,20	9,40
10.	3,10	17,00	115,70	156,20	8,00
Aritmetický průměr	2,77	17,96	123,55	147,50	8,22
Směrodatná odchylka	0,65	3,36	14,26	17,07	1,29
Procentuální zastoupení	1%	6%	41%	49%	3%

V *Tab. 8.* můžeme vidět průměrnou hmotnost částic na sítích dle jejich velikosti a také jejich průměrné procentuální zastoupení. Celkem proběhlo deset měření navážek, kdy jedna navážka měla hmotnost 300 gramů. Z výsledků uvedených v tabulce vyplývá, že největší zastoupení má recyklát o velikosti částic 4 – 3 mm, o trochu menší zastoupení má recyklát s velikostí částic 3 – 2 mm. Zbylé velikosti recyklátu měly v navážkách poměrně malé zastoupení. Průměrné procentuální zastoupení částic můžeme vidět na *Obr. 41.*



Obr. 41. Průměrné procentuální zastoupení částic v navážce

9 VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES Z RECYKLÁTU

Dalším bodem experimentální části bylo vstřikování zkušebních těles z recyklátu, který byl síťovou analýzou roztríděn do několika frakcí dle velikosti částic. Zkušební vzorky měly stejný tvar jako ty v kapitole 7.2 a vstřikování také probíhalo na stejném vstřikovacím stroji.

Bylo vystříknuto celkem sedm typů zkušebních vzorků. První byly vstřikovány zkušební vzorky z originálního materiálu a následovně vzorky z recyklátu, v pořadí od větších částic recyklátu až po nejmenší. Při změně materiálu vzorků bylo nutno vyčistit násypku a vyprázdnit pracovní válec vstřikovacího stroje. Tím bylo docíleno smíchání různých frakcí recyklátu a následné ovlivnění naměřených výsledků.

Po vystříknutí byly výstřiky zbaveny vtokové soustavy pomocí nůžek, dostali jsme tak hotové zkušební vzorky pro mechanické zkoušky.

Typy zkušebních vzorků:

- 1) PP + 30 % skleněných vláken – originální materiál
- 2) PP + 30 % skleněných vláken – neprosetý recyklát
- 3) PP + 30 % skleněných vláken – recyklát s částice o velikosti 5 – 4 mm
- 4) PP + 30 % skleněných vláken – recyklát s částice o velikosti 4 – 3 mm
- 5) PP + 30 % skleněných vláken – recyklát s částice o velikosti 3 – 2 mm
- 6) PP + 30 % skleněných vláken – recyklát s částice o velikosti 2 – 1 mm
- 7) PP + 30 % skleněných vláken – recyklát s částice o velikosti 1 – 0 mm

10 MECHANICKÉ ZKOUŠKY PP + 30 % SKLENĚNÝCH VLÁKEN

Všechny typy zkušebních vzorků byly podrobeny mechanickým zkouškám, patřila zde statická zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu a zkouška tvrdosti Shore D.

10.1 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem probíhala na univerzálním zkušebním stroji značky Zwick 1456. Tento univerzální stroj může být využit i k provádění jiných druhů zkoušek, ke kterým patří například zkouška ohybová, případně tlaková. Dle druhu zkoušky se využívá konkrétních upínacích čelistí. Zkušební stroj Zwick 1456 disponuje také temperační komorou, díky které jsme schopni provádět zkoušky v rozmezí teplot od $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Stroj je schopen dosáhnout maximální posuvové rychlosti čelistí o hodnotě 800 mm/min .

Zkouška začíná přitisknutím ramen extenzometru ke zkušebnímu vzorku, které v průběhu zkoušky zaznamenávají změnu délky vzorku. Vzorek je v čelistech namáhán jednoosým napětím až do doby, kdy dojde k jeho přetržení. Okamžik přetržení značí konec tahové zkoušky. Stroj je propojen s počítačem, který díky softwaru zaznamenává průběh zkoušky. Univerzální zkušební stroj můžeme vidět na *Obr. 42.* a čelisti na *Obr. 43.*



Obr. 42. Zwick 1456



Obr. 43. Upínací čelisti s
extenzometry

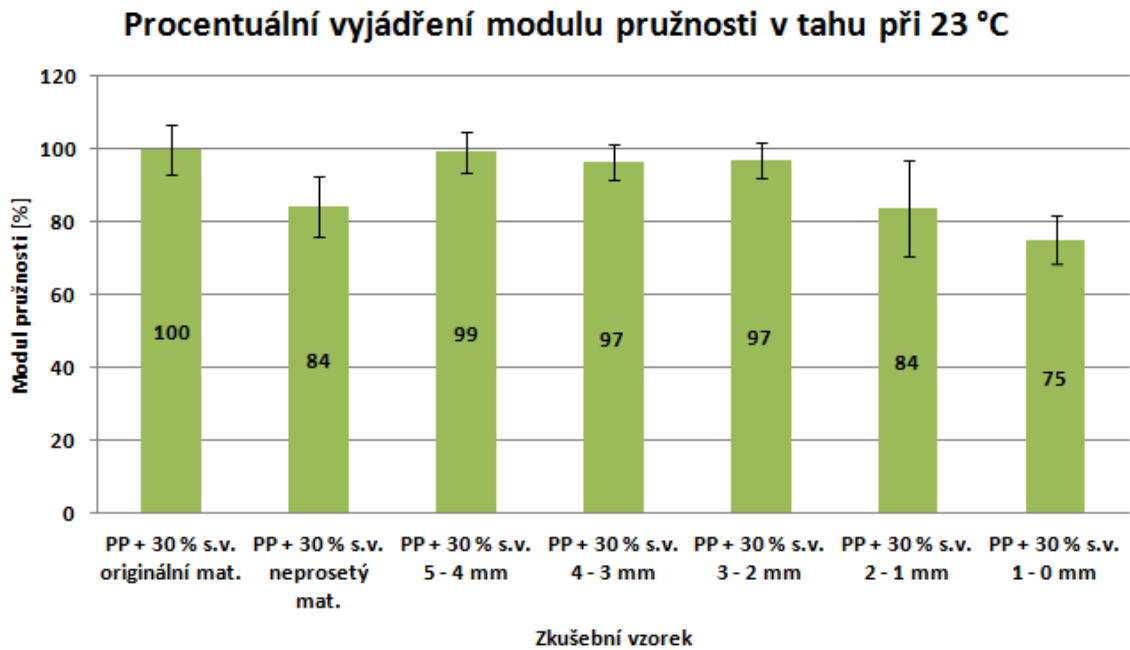
10.1.1 Modul pružnosti v tahu

Každé ze zkušebních těles dle druhu částic bylo podrobeno vždy deseti měření. Měření probíhalo za třech různých teplot, při pokojové teplotě 23 °C, při 60 °C a také při 100 °C. V Tab. 9. je zaznamenán aritmetický průměr a směrodatná odchylka, konkrétní naměřené hodnoty lze vidět v příloze na konci této diplomové práce.

Tab. 9. Modul pružnosti v tahu

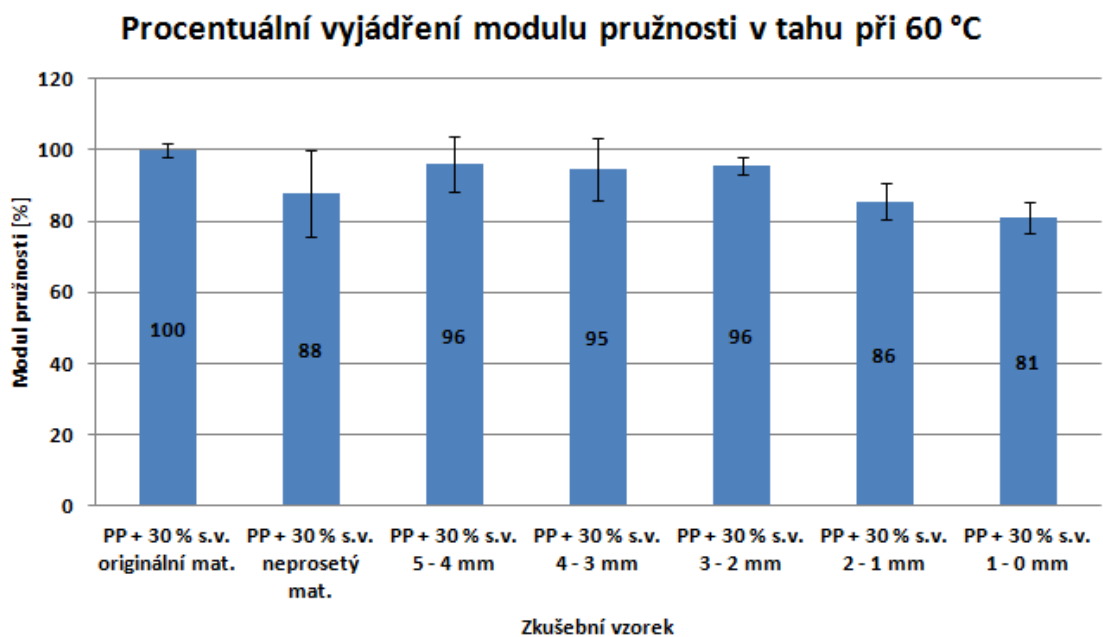
Materiály vzorků:	Modul pružnosti [MPa]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
23 °C							
Aritmetický průměr:	6532	5495	6488	6312	6324	5469	4907
Směrodatá odchylka:	443	453	368	305	307	729	323
60 °C							
Aritmetický průměr:	4648	4087	4471	4398	4442	3979	3776
Směrodatá odchylka:	89	491	341	392	115	197	167
100 °C							
Aritmetický průměr:	3262	2727	3001	2992	2906	2622	2386
Směrodatá odchylka:	175	324	270	193	240	172	294

V následujících grafech jsou zobrazeny výsledky měření při daných teplotách. Pro každou teplotu byl vytvořen jeden graf a následně také jeden graf společný. Ve společném grafu jsou hodnoty ponechány v jednotkách MPa. V jednotlivých grafech poté PP+30 % s.v. originální představuje 100 % a zbylé hodnoty se od něj odvíjí. Ohraničené čáry jsou chybovými úsečkami, které představují směrodatnou odchylku.



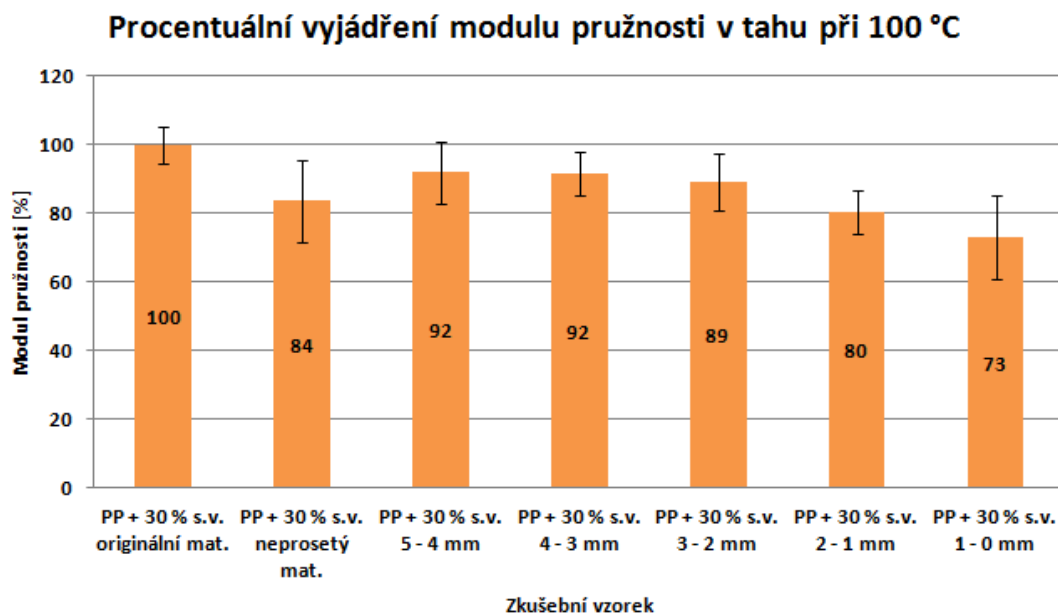
Obr. 44. Modul pružnosti při teplotě 23 °C

Na *Obr. 44.* můžeme vidět, že nejvyšší modul měl zkušební vzorek z originálního materiálu a pouze o 1 % nižší modul měl také vzorek z PP + 30 % s.v. 5 – 4 mm. O něco nižších hodnot dosáhly vzorky o velikosti částic 4 – 3 mm a také 3 – 2 mm. Stejných hodnot dosáhl vzorek o velikosti částic 2 – 1 mm a neprosetý materiál. Nejnižší hodnota byla naměřena u vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm, o 25 % nižší hodnota než u originálního materiálu.



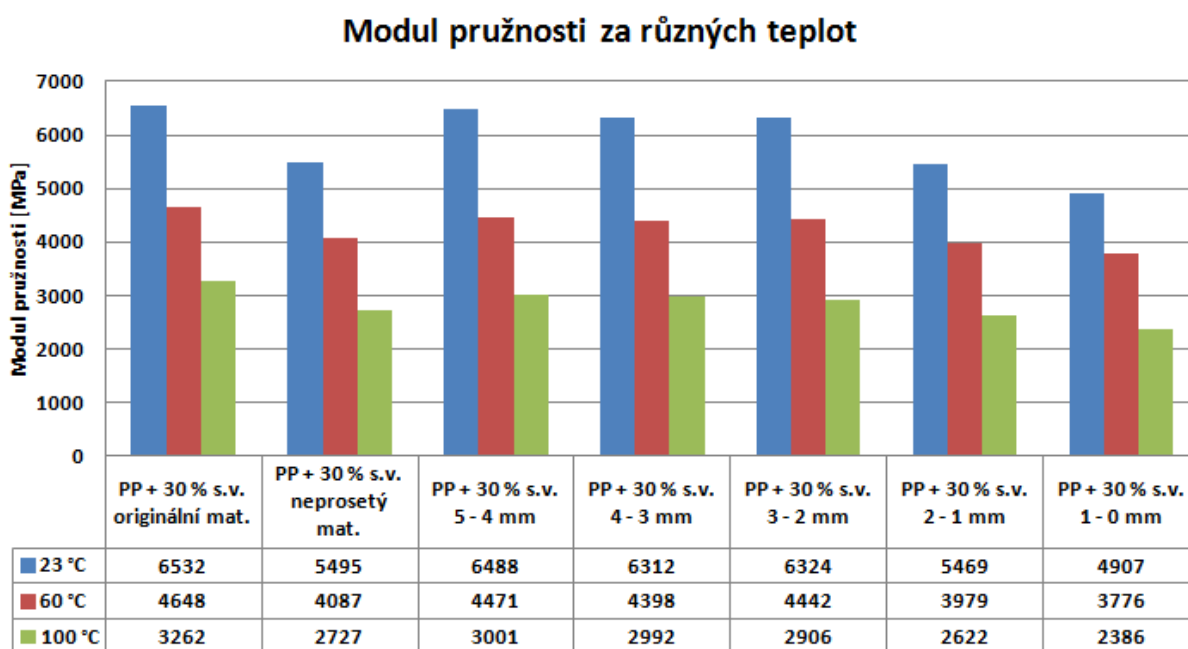
Obr. 45. Modul pružnosti při teplotě 60 °C

Na Obr. 45. můžeme vidět, že nejvyšší modul byl naměřen u originálního materiálu. Zkušební vzorky s velikostí částic 5 – 4 mm, 4 – 3 mm a 3 – 2 mm měly velice podobné hodnoty modulu, v porovnání s originálním materiálem byl jejich modul o 5 % nižší. O cca 15 % nižší hodnoty modulu byly naměřeny u vzorků s velikostí částic 2 – 1 mm a také u neprosetého materiálu. Nejnižší hodnota modulu pružnosti byla naměřena u zkušební vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm, byla téměř o 20 % nižší než u originálu.



