



Optimalizace výrobního procesu plastového dílu podvolantového modulu

Diplomová práce

Studijní program: N2301 / Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301T048 / Strojírenská technologie a materiály

Autor práce: **Bc. Vojtěch Dittrich**

Vedoucí práce: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch Dittrich**
Osobní číslo: **S16000534**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Optimalizace výrobního procesu plastového dílu podvolantového modulu**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Výběr plastového dílu podvolantového modulu z produkce firmy KOSTAL CR s.r.o., rešerše a popis stávajícího stavu.
2. Návrh řešení optimalizace výrobního procesu.
3. Experimentální studie ve vztahu k výsledné kvalitě plastového dílu.
4. Vyhodnocení výsledků experimentální studie.
5. Závěr, doporučení pro praxi.



Rozsah grafických prací: **grafy, tabulky**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

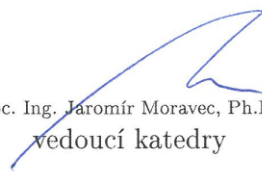
- [1] Zeman, Lubomír. *Vstřikování plastů*. Praha: BEN-Technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-2.
[2] Bryce, Douglas M. *Plastic Injection Molding: Manufacturing Process Fundamentals*. Dearborn:Society of Manufacturing Engineers, 1999.
[3] Kamal, Musa R., Avram L. Bayev a Shih-Jung Liu. *Injection Moulding - Fundamentals and Applications*. Cincinnati: Hanser Publications, 2013. ISBN 9781569904343.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **1. dubna 2018**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jāromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2016



Optimalizace výrobního procesu plastového dílu podvolantového modulu

Optimization of the manufacturing process of the plastic part of the steering column module

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací výrobního procesu plastového dílu podvolantového modulu, respektive ověřením možnosti využití regranulátu s ohledem na mechanické vlastnosti, rozměrovou stálost a výslednou kvalitu plastového dílu. Práce je rozdělena na dvě části, a to na teoretickou a experimentální část. Teoretická část je zaměřena na popis polyoxymethylenu, jeho vlastnosti, možnosti zpracování a aplikace, dále na možnosti recyklace termoplastů zejména pak metody umožňující recyklaci polyoxymethylenu. V experimentální části jsou stanoveny a hodnoceny mechanické vlastnosti, rozměrová stálost a výsledná kvalita plastového dílu v závislosti na obsahu přidaného regranulátu. V závěru práce jsou vyhodnoceny výsledky experimentální studie, jejich diskuze a doporučení pro praxi.

Klíčová slova: plastový díl, vstřikování, polyoxymethylen, recyklace, regranulát

Anotation

This thesis examines the optimization of the manufacturing process of the plastic part of the steering column module, respectively verification of the possibility of using the regranulate regarding to the mechanical properties, dimensional stability and the quality of the plastic part, depending on the content of the regranulate. The thesis is splitted into two parts, to a theoretical part and an experimental part. The theoretical part is focused on description of polyoxymethylene, its properties, possibilities of manufacturing and applications, furthermore possibilities of recycling of thermoplastics especially method possibly used for polyoxymethylene. The experimental part is focused on mechanical properties, dimensional stability and the quality of the plastic part depending on the content of the regranulate. Evaluation of the results of the experimental study, their discussion and recommendations for practice are presented in the conclusion of the thesis.

Key words: plastic part, injection molding, polyoxymethylene, recycling, regranulate



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:



Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. za cenné rady a odbornou pomoc během vypracování celé práce, Ing. Jiřímu Habrovi, Ph.D. za pomoc při vstřikování zkušebních těles, kolegům z firmy Kostal za vstřícnost a odborné konzultace a v neposlední řadě mé rodině, zejména Ing. Ireně Dittrichvé za podporu během celého studia.



Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1 Úvod	11
2 Teoretická část	12
2.1 Polyoxymethylen	12
2.1.1 Monomery pro výrobu polyoxymethylenu.....	12
2.1.2 Syntéza polyoxymethylenu	14
2.1.3 Fyzikální vlastnosti.....	18
2.1.4 Mechanické vlastnosti polyoxymethylenu	19
2.1.5 Zpracování polyoxymethylenu	21
2.1.6 Aplikace polyoxymethylenu.....	24
2.2 Recyklace plastů.....	24
2.2.1 Energetická recyklace	25
2.2.2 Surovinová recyklace	26
2.2.3 Materiálová recyklace	30
3 Experimentální část	35
3.1 Volba dílu	35
3.2 Výroba regranulátu	36
3.3 Výroba zkušebních těles	37
3.4 Výroba reálných dílů	41
3.5 Stanovení mechanických vlastností	45
3.5.1 Stanovení tahových vlastností	45
3.5.2 Stanovení ohybových vlastností.....	46
3.5.3 Stanovení vrubové houževnatosti	47
3.6 Stanovení tokových vlastností.....	49
3.7 Stanovení termických vlastností.....	51
3.8 Rozměrová analýza reálného dílu.....	54



4	Vyhodnocení a diskuze výsledků.....	57
4.1	Vyhodnocení tahových vlastností.....	57
4.2	Vyhodnocení ohybových vlastností.....	60
4.3	Vyhodnocení vrubové houževnatosti	63
4.4	Vyhodnocení tokových vlastností.....	64
4.5	Vyhodnocení termických vlastností.....	66
4.6	Vyhodnocení rozměrové analýzy	68
5	Závěr	69
	Seznam použitých zdrojů	71
	Seznam příloh a přílohy.....	77

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21122/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.



Seznam použitých zkratk a symbolů

POM	- polyoxymethylen
POM-H	- homopolymer polyoxymethylenu
POM-C	- kopolymer polyoxymethylenu
PE	- polyethylen
HDPE	- vysokohustotní polyethylen
LDPE	- nízkohustotní polyethylen
PP	- polypropylen
PS	- polystyren
PET	- polyethylentereftalát
PMMA	- polymethylmetakrylát
PTFE	- polytetrafluorethylen
PA 6	- polyamid 6
PA 66	- polyamid 66
PC	- polykarbonát
PSU	- polysulfon
PEEK	- polyetheretherketon
PVC-U	- neměkčený polyvinylchlorid
PVC-C	- chlorovaný polyvinylchlorid
MMA	- methylmethakrylát
TFE	- tetrafluorethylen
HCl	- chlorovodík
VW	- Volkswagen
DSC	- diferenční snímací kalorimetrie
MFI	- index toku taveniny



MVR	- objemový index toku taveniny	[cm ³ /10min]
MFR	- hmotnostní index toku taveniny	[g/10min]
OI	- kyslíkové číslo	[obj. %]
σ_m	- mez pevnosti v tahu	[MPa]
σ_{fm}	- mez pevnosti v ohybu	[MPa]
E_t	- modul pružnosti v tahu	[MPa]
E_f	- modul pružnosti v ohybu	[MPa]
ϵ_{tb}	- jmenovité poměrné prodloužení při přetržení	[%]
a_{cA}	- vrubová houževnatost	[kJ/m ²]
l	- délka vzorku	[mm]
b	- šířka vzorku	[mm]
b_N	- šířka vzorku pod vrubem	[mm]
h	- tloušťka vzorku	[mm]
$T_{p,c}$	- pík teploty krystalizace	[°C]
$T_{p,m}$	- pík teploty tání	[°C]
ΔH_c	- změna entalpie krystalizace	[J/g]
ΔH_m	- změna entalpie tání	[J/g]



1 Úvod

Plasty jsou progresivní materiály, které svými jedinečnými a neustále se modifikujícími vlastnostmi nacházejí nová uplatnění napříč všemi odvětvími lidské činnosti, technickou sféru nevyjímaje. Jedná se o materiály, které naplňují požadavky moderního strojírenství a jejich výrazný rozvoj se nevyhnul ani automobilovému průmyslu, kde čím dál tím více nahrazují konvenční materiály. Hlavním argumentem je téměř ve všech případech snížení hmotnosti, v některých případech i korozní odolnost, elektrické izolační vlastnosti, apod. Plasty začaly do automobilů pronikat již ve čtyřicátých letech dvacátého století, výrazněji pak v letech sedmdesátých, kdy byl jejich podíl v celém automobilu asi šest procent, což představovalo zhruba 66 kilogramů. Dnešní automobily mají přibližně patnáctiprocentní zastoupení plastů, to je zhruba 220 kilogramů. [1] Nevýhodou aplikace plastů může být environmentální hledisko, které je však eliminováno opětovným využitím recyklovaného materiálu při zpracování nebo aplikací biopolymerů.

Jedním z konstrukčních plastů, využívaných při stavbě automobilů, je polyoxymethylen. Jedná se o konstrukční plast, který má velmi dobré mechanické vlastnosti, je odolný proti tečení za studena (krípu), nárazům a má i velmi dobré kluzné vlastnosti. Právě tyto jeho přednosti vedli konstruktéry firmy Leopold Kostal GmbH & Co. KG k rozhodnutí, použít tento plast pro mechanicky namáhané součástky podvolantových modulů.

Cílem této diplomové práce je optimalizace výrobního procesu, respektive ověření možnosti využití regranulátu u plastového dílu podvolantového modulu označeného „Schaltstück“, jež je vyráběn vstřikováním z polyoxymethylenu. Tento díl je během svého užívání vystaven mechanickému namáhání a v podvolantovém modulu plní nezastupitelnou funkci. Přestože je tento díl konstrukčně velmi dobře vyřešen a technologický proces výroby zajišťuje požadovanou přesnost a kvalitu dílu, dochází při něm k produkci značného množství technologického odpadu, který navyšuje spotřebu vstupního materiálu a prodražuje tak výrobní proces, respektive díl samotný. Jednou z možností, jak snížit spotřebu panenského materiálu a snížit tak celkové výrobní náklady je přidání regranulátu, to však přináší riziko zhoršení výsledné kvality dílu, proto se firma KOSTAL CR spol. s r.o. rozhodla ve spolupráci s Technickou univerzitou v Liberci ověřit vliv přídavku regranulátu na kvalitu a funkčnost dílu z pohledu fyzikálních vlastností materiálu, tvarové a rozměrové stálosti dílu.

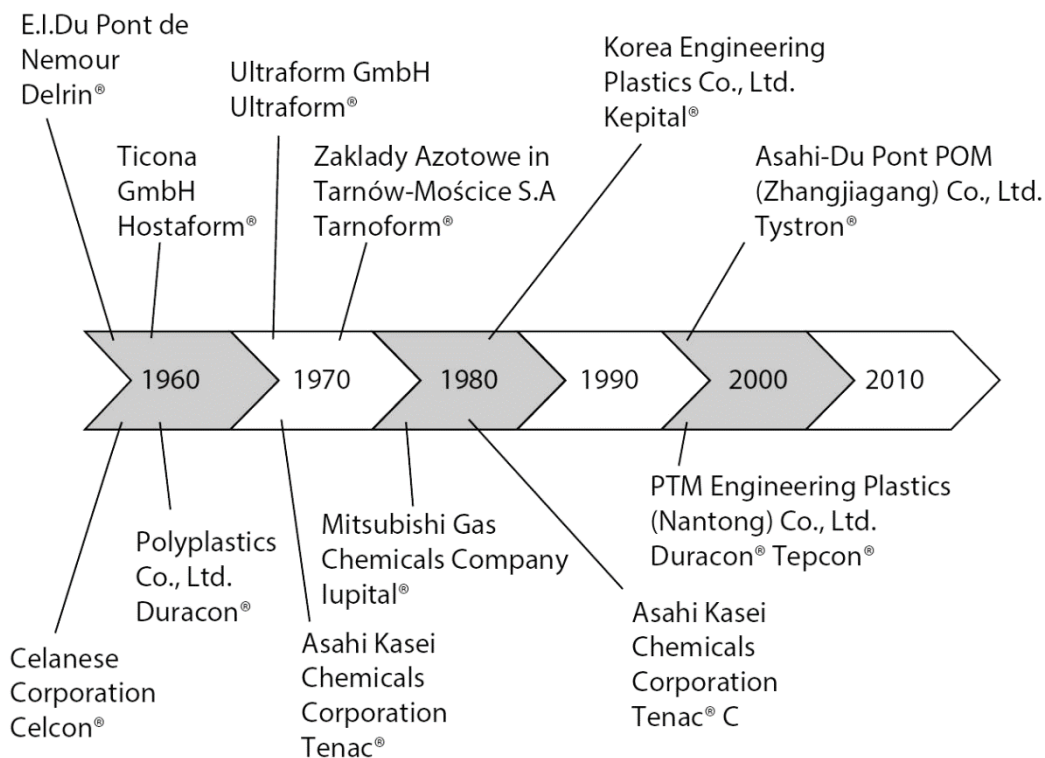


2 Teoretická část

Teoretická část diplomové práce se s ohledem na řešenou problematiku zabývá zvoleným materiálem, jeho vlastnostmi, možnostmi zpracování a aplikacemi, dále popisuje možnosti recyklace termoplastů, zejména pak možnosti recyklace zvoleného materiálu, jímž je polyoxymethylen.

2.1 Polyoxymethylen

Ve čtyřicátých letech dvacátého století firma E. I. du Pont de Nemours and Company, známá jako DuPont, započala rozsáhlý výzkum vedoucí k získání čistého formaldehydu a později z něj odvozených derivátů. Výsledkem byla syntetizace polyoxymethylenu s vysokou tepelnou stabilitou. V roce 1956 pak firma DuPont oznámila produkci komerčního homopolymeru (POM-H) pod obchodním názvem Delrin. Vývoj komerčně vyráběných POM je znázorněn na obr. 2.1. [2]



Obr. 2.1: Výroba a komercializace POM (1960-2010) [2]

2.1.1 Monomery pro výrobu polyoxymethylenu

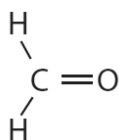
Základním monomerem pro výrobu polyoxymethylenu je formaldehyd, ale vlastnosti polymeru mohou být modifikovány použitím dalších monomerů



jako je trioxan, dále se používají komonomery, které mohou působit jako rozvětvací činidla či činidla pro přenos řetězců. Zmíněné monomery a komonomery jsou uvedeny v tab. 2.1 a na obr. 2.2. [3]

Tab. 2.1: Monomery a komonomery používané při syntéze POM [3]

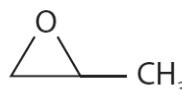
Nízkomolekulární látka	Poznámky
Formaldehyd	Základní monomer
Trioxan	Trimer formaldehydu
Ethylenoxid	Komonomer
1,2-Propylenoxid	Komonomer
Tetrahydrofuran	Komonomer
1,3-Dioxan	Komonomer
1,4-Dioxan	Komonomer
1,3-Dioxolan	Komonomer
1,3-Dioxepan	Komonomer



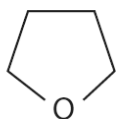
Formaldehyd



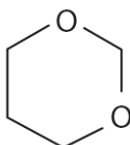
Ethylenoxid



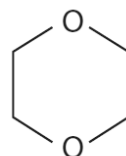
Propylenoxid



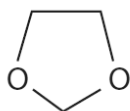
Tetrahydrofuran



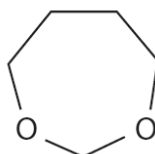
1,3-Dioxan



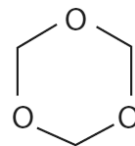
1,4-Dioxan



1,3-Dioxolan



1,3-Dioxepan



Trioxan

Obr. 2.2: Monomery a komonomery používané při syntéze POM [3]



Formaldehyd

Za pokojové teploty je formaldehyd v plynném stavu. Jedná se o plyn toxický. Formaldehyd může být syntetizován oxidací methanolu. Za teploty 650 °C může být formaldehyd připraven také pomocí dehydrogenace methanolu. Tato metoda je výhodná tím, že jsou potřeba pouze methanol, vodík a kyslík (případně vzduch). Nejsou zde žádné vedlejší produkty nebo odpad, kterým by bylo nutno se zabývat. [3]

Trioxan

Trioxan je trimer formaldehydu. Za pokojové teploty se jedná o pevnou látku. Trioxan se připravuje trimerizací formaldehydu, a při teplotách 150 ÷ 200 °C se na něj opět rozkládá. [3]

2.1.2 Syntéza polyoxymethylenu

Aniontová polymerace

Surovinou pro přípravu POM je formaldehyd v plynné formě (o vysoké čistotě) nebo ve formě roztoku v inertním organickém médiu.

Polymerace v plynné fázi je obtížná z důvodu tvorby značného tepla během reakce. Výhodou je získání suchého práškovitého polymeru a také, že v procesu nejsou žádné pomocné látky, které by bylo nutné regenerovat. Z důvodu problematického odvodu polymeračního tepla se tento způsob příliš nepoužívá. [4]

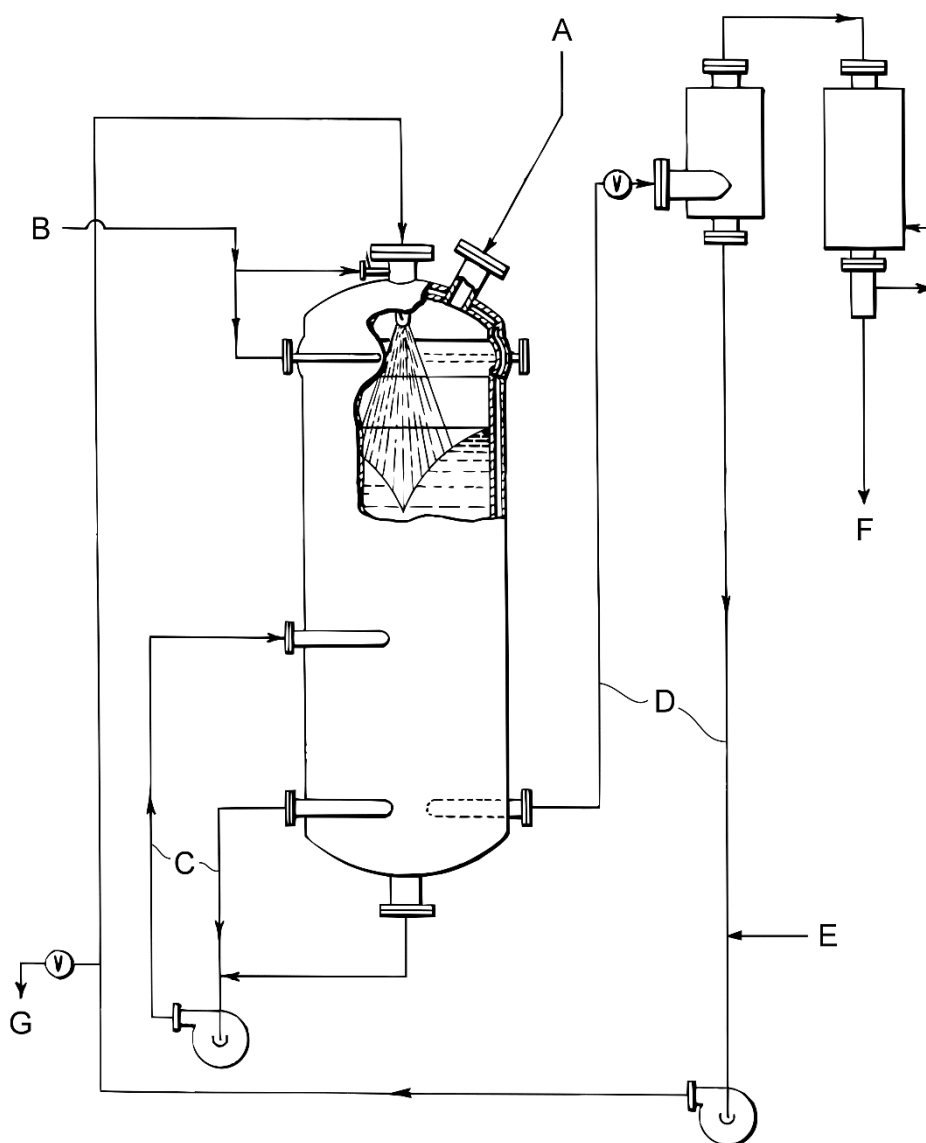
Častěji používaným způsobem je polymerace formaldehydu v inertním médiu, za přídavku katalyzátoru. Díky inertnímu médiu se jednak zlepší odvod tepla a vlastní polymerace je lépe říditelná. Množství použitého katalyzátoru je nízké (řádově 10^{-2} až 10^{-6} molu na mol formaldehydu). [4] Ze suspenze polymeru v inertním médiu se vhodným způsobem oddělí polymer, který se po promytí suší a dále upravuje. V průběhu polymerace může docházet k nežádoucím vedlejším reakcím. Výše uvedené komonomery (viz tab. 2.1) mohou těmto nežádoucím reakcím zabránit a zároveň zlepšit termální stabilitu polymeru. [3]

Kationtová polymerace

Výchozí surovinou kationtové polymerace je cyklický trimer formaldehydu - trioxan. Vzniká prakticky stejný polymer jako polymerací formaldehydu. Výhodou přípravy polyoxymethylenu z trioxanu je menší polymerační teplo a možnost přípravy vysoce čisté suroviny. [4]



Polymerace probíhá ve speciálních reaktorech. Jejich příklady jsou schematicky znázorněny na viz obr. 2.3 a obr. 2.4.

