

Vliv procesních parametrů vstřikování na mikro- mechanické vlastnosti plněného polyetyleny

Bc. Jan Hotárek

Diplomová práce
2019

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Hotárek**
Osobní číslo: **T17283**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv procesních parametrů vstřikování na mikro-mechanické vlastnosti plněného polyetylenu**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracovat literární studii na dané téma**
- 2. Příprava zkušebních těles pro experiment**
- 3. Provedení experimentu**
- 4. Vyhodnocení naměřených hodnot**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **PTÁČEK, L a kol. Nauka o materiálu I. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2**
2. **PTÁČEK, L. a kol.;; Nauka o materiálu II, Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.**
3. **BALTÁ CALLEJA, F a Stojko Christov FAKIROV. Microhardness of polymers. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, xiii, 237 s. ISBN 0-521-64218-3.**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Ovsík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2019

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2019

Ve Zlíně dne 7. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně

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

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

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

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

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

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

⁴¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní díla:

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem procesních parametrů vstřikování na mikro-mechanické vlastnosti plněného polyethylenu.

Teoretická část se skládá z WPC, dále obsahuje základy technologie vytlačování a vstřikování a měření tvrdosti pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti.

V praktické části byl sledován vliv procesních podmínek vstřikování na mikro-mechanické vlastnosti zkušebních těles vytvořené základním materiálem polyethylenem a různým plnivem jako dřevem nebo břidlicí pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti.

Klíčová slova: WPC, vytlačování, vstřikování, DSI

ABSTRACT

Master's thesis deals with the influence of injection molding process parameters on micro-mechanical properties of filled polyethylene.

The theoretical part is composed of WPC, furthermore it contains basics of extrusion molding, the injection molding process and also measuring of indentational hardness by using the depth sensing indentation method (DSI).

In the practical part, the influence of injection molding parameters on micro-mechanical properties of the tested specimens formed by the base material polyethylene and with various fillers such as wood or slate was examined by using depth sensing indentation method.

Keywords: WPC, extrusion molding, injection molding, DSI

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D., za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Poděkování také patří mé rodinně za morální i materiálovou podporu během studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 DŘEVOPLASTOVÝ KOMPOZIT (WPC)	12
1.1 CHARAKTERISTIKA.....	12
1.2 MATRICE WPC	13
1.2.1 Polyetylen.....	13
1.2.2 Polypropylen	14
1.2.3 Polyvinylchlorid	15
1.3 PLNIVO WPC	16
1.3.1 Dřevní moučka	16
1.3.2 Dřevní vlákna	17
1.4 ADITIVA	17
1.5 OBLASTI VYUŽITÍ	18
2 VYTLAČOVÁNÍ	21
2.1 PRINCIP VYTLAČOVÁNÍ	21
2.2 STROJE PRO VYTLAČOVÁNÍ	22
2.2.1 Pístové vytláčovací stroje.....	23
2.2.2 Diskové vytláčovací stroje	24
2.2.3 Šnekové vytláčovací stroje.....	25
2.3 GRANULACE VYTLAČOVÁNÍM	27
2.3.1 Granulace za tepla	27
2.3.2 Granulace za studena.....	28
3 VSTŘIKOVÁNÍ	29
3.1 PODSTATA A PRINCIP VSTŘIKOVÁNÍ	29
3.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	30
3.3 ČASY VSTŘIKOVACÍHO CYKLU	32
3.3.1 Strojní doby	32
3.3.2 Doba vstřikování	33
3.3.3 Doba dotlaku	35
3.3.4 Doba plastikace	36
3.3.5 Doba chlazení.....	36
3.4 VLIV TEPLoty TAVENINY A TEPLoty FORMY	38
3.5 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VLASTNOSTI A KVALITU VÝSTŘIKU.....	39
4 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI	41
4.1 PRINCIP METODY	41
4.2 METODA DOERNERA A NIXE	42
4.3 METODA OLIVER A PHARR.....	43
4.4 INDENTAČNÍ KŘIVKY	43
4.5 URČENÍ VÝSLEDKŮ DSI ZKOUŠKY	45
4.5.1 Určení tvrdosti.....	45
4.5.2 Vtiskový modul pružnosti	46
4.5.3 Vtiskové tečení.....	46

4.5.4	Deformační práce	47
II	PRAKTICKÁ ČÁST	48
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	49
6	PŘÍPRAVA MATERIÁLU	50
6.1	ZÁKLADNÍ MATERIÁL	52
6.2	VZORKY PLNĚNÉ DŘEVEM	53
6.2.1	Jemně mleté dřevo.....	54
6.2.2	Hrubě mleté dřevo.....	57
6.3	VZORKY PLNĚNÉ BŘIDLICÍ.....	59
7	VSTŘIKOVÁNÍ MATERIÁLU	62
7.1	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	63
8	VYHODNOCOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	64
8.1	VTISKOVÁ TVRDOST H_{IT}	66
8.2	VTISKOVÝ MODUL E_{IT}	73
8.3	VTISKOVÉ TEČENÍ (CREEP) C_{IT}	80
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ	87
	ZÁVĚR	90
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	92
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	95
	SEZNAM OBRÁZKŮ	97
	SEZNAM TABULEK.....	100
	SEZNAM PŘÍLOH.....	102

ÚVOD

Dnešní doba se vyznačuje tím, že člověk je ve stresu, pospíchá. Proto se snaží, aby věci, které používá splňovaly dané vlastnosti, mezi které patří snadná údržba, ochrana životního prostředí (recyklace), životnost, mechanická odolnost a zdravotní nezávadnost.

Dřevo jako přírodní materiál lidstvo používá od nepaměti, avšak tento materiál přináší řadu kladů i negativ. Mezi ty kladné vlastnosti patří zejména jeho dostupnost, obnovitelnost a relativně nízká cena. Mezi negativní vlastnosti dřeva řadíme vliv klimatických podmínek, životnost a nutnost ošetřování. Dřevo je nutné chránit proti slunečnímu záření, vlhkosti nebo škůdcům.

Výše uvedené důvody vedly k rozšíření využívání relativně nového dřevoplastového kompozitu (WPC), který byl objeven na počátku 20. století. Dřevoplastové kompozity jsou kompromisem při kterém se zmírňují negativní vlastnosti dřeva, ale zlepšují se mechanické vlastnosti základního materiálu, při zachování vizuálního efektu dřeva. WPC materiál je vyráběn nejčastěji z polyetylenové (PE) nebo polypropylenové (PP) matrice. Přidávané plnivo je ve formě dřevní moučky nebo dřevních vláken. Nedílnou součástí WPC jsou přísady jako stabilizátory, barviva a jiné, které upravují finální produkt pro danou aplikaci.

WPC se v dnešní době využívá v různých odvětvích. Nejčastěji ve stavebním průmyslu, kde se z WPC vyrábí podlahový a plotový materiál nebo okenní rámy či v automobilovém průmyslu, kde se zejména z WPC vstříkují různé menší součásti palubní desky.

S vytvořením nových materiálů jako je WPC, bylo současně zapotřebí vytvořit nové metody pro zjištění jejich vlastností. Jednou z metod využívající pro zjištění mikro-mechanických vlastností WPC je instrumentovaná zkouška tvrdosti (DSI). Díky této zkoušce lze zkoumat vliv procesních parametrů vstříkování na daný plněný materiál a vyhodnotit, které procesní parametry nejvíce vyhovují danému plněnému materiálu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DŘEVOPLASTOVÝ KOMPOZIT (WPC)

Dřevoplastový kompozit je ve světě známý pod označením WPC (Wood-Plastic Composites). Vzniku WPC dopomohla snaha vymyslet materiál podobný masivnímu dřevu, který by jej dokázal nahradit, odolával by lépe vnějším podmínkám a materiál by byl téměř bezúdržbový. Složení WPC je spojení dvou rozdílných hlavních složek, a to polymeru zastávajícího funkci matice a dřeva zastávajícího funkci plniva. Nejběžnějšími polymery, které se využívají u WPC jsou polyetylen, polyvinylchlorid a polypropylen. Dřevo jako plnivo může mít formu dřevité moučky, rozmělněného dřeva nebo dřevěných vláken. Výhodou dřeva jako plniva je jeho nízká cena, proto v celkovém složení může být jeho obsah 50-70 %. [15, 19]

1.1 Charakteristika

První výroba WPC se uskutečnila počátkem 20. století, kdy vznikl materiál s názvem bakelit. Pod tímto názvem je schován materiál složený z fenol-formaldehydové pryskyřice a dřevité moučky. Za vznikem tohoto materiálu stál chemik Leo Hendrik Baekeland. Následně se do různých typů pryskyřic (např. polyamidových nebo polyesterových) zkoušely přidávat různá plniva (dřevní vlákna, dřevní piliny, azbestová vlákna, skelná vlákna atd.). [16]

Další posun ve výrobě WPC nastal v roce 1970, kdy proběhly první pokusy nahradit pryskyřice termoplastickými materiály, a to polypropylenem a polyetylenem. Dále se pozornost zaměřovala na zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností a také na kvalitu výroby. Mezi první komerční výrobky využívající WPC se zařadily okenní rámy a to v 80. letech. Další využití WPC materiálů se nacházelo v automobilovém průmyslu v 90. letech. Kdy se začaly využívat pro palubní desky a součásti automobilových interiérů. V současné době největší využití WPC materiálů je při výrobě WPC podlah. [16]

První typy WPC využívající termoplastické materiály měly složení 50 % polypropylenu (později polyetylenu) a 50 % dřevité moučky. Kvůli komerčnímu využití se druhy využívaných termoplastických materiálů zvětšovaly a různě modifikovaly. V současnosti se jako další matice dají využít PVC, ABS, polystyren, polyvinylchlorid a další. [16, 17]

Využití dané termoplastové matrice je dáno i s komptabilitou s daným typem plniva. Komptabilitu mezi plnivem a matricí lze zvýšit. Zvýšení se provádí dvěma způsoby. Jedním způsobem je přidání vhodného aditiva do struktury matrice. Druhý způsob využívá úpravu plniva pomocí hydrofobizace. Využití plniva nejvíce ovlivňuje, jakým způsobem bylo zpra-

cováno dřevo, a především tvar a velikost částic dřeva, v neposlední řadě také křivku zrnitosti v celém objemu. Největší zastoupení má dřevní hmota zpracovaná na dřevitou moučku. Ta může být buď ve formě částic o velikosti 0,01–1 mm, pilin s velikostí od 1–10 mm, třísek s velikostí 10–20 mm, nebo pravidelného tvaru, např. vločkovitého nebo vláknitého. Výběr složek WPC je velmi důležitý a udává směr jeho vlastností k aplikačním dispozicím. [17]

1.2 Matrice WPC

Využití termoplastu pro výrobu WPC je závislé na jeho bodu tání. Termoplasty se nejčastěji zpracovávají při dosažení teploty tání. Při této teplotě jsou tvárné. Omezení při výrobě WPC nastává při dosažení teploty 200 °C, kdy nastává rozklad hemicelulózy. To způsobuje degradaci chemické struktury plniva. Proto by tato teplota při výrobě WPC neměla být překročena, proto ideální typy polymerů pro výrobu WPC jsou polyetylen, polypropylen, polyvinylchlorid a polystyren. [18, 19]

1.2.1 Polyetylen

V komerční výrobě WPC výrobků je polyetylen nejvíce využívanou matricí. Polyetylen se produkuje v rozdílných typech. Ty se odlišují svými vlastnostmi od hustoty, délky molekulárního řetězce, větvení až po teplotu tání, ta se pohybuje mezi 106 až 130 °C. Výhoda polyetylenové matrice je minimální nasákavost, a to 0,02 % při 24 hodinovém ponoření do vody, také dobrá opracovatelnost a odolnost proti chemickým látkám (ochrana dřevitého plniva). Při výrobě WPC má větší zastoupení vysokohustotní polyetylen (HDPE) než nízkohustotní polyetylen (LDPE). Různé strukturální složení polyetylenů způsobuje rozdílné vlastnosti, které vždy pro daný typ stanovují zpracovatelskou technologii a aplikaci. [1, 19, 23]

Tab. 1 Rozdělení polyetylenů [19]

HDPE	Vysocehustotní polyetylen
MDPE	Středněhustotní polyetylen
LDPE	Nízkohustotní polyetylen
LLDPE	Nízkohustotní polyetylen s lineárním makromolekulovým řetězcem
VLDPE	Polyethylen s velmi nízkou hustotou a lineárním řetězcem
UHMWPE	Vysocemolekulový a vysocehustotní polyetylen

Tab. 2 Vlastnosti polyetylenu [23]

Vlastnosti	Druh PE	
	HDPE	LDPE
Hustota [g/cm^3]	0,94-0,97	0,915-0,935
Modul pružnosti [N/mm^2]	1000	200
Mez pevnosti [N/mm^2]	20-30	8-10
Stupeň krystalizace [%]	60-80	40-50
Oblast tavení krystalů [$^{\circ}\text{C}$]	130-135	105-110
Max. trvalé teplotní zatížení [$^{\circ}\text{C}$]	100	80
Koeficient teplotní roztažnosti [$1/\text{K}$]	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$

1.2.2 Polypropylen

Polypropylen se vyznačuje lepšími fyzikálně mechanickými vlastnostmi, a to menší hmotností, vyššími pevnostmi a tuhostí, lepší odolností v creepu a dobrou drsností povrchu než polyetylen. Polypropylen, jehož základem je monomerní jednotka. Prostorové uspořádání monomerní jednotky je téměř přesně dáno valenčními úhly atomů uhlíků. Propylenové jednotky jsou nesymetrické a mají možnost se do makromolekuly skládat různými způsoby. Tím lze rozdělit polypropylen na izotaktický, syndiotaktický a ataktický. Mezi nevýhody polypropyleny patří nízká vrubová houževnatost, odolnost vůči oxidaci a v teplotě skelného přechodu. Teplota skelného přechodu má za následek křehnutí materiálu a její hodnota u polypropyleny je u teplot pod 0°C . [1, 19, 23]

Tab. 3 Vlastnosti polypropyleny [23]

Vlastnosti	Polypropylen
Hustota [g/cm^3]	0,91
Modul pružnosti [N/mm^2]	1450
Mez pevnosti [N/mm^2]	21-37
Stupeň krystalizace [%]	60-75
Oblast tavení krystalů [$^{\circ}\text{C}$]	160-170

Max. trvalé teplotní zatížení [°C]	100
Koeficient teplotní roztažnosti [1/K]	$1,5 \cdot 10^{-4}$

1.2.3 Polyvinylchlorid

Polyvinylchlorid při výrobě WPC tvoří jenom malé procento výroby v porovnání s polypropylenem a polyetylenem, ale lze předpokládat jeho častější využívání, jelikož má dobré mechanické vlastnosti a odolnost vůči chemikáliím. Nevýhodou polyvinylchloridové matrice je špatná adheze k částicím plniva, proto se musí využívat plastifikátory k dosažení požadované adheze. Ty ovšem neovlivňují pouze samotnou zpracovatelnost materiálu, ale i výsledné vlastnosti kompozitu. Polyvinylchlorid může mít různé modifikace uspořádání a řetězení. Vyskytuje se obvykle v syndiotaktické nebo ataktické formě. Nemodifikovaný polyvinylchlorid má značně vysokou teplotu skelného přechodu, a to v rozmezí 70 až 90 °C. Vysoká teplota skelného přechodu je zapříčiněna krystalickou strukturou, a proto jej pro normální využití modifikujeme přísadami na plastifikovaný nebo flexibilní typ. [1, 19, 23]

Tab. 4 Vlastnosti polyvinylchloridu [23]

Vlastnosti	Polypropylen
Hustota [g/cm ³]	1,38
Modul pružnosti [N/mm ²]	2500
Mez pevnosti [N/mm ²]	35
Stupeň krystalizace [%]	5,4-15
Oblast tavení krystalů [°C]	200-212
Max. trvalé teplotní zatížení [°C]	80
Koeficient teplotní roztažnosti [1/K]	$45-125 \cdot 10^{-6}$

1.3 Plnivo WPC

Už název dřevoplastové kompozity nám říká, že jako plnivo se využívá dřevo, ale lze využít i jiné přírodní materiály jako len, konopí, nebo rostlinné zbytky zemědělských rostlin. Dřevo jako plnivo může být ve formě dřevité moučky, rozmělněného dřeva nebo dřevních vláken. Plnivo je obsaženo ve WPC obvykle od 50 % do 70 %. Dřevo jako plnivo se využívá kvůli své ceně (levnější než polymer) a tuhosti, a proto v kombinaci s polymerem lze získat pevný, tvrdý a lehký materiál se vzhledem dřeva. [19, 20, 25]

1.3.1 Dřevní moučka

Dřevní moučka se dá popsat jako částice o velikosti, která umožňuje průchod sítem 850 μm , a byla získána rozmělněním dřevní masy. Nejčastěji se na výrobu dřevní moučky využívá odpadní produkt dřevozpracujícího průmyslu (pilařský, nábytkářský závod, nebo lesní těžba). Kvalita dřevní moučky se hodnotí podle několika kritérií. Mezi ty patří původ dřeviny, poměr mísení dřeviny (různé druhy dřeva), nebo čistota. Tato kritéria určují i cenu plniva.

S rostoucími požadavky na kvalitu WPC z pohledu jeho vlastností nebo následného vzhledu se také využívá dezintegrované dřevní hmoty, kde je dané, z jakého typu dřeva se vyrábí. V neposlední řadě musí splňovat požadované parametry pro další zpracování. [19, 20, 21, 25]

Tab. 5 Vlastnosti dřevní moučky [19]

Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Rozměrové třídy [μm]	Poměr délka/tloušťka
190-220	50-150, 100-200, 200-450, 250-700	2:1-5:1

Dřevo můžeme rozdělit do 3 základních druhů:

1. Jehličnaté dřeviny – modřín, smrk, jedle, borovice
2. Listnaté dřeviny – dub, jasan, olše, lípa, topol
3. Křovinaté dřeviny

Dále pak lze dřevo rozdělit na tvrdé a měkké dřevo. Listnaté stromy můžeme označit za zastupce tvrdého dřeva a mají zpravidla vysokou hustotu. Jehličnaté stromy se pak řadí k zastupcům měkkého dřeva a jejich hustota je zpravidla nízká. [19, 20]

1.3.2 Dřevní vlákna

Dřevní vlákna mají lepší mechanické vlastnosti než dřevní moučka. Dřevní vlákna lze nahradit i přírodními vlákny jako lnem, konopím nebo sisalem. Délka vláken z tvrdého dřeva je obvykle 1 mm a délka vláken u měkkého dřeva je obvykle v rozmezí 3-8 mm. Fyzikální a chemické vlastnosti vláken jsou dány použitým druhem dřeva. Použitým dřevem se určují vlastnosti konečného produktu. Použitím dřevních vláken lze získat lepší tahovou pevnost, protažení a rázovou houževnatost. Nevýhodou dřevních vláken je složitější homogenizace, která je daná délkou vláken. Mezi další nevýhody lze zařadit vyšší absorpce vlhkosti a následné bobtnání, nebo vysokou cenu dřevních vláken oproti dřevní moučce. [19, 20, 25]

1.4 Aditiva

Aditiva se do WPC přidávají za účelem odstranit nedostatky a problémy, které vznikají při spojování dvou rozdílných materiálů. Aditiva využívající se ve WPC vykonávají dvě hlavní funkce. První funkce zlepšuje zpracovatelnost surovinové směsi a tím zlepšuje fyzikální a mechanické vlastnosti výsledného produktu, nebo druhou funkcí, která plní funkci ochrannou. [19, 20, 22, 24]

Stabilizátory mají zabraňovat a minimalizovat nežádoucí chemické reakce, které následně vedou k degradaci materiálu.

- Antioxidanty – jsou to látky zpomalující degradaci polymerní matice vlivem zvýšených teplot a narušování povrchových vrstev působením CO₂
- UV stabilizátory – absorbují ultrafialové záření, které způsobuje degradaci polymeru
- Tepelné stabilizátory pro PVC – speciální zpomalovače, které zpomalují uvolňování chlóru

Biocidy mají za úkol ochraňovat přírodní plnivo proti plísním a vnikání a šíření škůdců.

Kompatibilizéry se přidávají z důvodu úpravy přilnavosti povrchu vláken plniva k termoplastické matici.

Retardéry hoření jsou činidla využívající se ke snížení hořlavosti a zamezí hoření

- Nejčastěji využívané retardéry hoření jsou sloučeniny halogenidů a fosforu

Lubrikanty se využívají k úpravě reologie taveniny neboli při zpracování materiálu ovlivňují tečení taveniny směsi. Lubrikanty lze rozdělit na dva typy:

- Interní (vnitřní) lubrikanty – ovlivňují viskozitu taveniny a tokové charakteristiky

- Externí (vnější) lubrikanty – ovlivňující kluznost a lepivost taveniny a při homogenizaci a následném zpracování směsi se odlučuje a přesunuje se na povrch taveniny, kde vytváří separační vrstvu mezi materiálem a součástmi výrobního stroje (formy, šneku)

Barevné pigmenty mají za úkol ovlivnit estetickou stránku konečného výrobku. Pigmenty lze rozdělit do dvou kategorií.

- Ovlivňující směs – změna estetické stránky probíhá ovlivněním materiálu.
- Neovlivňující směs – změna estetické stránky probíhá přidáním pigmentu, který nereaguje s materiálem.

1.5 Oblasti využití

Oblasti využití WPC se v posledních letech rozšiřují, ale největší uplatnění je ve dvou hlavních oblastech. První oblast je stavebnictví, kde se primárně jedná o výrobu WPC materiálů pro vnější (exteriérové) použití a v posledních letech se rozšířila i výroba pro vnitřní (interiérové) použití. Druhou oblastí je automobilový průmysl, kde se vyrábí primárně vnitřní (interiérové) součásti. [19, 26]

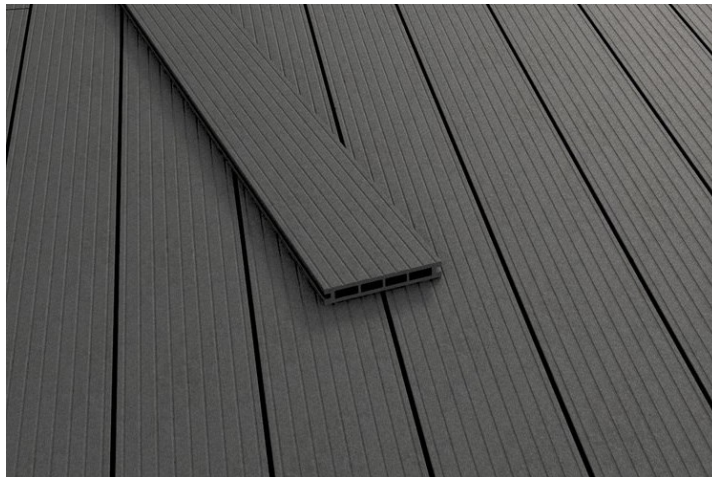
Aplikace WPC materiálů ve stavebnictví:

1. Vnitřní použití jedná se především o nenosné produkty, nebo produkty imitující dřevo.
 - a. Okenní rámy
 - b. Dveřní zárubně



Obr. 1 Dveřní zárubně [27]

- c. Žaluzie
 - d. Lišty (podlahové, okrasné)
2. Venkovní použití jedná se o materiál s velkými požadavky na odolnost a vzhled. To je zapříčiněno tím, že se má jednat o produkt s nízkými nároky na údržbu oproti přírodnímu dřevu, kterému se snaží konkurovat. Jsou to nejčastější produkty vyráběné z WPC materiálů.
- a. Terasová podlahovina



Obr. 2 Podlaha WPC [28]

- b. Plotové systémy



Obr. 3 WPC plot [29]

- c. Přístavní mola
- d. Zahradní nábytek

Aplikace WPC materiálů v automobilovém průmyslu. Jedná se o nejstarší obor využívající WPC materiály. V současnosti jej některé automobilky využívají díky snazší recyklaci po konci životnosti vozidla.