Obr. 46. Modul pružnosti při teplotě 100 °C

Na Obr. 46. můžeme vidět, že nejvyšší hodnota modulu byla naměřena u zkušební vzorku z originálního materiálu. O cca 10% nižší hodnoty modulu byly naměřeny u zkušebních vzorků s velikostí částic 5 – 4 mm, 4 – 3 mm a 3 – 2 mm. O 16 % nižší hodnota modulu byla naměřena u vzorku neprosetého a o 20 % u vzorku s velikostí částic 2 – 1 mm. Nejnižší hodnota modulu byla naměřena u vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm, modul byl nižší o 27 % v porovnání s originálním materiálem.



Obr. 47. Modul pružnosti v tahu za různých teplot

Na Obr. 47. můžeme vidět moduly pružnosti v tahu při teplotách 23, 60 a 100 °C. Dle předpokladu bylo nejvyšších hodnot dosaženo u měření za teploty 23 °C. Naměřené hodnoty při teplotách 60 °C jsou přibližně o třetinu nižší v porovnání s měřením při 23 °C. Oproti tomu naměřené hodnoty při teplotě 100 °C už jsou cca o polovinu nižší než při teplotě 23 °C. U všech teplot bylo dosaženo nejvyšší hodnoty modulu pružnosti u vzorku z originálního materiálu a nejnižších hodnot u vzorků s velikostí částic 1 – 0 mm.

10.1.2 Mez pevnosti v tahu

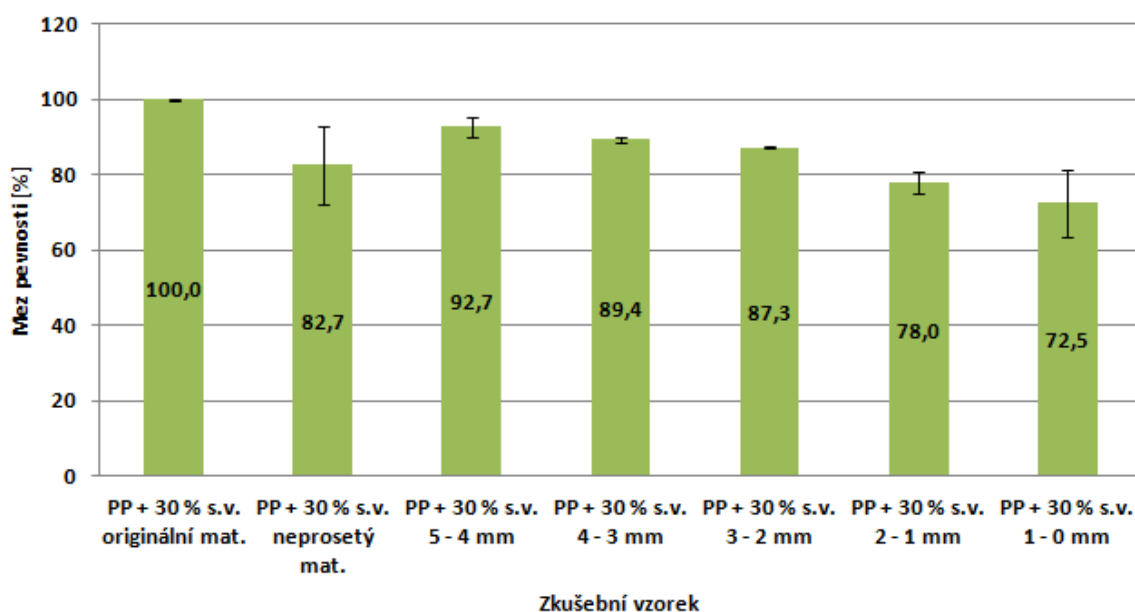
Každé ze zkušebních těles dle druhu částic bylo podrobeno vždy deseti měření. Měření probíhalo za třech různých teplot, při 23 °C, při 60 °C a také při 100 °C. V Tab. 10. je zaznamenán aritmetický průměr a směrodatná odchylka, konkrétní naměřené hodnoty lze vidět v příloze na konci této diplomové práce.

V následujících grafech jsou zobrazeny výsledky měření při konkrétních teplotách. Pro každou teplotu byl vytvořen jeden graf a následně také jeden graf společný. Ve společném grafu jsou hodnoty ponechány v jednotkách MPa. V jednotlivých grafech poté PP+30 % s.v. originální představuje 100 % a zbylé hodnoty se od něj odvíjí. Ohraničené čáry jsou chybovými úsečkami, které představují směrodatnou odchylku.

Tab. 10. Mez pevnosti v tahu

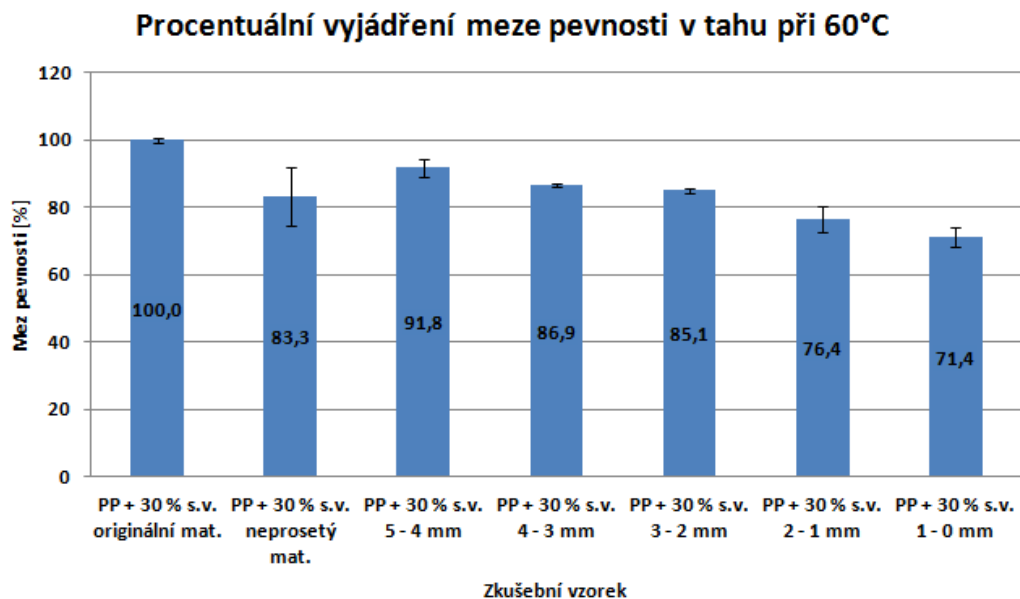
Materiály vzorků:	Mez pevnosti v tahu [MPa]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
23 °C							
Aritmetický průměr:	89,6	74,1	83,1	80,1	78,2	69,9	65,0
Směrodatá odchylka:	0,2	7,7	2,2	0,5	0,2	2,0	5,8
60 °C							
Aritmetický průměr:	59,1	49,2	54,2	51,3	50,3	45,1	42,2
Směrodatá odchylka:	0,4	4,3	1,3	0,2	0,4	1,7	1,2
100 °C							
Aritmetický průměr:	36,0	29,0	31,3	30,8	29,6	26,5	24,7
Směrodatá odchylka:	0,4	2,9	0,4	0,7	0,3	1,4	1,3

Procentuální vyjádření meze pevnosti v tahu při 23°C



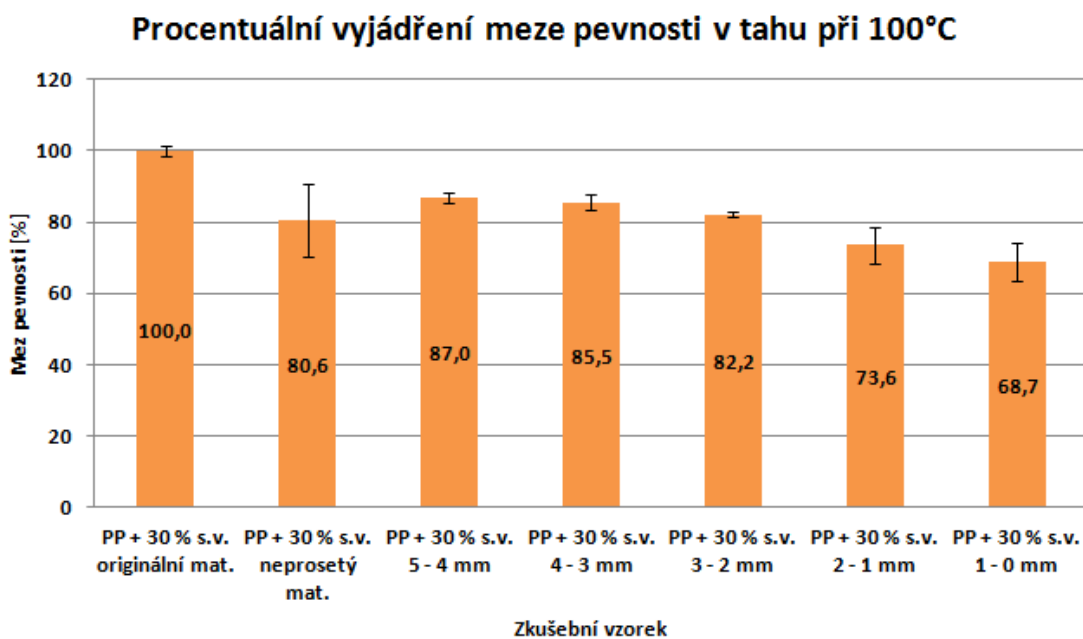
Obr. 48. Mez pevnosti v tahu při 23 °C

Na Obr. 48. můžeme vidět, že nejvyšší hodnota meze pevnosti byla naměřena u zkušební vzorku z originálního materiálu. O cca 10% nižší hodnoty meze pevnosti byly naměřeny u zkušebních vzorků s velikostí částic 5 – 4 mm, 4 – 3 mm a 3 – 2 mm. Přibližně o 20 % nižších hodnot bylo naměřeno u zkušebních vzorků s částicemi neprosetými a také u těch, s velikostí částic 2 – 1 mm. O 27,5 % nižší hodnota meze pevnosti v porovnání s originálním materiálem byla naměřena u zkušební vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm, to byla nejnižší naměřená hodnota meze pevnosti v tahu při teplotě 23 °C.



Obr. 49. Mez pevnosti v tahu při 60 °C

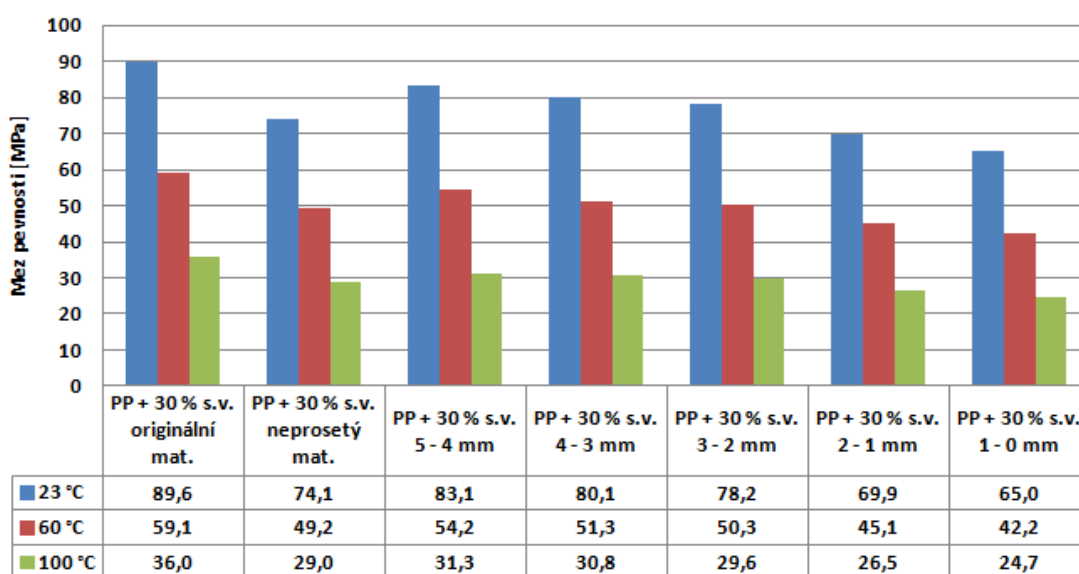
Na *Obr. 49.* můžeme vidět, že nejvyšší hodnota meze pevnosti byla naměřena u zkušební vzorku z originálního materiálu. O cca 8% nižší hodnota meze pevnosti byla naměřena u zkušebních vzorků s velikostí částic 5 – 4 mm. Přibližně o 15 % nižší hodnoty meze pevnosti byly naměřeny u vzorků s velikostí částic 4 – 3 mm, 3 – 2 mm a u vzorku s neprosetými částicemi. Zkušební vzorek s velikostí částic 2 – 1 mm měl o cca 15 % nižší hodnotu meze pevnosti než originál. Nejnižší hodnota meze pevnosti byla naměřena u zkušební vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm, byla přibližně o 20 % nižší než u originálu.



Obr. 50. Mez pevnosti v tahu při 100 °C

Na *Obr. 50.* můžeme vidět, že nejvyšší hodnota meze pevnosti byla naměřena u zkušební vzorku z originálního materiálu. O cca 15% nižší hodnoty meze pevnosti byly naměřeny u zkušebních vzorků s velikostí částic 5 – 4 mm a 4 – 3 mm. Přibližně o 20 % nižší hodnoty v porovnání s originálem byly naměřeny u vzorků s velikostí částic 3 – 2 mm a u vzorku s neprosetými částicemi. Vzorek s částicemi o velikosti 2 – 1 mm měl o cca 25 % nižší hodnotu meze pevnosti než originální materiál. Nejnižší hodnota meze pevnosti byla naměřena u vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm a byla přibližně o 31 % nižší než hodnota u originálního materiálu.

Mez pevnosti za různých teplot



Obr. 51. Mez pevnosti v tahu za různých teplot

Na *Obr. 51.* můžeme vidět meze pevnosti v tahu při různých teplotách. Dle předpokladu se potvrdilo, že nejvyšších hodnot bylo dosaženo u měření za teploty 23 °C. Naměřené hodnoty při teplotách 60 °C jsou přibližně o třetinu nižší v porovnání s měřením při teplotě 23 °C. Naměřené hodnoty při teplotě 100 °C jsou o více jak polovinu nižší než při teplotě 23 °C. U všech teplot bylo dosaženo nejvyšší hodnoty modulu pružnosti u vzorku z originálního materiálu. Nejnižších hodnot meze pevnosti v tahu bylo dosaženo u vzorků s velikostí částic 1 – 0 mm.