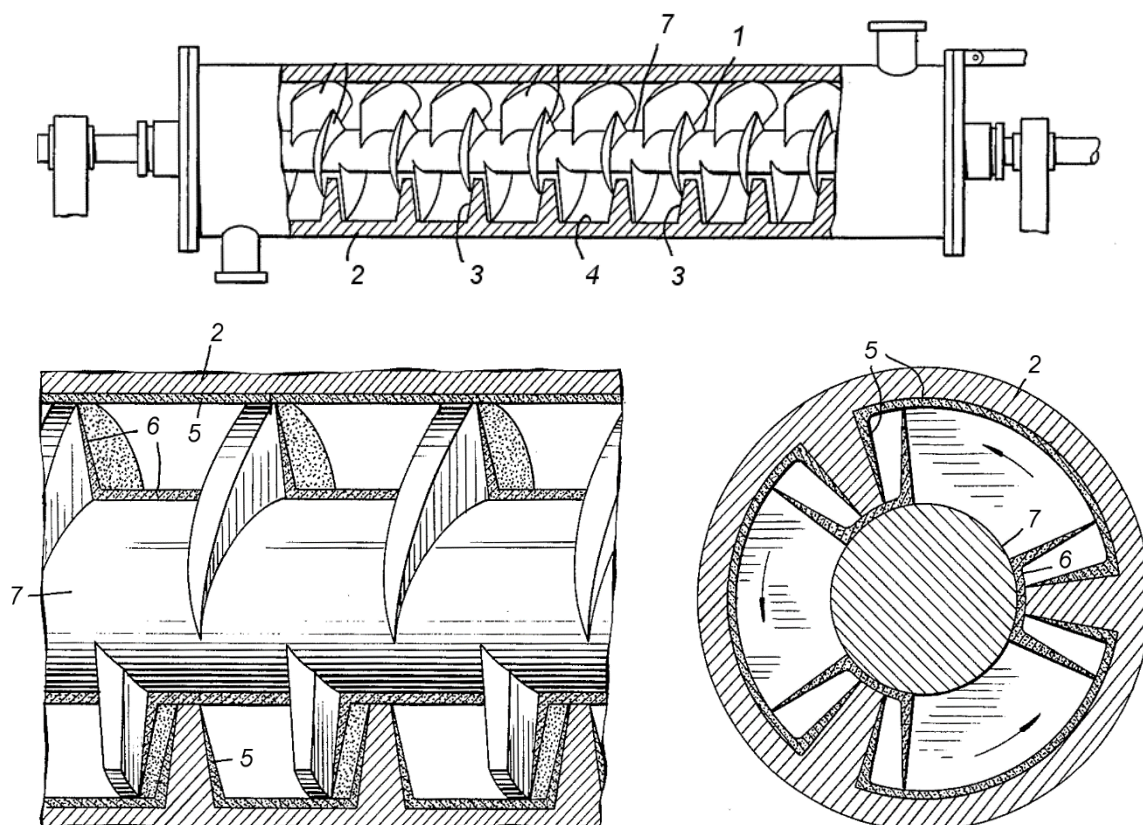


Obr. 2.3: Reaktor pro polymeraci plynného formaldehydu [5]

A - Formaldehyd
 B - Rozpouštědlo
 C - Oběhové čerpadlo
 D - Chladicí okruh

E - Katalyzátor
 F - Zotavení monomeru a rozpouštědla
 G - Produkt (kaše)





Obr. 2.4: Kontinuální reaktor pro masovou polymerizaci trioxanu [41]

- | | |
|----------------------------------|---------------------|
| 1 - Přerušená šroubovice | 5 - Vrstva polymeru |
| 2 - Válcová komora | 6 - Vrstva polymeru |
| 3 - Zub na vnitřní straně komory | 7 - Hřídel |
| 4 - Vnitřní stěna komory | |

Stabilizace polyoxymethylenu

Při tepelném namáhání polyoxymethylenu dochází ke dvojí destrukci polymeru, jednak od konců řetězců a jednak štěpením řetězců. První případ je řešen nahrazením koncových -OH skupin jinými skupinami např. -OR, -COOR apod. Při této úpravě polymeru nedochází k nežádoucím změnám (změna vzhledu, změna mechanickofyzikálních vlastností atd.). Štěpení řetězců, ke kterému dochází jen za přítomnosti kyslíku, je možné podstatně omezit přidáním antioxidantů (přímícháním do taveniny polymeru nebo přidáním antioxidantů ve formě roztoku). Přidáním antioxidantního stabilizátoru může dojít k zhnědnutí polymeru. [4]



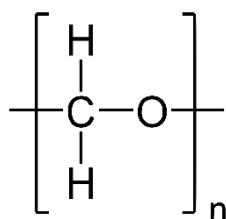
Základní typy polyoxymethylenu

Prakticky existují dva základní typy polyoxymethylenu a to homopolymer (strukturní jednotka viz obr. 2.5) a kopolymer.

Homopolymery

Prvním způsobem přípravy homopolymeru POM je aniontová polymerace bezvodného formaldehydu, v tekutém organickém reakčním médiu za přítomnosti polymerizačních katalyzátorů. Polymerace probíhá za pokojové teploty s přísunem čistého plynného formaldehydu v polymerizačním reaktoru obsahujícím malé množství katalyzátoru. Každá makromolekula takto vzniklého polymeru obsahuje nejméně jednu koncovou -OH skupinu, což činí polymer nestabilním. [3] (Stabilizace POM viz podkapitola výše.)

Druhým způsobem je reaktivní extruze trioxanu, která je realizována ve vzduchotěsném extrudéru, za stabilního tlaku. Doba pobytu v extrudéru je kolem 1 min při tlaku 1,8 MPa. Polymer vychází z extrudéru ve formě taveniny, ta je ochlazená a následuje tepelná úprava, z důvodu odstranění nestabilních konců řetězců. [3]



Obr. 2.5: Strukturní jednotka POM-H

Kopolymery

Homopolymery polyoxymethylenu mají vynikající mechanické vlastnosti, jejich stabilita však není příliš uspokojivá. Na druhou stranu kopolymery vzniklé kopolymerizací formaldehydu nebo trioxanu s cyklickými ethery mají velmi dobrou stabilitu, z hlediska dlouhodobé tepelné odolnosti, či odolnosti proti horké vodě, avšak v mechanických vlastnostech zaostávají, což vede k potřebě lepšího složení. Kopolymery uspokojivých mechanických vlastností, lze získat např. kationtovou kopolymerizací trioxanu s malým množstvím komonomerů. Dále lze získat blokové kopolymery a to polymerací formaldehydu za přítomnosti činidel pro přenos řetězců. [3]



2.1.3 Fyzikální vlastnosti

Polyoxymethylen je semikrystalický termoplast s teplotou tání $165 \div 185$ °C, teplota zeskenění je pak -50 °C. [6] V naturální podobě má mléčně bílou barvu. Hustota se pohybuje od $1,41$ do $1,42$ g/cm³. Díky kyslíku ve strukturní jednotce je POM slabě polární, což má za následek mírnou navlhavost. [7] Rovnovážný stav při 50 % relativní vlhkosti je $0,22 \div 0,28$ %, po 24 hod ve vodě $0,25 \div 0,32$ % a rovnovážný stav při trvalém ponoření do vody $0,9 \div 1,4$ %. [8] Dalším vlivem kyslíku je hořlavost. POM je silně hořlavý (viz tab. 2.2), odolnost vůči hoření nelze zvýšit ani přísadami. Jak homopolymer, tak kopolymer jsou bez stabilizace náchylné na UV záření. POM poměrně dobře odolává rozpouštědlům, kvůli jeho polaritě je však rozkládán silnými kyselinami. Při teplotách nad 220 °C dochází k jeho rozkladu na těkavý a toxický formaldehyd a k degradaci polymeru. [7]

Tab. 2.2: Hodnota kyslíkového čísla pro vybrané termoplasty [7]

Polymer	Zkratka	OI [obj. %]
Polyoxymethylen	POM	15
Polymethylmetakrylát	PMMA	16
Polyethylen	PE	17
Polypropylen	PP	17
Polystyren	PS	18
Polyethylentereftalát	PET	23
Polyamid 6	PA 6	23
Polyamid 66	PA 66	27
Polykarbonát	PC	28
Polysulfon	PSU	32
Polyetheretherketon	PEEK	35
Neměkčený polyvinylchlorid	PVC-U	47
Chlorovaný polyvinylchlorid	PVC-C	65

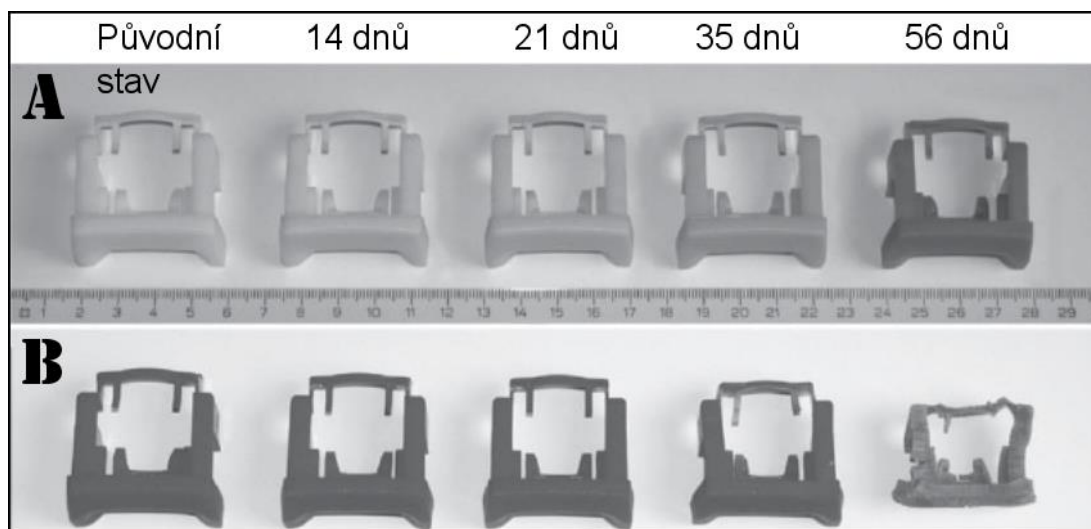
Poznámka: Polymery s $OI < 26$ [obj. %] lze označit za snadno hořlavé, polymery s $OI < 21$ [obj. %] dokonce za silně hořlavé, je-li $OI > 28$ [obj. %] lze tyto polymery považovat za samozhášivé.

Většina typů polyoxymethylenu je stabilizována proti termo-oxidační degradaci, avšak dlouhodobé vystavení zvýšené teplotě po delší dobu může zhoršovat tvarové, rozměrové a mechanické vlastnosti výstřiků a případně i barvu výstřiků. Termální stabilita POM může být testována vystavením výrobku zvýšeným teplotám po určitou dobu, tzv. stárnutím, typicky v rozsahu



110 ÷ 150 °C nebo 200 ÷ 230 °C. První rozsah teplot poskytuje informaci o stabilitě co do barvy, úbytku hmotnosti, mechanických vlastnostech, druhý (vyšší) rozsah teplot pak o stabilitě vlastního procesu výroby dílu. [9]

Výsledky testování termální stability dvou rozdílných typů polyoxymethylenu, používaných v automobilovém průmyslu jsou ukázány na obr. 2.6. Jedná se o tlačítko pro uvolnění přezky bezpečnostního pásu, to bylo vystaveno teplotě 140 °C po dobu 56 dnů, za přístupu vzduchu. Na Obr. 2.6 je na první pohled vidět změna barvy (zžnědnutí) a deformace tvaru. [9]



Obr. 2.6: Vliv dlouhodobé výdrže na vysoké teplotě na díl z POM [9]

A - nebarvený POM-C s UV stabilizátorem

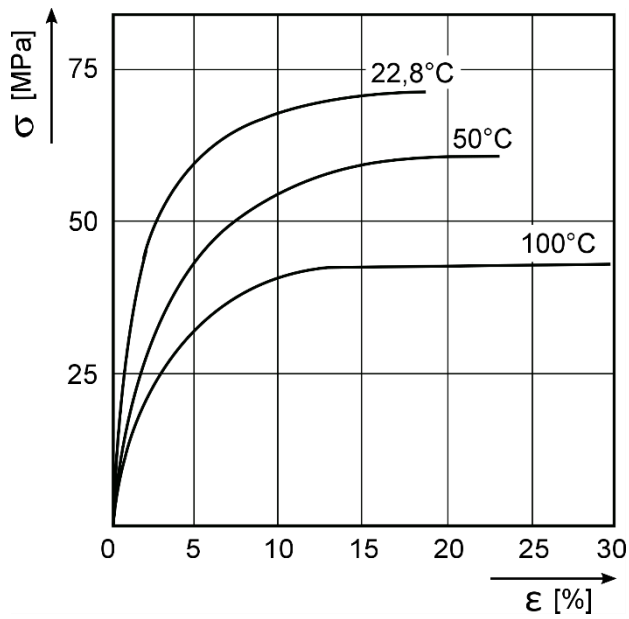
B - barvený (červený) tepelně stabilizovaný POM-H

2.1.4 Mechanické vlastnosti polyoxymethylenu

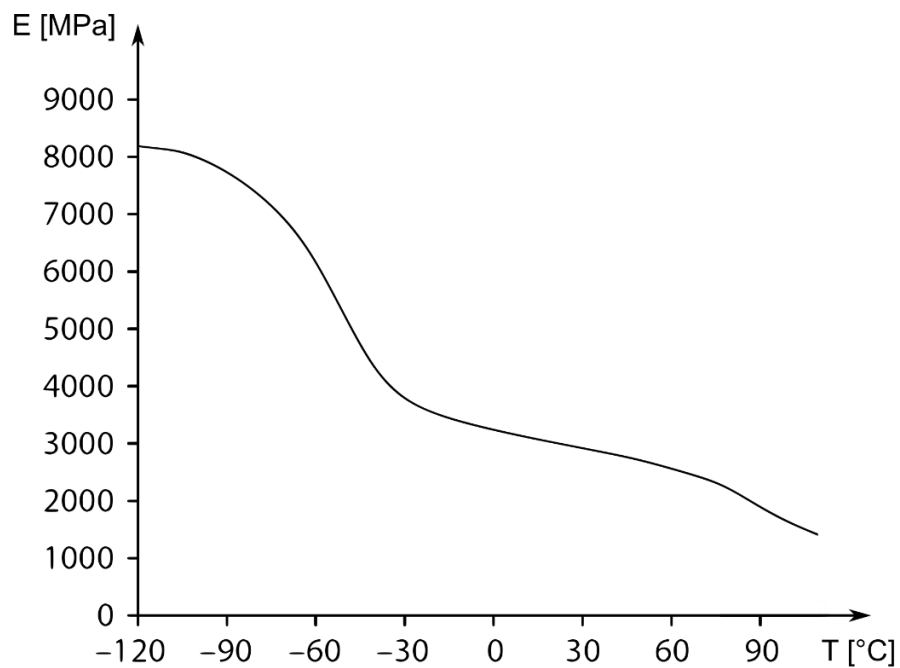
Polyoxymethylen je vzhledem ke svým mechanickým vlastnostem (viz tab. 2.3) vhodný pro konstrukční aplikace. Mezi jeho další přednosti patří odolnost proti krípu a nárazům, také má velmi dobré kluzné vlastnosti (nízký koeficient tření viz tab. 2.4 a dobrou otěruvzdornost). Za normální teploty má polyoxymethylen pevnost v tahu 62 ÷ 70 MPa a celkovou tažnost kolem 15 %. [4] [7] S rostoucí teplotou se pevnost v tahu snižuje, celková tažnost naopak roste. Při teplotách okolo 100 °C dosahuje tažnosti 350 ÷ 500 %. [10] Vliv teploty na tažnost a pevnost v tahu je znázorněn na obr. 2.7. Na pevnost v tahu nemá podstatný vliv vlhkost. Při zvýšení relativní vlhkosti prostředí z 0 na 100 % se modul pružnosti v tahu sníží o 20 %. [4] Modul pružnosti v tahu se blíží 3 GPa, na tuto hodnotu má však značný vliv stupeň krystalinity, který se může



pohybovat od 60 do 85 %. [11] Vliv teploty na modul pružnosti v tahu je znázorněn na obr. 2.8.



Obr. 2.7: Tahový diagram POM při různých teplotách (dle normy ASTM D - 638) [10]



Obr. 2.8: Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě [11]



Tab. 2.3: Přehled typických mechanických vlastností [4] [10] [12]

Mez pevnosti v tahu	70	MPa
Mez pevnosti v ohybu	100	MPa
Mez pevnosti ve smyku	65	MPa
Vrubová houževnatost	7,5	kJ/m ²
Modul pružnosti v tahu	2900	MPa
Modul pružnosti v ohybu	2600	MPa
Modul pružnosti ve smyku	1200	MPa
Tvrdoost podle Rockwella	90/120	M/R

Tab. 2.4: Koeficient tření POM ve styku s ocelí [4]

Teplota okolí [°C]	Mazivo	Koeficient statického tření	Koeficient dynamického tření
22,8	-	0,1 ÷ 0,3	0,1 ÷ 0,3
121,1	-	0,1 ÷ 0,3	0,1 ÷ 0,3
22,8	voda	0,2	0,2
22,8	olej	0,05 ÷ 0,1	0,05 ÷ 0,1

Podmínky: tlak $3,43 \times 10^{-4} \div 17,27$ MPa, rychlost posuvu $2,4 \div 112$ m/min

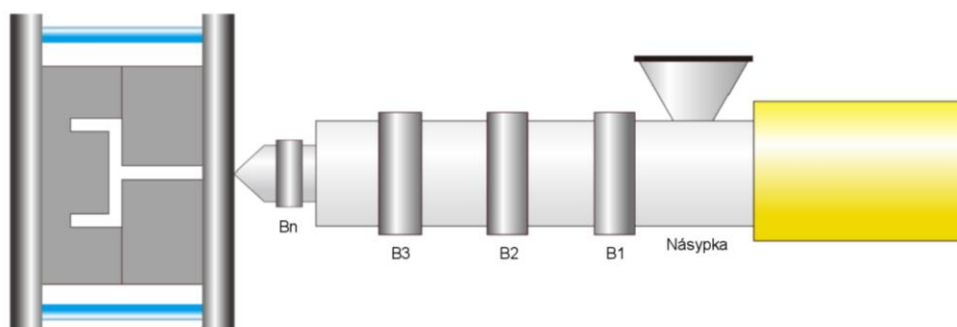
2.1.5 Zpracování polyoxymethylenu

Polyoxymethylen je polymer s úzkým rozsahem zpracovatelských teplot, teplota tání je 165 až 185 °C. [6] Na teplotě taveniny závisí i přípustná doba setrvání POM v tavicí komoře, při nižších teplotách je to max. 15 minut, při vyšší teplotě max. 10 minut. [13] Při vyšší teplotě (nad 220 °C) a delší prodlevě dochází k degradaci POM a uvolňování plynných produktů (formaldehydu) [7], jež jsou toxické, je tedy nutné, aby byly teploty a časy zpracování respektovány, jinak může dojít k ohrožení obsluhy. Nižší koncentrace formaldehydu dráždí oči a dýchací cesty, se zvyšováním koncentrace nastává kašel, slzení, kýchání, bolesti hlavy, nucení na zvracení a dušnost. Vyšší koncentrace mohou vést i k podráždění kůže, ekzémům, poškozena může být centrální nervová soustava, játra a ledviny. [14]



Vstřikování

Vstřikování je jedna z nejrozšířenějších technologií v plastikářském průmyslu, jež je využívána pro širokou škálu, často tvarově složitých výrobků (výstřiků). Pro vstřikování polyoxymethylenu je doporučován nízký zpětný odpor šneku (0 až 20 bar - tlak v hydraulickém systému), nízká obvodová rychlost šneku (tekuté typy 0,3 m/s, při nízké tekutosti 0,2 m/s). Příklad nastavení vstřikovacího stroje pro zpracování POM, je uvedeno na obr. 2.9. Při přerušení vstřikování je nutné vyprázdnit tavící komoru a snížit teplotu na 150 °C. Při odstavení stroje je vhodné vyčistit tavící komoru čistícím materiálem, použít lze například přírodní PS nebo HDPE. Dojde-li k nouzovému odstavení stroje (např. z důvodu výpadku elektrické energie), pro opětovné rozjetí se doporučuje nejprve ohřát trysku, což umožní odchod plyných zplodin degradovaného materiálu, následně ohřát celou tavící komoru na cca 150 ÷ 170 °C (časová prodleva cca 5 ÷ 10 min), ohřev na pracovní teplotu a vyprázdnění komory. Při čištění od degradovaného materiálu, se do okolí uvolňuje nepříjemný zápach, proto je důležité dobré odvětrávání. [8]



Sušení

Maximální vlhkost: 0,1%

Teploty

Forma	Bn (Tryska)	B3 (Dávkování)	B2 (Komprese)	B1 (Vstup)	Násypka
60+80 °C	180+200 °C	190+200 °C	180+190 °C	170+180 °C	60+80 °C

Plastifikace

Rychlost šneku: 150+200 mm/s
Zpětný tlak: max. 20 bar

Obr. 2.9: Doporučené parametry pro vstřikování materiálu Kepital F30-03 [15]

Poznámka: Je vhodné používat otevřenou trysku, čímž lze předejít hromadění plyných zplodin v tavící komoře.



Vytlačování

Vytlačování neboli extruze, je kontinuální proces, při kterém jsou za pomoci vytlačovací hubice vyráběny profily, trubky, desky a fólie. Některé doporučené parametry pro vytlačování vybraných POM jsou uvedeny v tab. 2.5. Desky a tyče z POM bývají často polotovarem pro obrábění. Příklady vytlačovaných tyčí, desek viz obr. 2.10 a obrobků z POM viz obr. 2.11.

Tab. 2.5: Doporučené parametry pro vytlačování vybraných materiálů [16]

		Celcon	Ultraform	Delrin	Tarnoform
Délka šneku a jednotlivých zón	Celková délka	24 D	20 ÷ 25 D	-----	20 ÷ 25 D
	Vstupní zóna	-----	8 D	-----	8 ÷ 9 D
	Kompresní zóna	-----	3 ÷ 5 D	-----	3 ÷ 5 D
	Dávkovací zóna	-----	9 ÷ 12 D	-----	9 ÷ 10 D
Teplota tání [°C]		180 ÷ 205	166	205 ÷ 225	175 ÷ 185
Rychlost šneku [ot./min]		33	42	-----	40
Teplota vytlačovací hlavy [°C]		230	175	-----	-----

Poznámka: D je průměr šneku



Obr. 2.10: Tyče a desky z POM [17]



Obr. 2.11: Obrobky z POM [18]



2.1.6 Aplikace polyoxymethylenu

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 2.1.4, POM se řadí mezi konstrukční plasty a je použitelný pro aplikace v teplotním rozsahu -30 až 150 °C (krátkodobě), dlouhodobě odolává teplotám do 110 °C. [7] Využití nachází jak v automobilovém průmyslu, tak i v dalších strojírenských oblastech. (příklady viz obr. 2.12)



Obr. 2.12: Příklady výrobků z polyoxymethylenu

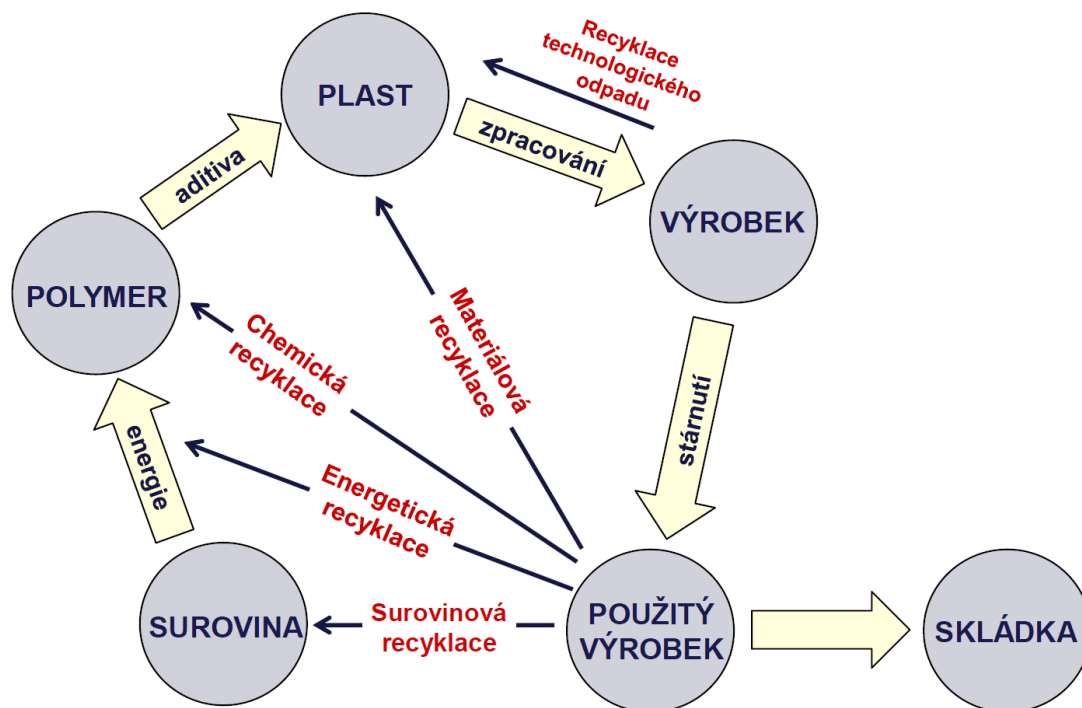
- 1 Horní kryt rotační části podvolantového modulu
- 2 Odpružený šroub s kuličkou [19]
- 3 Kuličkové ložisko se skleněnými kuličkami [20]
- 4 Ozubené kolo [21]

2.2 Recyklace plastů

Pod pojmem recyklace plastů se skrývají procesy umožňující opětovné využití plastového odpadu, ať už se jedná o obalové materiály, výrobky po uplynutí jejich životnosti či technologický odpad vzniklý při samotné výrobě plastových dílů. Tyto procesy skýtají hned několik alternativ, jak lze plastový odpad zužitkovat. Recyklací plastů lze získat materiál pro opětovnou výrobu plastového dílu, ať už pro původní aplikaci, či pro zcela jinou. Dále lze získávat



tepelnou energii nebo rozličné, z pravidla nízkomolekulární, hodnotné produkty. Recyklační cyklus je znázorněn na obr. 2.13. Vhodnost pro výše uvedené možnosti recyklace je dána chemickou podstatou polymeru, použitými plnivy, degradací polymeru, stupněm znečištění a v neposlední řadě úrovní třídění.