- a) Palubní desky
- b) Dveřní vložky



Obr. 4 WPC výplň automobilových dveří [30]

- c) Obložení interiéru
- d) Ostatní doplňky

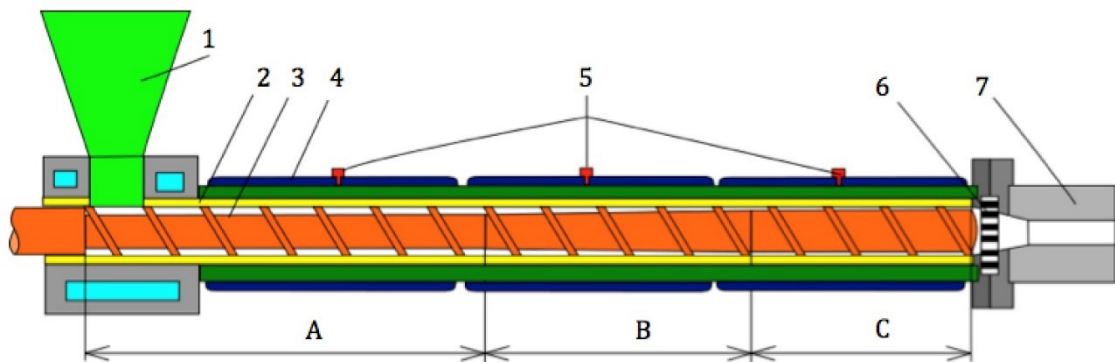
2 VYTLAČOVÁNÍ

Jedná se o technologickou operaci, kdy tavenina plastu je kontinuálně vytlačována pomocí vytlačovací hlavy do volného prostoru. Touto technologií lze vyrábět polotvary nebo konečné výrobky. Technologie vytlačování se dělí podle tvaru výrobku nebo polotvaru na tři skupiny. První skupinou je výroba fólií a desek. Druhou skupinou je výroba trubek a profilů a poslední skupinou jsou speciální způsoby, např. granulace vytlačováním, nebo opláštění vodičů vytlačováním. Uvedené technologie používají především šnekové vytlačovací stroje, ty však zpravidla nepracují samostatně. Většinou jsou součástí výrobních linek. Dalšími typy strojů jsou pístové nebo diskové. [1, 7, 8]

2.1 Princip vytlačování

Technologie vytlačování se uskutečňuje na vytlačovacích strojích neboli extrudérech. Vytlačovací stroj je tvořen velmi pevným rámem, v němž je uložen elektromotor určený pro pohon šneku. Elektromotor je plynule říditelný počtem otáček.

Převážná část vytlačovacích strojů přivádí polymery ve formě granulí, prášku, pásků nebo vloček do násypky. Z násypky jsou vtahovány do štěrbin mezi rotujícím šnekem a ocelovým válcem. Ocelový válec je vyhříván v několika regulovaných zónách elektrickými topnými pásy. Délka šneku se udává jako násobek jeho průměru a jeho hodnota bývá 20 až 40 D. Válec je rozdělen minimálně na 3 pásma, a to vstupní, přechodové a výstupní. Každé pásmo má svoji tepelnou regulaci. Materiál je ve válci dopravován směrem dopředu, míchán, stlačován, homogenizován a převeden do plastického stavu. Pod tlakem se vytlačuje přes takzvaný lamač, který slouží pro další homogenizaci, do vytlačovací hlavy (hubice). Lamač také slouží jako podpora síta, které zachytává neroztavený granulát a jiné pevné nečistoty. Sestavu nazýváme plastikační jednotka. Po vytlačení probíhají následující operace fixace tvaru a rozměru, chlazení, řezání nebo granulování. [1, 5, 7, 8]



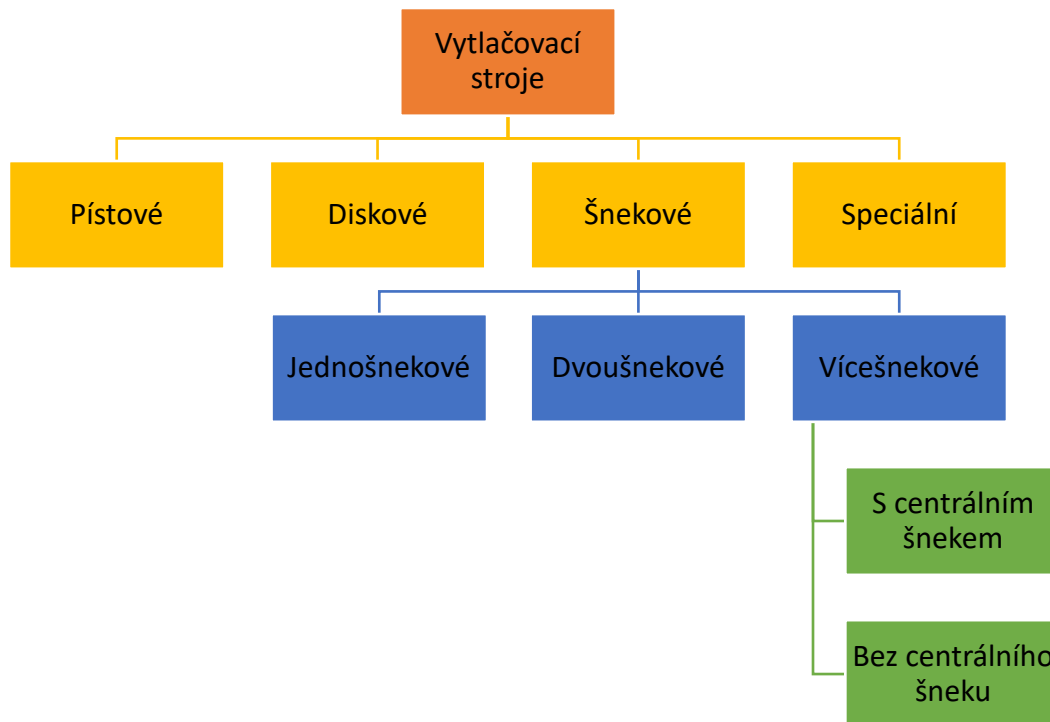
Obr. 5 Jednošnekový vytlačovací stroj [7]

Na obrázku 5 je schematicky znázorněn jednošnekový vytlačovací stroj kde:

- | | |
|---------------------|--|
| 1. Násypka | 4. Elektrické odporové topení |
| 2. Ocelový válec | 5. Termočlánky k měření teploty v zónách A, B, C |
| 3. Šnek | 6. Lamač |
| A. Vstupní pásmo | 7. Vytlačovací hlava |
| B. Přechodové pásmo | |
| C. Výstupní pásmo | |

2.2 Stroje pro vytlačování

Stroje pro vytlačování využívají různé konstrukce, u těch se mění pracovní člen v tavní komoře. Podle pracovního členu rozdělujeme stroje na pístové, šnekové, diskové. Vytlačovací stroje mají dané požadavky, které musí splňovat. Mezi tyto požadavky patří rovnoměrná doprava taveniny bez pulzací, vytlačování taveniny bez orientace, homogenní zamíchání polymeru i s eventuálními aditivy, místně a časově rovnoměrná teplota taveniny, která je nejvhodnější z hlediska výkonu stroje, zpracovávaného polymeru a také kvality vytlačovaného výrobku. [5, 7, 8]



Obr. 6 Rozdělení vytlačovacích strojů [5]

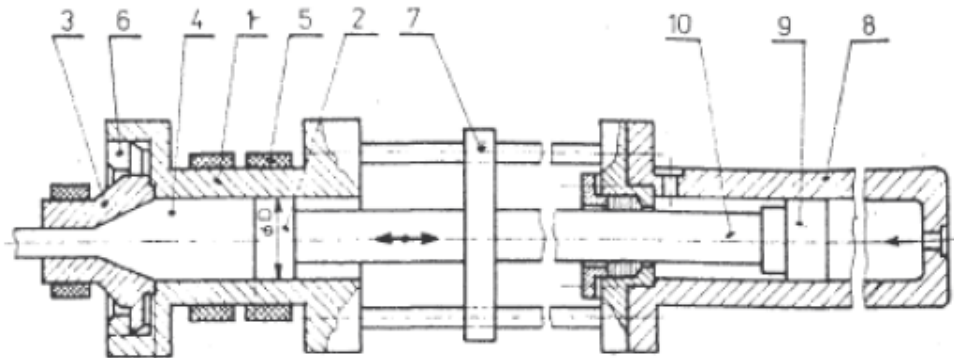
Vytlačovací stroje lze rozdělit také podle rychlosti stroje na rychloběžné a pomaloběžné stroje. Rychloběžné stroje díky vysokým otáčkám šneku (250 až 1500 min^{-1}) nepotřebují vytápění celého šneku a stačí jenom vytápnout začátek šneku, protože vyvinuté teplo třením stačí k roztavení materiálu. U pomaloběžných strojů je nutný neustálý ohřev tavicí komory. Rychloběžné stroje mají krátké šneky o délce 10 až $17 D$. [5, 8]

2.2.1 Pístové vytlačovací stroje

Vytlačovací stroje pístové využívají vytlačovací píst jako hlavní funkční část. Pohon vytlačovacího pístu zabezpečuje hydraulický nebo mechanický pohon. Je složen z pohonné a pracovní části. Pohonná část se skládá z hydraulického válce a pístu. Pístnice vedená v příčniku zabezpečuje spojení pohonné části s pracovní částí. Hydraulický válec je součástí dvoutlakového hydraulického obvodu. Nižší tlak při dodávkách velkého množství hydraulické kapaliny zabezpečuje pomocné a přípravné posuny válce. Zato vyšší tlak (10 až 30 MPa) má za úkol pracovní pohyb pístu. [5, 7, 8]

Pracovní část je složena z pracovního válce, pístu a vytlačovací hlavy. Do pracovního válce se vkládá materiál určený pro vytlačování. Velikost pístového vytlačovacího stroje je dána maximální vytlačovací silou, kterou stroj vyvine. Dále je dána průměrem pracovního válce

a jeho zdvihem. Využití pístových vytlačovacích strojů je pro materiály se špatnými točivými vlastnostmi (PTFE) a také pro materiály citlivé na teplotu (PF). Při vytlačování nedochází k namáhání materiálu vysokým smykovým zatížením. Proto je metoda vhodná pro výrobu profilů v relativně úzkých výrobních tolerancích. Pístový vytlačovací stroj má diskontinuální chod, což je bráno jako nevýhoda. [5, 7, 8]



Obr. 7 Pístový vytlačovací stroj [5]

Na obrázku 7 je schematicky znázorněn pístový vytlačovací stroj:

- | | |
|-------------------------|----------------------|
| 1. Pracovní válec | 6. Bajonetový uzávěr |
| 2. Pracovní píst | 7. Vedení pístnice |
| 3. Vytlačovací hlava | 8. Hydraulický válec |
| 4. Vytlačovaný materiál | 9. Píst |
| 5. Topná tělesa | 10. Pístnice |

2.2.2 Diskové vytlačovací stroje

Zvláštního chování zpracovávaného materiálu podmíněného jeho viskoelastickými vlastnostmi (Weissenbergův efekt) se využívá u diskových vytlačovacích strojů. Výkon diskového vytlačovacího stroje závisí na průměru a tvaru disku, smykové rychlosti a použitého polymeru. [5, 7, 8]

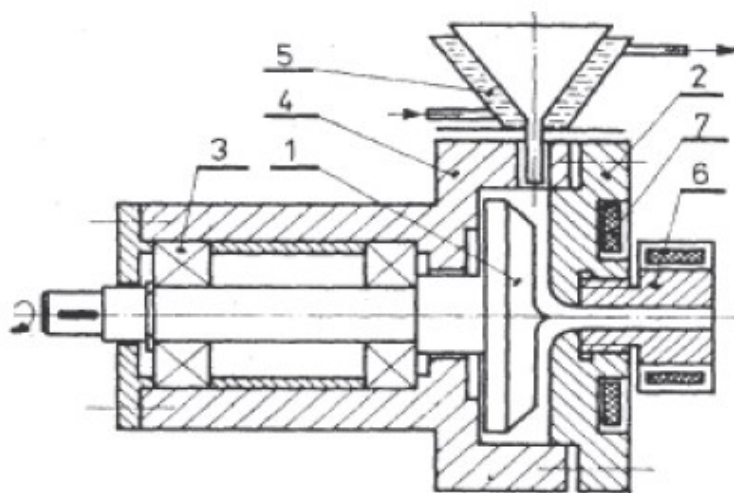
Hlavní částí je disk, který je uložený v ložiskách a vykonává otáčející pohyb v tělese. Disk vytváří proti čelní desce štěrbinu, do té je přiváděn materiál skrze chlazenou násypku. Následně se natavuje a pomocí účinku elastického napětí se dopravuje v radiálním směru k vytlačovací hubici. [5, 8]

Vytlačovací tlaky dosahují jen velmi malých hodnot (řádově desetiny MPa). Jejich velikost je závislá na normálovém napětí, které je funkcí tzv. gradientu rychlosti. Gradient rychlosti

má optimální hodnotu v rozmezí 400–500 s⁻¹. Vyšší hodnoty mají za následek nežádoucí jevy, jako např. elastické turbulence nebo vyšší ohřev.

Výkon diskového vytlačovacího stroje je určen jeho konstrukčním uspořádáním (tvar pístu, průměr, otáčky), smykovou rychlostí a vlastnostmi zpracovávaného materiálu.

Výhodou diskového vytlačovacího stroje je dobrá homogenizace taveniny a velmi dobré ovládání plastikace. Nevýhodou je dosažení velmi nízkých vytlačovacích tlaků. [5, 8]



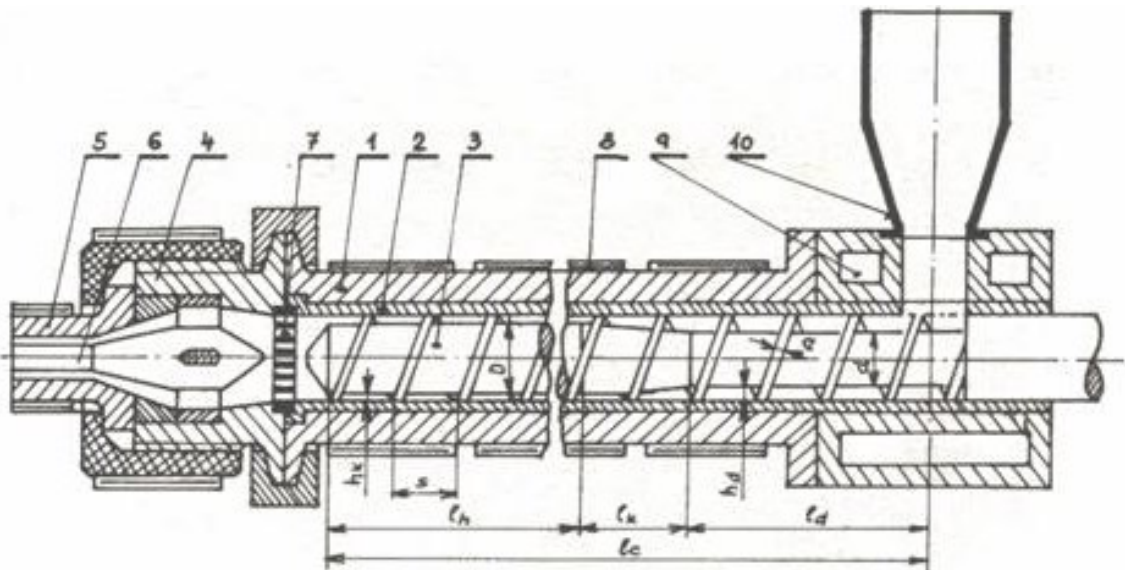
Obr. 8 Diskový vytlačovací stroj [5]

Na obrázku 8 je schematicky znázorněn diskový vytlačovací stroj kde:

- | | |
|----------------|----------------------|
| 1. Rotor | 5. Násypka |
| 2. Čelní deska | 6. Vytlačovací hlava |
| 3. Ložisko | 7. Topné těleso |
| 4. Těleso | |

2.2.3 Šnekové vytlačovací stroje

Materiál (např. granulovaný polymer) je přiveden z násypky do vstupní části, kde se zachytí, následně se předejde a za odplynění se stlačí. V kompresní části je polymer následně dále stlačován, plastikován a homogenizován v případě použití přísad. V poslední výstupní části je tavenina materiálově i tepelně homogenní, následuje vytlačování pod kontinuálním tlakem do vytlačovací hlavy. Pro zpracování plastů se využívají zejména jednošnekové vytlačovací stroje, ale lze použít např. i dvoušnekové vytlačovací stroje pro různé aplikace. [5, 7]

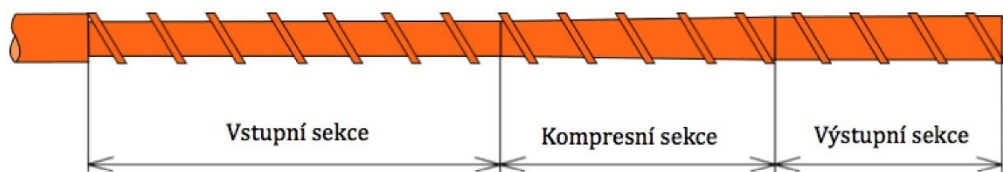


Obr. 9 Šnekový vytlačovací stroj [5]

Na obrázku 9 je schematicky znázorněn šnekový vytlačovací stroj kde:

- | | |
|---------------------------|-------------|
| 1. Pracovní válec | 6. Trn |
| 2. Pouzdro, tavicí komora | 7. Lamač |
| 3. Šnek | 8. Topení |
| 4. Vytlačovací hlava | 9. Chlazení |
| 5. Hubice | 10. Násypka |

Vytlačovací šnek je základní funkční částí vytlačovacího stroje. Základními parametry jsou průměr šneku, délka šneku, stoupání závitu, hloubka šnekového profilu, hloubka šnekového kanálu a úhel stoupání závitu. Šnek lze rozdělit na tři pásma, první je pásmo vstupní, druhé pásmo je přechodové a poslední pásmo je výstupní. Důležitou veličinou u šnekových vytlačovacích strojů je kompresní poměr. Ten udává poměr objemů šnekového profilu pro jedno stoupání ve dvou místech šneku. Obvykle se jedná o počátek šneku pod násypkou a konec šneku. Změnu kompresního poměru lze docílit změnou hloubky šnekového profilu. [5, 7, 8]



Obr. 10 Třísekční vytlačovací šnek [7]

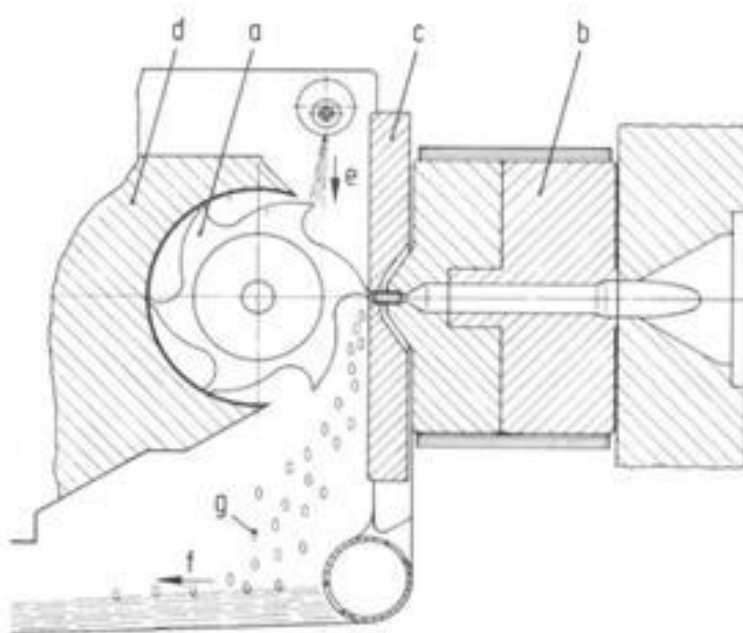
2.3 Granulace vytlačováním

Granulace je zpravidla konečným stupněm přípravy pro většinu plastových materiálů. Materiál ve formě granulí je vhodný pro další zpracování, například pro míchání s dalšími materiály jako barviva nebo plniva. Výběr granulární metody je určen vlastnostmi materiálu, prostorem, požadovaným výkonem a ekonomickým hlediskem.

Vytlačovací stroje pro výrobu granulátu jsou osazeny strunovými vytlačovacími hlavami. Výrobu granulátu lze rozdělit na dva způsoby, které se liší teplotou struny při dělení. První způsob je vytlačování strun (pásků) dělících až po vychladnutí struny. Tato metoda je nazývána granulace za studena. Druhým způsobem je dělení struny hned po výstupu z vytlačovací hlavy. Tato metoda je nazývána granulace za tepla. [5, 7, 8]

2.3.1 Granulace za tepla

Princip granulace na hlavě spočívá v tom, že vytlačovací stroj je osazen vytlačovací nožovou hlavou, která má tvar dřevé desky. Přes tuto desku je materiál protlačován, rotační nůž ořezává protlačený materiál a vznikají granule. Granule jsou chlazeny vzduchem nebo vodou, aby nedocházelo ke slepování. Chladicí médium je často využíváno i k transportu granulí k dalšímu zpracování. Tvar granulí vyrobených touto metodou má specifický tvar čoček nebo pecek. [5, 8]



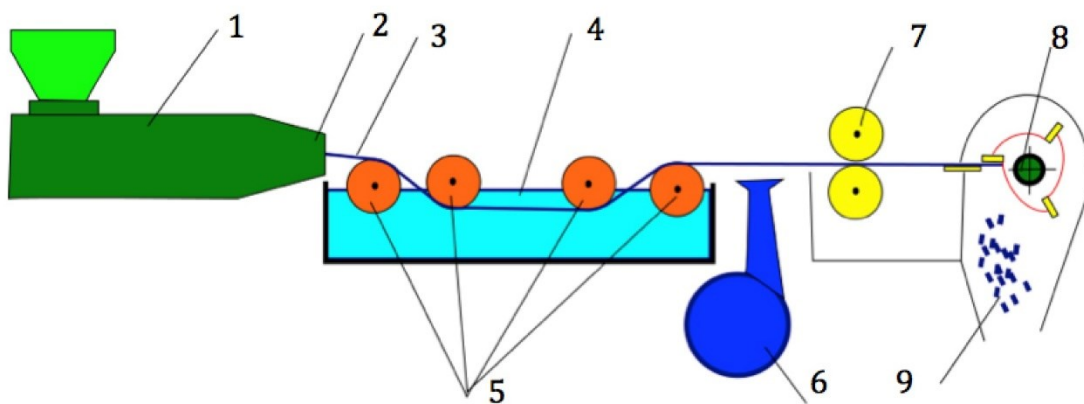
Obr. 11 Granulace na hlavě [8]

Na obrázku 11 je schematicky znázorněna granulace na hlavě kde:

- | | |
|------------------------|---------------------|
| a) Sekací nožová hlava | e) Ochlazovací směs |
| b) Vytlačovací hlava | f) Pásový dopravník |
| c) Děrovaná deska | g) Granule |
| d) Granulační zařízení | |

2.3.2 Granulace za studena

Princip výroby granulátu ze struny je založen na tom, že vytlačovací stroj vytlačuje přes vytlačovací hlavu struny o průměru kolem 3 mm, ale je možné vytlačovat struny i o průměrech 1 milimetr až 10 milimetrů. Struny jsou dále vedeny přes chladicí lázeň k odtahovacímu zařízení a pak jsou následně granulovány pomocí nožového granulátoru (rotujících nožů). Granulovací stroj se volí podle toho, zda se vytlačuje struna nebo pásek. Granule vyrobené ze strun mají specifický tvar válečku, případně krychle. Po průchodu struny přes chladicí lázeň je důsledkem vysoký obsah vlhkosti v granulátu, proto se granulát před dalším zpracováním musí sušit. [5, 7, 8]



Obr. 12 Granulace za studena [7]

Na obrázku 12 je schematicky znázorněna granulace za studena kde:

- | | |
|------------------------------|----------------------|
| 1. Šnekový vytlačovací stroj | 6. Ventilátor |
| 2. Granulační hlava | 7. Podávací válečky |
| 3. Vytlačovaná struna | 8. Nožový granulátor |
| 4. Chladicí lázeň | 9. Granule |
| 5. Vodící válečky | |

3 VSTŘIKOVÁNÍ

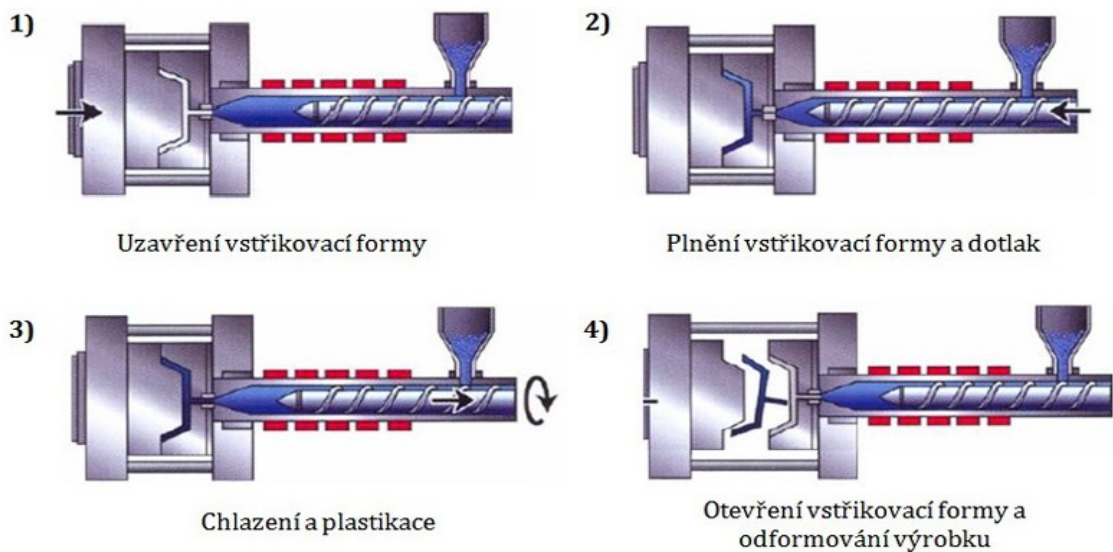
Technologie vstřikování je nejrozšířenější metodou pro zpracování plastů pro velkosériovou výrobu. Jedná se o proces diskontinuální, cyklický. Vstřikování se využívá téměř pro všechny druhy termoplastů, méně často se využívá i pro vstřikování reaktoplastů a kaučuků. Metoda vstřikování se využívá pro výrobu konečného výrobku, nebo polotvarů pro další zpracování. Díly vytvořené vstřikováním mohou mít velmi rozdílnou váhu, a to u malých vstřikovaných dílů od hmotnosti 0,1 g, až po velké vstřikované díly s hmotností až několik kilogramů.