10.1.3 Prodloužení v tahu

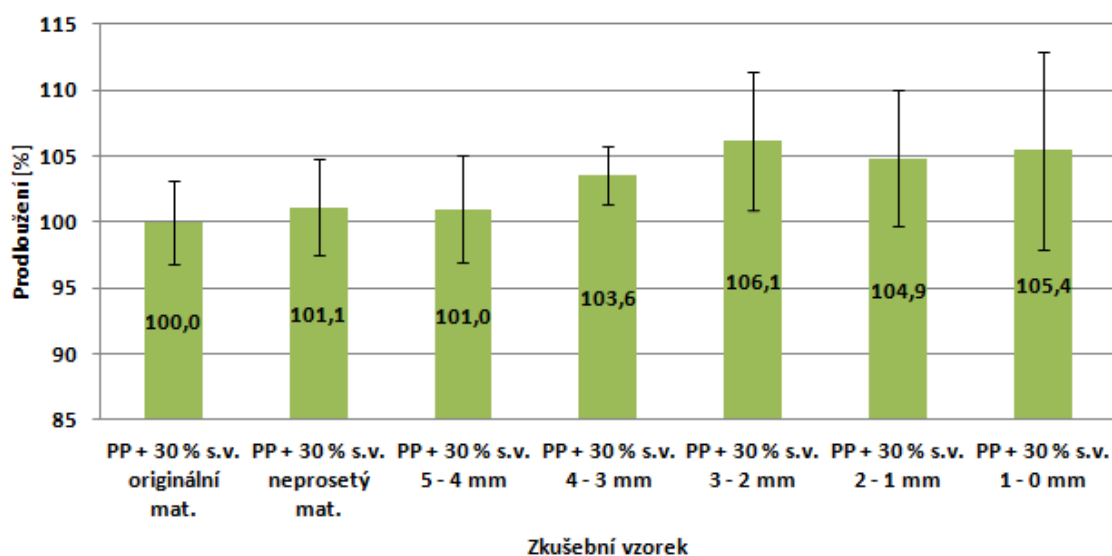
Každé ze zkušebních těles dle druhu částic bylo podrobeno vždy deseti měření. Měření probíhalo za třech různých teplot, při 23 °C, při 60 °C a také při 100 °C. V Tab. 11. je zaznamenán aritmetický průměr a směrodatná odchylka, konkrétní naměřené hodnoty lze vidět v příloze na konci této diplomové práce.

V následujících grafech jsou zobrazeny výsledky měření při daných teplotách. Pro každou teplotu byl vytvořen jeden graf a následně také jeden graf společný. Ve společném grafu jsou hodnoty ponechány v milimetrech. V jednotlivých grafech poté PP+30 % s.v. originální představuje 100 % a zbylé hodnoty se od něj odvíjí. Ohraničené čáry jsou chybovými úsečkami, které představují směrodatnou odchylku.

Tab. 11. Prodloužení v tahu

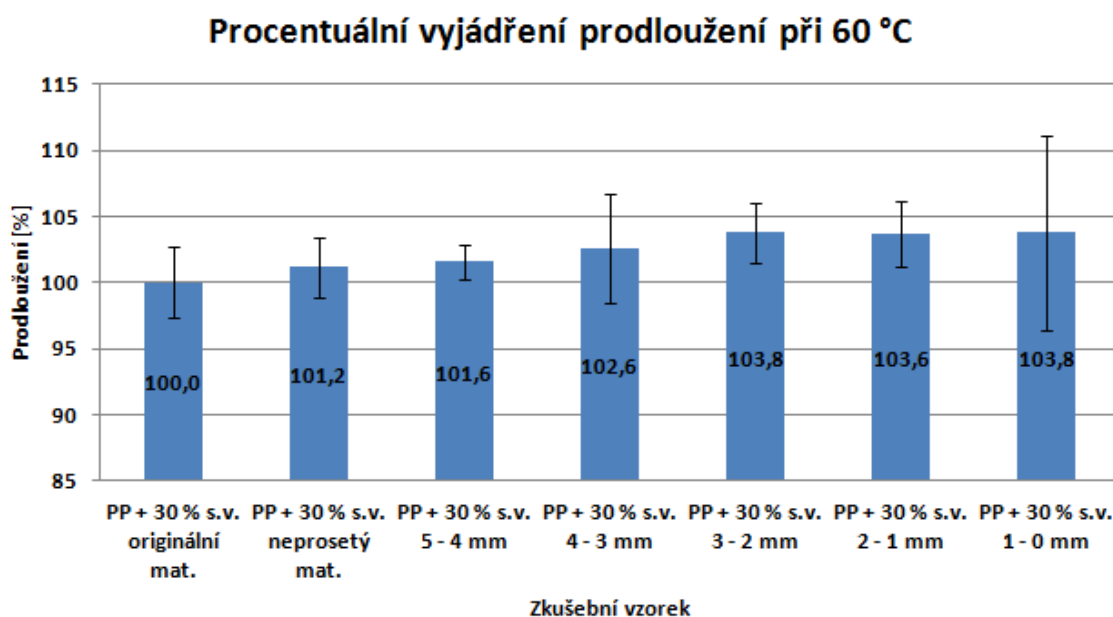
Materiály vzorků:	Prodloužení v tahu [mm]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
23 °C							
Aritmetický průměr:	7,0	7,1	7,1	7,3	7,4	7,3	7,4
Směrodatá odchylka:	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,6
60 °C							
Aritmetický průměr:	7,7	7,8	7,8	7,9	8,0	8,0	8,0
Směrodatá odchylka:	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,6
100 °C							
Aritmetický průměr:	9,3	9,6	9,6	9,6	9,8	9,7	9,9
Směrodatá odchylka:	0,3	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3

Procentuální vyjádření prodloužení při 23 °C



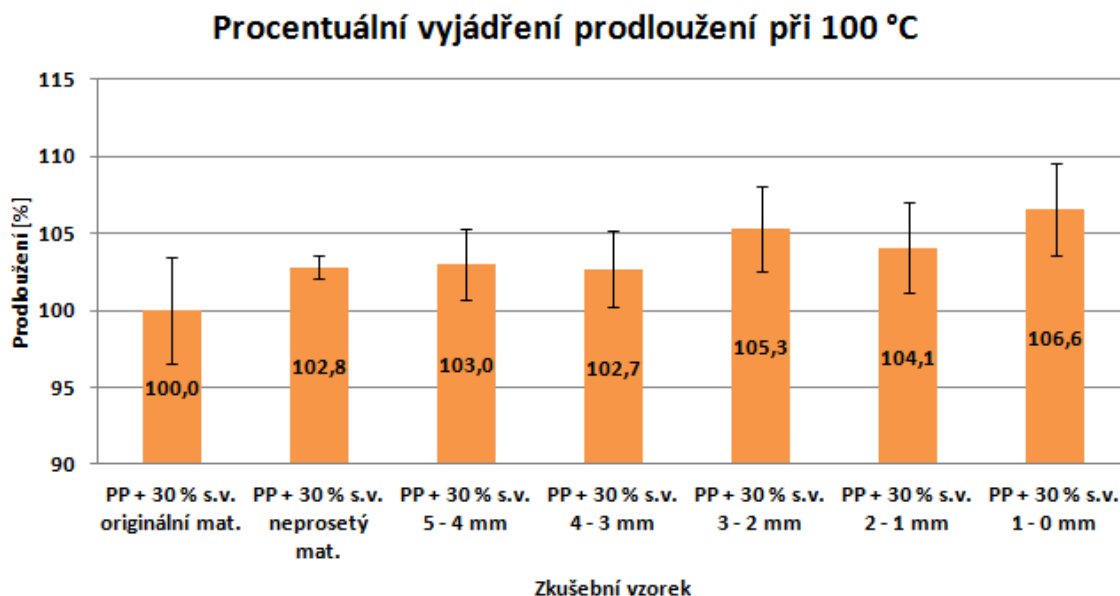
Obr. 52. Prodloužení při 23 °C

Na Obr. 52. můžeme vidět, že nejnižší hodnotu prodloužení měl zkušební vzorek s originálním materiálem. Téměř totožných a o 1 % vyšší hodnoty prodloužení dosáhly vzorky s velikostí částic 5 – 4 mm a vzorek s neprosetými částicemi. Zbylé zkušební vzorky měly o cca 5 % vyšší hodnoty prodloužení. Nejvyšší hodnotu prodloužení v porovnání s originálním materiálem dosáhl zkušební vzorek s velikostí částic 3 – 2 mm a tato hodnota byla o 6 % vyšší.



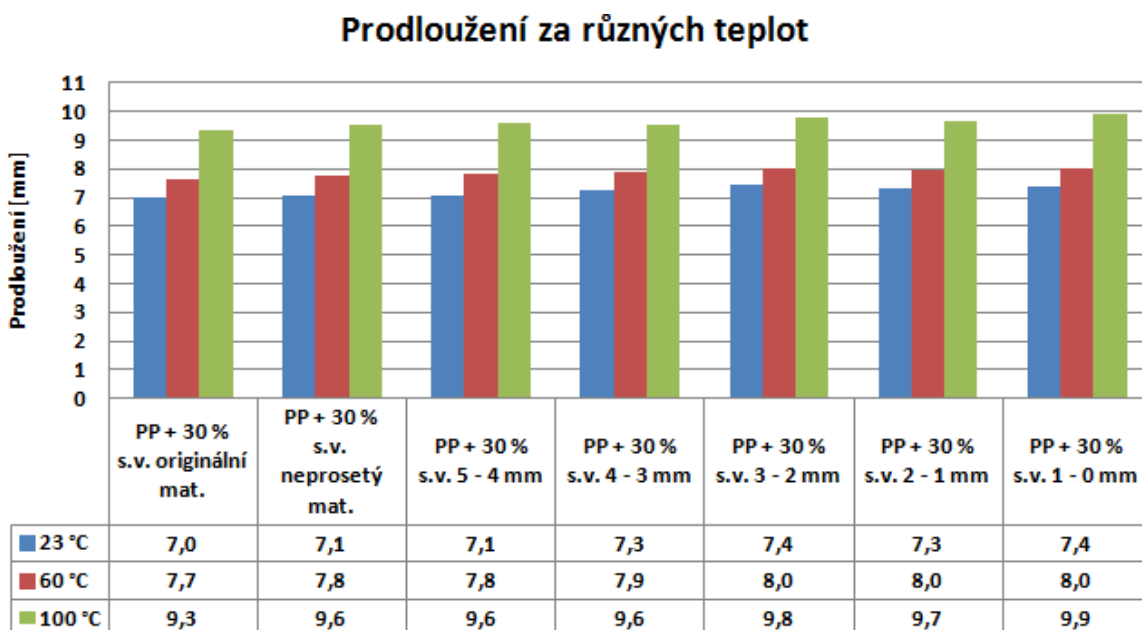
Obr. 53. Prodloužení při 60 °C

Na Obr. 53. můžeme vidět, že nejnižší hodnotu prodloužení měl zkušební vzorek s originálním materiálem. O 1 % vyšší hodnotu prodloužení dosáhl vzorek s neprosetými částicemi. Zkušební vzorky s velikostí částic 5 – 4 mm a 4 – 3 mm měly o cca 2 % vyšší hodnotu prodloužení než originální materiál. Zbylé zkušební vzorky měly přibližně o 4 % vyšší hodnoty prodloužení. Nejvyšší hodnoty prodloužení v porovnání s originálním materiálem dosáhly v tomto případě dva zkušební vzorky s velikostí částic 3 – 2 mm a 1 – 0 mm.



Obr. 54. Prodloužení při 100 °C

Na Obr. 54. můžeme vidět, že nejnižší hodnotu prodloužení měl zkušební vzorek s originálním materiálem. O přibližně 3 % vyšší hodnoty prodloužení dosáhly vzorky s neprosetými částicemi a s velikostí částic 5 – 4 mm a 4 – 3 mm. Zbylé zkušební vzorky měli přibližně o 5 % vyšší hodnoty prodloužení. Nejvyšší hodnoty prodloužení v porovnání s originálním materiálem dosáhl zkušební vzorek s velikostí částic 1 – 0 mm a to o téměř 7 %.



Obr. 55. Prodloužení za různých teplot

Na *Obr. 55.* můžeme vidět prodloužení v tahu při různých teplotách. Dle předpokladu se potvrdilo, že nejvyšších hodnot bylo dosaženo u měření za teploty 100 °C. Naměřené hodnoty při teplotách 60 °C jsou přibližně o pětinu nižší v porovnání s měřením při teplotě 100 °C. Naměřené hodnoty při teplotě 23 °C jsou přibližně o třetinu nižší než při teplotě 100 °C. U všech teplot bylo dosaženo nejvyšší hodnoty prodloužení u vzorků s velikostí částic 3 – 2 mm a 1 – 0 mm. Nejnižších hodnot prodloužení v tahu bylo dosaženo u vzorků s originálním materiálem.

10.2 Zkouška rázem v ohybu

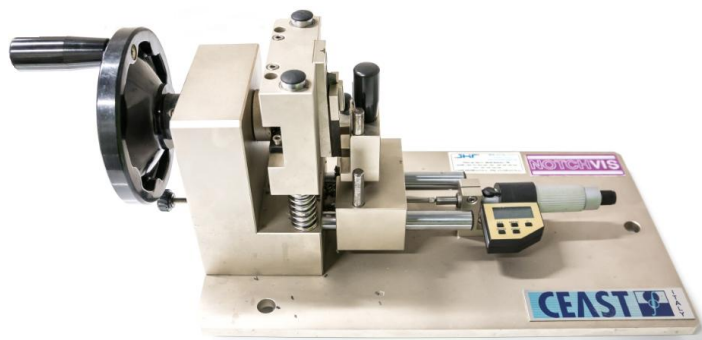
Zkouška rázem v ohybu, neboli zkouška vrubové houževnatosti byla provedena na zkušebním stroji zvaném Charpyho kladivo (Resil Impactor Junior), který byl vyroben italskou firmou Ceast. Na tomto stroji je možno měřit jak polymerní materiály, tak i materiály kompozitní. Naměřené hodnoty se díky senzorům skrze software ukládají do počítače a jsou zde také vyhodnoceny. Charpyho kladivo je zobrazeno na *Obr. 56.*



Obr. 56. Charpyho kladivo

Před provedením zkoušky bylo nutné na vzorcích vyrobít normalizované vruby o hloubce 2 mm. K vytvoření vrubu bylo použito stroje značky Ceast, který má ruční pohon. Rotací kliky byl vyvozen přímočarý vratný pohyb nože, do kterého byl postupně pomocí mikrometrického šroubu posouván zkušební vzorek.

Na Obr. 57. lze vidět přístroj na výrobu vrubů.