Obr. 2.13: Schéma recyklačního cyklu [22]

2.2.1 Energetická recyklace

Při energetické recyklaci prochází směsný plastový odpad kontrolovaným spalováním. Takto produkované teplo může být použito jako náhrada za teplo, jež je vyráběno spalováním uhlí, plynů či olejů. Plastové výrobky mají přibližně stejnou energetickou hodnotu jako ropa z níž jsou vyrobeny. Energetická recyklace tak může sloužit jako nástroj ke snížení spotřeby fosilních paliv pro produkci tepla. Aby bylo dosaženo co nevyšší ekonomické efektivity, je nutno využívat spalovny poměrně velkých rozměrů a spalovat velký objem směsného polymerního odpadu. [12] Touto technologií recyklace lze efektivně zhodnotit plastový odpad, který je kontaminovaný, silně znečištěný či obtížně separovatelný a nelze ho pomocí materiálové ani surovinové recyklace využít. [23]



Ekologické hledisko tohoto recyklačního postupu, bývá zpochybňováno z obav úniku nebezpečných látek do okolního prostředí. Je pravdou, že k produkci toxických či korozních látek může vskutku docházet. Například při hoření PVC dochází k uvolňování chlorovodíku či kyseliny chlorovodíkové, avšak díky konstrukci topenišť a technologickým podmínkám, jsou ekologicky závadné produkty ze směsi spalin vhodně neutralizovány převedením na pevnou formu (viz tab. 2.6). Spalování probíhá v uzavřeném cyklu a k úniku emisí do ovzduší prakticky nedochází. Pevný produkt v podobě popelu musí být stále umístěn na skládku avšak hmotnost odpadu je zredukována až o 90 %. [12] Energetická recyklace je hojně využívána například v Japonsku, které je jednou z nejúspěšnějších zemí co se recyklování plastů týče. [23] V roce 2010 zde bylo zrecyklováno 77 % plastového odpadu. [24]

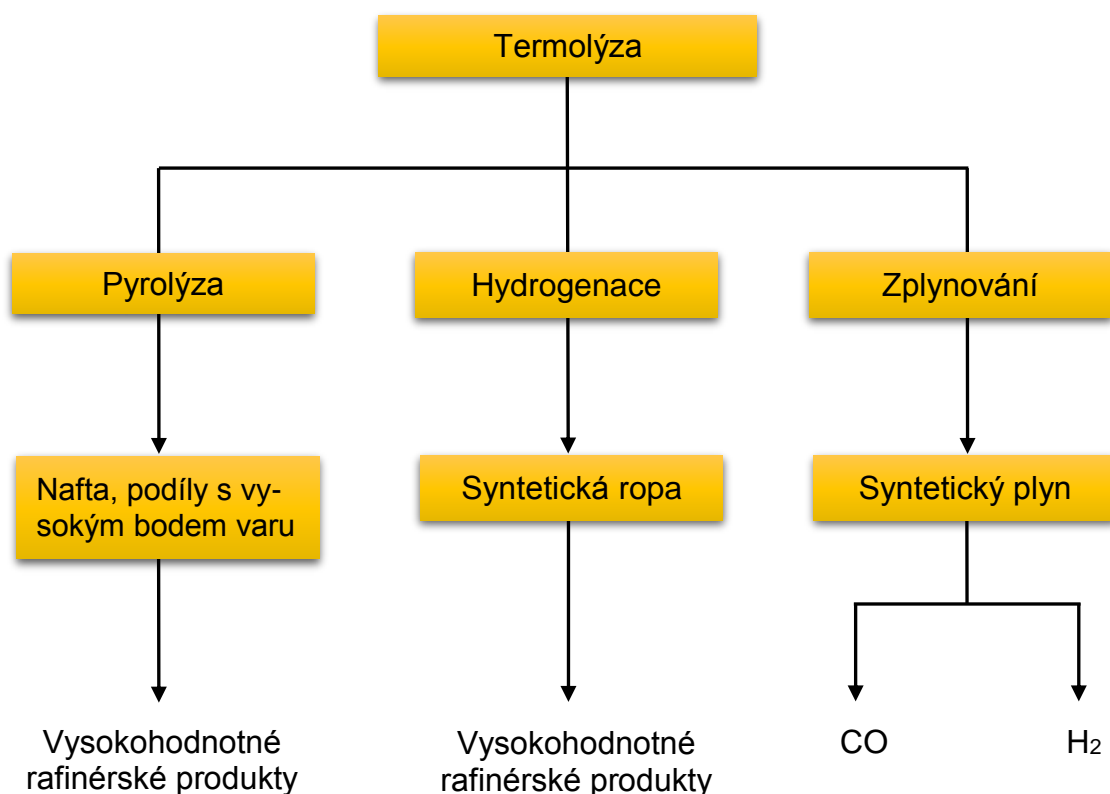
Tab. 2.6: Příklady produktů při spalování plastů [12] [22]

Materiál	Produkt spalování	Neutralizovaná pevná forma
PVC	chlorovodík	chlorid vápenatý
PA	oxidy dusíku	dusíkaté soli
Pryž	síra	síran vápenatý
PP	oxid uhličitý a voda	

2.2.2 Surovinová recyklace

Surovinová recyklace představuje skupinu termických a chemických postupů, jejichž výslednými produkty jsou nízkomolekulární uhlíkové frakce, oleje a plyny, které jsou vhodné na přípravu nových polymerů, nebo jako alternativní palivo. Tyto recyklační postupy jsou vhodné pro zpracování silně znečištěného odpadu, pro který není z ekonomických, nebo technologických důvodů vhodná materiálová recyklace. Plastový odpad lze zpracovat přímo, bez jakékoliv úpravy, není potřeba třídění ani čištění. Problémem není ani obsah kovu či dalších příměsí. Efektivnost využití plastového odpadu je 55 ÷ 70 %. [23] Přehled termických postupů surovinové recyklace je znázorněn na obr. 2.14.





Obr. 2.14: Přehled termických postupů surovinové recyklace [23]

Pyrolýza

Jedná se o proces chemicko-tepelného rozkladu, který obecně vede k získání nízkomolekulární látky. Pyrolýza probíhá v inertní atmosféře, obvykle za atmosférického tlaku. V případě, že jsou žádoucí produkty teplotně nestabilní, provádí se pyrolýza i při nižším tlaku, než je atmosférický. Příkladem je pyrolýza pryže nebo styrenových plastů, které snadno repolymerizují. Z hlediska teploty lze pyrolýzu plastů rozdělit na nízko (<400 °C), středně (400 ÷ 600 °C) a vysokoteplotní (>600 °C). [25] Proces pyrolýzy je schematicky znázorněn na obr. 2.15.

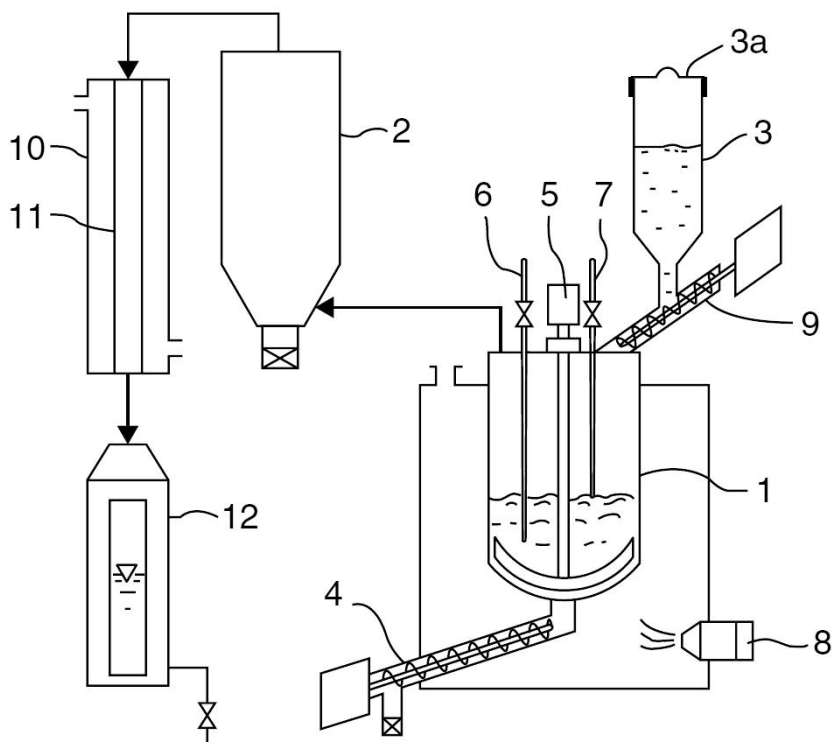
Produktem termického rozkladu polymerů jsou plyny a destiláty, využitelné v petrochemickém průmyslu, ale také monomery vhodné pro přípravu nových polymerů nebo jako paliva. Příklady těchto produktů jsou uvedeny v tab. 2.7. Proces pyrolýzy zahrnuje štěpení vazeb, jedná se často o endotermický jev, je tedy nutné zajistit přívod tepla. [25]



Tab. 2.7: Možné produkty tepelného rozkladu [25]

Polymer	Typ termálního rozkladu	Nízkoteplotní produkty	Vysokoteplotní produkty
PE	Náhodné štěpení řetězce	Vosky, parafinové oleje, α olefiny	Plyny a lehké oleje
PP	Náhodné štěpení řetězce	Vazelína, olefiny	Plyny a lehké oleje
PVC	Eliminace HCl z řetězce, dehydrogenizace a cyklení řetězce	HCl (<300 °C), benzen	Toluen (>300 °C)
PS	Kombinace odzipování a štěpení řetězce, tvorba oligomerů	Styren a jeho oligomery	Styren a jeho oligomery
PMMA	Odzipování	MMA	Méně MMA, více se rozkládá
PTFE	Odzipování	Monomer	TFE
PET	Transfěr β vodíku, přeskupení a dekarboxylace	Kyselina benzoová a vinyl tereftalát	
PA 6	Odzipování	Kaprolaktam	





Obr. 2.15: Schéma typického procesu pyrolýzy [25]

1 Pyrolyzační nádoba s míchacím zařízením; 2 Katalyzační komora; 3 Ná-sypka se vstupním platem; 4 Šnek k odstranění pevného zbytku; 5 Motor mí-chacího zařízení; 6,7 Teplotní čidlo; 8 Hořák; 9 Šnek pro dopravu vstupního platu; 10 Chladicí plášť; 11 Kondenzátor; 12 Sběrná nádrž

Hydrogenace

Hydrogenace je ohřev za přítomnosti katalyzátoru ve vodíkové atmo-sféře. Jedná se o zajímavou možnost, jak lze štěpit polymerní řetězce. Díky vodíku dochází k odstranění atomů chlóru, dusíku a síry, které se mohou vy-skytovat v plastovém odpadu. Hydrogenace má však i několik nevýhod, hlavní z nich je cena vodíku a nutnost přetlaku. [12] [26]

Ačkoliv byly představeny i procesy hydrogenace bez katalyzátoru, vět-šina vyžaduje katalyzátor k propagaci dodatečných vodíkových reakcí. Jsou preferovány bifunkční katalyzátory, které zajišťují proces štěpení i hydroge-nace/dehydrogenace. Typické katalyzátory obsahují vodivé kovy (platinu, nikl, molybden, železo atd.). [26]



Alternativou je také společné zpracování (tzv. koprocesing) uhlí s plastovým či pryžovým odpadem v atmosféře vodíku. Výhodný je poměr vodík/uhlík, který je u většiny plastů vyšší než u uhlí. Primární výhodou je snížení spotřeby vodíku. [26]

Chemická recyklace

Chemická recyklace neboli solvolýza zahrnuje depolymerační postupy, jejichž výsledným produktem jsou nízkomolekulární látky (oligomery nebo monomery), které lze použít pro přípravu nových polymerů. Solvolytické postupy je vhodné použít při recyklaci polymerů, které v základním řetězci obsahují kyslík, dusík, křemík, polyestery, polyamidy, polyuretany či polykarbonáty. Solvolytické postupy jsou ekonomicky a technologicky výhodné zejména v automobilovém průmyslu, neboť právě zde jsou používány plasty pro tyto postupy vhodné. [23]

Jako příklad lze uvést chemickou recyklaci polyoxymethylenu. Tento proces probíhá za zvýšené teploty a tlaku, nejčastěji $140 \div 160$ °C a $0,3 \div 0,5$ MPa. Za přítomnosti vody, polyoxymethylenu a katalyzátoru (např. kyseliny sírové) je vytvořena kaše, ve které se vlivem teploty, tlaku a kyseliny polyoxymethylen rozkládá na formaldehyd, v omezené míře může docházet i k tvorbě trioxanu. Obsah polyoxymethylenu v kaši je v ideálním případě $50 \div 75$ hm. %. POM není před vlastním procesem potřeba čistit od samolepek, kovových částí atd. ty jsou v následných krocích jednoduše odfiltrovány. [27]

2.2.3 Materiálová recyklace

Materiálovou, neboli fyzikální, recyklaci lze dle zdroje vstupní suroviny rozdělit na primární recyklaci a sekundární recyklaci. Pojem primární recyklace je označován recyklací tzv. technologického odpadu. [23] Jedná se o odpad vzniklý při technologickém procesu vstřikováním, především pak o vtokové zbytky a zmetkové výrobky. Technologický odpad může být zdrojem relativně kvalitních materiálů. Zdrojem vstupního plastu pro sekundární recyklaci je komunální (užitkový) odpad, který zahrnuje plastové výrobky, které již dosáhly své doby životnosti (domácí spotřebiče, automobily, spotřební zboží, elektroniku atd.) a plastové výrobky na jedno použití (především jde o obaly, typickým příkladem jsou PET lahve). [23] [13] Komunální odpad bývá obvykle znečištěn (prach, mastnota atd.) a polymer je více či méně znehodnocen stárnutím (ztráta pevnosti, houževnatosti, často i barevné změny). [13]



Primární materiálová recyklace

Kvalita druhotného materiálu závisí na technologické kázni při jeho sběru a přípravě k dalšímu zpracování. Pro vstřikování plnohodnotných výrobků připadá v úvahu především homogenní odpad, tj. odpad tvořený jedním konkrétním typem materiálu. [13] Tento odpad lze zpracovávat do podoby drtě nebo regenerulátu, obě formy se dále používají obdobně jako běžný granulát.

Drť

Použití drceného materiálu (viz obr. 2.16) je výhodné s ohledem na stabilitu taveniny, drť totiž není tepelně namáhána regenerulací, čehož je s výhodou využíváno především u tepelně citlivých polymerů (např. polymethylmetakrylátu) a u polymerů vystužených vláknennými plnivými (při regenerulaci recyklovaný materiál prochází šnekem, což má za následek zkracování vláken). [13] Nevýhodou drtě je nerovnoměrná velikost drcených (mletých) částí a zvýšený obsah prachového podílu. To může způsobovat problémy při plastifikaci. Konkrétně může docházet k tvorbě klenby v násypce vstřikovacího stroje a v krajním případě způsobit ucpání otvoru do šneku vstřikovací jednotky. Tuto nevýhodu však lze z velké části potlačit použitím pomaloběžných mlýnů (s výhodou se používají nožové mlýny s otáčkami rotoru do 200 min^{-1}). Protože se mohou v drti ojediněle vyskytnout kovové částice, doporučuje se při vstřikování používat magnety, jež jsou umístěny v násypce a v případě horkých trysek a rozvodů též vhodná síta. [13] Zpracování odpadu může být realizováno buď v uzavřeném, nebo otevřeném cyklu.



Obr. 2.16: Drť [28]



Uzavřený cyklus

Recyklační jednotka (mlýn, manipulátor, ad.) je umístěna přímo na vstřikovací stroji. Velikost drtě je stanovena za pomoci sít, dopravním zařízením drť postupuje k mísiči, kde je smíchána s originálním materiálem. Na obr. 2.17 je znázorněno složení zpracovávané dávky materiálu, po šesti průchodech strojem. Nejprve je zpracováno 100 % originálního materiálu, z odpadu je vždy odebráno 20 % a přidáno 80 % originálního materiálu. Takto smíchaný materiál je znovu zpracován. Tento postup se opakuje až do získání 0,01 % šestkrát zpracovávaného recyklátu. [22]

Průchod materiálu strojem	Procentuální složení dávky
0	100 ₍₀₎
1	20 ₍₁₎ / 80 ₍₀₎
2	4 ₍₂₎ / 16 ₍₁₎ / 80 ₍₀₎
3	0,8 ₍₃₎ / 3,2 ₍₂₎ / 16 ₍₁₎ / 80 ₍₀₎
4	0,2 ₍₄₎ / 0,6 ₍₃₎ / 3,2 ₍₂₎ / 16 ₍₁₎ / 80 ₍₀₎
5	0,04 ₍₅₎ / 0,12 ₍₄₎ / 0,64 ₍₃₎ / 3,2 ₍₂₎ / 16 ₍₁₎ / 80 ₍₀₎
6	0,01 ₍₆₎ / 0,02 ₍₅₎ / 0,13 ₍₄₎ / 0,64 ₍₃₎ / 3,2 ₍₂₎ / 16 ₍₁₎ / 80 ₍₀₎

Obr. 2.17: Recyklační pyramida uzavřeného cyklu [22]

100₍₀₎ – hodnota 100 označuje procentuální množství materiálu, dolní index ukazuje, kolikrát bylo toto procentuální zastoupení recyklátu opětovně zpracováno. Je-li uvažován uzavřený cyklus recyklace, dávka by obsahovala 0,01% 6x recyklovaného odpadu, 0,02% 5x, 0,13% 4x, 0,64% 3x recyklovaného odpadu, atd. Při vyšším počtu cyklů hrozí zhoršení mechanických vlastností výrobku, nelze pak zaručit kvalitu výrobků.

Firma DuPont, která je výrobcem materiálu Delrin (POM-H), popisuje vliv procenta recyklátu na vybrané mechanické vlastnosti v závislosti na počtu průchodů materiálu Delrin vstřikovací strojem. Test byl vykonán za účelem stanovení maximální přípustné procentuální hodnoty recyklátu Delrinu při uzavřeném cyklu recyklace a spočíval v deseti průchodech 100% recyklátu a 50%



recyklátu strojem. Výsledky testu jsou uvedeny v tab. 2.8, pro běžnou praxi však firma DuPont doporučuje používání 20% recyklátu. [22]

Tab. 2.8: Vliv recyklátu na mechanické vlastnosti při 10 průchodech materiálu strojem [22]

Vlastnosti materiálu	100% recyklátu	50% recyklátu
Tok taveniny	nárůst (méně než 10%)	nárůst (méně než 2%)
Pevnost v tahu	beze změny	beze změny
Vrubová houževnatost	snížení (o 20%)	snížení (o 2%)

Otevřený cyklus

Recyklační jednotka je umístěna mimo vstřikovací stroj, odpad je ukládán do připravených kontejnerů a dopravován k mlýnu a následně drcen. Drť je pneumaticky dopravována ke stroji. Nevýhodou je nebezpečí selhání technické kázně obsluhy – nebezpečí kontaminace odpadu. [22]

Regranulát

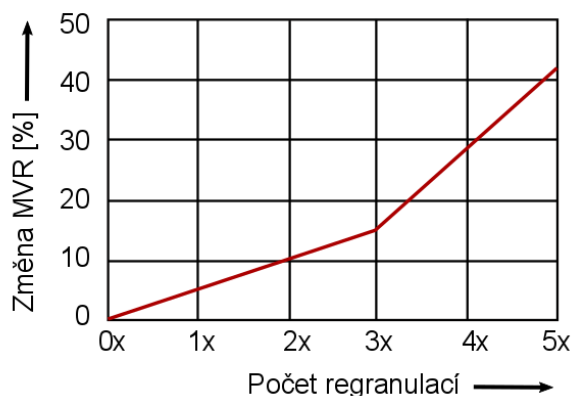
Regranulovaný materiál má v porovnání s drtí rovnoměrnou velikost. Nejčastěji je regranulát zpracováván společně s panenským materiálem a to v daném poměru. Výroba jen z regranulátu se obecně nedoporučuje. Je vhodné, aby měly granule regranulátu a panenského materiálu stejný tvar a rozměry. Jeli transportována směs panenského granulátu a regranulátu, může dojít k jejich separaci, následkem čehož by směs vstupující do stroje měla proměnlivou koncentraci (v extrémním případě až 100 % regranulátu), to může být příčinou nestability procesu a zmetkovitost.

Při regranulaci jsou často přidávána aditiva jako antioxidanty, deaktivátory kovů (pozn.: brání degradaci polymeru oxidací katalyzovanou kovovými ionty), tepelné stabilizátory, modifikátory rázové houževnatosti a modifikátory viskozity. Přidáním vhodných aditiv lze degradaci polymeru kompenzovat a docílit konzistentních vlastností. [12]

Nevýhodou regranulace oproti pouhému drcení (mletí) je zvýšené tepelné a smykové namáhání materiálu a s tím spojená energetická náročnost procesu. [13] Materiál při zpracování prochází fyzikálními a chemickými pro-



cesy, které vedou ke změně struktury a složení, to může mít za následek degradaci materiálu. Degradace polymerů závisí na obsahu a typu stabilizátorů, vlhkosti, teplotě vstřikování a době prodlevy materiálu v tavicí komoře. [29] Kritickým faktorem při regranulaci polyoxymethylenu je právě tepelné namáhání materiálu, které přináší riziko degradace a tím změnu jak tokových tak mechanických vlastností výsledného regranulátu. Vliv regranulace POM, konkrétně Hostaformu C 13021 na index toku taveniny je znázorněn na obr. 2.1.



Obr. 2.18: Nárůst MVR polyoxymethylenu s počtem recyklací [13]

Při materiálové recyklaci POM mírně vzrůstá tekutost taveniny, materiál si zachovává svoji pevnost i tuhost, výrazněji však klesá tažnost a houževnatost. Z toho vyplývá, že tříděný a kvalitně vstřikovaný drcený či regranulovaný odpad POM lze používat pro většinu pevnostně namáhaných aplikací stejně jako POM originál. Pro výrobky vyžadující vysokou houževnatost je však třeba mísit tento druhotný materiál s originálem POM přibližně v poměru 1 : 1 až 1 : 2. [13]

Sekundární materiálová recyklace

Na rozdíl od primární recyklace, vlastnosti regranulátu připraveného ze znečištěného plastového odpadu se výrazně liší od panenského materiálu, z tohoto důvodu ho lze využít pouze na méně náročné aplikace než původní materiál. [23] Typickým příkladem sekundární recyklace je recyklace PET lahví.