Charakteristikou vstřikovaných výrobků je velmi dobrá rozměrová i tvarová přesnost, dále se vyznačují vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností. Mezi výhody lze zařadit výborná kvalita povrchu, krátké výrobní cykly, nebo že lze na jeden cyklus získat hotový (konečný) díl, který může být velmi tvarově složitý. Vstřikovací technologie má i nevýhody, mezi ty patří velké pořizovací náklady na nákup strojů a forem nebo odladění procesu (úprava formy, technologických parametrů). [1, 2, 4]

3.1 Podstata a princip vstřikování

Technologie vstřikování je metoda zpracování plastů, kdy je zpracováváný materiál převeden do taveniny a je vstříknut v daném množství (dávce) pomocí šneku nebo pístu velkou rychlostí z plastikační komory do kovové vstřikovací formy. Součástí vstřikovacího stroje je plastikační komora se zásobou vstřikovaného materiálu, který se v ní stále doplňuje během výrobního cyklu.

Princip technologie vstřikování je následovný, polymer ve formě granulí je nasypán do násypky stroje, která ústí k pracovní části vstřikovacího stroje šneku nebo pístu. Pracovní část vstřikovacího stroje odebírá granulát, který se následně dopravuje do tavicí komory, kde pomocí tření a topení plast taje. V tavicí komoře vzniká tavenina. Tavenina se dále vstřikuje do dutiny kovové formy, kde tavenina zaujímá tvar formy a celou ji zaplní. Plast předává formě teplo a ochlazením tavenina tuhne a vzniká finální výrobek. Následně se forma otevře a výrobek je vyhozen z formy. Vstřikování je metoda cyklická, děj se opakuje, dokud není vyrobeno požadované množství kusů. [1, 2, 4]



Obr. 13 Vstříkovací cyklus [3]

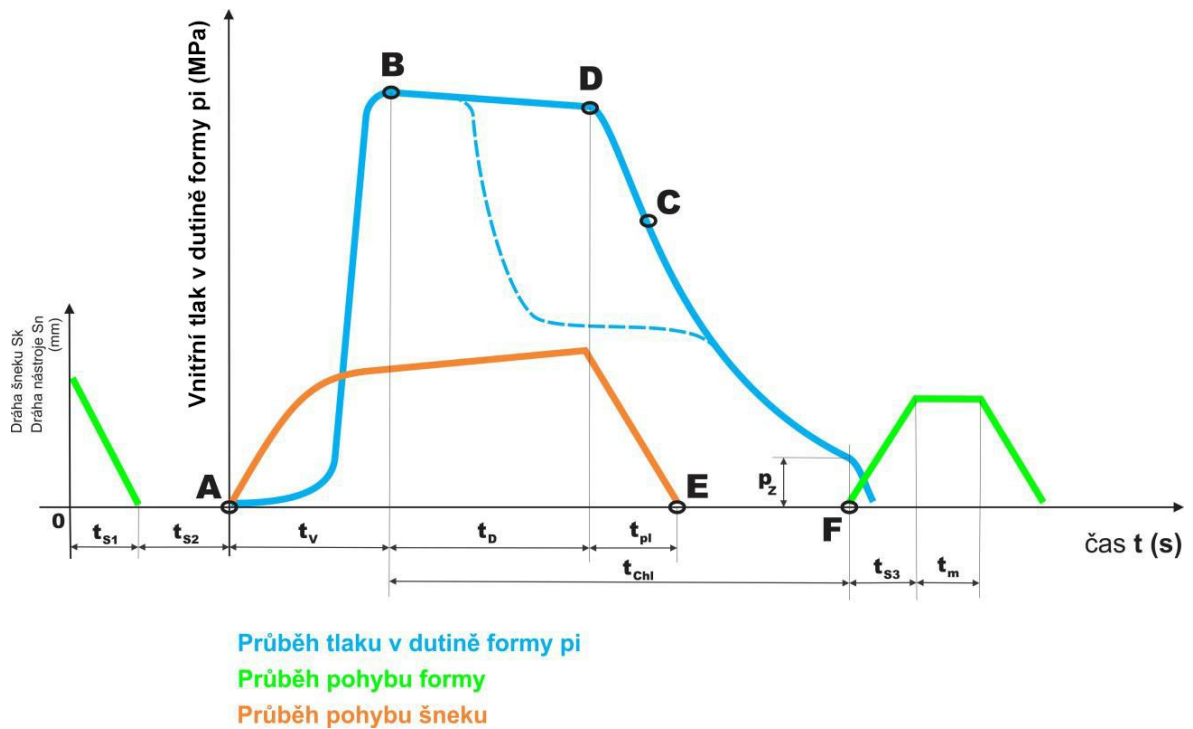
Vstříkovací cyklus je dán přesně danými specifickými úkony. Jedná se o proces neizotermický, při němž plast prochází teplotním cyklem. Pro popis vstříkovacího cyklu je nutno jednoznačně definovat jeho začátek. Počátek cyklu lze definovat jako impuls k uzavření formy.

Ke vstříkování plastů se využívají vstříkovací stroje. Ty lze rozdělit podle využívaného typu pohonu na hydraulické, elektrické nebo hybridní. Vstříkovací stroje mají vstříkovací a uzavírací jednotky, které jsou na sobě nezávislé a jsou řízeny řídicí mikroprocesorovou jednotkou. Uzavírací jednotka provádí otevírání a zavírání vstříkovací formy, také zajišťuje, aby forma zůstala v zavřeném stavu během vstříkování, následný dotlak ale i vyhození výrobku. Vstříkovací jednotka má za úkol dopravu plastu, plastikaci, vstříkování a také dotlak taveniny plastu. [1, 2, 4, 5]

3.2 Vstříkovací cyklus

Vstříkovací cyklus se skládá z přesně po sobě jdoucích kroků, které se podílí na výrobě vstříkovaných dílů. Vstříkovací cyklus je proces, v jehož průběhu plast prochází teplotním a tlakovým cyklem.

Vstříkovací cyklus můžeme definovat i z hlediska zpracování plastu a vyjádřit jej jako závislost tlaku v dutině formy na čase, nebo také pomocí p - v - T diagramu. Tlak využitý pro definici závislosti tlaku v dutině formy na čase nazýváme vnitřní tlak a značí se p_i . Vedle vnitřního tlaku existuje tlak vnější, označovaný p_v , který udává tlak vztažený na jednotku plochy průřezu šneku. [1, 2, 4, 6]



Obr. 14 Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování [4]

Na počátku vstřikovacího cyklu je dutina formy prázdná a forma je otevřená. V nulovém čase obdrží stroj impuls k zahájení cyklu. Proběhne uzavření formy a uzamknutí, kdy pohyblivá část formy se přisune k pevné části formy (strojní doba). Přisouvání a uzamknutí formy jsou činnosti, které je nezbytné odlišit. Na přisouvání formy dostačuje vynaložit jen malou sílu F_p . Pro uzamknutí vstřikovací formy je nutno vynaložit vyšší uzavírající sílu F_u . Uzavírající síla zaručuje, že při vstřikování se forma vlivem tlaku taveniny neotevře. Následuje pohyb šneku a začíná vstřikování taveniny do dutiny vstřikovací formy. Při tomto úkonu šnek zastává funkci pístu, neotáčí se a koná jenom axiální pohyb. Po naplnění formy je tavenina stlačena a tlak dosáhne maximální hodnoty. [2, 4, 6]

Při vstupu taveniny do dutiny formy tavenina okamžitě začne předávat teplo vstřikovací formě a chladne. Chlazení probíhá až do doby, kdy se otevře forma a dojde k vyjmutí výstřiku. Praxe rozděluje chlazení na dobu chlazení při plném vstřikovacím tlaku a na dobu chlazení při klesajícím tlaku. Doba chlazení se odvíjí od teploty formy T_F a tloušťky stěny výrobku. Jednou z nevýhod vstřikování je, že při chladnutí se hmota smršťuje a zmenšuje svůj objem. Přitom hrozí vytvoření propadlin, staženin, proto je nutné zmenšování objemu co nejvíce omezit a toho je docíleno dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy. Tato funkce je nazývána dotlak. Velikost dotlaku může být po celou dobu stejně vysoká jako

maximální tlak použitý při vstřikování, nebo se může po několika sekundách snížit a po zbytek chladnutí probíhá chladnutí za sníženého tlaku. Dotlak se dělí na izobarický nebo izochorický. Využití dotlaku je podmíněno tím, že před čelem šneku zůstane určitý objem plastu (polštář), na který šnek bude působit svým čelem. Objem plastu by se měl pohybovat kolem 10 až 15 %, při větším objemu by mohlo docházet k tepelné degradaci hmoty. [1, 2, 4]

Po skončení dotlaku probíhá plastikace nové dávky plastu. Šnek začne vykonávat otáčivý pohyb, pod násypkou nabírá granulát, který plastikuje a vtlačuje do prostoru před čelem šneku. Šnek se pohybuje dozadu, při tomto pohybu musí překonávat zpětný tlak (protitlak). Výška protitlaku ovlivňuje dobu plastikace, a i kvalita prohnětení roztaveného plastu. Protitlak zvolený příliš vysoký může způsobit degradaci plastu. Ohřev plastu při plastikaci probíhá převodem tepla ze stěn válce (topení), dále probíhá frikčním teplem, které vzniká třením plastu o stěny komory a o povrch šneku, a v neposlední řadě přeměnou hnětací práce šneku v teplo. Pokud je tavící komora opatřena samouzavíratelnou tryskou, může plastikace probíhat, i když je forma otevřená. Podle možností může probíhat odsunutí tavící komory od formy, nebo také nemusí. V průběhu chlazení tlak ve formě nadále klesá, až dosáhne hodnoty zbytkového tlaku p_z , to je tlak ve formě těsně před jejím otevřením. Je-li hodnota zbytkového tlaku příliš vysoká, může to mít za následek vznik vysokých vnitřních pnutí ve výstřicích, které mohou způsobit až samovolné praskání u křehkých hmot. Zbytkový tlak jde upravit zkrácením doby dotlaku, anebo naprogramováním průběhu tlaku během dotlaku. Po dokonalém zchladnutí výstřiku se forma otevře a výstřik se vyhodí z formy. [1, 2, 6]

3.3 Časy vstřikovacího cyklu

Každý úsek vstřikovacího cyklu má různě dlouhou dobu trvání. Tyto časy ovlivňuje geometrie výstřiku nebo použité technologické podmínky vstřikování. Dále záleží na konstrukci vstřikovací formy a typu stroje. [1, 2]

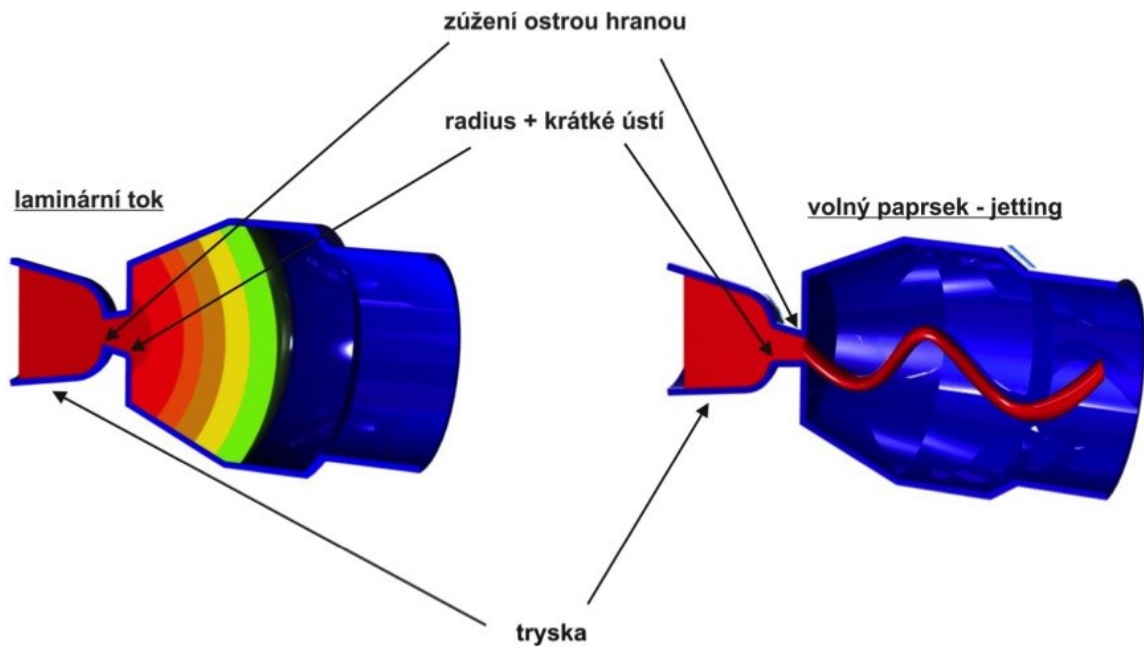
3.3.1 Strojní doby

Strojní doba na uzavření formy t_{s1} a na otevření formy t_{s3} je dána rychlostí, jakou se pohybuje forma po dráze a dráhou, kterou musí forma urazit. Rozměry výstřiku udávají dráhu otevření formy, v dráze musí být dostatečně velká, aby se dal výrobek jednoduše z formy vyjmout. V případě využití manipulátoru, nebo robota musí vzniknout dostatečný prostor pro jeho činnost ve formě. Přitom se dbá na to, aby strojní časy byly co nejmenší. Toho lze dosáhnout

zvýšením rychlosti pohybu formy. U modernějších strojů není rychlost po celou dobu konstantní, z počátku se forma pohybuje velkou rychlostí a chvíli před dosednutím formy se rychlost sníží, aby nedošlo k poškození formy a obě části formy na sebe dosedly. Při otevírání formy je nejprve její rychlost vysoká a před dojezdem formy na doraz se rychlost sníží, aby docházelo k vyhození výrobku z formy pomalu. Celkový součet strojních časů t_{s1} , t_{s2} , t_{s3} nepřesahuje několik málo sekund. Mimo strojních časů, které jsou součástí vstřikovacího cyklu, jsou další strojní doby překryty dobou chlazení. [1, 2, 4, 6]

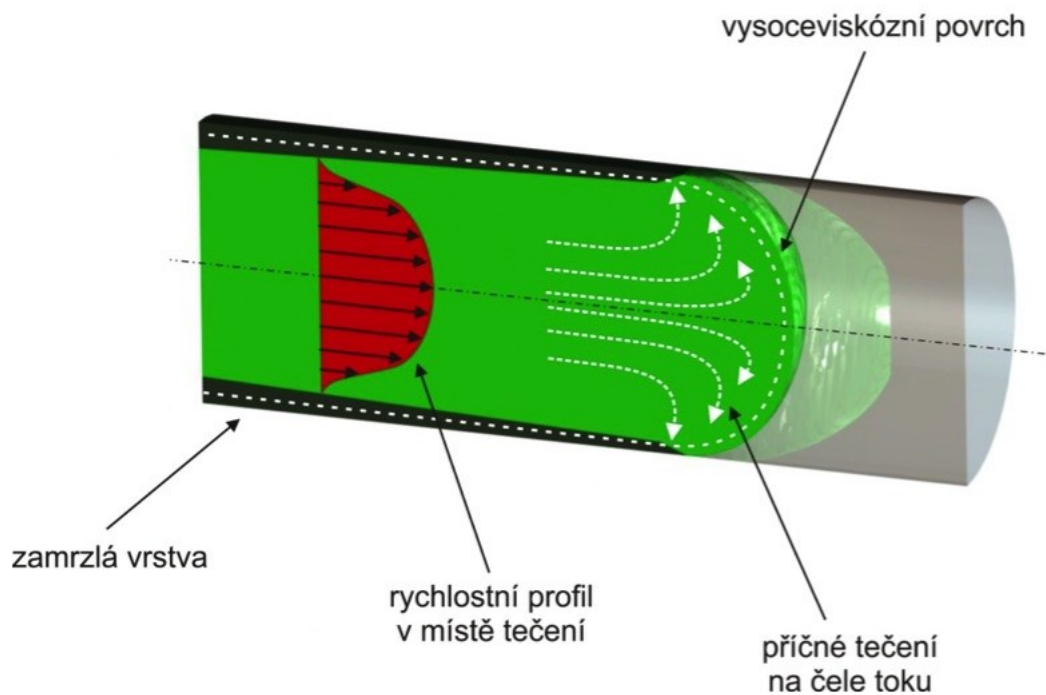
3.3.2 Doba vstřikování

Doba plnění dutiny formy t_v závisí na rychlosti vstřikování neboli na rychlosti pohybu šneku vpřed, která se odvíjí od zvolených technologických podmínek, zejména od teploty taveniny T_{tav} , také od vstřikovacího tlaku p . Nezanedbatelný vliv má i teplota formy, geometrický tvar či objem výstřiku, dále pak řešení vtokové soustavy a druh vstřikovaného plastu. Ovšem nelze nastavit velkou vstřikovací rychlost při nízkém tlaku, k dané hodnotě vstřikovací rychlosti patří určitá hodnota vstřikovacího tlaku. Pro výrobky, kde je požadovaný kvalitní povrch, velká rozměrová přesnost, nebo pro výrobky složitých tvarů lze programovat průběh rychlosti vstřikování. Použitím vysoké rychlosti vstřikování je docíleno příznivé orientace makromolekul, ale může dojít k přehřátí materiálu nebo jeho degradaci. Doba plnění závisí na velikosti výstřiků, může trvat od zlomku sekundy u malých dílců po několik sekund u velkých dílců. Doba plnění by měla dosahovat co nejkratší doby, jelikož vstřikovaná tavenina při doteku s chlazenou formou se ochlazuje a ztrácí svoji tekutost. Kdyby vstřikování bylo nepřiměřeně dlouhé, mohlo by dojít k tomu, že vstřikovaná tavenina by nezaplnila celou dutinu formy a vznikl by nedostříknutý zmetek. Proces plnění je nutné upravovat a řídit tak, aby materiál vtékal do formy postupně a zamezilo se plnění volným tokem. Při postupném plnění (laminárním toku) se jedná o složitý mechanismus tuhnutí vrstev taveniny. Tavenina při styku se stěnou formy okamžitě ztuhne, vytvoří vrstvu nepohyblivé hmoty, ale i vrstvu tepelné izolace, což je zapříčiněno rozdílnou teplotou taveniny a stěny formy. Teplota formy je mnohem nižší než teplota taveniny, a to přibližně 3krát až 4krát. [1, 2, 4]



Obr. 15 Plnění volným tokem (jettingem) a laminárním tokem [4]

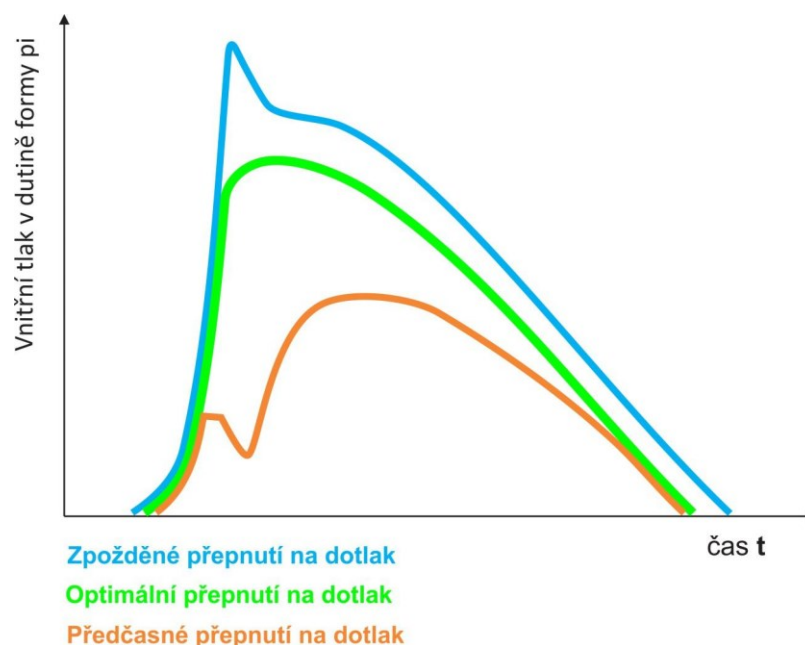
Uvnitř je potom plastické jádro s nízkou viskozitou umožňující další průtok taveniny plastu do dutiny formy, která se potom roztéká směrem ke stěnám, až dojde k zaplnění tvarové dutiny formy. Vzhledem ke zvyšování viskozity směrem ke stěně formy dochází k rostoucí rychlosti v plastickém jádru a k zakřivení čela. Pokles tlaku je potom směrem ke stěně formy. [1, 6]



Obr. 16 Laminární tok taveniny plastů [4]

3.3.3 Doba dotlaku

Po naplnění tvarové dutiny formy následuje stlačování hmoty, kdy tlak strmě stoupne a rychlost náhle klesne. Změnou tlaku se zamezuje vzniku tlakové špičky, která by vznikla, kdyby tlak zůstal na původní hodnotě. Tlaková špička může způsobit zvětšení hmotnosti a rozměrů výstřiků, ale i nadměrné namáhání formy, které by mohlo vést k pružnému prohnutí formy, jinak řečeno dýchnutí. Pro zamezení vzniku těchto jevů je potřeba v danou dobu snížit vstřikovací tlak neboli přepnout na dotlak. Pokud by k přepnutí došlo předčasně, může se stát, že výrobek bude nedostříknutý, pokud ale přepneme na dotlak opožděně, dojde k výše popsaným jevům. Pro přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak můžeme využít různé způsoby. Prvním způsob je podle dráhy šneku, druhý způsob je podle vstřikovacího tlaku, třetí způsob je podle tlaku ve formě a poslední způsob je podle tlaku v hydraulice. Doba dotlaku t_d záleží převážně na průřezu vtokového kanálu a obvykle činí několik sekund až desítek sekund. Hlavním účelem dotlaku je po danou dobu dodávat materiál do formy a tím omezit smrštění během chladnutí a zamezit vzniku vad jako propadlin a staženin. U novějších strojů, které jsou vybaveny optimalizací procesu, může být průběh dotlaku upravován. A to tak, že v první fázi je dotlak vyšší, aby se využilo vysoké tekutosti taveniny, a ke konci se dotlak sníží, aby se omezila orientace v okolí vtoku. [1, 2, 4]

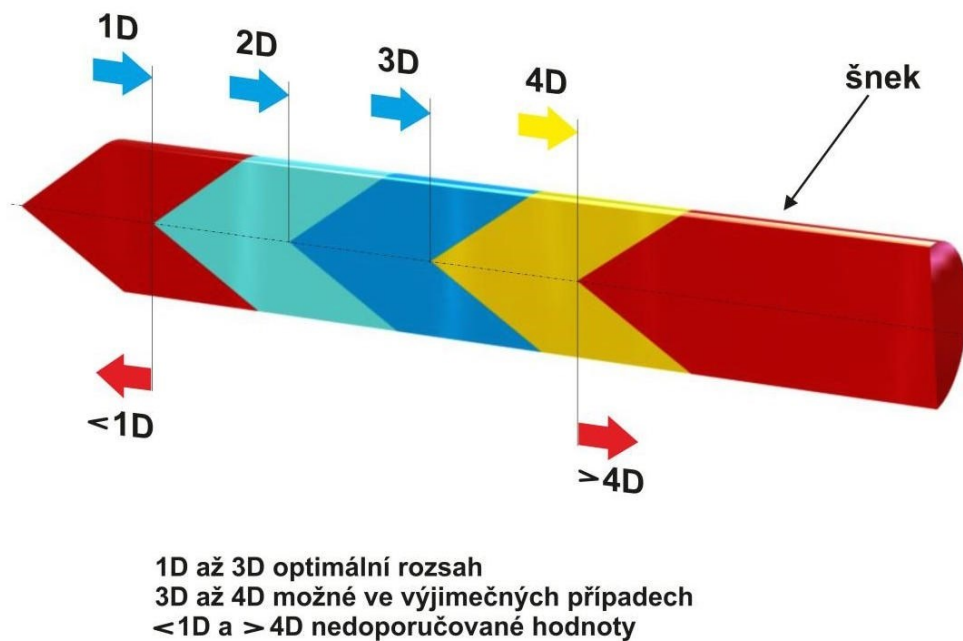


Obr. 17 Průběhy tlaků při přepnutí na dotlak [4]

3.3.4 Doba plastikace

Plastikace slouží k nezbytnému nadávkování stejného množství taveniny plastu před čelo šneku pro další výrobní cyklus. Při fázi plastikace dochází k tomu, že plast vlivem rotačního a zpětného pohybu šneku se převádí do stavu taveniny.