Obr. 57. Přístroj na výrobu vrubů

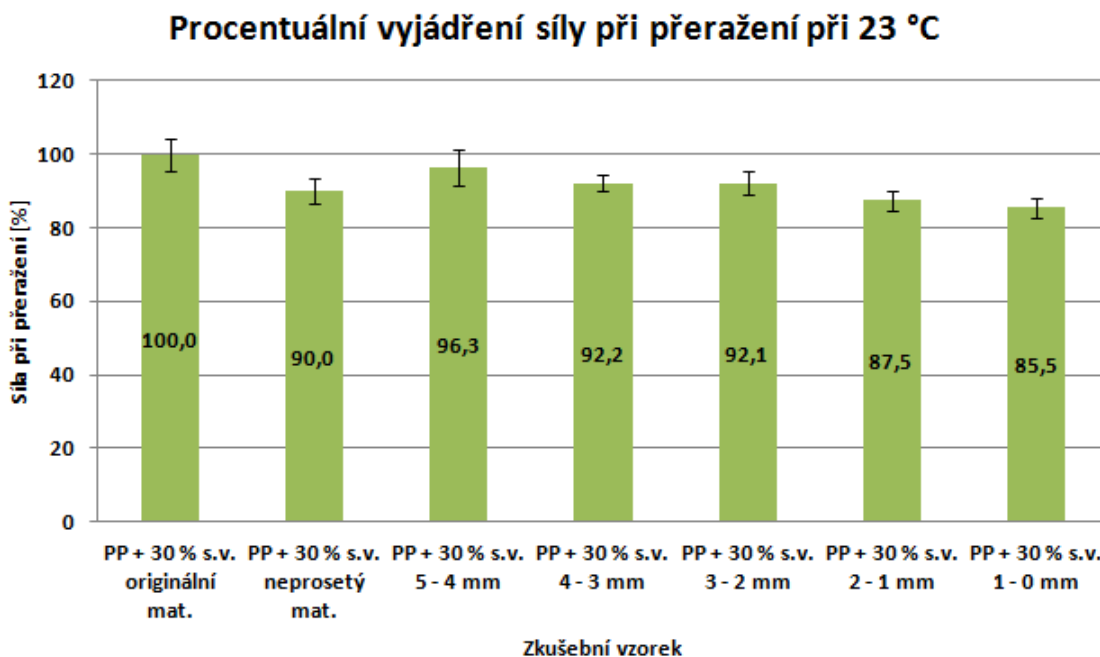
10.2.1 Vyhodnocení síly při přeražení

Zkušební tělesa dle druhu částic byla podrobena vždy deseti měření. Měření probíhalo při třech různých teplotách, při 23 °C, 60 °C a také při 100 °C. V Tab. 12. jsou zaznamenány hodnoty aritmetického průměru a směrodatné odchylky. Konkrétní naměřené hodnoty lze vidět v příloze na konci této diplomové práce.

V následujících grafech jsou zobrazeny výsledky měření při různých teplotách. Pro každou teplotu byl vytvořen jeden graf a poté také jeden graf společný. Ve společném grafu jsou hodnoty ponechány v newtonech. V jednotlivých grafech poté PP+30 % s.v. originální představuje 100 % a zbylé hodnoty se od něj odvíjejí. Ohraničené čáry jsou chybovými úsečkami, které představují směrodatnou odchylku.

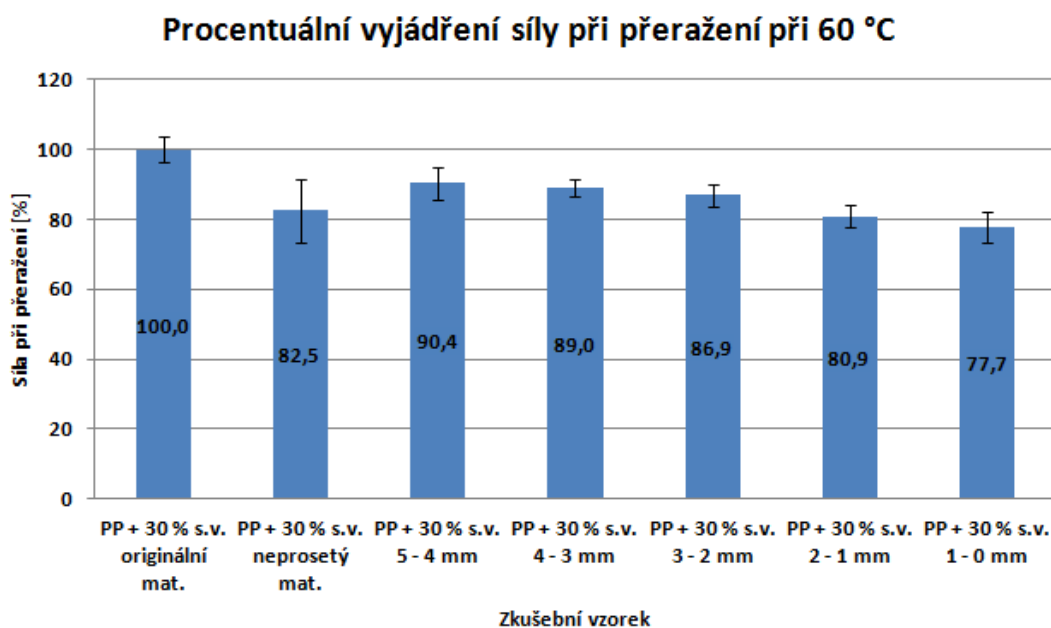
Tab. 12. Síly při přeražení

Materiály vzorků:	Síla při přeražení [N]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
	23 °C						
Aritmetický průměr:	528,9	476,2	509,4	487,7	487,1	462,8	452,4
Směrodatá odchylka:	23,5	15,5	25,2	11,4	15,8	12,6	12,1
	60 °C						
Aritmetický průměr:	472,4	389,9	427,2	420,5	410,6	382,3	366,9
Směrodatá odchylka:	16,8	35,7	19,5	10,4	12,6	11,9	15,8
	100 °C						
Aritmetický průměr:	387,5	350,7	375,5	358,9	355,9	329,8	301,6
Směrodatá odchylka:	13,2	9,7	13,1	7,1	10,3	22,8	18,4



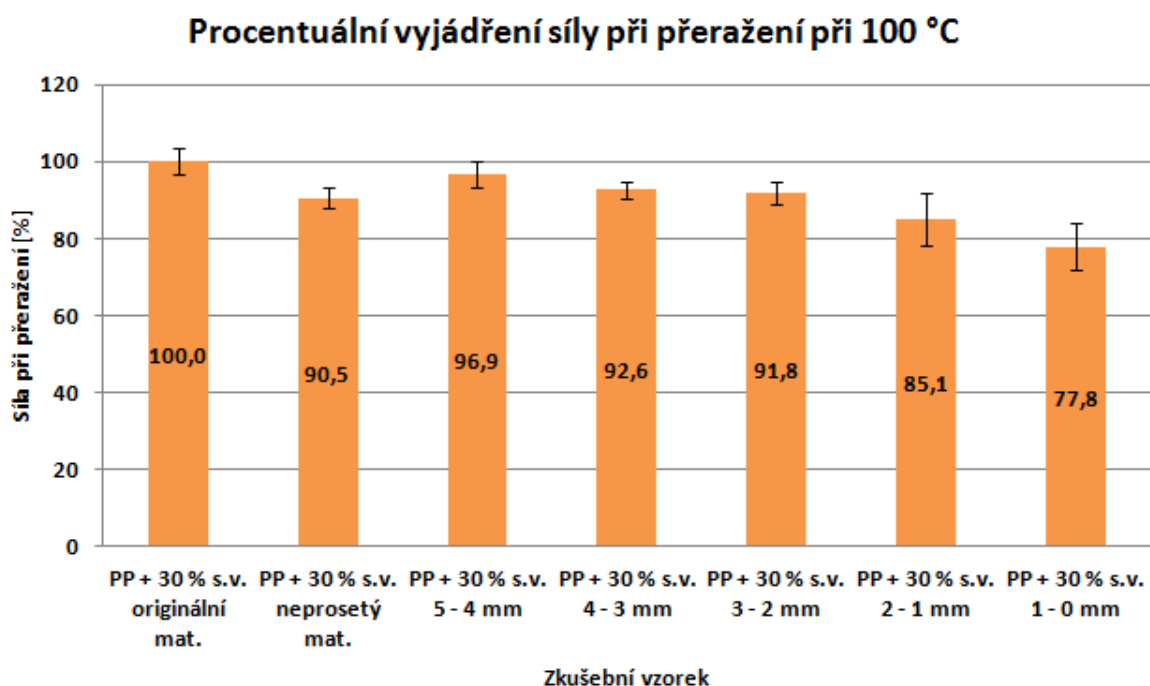
Obr. 58. Síla při přeražení při 23 °C

Na *Obr. 58.* můžeme vidět, že nejvyšší síla při přeražení je u zkušební vzorku z originálního materiálu. Druhá nejvyšší síla byla neměřena u zkušební vzorku s velikostí částic 5 – 4 mm, síla byla přibližně o 4 % nižší. Přibližně o 8 % nižší síla při přeražení byla naměřena u vzorků s velikostí částic 4 – 3 mm a 3 – 2 mm. O 10 % nižší síla při přeražení byla naměřena u vzorku z neprosetých částic. Nejnižší síly při přeražení byly naměřeny u vzorků s velikostí částic 1 - 0 mm a 2 - 1 mm, hodnoty byly přibližně o 15 % nižší v porovnání s originálním materiálem.



Obr. 59. Síla při přeražení při 60 °C

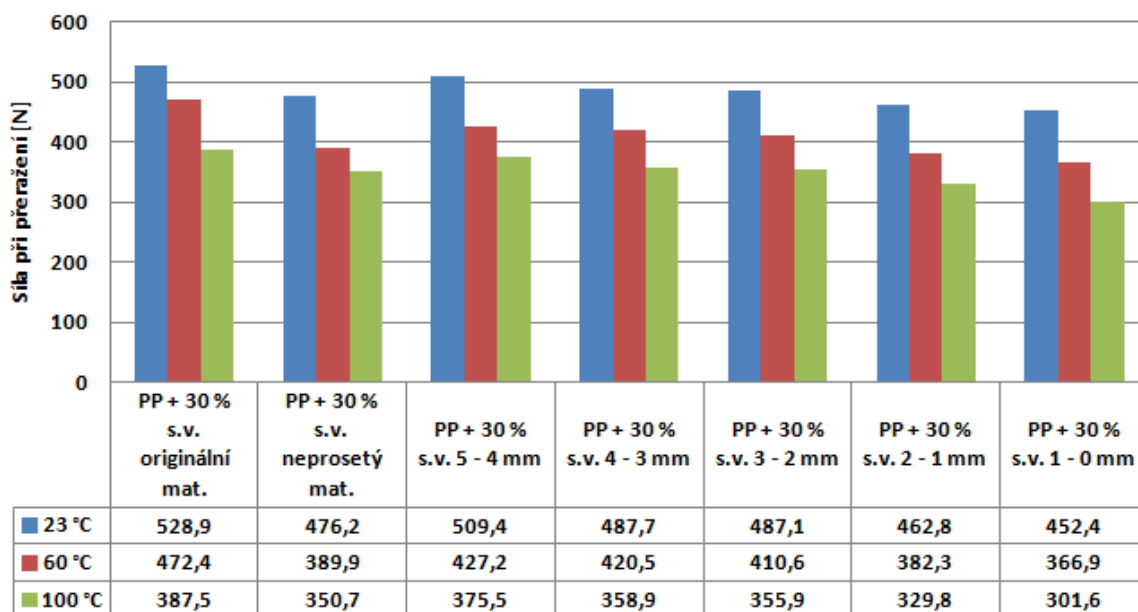
Na Obr. 59. lze vidět, že největší síla při přeražení byla naměřena u zkušební vzorku z originálního materiálu. Přibližně o 10 % nižší síla byla naměřena u těles s velikostí částic 5 – 4 mm a 4 – 3 mm. O 13 % nižší síla při přeražení v porovnání s originálním materiálem byla naměřena u vzorku s velikostí částic 3 – 2 mm. U vzorků z neprosetého materiálu a s velikostí částic 2 – 1 mm byla naměřena přibližně o 20 % nižší síla. Nejnižší síla při přeražení byla zjištěna u vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm.



Obr. 60. Síla při přeražení při 100 °C

Na Obr. 60. můžeme vidět, že největší síla při přeražení byla změřena u vzorku z originálního materiálu. Druhá nejvyšší síla při přeražení byla naměřena u vzorku s velikostí částic 5 – 4 mm, tato síla byla přibližně o 3 % nižší než u vzorku s originálním materiálem. Přibližně o 10 % nižší síly při přeražení byly naměřeny u vzorků z neprosetého materiálu, dále o velikosti částic 4 – 3 mm a 3 – 2 mm. K přeražení vzorku s velikostí částic 2 – 1 mm bylo potřeba o 15 % nižší síly. Nejnižší síla při přeražení byla u vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm a to o cca 22 %.

Síla při přeražení za různých teplot



Obr. 61. Síla při přeražení za různých teplot

Na Obr. 61. můžeme vidět naměřenou sílu při přeražení za různých teplot. Dle předpokladu se ukázalo, že nejvyšších hodnot síly bylo dosaženo u měření při teplotě 23 °C. Naměřené hodnoty při teplotách 60 °C jsou přibližně o pětinu nižší v porovnání s měřením při teplotě 23 °C. Naměřené hodnoty při teplotě 100 °C jsou přibližně o čtvrtinu nižší než při teplotě 23 °C. U všech teplot byla naměřena nejvyšší síla při přeražení u vzorku z originálního materiálu. Nejnižších hodnot síly při přeražení bylo dosaženo u vzorků s velikostí částic 1 – 0 mm.

10.2.2 Vyhodnocení vrubové houževnatosti

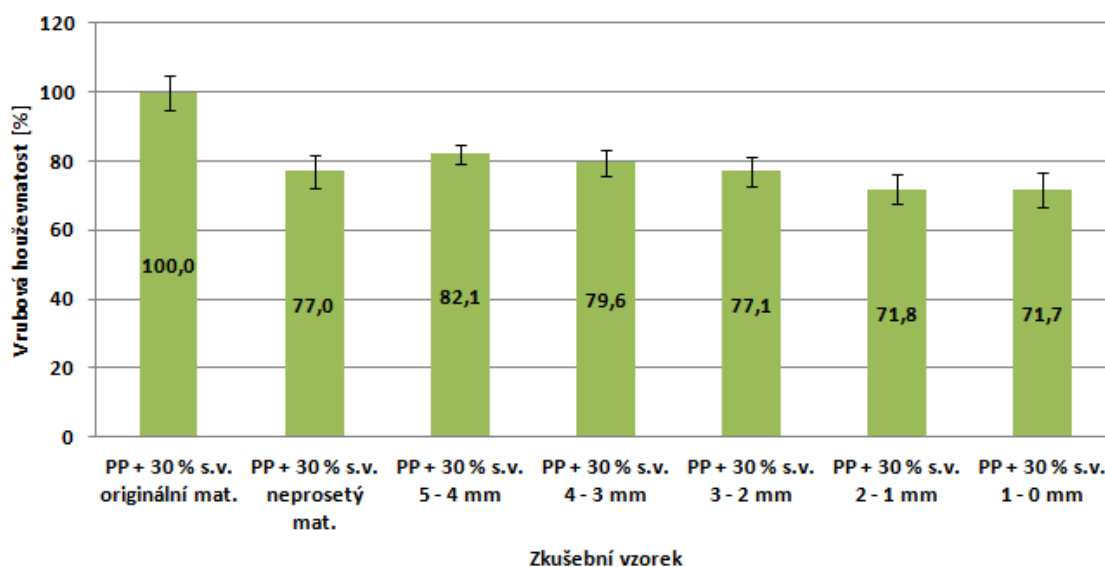
Každé zkušební těleso bylo podrobeno vždy deseti měření. Měření probíhalo při třech různých teplotách, při 23 °C, 60 °C a také při 100 °C. V Tab. 13. jsou zaznamenány hodnoty aritmetického průměru a směrodatné odchylky. Konkrétní naměřené hodnoty lze vidět v příloze na konci této diplomové práce.