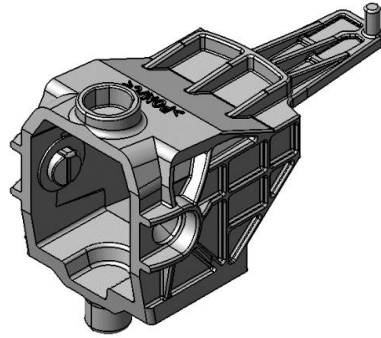
3 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce se zabývá možnostmi optimalizace výrobního procesu vstřikovaného dílu z polyoxymethylenu s využitím regranulátu při jeho výrobě, studiem mechanických vlastností materiálu a rozměrové stálosti reálného dílu v závislosti na množství přidaného regranulátu. V souladu s vytyčenými cíli jsou v experimentální části práce hodnoceny tahové, ohybové a rázové vlastnosti zkušebních těles v závislosti na obsahu regranulátu v hmotnostních procentech. Mechanické vlastnosti polymerů, jsou obdobně jako tekutost taveniny závislé na délce makromolekul, respektive molekulové hmotnosti, kterou lze v technické praxi nepřímou hodnotit stanovením indexu toku taveniny, který je přímo úměrný tekutosti taveniny polymeru. Dalším faktorem, který výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti plastů je jejich nadmolekulární struktura, respektive stupeň krystalinity, který je ovlivněn celou řadou faktorů, včetně délky makromolekul. V technické praxi existuje mnoho metod pro analýzu krystalizace materiálu. Jedna z nich je metoda diferenční snímací kalorimetrie, kdy je stupeň krystalinity pozorován na základě změny entalpie tání, jejíž hodnota je přímo úměrná stupni krystalinity materiálu. Všechny analyzované vlastnosti, respektive vliv přídavku regranulátu, jsou v experimentální části diplomové práce hodnoceny i s ohledem na životnost dílu. Za tímto účelem bylo provedeno umělé stárnutí materiálu, které bylo simulováno vystavením zkušebních těles zvýšené teplotě 150 °C po dobu 500 h dle standardních doporučení podnikových předpisů VW.

3.1 Volba dílu

Ve firmě KOSTAL CR spol. s r.o. je snaha o využití technologického odpadu. Díl podvolantového modulu „Schaltstück“ (viz obr. 3.1) je vyráběn z kopolymeru polyoxymethylenu Kepital F10-03H. (Typické užité vlastnosti materiálu jsou uvedeny v příloze 1.) Polyoxymethylen je náchylný na zvýšené smykové a tepelné namáhání, které může mít za následek degradaci makromolekul a tím i negativně ovlivnit mechanické vlastnosti materiálu, rozměrovou stálost a celkovou kvalitu dílu. Schaltstück je mechanicky namáhaný díl, který umožňuje relativní pohyb stěračové páky vůči tělu podvolantového modulu a jakýkoliv pokles mechanických vlastností, rozměrové stálosti či celkové kvality dílu by mohl vést ke komplikacím při montáži, ke vzniku nežádoucích vůle, hlučnosti či naopak zadržování. Z těchto důvodů je zapotřebí důkladně ověřit případné využití regranulátu pro sériovou výrobu.





Obr. 3.1: 3D model dílu „Schaltstück“

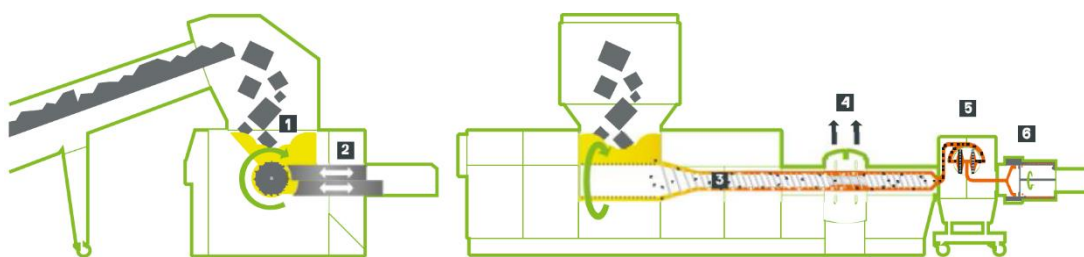
3.2 Výroba regranulátu

Výrobu regranulátu zprostředkovává firma Arexim Engineering EAD. Regranulace probíhá na regranulační lince ISEC101E PureLoop (viz obr. 3.2 a obr. 3.3), vstupní surovinou je výhradně technologický odpad Kepitalu F10-03H produkovaný firmou KOSTAL CR spol. s r.o. Technologické podmínky procesu regranulace jsou know-how firmy Arexim Engineering EAD, z tohoto důvodu nemohou být v experimentální části práce uvedeny.



Obr. 3.2: Regranulační linka ISEC101E PureLoop [30]



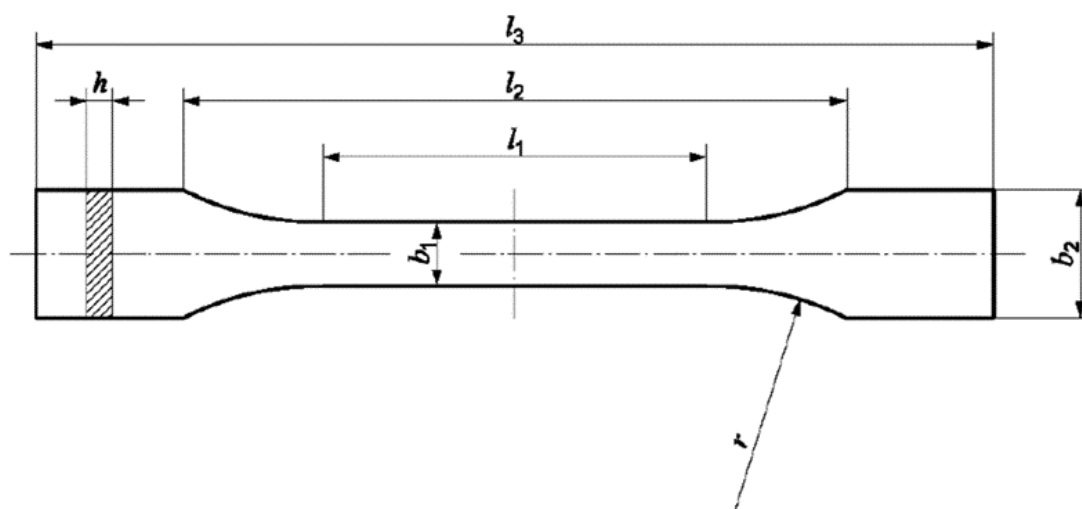


Obr. 3.3: Schéma regranační linky ISEC101E PureLoop [30]

1 Drtič; 2 Podávací systém; 3 Extrudér; 4 Odplyňovací zóna; 5 Automatický samočistící filtr; 6 Granulovací hlava

3.3 Výroba zkušebních těles

Pro účely testování vlivu obsahu regranolátu na mechanické vlastnosti dílu byla vyrobena víceúčelová zkušební tělesa typu A dle ČSN EN ISO 3167 [31] (viz obr. 3.4). Celkem bylo vyrobeno 810 víceúčelových zkušebních těles s řízeným přídavkem regranolátu, viz tab. 3.1. Tato víceúčelová zkušební tělesa byla použita pro hodnocení tahových, ohybových a rázových vlastností.



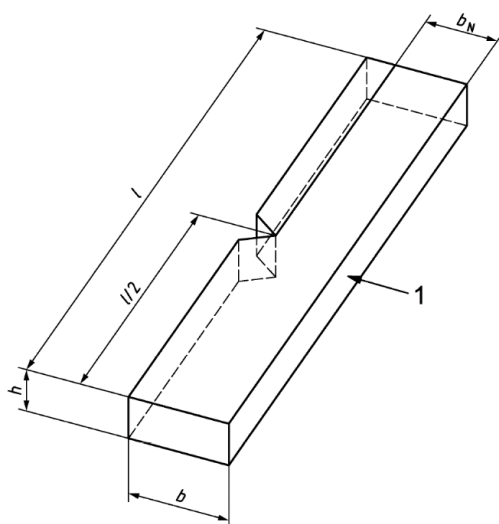
Obr. 3.4: Víceúčelové zkušební těleso typu A dle ČSN EN ISO 3167 [31]

Tab. 3.1: Šarže materiálu pro výrobu zkušebních těles

Obsah regranolátu	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	70 %	90 %	100 %
Vyrobeno ks	90	90	90	90	90	90	90	90	90



Při výrobě víceúčelových zkušebních těles bylo postupováno dle ČSN EN ISO 294-1, za podmínek specifikovaných v předmetové normě ČSN EN ISO 9988-2 a materiálovém listu. Technologické podmínky vstřikování jsou uvedeny v tab. 3.2. Jak panenský materiál, tak regranulát byly před vstřikováním vysušeny v podtlakové sušičce Maguire LPD-22 při teplotě 80 °C a tlaku 0,08 MPa, po dobu 3 hod. Vlastní proces vstřikování byl realizován na vstřikovacím stroji Arburg ALLROUNDER 270 S 400-100 s dvounásobnou dvoudeskovou formou (viz obr. 3.6 a obr. 3.7). Pro stanovení tahových vlastností byla použita víceúčelová zkušební tělesa typu A, pro stanovení ohybových a rázových vlastností byla zkušební tělesa získána obrobením ze střední části víceúčelových zkušebních těles typu A na rozměry 80 x 10 x 4 mm dle ČSN EN ISO 178 a ČSN EN ISO 179-1. Pro stanovení rázových vlastností byla zkušební tělesa opatřena vrubem typu A (viz ČSN EN ISO 179-1). Vruby byly zhotoveny obráběním pomocí vrubovacího zařízení Ceast s digitálním mikrometrem (viz obr. 3.8). Šířka pod vrubem byla 8 mm (viz obr. 3.5). Před vlastním zkoušením byla zkušební tělesa kondicionována při standardních podmínkách 23/50 po dobu min. 16 hodin v souladu s předmetovou normou ČSN EN ISO 9988-2. Za účelem hodnocení vlivu regranulátu na mechanické vlastnosti výstřiků z dlouhodobého hlediska byla polovina vyrobených zkušebních těles umístěna do sušičky s nucenou cirkulací vzduchu Venticell a vystavena teplotě 150 °C po dobu 500 hod. Během této doby dochází k simulaci stárnutí materiálu. Podmínky stárnutí byly zvoleny dle standardních doporučení podnikových předpisů VW a korespondují s experimentem jež je uveden v podkapitole 2.1.3.



Obr. 3.5: Zkušební těleso opatřeno vrubem typu A dle ČSN EN ISO 179-1 [32]

1 směr rázu; l délka; b šířka; h tloušťka; b_N šířka pod vrubem



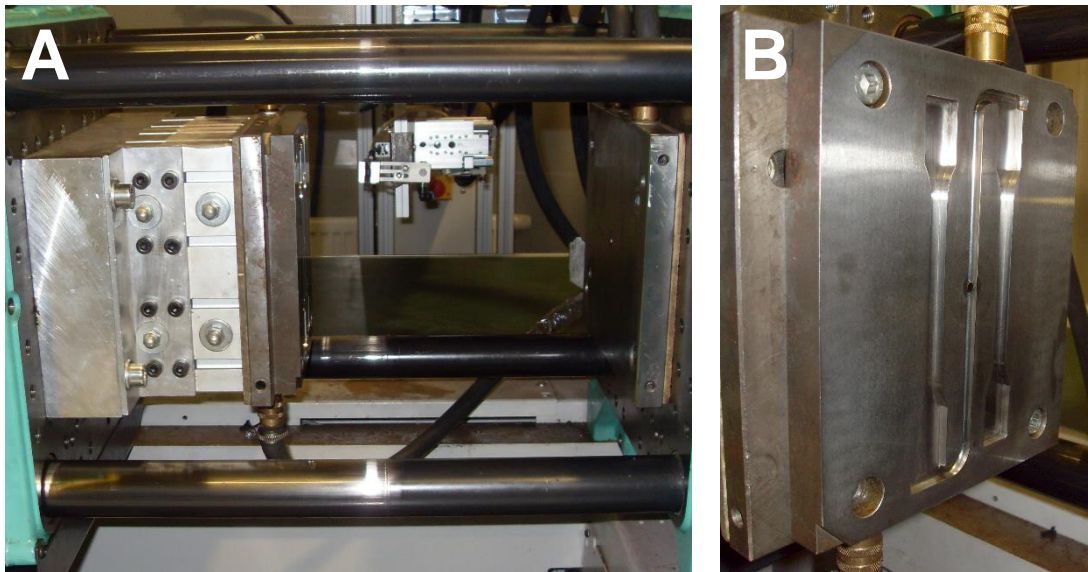
Tab. 3.2: Technologické podmínky vstřikování víceúčelových zkušebních těles

Parametr	Hodnota	Jednotka
Teplota pod násypkou	60	°C
Teplota vstupní zóny tavicí komory	180	°C
Teplota kompresní zóny tavicí komory	190	°C
Teplota dávkovací zóny tavicí komory	200	°C
Teplota trysky	210	°C
Teplota temperačního média formy	80	°C
Doba cyklu	60	s
Doba dotlaku	40	s
Velikost dotlaku	50	MPa
Velikost dávky	40	cm ³
Bod přepnutí na dotlak	14	cm ³
Vstřikovací rychlost	15	cm ³ /s

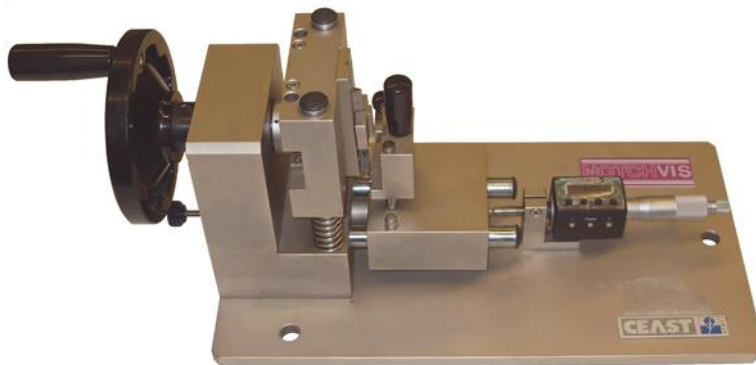


Obr. 3.6: Vstřikovací stroj Arburg ALLROUNDER 270 S 400-100 [33]





Obr. 3.7: Forma pro vstřikování víceúčelových zkušebních těles typu A
 A Vstřikovací forma pro víceúčelová zkušební tělesa typu A upnutá na vstřikovacím stroji
 B Pohyblivá část formy s tvarovou dutinou formy



Obr. 3.8: Vrubovací zařízení Ceast s digitálním mikrometrem



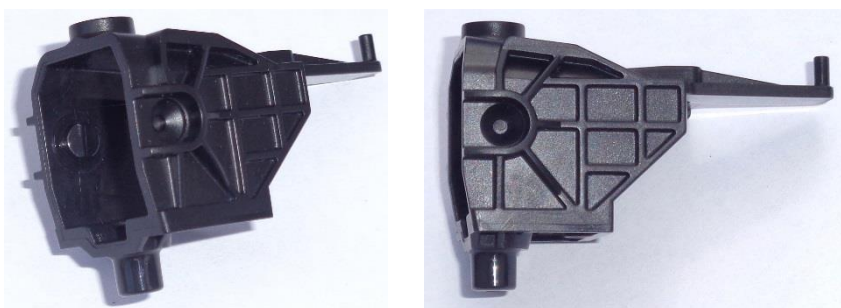
3.4 Výroba reálných dílů

Pro hodnocení rozměrové stálosti reálného dílu (viz obr. 3.9), v závislosti na obsahu regranulátu, byly ve firmě KOSTAL CR spol. s r.o., technologií vstřikování vyrobeny díly s obsahem regranulátu ve vybraných šaržích dle tab. 3.3.

Tab. 3.3: Šarže materiálu pro výrobu vzorků

Obsah regranulátu	0 %	20 %	30 %	50 %	100 %
Vyrobena ks	36*	36	36	36	36

Poznámka: *Vzorky vyrobené z panenského materiálu (0 % regranulátu) byly odebrány ze sériové produkce.



Obr. 3.9: Schaltstück

Jak panenský materiál, tak regranulát byly před zpracováním vysušeny v sušičce Piovan. Doba sušení byla 3 hodiny při teplotě 80 °C. Zbytková vlhkost po sušení byla 0,07 %. (Ověřeno termogravimetrickou metodou pomocí halogenového analyzátoru Kern DBS.) Vlastní proces vstřikování byl realizován na elektrickém bezsloupkovém vstřikovacím stoji ENGEL e-victory 200 s čtyřnásobnou třideskovou formou (viz obr. 3.10 a obr. 3.12), forma má čtyři temperační okruhy, jednotlivé okruhy byly temperovány na 90 °C, 90 °C, 100 °C a 60 °C (viz obr. 3.11). Vstřikování vzorků probíhalo za sériových podmínek. Technologické podmínky vstřikování jsou know-how firmy KOSTAL CR spol. s r.o., z tohoto důvodu nemohou být v experimentální části práce uvedeny. Procesní parametry vstřikování byly pro všechny šarže stejné. Vzorky byly z formy vyjímány pomocí průmyslového robotu Stäubli TX90 osazeného efektoem s aktivními přísavkami (viz obr. 3.13 a obr. 3.14).

Poznámka: Doporučené podmínky sušení materiálu Kepital F10-03H dle materiálové specifikace: 80 ÷ 100 °C po dobu 3 ÷ 4 hod. Zbytková vlhkost materiálu nesmí překročit 0,1 %.



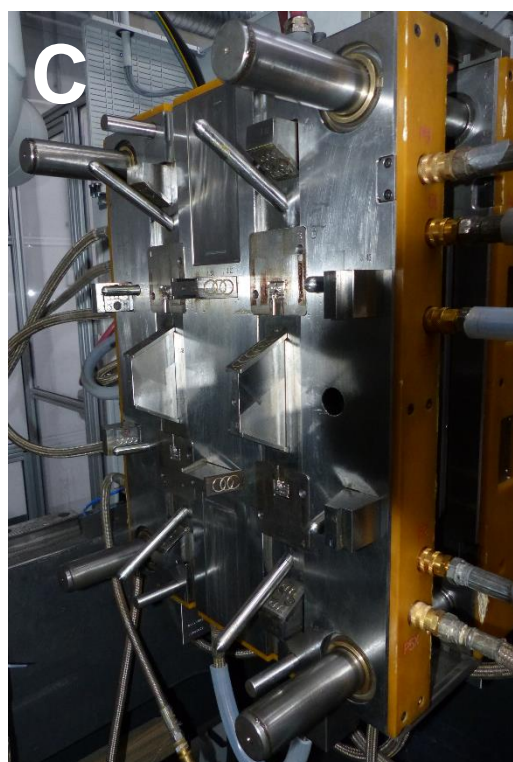
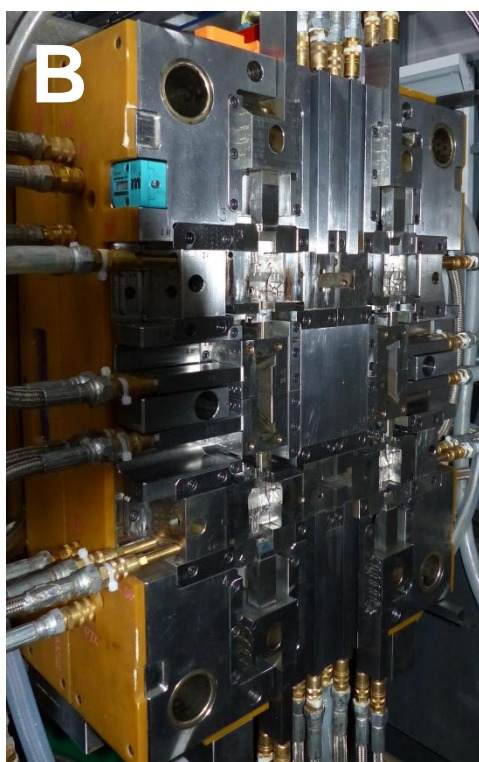
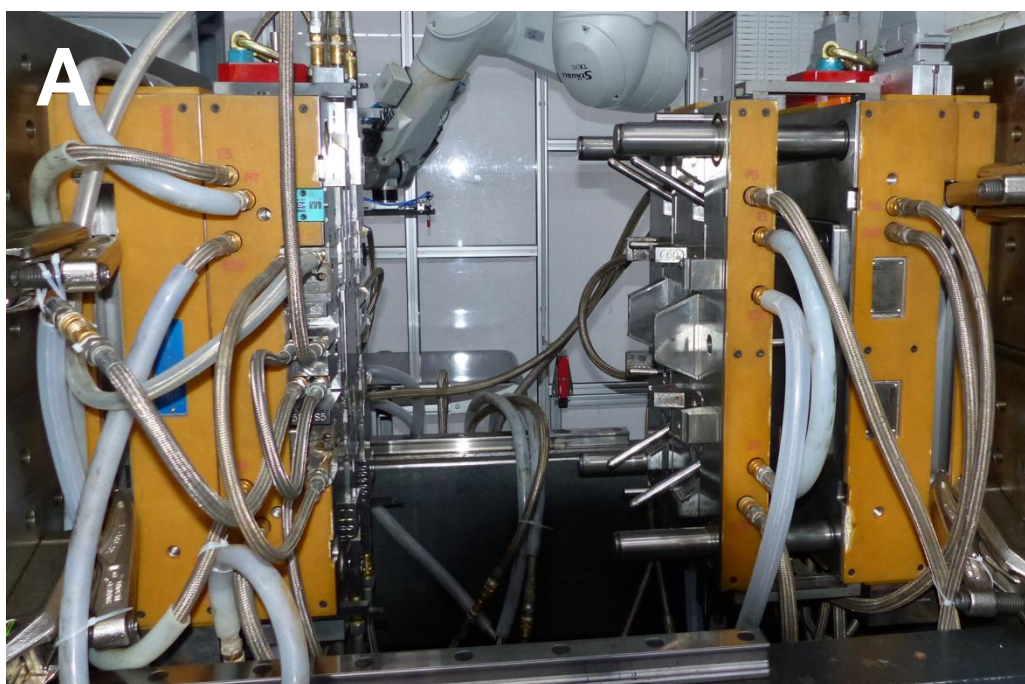


Obr. 3.10: Vstřikovací stroj ENGEL e-victory 200



Obr. 3.11: Temperační zařízení





Obr. 3.12: Forma pro vstřikování dílu „Schaltstück“

A Forma upnutá na vstřikovacím stroji

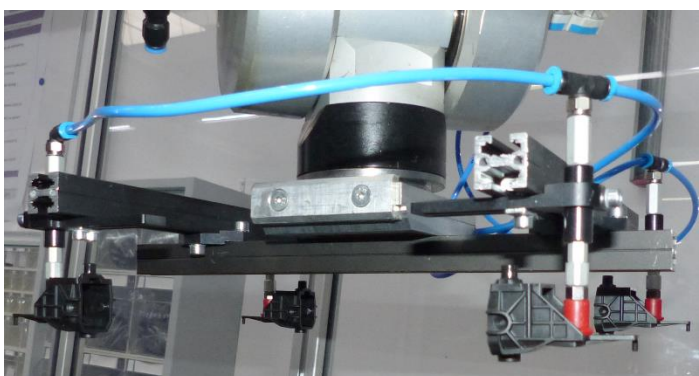
B Pevná část formy

C Pohyblivá část formy





Obr. 3.13: Průmyslový robot Stäubli TX90



Obr. 3.14: Efektor se díly



3.5 Stanovení mechanických vlastností

Přestože je regranulát vyráběn výhradně z technologického odpadu papenského materiálu, může vlivem přílišného tepelného a smykového namáhání může docházet k degradaci polymeru. Zvýšené riziko degradace je z důvodu úzkého rozmezí zpracovatelských teplot právě u polyoxymethylenu. Nedodržení technologických podmínek při regranulaci tak může mít zásadní vliv na mechanické vlastnosti a výslednou kvalitu vyráběného dílu. Tato podkapitola se zabývá vlivem množství přidaného regranulátu na mechanické vlastnosti.