Dobu plastikace t_{pl} lze definovat jako čas potřebný k zplastikování dávky plastu a k její rovnoměrné homogenizaci a přesunutí dávky před čelo šneku. Velikost dávky se volí s ohledem na to, aby došlo k naplnění tvarové dutiny formy a vtokového systému. Dávka však musí být dostatečně velká, aby zvládla kompenzovat změnu objemu vyvolanou smrštěním. Roztavení dávky je způsobeno jednou třetinou předáním tepla z elektrického odporového topení a zbylé dvě třetiny tepla vznikají třením hmoty při hnětení. [1, 2, 4]



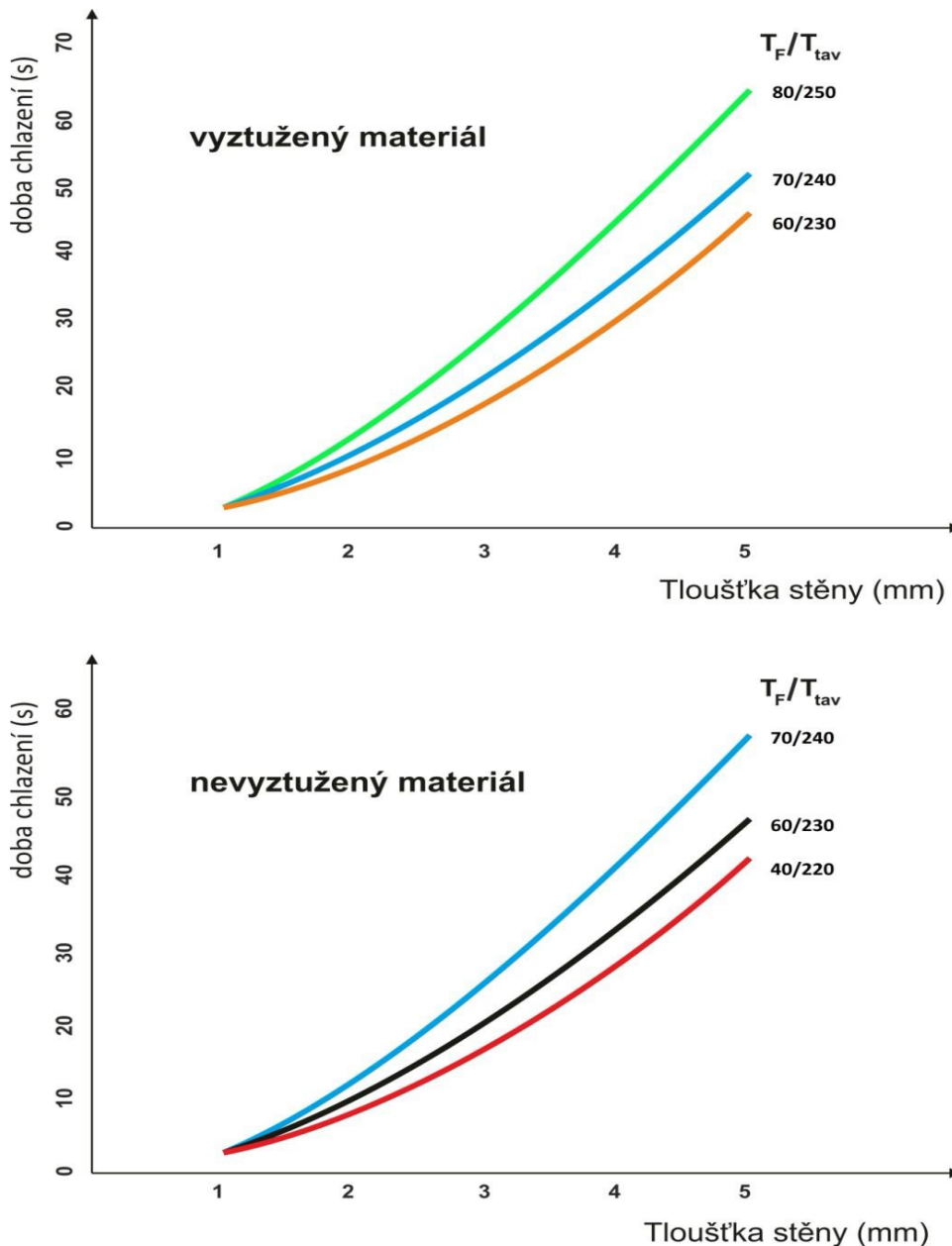
Obr. 18 Použitelné dávkovací dráhy u vstřikovacích strojů [4]

3.3.5 Doba chlazení

Doba chlazení t_{ch} reprezentuje největší část vstřikovacího cyklu a podle velikosti výstřiků se pohybuje od několika málo sekund u tenkostěnných výstřiků po několik málo minut u složitých výstřiků. Doba chlazení se určuje podle tloušťky stěny výstřiku, druhu plastu, teploty taveniny, teploty formy a teploty výstřiku v okamžiku, kdy dohází k vyjmutí z formy. S ohledem na ekonomické hledisko je důležité, aby byla doba chlazení co nejmenší. Vytvořením analýzy lze zjistit, ve kterých místech výstřik chladne nejpomaleji, a pomocí účinného

chlazení těchto míst zkrátit dobu chlazení na minimum. Při zvolení správného postupu lze ušetřit téměř 40 % celkových nákladů.

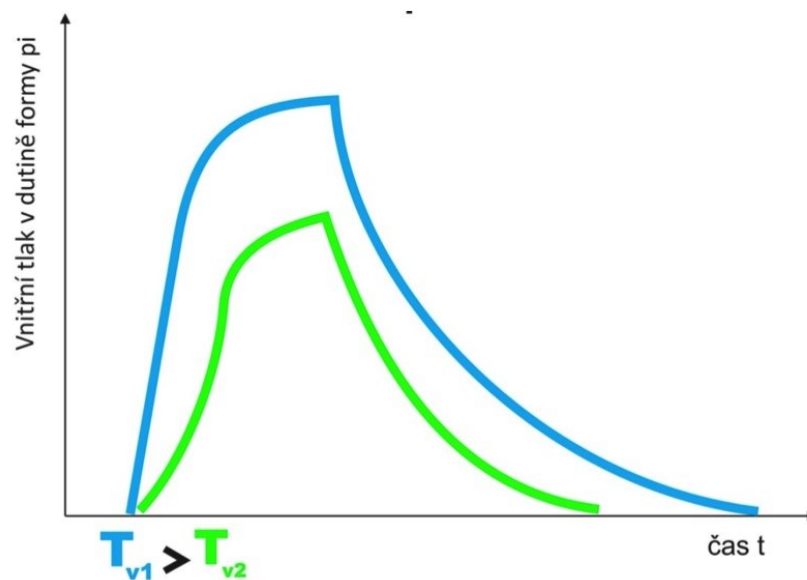
Chladnutí začíná už od fáze vstřikování a pokračuje během dotlaku, při chladnutí dochází ke změnám stavových veličin, tlaku, měrného objemu a teploty. Fáze chladnutí může způsobit nejenom změnu struktury jako orientaci, krystalizaci a vnitřní pnutí, ale rovněž může ovlivnit kvalitu povrchu, a to především lesk. [2, 4]



Obr. 19 Porovnání doby chlazení pro plněný a neplněný plast [4]

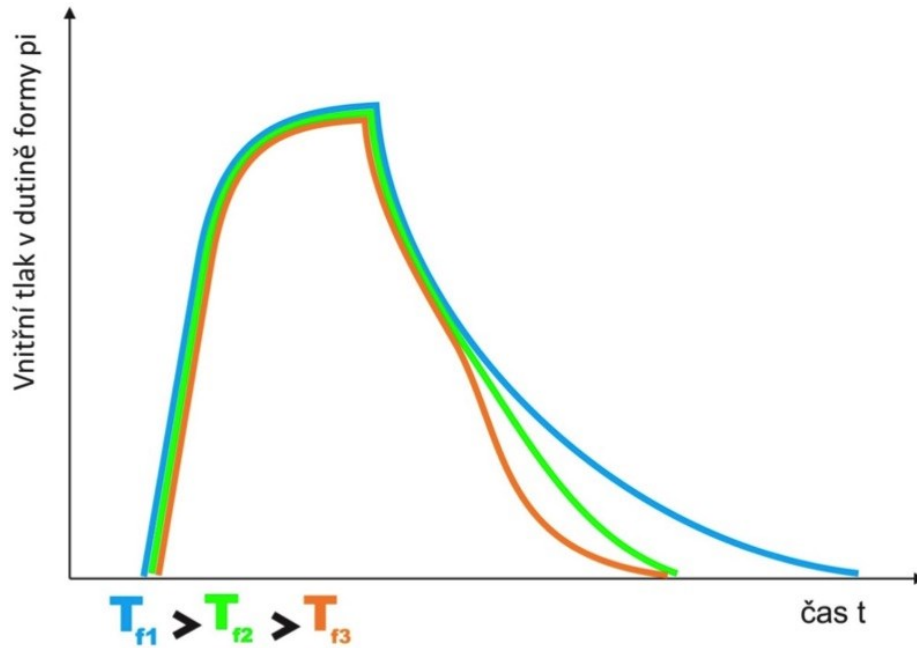
3.4 Vliv teploty taveniny a teploty formy

Teplota taveniny výrazně ovlivňuje tekutost plastu a dobu vstřikovacího cyklu. Čím je teplota taveniny vyšší, tím více dochází k nárůstu tekutosti a také prodloužení vstřikovacího cyklu. Při zachování hodnoty vstřikovací rychlosti dochází k poklesu minimální potřebné hodnoty hydraulického tlaku, ale přitom dochází k navýšení tlaku v dutině vstřikovací formy. Uvedené může mít za následek vznik přetoků a zástřiků. Dochází k prodloužení doby chlazení i dotlaku, a to proto, že v dutině formy je teplejší tavenina. Dalším nebezpečím je vznik spálené hmoty nebo teplotní degradace materiálu. Při volbě nižších teplot taveniny se vytváří nebezpečí vzniku studených spojů. [2, 4]



Obr. 20 Vliv teploty taveniny na průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje [4]

Teplota vstřikovací formy má významný vliv na kvalitu povrchu, také na vzhled plastových dílů, ale i na rozměrovou přesnost (smrštění) dílů, délku vstřikovacího cyklu a na výsledné mechanické vlastnosti. Vyšší teplota formy výrazně prodlužuje dobu chlazení, ale dochází k mírnému nárůstu tlaku v dutině vstřikovací formy. Hodnota smrštění je vyšší při vyšších teplotách vstřikovací formy. To může mít za následek vznik propadlin a staženin. Mezi klady vyšší teploty formy lze zařadit to, že dochází ke snížení pnutí uvnitř plastových dílů, jelikož relaxační procesy probíhají mnohem rychleji nežli u studených plastových dílů. Při vyšších teplotách vstřikovací formy dochází k eliminaci studených spojů a k eliminaci zvlnění. [1, 4]



Obr. 21 Vliv teploty vstřikovací formy na průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje [4]

3.5 Faktory ovlivňující vlastnosti a kvalitu výstřiku

Parametrů, jež ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti a kvalitu plastových dílů, je u technologie vstřikování nespočet. O kvalitě výstřiku rozhoduje druh plastu, volba stroje, konstrukce výrobku, technologické parametry a konstrukce vstřikovací formy. Tyto parametry nepůsobí na výstřik samostatně, ale vždy se ovlivňují navzájem. [2, 4]

Z hlediska volby druhu plastu ovlivňují konečné vlastnosti výstřiku:

- rychlost plastikace polymeru
- druh a množství přísad
- rovnoměrná homogenita taveniny plastu
- tekutost (reologické vlastnosti) plastu
- dostatečná tepelná stabilita plastu v rozsahu zpracovatelských teplot
- uvolňování těkavých látek
- velikost vnitřního pnutí
- smrštění plastu v jednotlivých směrech na výrobku

Z technologických parametrů ovlivňují konečné a užité vlastnosti:

- vstřikovací tlak

- teplota taveniny
- teplota formy
- doba dotlaku
- velikost dotlaku

Z hlediska konstrukce plastového výrobku dochází k ovlivnění vlastností:

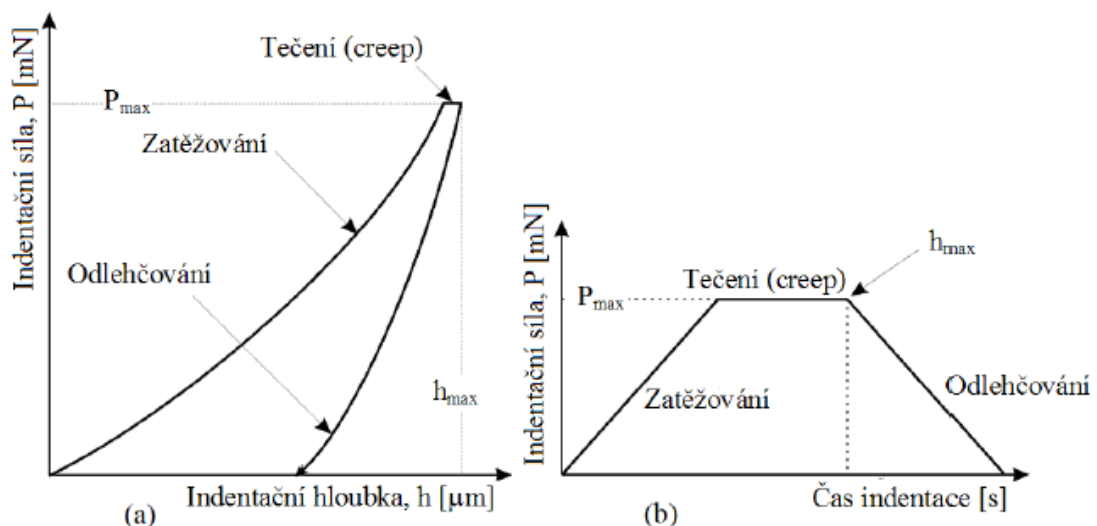
- velikostí výrobku
- tloušťkou stěny
- velikostí rádiů
- hmotností výrobku

4 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI

Rozvojem nových technologií pro výrobu tenkých vrstev a požadavků pro měření lokálních mechanických vlastností se stávající metody měření tvrdosti staly nedostačující, proto v 70. letech 20. století vznikla nová metoda nazývaná DSI (Depth Sensing Indentation). Autory této metody byli Bulichev a Alekin. Vylepšení této metody provedli na počátku 80. let pání Oliver a Pharr. Vylepšení spočívalo ve shromažďování dat, analýzách a metodologii. S ohledem na ostatní metody měření tvrdosti se metoda DSI zařadila mezi nové metody. [9, 11, 12, 14]

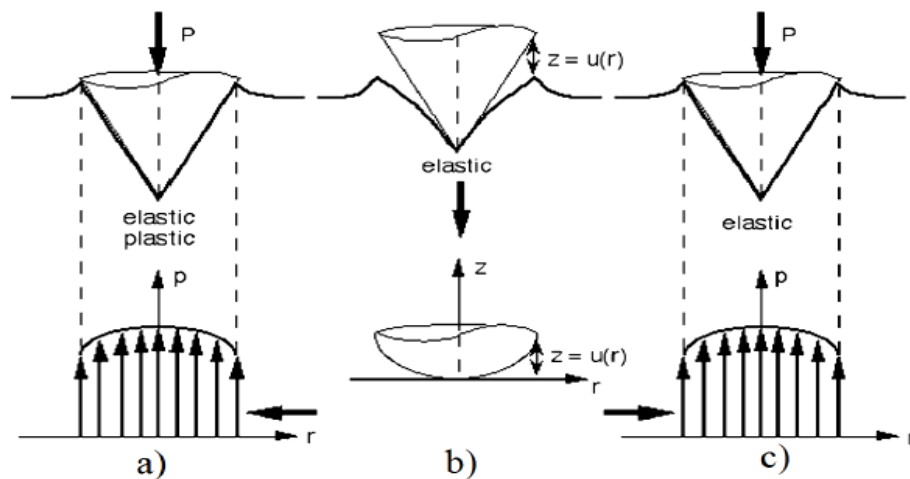
4.1 Princip metody

Metoda měření DSI funguje na principu, kdy přístroj detekuje současně okamžitou změnu hloubky průniku indentoru do materiálu a nárůst nebo pokles zatížení v celém průběhu zatěžovacího a odlehčovacího procesu. Data jsou graficky zpracována a vzniká charakteristická indentační křivka zatížení-hloubka vtisku. Zkoušku můžeme rozlišit do dvou fází. První fáze indentačního cyklu je řízené zatěžování, kde je zatěžovací síla aplikována na indentor definovanou rychlostí. Druhou fází v cyklu je odlehčování. Odlehčování je definováno jako postupné snižování zatěžující síly až na nulovou hodnotu. Často mezi fází zatěžování a fází odlehčování bývá prodleva, při které je vzorek vystaven maximální zatěžující síle. To nám dovoluje zkoumat creep (tečení). [10, 11]



Obr. 22 Indentační křivka (a), časový diagram indentační zkoušky (b). [10]

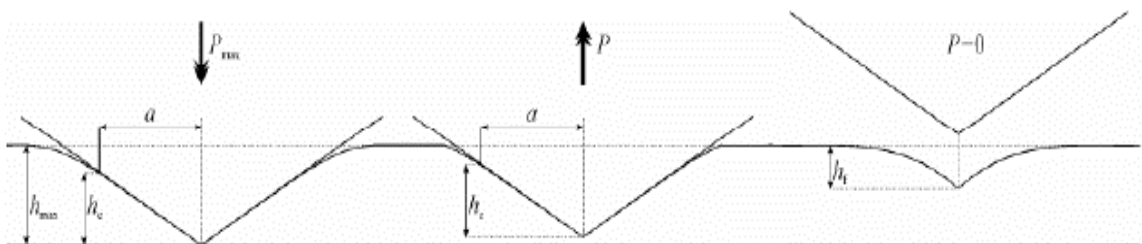
V průběhu zatěžování dochází k elasticko-plastické deformaci a tvar vtisku odpovídá tvaru indentoru (obrázek 23 a), ale během odlehčování dojde k elastickému zotavení, při kterém se mění tvar vtisku. Ve výsledku tvar vtisku neodpovídá tvaru indentoru (obrázek 23 b). Následuje opětovné zatížení, při kterém se postupně kontaktní plocha navyšuje, než dosáhne plného zatížení. Elastická deformace nastává jak u opětovného zatížení, tak i u odlehčování (obrázek 23 c). Prostřednictvím zkoušky DSI lze vyhodnotit lomovou houževnatost, elastický modul, fázové transformace, tečení materiálu (creep) a práci vynaloženou na vtisk. [10]



Obr. 23 Průběh zatěžování a odlehčování indentoru: a) zatížení, b) odlehčení, c) opětovné zatížení [10]

4.2 Metoda Doernera a Nixe

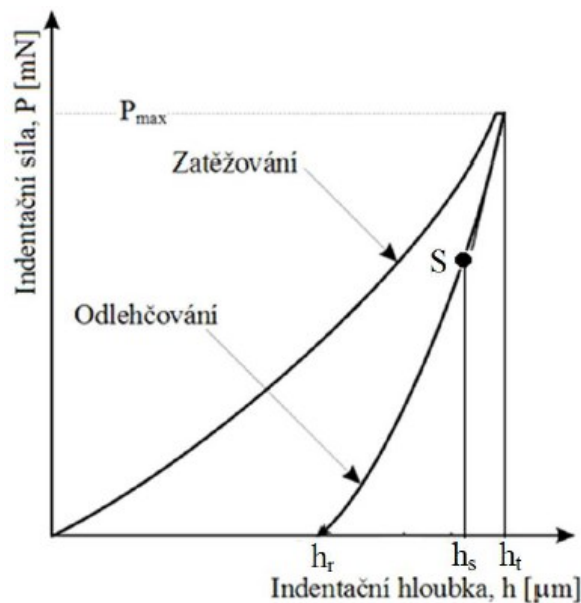
Pánové Doerner a Nix jsou autory této metody, kteří nahradili ve své analýze Berkovičův indentor za kónický. U metody je důležité, že v prvních fázích odlehčování je ponechán poloměr kontaktního kruhu konstantní. Hrot a deformovaný povrch jsou neustále ve stejném kontaktu, jenom dochází ke snižování indentační hloubky, což je způsobeno elastickou regenerací povrchu. Z toho lze odvodit, že počáteční fáze odlehčování je lineární. [10, 11]



Obr. 24 Schématické znázornění hloubky vtisku [11]

4.3 Metoda Oliver a Pharr

Metoda se nejčastěji využívá pro výpočet tvrdosti a elastického modulu. Metoda využívá předpokladu elasticko-plastického zatěžování a elastického odlehčování. Hlavními měřnými hodnotami v analýze jsou maximální zatěžující síla P_{\max} , maximální indentační hloubka h_{\max} a kontaktní tuhost S , jež je definovaná jako směrnice tečny počáteční části odlehčovací křivky. Lze říci, že metoda čerpá z metody Doernera a Nixe, avšak odlehčovací fáze se neuvažuje jako lineární, ale je aproximována mocninnou funkcí. [10, 11]



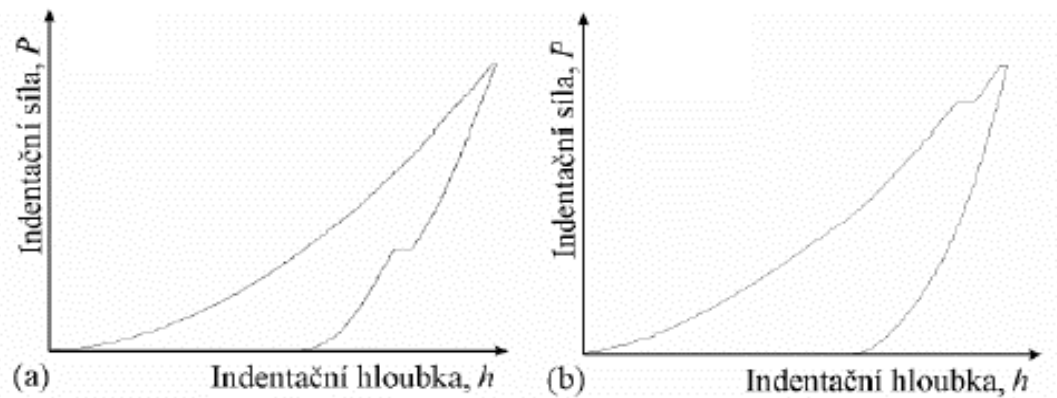
Obr. 25 Indentační křivka [10]

4.4 Indentační křivky

V praxi se metoda DSI využívá pro měření velkého množství materiálů od měkkých polymerů až po tvrdé uhlíkové diamantu podobné vrstvy.

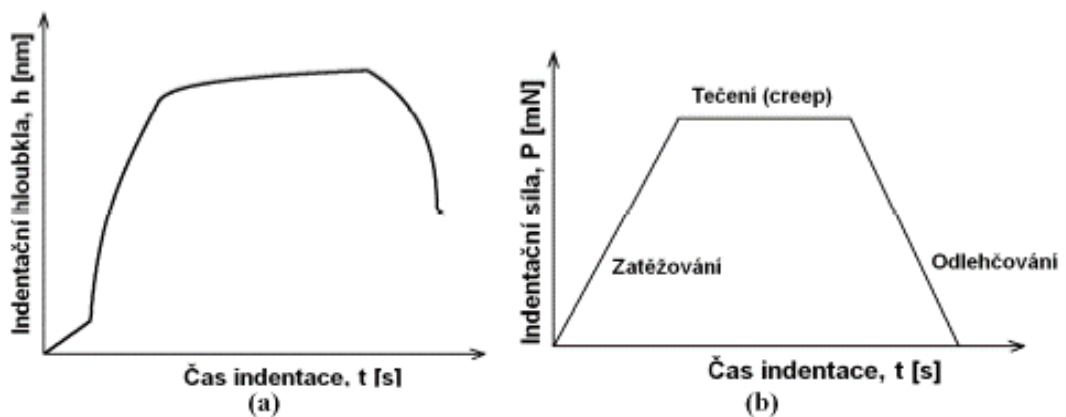
Podstata zkoušky je nepřetržité zaznamenávání zatěžující síly P a okamžité polohy indentoru h . Indentační křivka je grafické vyjádření této závislosti.