V následujících grafech jsou zobrazeny výsledky měření při různých teplotách. Pro každou teplotu byl vytvořen jeden graf a poté také jeden graf společný. Ve společném grafu jsou hodnoty ponechány v originálních jednotkách. V jednotlivých grafech poté PP+30 % s.v. originální představuje 100 % a zbylé hodnoty se od něj odvíjejí. Ohraničené čáry jsou chybovými úsečkami, které představují směrodatnou odchylku.

Tab. 13. Vrubová houževnatost

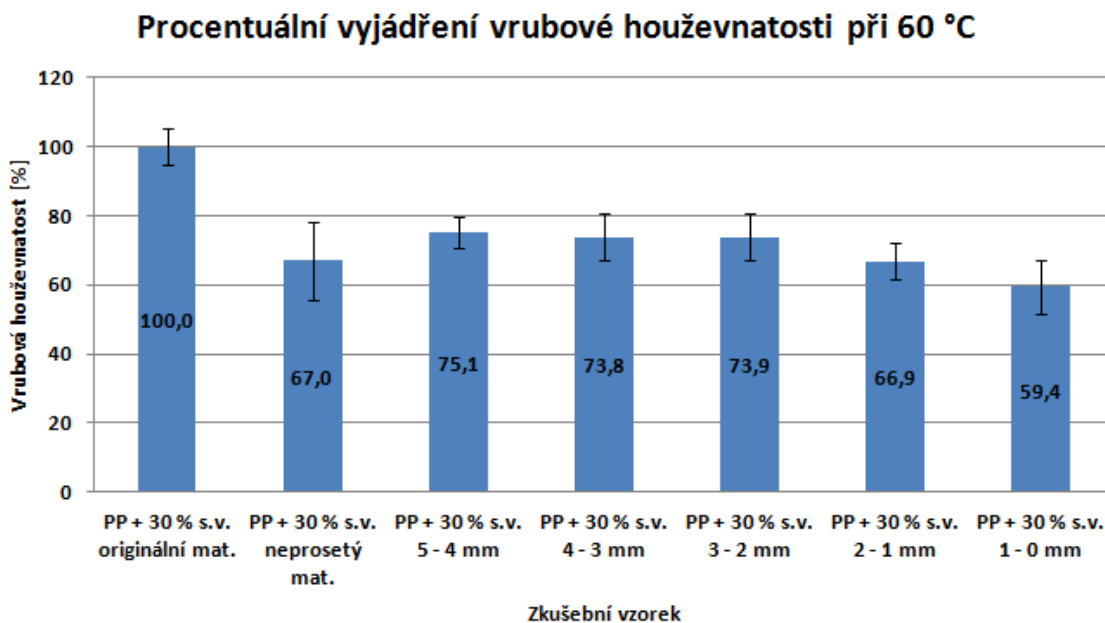
Materiály vzorků:	Vrubová houževnatost [kJ.m ⁻²]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
23 °C							
Aritmetický průměr:	6,8	5,2	5,6	5,4	5,2	4,9	4,9
Směrodatá odchylka:	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
60 °C							
Aritmetický průměr:	10,8	7,2	8,1	8,0	8,0	7,2	6,4
Směrodatá odchylka:	0,6	0,8	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5
100 °C							
Aritmetický průměr:	22,2	12,6	15,3	14,3	12,8	10,3	9,0
Směrodatá odchylka:	0,8	1,6	2,2	1,4	1,5	1,3	0,5

Procentuální vyjádření vrubové houževnatosti při 23 °C



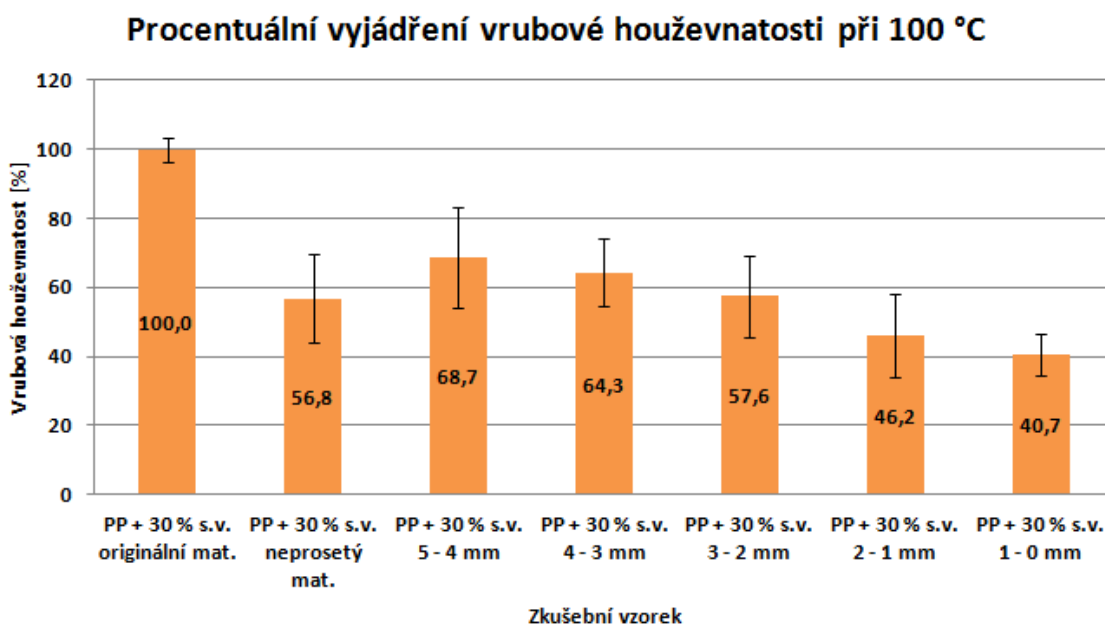
Obr. 62. Vrubová houževnatost při 23 °C

Na Obr. 62. můžeme vidět výsledné hodnoty měření vrubové houževnatosti při 23 °C. Nejvyšší hodnota vrubové houževnatosti byla naměřena u zkušebního tělesa z originálního materiálu. Přibližně o 20 % nižší vrubová houževnatost byla naměřena u vzorků s velikostí částic 5 – 4 mm a 4 – 3 mm. O 23 % nižší vrubová houževnatost byla naměřena u vzorků s velikostí částic 3 – 2 mm a s neprosetým materiálem. Téměř shodné a nejnižší hodnoty vrubové houževnatosti, která byla přibližně o 28 % nižší v porovnání s originálním materiálem, bylo dosaženo u vzorků s velikostí částic 2 – 1 mm a 1 – 0 mm.



Obr. 63. Vrubová houževnatost při 60 °C

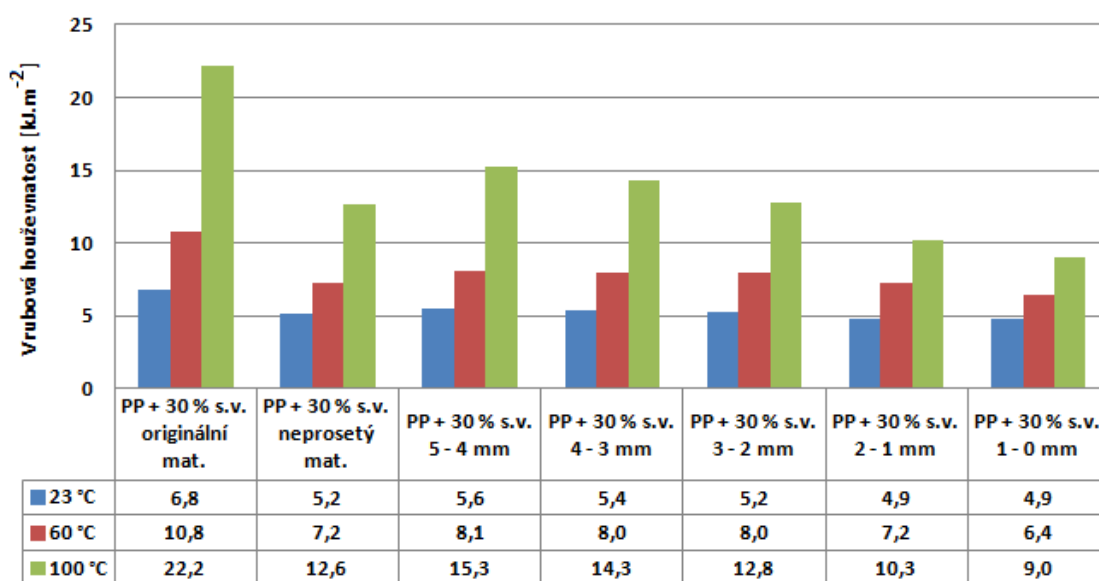
Na *Obr. 63.* můžeme vidět, že nejvyšší vrubová houževnatost byla naměřena u originálního zkušební vzorku. Přibližně o 25 % nižších hodnot bylo dosaženo u zkušebních vzorků s velikostí částic 5 – 4 mm, 4 – 3 mm a 3 – 2 mm. O 33 % nižší hodnoty vrubové houževnatosti byly naměřeny u vzorku s neprosetými částicemi a u vzorku s velikostí částic 2 – 1 mm. Nejnižší hodnota vrubové houževnatosti byla přibližně o 41 % nižší v porovnání s originálním materiálem, tato hodnota byla u tělesa s velikostí částic 1 – 0 mm.



Obr. 64. Vrubová houževnatost při 100 °C

Na *Obr. 64.* můžeme vidět, že nejvyšší vrubové houževnatosti bylo dosaženo u originálního zkušební vzorku. Přibližně o 31 % nižších hodnot bylo dosaženo u zkušebních vzorků s velikostí částic 5 – 4 mm. O 36 % nižší hodnota vrubové houževnatosti byla naměřena u vzorku s velikostí částic 4 – 3 mm. U vzorku z neprosetých částic a s velikostí částic 3 – 2 mm byla naměřena přibližně o 43 % menší vrubová houževnatost. Až o 54 % nižší vrubová houževnatost byla dosažena u vzorku s velikostí částic 2 – 1 mm. Nejnižší hodnoty bylo dosaženo u vzorku s částicemi 1 – 0 mm, byla nižší přibližně o celých 60 %.

Vrubová houževnatost za různých teplot



Obr. 65. Vrubová houževnatost za různých teplot

Na *Obr. 65.* vidíme výsledky vrubové houževnatosti za různých teplot. Dle předpokladu se potvrdilo, že nejvyšších hodnot vrubové houževnatosti bylo dosaženo u měření při teplotě 100 °C. S rostoucí teplotou totiž klesá křehkost. Naměřené hodnoty při teplotách 60 °C jsou přibližně o polovinu nižší v porovnání s měřením při teplotě 100 °C. Naměřené hodnoty při teplotě 23 °C jsou přibližně o třetinu nižší než při teplotě 100 °C. U všech teplot bylo dosaženo nejvyšší vrubové houževnatosti u vzorků z originálního materiálu. Nejnižších hodnot vrubové houževnatosti bylo dosaženo u vzorků s velikostí částic 1 – 0 mm.

10.3 Zkouška tvrdosti Shore D

Měření tvrdosti metodou Shore D probíhalo na tvrdoměru firmy Omag, konkrétně šlo o model ART 13. Tento tvrdoměr měl indentor tvaru kužele a jeho materiálem byla ocel. Měření tvrdosti probíhalo dle normy EN ISO 868. Měření tvrdosti metodou Shore D s využitím použitého tvrdoměru bylo poměrně rychlé a jednoduché.

Zkušební vzorek byl umístěn na stojan tvrdoměru pod indentor a následovalo stlačení páky, které zapříčinilo vniknutí indentoru do povrchu zkušebního tělesa. Po uplynutí doby působení indentoru na zkušební vzorek se na displeji vyhodnocovacího zařízení objevila hodnota tvrdosti Shore. Na *Obr. 66.* můžeme vidět tvrdoměr ART 13.



Obr. 66. Tvrdoměr ART 13

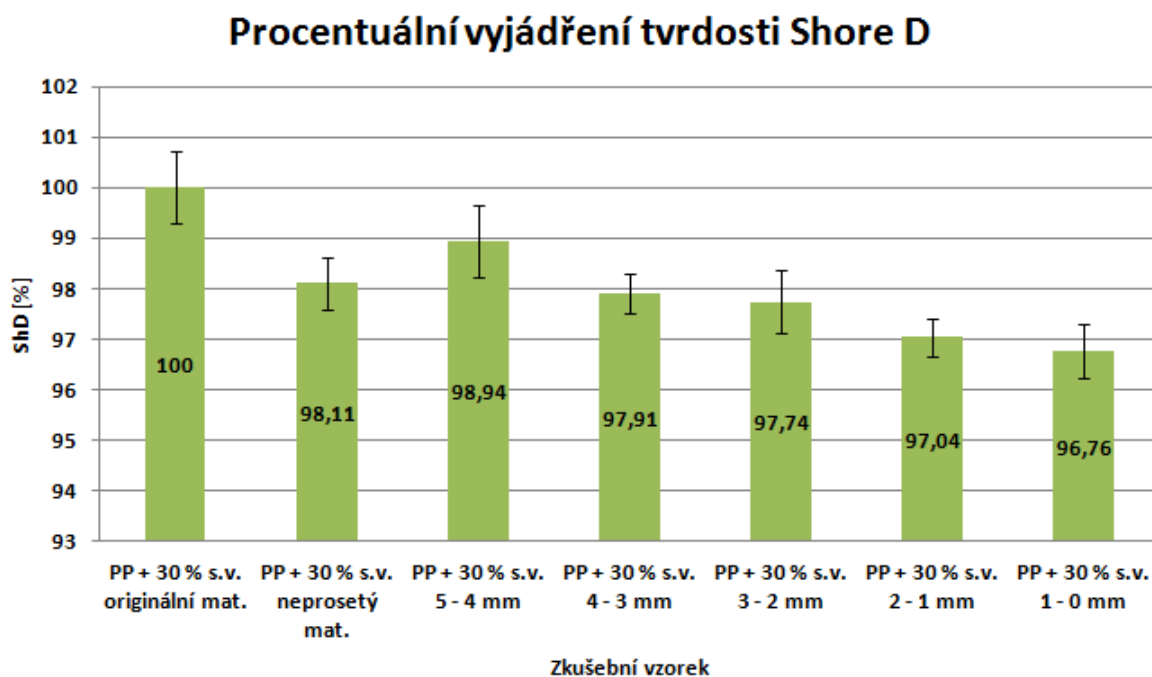
10.3.1 Vyhodnocení tvrdosti Shore D

Na zkušebních vzorcích proběhlo vždy deset měření. Měření probíhalo při pokojové teplotě 23 °C. V *Tab. 14.* jsou zaznamenány naměřené hodnoty, aritmetické průměry a směrodatné odchylky.