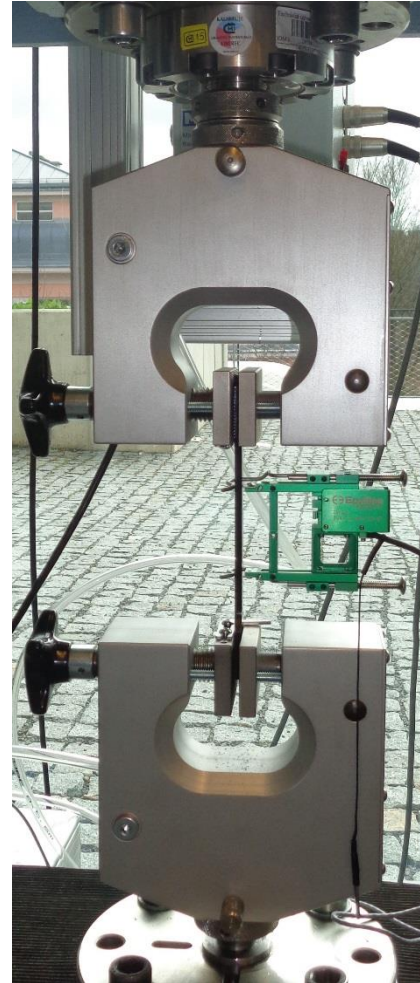
3.5.1 Stanovení tahových vlastností

Tahová zkouška se používá pro stanovení meze pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu a dalších tahových charakteristik. Stanovení modulu pružnosti v tahu probíhalo dle ČSN EN ISO 527-2 pomocí průtahoměru Epsilon 3542-010M-025-ST (viz obr. 3.15). Zkušební tělesa byla protahována ve směru své hlavní podélné osy při konstantní zkušební rychlosti 1 mm/min (odpovídající požadavku dle předmětové normy ČSN EN ISO 9988-2). Stanovení meze pevnosti v tahu a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení probíhalo dle ČSN EN ISO 9988-2 za konstantní zkušební rychlosti 50 mm/min až do porušení. Během zkoušky byly zaznamenávány hodnoty působícího zatížení a prodloužení. Zkoušky byly realizovány na trhacím stroji TIRAtest 2300 (viz obr. 3.15). Zkoušky byly provedeny ve standardním prostředí 23/50, v němž bylo provedeno kondicionování zkušebních těles. Střední hodnoty měřených tahových vlastností materiálu v závislosti na obsahu regranulátu jsou uvedeny v tab. 3.4.

Tab. 3.4: Střední hodnoty tahových vlastností před stárnutím a po stárnutí

Obsah regranulátu [hm. %]	Před stárnutím			Po stárnutí		
	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ_{tb} [%]	E_t [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ_{tb} [%]
0	2735 ± 41	63,3 ± 0,3	28,7 ± 7,0	3135 ± 97	65,4 ± 2,0	23,9 ± 13,2
10	2704 ± 24	63,4 ± 0,2	31,5 ± 6,0	2951 ± 146	65,7 ± 2,7	26,6 ± 11,6
20	2720 ± 30	63,4 ± 0,3	33,9 ± 4,9	2963 ± 75	66,1 ± 2,3	25,9 ± 12,3
30	2727 ± 73	63,7 ± 0,2	35,7 ± 6,5	2855 ± 44	68,6 ± 0,4	33,0 ± 9,2
40	2738 ± 46	63,4 ± 0,2	35,4 ± 3,7	2942 ± 31	68,2 ± 0,3	31,7 ± 4,6
50	2668 ± 48	63,8 ± 0,3	33,3 ± 5,8	2992 ± 50	68,6 ± 0,9	25,6 ± 8,1
70	2668 ± 41	63,8 ± 0,2	33,5 ± 5,3	2992 ± 50	68,6 ± 1,1	31,6 ± 8,2
90	2657 ± 49	63,8 ± 0,2	38,7 ± 4,1	3044 ± 38	67,4 ± 0,5	26,5 ± 5,8
100	2734 ± 60	63,8 ± 0,4	31,5 ± 5,5	2816 ± 88	69,1 ± 0,3	28,8 ± 4,1





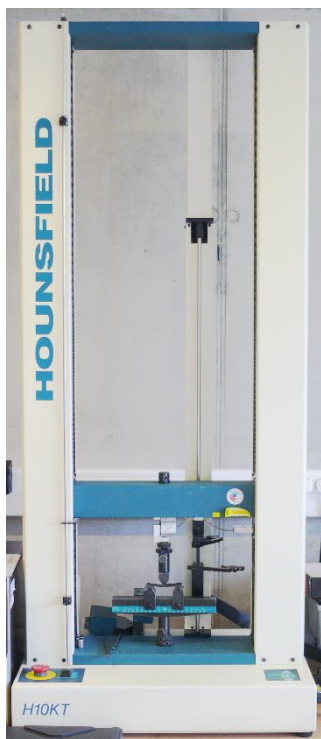
Obr. 3.15: Trhací stroj TIRAtest 2300, vpravo trhací stroj TIRAtest 2300 s použitím průtahoměru Epsilon 3542-010M-025-ST

3.5.2 Stanovení ohybových vlastností

Tato metoda se používá ke zjišťování chování zkušebních těles při námáhání ohybem a pro stanovení pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v ohybu a dalších závislostí mezi napětím a deformací za definovaných podmínek. Podstatou zkoušky je zatěžování zkušebního tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přítlačným trnem uprostřed jejich rozpětí (třibodový ohyb). Stanovení meze pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu probíhalo dle ČSN EN ISO 178 za konstantní zkušební rychlosti 2 mm/min do maximální hodnoty deformace 5 %. Zkušební rychlost odpovídá požadavkům předmetové normy ČSN EN ISO 9988-2. V průběhu tohoto postupu je měřena síla působící na zkušební těleso a výsledný průhyb zkušebního tělesa uprostřed mezi podpěrami. Zkoušky byly realizovány na zkušebním zařízení HOUNS-



FIELD H10KT (viz obr. 3.16 a obr. 3.17). Zkoušky byly provedeny ve standardním prostředí 23/50. Střední hodnoty měřených ohybových vlastností v závislosti na obsahu regranulátu jsou uvedeny v tab. 3.5.



Tab. 3.5: Střední hodnoty ohybových vlastností před stárnutím a po stárnutí

Obsah regranulátu [hm. %]	Před stárnutím		Po stárnutí	
	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
0	87,1 ± 0,2	2393 ± 25	88,4 ± 0,3	2541 ± 20
10	87,6 ± 0,4	2400 ± 23	89,6 ± 0,3	2743 ± 33
20	88,3 ± 0,3	2411 ± 38	89,7 ± 0,6	2707 ± 50
30	89,5 ± 0,6	2474 ± 37	89,7 ± 0,5	2770 ± 27
40	89,1 ± 0,6	2420 ± 28	88,8 ± 0,6	2615 ± 31
50	87,3 ± 0,5	2428 ± 10	89,9 ± 0,5	2719 ± 10
70	88,1 ± 0,5	2416 ± 20	90,1 ± 0,6	2707 ± 27
90	88,2 ± 0,3	2397 ± 10	89,6 ± 0,6	2660 ± 41
100	90,7 ± 1,5	2493 ± 61	88,5 ± 0,6	2574 ± 38

Obr. 3.16: Zkušební zařízení HOUNSFIELD H10KT



Obr. 3.17: Průběh zkoušky ohybových vlastností dle ČSN EN ISO 178 na zkušebním zařízení HOUNSFIELD H10KT

3.5.3 Stanovení vrubové houževnatosti

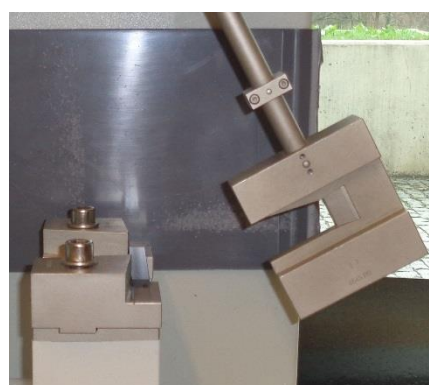
Podstatou zkoušky je přeražení zkušebního tělesa umístěného vodorovně na podpěrách úderem rázového kladiva na užší stranu (proti vrubu), přičemž se sleduje energie spotřebovaná k přeražení vzorku. Stanovení vrubové houževnatosti metodou Charpy bylo provedeno dle ČSN EN ISO 179-1.



Zkouška byla realizována na zkušebním zařízení Ceast Resil 5.5 (viz obr. 3.19). Pro měření bylo použito rázové kladivo s nominální energií 0,5 J (viz obr. 3.18). Před započítáním zkoušky byl vždy zkušební vzorek umístěn vodorovně na podpory tak, aby vrub ležel v dráze kladiva a ráz působil proti vrubu. Po uvolnění kladiva a přeražení vzorku se zaznamenávala absorbovaná rázová energie, z níž se následně stanovila vrubová houževnost. U všech vzorků došlo k úplnému typu přeražení (C). Střední hodnoty vrubové houževnosti v závislosti na obsahu regranulátu jsou uvedeny v tab. 3.6.

Tab. 3.6: Střední hodnoty vrubové houževnatosti před stárnutím a po stárnutí

Obsah regranulátu [hm. %]	Před stárnutím	Po stárnutí
	a_{cA} [kJ/m ²]	a_{cA} [kJ/m ²]
0	11,0 ± 0,9	6,6 ± 0,7
10	10,3 ± 1,1	4,3 ± 0,7
20	9,7 ± 1,2	4,7 ± 1,1
30	11,0 ± 1,0	4,7 ± 1,0
40	10,5 ± 1,0	4,9 ± 1,2
50	10,4 ± 0,9	4,0 ± 1,1
70	10,9 ± 0,9	4,8 ± 0,9
90	10,5 ± 0,5	5,0 ± 0,9
100	9,7 ± 1,8	5,3 ± 1,4



Obr. 3.18: Rázové kladivo s nominální energií 0,5 J



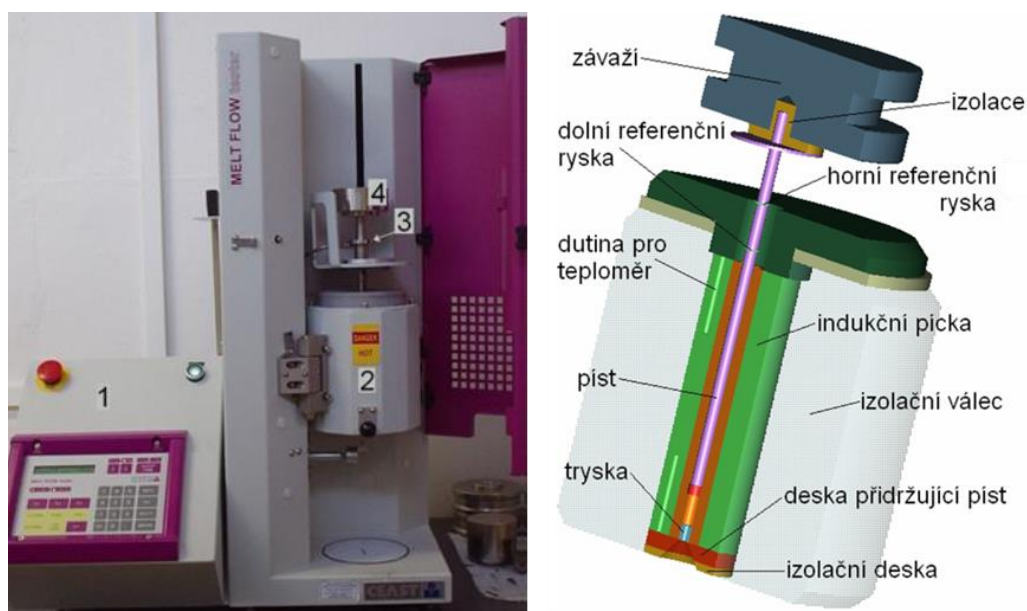
Obr. 3.19: Zkušební zařízení Ceast Resil 5.5



3.6 Stanovení tokových vlastností

Pro hodnocení tokových vlastností v závislosti na obsahu regranulátu byl stanoven index toku taveniny (MFI) pro panenský granulát, regranulát a drtě připravené z víceúčelových zkušebních těles typu A s obsahem regranulátu 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 100 %. Jelikož se případná tepelná degradace makromolekul může výrazněji projevit až během stárnutí, byl index toku taveniny rovněž stanoven pro drtě připravené z vystárých víceúčelových zkušebních těles typu A a to opět pro všechny výše uvedené obsahy regranulátu. Veličina MFI udává množství taveniny v gramech (hmotnostní index toku taveniny) nebo v kubických centimetrech (objemový index toku taveniny), které proteče tryskou předepsané geometrie při dané teplotě a velikosti zatížení za 10 min. V rámci experimentálního měření byl stanoven objemový index toku taveniny (MVR), při jehož měření byl zaznamenáván čas pohybu pístu po předem stanovené dráze a za pomoci jmenovitého průřezu válce a hlavy pístu byl stanoven MVR. Před vlastní zkouškou byl granulát, regranulát i drtě vysušeny ve vakuové sušičce Binder VD5, doba sušení byla 3 hod při teplotě 80 °C. Zkouška byla realizována na výtlačném plastometru MELT FLOW tester Ceast (viz obr. 3.20). Při této zkoušce bylo postupováno dle ČSN EN ISO 1133-1. Zkouška probíhala za podmínek uvedených v

tab. 3.7 dle ČSN EN ISO 8899-2. Střední hodnoty MVR v závislosti na obsahu recyklátu jsou uvedeny v tab. 3.8 a tab. 3.9.



Obr. 3.20: Výtlačný plastometr MELT FLOW tester Ceast [34]

1 řídící panel; 2 válec; 3 píst; 4 závaží



Tab. 3.7: Podmínky měření MVR

Parametr	Hodnota	Jednotka
Zkušební teplota	190	°C
Zatížení při přehřevu	2,16	kg
Doba přehřevu	300	s
Nominální zatížení	2,16	kg
Vzdálenost, kterou urazí píst	30	mm

Tab. 3.8: Střední hodnoty MVR pro granulát a regranulát Kepital F10-03H

	MVR [cm ³ /10min]
Panenský materiál	3,0 ± 0,1
Regranulát	3,9 ± 0,1

Tab. 3.9: Střední hodnoty MVR pro drtě před stárnutím a po stárnutí

Číslo šarže	Obsah regranulátu [hm. %]	Před stárnutím	Po stárnutí
		MVR [cm ³ /10min]	MVR [cm ³ /10min]
1	0	3,2 ± 0,1	5,5 ± 0,4
2	10	3,4 ± 0,1	7,6 ± 0,5
3	20	3,4 ± 0,1	8,4 ± 0,1
4	30	3,5 ± 0,1	8,8 ± 1,4
5	40	3,6 ± 0,2	6,3 ± 0,1
6	50	3,5 ± 0,1	9,3 ± 0,2
7	70	4,0 ± 0,1	9,1 ± 0,1
8	90	3,9 ± 0,2	9,1 ± 1,0
9	100	3,9 ± 0,1	8,4 ± 1,0



3.7 Stanovení termických vlastností

Diferenční snímací kalorimetrie neboli DSC, je nejpoužívanější metoda termické analýzy pro charakterizaci plastů a hodnocení jejich nadmolekulární struktury. Podstatou této metody je měření rozdílu tepelného příkonu při ohřevu (chlazení) měřeného a referenčního vzorku při zachování nulového teplotního rozdílu mezi nimi.

Pro DSC analýzu byl ze středu víceúčelového zkušebního tělesa typu A (ČSN EN ISO 3167) vyříznut vzorek o hmotnosti $10,5 \pm 0,3$ mg, toto množství bylo naváženo na laboratorních analytických vahách Mettler Toledo XSE 105 Dual Range s přesností 0,01 mg. Takto získaný vzorek byl umístěn do hliníkové pánvičky a přiklopen víčkem, které bylo již předem propíchnuté, tak aby byl umožněn únik plyných zplodin, jež mohou vznikat při ohřevu studovaného vzorku (uniklé zplodiny, jsou odváděny proplachovacím plynem). Studovaný vzorek byl do pánvičky zalisován ručním lisem Mettler Toledo. Referenčním vzorkem byl vzduch, respektive prázdná hliníková pánvička. Hliníkové pánvičky se studovanými vzorky byly po zalisování umístěny do zásobníku kalorimetru DSC1/700 Mettler Toledo (viz obr. 3.21), odkud byly pomocí automatického podavače postupně odebírány a vkládány do měřící cely, kde byly podrobeny měření společně s referenčním vzorkem. Studované vzorky byly v souladu s ČSN EN ISO 11357-1 vystaveny dvěma fázím ohřevu.

První fáze ohřevu měla za cíl odstranit tepelnou historii materiálu v důsledku jeho zpracování (vstřikování) a prováděla se do roztavení plastu, kdy materiál dosáhl rovnovážného stavu, druhý ohřev byl proveden po ochlazení studovaného vzorku a jeho cílem bylo umožnit charakterizaci skutečných termických vlastností materiálu, včetně jeho strukturního stavu. Teplotní program, zahrnující jednotlivé fáze ohřevu a ochlazení, je popsán v tab. 3.10. Hodnoty změn entalpií tání a krystalizace i teploty tání a krystalizace v závislosti na obsahu regranulátu jsou uvedeny v tab. 3.11 a tab. 3.12.





Obr. 3.21: Diferenční snímací kalorimetr DSC1/700 Mettler Toledo [35]

Tab. 3.10: Teplotní program při DSC analýze

1. Fáze - ohřev		3. Fáze - ochlazení	
Počáteční teplota	25 °C	Počáteční teplota	210 °C
Konečná teplota	210 °C	Konečná teplota	25 °C
Rychlost ohřevu	10 °C/min	Rychlost ohřevu	10 °C/min
Inertní atmosféra (proplachovací plyn)	dusík	Inertní atmosféra (proplachovací plyn)	dusík
Průtok plynu	50 ml/min	Průtok plynu	50 ml/min
2. Fáze - izoterma		4. Fáze - druhý ohřev	
Teplota	210 °C	Počáteční teplota	25 °C
Čas	120 s	Konečná teplota	210 °C
Inertní atmosféra (proplachovací plyn)	dusík	Rychlost ohřevu	10 °C/min
Průtok plynu	50 ml/min	Inertní atmosféra (proplachovací plyn)	dusík
		Průtok plynu	50 ml/min



Tab. 3.11: Hodnoty změny entalpie a teploty krystalizace vzorků před stárnutím a po stárnutí

Číslo šarže	Obsah regranulátu [hm. %]	3. fáze - chlazení			
		Před stárnutím		Po stárnutí	
		$T_{p,c}$ [°C]	ΔH_c [J/g]	$T_{p,c}$ [°C]	ΔH_c [J/g]
1	0	147,4	143,1	145,2	145,4
2	10	148,2	139,5	146,1	146,3
3	20	147,7	141,7	145,8	146,2
4	30	147,9	140,8	145,7	147,8
5	40	148,0	138,6	146,3	146,1
6	50	148,1	142,3	146,2	146,1
7	70	148,2	141,1	146,3	145,3
8	90	147,8	141,9	146,7	145,7
9	100	148,2	142,9	146,2	145,1

Tab. 3.12: Hodnoty změny entalpie a teploty tání vzorků před stárnutím a po stárnutí

Číslo šarže	Obsah regranulátu [hm. %]	4. fáze - druhý ohřev			
		Před stárnutím		Po stárnutí	
		$T_{p,m}$ [°C]	ΔH_m [J/g]	$T_{p,m}$ [°C]	ΔH_m [J/g]
1	0	170,6	158,0	170,0	155,0
2	10	171,5	156,1	170,2	158,5
3	20	171,3	159,4	169,1	156,4
4	30	170,5	156,9	169,9	158,2
5	40	171,7	158,6	168,6	158,9
6	50	171,6	158,6	169,8	161,0
7	70	171,8	157,1	169,7	158,4
8	90	171,9	160,4	169,9	162,5
9	100	171,9	160,4	170,7	157,8



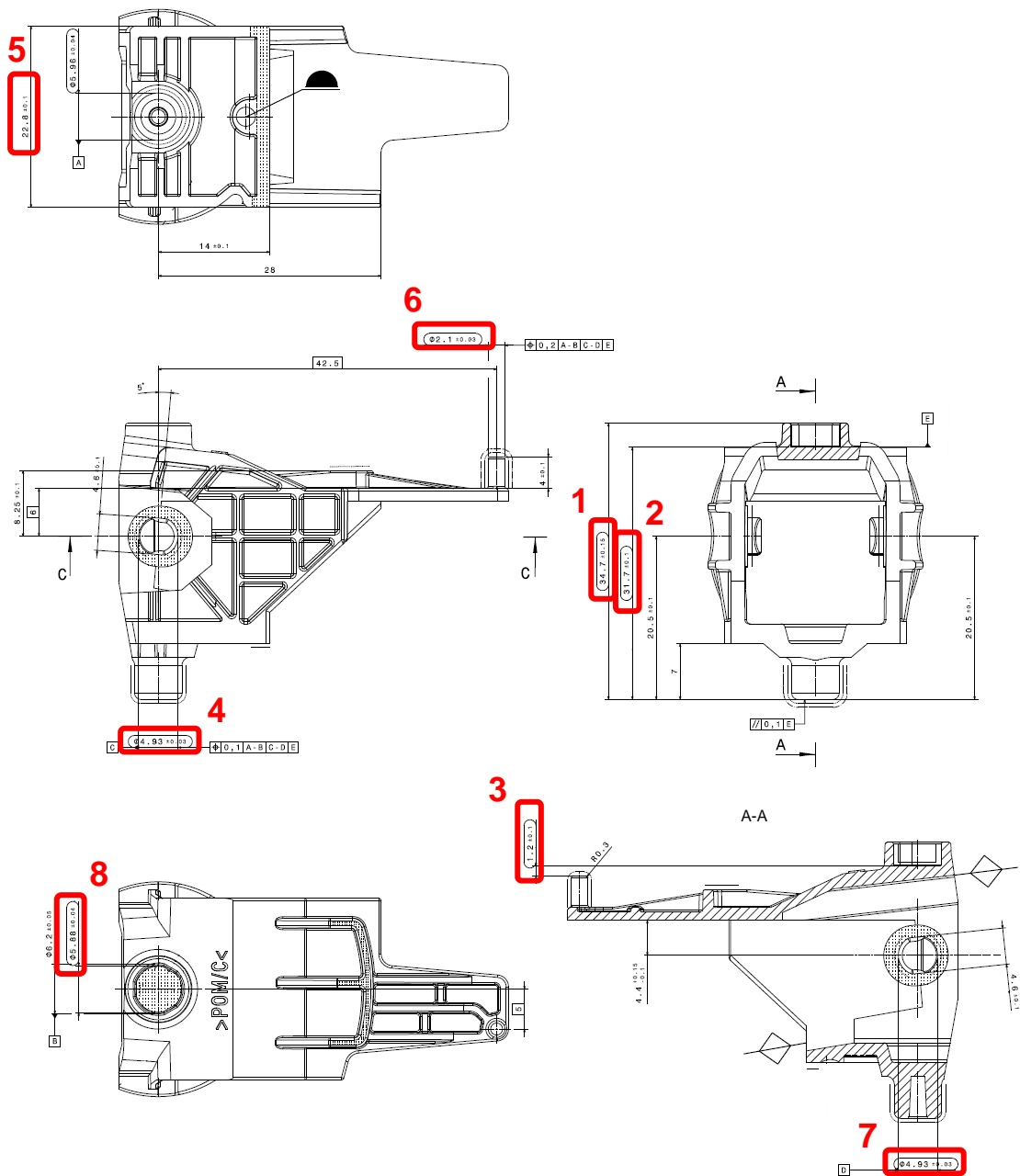
3.8 Rozměrová analýza reálného dílu

Rozměrová analýza reálného dílu byla provedena ve firmě KOSTAL CR spol. s r.o. Měření bylo realizováno na portálovém souřadnicovém měřicím stroji Zeiss Spectrum (viz obr. 3.22), tento měřicí stroj slouží mimo jiné k ověření rozměrové stálosti vstřikovaných dílů během sériové produkce firmy KOSTAL CR spol. s r.o. Měření probíhalo 24 hod po výrobě, při standardních podmínkách 23/50. Jelikož je zvolený díl sériově vyráběn, bylo možné použít již existující program a proměřit vybrané funkční rozměry dílu (viz obr. 3.23). Tyto funkční rozměry byly oddělením kvality stanoveny jako kontrolní a během sériové produkce podléhají pravidelné kontrole. Díl je vyráběn ve čtyřnásobné formě, měřeny byly díly ze všech čtyř kavit a to pro vybrané obsahy regranulátu 0, 20, 30, 50, 100 %. Z důvodu velké vytíženosti měřicího stroje byly provedeny pouze dvě série měření. Naměřené odchylky od jmenovitých rozměrů jsou uvedeny v tab. 3.13 a tab. 3.14.