Tvar indentační křivky je nejvíce ovlivňován odezvou měřeného materiálu na indentaci. Tvar indentační křivky neslouží jenom pro výpočet tvrdosti nebo modulu pružnosti, ale dále se využívá i k získání dalších poznatků, a to např. trhlin, fázové transformace anebo delaminace vrstvy, která se projeví na indentační křivce nespojitým průběhem. [10]



Obr. 26 Nespojité průběh indentačních křivek (a) fázová transformace, (b) praskání při transformaci [10]

Mezi další informace, které lze získat, patří odezva materiálu na plynulé zatěžování nebo odlehčování a lze využít grafické závislosti zatížení na čase, nebo závislosti hloubky průniku na čase. [10]



Obr. 27 Závislost zatížení – čas (a), hloubka průniku – čas (b) [10]

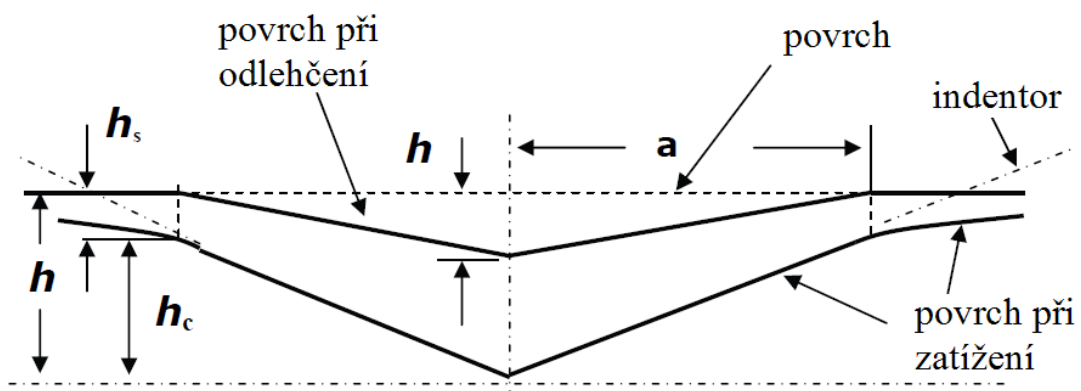
Nicméně je nutné materiály rozdělit podle reakce na vnější silové působení, a to do tří skupin:

- elastické
- plastické
- elasticko-plastické (viskoelastické)

4.5 Určení výsledků DSI zkoušky

Získané hodnoty z instrumentované zkoušky mikrotvrdomosti jsou okamžité hodnoty zatěžující síly P a hloubky h . K vyhodnocování dat (výpočet tvrdosti a elastického modulu) se nejčastěji využívá metoda navržená Oliverem a Pharrrem.

Metoda je založena na předpokladu elasticko-plastického zatěžování a elastického odlehčování. Výsledné hodnoty získané z daného vyhodnocování jsou maximální zatěžující síla P_{max} , maximální indentační hloubka h_{max} a kontaktní tuhost S . Kontaktní tuhost je definovaná jako směrnice tečky počáteční části odlehčovací křivky. [10, 11]



Obr. 28 Schéma zatěžování a odlehčování [10]

4.5.1 Určení tvrdosti

Vtiskovou tvrdost H_{IT} lze definovat jako míru rezistence (odporu) k trvalé deformaci nebo poškození. Obecnou definicí vtiskové tvrdosti H_{IT} je maximální zatěžující síla P_{max} podělená průmětem kontaktní plochy vnikajícího tělesa s tělesem zkušebním A_p . [10, 13]

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_p} \quad (4.1)$$

Stanovení Martenzovy tvrdosti HM se provádí z křivky zatížení na hloubce vtisku, a to v oblasti rostoucího zkušebního zatížení. Výhodou tvrdosti HM je, že obsahuje plastickou i pružnou deformaci, proto ji lze spočítat pro všechny materiály. Definice Martenzovy tvrdosti HM je zatěžující síla P podělená plochou povrchu vnikajícího tělesa $A_s(h)$ ve vzdálenosti h od hrotu, tedy: [10, 13]

$$HM = \frac{P}{A_s(h)} \quad (4.2)$$

Tvrдость podle Vickerse HV se určí jako:

$$HV = \frac{P_{max}}{9,81 \cdot A_c \cdot (h_c)} \quad (4.3)$$

4.5.2 Vtiskový modul pružnosti

Metodou DSI lze získat některé další materiálové veličiny jako indentační (vtiskový) modul E_{IT} . Mezi další veličiny lze zařadit redukovaný modul E_r , nebo komplexní modul E^* . Indentační modul se obecně určí ze směrnice tečny sloužící k výpočtu indentační tvrdosti H_{IT} . Indentační modul má v ideálním případě identický význam jako elastický (Youngův) modul.

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \quad (4.4)$$

kde ν_s je Poissonův poměr zkušební tělesa a pro kovové materiály se volí od 0,2 až do 0,4, pro polymerní materiály se volí od 0,3 až do 0,4 a E^* je komplexní modul. [10, 13]

Následující rovnice definuje redukovaný modul E_r .

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot C \sqrt{A_p}} \quad (4.5)$$

kde A_p je průmět kontaktní plochy a C je kontaktní poddajnost.

Komplexní modul E^* je stanoven jako:

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (4.6)$$

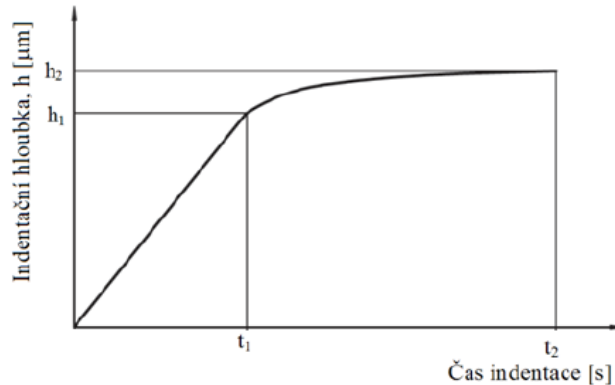
kde E_i je modul vnikajícího tělesa, E_r je redukovaný modul vtiskového kontaktu a ν_i je Poissonův poměr vnikajícího tělesa (u diamantu 0,07). [10, 13]

4.5.3 Vtiskové tečení

Hodnotu tečení materiálu (creep) lze získat, jestliže se při konstantním zatížení měří změna hloubky vtisku a může se vypočítat relativní hloubka vtisku. Vtiskové tečení C_{IT} je určeno ze vztahu:

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad (4.7)$$

kde h_1 znázorňuje hloubku v čase t_1 , kdy v té době je dosaženo zkušebního zatížení a h_2 znázorňuje hloubku vtisku v čase t_2 při setrvání na dosaženém maximálním zkušebním zatížení. [10, 13]



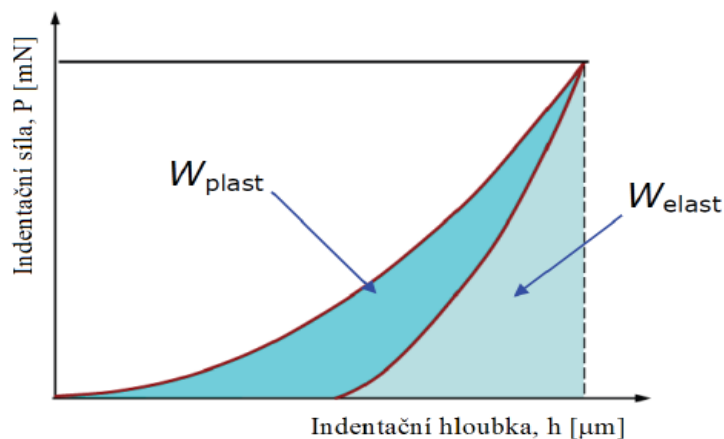
Obr. 29 Vyjádření vtiskového tečení [10]

4.5.4 Deformační práce

Plocha pod zatěžovací křivkou je rovna celkové práci W_{total} , která je spotřebována v průběhu indentačního cyklu. Odlehčovací křivka rozděluje deformační práci na dvě plochy, a to na plochu mezi zatěžovací a odlehčovací křivkou, která udává nevratnou plastickou práci W_{plast} , druhá plocha je pod odlehčovací křivkou a ta udává vratnou elastickou práci W_{elast} . Koeficient zpětné relaxace η_{IT} je dán jako podíl elastické práce W_{elast} a celkové práce W_{total} . [10, 13]

$$W_{total} = W_{plast} + W_{elast} \quad (4.8)$$

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{plast}} \cdot 100 \quad (4.9)$$



Obr. 30 Indentační křivka – deformační práce [10]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem praktické části diplomové práce je příprava plněného materiálu různými plnivými (jemně mleté dřevo, hrubě mleté dřevo a břidlice) a jeho následná granulace. Dalším cílem praktické části je vyhodnocení micro-mechanických vlastností materiálu za měnících se procesních parametrů vstřikování. Procesní parametry, které se v experimentální části mění jsou teplota taveniny a teplota formy. V neposlední řadě následuje porovnání micro-mechanických vlastností materiálů mezi sebou.

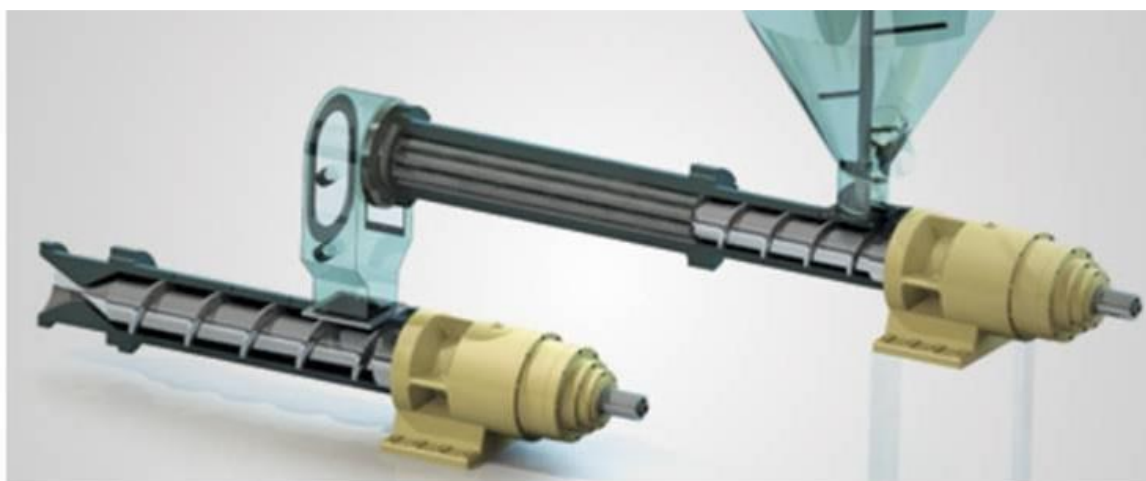
Hlavní zásady pro vypracování diplomové práce.

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Připravte zkušební tělesa pro experiment.
3. Proveďte experiment.
4. Vyhodnoťte naměřené hodnoty.

6 PŘÍPRAVA MATERIÁLU

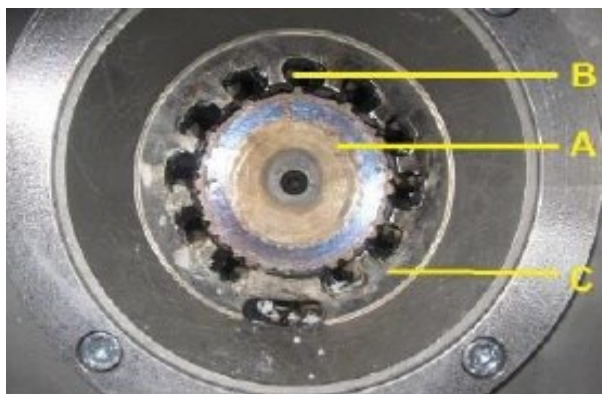
Příprava materiálu pro experiment obsahovala zvolení matrice materiálu, zvolení plniva a jeho objemů. Materiál využitý jako matrice byl zvolen polyetylen s nízkou hustotou (LDPE). Základním plnivem bylo zvoleno dřevo ve dvou různých variantách, a to jemně mleté a hrubě mleté bukové piliny. Druhým plnivem byla zvolena břidlice.

Příprava materiálu probíhala ve firmě Plastikářský klastr ve Zlíně. Míchání materiálu probíhalo na laboratorní planetární vytlačovací lince. Vrchní část linky byla složena z násypky, podávajícího šneku a planetární sekce, která pro experiment byla osazena 12 šneky. Dodávané teplo zajišťovaly dvě topné zóny. Spodní část linky byla složena z podávacího šneku a strunové vytlačovací hlavy. Dodávané teplo ve spodní části zajišťovaly tři topné zóny.



Obr. 31 Planetární vytlačovací linka

Planetární sekce se skládá z centrálního šneku, po kterém se planetárně pohybuje 12 šneků. Ty jsou překryty opěrným kroužkem.



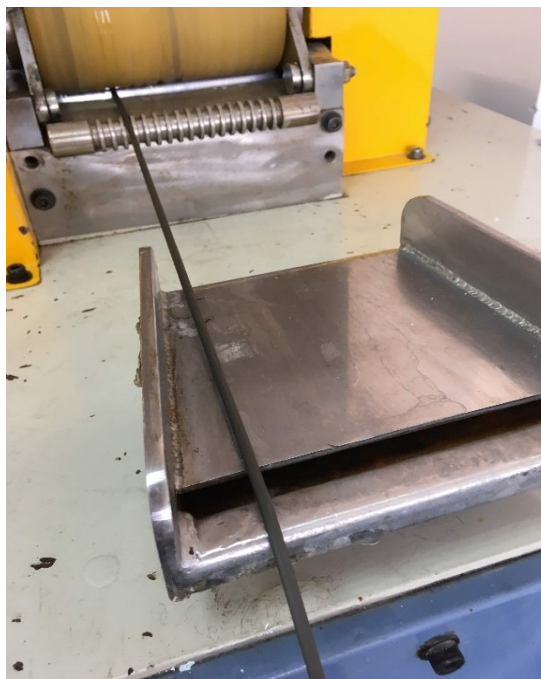
Obr. 32 Planetární sekce A) centrální šnek, B) planetární šneky, C) opěrný kroužek

Spodní část stroje byla osazena vytlačovací hlavou, která vytlačovala strunu o průměru 4 mm. Struna byla vedena skrze chladicí lázeň, kde jako chladicí médium byla použita voda do nožového granulátoru.



Obr. 33 Strunová vytlačovací hlava

Před vstupem do granulovacího zařízení byla struna zbavena přebytečné vody pomocí vyfukovaného vzduchu.



Obr. 34 Zbavování struny přebytečné vody

6.1 Základní materiál

Základní materiál využitý v experimentu jako matrice byl zvolen nízko hustotní polyetylen BRALEN VA 20-60, vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tabulce 6. Jedná se o materiál vhodný pro vstřikování. Materiál je charakterizován dobrou zatékavostí a neobsahuje žádné aditiva.

Tab. 6 Vlastnosti materiálu

	Testovací metoda	Jednotka	Hodnota
Index toku taveniny (190 °C / 2.16 kg)	ISO 1133-1	g/10 min	20
Hustota při 23 °C	ISO 1183-1 metoda C	Kg/m ³	914
Pevnost v tahu	ISO 527-1,2	MPa	9
Teplota tání	ISO 306/A 50	°C	80
Drsnost D Shore	ISO 868	-	41

Materiál je určen pro výrobu domácích produktů a technických výrobků komplikovaného tvaru. Materiál je vhodný i pro výrobu hraček, a také jej lze využít v potravinářském průmyslu nebo farmaceutickém průmyslu.

Materiál je určen pro konvenční vstřikovací stroje. Doporučené teploty pro zpracování materiálu jsou výrobcem udány od 130 do 150 °C.

Pro experiment bylo odsypáno malé množství čistého materiálu pro vytvoření 0 vzorku, pro získání referenčních hodnot pro daný materiál, které se následně budou porovnávat s plněnými materiály.



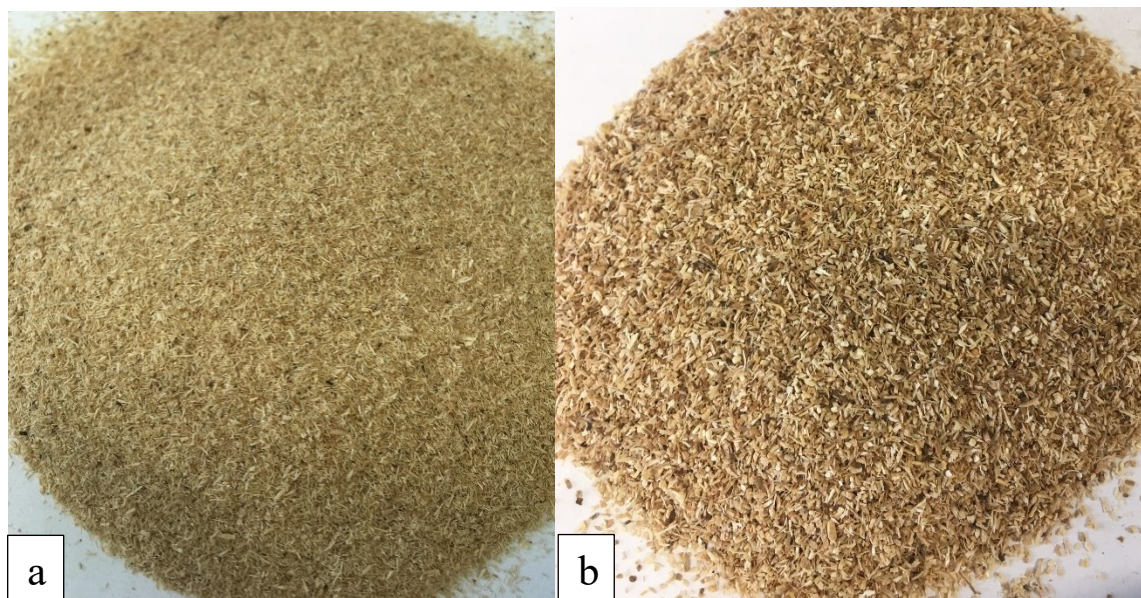
Obr. 35 Nízko hustotní polyetylen BRALEN VA 20-60

6.2 Vzorky plněné dřevem

Pro experiment byly použity dvě varianty bukového dřeva (plniva), které se lišily ve velikosti částic a také jeho objemem v základním materiálu. První varianta bukového dřeva byla jemně mletá (délka částic do 0,5 mm) viz obrázek 36 a. Druhá varianta bukového dřeva byla hrubě mletá (délka částic 3 mm) viz obrázek 36 b. Pro každé plnivo byly vytvořeny dvě objemové varianty. První objem byl dán 80 % základního materiálu s 20 % plniva. Druhý objem byl dán 50 % základního materiálu a 50 % plniva.

Tab. 7 Vzorky plněné dřevem

	Objem základního materiálu [%]	Objem plniva [%]
1. Vzorek jemně mleté dřevo	80	20
2. Vzorek jemně mleté dřevo	50	50
3. Vzorek hrubě mleté dřevo	80	20
4. Vzorek hrubě mleté dřevo	50	50



Obr. 36 Bukové dřevo a) jemně mleté b) hrubě mleté

6.2.1 Jemně mleté dřevo

Zpracování materiálu probíhalo za stejných teplot, kdy teplota ve vrchní části linky byla v první horní zóně 180 °C a v druhé horní zóně 185 °C. Teplota ve spodní části linky byla v dolní zóně 170 °C, následuje první teplota formy její hodnota byla 175 °C a poslední hodnotou byla druhá teplota formy její hodnota odpovídá 170 °C. Stejně teploty pro zpracování materiálu se zvolily z důvodu, aby nedošlo k ovlivnění materiálu různými teplotami. Při zpracování docházelo ke změně zpracovatelských vlastností jen změnou otáček horní a spodní části linky a také úpravou energie motoru.

Tab. 8 Zpracovatelské teploty vytlačovací linky

	Hodnota	Jednotky
1 horní zóna	180	°C
2 horní zóna	185	°C
Dolní zóna	170	°C
1 teplota formy	175	°C
2 teplota formy	170	°C

1 vzorek

První vzorek byl namíchán s objemem matrice 80 % nízko hustotního polyetylenu a 20 % jemně namletého bukového dřeva.

Tab. 9 Další zpracovatelské vlastnosti 1 vzorku

	Hodnoty	Jednotky
Horní energie motoru	3.5	AMP.
Horní otáčky 1	881	ot/min ⁻¹
Dolní energie motoru	3.8	AMP.
Dolní otáčky 1	569	ot/min ⁻¹



Obr. 37 Tok materiálu vytlačovací linkou pro 1 vzorek

2 vzorek

Druhý vzorek byl namíchán s objemem matrice 50 % nízko hustotního polyetylenu a 50 % jemně namletého bukového dřeva.

Tab. 10 Zpracovatelské vlastnosti 2 vzorku

	Hodnoty	Jednotky
Horní energie motoru	4.0	AMP.
Horní otáčky 1	1114	ot/min ⁻¹
Dolní energie motoru	4.0	AMP.
Dolní otáčky 1	293	ot/min ⁻¹



Obr. 38 Tok materiálu vylačovací linkou pro 2 vzorek

6.2.2 Hrubě mleté dřevo

Zpracování materiálu s hrubě mletým dřevem probíhalo za stejných teplot jako zpracování materiálu s jemně mletým dřevem. Stejně teploty pro zpracování materiálu se zvolily z důvodu, aby nedošlo k ovlivnění materiálu různými teplotami. Při zpracování docházelo ke změně zpracovatelských vlastností jen změnou otáček horní a spodní části linky a také úpravou energie motoru.

3 vzorek

Třetí vzorek byl namíchán s objemem matrice 80 % nízko hustotního polyetylenu a 20 % hrubě mletého bukového dřeva.

Tab. 11 Zpracovatelské vlastnosti 3 vzorku

	Hodnoty	Jednotky
Horní energie motoru	3.2	AMP.
Horní otáčky 1	1081	ot/min ⁻¹
Dolní energie motoru	3.5	AMP.
Dolní otáčky 1	480	ot/min ⁻¹



Obr. 39 Tok materiálu vytlačovací linkou pro 3 vzorek

4 vzorek

Čtvrtý vzorek byl namíchán s objemem matrice 50 % nízko hustotního polyetylenu a 50 % hrubě mletého bukového dřeva.

Tab. 12 Zpracovatelské vlastnosti 4 vzorku

	Hodnoty	Jednotky
Horní energie motoru	3.0	AMP.
Horní otáčky 1	1400	ot/min ⁻¹
Dolní energie motoru	3.6	AMP.
Dolní otáčky 1	340	ot/min ⁻¹



Obr. 40 Tok materiálu vytlačovací linkou pro 4 vzorek

6.3 Vzorky plněné břidlicí

V experimentu pro srovnání mikro-mechanických vlastností materiálu plněného dřevem byly vytvořeny vzorky plněné břidlicí obrázek 41. Břidlice se využívá pro plnění materiálu z důvodu snižování ceny materiálu a zlepšování mechanických vlastností. Z materiálu plněného břidlicí se vyrábějí dlaždice, kterým se při výrobě dodá vzhled kamene.

Zpracování materiálu plněného břidlicí probíhalo za stejných teplot jako předešlé zpracování vzorků plněných dřevem. Stejně teploty pro zpracování materiálu se zvolily z důvodu, aby nedošlo k ovlivnění materiálu různými teplotami. Při zpracování docházelo ke změně zpracovatelských vlastností jen změnou otáček horní a spodní části linky a také úpravou energie motoru.