Tab. 14. Naměřené tvrdosti vzorků metodou Shore D

Číslo měření	Tvrdost Shore D [ShD]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	72,10	71,10	71,50	71,00	70,60	70,70	70,00
2.	72,50	71,30	72,60	71,20	70,90	70,50	70,50
3.	73,00	71,80	71,60	71,10	71,00	70,80	69,90
4.	73,70	70,90	72,40	71,40	70,90	70,80	70,40
5.	72,20	71,90	72,00	71,40	70,90	70,20	70,20
6.	72,90	71,20	72,30	70,50	71,20	70,40	70,20
7.	72,70	71,30	71,40	71,40	71,10	70,60	70,10
8.	71,90	70,70	70,90	70,80	71,20	70,10	71,20
9.	72,70	71,10	71,70	71,10	70,10	70,30	70,10
10.	72,40	71,10	72,00	71,00	71,80	70,20	70,00
Aritmetický průměr	72,61	71,24	71,84	71,09	70,97	70,46	70,26
Směrodatá odchylka	0,52	0,37	0,52	0,29	0,44	0,26	0,38

V následujícím grafu (Obr. 67.) jsou zobrazeny hodnoty tvrdosti Shore D v procentuálním vyjádření. PP + 30 % s. v. originální představuje 100 % a zbylé hodnoty se od této hodnoty odvíjí.



Obr. 67. Tvrdost Shore D

Z grafu lze vyčíst, že maximální a minimální hodnota tvrdosti se od sebe přibližně liší o 3,5 %. Nejvyšší tvrdost byla naměřena u PP + 30 % s.v. originálního, nejbližší hodnotu tvrdosti originálního materiálu měl recyklát o velikosti částic 5 – 4 mm. Naopak nejnižší tvrdost byla naměřena u recyklátu s velikostí částic 1 – 0 mm.

11 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Zkušební tělesa byla podrobena třem druhům mechanických zkoušek. Konkrétně šlo o zkoušky:

- Statická zkouška tahem.
- Zkouška rázem v ohybu.
- Zkouška tvrdosti Shore D.

U statické zkoušky tahem byly vyhodnocovány tři veličiny, modul pružnosti, mez pevnosti a prodloužení. Tyto veličiny byly vyhodnocovány za třech různých teplot, při 23 °C, 60 °C a také při 100 °C. Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti za všech teplot vždy dosáhl zkušební vzorek z originálního materiálu, dle předpokladu by měl mít nejlepší mechanické vlastnosti. Nejnížší hodnoty modulu pružnosti za všech teplot byly vždy naměřeny u zkušební vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm. Za teploty 23 °C byla nejnížší hodnota modulu pružnosti o 25 % nižší v porovnání s originálním materiálem. Při teplotě 60 °C byla nejnížší hodnota modulu o 19 % nižší a při 100 °C o 27 %. Při srovnání naměřených hodnot modulů pružnosti za všech použitých teplot se potvrdilo, že nejvyšších hodnot bylo dosaženo při teplotě 23 °C. Moduly pružnosti za teploty 60 °C byly přibližně o třetinu nižší v porovnání se získanými hodnotami za teploty 23 °C. Moduly pružnosti za teploty 100 °C byly přibližně o polovinu nižší v porovnání se získanými hodnotami za teploty 23 °C. Potvrdilo se tak, že s rostoucí teplotou hodnota modulu pružnosti klesá. Nejvyšší hodnoty meze pevnosti byly dosaženy za všech teplot u zkušební vzorku z originálního materiálu, protože dle předpokladu by měl mít zkušební vzorek z originálního materiálu nejlepší mechanické vlastnosti. Naopak nejnížších hodnot meze pevnosti za všech teplot bylo dosaženo u zkušební vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm. Při teplotě 23 °C byla nejnížší naměřená hodnota v porovnání s originálním materiálem přibližně o 27 % nižší. Za teploty 60 °C byla nejnížší hodnota přibližně o 29 % nižší a za teploty 100 °C přibližně o 31 %. Při porovnání naměřených hodnot meze pevnosti za všech použitých teplot se potvrdilo, že nejvyšších hodnot bylo dosaženo za teplot 23 °C. Za teploty 60 °C byly naměřené hodnoty přibližně o třetinu nižší v porovnání s hodnotami za teplot 23 °C. U teploty 100 °C byly naměřené hodnoty meze pevnosti přibližně o polovinu nižší, než u hodnot získaných při teplotě 23 °C. Potvrdilo se tak, že s rostoucí teplotou hodnota meze pevnosti klesá.

Nejvyšších hodnot prodloužení za všech teplot bylo dosaženo u zkušebních těles s velikostí částic 3 – 2 mm a 1 – 0 mm. Potvrdilo se tak, že vzorky z recyklátu o malé velikosti částic mají horší mechanické vlastnosti a tudíž i vyšší prodloužení. Naopak nejnižších hodnot prodloužení za všech teplot bylo vždy dosaženo u zkušebního vzorku z originálního materiálu. Nejvyšší hodnota prodloužení při teplotě 23 °C byla přibližně o 6 % vyšší, než vzorek z originálního materiálu. Při teplotě 60 °C byly hned dva vzorky s nejvyšší naměřenou hodnotou prodloužení a to přibližně o 4 % v porovnání s vzorkem z originálního materiálu. Za teploty 100 °C byla nejvyšší hodnota prodloužení přibližně o 7 % vyšší. Při porovnání prodloužení za všech teplot bylo dokázáno, že nejvyšších hodnot bylo dosaženo při 100 °C. Naměřené hodnoty za teplot 60 °C jsou přibližně o pětinu nižší v porovnání s měřením při teplotě 100 °C. Naměřené hodnoty za teplot 23 °C jsou přibližně o třetinu nižší v porovnání s měřením při teplotě 100 °C. Potvrdilo se tak, že s rostoucí teplotou hodnota prodloužení roste.

U zkoušky rázem v ohybu byly vyhodnocovány dvě veličiny, síla při přeražení a vrubová houževnatost. Tyto veličiny byly vyhodnocovány za třech různých teplot, při 23 °C, 60 °C a také při 100 °C. Nejvyšších hodnot síly při přetržení za všech teplot bylo dosaženo u vzorků z originálního materiálu. Potvrdil se tedy předpoklad, že originální materiál by měl mít nejvyšší mechanické vlastnosti. Naopak nejnižší hodnoty síly při přeražení za všech teploty byly vždy dosaženy u vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm. Nejnižší hodnota síly při přeražení za teploty 23 °C byla přibližně o 14 % nižší, než hodnota vzorku z originálního materiálu. Nejnižší hodnota síly při přeražení za teploty 60 °C byla přibližně o 22 % nižší, než hodnota zkušebního vzorku z originálního materiálu. Stejně tak tomu bylo i při měření za teploty 100 °C. Při porovnání síly při přeražení za všech teplot bylo dokázáno, že nejvyšších hodnot bylo dosaženo při 23 °C. Naměřené hodnoty při teplotách 60 °C jsou přibližně o pětinu nižší v porovnání s naměřenými hodnotami při teplotě 23 °C. Naměřené hodnoty při teplotě 100 °C jsou přibližně o čtvrtinu nižší v porovnání s naměřenými hodnotami při teplotě 23 °C. Potvrdilo se tak, že s rostoucí teplotou síla při přeražení klesá. Nejvyšších hodnot vrubové houževnatosti za všech teplot bylo dosaženo u vzorků z originálního materiálu. Potvrdilo se tak předpoklad, že vzorek z tohoto materiálu má nejlepší mechanické vlastnosti. Naopak nejnižších hodnot za všech teplot bylo vždy dosaženo u zkušebního vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm.

Nejnižší hodnota vrubové houževnatosti při teplotě 23 °C byla přibližně o 28 % nižší než u vzorku z originálního materiálu. U teploty 60 °C byla nejnižší naměřená hodnota přibližně o 41 % nižší, než u vzorku z originálního materiálu. Nejnižší hodnota vrubové houževnatosti při teplotě 100 °C byla přibližně o 59 % nižší, než u zkušební vzorku z originálního materiálu. Při porovnání vrubové houževnatosti za všech teplot bylo dokázáno, že nejvyšších hodnot bylo dosaženo při teplotě 100 °C. Naměřené hodnoty při 60 °C byly přibližně o polovinu nižší v porovnání s měřením při teplotě 100 °C. U naměřených hodnot při teplotě 23 °C byly výsledky přibližně o třetinu nižší v porovnání s měřením při teplotě 100 °C. Měřením se potvrdilo, že s rostoucí teplotou vzrůstá vrubová houževnatost. To znamená, že čím vyšší je teplota, tím nižší je křehkost a zkušební těleso tak klade větší odpor proti porušení.

U zkoušky tvrdosti Shore D byly vyhodnocována pouze jedna veličina a to tvrdost Shore D. Tato veličina byla měřena pouze za teploty 23 °C. Nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u zkušební vzorku z originálního materiálu. Naopak nejnižší hodnota tvrdosti byla naměřena u zkušební vzorku s velikostí částic 1 – 0 mm. Maximální a minimální hodnota tvrdosti se od sebe liší přibližně o 3,5 %. Měřením se potvrdilo, že zkušební vzorek z originálního materiálu kladl největší odpor proti vnikání indentoru, má tedy nejvyšší mechanické vlastnosti.

Po celkovém zhodnocení je možné konstatovat, že zkušební vzorek z originálního materiálu dosahoval nejlepších mechanických vlastností. Díky tomuto zhodnocení lze tedy s jistou pravděpodobností říci, že recyklát výsledné mechanické vlastnosti snižuje. Velkou měrou se na snížení vlastností projevil recyklát prachových rozměrů, u kterého skleněná vlákna nehrají téměř žádnou roli. K ještě většímu poklesu mechanických vlastností by došlo při opakované recyklaci materiálu. Také lze s jistou pravděpodobností tvrdit, že téměř u všech zkoušek měl zkušební vzorek s velikostí částic 1 – 0 mm nejnižší mechanické vlastnosti.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala vlivem velikosti částic recyklátu z polypropylenu obsahujícího 30 % skleněných vláken na výsledné mechanické vlastnosti výrobků. Teoretická část práce obsahovala celkem čtyři kapitoly, které se zabývaly polymery obecně a následně také konkrétně polymerem zkoumaným v praktické části. Dále teoretická část obsahovala seznámení se skleněnými vlákny, jejich vlastnostmi a vlivem na výsledné vlastnosti. Teoretická část také obsahovala seznámení s technologií vstřikování, nástrojem pro vstřikování a druhy vtokových systémů. V další části následovalo seznámení s problematikou recyklace plastů a konkrétními typy recyklací. Závěr teoretické části byl věnován zkouškám mechanických vlastností. Praktická část diplomové práce se zabývala měřením konkrétních mechanických vlastností na zkušebních vzorcích. Zkušební vzorky byly podrobeny statické zkoušce tahem, zkoušce rázem v ohybu a také zkoušce tvrdosti Shore D. Statická zkouška tahem a zkouška rázem v ohybu probíhala při teplotách 23 °C, 60 °C a 100 °C. Zkouška tvrdosti Shore D probíhala za teploty 23 °C. Pro měření mechanických vlastností bylo připraveno 7 druhů zkušebních vzorků. Šlo o vzorek z originálního materiálu, vzorek z neprosetého materiálu a vzorky s velikostí částic 5 – 4 mm, 4 – 3 mm, 3 – 2 mm, 2 – 1 mm a 1 – 0 mm.

Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí základních statistických veličin a sloupcových grafů. U každé teploty byl vytvořen graf s procentuálním vyjádřením naměřených veličin a následně také společný graf, který porovnával hodnoty za všech tří teplot. Zkušební vzorky z neprosetého materiálu, s velikostí částic 5 – 4 mm, 4 – 3 mm a 3 – 2 mm ještě nevykazují tak velký rozdíl v mechanických vlastnostech. U vzorků s velikostí částic 2 – 1 mm a 1 – 0 mm už byly ve většině případů rozdíly v mechanických vlastnostech a něco znatelnější. Nejnižší naměřené výsledky a tudíž i nejnižší mechanické vlastnosti byly naměřeny u zkušebních těles z recyklátu o velikosti částic 1 – 0 mm.

Měřením se potvrdilo, že použití recyklátu snižuje mechanické vlastnosti. Není tak vhodné jeho použití u konstrukčních dílů se zaručenými mechanickými vlastnostmi. U recyklátu z prachových částic navíc skleněná vlákna nemají téměř žádný vliv na výsledné vlastnosti. Na druhou stranu u dílů s nižšími nároky na použití by mělo být využití recyklátu samozřejmostí. Došlo by tak ke snížení nákladů na nákup materiálu a s ním spojenou výrobu nových polymerů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-708-0617-6.
- [2] *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit. 2015-10-30]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [3] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Liberec, 2014 [cit. 2015-10-30]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books//180/Impresum.html>
- [4] TZB-INFO. *Aliance proti nedostatku plastů se týká I. stavebních aplikací Zdroj: http://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/13329-aliance-proti-nedostatku-plastu-se-tyka-i-stavebnich-aplikaci* [online]. 2015 [cit. 2015-10-30]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/13329-aliance-proti-nedostatku-plastu-se-tyka-i-stavebnich-aplikaci>
- [5] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7
- [6] QIAO, Jinliang, Meifang GUO, Liangshi WANG, Dongbing LIU, Xiaofan ZHANG, Luqiang YU, Wenbo SONG a Yiqun LIU. Recent advances in polyolefin technology. *Polymer Chemistry* [online]. 2011, 2(8): 1611- [cit. 2015-10-30]. DOI: 10.1039/c0py00352b. ISSN 1759-9954. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c0py00352b>
- [7] Polyolefiny.pdf. *Chemistry UJEP* [online]. 2013 [cit. 2015-10-30]. Dostupné z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/PE%20a%20PP2013.pdf>
- [8] CHVÁTALOVÁ, Lenka. *CONTROLLING INNOVATIVE POLYOLEFIN PROPERTIES BY STRUCTURAL TRANSFORMATIONS* [online]. Zlín, 2011 [cit. 2015-10-30]. Dostupné z: <http://digilib.k.utb.cz//handle/10563/16363>. Doctoral Thesis. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Čermák Roman.
- [9] Polymer Basics. *University of Cambridge: DoITPoMS* [online]. 2015 [cit. 2015-10-30]. Dostupné z: <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/polymerbasics/questions.php>

- [10] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [11] *ECTA Handelsgesellschaft mbH: Výrobky ze skelného vlákna* [online]. 2009. [cit. 2015-10-22]. Dostupné z: <http://www.ecta-gmbh.com/czech/glasfaser.html>
- [12] NAVRÁTILOVÁ, Jana. Přísady do plastů. UTB ve Zlíně. [přednášky]
- [13] TRAUTMANN, Radoslav. 2011. *EFFECT OF COMPOSITION ON ADHESION STRENGTH BETWEEN PARTICLE FILLED COMPOSITE AND FIBER REINFORCED COMPOSITE* [online]. Brno [cit. 2015-10-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=34491. Dizertační práce. VUT BRNO. Vedoucí práce Josef Jančář.
- [14] KRAUSE-SAMMARTINO, L. E., Lucas, J. C., Reboredo, M. M., Aranguren M. I.: Maleic anhydride grafting of polypropylene: peroxide and solvent effect. *Plastic, Rubber and Composites*, 2006, vol. 35, no.3, pp. 117-123
- [15] THOMASON, J.L. The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 7. Interface strength and fibre strain in injection moulded long fibre PP at high fibre content. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2007, 38(1): 210-216 [cit. 2015-10-22]. DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.01.007. ISSN 1359835x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X06000261>
- [16] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů: vstřikování termoplastů*. 2. opr. vyd. Brno: Uniplast, 1999, 133 s.
- [17] *Vstřikování plastů* [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [18] MAŇAS, Miroslav a Jiří VLČEK. *Aplikovaná reologie*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001, 144 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-731-8039-1.
- [19] STANĚK, Michal. *Modelování procesu tváření polymerů, včetně technologického řešení nástrojů: Modelling of polymers forming process inc. tools design : zkrácená verze Ph.D. Thesis* [online]. [Brno: VUTIUM], c2005, 27 s. [cit. 2015-10-28]. ISBN 80-214-3025-7.