Obr. 3.22: Portálový souřadnicový měřicí stroj Zeiss Spectrum





Obr. 3.23: Vybrané funkční (kontrolní) rozměry dílu „Schaltstück“



Tab. 3.13: Odchylka od jmenovitého rozměru při obsahu regranulátu 0, 20, 30 %

Číslo kóty	Jmenovitý rozměr	Horní tolerance	Dolní tolerance	Obsah regranulátu [hm. %]											
				0				20				30			
				Číslo kavity				Číslo kavity				Číslo kavity			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	34,70	0,15	-0,15	0,024	0,033	0,029	0,021	0,013	0,027	0,024	0,019	0,012	0,029	0,260	0,021
2	31,70	0,10	-0,10	0,012	0,007	0,012	0,003	-0,005	-0,003	0,004	-0,006	-0,005	-0,002	0,004	-0,006
3	1,20	0,10	-0,10	-0,057	-0,014	-0,031	-0,025	-0,040	-0,052	-0,063	-0,019	-0,037	-0,069	-0,068	-0,016
4	4,93	0,03	-0,03	0,005	-0,004	-0,029	-0,020	-0,003	-0,008	-0,017	-0,024	-0,003	-0,008	-0,034	-0,024
5	5,96	0,04	-0,04	0,014	-0,018	-0,008	-0,001	0,012	-0,020	-0,006	-0,003	0,012	-0,019	-0,006	-0,002
6	2,10	0,03	-0,03	-0,012	-0,015	-0,014	-0,015	-0,012	-0,015	-0,015	-0,015	-0,012	-0,015	-0,014	-0,015
7	4,93	0,03	-0,03	0,016	-0,017	-0,011	-0,012	0,009	-0,018	-0,012	-0,014	0,009	-0,018	-0,012	-0,014
8	5,88	0,04	-0,04	0,030	0,028	0,028	0,032	0,033	0,027	0,032	0,033	0,037	0,029	0,048	0,039

Tab. 3.14: Odchylka od jmenovitého rozměru při obsahu regranulátu 50 a 100 %

Číslo kóty	Jmenovitý rozměr	Horní tolerance	Dolní tolerance	Obsah regranulátu [hm. %]							
				50				100			
				Číslo kavity				Číslo kavity			
				1	2	3	4	1	2	3	4
1	34,70	0,15	-0,15	0,023	0,036	0,036	0,021	0,047	0,042	0,047	0,040
2	31,70	0,10	-0,10	0,005	0,005	0,014	-0,003	0,031	0,010	0,025	0,016
3	1,20	0,10	-0,10	-0,025	-0,078	-0,073	-0,010	-0,029	-0,069	-0,085	-0,019
4	4,93	0,03	-0,03	-0,001	-0,006	-0,031	-0,023	0,008	-0,005	-0,030	-0,022
5	5,96	0,04	-0,04	0,014	-0,019	-0,005	-0,001	0,020	-0,018	-0,004	0,000
6	2,10	0,03	-0,03	-0,012	-0,015	-0,014	-0,014	-0,012	-0,015	-0,013	-0,014
7	4,93	0,03	-0,03	0,010	-0,018	-0,011	-0,013	0,020	-0,016	-0,010	-0,012
8	5,88	0,04	-0,04	0,050	0,028	0,049	0,051	0,052	0,030	0,050	0,053

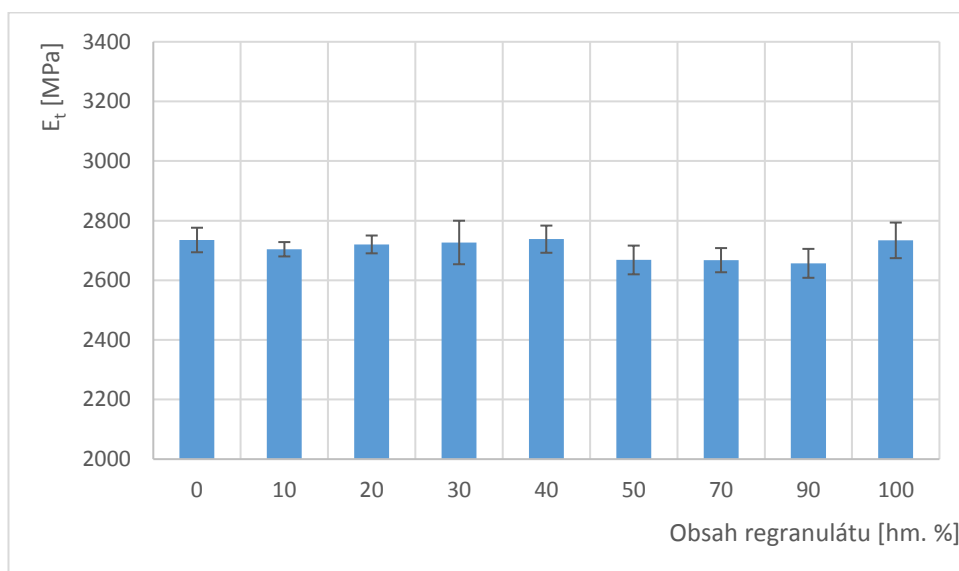
Poznámka: Rozměry, jejichž odchylka je mimo toleranci, jsou zvýrazněny červenou barvou.



4 Vyhodnocení a diskuze výsledků

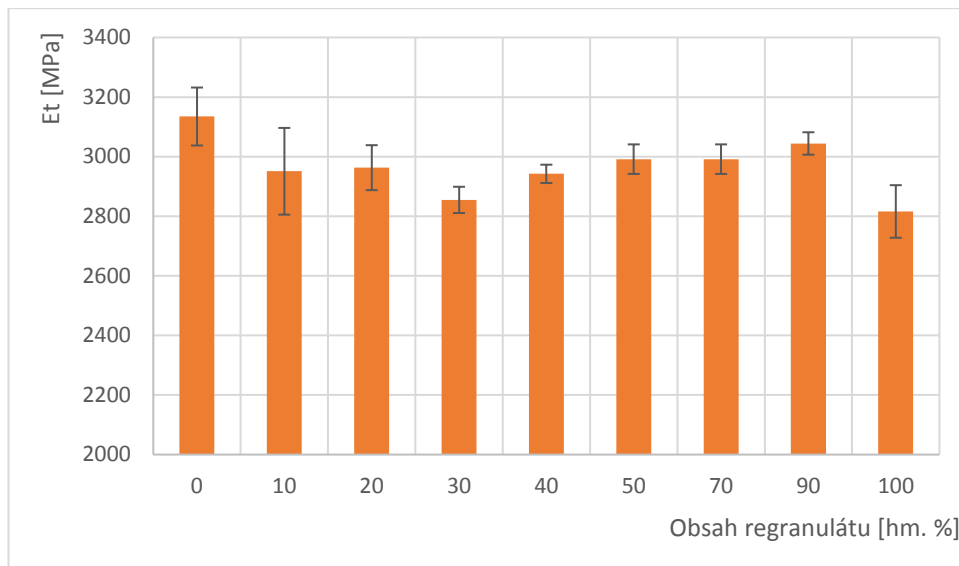
4.1 Vyhodnocení tahových vlastností

Zkouška tahem byla provedena na víceúčelových zkušebních tělesech typu A dle ČSN EN ISO 3167. Pro hodnocení tahových vlastností byl stanoven modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu a jmenovité poměrné prodloužení při přetržení v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu před stárnutím a po stárnutí. Naměřené hodnoty (viz tab. 3.4) byly zpracovány do podoby grafické závislosti na obsahu regranulátu (viz obr. 4.1 až obr. 4.6). Z naměřených hodnot lze s ohledem na rozptyl měřených hodnot, vyjádřený směrodatnou odchylkou konstatovat, že přídavek regranulátu nemá vliv na tahové vlastnosti měřené před stárnutím. Po stárnutí došlo k nárůstu modulu pružnosti v tahu. Z obr. 4.2 je patrné, že k nejvyššímu nárůstu došlo u panenského materiálu, již od 10 hm. % regranulátu je viditelný pokles, tyto rozdíly jsou však na hranici statistické významnosti. Dále došlo k nárůstu meze pevnosti v tahu, nejvíce u 100 hm. % regranulátu, rozdíly v naměřených hodnotách jsou však vzhledem k rozptylu hodnot na hranici statistické významnosti. U jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení došlo oproti měření před stárnutím k poklesu hodnot, při respektování směrodatné odchylky není patrný rozdíl v závislosti na obsahu regranulátu.

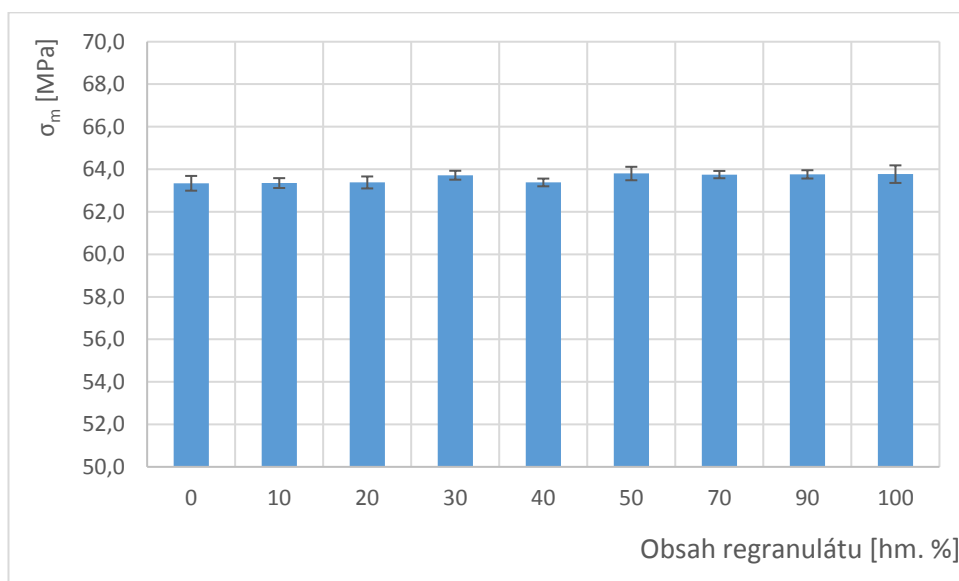


Obr. 4.1: Modul pružnosti v tahu v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu před stárnutím



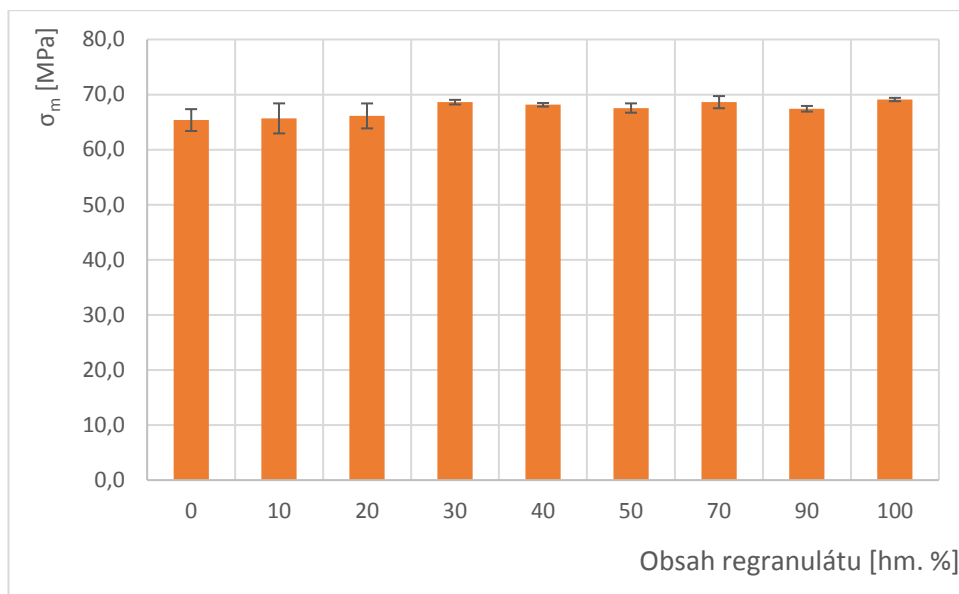


Obr. 4.2: Modul pružnosti v tahu v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu po stárnutí

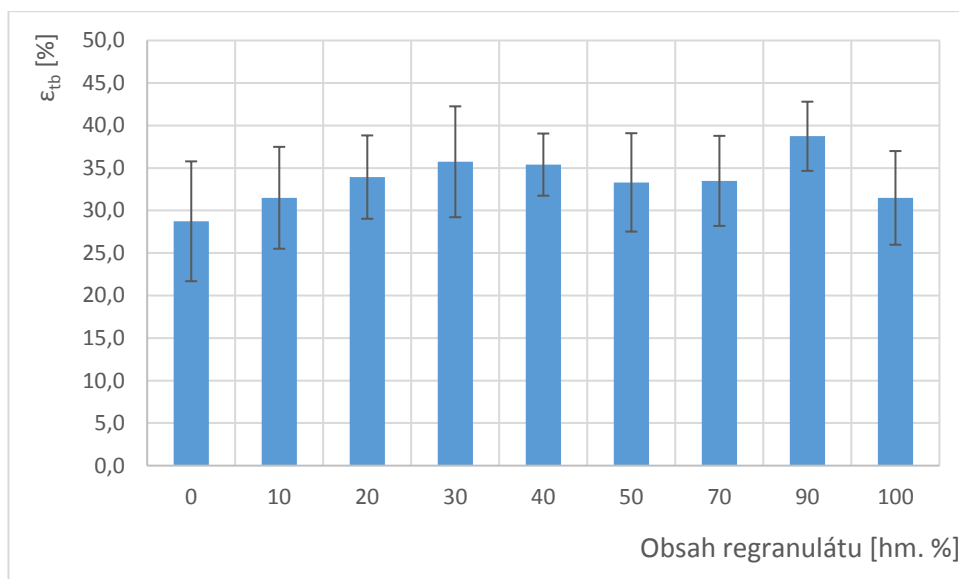


Obr. 4.3: Mez pevnosti v tahu v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu před stárnutím



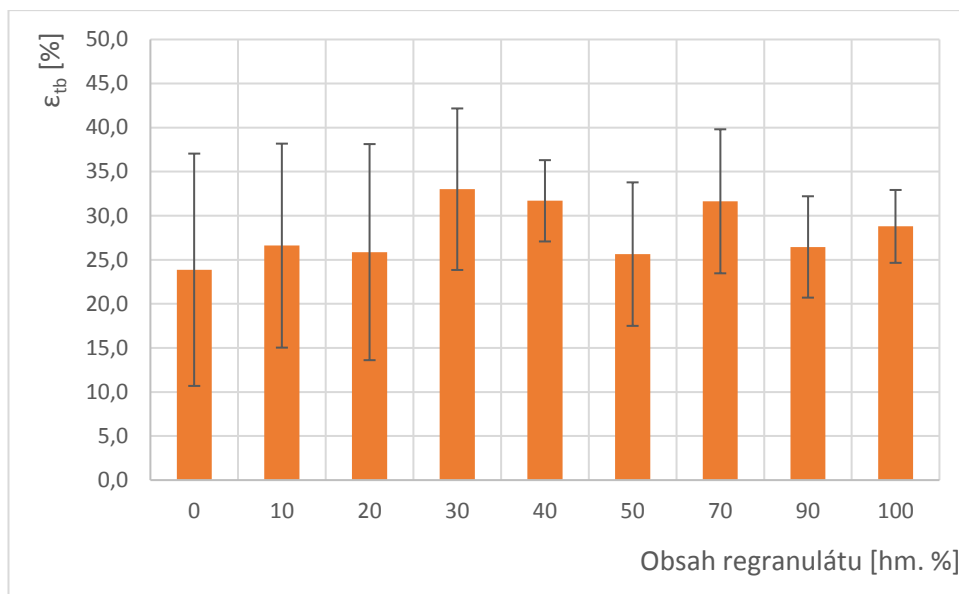


Obr. 4.4: Mez pevnosti v tahu v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu po stárnutí



Obr. 4.5: Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu před stárnutím



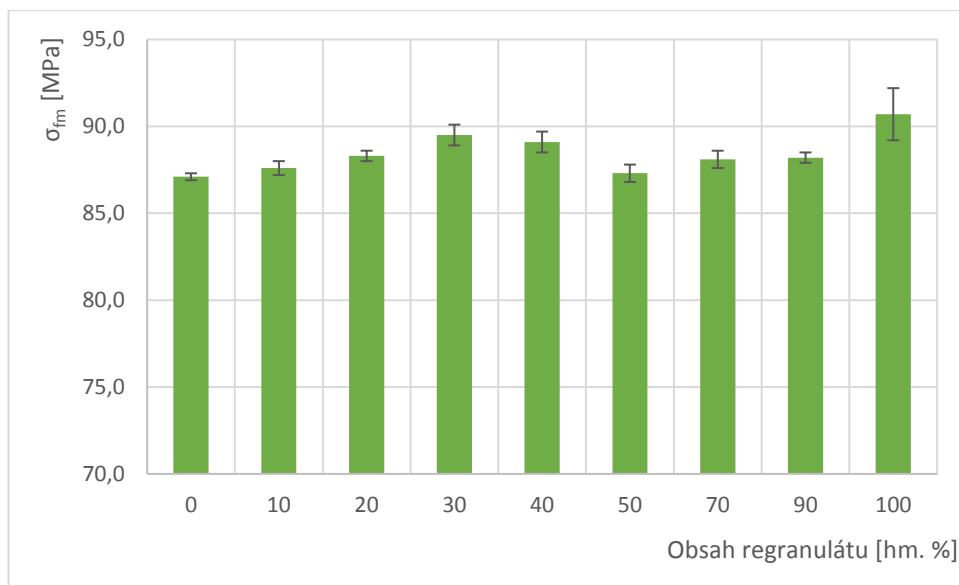


Obr. 4.6: Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu po stárnutí

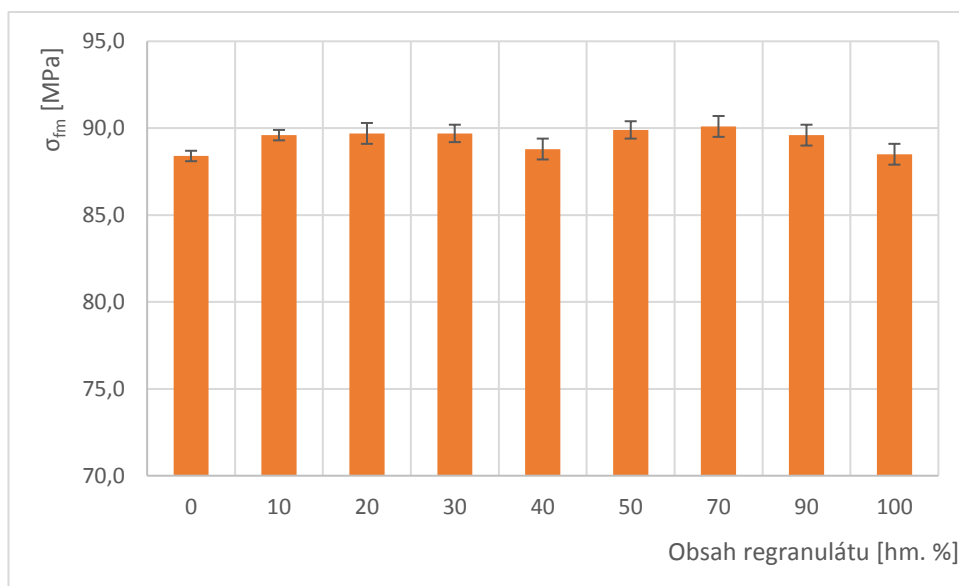
4.2 Vyhodnocení ohybových vlastností

Stanovení ohybových vlastností bylo provedeno v souladu s ČSN EN ISO 178. Pro hodnocení ohybových vlastností byl stanoven modul pružnosti v ohybu a mez pevnosti v ohybu v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu před stárnutím a po stárnutí. Naměřené hodnoty (viz tab. 3.5) byly zpracovány do podoby grafické závislosti na obsahu regranulátu (viz obr. 4.7 až obr. 4.10). Z naměřených hodnot lze s ohledem na rozptyl měřených hodnot, vyjádřený směrodatnou odchylkou konstatovat, že přídavek regranulátu nemá vliv na modul pružnosti v ohybu ani mez pevnosti v ohybu a to ani po stárnutí, tedy z dlouhodobého hlediska užívání dílu. Rozdíly v naměřených hodnotách pro různé obsahy regranulátu jsou statisticky nevýznamné.