Tab. 13 Vzorky s břidlicí

	Objem základního materiálu [%]	Objem plniva [%]
5. Vzorek s břidlicí	80	20
6. Vzorek s břidlicí	50	50



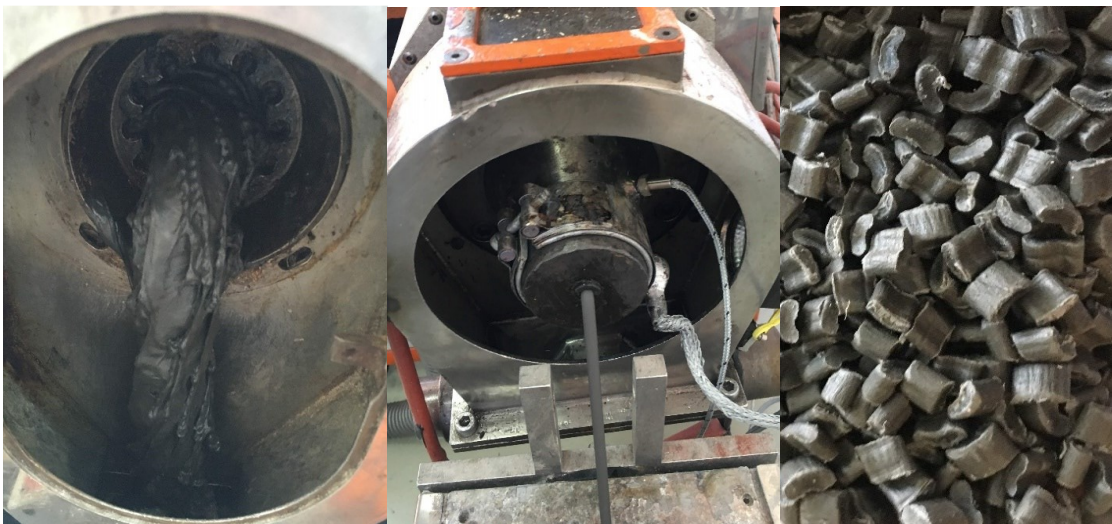
Obr. 41 Břidlice

5 vzorek

Pátý vzorek byl namíchán s objemem matrice 80 % nízko hustotního polyetylenu a 20 % břidlice.

Tab. 14 Zpracovatelské vlastnosti 5 vzorku

	Hodnoty	Jednotky
Horní energie motoru	5.4	AMP.
Horní otáčky 1	221	ot/min ⁻¹
Dolní energie motoru	3.7	AMP.
Dolní otáčky 1	510	ot/min ⁻¹



Obr. 42 Tok materiálu vytlačovací linkou pro 5 vzorek

6 vzorek

Šestý vzorek byl namíchán s objemem matrice 50 % nízko hustotního polyetylenu a 50 % břidlice.

Tab. 15 Zpracovatelské vlastnosti 6 vzorku

	Hodnoty	Jednotky
Horní energie motoru	7.0	AMP.
Horní otáčky 1	359	ot/min ⁻¹
Dolní energie motoru	4.5	AMP.
Dolní otáčky 1	510	ot/min ⁻¹



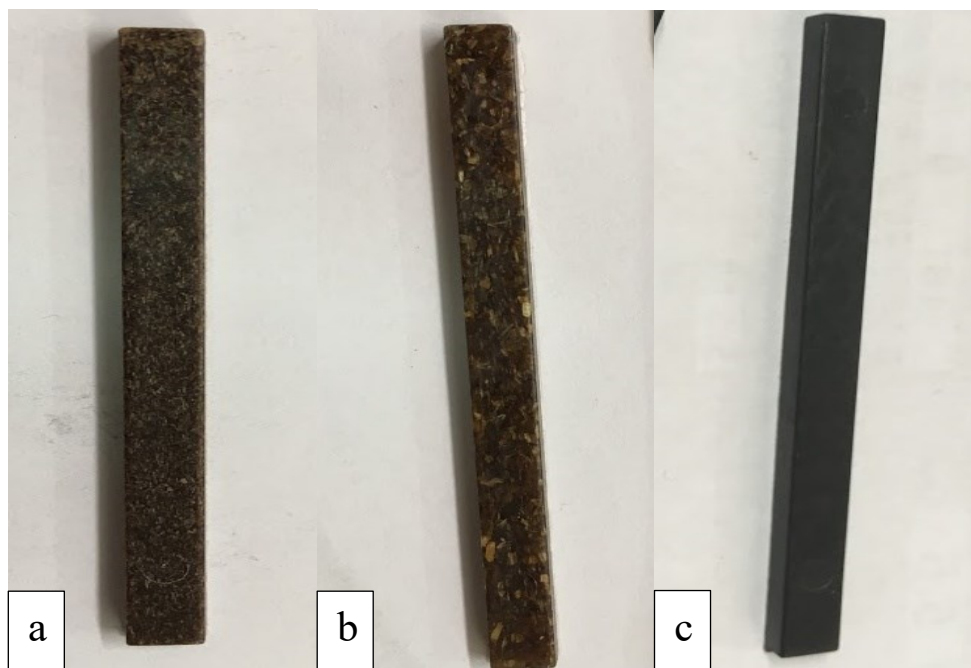
Obr. 43 Tok materiálu vytlačovací linkou pro 6 vzorek

7 VSTŘIKOVÁNÍ MATERIÁLU

Vstřikování zkušebních tělísek daných rozměrů (5x3x60) probíhalo na vstřikovacím stroji ARBURG 170 U Allrounder. Jedná se o konvenční vstřikovací stroj s hydraulickým pohonem. V experimentu se upravovaly dva procesní vstřikovací parametry, a to teplota taveniny a teplota formy. Ostatní procesní vstřikovací parametry pro všechny vzorky zůstaly nezměněny, aby nedošlo k ovlivnění výsledků. Teploty taveniny byly zvoleny 180 °C, 190 °C a 200 °C. Pro teplotu taveniny 200 °C byly použity tři teploty formy a to 30 °C, 40 °C a 50 °C. Před vystříknutím daných vzorků probíhalo ustálení na dané teplotě a vytvoření několika nepoužitých vzorků.

Tab. 16 Procesní vstřikovací parametry

	Hodnota	Jednotky
Vstřikovací tlak	800	bar
Vstřikovací rychlost	100	mm·s ⁻¹
Bod přepnutí	7	mm
Dotlak	600	bar
Čas dotlaku	8	s
Dávka taveniny	45	mm
Chlazení	20	s
Průměrný polštář	4,5	mm



Obr. 44 Zkušební tělíska a) s jemně mletým dřevem, b) s hrubě mletým dřevem, c) s břidlicí

7.1 Vstřikovací stroj

Pro vytvoření zkušebních tělísek byl zvolen konvenční vstřikovací stroj Arburg 170 U Allrounder.

Tab. 17 Hlavní parametry vstřikovacího stroje

	Hodnoty	Jednotky
Uzavírající síla	150	kN
Maximální rozměr formy	170x170x200	mm
Průměr šneku	22	mm
Maximální vstřikovací objem	34	cm ³

8 VYHODNOCOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Zkušební tělíska byla měřena pomocí metody DSI dle normy ČSN EN ISO 14577. Měření probíhalo na stroji Micro-combi tester od firmy CSM Instruments. Využitý indenter byl čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° . Měřením byla získána data vtiskové tvrdosti, vickersovi tvrdosti, vtiskového modulu, maximální hloubky, vtiskového tečení, elastické deformační práce a plastické deformační práce. Data byla zpracována pomocí metody Oliver a Pharr.

V experimentu byla vyhodnocena vtisková tvrdost, vtiskový modul a vtiskové tečení (creep).

Použité veličiny pro vyhodnocení naměřených dat:

1. Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8.1)$$

2. Směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (8.2)$$

kde:

\bar{x} = aritmetický průměr

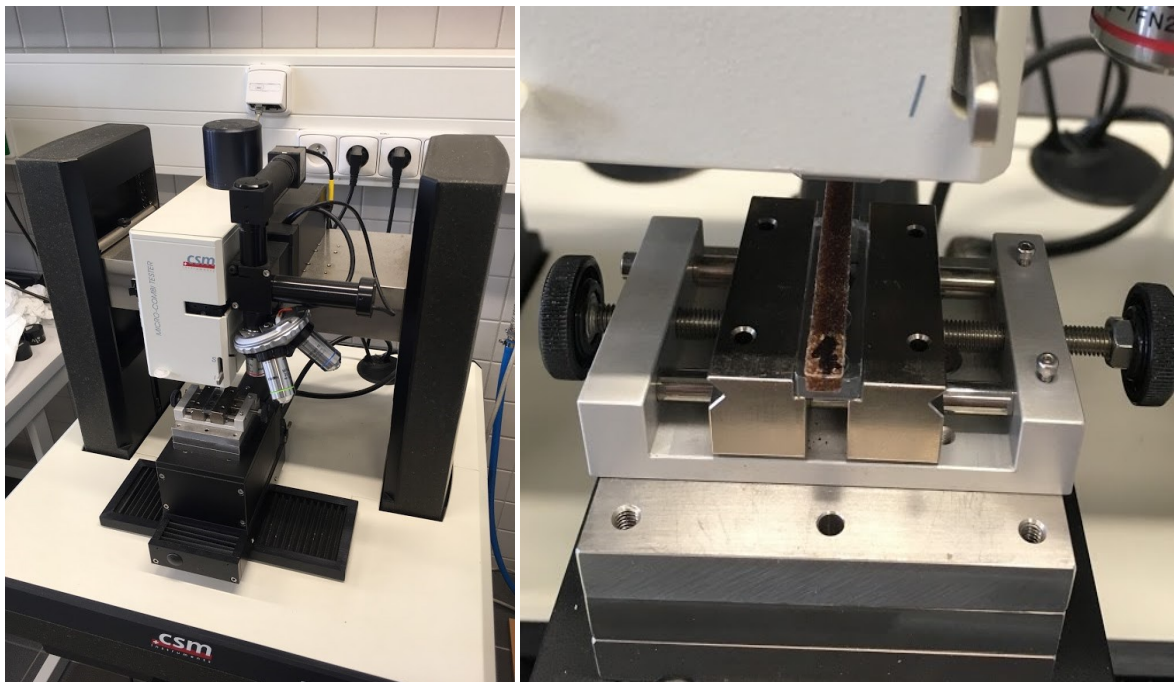
s = směrodatná odchylka

x_i = i-tá hodnota měřené veličiny

n = počet měření

Tab. 18 Zkušební podmínky

	Hodnota	Jednotka
Aplikované zatížení	0,5	N
Výdrž na maximálním zatížení	90	s
Rychlost zatěžování	1	N/min
Poissonovo číslo	0,3	-



Obr. 45 Micro-combi tester

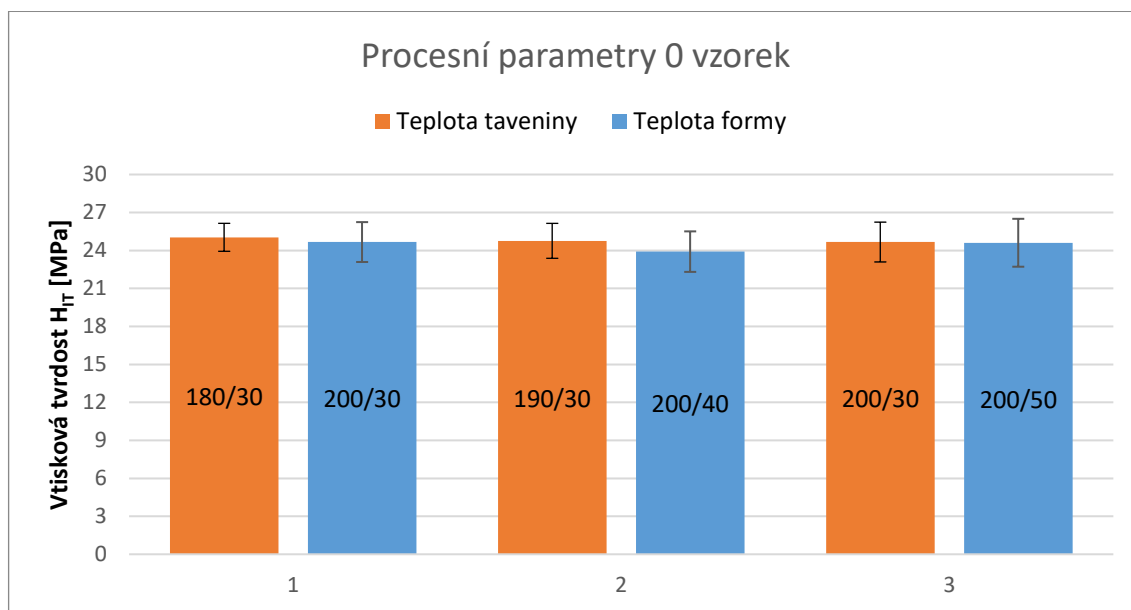
8.1 Vtisková tvrdost H_{IT}

Vtisková tvrdost je základní veličina získaná při Instrumentované zkoušce tvrdosti. Jedná se o míru rezistence k trvalé deformaci nebo poškození.

0 Vzorek složení materiálu: 100 % LDPE

Tab. 19 Vyhodnocená naměřená data pro 0 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	25,039		24,76		24,664		23,908		24,608	
Směrodatná odchylka	1,104		1,38		1,575		1,601		1,892	



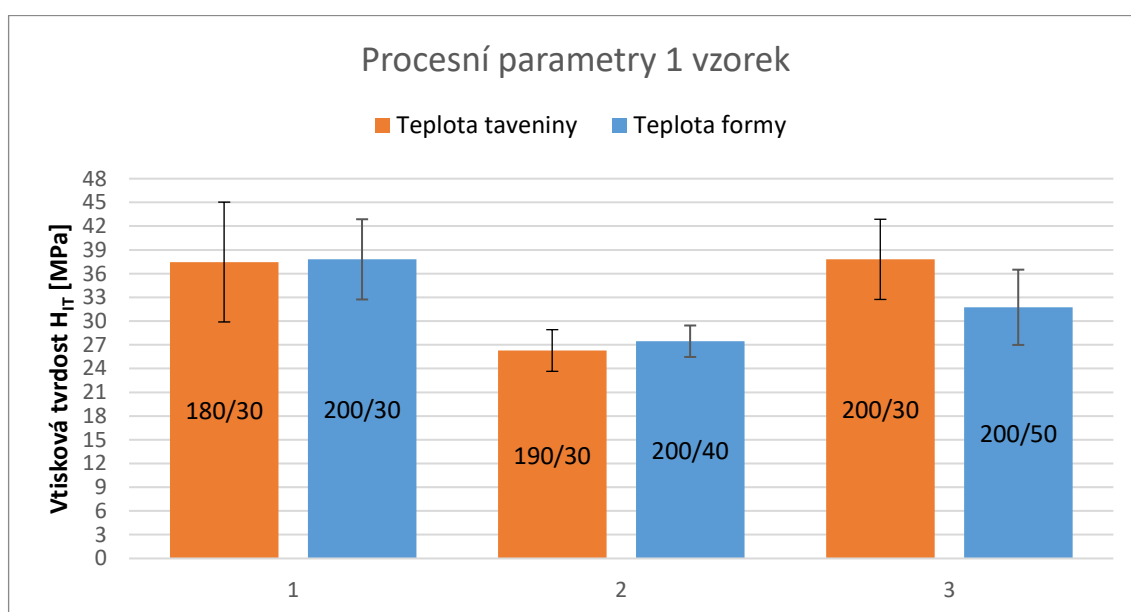
Obr. 46 Vtisková tvrdost neplněné LDPE

Z naměřených hodnot vyplývá, že teplota taveniny a teplota formy téměř neovlivnila vtiskovou tvrdost neplněného materiálu LDPE. Získaná vtisková tvrdost neplněného materiálu bude sloužit pro porovnání s materiály plněnými.

1 Vzorek složení materiálu: 80 % LDPE a 20 % jemně mletého dřeva

Tab. 20 Vyhodnocená naměřená data pro 1 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	37,461		26,283		37,803		27,455		31,744	
Směrodatná odchylka	7,577		2,633		5,068		1,989		4,757	



Obr. 47 Vtisková tvrdost 80 % LDPE s 20 % jemně mletého dřeva

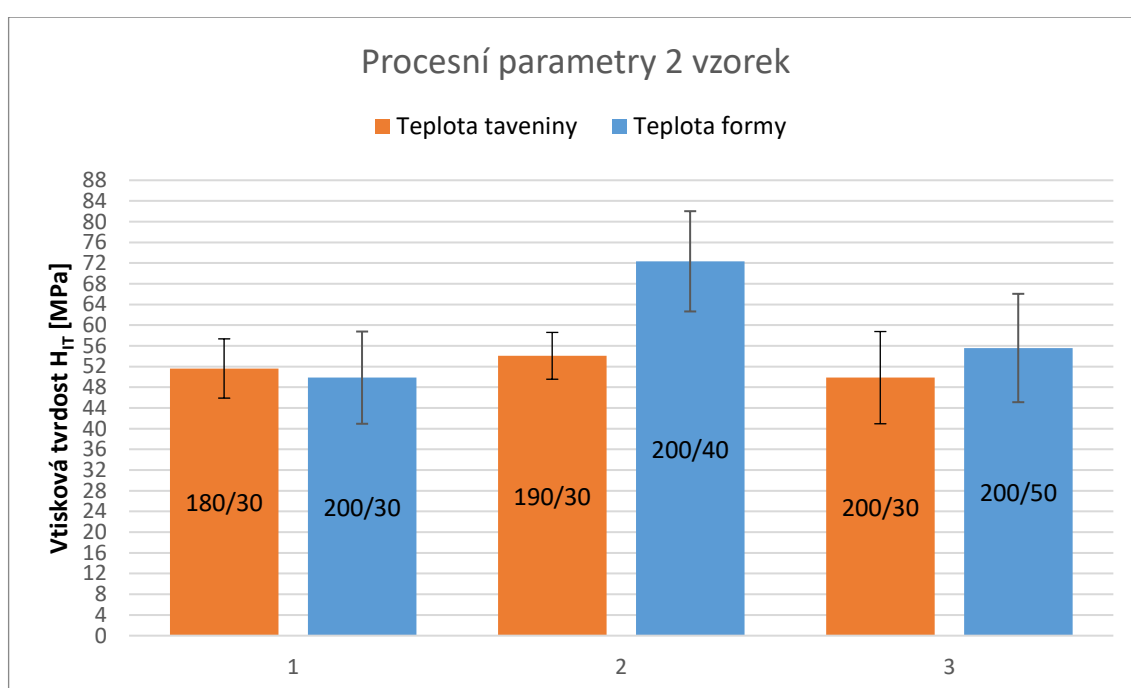
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 20 % jemně mletého dřeva není pro teplotu taveniny spatřen žádný trend vývoje vtiskové tvrdosti. Nejmenší vtisková tvrdost byla naměřena pro teplotu taveniny 190 °C a největší vtisková tvrdost pro teplotu taveniny 200 °C. Rozdíl mezi naměřenými hodnotami je 44 %.

Z naměřených hodnot není patrný žádný trend vtiskové tvrdosti pro změnu teploty formy. Nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena pro teplotu formy 30 °C a byla o 38 % větší než pro teplotu formy 40 °C.

2 Vzorek složení materiálu: 50 % LDPE a 50 % jemně mletého dřeva

Tab. 21 Vyhodnocená naměřená data pro 2 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	51,629		54,076		49,857		72,339		55,586	
Směrodatná odchylka	5,718		4,521		8,912		9,688		10,472	



Obr. 48 Vtisková tvrdost 50 % LDPE s 50 % jemně mletého dřeva

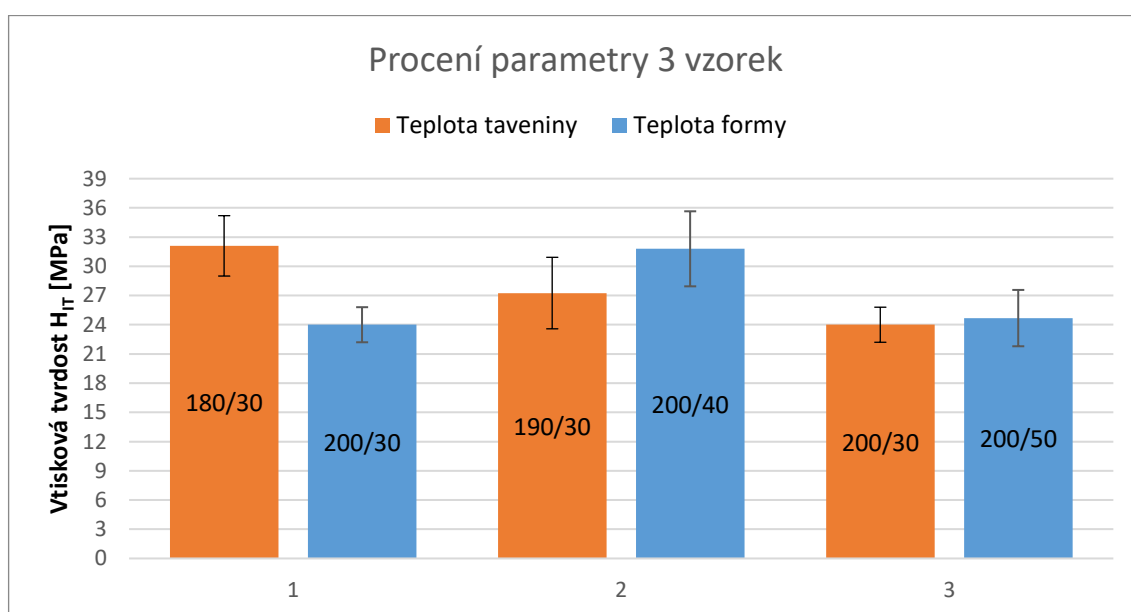
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 50 % jemně mletého dřeva není pro teplotu taveniny spatřen žádný trend vývoje vtiskové tvrdosti. Oproti materiálu plněného 20 % jemně mletým dřevem nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena pro teplotu taveniny 190 °C a nejmenší vtisková tvrdost menší o 8 % pro teplotu taveniny 200 °C.

Z naměřených hodnot není patrný žádný trend vtiskové tvrdosti pro změnu teploty formy. Nejvyšší tvrdost byla vyhodnocena pro teplotu formy 40 °C přitom při použití stejného plniva jen v objemu 20 % byla pro tuto teplotu tvrdost nejmenší. Nejnižší vtisková tvrdost byla naměřena pro teplotu formy 30 °C a byla o 45 % nižší než pro teplotu formy 40 °C.

3 Vzorek složení materiálu: 80 % LDPE a 20 % hrubě mletého dřeva

Tab. 22 Vyhodnocená naměřená data pro 3 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	32,102		27,252		24,001		31,796		24,682	
Směrodatná odchylka	3,098		3,672		1,801		3,853		2,893	



Obr. 49 Vtisková tvrdost 80 % LDPE s 20 % hrubě mletého dřeva

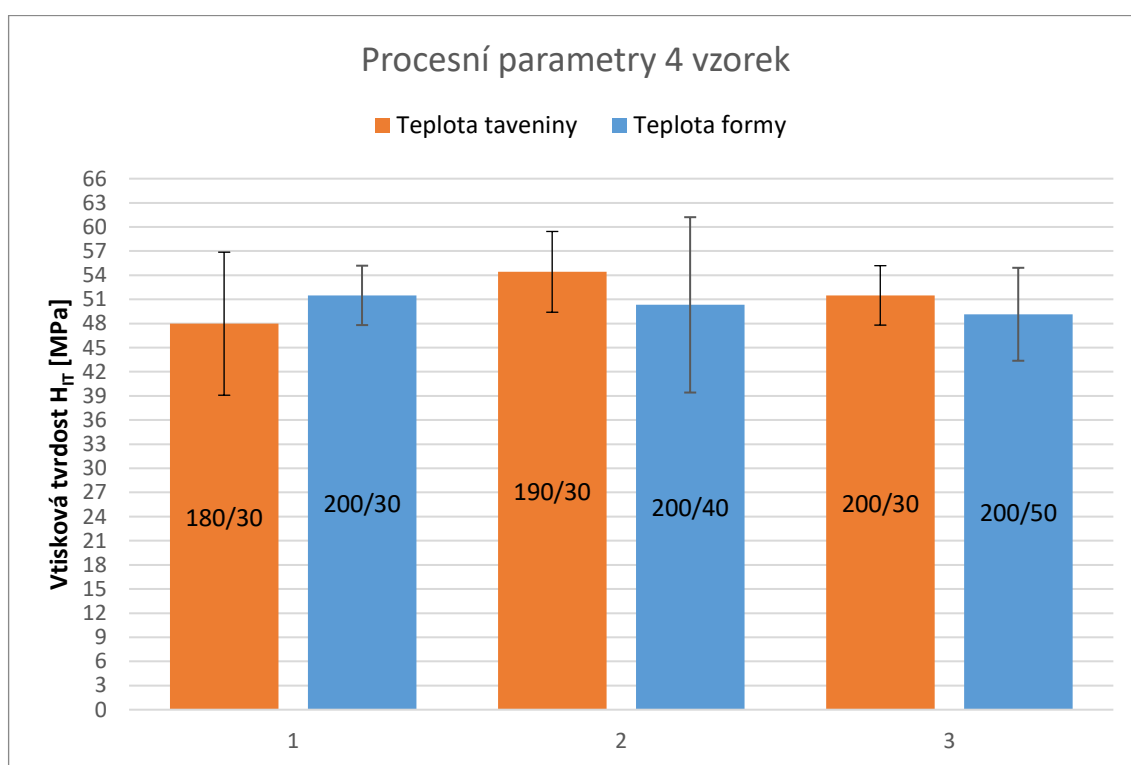
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 20 % hrubě mletého dřeva lze pro teplotu taveniny spatřit trend snižování vtiskové tvrdosti se zvyšující se teplotou taveniny. Nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena pro teplotu taveniny 180 °C. Její hodnota byla o 34 % než u vzorku vstříkovaném s teplotou taveniny 200 °C.