- [20] BOBEK, Jiří. *Vstříkovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. 2015 [cit. 2015-10-30]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/02.html#2-1-3>
- [21] *Vstříkovací formy: Vtokový systém* [online]. [cit. 2015-10-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/htn__tvareci_nastroje_vstrikovaci_formy__zak.pdf
- [22] *Think hot runners for injection molding tricky medical parts: Manifolds for plastic melt* [online]. 2008 [cit. 2015-10-30]. Dostupné z: <http://medicaldesign.com/archive/think-hot-runners-injection-molding-tricky-medical-parts>
- [23] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
- [24] KUDLÁČEK, Ivan. *Ekologie průmyslu*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 170, [18] s. ISBN 80-010-2495-4.
- [25] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 1999, 203 s. ISBN 80-708-0367-3.
- [26] MAŇAS, Miroslav, Michal STANĚK a David MAŇAS. *Výrobní stroje a zařízení*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 264 s. ISBN 978-80-7318-596-1.
- [27] *Nauka o materiálu: STRUKTURA A VLASTNOSTI MATERIÁLU A JEJICH ZKOUŠENÍ. ČVÚT* [online]. [cit. 2015-11-06]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3_2__struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf
- [28] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2001, xi, 505 s. ISBN 80-720-4193-2.
- [29] RYBNÍKÁŘ, F., et al. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 418 s.
- [30] *ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ.ATEAM* [online]. [cit. 2015-11-06]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/zkousky_mat.pdf

- [31] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007, 266 s. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [32] STATICKÉ ZKOUŠKY KRÁTKODOBÉ: Tahové zkoušky. *Ústav fyziky a materiálového inženýrství* [online]. 2011 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [33] ČSN EN ISO 527-1 64 0604. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 1: Obecné principy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [34] SCHÄTZ, Miroslav a Petr VONDRÁČEK. *Zkoušení polymerů*. 2., přepr. a dopl. vyd. Praha: VŠCHT, 1988, 276 s.
- [35] PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1989, 549 s.
- [36] Zkoušky mechanických vlastností materiálů: ZKOUŠKY TVRDOSTI. *Učíme v prostoru* [online]. [cit. 2015-11-09]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2076
- [37] PLUHAŘ, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály*. 3., nezměn. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981, 562 s.
- [38] ČSN EN ISO 868. *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtláčováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 12 s

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	[%]	Tažnost.
aPP	[-]	Ataktický polypropylen.
ČSN	[-]	Česká státní norma.
E	[MPa]	Mez elasticity.
E	[MPa]	Mez pevnosti v tahu.
EN	[-]	Evropská norma.
F _e	[N]	Síla na mezi kluzu.
F _m	[N]	Maximální zatěžující síla.
F _o	[N]	Zatěžující síla.
G	[N]	Tíhová síla.
GF	[-]	Skleněné vlákno.
HBW	[-]	Tvrdost podle Brinella.
HDPE	[-]	Vysoko-hustotní polyethylen.
HR	[-]	Tvrdost podle Rockwella.
HSh	[-]	Tvrdost podle Shoreho.
HVS	[-]	Horké vtokové systémy.
h	[mm]	Hloubka vtisku.
h ₁	[m]	Počáteční výška kladiva.
h ₂	[m]	Konečná výška kladiva.
ISO	[-]	Mezinárodní norma.
iPP	[-]	Isotaktický polypropylen.
K	[MPa]	Mez kluzu v tahu.
K	[J]	Spotřebovaná práce.
KCU	[J.cm ⁻²]	Vrubová houževnatost u vrubu tvaru „U„.

KCV	[J.cm ⁻²]	Vrubová houževnatost u vrubu tvaru „V„.
KU (KV)	[J]	Spotřebovaná nárazová práce.
LDPE	[-]	Nízko-hustotní polyetylen.
LGF	[-]	Dlouhé skleněné vlákno.
LLDPE	[-]	Lineární nízko-hustotní polyetylen.
L _o	[mm]	Počáteční délka.
L _u	[mm]	Konečná délka.
N	[-]	Číslo charakterizující stupnici.
P	[MPa]	Mez pevnosti v tahu.
PC	[-]	Polykarbonát.
PMMA	[-]	Polymethylmethakrylát.
PP	[-]	Polypropylen.
PS	[-]	Polystyren.
R	[MPa]	Smluvní napětí.
R _e	[MPa]	Pevnost v kluzu.
R _m	[MPa]	Pevnost v tahu.
R _{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu.
S	[MPa]	Napětí při přetržení.
S	[-]	Jednotková stupnice.
SGF	[-]	Krátká skleněná vlákna.
S _o	[mm ²]	Počáteční průřez tyče.
S _o	[cm]	Plocha průřezu tyče v místě vrubu.
S _u	[mm ²]	Nejmenší průřez.
SVS	[-]	Studený vtokový systém.
sPP	[-]	Syndiotaktický polypropylen.

T_f	[°C]	Teplota tečení.
T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu.
T_m	[°C]	Teplota tání.
U	[MPa]	Mez úměrnosti.
U	[-]	Vrub tvaru „U„.
V	[-]	Vrub tvaru „V„.
Z	[%]	Kontrakce.
ΔL	[mm]	Celkové prodloužení.
ε	[-]	Poměrné prodloužení.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [1]</i>	13
<i>Obr. 2. Molekulární struktura polymerů [3].....</i>	15
<i>Obr. 3. Charakteristická závislost modulu pružnosti E_t a celkové tažnosti $\varepsilon_{b,tb}$, resp. poměrného prodloužení při přetržení na teplotě u amorfního a semikrystalického termoplastu [3].....</i>	17
<i>Obr. 4. Schéma nadmolekulární struktury polymerů a) amorfni; b) semikrystalické [3]</i>	18
<i>Obr. 5. Rozdělení polymerů dle aplikace [3]</i>	18
<i>Obr. 6. Základní jednotka polypropylenu [7]</i>	20
<i>Obr. 7. Molekulární struktura polypropylenu [9].....</i>	21
<i>Obr. 8. Struktura skleněného vlákna (snímek pořízen rastrovacím elektronovým mikroskopem) [10].....</i>	22
<i>Obr. 9. Vliv obsahu skelných vláken na vlastnosti kompozitu [15]</i>	23
<i>Obr. 10. Vstřikovací cyklus v závislosti na tlaku vstřikovacího stroje [16].....</i>	26
<i>Obr. 11. Uzavřená dvoudesková vstřikovací forma.....</i>	27
<i>Obr. 12. Vtokový systém formy [16]</i>	30
<i>Obr. 13. Konstrukce vstřikovací formy s HVS [22]</i>	31
<i>Obr. 14. Recyklační cyklus [23].....</i>	33
<i>Obr. 15. Linka na zpracování tříděného plastového odpadu</i>	35
<i>Obr. 16. Nožový mlýn</i>	36
<i>Obr. 17. Speciální nožový mlýn</i>	37
<i>Obr. 18. Různé tvary zkušebních těles pro tahové zkoušky [32].....</i>	40
<i>Obr. 19. Pracovní diagram polyamidu při různých teplotách a konstantním čase [31]</i>	41
<i>Obr. 20. Pracovní diagram zkoušky tahem [31].....</i>	42
<i>Obr. 21. Zkouška tvrdosti podle Brinella [31].....</i>	44
<i>Obr. 22. Zkouška tvrdosti dle Rockwella [31]</i>	45
<i>Obr. 23. Vickersova metoda [31].....</i>	45
<i>Obr. 24. Schematické zobrazení zkušebních hrotů [38].....</i>	46
<i>Obr. 25. Zkouška rázem v ohybu – Charpyho kyvadlové kladiivo [31].....</i>	47
<i>Obr. 26. Typy používaných vrubů [28]</i>	48

<i>Obr. 27. Granulát PP s 30% skleněných vláken</i>	51
<i>Obr. 28. Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 H</i>	53
<i>Obr. 29. Zkušební tělesa pro mechanické zkoušky včetně vtokového systému</i>	55
<i>Obr. 30. Nožový mlýn Maskin AB Rapid</i>	57
<i>Obr. 31. Pracovní prostor nožového mlýnu</i>	58
<i>Obr. 32. Síto nožového mlýnu</i>	58
<i>Obr. 33. Nepřesetá polydisperzní drť</i>	59
<i>Obr. 34. Prosévací stroj AS 200 Basic</i>	59
<i>Obr. 35. Síto prosévacího stroje</i>	60
<i>Obr. 36. Recyklát velikosti 5- 4 mm</i>	61
<i>Obr. 37. Recyklát velikosti 4-3 mm</i>	61
<i>Obr. 38. Recyklát velikosti 3-2 mm</i>	61
<i>Obr. 39. Recyklát velikosti 2-1 mm</i>	62
<i>Obr. 40. Recyklát velikosti 1-0 mm</i>	62
<i>Obr. 41. Průměrné procentuální zastoupení částic v navážce</i>	63
<i>Obr. 42. Zwick 1456</i>	65
<i>Obr. 43. Upínací čelisti s extenzometry</i>	66
<i>Obr. 44. Modul pružnosti při teplotě 23 °C</i>	67
<i>Obr. 45. Modul pružnosti při teplotě 60 °C</i>	67
<i>Obr. 46. Modul pružnosti při teplotě 100 °C</i>	68
<i>Obr. 47. Modul pružnosti v tahu za různých teplot</i>	69
<i>Obr. 48. Mez pevnosti v tahu při 23 °C</i>	70
<i>Obr. 49. Mez pevnosti v tahu při 60 °C</i>	71
<i>Obr. 50. Mez pevnosti v tahu při 100 °C</i>	71
<i>Obr. 51. Mez pevnosti v tahu za různých teplot</i>	72
<i>Obr. 52. Prodloužení při 23 °C</i>	73
<i>Obr. 53. Prodloužení při 60 °C</i>	74
<i>Obr. 54. Prodloužení při 100 °C</i>	75
<i>Obr. 55. Prodloužení za různých teplot</i>	75
<i>Obr. 56. Charpyho kladivo</i>	76
<i>Obr. 57. Přístroj na výrobu vrubů</i>	77
<i>Obr. 58. Síla při přeražení při 23 °C</i>	78
<i>Obr. 59. Síla při přeražení při 60 °C</i>	78

<i>Obr. 60. Síla při přeražení při 100 °C</i>	79
<i>Obr. 61. Síla při přeražení za různých teplot</i>	80
<i>Obr. 62. Vrubová houževnatost při 23 °C</i>	81
<i>Obr. 63. Vrubová houževnatost při 60 °C</i>	82
<i>Obr. 64. Vrubová houževnatost při 100 °C</i>	82
<i>Obr. 65. Vrubová houževnatost za různých teplot</i>	83
<i>Obr. 66. Tvrdoměr ART 13</i>	84
<i>Obr. 67. Tvrdost Shore D</i>	85

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku plastů [33]</i>	40
<i>Tab. 2. Vlastnosti PP Syntegum 1030 AFV</i>	52
<i>Tab. 3. Základní parametry vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 470 H</i>	54
<i>Tab. 4. Nastavení procesních podmínek</i>	54
<i>Tab. 5. Procentuální zastoupení a hmotnosti částí výstřiků</i>	55
<i>Tab. 6. Základní parametry nožového mlýnu Maskin AB Rapid</i>	57
<i>Tab. 7. Základní parametry prosévacího stroje AS 200 Basic</i>	60
<i>Tab. 8. Poměr hmotností různých velikostí částic recyklátu</i>	62
<i>Tab. 9. Modul pružnosti v tahu</i>	66
<i>Tab. 10. Mez pevnosti v tahu</i>	70
<i>Tab. 11. Prodloužení v tahu</i>	73
<i>Tab. 12. Síly při přeražení</i>	77
<i>Tab. 13. Vrubová houževnatost</i>	81
<i>Tab. 14. Naměřené tvrdosti vzorků metodou Shore D</i>	85
<i>Tab. 15. Hodnoty modulu pružnosti v tahu při 23 °C</i>	102
<i>Tab. 16. Hodnoty modulu pružnosti v tahu při 60 °C</i>	102
<i>Tab. 17. Hodnoty modulu pružnosti v tahu při 100 °C</i>	102
<i>Tab. 18. Hodnoty meze pevnosti při 23 °C</i>	102
<i>Tab. 19. Hodnoty meze pevnosti při 60 °C</i>	102
<i>Tab. 20. Hodnoty meze pevnosti při 100 °C</i>	102
<i>Tab. 21. Hodnoty prodloužení při 23 °C</i>	102
<i>Tab. 22. Hodnoty prodloužení při 60 °C</i>	102
<i>Tab. 23. Hodnoty prodloužení při 100 °C</i>	102
<i>Tab. 24. Hodnoty síly při přeražení při 23 °C</i>	102
<i>Tab. 25. Hodnoty síly při přeražení při 60 °C</i>	102
<i>Tab. 26. Hodnoty síly při přeražení při 100 °C</i>	102
<i>Tab. 27. Hodnoty vrubové houževnatosti při 23 °C</i>	102
<i>Tab. 28. Hodnoty vrubové houževnatosti při 60 °C</i>	102
<i>Tab. 29. Hodnoty vrubové houževnatosti při 100 °C</i>	102

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Modul pružnosti v tahu.
- P II Mez pevnosti.
- P III Prodloužení.
- P IV Síla při přeražení.
- P V Vrubová houževnatost.

PŘÍLOHA P I: Modul pružnosti v tahu.