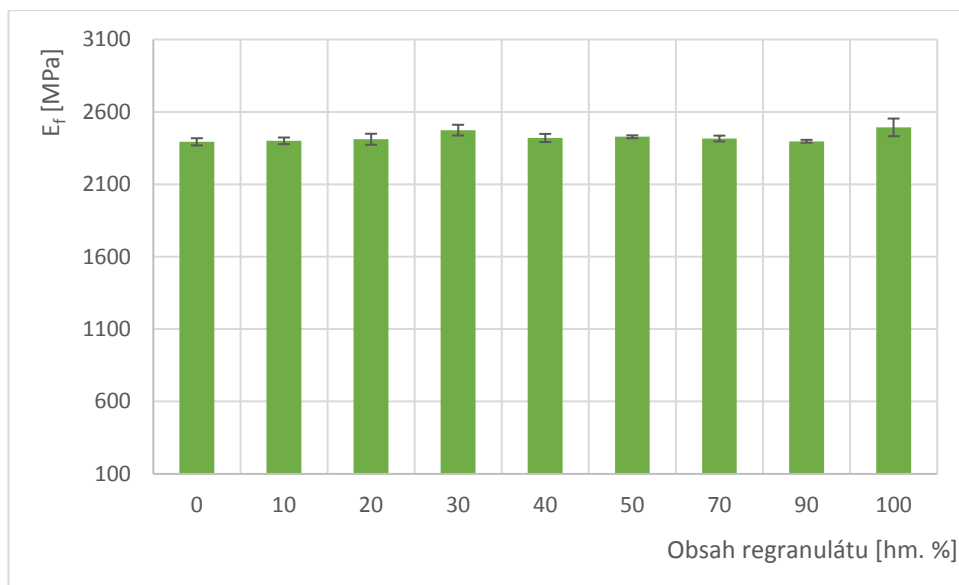


Obr. 4.7: Mez pevnosti v ohybu v závislosti na hmotnostním obsahu regranolátu před stárnutím

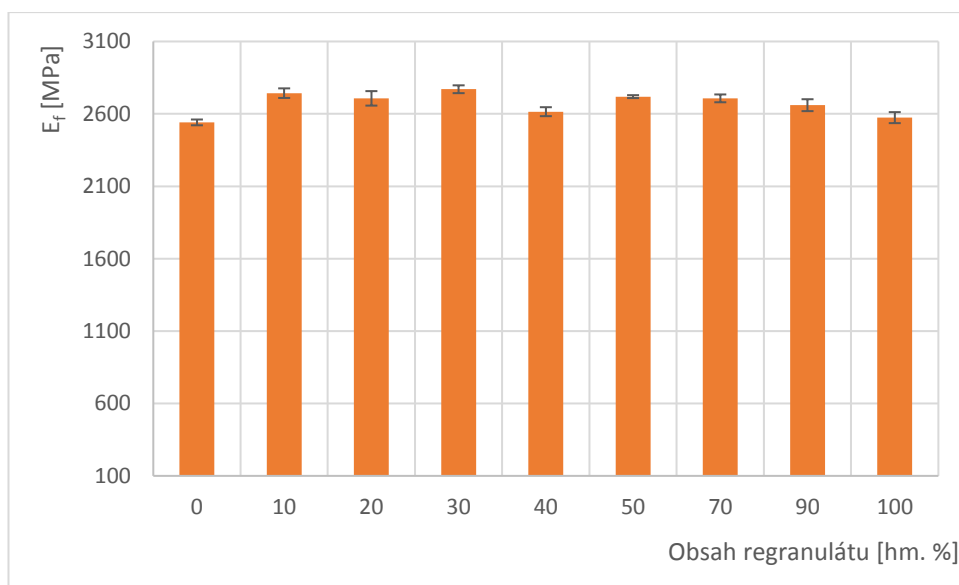


Obr. 4.8: Mez pevnosti v ohybu v závislosti na hmotnostním obsahu regranolátu po stárnutí





Obr. 4.9: Modul pružnosti v ohybu v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu před stárnutím

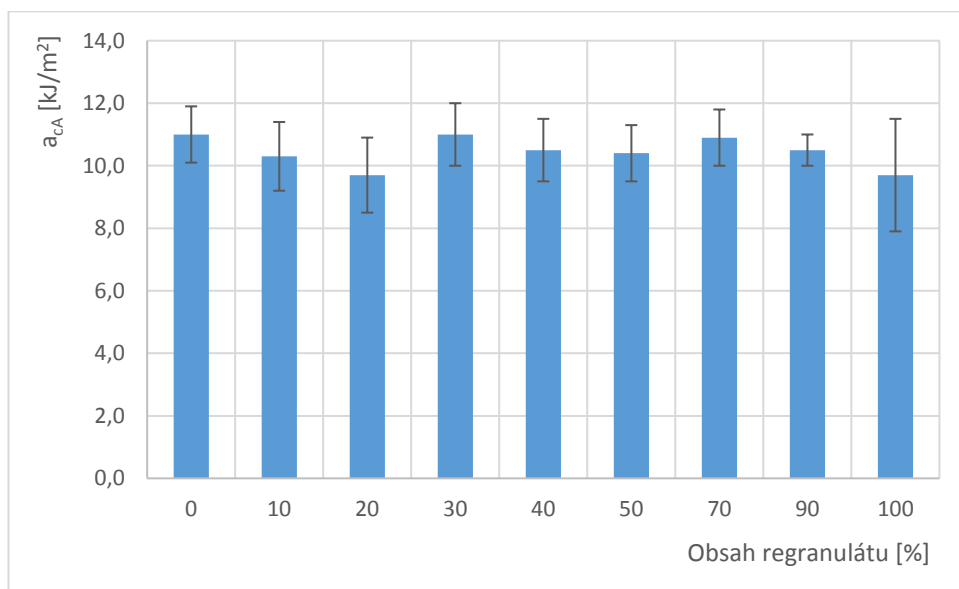


Obr. 4.10: Modul pružnosti v ohybu v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu po stárnutí



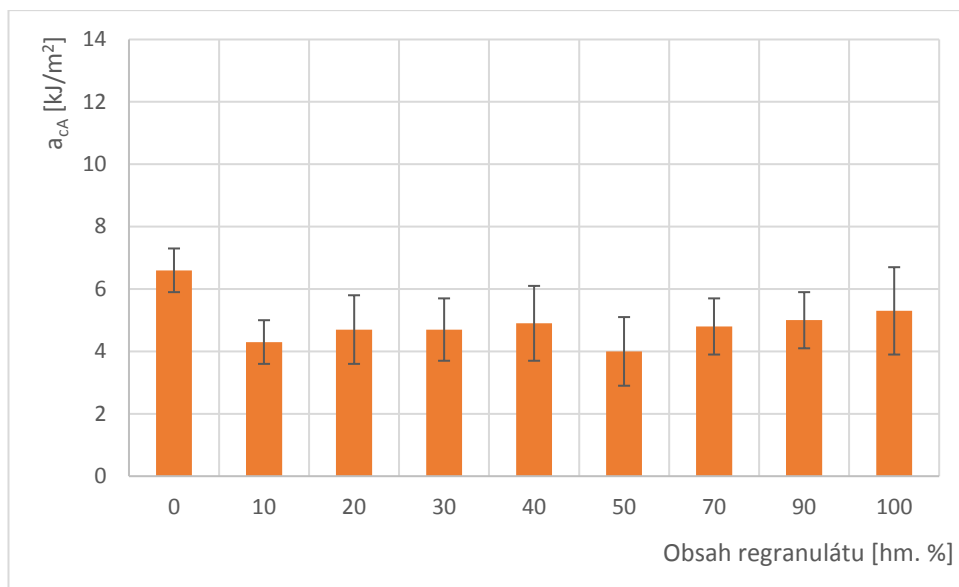
4.3 Vyhodnocení vrubové houževnatosti

Zkouška vrubové houževnatosti Charpy byla provedena na zkušebních tělesech s normalizovaným vrubem typu A v souladu s ČSN EN ISO 179-1. Naměřené hodnoty (viz tab. 3.6) byly zpracovány do podoby grafické závislosti na obsahu regranulátu (viz obr. 4.11 a obr. 4.12). Po započtení směrodatné odchylky je z obr. 4.11 zřejmé, že u zkušebních těles, která nebyla vystavena stárnutí, nemá obsah regranulátu zásadní vliv na vrubovou houževnatost. U vystárých zkušebních těles obsahujících podíl regranulátu byl oproti panenskému materiálu naměřen pokles vrubové houževnatosti a to již při 10 hm. % (o 56 %). Hodnoty znázorněné na obr. 4.12 nenaznačují trend poklesu vrubové houževnatosti při přidávku regranulátu. Při respektování směrodatné odchylky naměřených hodnot je však u vystárých zkušebních těles negativní vliv regranulátu na vrubovou houževnatost patrný.



Obr. 4.11: Vrbové houževnatost v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu před stárnutím





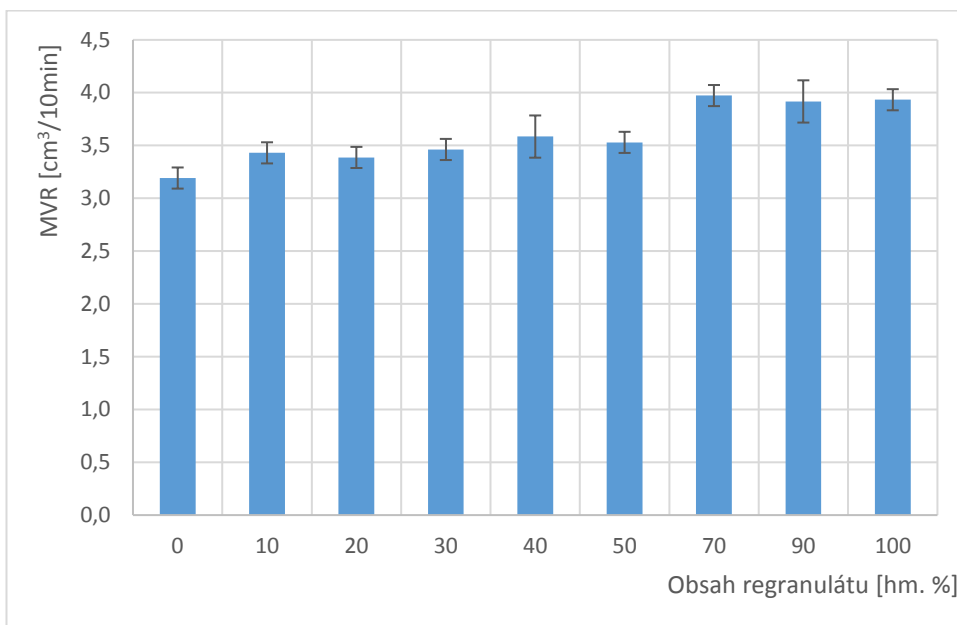
Obr. 4.12: Vrubová houževnatost v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu po stárnutí

4.4 Vyhodnocení tokových vlastností

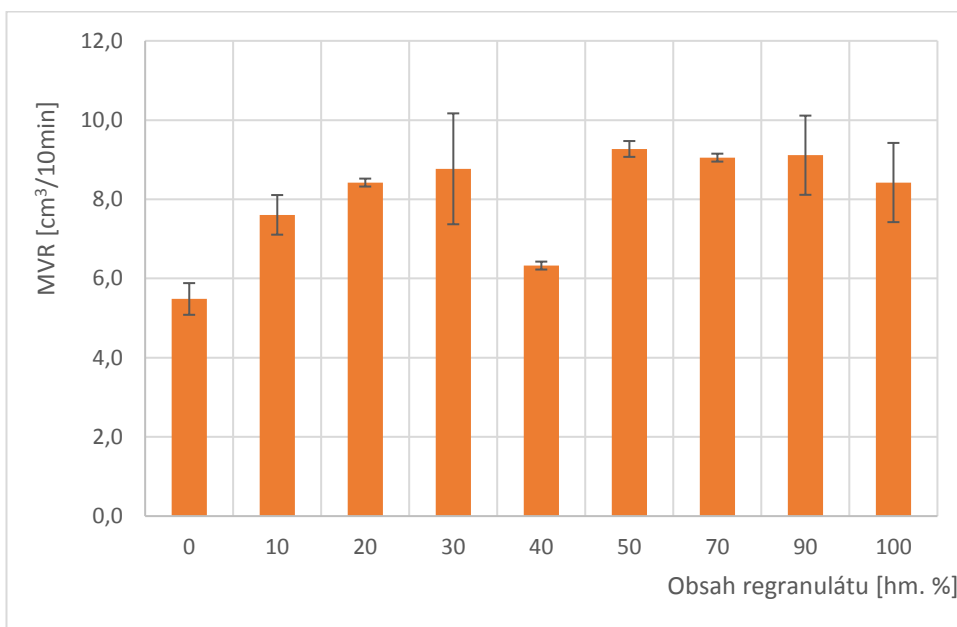
Objemový index toku taveniny (MVR) byl měřen v souladu s normou ČSN EN ISO 1133-1. Pro panenský granulát byla naměřena hodnota MVR $3,0 \pm 0,1 \text{ cm}^3/10\text{min}$, pro regranulát pak $3,9 \pm 0,1 \text{ cm}^3/10\text{min}$. Po porovnání těchto hodnot s inspekčním certifikátem (viz příloha č. 2) bylo zjištěno, že regranulát přesahuje maximální přípustnou hodnotu $3,3 \text{ cm}^3/10\text{min}$. Naměřené hodnoty MVR drtí připravených z víceúčelových zkušebních těles typu A před stárnutím a po stárnutí (viz tab. 3.9) byly zpracovány do podoby grafické závislosti na obsahu regranulátu. obr. 4.13 koresponduje s faktem, že u regranulátu byla zjištěna vyšší tekutost než u panenského materiálu a ukazuje, že hodnota MVR stoupá se zvyšujícím se obsahem regranulátu. U drtí připravených z vystárlých zkušebních těles se změna tekutosti v závislosti na obsahu regranulátu projevila ještě výrazněji, při desetiprocentním obsahu regranulátu byl nárůst tekutosti oproti panenskému materiálu o 38 %, při dvacetiprocentním obsahu regranulátu o 53 %, s rostoucím obsahem regranulátu se po započtení směrodatné odchylky tato hodnota dále již výrazně nezvyšuje. Výjimkou je šarže s čtyřiceti procentním obsahem regranulátu, zde byl nárůst tekutosti oproti panenskému materiálu „pouze“ o 15 %, tato anomálie je přisuzována nerovnoměrnosti stárnutí. Naměřené hodnoty MVR mohou být indikátorem toho, že regranulovaný materiál prošel za dobu svého života více teplot-



ními cykly než panenský materiál, což může mít za následek částečnou degradaci makromolekulárních řetězců, která se může výrazněji projevit až po stárnutí materiálu.



Obr. 4.13: Střední hodnoty MVR v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu před stárnutím

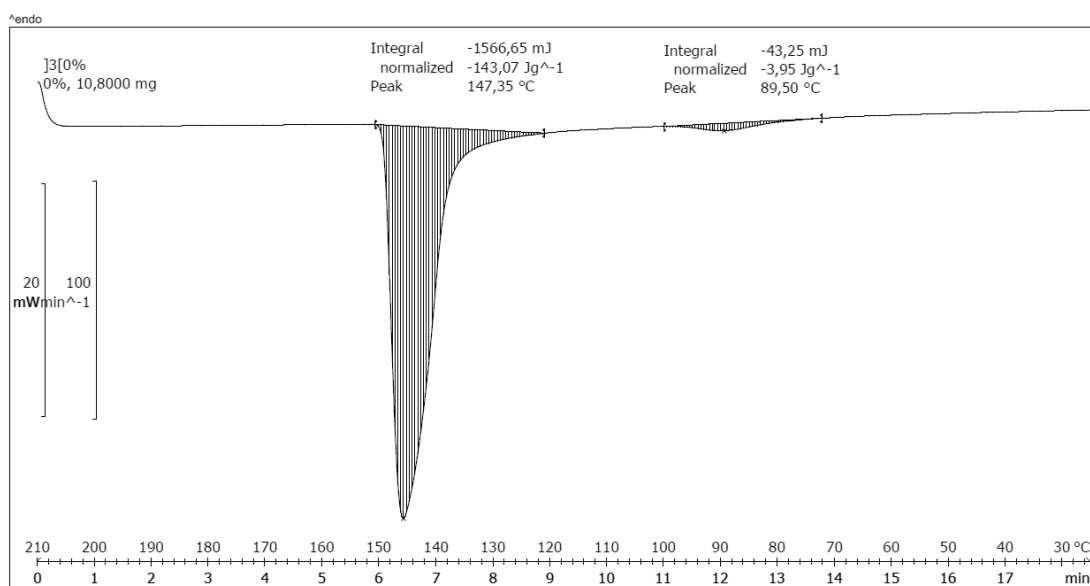


Obr. 4.14: Střední hodnoty MVR v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu po stárnutí



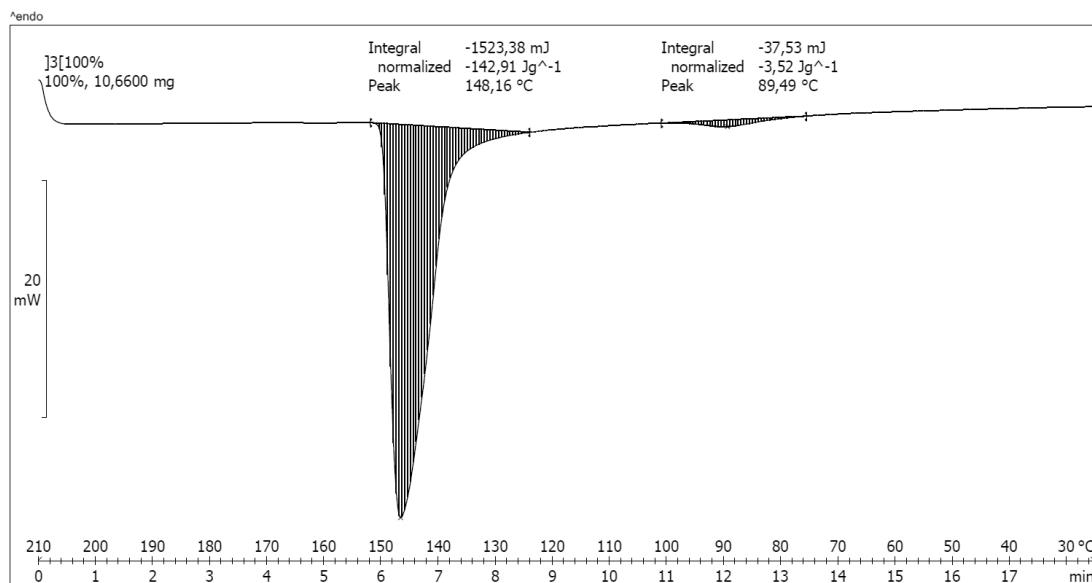
4.5 Vyhodnocení termických vlastností

Vliv obsahu regranulátu na termické vlastnosti byl zkoumán ve třetí a čtvrté fázi teplotního programu tj. ve fázi chlazení a druhého ohřevu. Naměřené hodnoty změny entalpie krystalizace a změny entalpie tání jsou uvedeny v tab. 3.11 a tab. 3.12, změna entalpie tání je přímo úměrná stupni krystalinity zkoumaného materiálu. Dále byly hodnoceny teplota krystalizace a teplota tání, které jsou rovněž uvedeny v tab. 3.11 a tab. 3.12, teplota tání je závislá na molekulové hmotnosti polymeru. Vyhodnocení respektive odečet naměřených hodnot z termogramu je do určité míry ovlivněn lidským faktorem, vlastní měření je zatíženo také dalšími faktory, které jsou detailně popsány např. v [36]. Snahou bylo faktory minimalizovat. Po přihlédnutí k těmto faktorům lze z tab. 3.11, tab. 3.12 a obr. 4.15 až obr. 4.18 vyvodit, že vliv obsahu regranulátu na sledované hodnoty je minimální, ne-li žádný a to jak před stárnutím, tak i po stárnutí. Dále z měření vyplývá, že regranulát z materiálového hlediska odpovídá panenskému materiálu a při jeho třídění a transportu nedošlo ke kontaminaci jiným plastem.

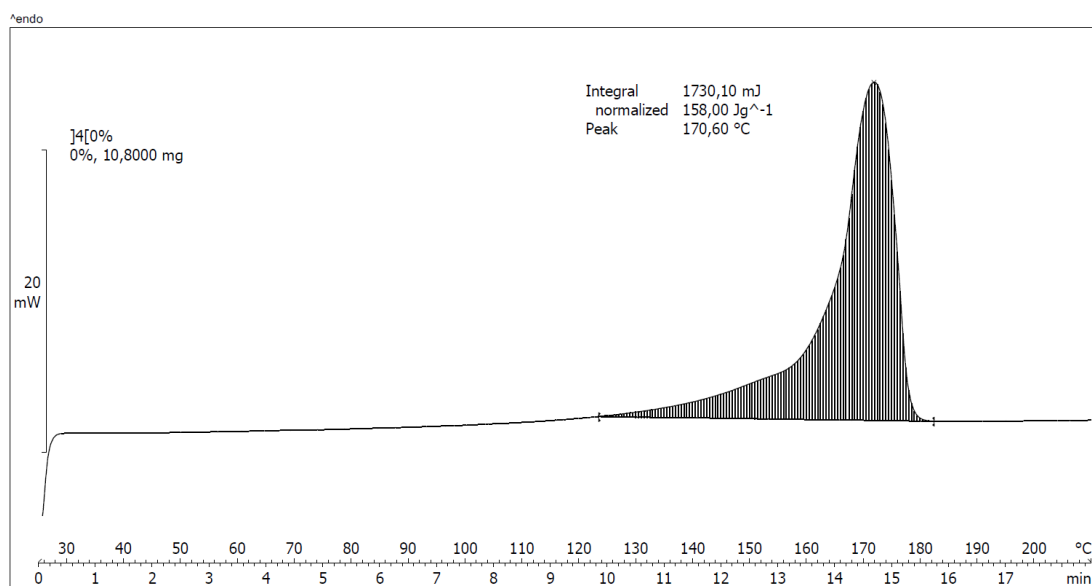


Obr. 4.15: DSC termogram materiálu Kepital F10-03H s 0 hm. % regranulátu před stárnutím - fáze chlazení (3. fáze)



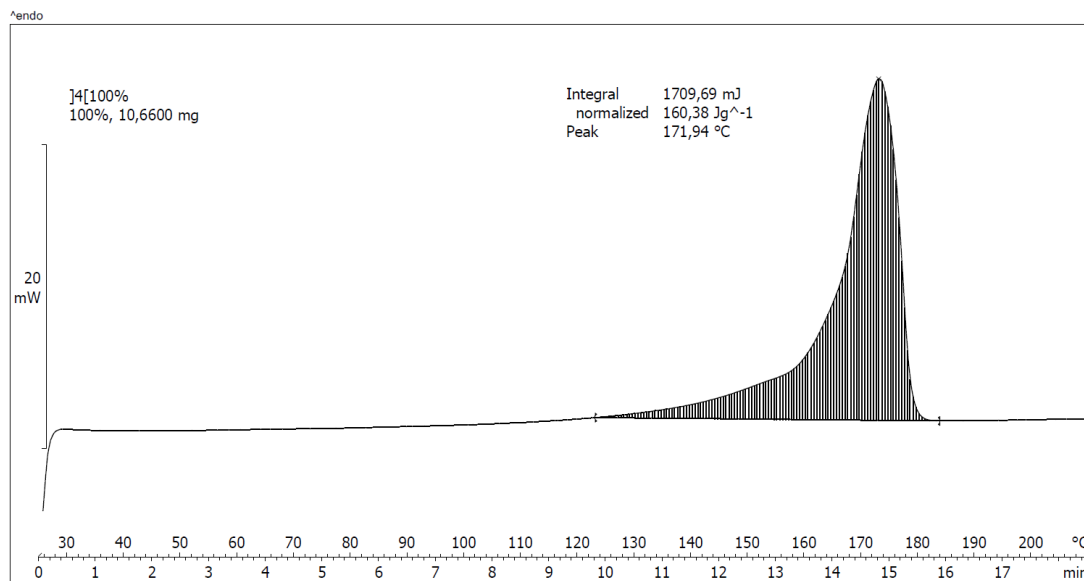


Obr. 4.16: DSC termogram materiálu Kepital F10-03H se 100 hm. % regranulátu před stárnutím - fáze chlazení (3. fáze)



Obr. 4.17: DSC termogram materiálu Kepital F10-03H s 0 hm. % regranulátu před stárnutím - fáze ohřevu (4. fáze)





Obr. 4.18: DSC termogram materiálu Kepital F10-03H se 100 hm. % regranulátu před stárnutím - fáze ohřevu (4. fáze)

4.6 Vyhodnocení rozměrové analýzy

Při hodnocení rozměrové stálosti dílu v závislosti na obsahu regranulátu byly sledovány vybrané funkční, respektive kontrolní rozměry dílu, které jsou důležité z hlediska funkce nebo montáže dílu. Z naměřených hodnot uvedených v tab. 3.13 a tab. 3.14 vyplývá, že přidavek regranulátu do 20 hm. % nemá na tyto rozměry, respektive rozměrovou stálost dílu negativní vliv.