Z naměřených hodnot není patrný žádný trend vtiskové tvrdosti pro změnu teploty formy. Nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena pro teplotu formy 40 °C a byla o 32 % vyšší než nejmenší naměřená hodnota vtiskové tvrdosti pro teplotu formy 30 °C.

4 Vzorek složení materiálu: 50 % LDPE a 50 % hrubě mletého dřeva

Tab. 23 Vyhodnocená naměřená data pro 4 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	47,976		54,419		51,493		50,315		49,146	
Směrodatná odchylka	8,891		5,019		3,692		10,896		5,777	



Obr. 50 Vtisková tvrdost 50 % LDPE s 50 % hrubě mletého dřeva

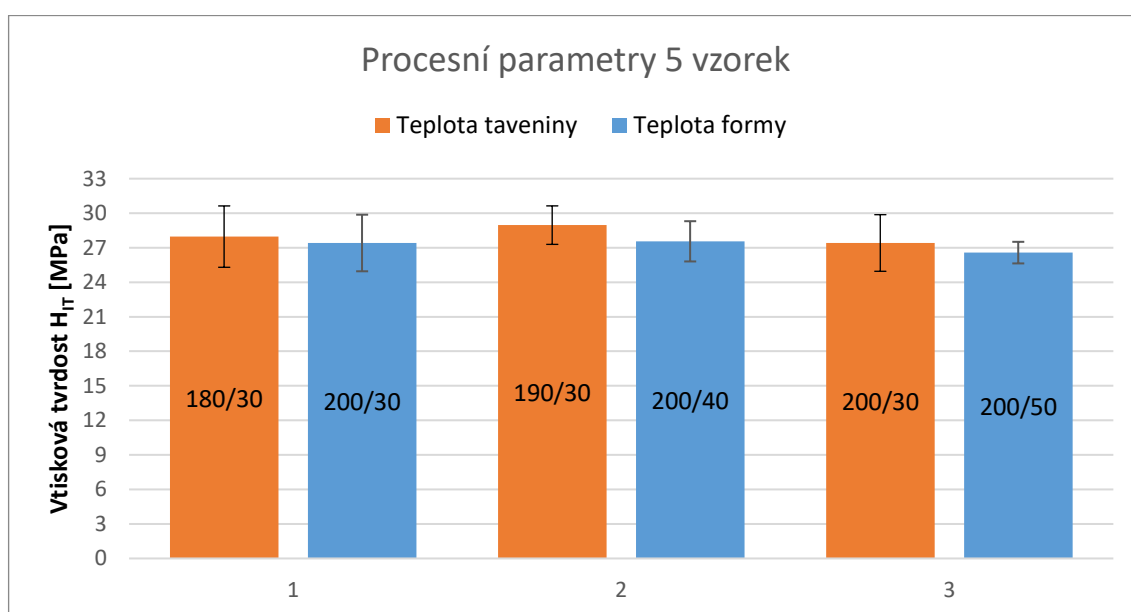
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 50 % hrubě mletého dřeva nelze pro teplotu taveniny spatřit žádný trend vtiskové tvrdosti. Nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena pro teplotu taveniny 190 °C, přičemž lze zpozorovat změnu oproti materiálu plněného 20 % hrubě mletého dřeva, kde nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena pro teplotu taveniny 180 °C. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší naměřenou hodnotou vtiskové tvrdosti byl 13 %.

Z naměřených hodnot lze zpozorovat klesající trend vtiskové tvrdosti pro změnu teploty formy. Kdy nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena pro teplotu formy 30 °C a zvyšující teplotou formy se vtisková tvrdost pro teplotu formy 50 °C snížila o 5 %.

5 Vzorek složení materiálu: 80 % LDPE a 20 % břidlice

Tab. 24 Vyhodnocená naměřená data pro 5 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	27,964		28,962		27,411		27,557		26,575	
Směrodatná odchylka	2,665		1,672		2,459		1,749		0,939	



Obr. 51 Vtisková tvrdost 80 % LDPE s 20 % břidlice

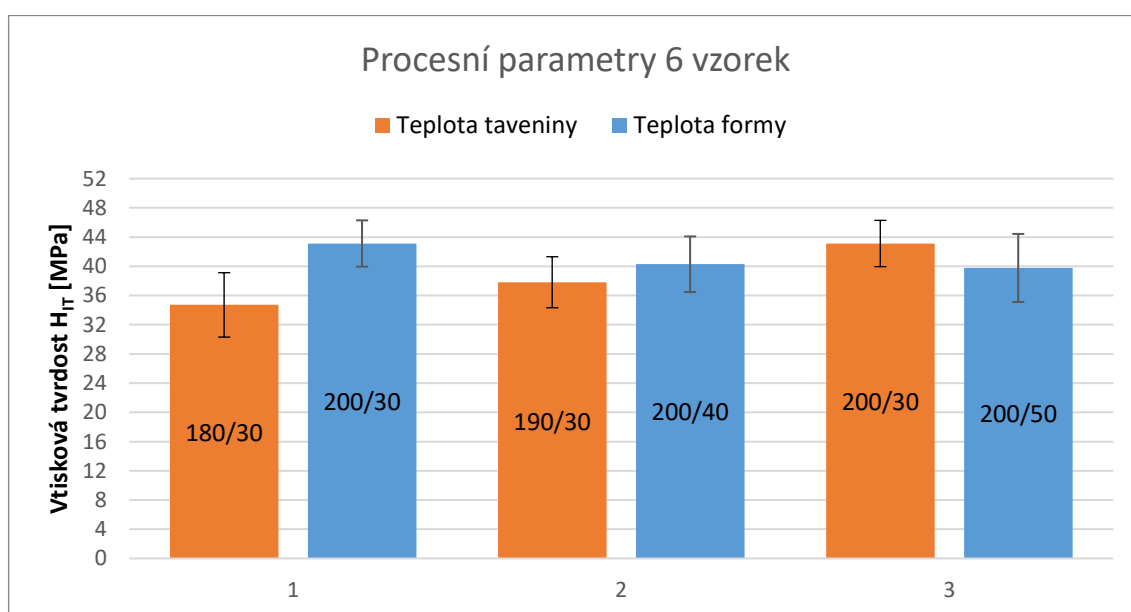
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 20 % břidlice nelze pro teplotu taveniny spatřit žádný trend vtiskové tvrdosti. Z grafu ovšem lze vyčíst, že se hodnoty vtiskové tvrdosti téměř nemění a rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou je 6 %. Nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena pro teplotu taveniny 190 °C.

Z naměřených hodnot není pro teplotu formy patrný žádný trend vývoje vtiskové tvrdosti. V grafu lze spatřit, že změnou teploty formy dochází jen k nepatrným změnám vtiskové tvrdosti. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou vtiskové tvrdosti je 4 %. Výstřík vyhotovený s teplotou formy 40 °C má nejvyšší vtiskovou tvrdost.

6 Vzorek složení materiálu: 50 % LDPE a 50 % břidlice

Tab. 25 Vyhodnocená naměřená data pro 6 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	34,719		37,815		43,122		40,286		39,777	
Směrodatná odchylka	4,407		3,493		3,168		3,805		4,66	



Obr. 52 Vtisková tvrdost 50 % LDPE s 50 % břidlice

Z naměřených hodnot pro materiál plněný 50 % břidlice lze spatřit rostoucí trend vtiskové tvrdosti se zvyšující se teplotou taveniny. Nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena pro teplotu taveniny 200 °C a nejnižší vtisková tvrdost pro teplotu taveniny 180 °C a rozdíl mezi nimi činil 24 %.

Z naměřených hodnot pro teplotu formy vyplývá klesající trend vývoje vtiskové tvrdosti. Kdy pro teplotu formy 30 °C byla naměřena nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti, za to pro teplotu formy 50 °C byla naměřena hodnota vtiskové tvrdosti nejnižší. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou vtiskové tvrdosti je 8 %.

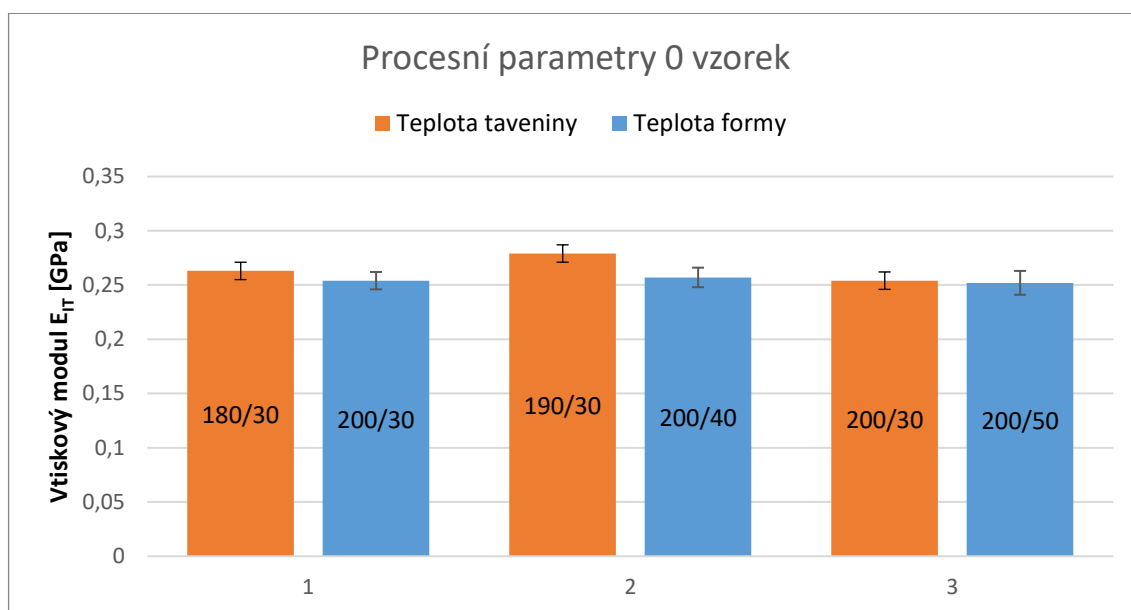
8.2 Vtiskový modul E_{IT}

Mezi důležité veličiny, které lze získat ze zkoušky DSI je vtiskový modul. Jedná se o směrnici tečny odtěžující křivky a odpovídá elastickému modulu.

0 Vzorek složení materiálu: 100 % LDPE

Tab. 26 Vyhodnocená naměřená data pro 0 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	0,263		0,279		0,254		0,257		0,252	
Směrodatná odchylka	0,008		0,008		0,008		0,009		0,011	



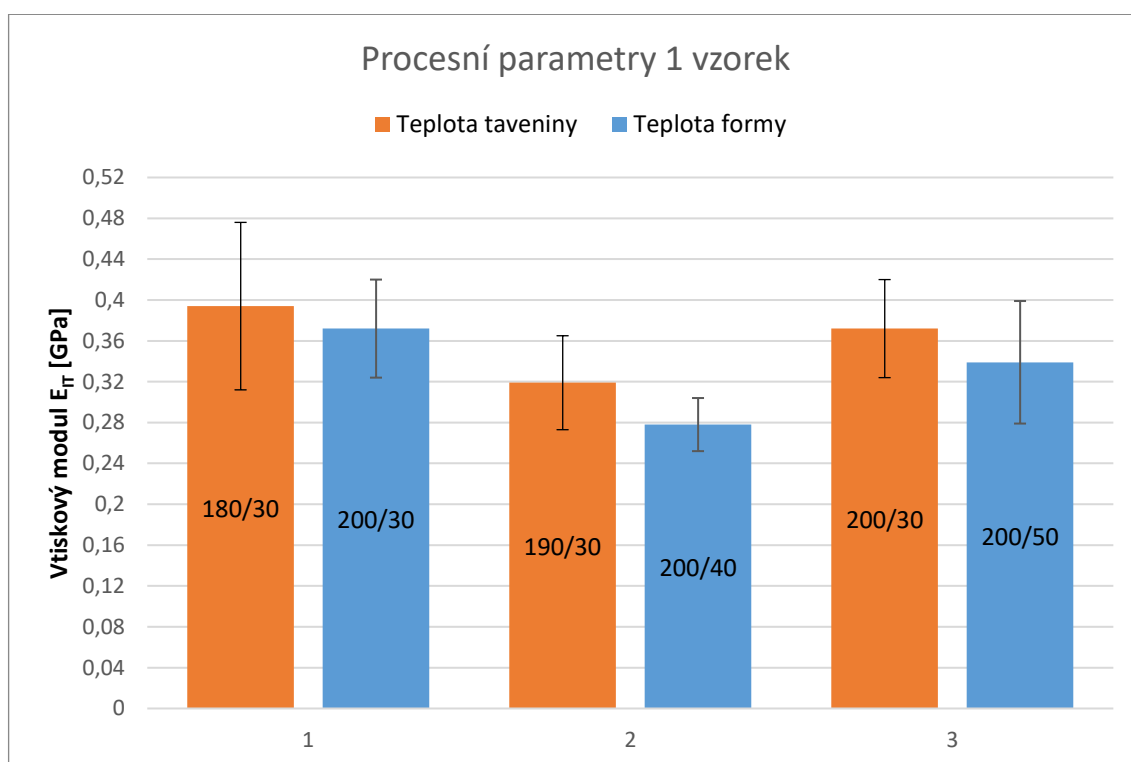
Obr. 53 Vtiskový modul neplněného LDPE

Z naměřených hodnot vyplývá, že teplota taveniny a teplota formy téměř neovlivnila vtiskový modul neplněného materiálu LDPE. Jediná více rozdílná hodnota byla naměřena pro teplotu taveniny 190 °C, kdy vtiskový modul byl o 10 % vyšší než nejmenší naměřený pro teplotu taveniny 190 °C. Získaný vtiskový modul neplněného materiálu bude sloužit pro porovnání s materiály plněnými.

1 Vzorek složení materiálu: 80 % LDPE a 20 % jemně mletého dřeva

Tab. 27 Vyhodnocená naměřená data pro 1 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	0,394		0,319		0,372		0,278		0,339	
Směrodatná odchylka	0,082		0,046		0,048		0,026		0,06	



Obr. 54 Vtiskový modul 80 % LDPE s 20 % jemně mletého dřeva

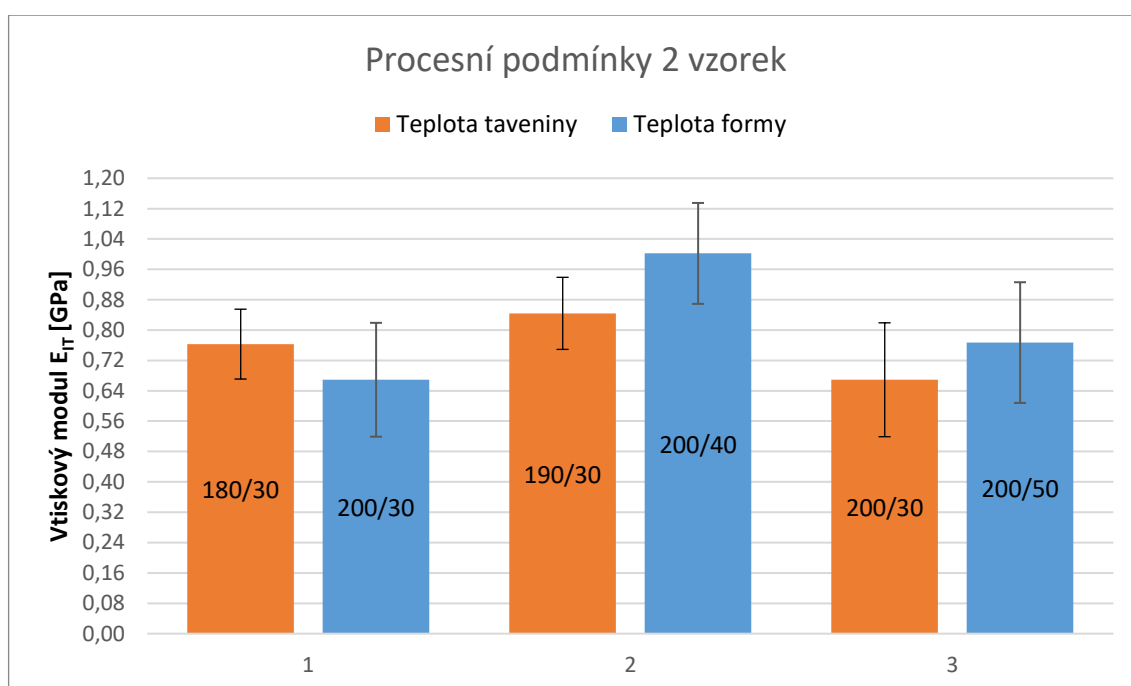
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 20 % jemně mletého dřeva pro teplotu taveniny nevykazuje žádný trend vývoje vtiskového modulu. Nejmenší vtiskový modul byl naměřena pro teplotu taveniny 190 °C a největší vtiskový modul pro teplotu taveniny 200 °C. Rozdíl mezi naměřenými hodnotami je 24 %.

Z naměřených hodnot není patrný žádný trend vtiskového modulu pro změnu teploty formy. Nejvyšší vtiskový modul byl naměřen pro teplotu formy 30 °C a byl o 34 % větší než pro nejnižší hodnotu naměřenou při teplotě formy 40 °C.

2 Vzorek složení materiálu: 50 % LDPE a 50 % jemně mletého dřeva

Tab. 28 Vyhodnocená naměřená data pro 2 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	0,763		0,844		0,669		1,002		0,767	
Směrodatná odchylka	0,092		0,095		0,15		0,133		0,159	



Obr. 55 Vtiskový modul 50 % LDPE s 50 % jemně mleté dřeva

Z naměřených hodnot pro materiál plněný 50 % jemně mletého dřeva nelze pro teplotu taveniny spatřit žádný trend vývoje vtiskového modulu. V porovnání s materiálem plněným 20 % jemně mletého dřeva, kdy při teplotě taveniny 190 °C byl změřen nejnižší vtiskový modul, při navýšení plniva na 50 % při stejné teplotě taveniny bylo dosaženo nejvyšší hodnoty vtiskového modulu. Nejnižší vtiskový modul byl naměřen o 26 % menší pro teplotu taveniny 200 °C.

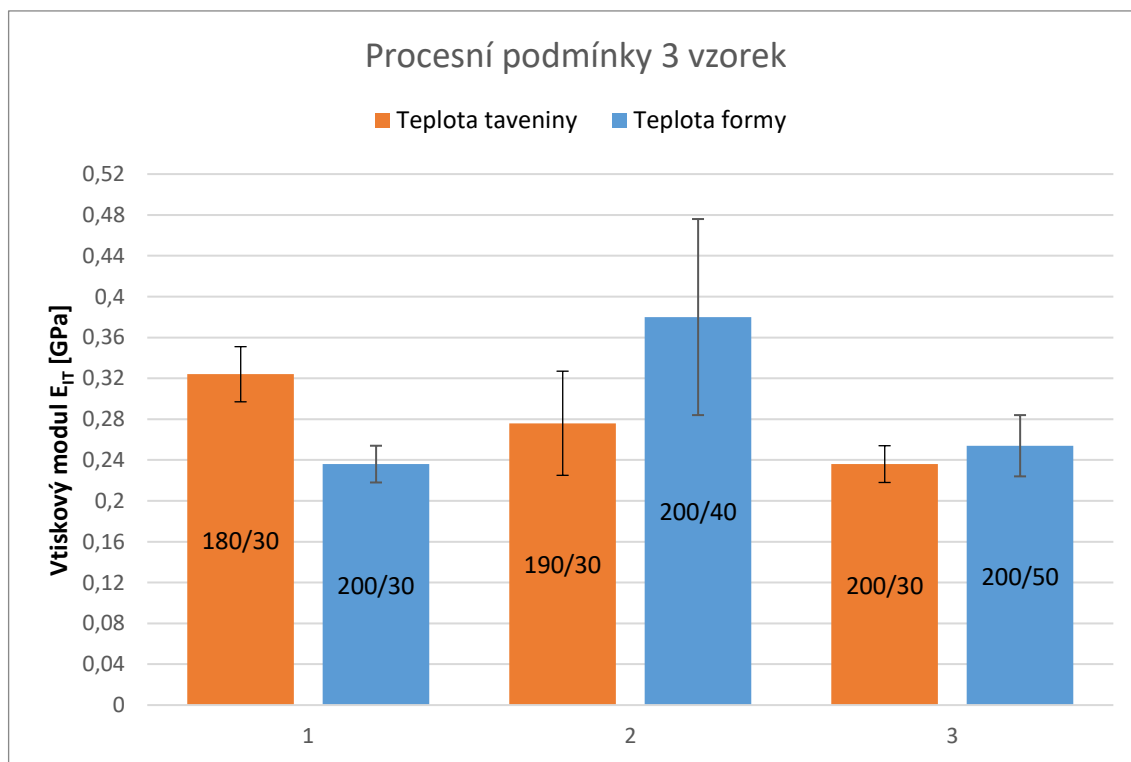
Z naměřených hodnot nevyplývá žádný trend vtiskového modulu pro změnu teploty formy. Jen je patrná, stejně jako u teploty taveniny, změna z nejnižšího vtiskového modulu na nejvyšší vtiskový modul pro teplotu formy 40 °C oproti vzorku plněného 20 % jemně mletým

dřevem. Nejvyšší vtiskový modul byl o 50 % větší než nejnižší hodnota naměřená pro teplotu formy 30 °C.

3 Vzorek složení materiálu: 80 % LDPE a 20 % hrubě mletého dřeva

Tab. 29 Vyhodnocená naměřená data pro 3 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	0,324		0,276		0,236		0,38		0,254	
Směrodatná odchylka	0,027		0,051		0,018		0,096		0,03	



Obr. 56 Vtiskový modul 80 % LDPE s 20 % hrubě mletého dřeva

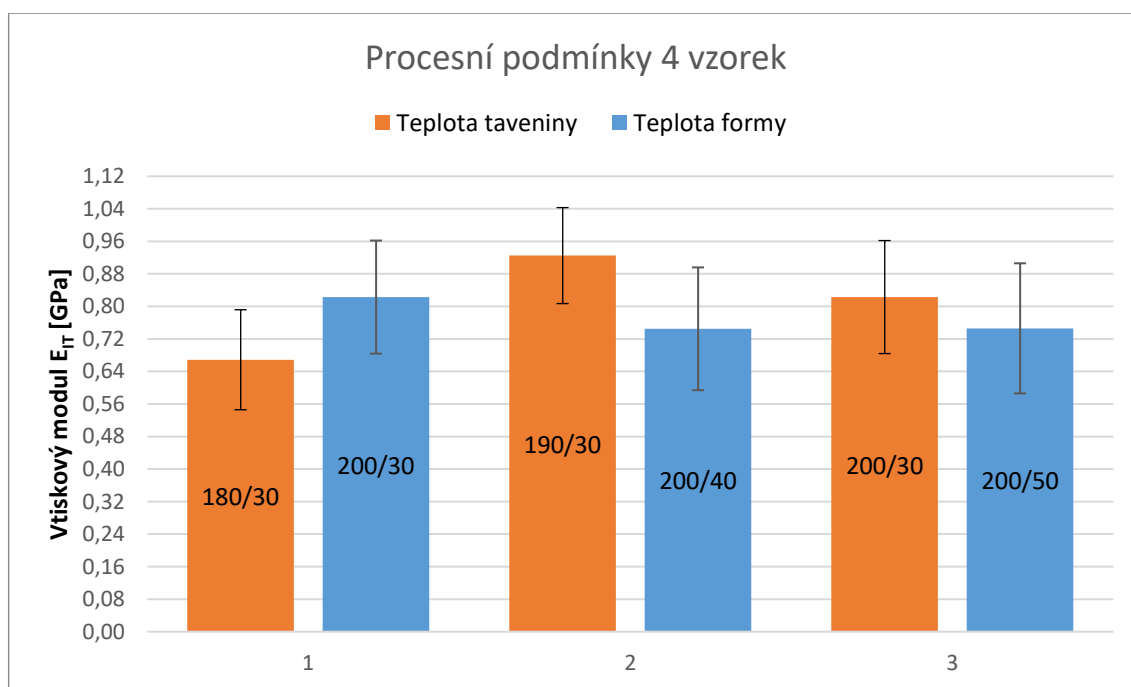
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 20 % hrubě mletého dřeva pro teplotu taveniny lze zpozorovat klesající trend vývoje vtiskového modulu. Nejvyšší vtiskový modul byl naměřen pro teplotu taveniny 180 °C a postupně klesal, až dosáhl hodnoty o 37 % menší pro teplotu taveniny 200 °C.