Tab. 15. Hodnoty modulu pružnosti v tahu při 23 °C

Materiály vzorků:	Modul pružnosti v tahu při 23 °C [MPa]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	6610	5550	6740	5820	6420	4490	5150
2.	6490	5800	6940	6740	6540	6100	5020
3.	6840	5620	6880	6400	6620	6340	4830
4.	6530	4670	6520	6180	6010	6050	5130
5.	5570	4910	6190	6040	6090	5950	4800
6.	6140	6090	6160	6250	6640	5350	4890
7.	6310	5380	6750	6630	6160	5820	4970
8.	7050	5370	6480	6440	6520	5520	4140
9.	6830	5490	6460	6620	5730	4210	5350
10.	6950	6070	5760	6000	6510	4860	4790
Aritmetický průměr:	6532	5495	6488	6312	6324	5469	4907
Směrodatá odchylka:	443	453	368	305	307	729	323

Tab. 16. Hodnoty modulu pružnosti v tahu při 60 °C

Materiály vzorků:	Modul pružnosti v tahu při 60 °C [MPa]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	4650	3690	4920	4170	4330	3840	3630
2.	4620	4690	4680	5000	4370	4010	3830
3.	4690	4050	4340	3950	4510	3890	3960
4.	4640	4370	4160	4110	4550	4490	3680
5.	4540	4350	4770	4720	4560	4010	3620
6.	4670	4310	4850	4420	4250	3880	3610
7.	4480	4550	4320	3910	4580	3920	3910
8.	4800	3000	4010	4960	4520	4060	3580
9.	4720	3980	4630	4480	4360	3890	3960
10.	4670	3880	4030	4260	4390	3800	3980
Aritmetický průměr:	4648	4087	4471	4398	4442	3979	3776
Směrodatá odchylka:	89	491	341	392	115	197	167

Tab. 17. Hodnoty modulu pružnosti v tahu při 100 °C

Materiály vzorků:	Modul pružnosti v tahu při 100 °C [MPa]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	3520	2900	3070	2990	2610	2480	2290
2.	3230	2800	2950	2870	2440	2620	2390
3.	3500	1850	2440	2590	3010	2940	1810
4.	3240	2640	2970	3140	3200	2560	2720
5.	3190	2790	3210	2940	3050	2920	2680
6.	3020	2770	3200	3090	2800	2520	2710
7.	3010	2730	3310	2850	2910	2660	2030
8.	3380	2960	2980	3030	3180	2530	2460
9.	3340	2920	3210	3150	3000	2490	2390
10.	3190	2910	2670	3270	2860	2500	2380
Aritmetický průměr:	3262	2727	3001	2992	2906	2622	2386
Směrodatá odchylka:	175	324	270	193	240	172	294

PŘÍLOHA P II: Mez pevnosti.

Tab. 18. Hodnoty meze pevnosti při 23 °C

Materiály vzorků:	Mez pevnosti při 23 °C [MPa]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	89,5	77,0	83,7	80,8	78,4	70,0	55,3
2.	89,9	77,4	83,0	79,8	78,4	70,7	58,1
3.	89,4	53,0	85,5	79,8	78,3	70,7	67,5
4.	89,6	75,8	82,3	80,6	78,2	68,0	69,3
5.	89,8	78,1	82,4	80,0	78,4	72,4	56,7
6.	89,2	75,7	82,2	79,9	78,0	71,9	69,8
7.	89,7	71,4	81,8	80,4	78,0	70,3	68,2
8.	89,3	76,2	82,2	80,7	78,5	69,0	67,0
9.	89,8	77,6	87,8	79,2	78,0	70,8	69,2
10.	89,6	78,4	80,1	79,9	78,2	65,5	68,9
Aritmetický průměr:	89,6	74,1	83,1	80,1	78,2	69,9	65,0
Směrodatá odchylka:	0,2	7,7	2,2	0,5	0,2	2,0	5,8

Tab. 19. Hodnoty meze pevnosti při 60 °C

Materiály vzorků:	Mez pevnosti při 60 °C [MPa]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	58,8	51,2	52,9	51,2	49,5	44,3	40,2
2.	59,2	50,6	52,8	51,2	50,3	44,2	41,8
3.	59,7	50,0	56,5	51,6	49,8	44,5	43,3
4.	59,0	50,8	54,0	50,9	50,4	49,7	43,5
5.	58,3	50,5	53,5	51,5	50,1	45,1	40,3
6.	58,8	50,0	52,9	51,5	50,8	44,5	41,3
7.	59,4	51,3	53,8	51,6	50,4	43,2	42,6
8.	59,4	37,1	54,6	51,1	50,7	45,2	42,9
9.	59,2	50,4	55,3	51,5	50,2	45,5	43,4
10.	59,3	50,3	56,1	51,2	50,5	45,2	42,5
Aritmetický průměr:	59,1	49,2	54,2	51,3	50,3	45,1	42,2
Směrodatá odchylka:	0,4	4,3	1,3	0,2	0,4	1,7	1,2

Tab. 20. Hodnoty meze pevnosti při 100 °C

Materiály vzorků:	Mez pevnosti při 100 °C [MPa]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	35,2	29,9	31,2	30,3	29,7	25,5	25,9
2.	35,7	30,1	31,3	30,3	29,7	26,4	24,6
3.	36,1	20,7	31,0	30,2	29,9	29,0	21,9
4.	36,0	29,7	31,0	30,5	29,6	26,0	26,0
5.	36,3	30,2	31,0	30,7	30,0	29,0	25,9
6.	36,6	29,7	32,4	30,8	29,6	26,2	24,8
7.	35,7	29,3	31,4	31,1	29,2	25,9	23,6
8.	36,6	30,5	31,0	30,5	29,6	25,3	24,1
9.	35,9	30,3	31,6	30,8	29,2	26,1	24,6
10.	35,6	29,7	31,3	32,6	29,5	25,6	26,0
Aritmetický průměr:	36,0	29,0	31,3	30,8	29,6	26,5	24,7
Směrodatá odchylka:	0,4	2,9	0,4	0,7	0,3	1,4	1,3

PŘÍLOHA P III: Prodloužení.

Tab. 21. Hodnoty prodloužení při 23 °C

Materiály vzorků:	Prodloužení při 23 °C [mm]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	7,1	6,7	7,2	7,2	7,7	8,0	6,9
2.	6,9	7,1	7,4	7,6	7,7	7,0	7,7
3.	6,9	7,2	7,2	7,1	7,2	7,2	7,9
4.	7,1	6,9	7,2	7,2	7,2	7,0	7,2
5.	7,1	6,9	6,4	7,1	8,2	6,9	7,4
6.	7,2	7,0	7,3	7,4	7,1	7,9	8,6
7.	6,7	7,1	6,9	7,2	6,9	7,3	7,0
8.	7,1	7,5	7,2	7,3	7,7	7,4	6,8
9.	7,4	6,9	6,9	7,1	7,4	7,6	7,0
10.	6,7	7,5	7,0	7,3	7,2	7,1	7,3
Aritmetický průměr:	7,0	7,1	7,1	7,3	7,4	7,3	7,4
Směrodatá odchylka:	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,6

Tab. 22. Hodnoty prodloužení při 60 °C

Materiály vzorků:	Prodloužení při 60 °C [mm]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	7,4	7,7	7,9	7,5	8,2	8,2	8,2
2.	7,9	7,6	7,7	7,7	8,0	8,4	6,7
3.	7,5	7,5	7,9	7,7	8,1	7,9	7,9
4.	7,5	7,9	7,7	7,6	7,8	7,9	8,7
5.	7,7	7,7	7,7	7,9	7,9	7,9	8,3
6.	7,7	8,1	7,9	7,7	7,9	7,9	8,1
7.	8,0	7,7	7,9	8,2	7,7	8,1	7,9
8.	7,7	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,5
9.	7,8	7,9	7,7	8,4	8,2	7,9	8,7
10.	7,4	7,9	7,9	8,4	8,2	7,7	7,9
Aritmetický průměr:	7,7	7,8	7,8	7,9	8,0	8,0	8,0
Směrodatá odchylka:	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,6

Tab. 23. Hodnoty prodloužení při 100 °C

Materiály vzorků:	Prodloužení při 100 °C [mm]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	9,4	9,6	9,8	9,6	9,6	9,8	10,6
2.	8,9	9,6	9,1	9,6	10,5	9,8	10,1
3.	8,8	9,6	9,6	9,8	9,6	9,8	9,6
4.	9,8	9,5	9,6	9,6	9,6	9,8	10,1
5.	9,5	9,6	9,8	9,6	9,6	9,9	9,8
6.	9,4	9,4	9,7	9,6	9,8	9,4	9,8
7.	9,3	9,6	9,3	9,6	9,8	9,0	9,8
8.	9,6	9,6	9,6	9,6	9,8	9,8	9,6
9.	9,6	9,5	9,7	9,6	9,8	9,9	9,9
10.	9,1	9,6	9,6	8,9	9,8	9,6	9,8
Aritmetický průměr:	9,3	9,6	9,6	9,6	9,8	9,7	9,9
Směrodatá odchylka:	0,3	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3

PŘÍLOHA P IV: Síla při přeražení.

Tab. 24. Hodnoty síly při přeražení při 23 °C

Materiály vzorků:	Síla při přeražení při 23 °C [N]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	523,9	482,8	529,2	481,6	471,4	463,7	454,7
2.	583,0	508,4	472,6	497,1	512,6	464,3	465,5
3.	534,0	463,7	504,2	486,3	492,9	452,4	462,5
4.	520,3	475,6	495,3	481,6	477,4	471,4	438,1
5.	517,3	476,8	549,5	497,7	494,7	494,1	444,7
6.	527,5	457,1	497,1	494,1	470,2	452,4	455,5
7.	500,6	459,5	504,1	460,1	478,0	453,6	452,5
8.	506,0	479,2	495,2	494,7	506,0	460,1	428,1
9.	550,1	490,5	549,4	494,7	469,6	454,7	457,7
10.	526,1	468,1	497,0	489,1	498,4	461,8	464,3
Aritmetický průměr:	528,9	476,2	509,4	487,7	487,1	462,8	452,4
Směrodatá odchylka:	23,5	15,5	25,2	11,4	15,8	12,6	12,1

Tab. 25. Hodnoty síly při přeražení při 60 °C

Materiály vzorků:	Síla při přeražení při 60 °C [N]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	448,2	411,2	404,1	422,6	417,8	358,2	380,8
2.	467,3	359,4	416,0	411,2	405,3	379,7	369,5
3.	467,3	404,1	412,4	398,1	420,2	392,2	340,3
4.	503,0	402,9	460,1	415,4	399,9	367,7	374,9
5.	460,7	428,5	426,7	430,3	410,0	384,4	382,0
6.	494,1	321,8	432,7	424,4	400,5	394,6	370,6
7.	478,6	345,7	417,1	421,4	433,9	395,1	341,4
8.	468,5	404,7	413,5	432,1	420,2	387,4	376,0
9.	456,5	427,3	461,2	430,9	390,4	385,6	379,1
10.	480,1	393,9	427,8	418,4	408,3	378,5	354,7
Aritmetický průměr:	472,4	389,9	427,2	420,5	410,6	382,3	366,9
Směrodatá odchylka:	16,8	35,7	19,5	10,4	12,6	11,9	15,8

Tab. 26. Hodnoty síly při přeražení při 100 °C

Materiály vzorků:	Síla při přeražení při 100 °C [N]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	377,9	337,3	389,2	345,7	343,3	291,4	314,1
2.	372,5	360,0	356,4	360,6	346,3	308,7	273,6
3.	366,5	357,0	373,1	355,8	360,0	320,6	313,5
4.	375,5	349,3	361,8	361,8	351,0	324,8	309,9
5.	389,2	348,7	377,3	353,4	354,6	365,3	314,0
6.	398,1	356,4	392,8	352,8	357,0	330,2	273,5
7.	398,1	334,4	373,0	364,2	360,0	336,7	313,4
8.	398,7	365,3	361,7	371,3	357,6	333,2	309,8
9.	403,5	352,7	377,2	360,6	380,2	365,3	278,4
10.	394,9	346,4	392,7	362,6	349,0	321,8	315,9
Aritmetický průměr:	387,5	350,7	375,5	358,9	355,9	329,8	301,6
Směrodatá odchylka:	13,2	9,7	13,1	7,1	10,3	22,8	18,4

PŘÍLOHA P V: Vrubová houževnatost.

Tab. 27. Hodnoty vrubové houževnatosti při 23 °C

Materiály vzorků:	Vrubová houževnatost při 23 °C [kJ.m ⁻²]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	6,8	5,3	5,5	5,1	5,2	4,9	4,7
2.	6,6	5,5	5,3	5,6	5,1	4,5	5,0
3.	6,7	5,5	5,7	5,4	5,2	5,0	5,1
4.	7,3	5,0	5,6	5,5	5,4	4,8	4,6
5.	6,9	5,1	5,5	5,6	5,1	5,2	4,6
6.	6,4	4,7	5,8	5,1	5,7	5,0	4,9
7.	6,2	5,1	5,6	5,2	5,0	4,8	5,0
8.	7,0	5,3	5,3	5,5	5,3	4,6	4,5
9.	7,1	5,4	5,6	5,3	4,9	4,9	5,0
10.	6,8	5,2	5,6	5,6	5,3	5,0	5,1
Aritmetický průměr:	6,8	5,2	5,6	5,4	5,2	4,9	4,9
Směrodatá odchylka:	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Tab. 28. Hodnoty vrubové houževnatosti při 60 °C

Materiály vzorků:	Vrubová houževnatost při 60 °C [kJ.m ⁻²]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	10,9	6,8	7,6	8,3	8,3	7,1	6,6
2.	10,8	6,0	8,5	7,7	8,1	7,7	6,7
3.	10,5	8,3	8,6	7,5	7,6	7,4	5,6
4.	12,1	7,3	8,3	7,8	7,3	6,8	7,0
5.	9,9	7,9	8,0	8,4	7,4	7,0	6,5
6.	10,5	6,1	7,8	6,9	7,8	6,8	6,6
7.	10,6	6,6	8,5	7,7	8,9	8,1	5,5
8.	10,6	7,6	8,2	8,6	8,8	7,3	6,9
9.	11,4	8,2	7,9	8,7	7,5	7,0	6,7
10.	10,8	7,6	7,7	8,1	8,2	7,2	6,2
Aritmetický průměr:	10,8	7,2	8,1	8,0	8,0	7,2	6,4
Směrodatá odchylka:	0,6	0,8	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5

Tab. 29. Hodnoty vrubové houževnatosti při 100 °C

Materiály vzorků:	Vrubová houževnatost při 100 °C [kJ.m ⁻²]						
	PP + 30 % s.v. originální mat.	PP + 30 % s.v. neprosetý mat.	PP + 30 % s.v. 5 - 4 mm	PP + 30 % s.v. 4 - 3 mm	PP + 30 % s.v. 3 - 2 mm	PP + 30 % s.v. 2 - 1 mm	PP + 30 % s.v. 1 - 0 mm
1.	21,8	14,6	16,6	15,2	15,5	10,8	9,9
2.	23,8	11,0	16,5	15,1	14,6	11,4	8,7
3.	22,5	14,6	16,1	14,5	13,7	12,5	9,2
4.	21,1	11,6	15,4	12,4	11,8	10,0	9,2
5.	21,7	15,2	12,0	15,2	11,4	11,0	9,8
6.	21,6	11,1	11,6	15,8	11,9	8,5	8,6
7.	22,4	11,6	17,7	14,7	11,5	8,6	9,1
8.	22,6	11,7	17,2	11,2	13,7	9,5	9,1
9.	22,8	13,0	16,5	14,1	11,0	9,7	8,1
10.	22,0	11,8	13,1	14,7	13,0	10,7	8,8
Aritmetický průměr:	22,2	12,6	15,3	14,3	12,8	10,3	9,0
Směrodatá odchylka:	0,8	1,6	2,2	1,4	1,5	1,3	0,5