5 Závěr

Cílem diplomové práce byla optimalizace výrobního procesu, respektive ověření možnosti využití regranulátu u plastového dílu podvolantového modulu označeného „Schaltstück“ vyráběného z kopolymeru polyoxymethyleny Kepital F10-03H. Cena 1 kg panenského materiálu Kepital F10-03H je 2,9 EUR, cena regranulátu dodávaného firmou Arexim Engineering EAD, vyráběného z technologického odpadu Kepitalu F10-03H produkovaného firmou KOSTAL CR spol. s r.o. činí 1,7 EUR za kilogram. Pro nalezení maximálního množství regranulátu, které lze přidat do panenského materiálu, aniž by došlo k poklesu výsledné kvality dílu, byly použity experimentální metody, které měly za cíl zjistit vliv přídavku regranulátu na kvalitu a funkčnost dílu z pohledu fyzikálních vlastností materiálu, tvarové a rozměrové stálosti dílu. Fyzikální vlastnosti byly hodnoceny i s ohledem na životnost dílu. Za tímto účelem bylo provedeno umělé stárnutí materiálu, které bylo simulováno vystavením zkušebních těles zvýšené teplotě 150 °C po dobu 500 h dle standardních doporučení podnikových předpisů VW.

Pro hodnocení mechanických vlastností byly stanoveny tahové vlastnosti, ohybové vlastnosti a vrubová houževnatost Charpy. Protože jsou mechanické vlastnosti úzce spjaty s délkou makromolekul, respektive molekulovou hmotností, kterou lze nepřímo hodnotit pomocí indexu toku taveniny, byl stanoven objemový index toku taveniny (MVR). Dalším z faktorů ovlivňujících mechanické vlastnosti plastů je jejich nadmolekulární struktura, respektive stupeň krystalinity, který byl hodnocen za pomoci termické analýzy, konkrétně diferenční snímací kalorimetrií (DSC). Všechny zkoumané mechanické, tokové a termické vlastnosti byly stanoveny jak před stárnutím, tak i po stárnutí. Dále byla provedena rozměrová analýza reálných dílů.

Z výsledků měření lze po přihlédnutí ke směrodatné odchylce konstatovat, že přídavek regranulátu, bez ohledu na jeho množství, nemá negativní vliv na tahové ani ohybové vlastnosti a to ani po stárnutí. Analýza vrubové houževnatosti Charpy však prokázala negativní vliv přídavku 10 a více hm. % regranulátu na vrubovou houževnatost, který se projevil po simulaci stárnutí materiálu. Naměřená hodnota MVR u regranulátu mírně překročila maximální hodnotu stanovenou v inspekčním certifikátu, čemuž odpovídá i rostoucí trend



v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu přidaného k panenskému materiálu. Mírný rozdíl v těchto hodnotách je však na hranici statistické významnosti a nelze mu přisuzovat vliv na mechanické vlastnosti před stárnutím. U hodnot naměřených po stárnutí došlo, v závislosti na hmotnostním obsahu regranulátu k nárůstu MVR až o 53 %, to může být indikátorem toho, že regranulovaný materiál prošel za dobu svého života více teplotními cykly než panenský materiál, což může mít za následek částečnou degradaci makromolekulárních řetězců, která se může výrazněji projevit až po stárnutí materiálu. Vliv zvýšeného MVR po stárnutí se na mechanických vlastnostech výrazně neprojevil, výjimkou je pouze vrubová houževnatost, která z hlediska funkce dílu a z ní vyplývajícího namáhání, není pro tento díl příliš důležitá, za podstatně důležitější lze považovat vlastnosti ohybové. Na základě DSC analýzy bylo zjištěno, že přídavek regranulátu nemá negativní vliv na termické vlastnosti a nadmolekulární strukturu materiálu. Pomocí rozměrové analýzy bylo zjištěno, že přídavek regranulátu 30 hm. % a více má negativní vliv na rozměrovou stálost dílu, jež se u vybraných funkčních, respektive kontrolních rozměrů projevil odchýlením těchto rozměrů mimo tolerance stanovené ve výkresové dokumentaci. Nutno však podotknout, že z důvodu vytiženosti měřícího zařízení byly použity střední hodnoty pouze ze dvou sérií měření.

Provedené experimenty prokázaly, že přídavek 10 až 20 hm. % regranulátu by neměl mít negativní vliv na tahové a ohybové vlastnosti a rovněž ani na rozměrovou stálost dílu. Ekonomické zhodnocení prokázalo, při používání 20 hm. % podílu regranulátu, úsporu přibližně 8,3 % nákladů na vstupní materiál ročně. Před začátkem sériové produkce dílu „Schaltstück“ s přídávkem regranulátu se však doporučuje provést více měření vybraných funkčních, respektive kontrolních rozměrů, za účelem potvrzení rozměrové stálosti dílu u vybraných obsahů přidávaného regranulátu. Jelikož se jedná o cyklicky namáhaný díl, doporučuje se provést zkušební montáž dílů vyrobených s přídávkem 20 hm. % a následně celý podvolantový modul podrobit zkoušce cyklického namáhání dle předpisu stanoveného zákazníkem v laboratoři dlouhodobých zkoušek ve firmě KOSTAL CR spol. s r.o.



Seznam použitých zdrojů

- [1] *Plasty v autech aneb K čemu slouží podrážedlo. Výzkum vývoj automotive. Technický magazín* [online]. Boomerang Publishing, vydavatelství firemních časopisů, 2015 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.vvautomotive.cz/plasty-v-autech-aneb-k-cemu-slouzi-podrazedlo/>
- [2] LÜFTL, S. a P. VISAKH. *Polyoxymethylene: State of Art, New Challenges. Polyoxymethylene Handbook. Structure, Properties, Applications*. New Jersey and Massachusetts: John Wiley & Sons and Scrivener Publishing, 2014. ISBN 978-1-118-38511-1.
- [3] FINK, J. *Polymerization and Manufacture of Polyoxymethylene. Polyoxymethylene Handbook. Structure, Properties, Applications*. New Jersey and Massachusetts: John Wiley & Sons and Scrivener Publishing, 2014. ISBN 978-1-118-38511-1.
- [4] ČERVENKA, Z. a J. JANKŮ. *Polyformaldehyd*. Bratislava: Dom techniky, 1961.
- [5] *Apparatus for contacting a gas with a liquid*. 1965. US Patent 3,172,736.
- [6] BĚHÁLEK, L. *Plasty – Diferenční snímací kalorimetrie (DSC)*. Liberec: TU v Liberci, b.r. Přednáška v rámci projektu „Přeshraniční kooperativní výuka zpracování plastů Zittau-Liberec (GreK)“.
- [7] BĚHÁLEK, L. *Polymery*. Code Creator, s.r.o., 2016. Dostupné také z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [8] ZEMAN, L. *Vstřikování plastů. 1. vydání*. Praha: Nakladatelství BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [9] ARCHODOULAKI, V. a S. LÜFTL. *Thermal Properties and Flammability of Polyoxymethylene. Polyoxymethylene Handbook. Structure, Properties, Applications*. New Jersey and Massachusetts: John Wiley & Sons and Scrivener Publishing, 2014. ISBN 978-1-118-38511-1.
- [10] RUSSELL, A., J. JANKŮ a Š. ĎURAŠ, Z. ČERVENKA. *Polyformaldehyd a kopolymer*. Praha: SNTL, 1965.



- [11] BEDOUI, F. a B. FAYOLLE. *POM Mechanical Properties. Polyoxymethylene Handbook. Structure, Properties, Applications*. New Jersey and Massachusetts: John Wiley & Sons and Scrivener Publishing, 2014. ISBN 978-1-118-38511-1.
- [12] MAIER, C. a T. CALAFUT. *Polypropylene: The definitive user's guide and databook*. Norwich: *Plastics Design Library*, 1998. ISBN 1-884207-58-8.
- [13] NEUHÄUSL, Emil. Problematika vstřikování recyklovaných termoplastů [online]. Praha: MM Publishing, 2011, (1), s. 34 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/problematika-vstrikovani-recyklovanych-termoplastu.html>
- [14] HAVEL, M. *Sít' ekologických poraden. Co je formaldehyd a máme se ho bát?* [online]. 2014 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: http://wiki.ekoporadna.cz/index.php?title=Co_je_formaldehyd_a_m%C3%A1me_se_ho_b%C3%A1t%3F
- [15] *Prospector*. Dostupné také z: www.ulprospector.com
- [16] PIELICHOWSKA, K. *Polyoxymethylene Processing. Polyoxymethylene Handbook. Structure, Properties, Applications*. New Jersey and Massachusetts: John Wiley & Sons and Scrivener Publishing, 2014. ISBN 978-1-118-38511-1.
- [17] *Plast partner* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.plastpartner.cz/POM-C>
- [18] *Petr Novák - obrábění kovů* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.obrabenikovuhk.cz/fotogalerie.html>
- [19] *BOSSARD* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://eu.shop.bossard.com/hn/cz/11241/ovladaci-prvky-pojistne-tlacitko/staveci-tlacitka-s-odpruzenou-kulickou/bn-13378_odpruzene-srouby-s-kulickou-a-drazkou-kulicka-delrin-bily-pom
- [20] *2B1st Consulting* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <https://www.2b1stconsulting.com/polyacetal/>
- [21] *Amazon*. Dostupné také z: <https://www.amazon.com/Plastic-Powerdrive-10M040B8-Pressure-Diameter/dp/B003HGGRRY>



- [22] BĚHÁLEK, L. *Teorie zpracování nekovových materiálů. Cvičení č. 13: Recyklace polymerů*. Liberec: TU v Liberci, b.r.
- [23] KHUNOVÁ, V. *Materiálová, surovinová a energetická recyklácia plastov. In: Plastové odpady - recyklace, zneškodnění: sborník semináře*. Praha: VŠCHT, 1999, s. 1-5. ISBN 80-7080-361-4.
- [24] MCCURRY, J. *Japan streets ahead in global plastic recycling race* [online]. Tokyo: Guardian Media Group, 2011 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/environment/2011/dec/29/japan-leads-field-plastic-recycling>
- [25] BUEKENS, A. *Introduction to Feedstock Recycling. Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics*. John Wiley & Sons, 2006. ISBN 0-470-02152-7.
- [26] AGUADO, J. a D. SERRANO. *Feedstock Recycling of Plastic Wastes. Cambridge: The Royal Society of Chemistry*, 1999. ISBN 0-85404-531-7.
- [27] *Aqueous process for recycling acetal polymer and moldings thereof*. 1994. H1339.
- [28] *Praktik system*. [cit. 2017-04-15]. Dostupné také z: <http://www.praktiksystem.cz/plasty/#abs-14>
- [29] LENFELD, P. *Technologie II. – 2. část (zpracování plastů)*. Liberec: TU v Liberci, 2009. Dostupné také z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/. ISBN 978-80-7372-467-2.
- [30] *Pure Loop* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: http://www.pureloop.at/en/isec_product/
- [31] ČSN EN ISO 3167. *Plasty - Víceúčelová zkušební tělesa*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Třídící znak: 64 0209.
- [32] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. Třídící znak: 64 0612.



- [33] *KLab – Engineering Plastics*. Dostupné také z: <http://www.klab-owl.de/laborausstattung/technikum/>
- [34] BĚHÁLEK, L. *Zpracování plastů*. Cvičení č. 3: Hmotnostní a objemový index toku taveniny termoplastů. Liberec: TU v Liberci, b.r.
- [35] *American Pharmaceutical Review*. [cit. 2017-05-16]. Dostupné také z: <http://media.americanpharmaceuticalreview.com/m/28/product/10704950-400x300.jpg>
- [36] MENCZEL, J., L. JUDOVITS, R. PRIME, H. BAIR, M. READING a S. SWIER. *Differential scanning calorimetry (DSC). Thermal analysis of polymers. Fundamentals and applications*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009. ISBN 978-0-471-76917-0.
- [37] BUCHTELE, J., STRAKA, P. aj. KOVÁŘOVÁ. *Kopyrolýza uhlí s odpadními plasty: Výtěžky a vlastnosti produktů*. In: *Plastové odpady - recyklace, zneškodnění: sborník semináře*. Praha: VŠCHT, 1999, s. 45-49. ISBN 80-7080-361-4.
- [38] BURNETT, R. a G. BAUM. *Engineering Thermoplastics. Plastics recycling: Products and processes*. Hanser Publishers, 1992. ISBN 3-446-15882-0.
- [39] *Trioxane polymerization process and apparatus*. 1966. US Patent 3,254,053.
- [40] *E-plyn*. [cit. 2017-04-13]. Dostupné také z: <http://www.e-plyn.cz/?p=productsList&iCategory=47&sName=Vodik>
- [41] *CWK-Recycling*. [cit. 2017-04-15]. Dostupné také z: <http://www.cwkrecycling.de/de/unsere-produkte/regranulate>
- [42] BĚHÁLEK, L. *Vlastnosti a inženýrské aplikace plastů. Přednáška č. 4: Morfologie polymerů*. Liberec: TU v Liberci, b.r.
- [43] SHAH, V. *Plastic parts failure analysis and product liability prevention*. 2006. Dostupné také z: <http://www.consultekusa.com/pdf/Consulting/Failure%20Analysis%20and%20Testing/Failure%20Analysis%20and%20Product%20Liability%20Prevention.pdf>



- [44] FINK, J. *Physical Properties of Polyoxymethylene. Polyoxymethylene Handbook. Structure, Properties, Applications*. New Jersey and Massachusetts: John Wiley & Sons and Scrivener Publishing, 2014. ISBN 978-1-118-38511-1.
- [45] LENFELD, P. *Technologie vstřikování* [online]. Code Creator, s.r.o., 2016 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://publi.cz/bo-oks/184/Cover.html>. ISBN 978-80-88058-74-8.
- [46] *Stäubli* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.staubli.com/en/robotics/6-axis-scara-industrial-robot/medium-payload-6-axis-robot/6-axis-industrial-robot-tx90/>
- [47] *Technická univerzita v Liberci. Katedra strojírenské technologie. Oddělení tváření kovů a plastů*. [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/plasty/plasty.htm>
- [48] ČSN EN ISO 294-1. *Plasty - Vstřikování zkušebních těles z termoplastů - Část 1: Obecné principy a vstřikování víceúčelových zkušebních těles a zkušebních těles tvaru pravoúhlého hranolu*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999. Třídící znak: 64 0210.
- [49] ČSN EN ISO 9988-2. *Plasty - Polyoxymethylen (POM) pro tváření - Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Třídící znak: 64 5703.
- [50] ČSN EN ISO 178. *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak: 64 0607.
- [51] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Třídící znak: 64 0604.
- [52] ČSN EN ISO 1133-1. *Plasty - Stanovení hmotnostního (MFR) a objemového (MVR) indexu toku taveniny termoplastů - Část 1: Standardní metoda*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Třídící znak: 64 0861.



- [53] ČSN EN ISO 11357-1. *Plasty - Diferenciální snímací kalorimetrie (DSC) - Část 1: Základní principy*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. Třídící znak: 64 0748.



Seznam příloh a přílohy

Příloha č. 1 - Materiálový list Kepital F10-03H

Příloha č. 2 - Inspekční certifikát Kepital F10-03H



POM | KEPITAL F10-03H | Standard grade

- A high-viscosity grade for general injection molding
- It has a high stiffness compared to general POM copolymer.

Physical properties	Test Standard	Unit	Value
Density	ISO 1183	g/cm ³	1.41
Melt flow rate	ISO 1133	g/10min	3
Water absorption(23 °C, 50 %RH)	ISO 62	%	0.2

Thermal properties	Test Standard	Unit	Value
Heat deflection temperature(1.8 MPa)	ISO 75	°C	100
Flammability	UL 94	–	HB
Melting point(10 °C/min)	ISO 11357	°C	168
Coefficient of linear thermal expansion	ISO 11359	X 10 ⁻⁵ /°C	12

Mechanical properties	Test Standard	Unit	Value
Tensile modulus	ISO 527	MPa	2,800
Tensile strength	ISO 527	MPa	68
Tensile strain at yield	ISO 527	%	12
Strain at break	ISO 527	%	40
Flexural strength	ISO 178	MPa	90
Flexural modulus	ISO 178	MPa	2,650
Charpy impact strength(Notched) @ 23°C	ISO 179/1eA	KJ/m ²	7.0
Charpy impact strength(Notched) @ -30°C	ISO 179/1eA	KJ/m ²	6.5

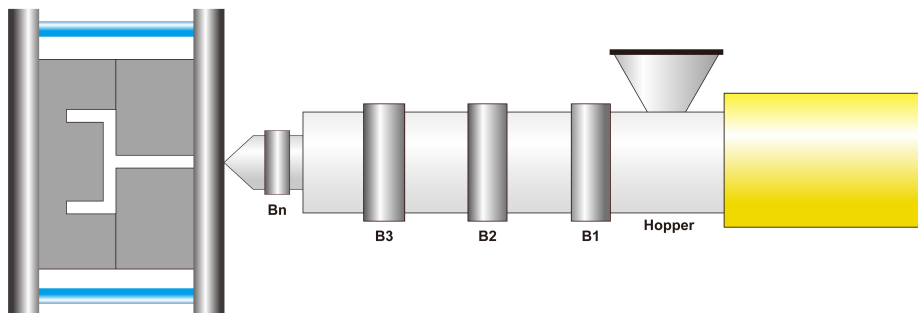
Electrical properties	Test Standard	Unit	Value
Surface resistivity	IEC 60093	Ω	1x10 ¹⁶
Volume resistivity	IEC 60093	Ω/ cm	1x10 ¹⁴
Dielectric strength	IEC 60243-1	kV/mm	19

Other	Test Standard	Unit	Value
Mold shrinkage(flow direction, Φ = 100 mm, t = 3 mm)	KEP Method	%	2.2

General information	Test Standard	Unit	Value
Polymer abbreviation	ISO 1043	-	POM

Revision No : 2 (2015-07-22)

Injection molding condition



Pre-drying (Suggested max. moisture : 0.1%)

It is recommend to dry material at 80°C ~ 100°C(176°F ~ 212°F) for 3 h ~ 4 h if necessary.

Temperature

Mold temperature : 60 °C ~ 80 °C(140 °F ~ 176 °F)

Barrel temperature : 170 °C ~ 210 °C(338 °F ~ 410 °F)

Mold	Bn(Nozzle)	B3(Metering)	B2(Compression)	B1(Feeding)	Hopper
60 ~ 80 °C	180 ~ 210 °C	190 ~ 200 °C	180 ~ 190 °C	170 ~ 180 °C	60 ~ 80 °C
140 ~ 176 °F	356 ~ 410 °F	374 ~ 392 °F	356 ~ 374 °F	338 ~ 356 °F	140 ~ 176 °F

Plastification

Screw speed : 150 mm/s ~ 200 mm/s

Back pressure : Maximum 20 bar

Contact information

Headquarters

Mapo-daero 119 (Gongdeok-dong), Mapo-gu, Seoul, Korea
Tel 82-2-707-6840 ~ 8, Telefax 82-2-714-9235

KEP Europe GmbH

Rheingaustrasse 190-196 D-65203 Wiesbaden Germany
Tel +49(0) 611 962-7381, Telefax +49 (0)611 962-9132

KEP Americas

106 North Denton Tap Road Suite 210-202 Coppell, TX
75019, USA
Tel +1 888 KEPITAL, Telefax +1 888 537-3291

KEP China

A1905, HongQiao Nanfeng Plaza, 100 Zunyi Road, Shanghai,
China
Tel +86 21 6237-1972, Telefax +86 21 6237-1803

Disclaimer

Notice to users : The information contained in this data sheet is based on our current knowledge and experience, so it may change as new knowledge and experience becomes available. This information is based on only above-mentioned product produced in Korea Engineering Plastics Co., Ltd. ("KEP") through relevant test methods and conditions and doesn't relate to any products made of this product with the inclusion of other additives, such as processing aids or colorants. This information should not be construed as a promise or guarantee of specific properties of this product described or its suitability for a particular application, so users make their own determination as to its suitability to their purposes prior to use this product. It is the sole responsibility of the users to investigate whether any existing patents are infringed by the use of this product. This product is not intended for use in medical and dental implants and users should meet all safety and health standards. KEP makes no warranty and assumes no liability in connection with any use of this information.

P 35351



To : KOREA ENGINEERING PLASTICS CO., Ltd.
 119 MAPO-DAERO, MAPO-GU,
 SEOUL, 121-020, KOREA
 Fax No. : Head Office: (Tel) 82-2-707-6830-38, (Fax) 82-2-714-9235
 Ulsan Plant: (TEL) 82-52-279-7830-3, (FAX) 82-52-279-7889
 http://www.KEPITAL.com


INSPECTION CERTIFICATE TO EN 10204 3.1B

Product Polyacetal Copolymer
 Brand Name KEPITAL Customer TEKUMA KUNSTSTOFF GMBH
 Grade F10-03H BK QTY 6MT
 Lot No. 6K21U
 Issued Date 2016-12-02 Production Date 2016-11-01

Test Item	Method	Unit	Spec.	Result	Remarks
Melt Index	ISO 1133	g/10min	2.5 - 3.9	3.4	
Tensile Strength	ISO 527	MPa	Min 63	63	
Nominal strain at break	ISO 527	%	Min 25	36	
Flexural Strength	ISO 178	MPa	Min 83	86	
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	Min 2300	2550	
Charpy Notched Impact Strength	ISO 179/1eA	kJ/m ²	Min 4	11.2	
Flammability	UL94	-	HB	HB	

ORIGINAL

TERMS OF DELIVERY : DDP GROBENLUDER

Signature : 
 Bong-soo, Kang
 Technical Team Manager
 Ulsan Plant