Z naměřených hodnot není patrný žádný trend vtiskového modulu při změně teploty formy. Nejvyšší vtiskový modul byl naměřen pro teplotu formy 40 °C a nejnižší hodnota byla naměřena pro teplotu formy 30 °C. Rozdíl mezi těmito teplotami je 61 %.

4 Vzorek složení materiálu: 50 % LDPE a 50 % hrubě mletého dřeva

Tab. 30 Vyhodnocená naměřená data pro 4 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	0,669		0,925		0,823		0,745		0,746	
Směrodatná odchylka	0,123		0,118		0,139		0,151		0,16	



Obr. 57 Vtiskový modul 50 % LDPE s 50 % hrubě mletého dřeva

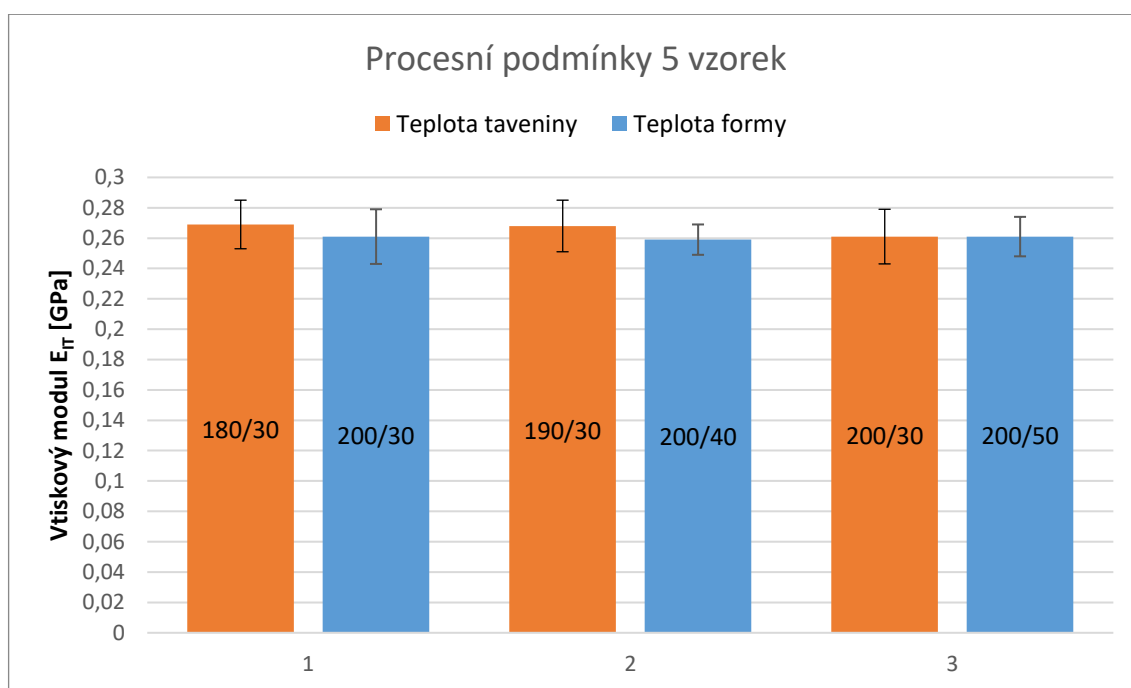
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 50 % hrubě mletého dřeva nelze pro teplotu taveniny spatřit žádný trend vývoje vtiskového modulu. Nejvyšší vtiskový modul byl naměřen pro teplotu taveniny 190 °C, o 38 % větší než pro teplotu taveniny 180 °C.

Z naměřených hodnot není patrný žádný trend vtiskového modulu při změně teploty formy. Nejnižší vtiskový modul byl naměřen při teplotě formy 40 °C a nejvyšší vtiskový modul byl naměřen při teplotě formy 30 °C. Rozdíl mezi těmito hodnotami je 10 %.

5 Vzorek složení materiálu: 80 % LDPE a 20 % břidlice

Tab. 31 Vyhodnocená naměřená data pro 5 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	0,269		0,268		0,261		0,259		0,261	
Směrodatná odchylka	0,016		0,017		0,018		0,01		0,013	



Obr. 58 Vtiskový modul 80 % LDPE s 20 % břidlice

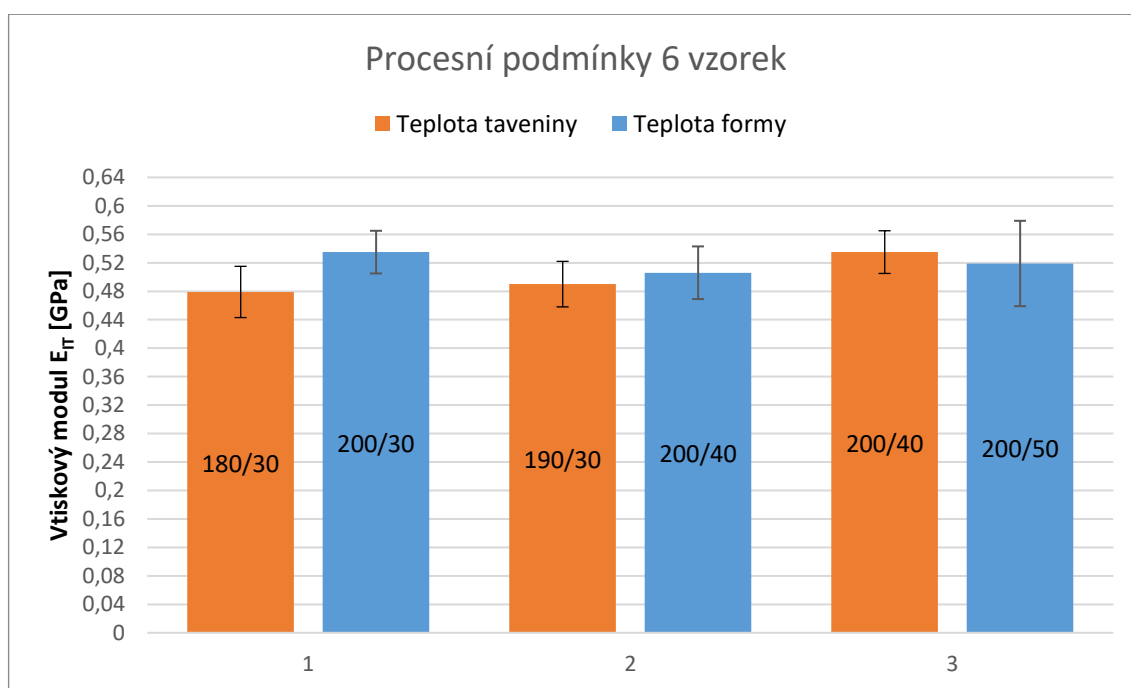
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 20 % břidlice pro teplotu taveniny nevyplývá žádný trend vtiskovém modulu. Z grafu ovšem lze vyčíst, že se hodnoty vtiskového modulu téměř nemění a rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou je 3 %. Nejvyšší vtiskový modul byl naměřen pro teplotu taveniny při 180 °C.

Z naměřených hodnot není pro teplotu formy spatřen žádný trend vývoje vtiskové tvrdosti. Z grafu je patrné, že změnou teploty formy dochází jen k nepatrným změnám vtiskové tvrdosti. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou vtiskové tvrdosti je 1 %. Pro teploty formy 30 °C a 50 °C byla naměřená stejná hodnota vtiskového modulu a také hodnota nejvyšší.

6 Vzorek složení materiálu: 50 % LDPE a 50 % břidlice

Tab. 32 Vyhodnocená naměřená data pro 6 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	0,479		0,49		0,535		0,506		0,519	
Směrodatná odchylka	0,036		0,032		0,03		0,037		0,06	



Obr. 59 Vtiskový modul 50 % LDPE s 50 % břidlice

Naměřené hodnoty pro materiál plněný 50 % břidlice pro teplotu taveniny vykazují rostoucí trend vtiskového modulu. Kdy pro teplotu taveniny 180 °C byla naměřena hodnota vtiskového modulu nejnižší, ta se postupně se zvyšující se teplotou taveniny zvyšovala, až dosáhla svého maxima při teplotě taveniny 200 °C. Tyto hodnoty se mezi sebou lišily o 12 %.

Z naměřených hodnot pro teplotu formy není patrný žádný trend vývoje vtiskového modulu. Nejvyšší naměřená hodnota vtiskového modulu byla naměřena pro teplotu formy 30 °C. Pro teplotu formy 40 °C byla naměřena o 6 % menší hodnota vtiskového modulu. Jednalo se o hodnotu nejnižší.

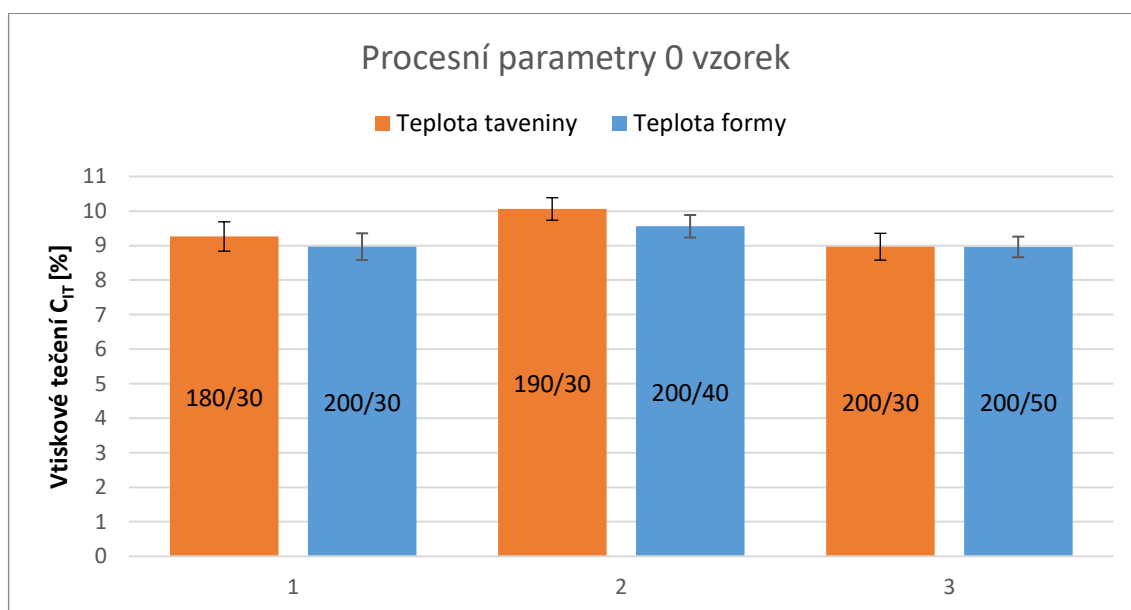
8.3 Vtiskové tečení (creep) C_{IT}

Další důležitou hodnotou získanou pomocí zkoušky DSI je vliv objemu a druhu plniva na creepové chování materiálu. Vtiskové tečení je stanoveno ze závislosti indentační hloubky na čase indentace. Po dosažení maximální zatěžující síly 0,5 N následuje výdrž po dobu 90 s na maximální síle.

0 Vzorek složení materiálu: 100 % LDPE

Tab. 33 Vyhodnocená naměřená data pro 0 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	9,263		10,06		8,967		9,559		8,96	
Směrodatná odchylka	0,424		0,326		0,388		0,327		0,299	



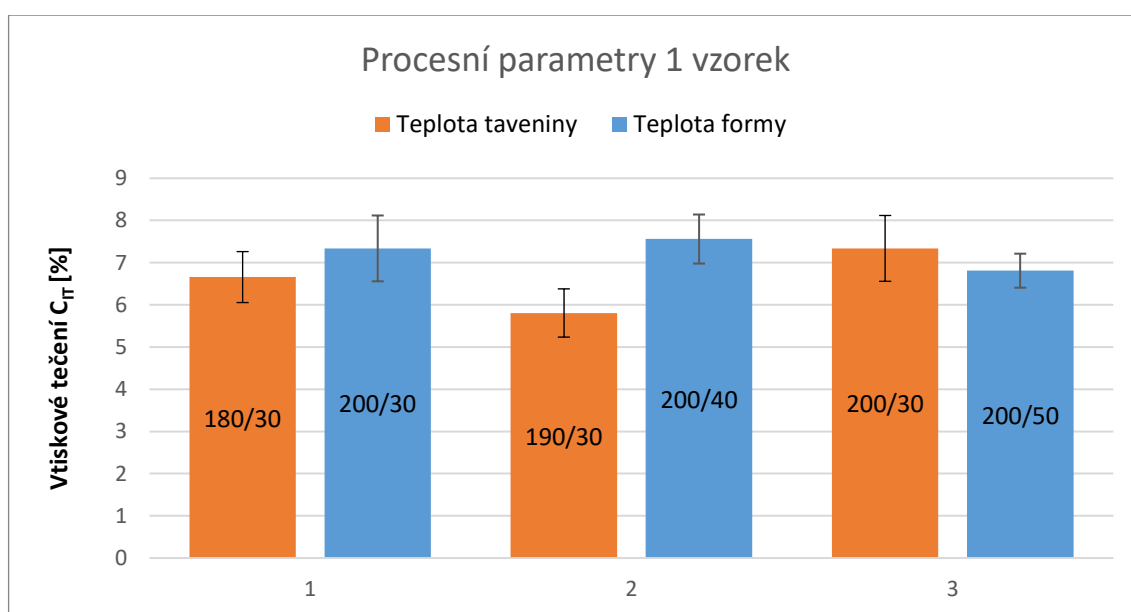
Obr. 60 Vtiskové tečení neplněné LDPE

Z naměřených hodnot vyplývá, že teplota taveniny a teplota formy téměř neovlivnila vtiskové tečení neplněného materiálu LDPE. Jediná více odlišná hodnota byla naměřena pro teplotu taveniny 190 °C, kdy vtiskové tečení bylo o 9 % vyšší než nejmenší naměřené vtiskové tečení pro teplotu taveniny 180 °C. Získané vtiskové tečení neplněného materiálu bude sloužit pro porovnání s materiály plněnými.

1 Vzorek složení materiálu: 80 % LDPE a 20 % jemně mletého dřeva

Tab. 34 Vyhodnocená naměřená data pro 1 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	6,658		5,807		7,338		7,56		6,81	
Směrodatná odchylka	0,604		0,571		0,78		0,581		0,403	



Obr. 61 Vtiskové tečení 80 % LDPE s 20 % jemně mletého dřeva

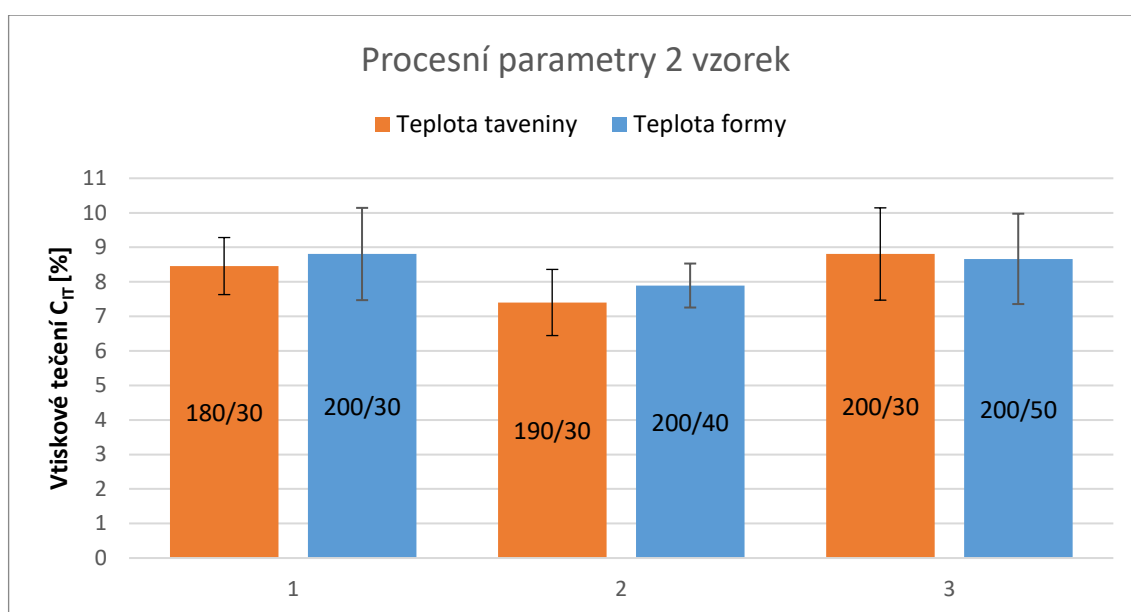
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 20 % jemně mletého dřeva není pro teplotu taveniny spatřen žádný trend vývoje vtiskového tečení. Nejmenší vtiskové tečení bylo naměřeno pro teplotu taveniny 190 °C a největší vtiskové tečení pro teplotu taveniny 200 °C. Rozdíl mezi těmito naměřenými hodnotami je 26 %.

Z naměřených hodnot nevyplývá žádný trend vtiskového tečení pro změnu teploty formy. Nejvyšší vtiskové tečení bylo naměřeno pro teplotu formy 40 °C, a bylo o 11 % větší než pro nejnižší hodnotu naměřenou při teplotě formy 50 °C.

2 Vzorek složení materiálu: 50 % LDPE a 50 % jemně mletého dřeva

Tab. 35 Vyhodnocená naměřená data pro 2 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	8,457		7,402		8,806		7,893		8,665	
Směrodatná odchylka	0,826		0,958		1,336		0,637		1,309	



Obr. 62 Vtiskové tečení 50 % LDPE s 50 % jemně mleté dřevo

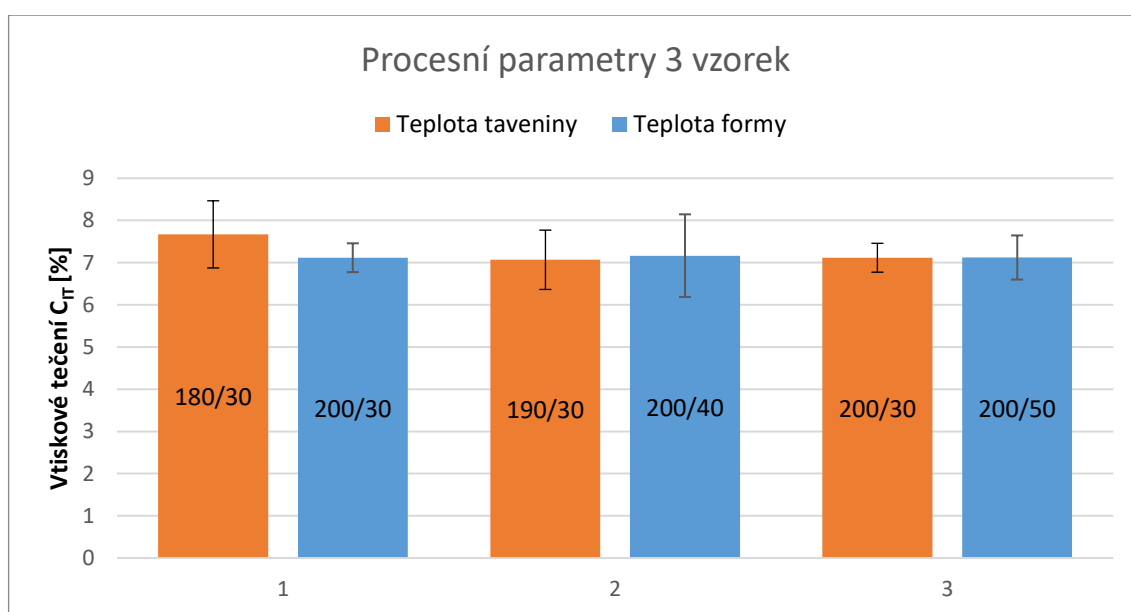
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 50 % jemně mletého dřeva není pro teplotu taveniny spatřen žádný trend vývoje vtiskového tečení. Největší vtiskové tečení bylo naměřeno pro teplotu taveniny 200 °C a nejmenší vtiskové tečení pro teplotu taveniny 190 °C. Rozdíl mezi těmito naměřenými hodnotami je 19 %. Z grafu lze vypočítat podobné chování vtiskového tečení jako u materiálu plněného 20 % jemně mletého dřeva při změně teploty taveniny.

Z naměřených hodnot není patrný žádný trend vtiskového tečení pro změnu teploty formy. Nejvyšší vtiskové tečení bylo naměřeno pro teplotu formy 30 °C, a byla o 12 % větší než pro nejnižší hodnotu naměřenou při teplotě formy 40 °C. Z grafu lze vypočítat podobné chování vtiskového tečení jako u materiálu plněného 20 % jemně mletého dřeva při změně teploty formy.

3 Vzorek složení materiálu: 80 % LDPE a 20 % hrubě mletého dřeva

Tab. 36 Vyhodnocená naměřená data pro 3 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	7,67		7,068		7,117		7,165		7,122	
Směrodatná odchylka	0,796		0,703		0,342		0,98		0,523	



Obr. 63 Vtiskové tečení 80 % LDPE s 20 % hrubě mleté dřevo

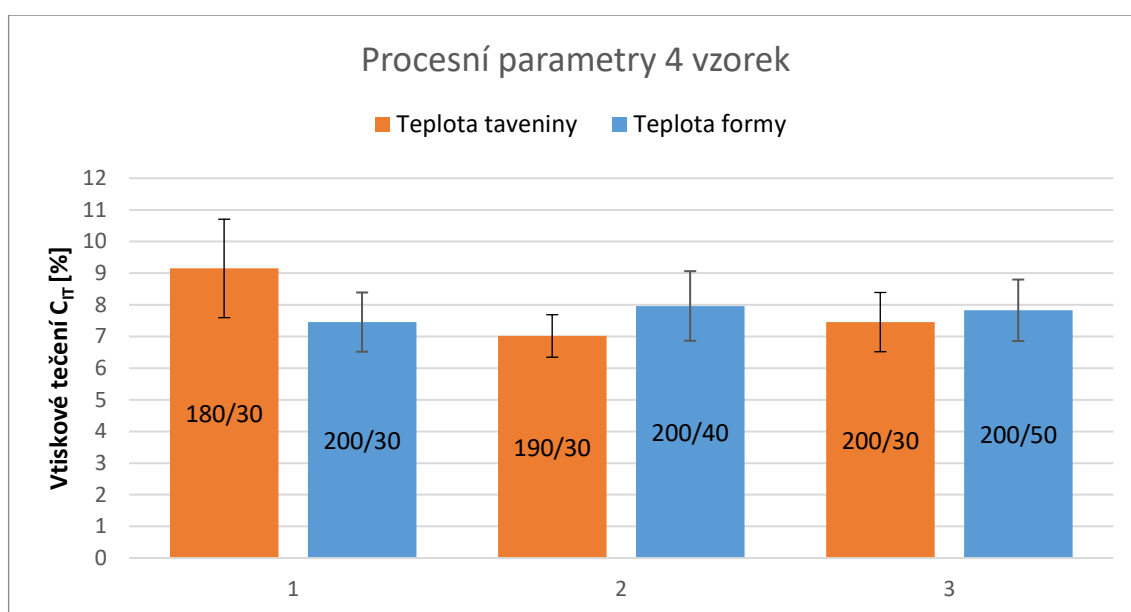
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 20 % hrubě mletého dřeva pro teplotu taveniny nevyplývá žádný trend vývoje vtiskového tečení. Nejmenší vtiskové tečení bylo naměřeno pro teplotu taveniny 190 °C a největší vtiskové tečení pro teplotu taveniny 180 °C. Rozdíl mezi těmito naměřenými hodnotami je 9 %.

Z naměřených hodnot není patrný žádný trend vtiskového tečení pro změnu teploty formy. Při změně teploty formy dochází jen k nepatrným změnám vtiskového tečení. Nejvyšší vtiskové tečení bylo naměřeno pro teplotu formy 40 °C, a bylo o 1 % větší než pro nejnižší hodnotu naměřenou při teplotě formy 30 °C.

4 Vzorek složení materiálu: 50 % LDPE a 50 % hrubě mletého dřeva

Tab. 37 Vyhodnocená naměřená data pro 4 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	9,151		7,017		7,455		7,965		7,829	
Směrodatná odchylka	1,556		0,671		0,936		1,1		0,971	



Obr. 64 Vtiskové tečení 50 % LDPE s 50 % hrubě mletého dřeva

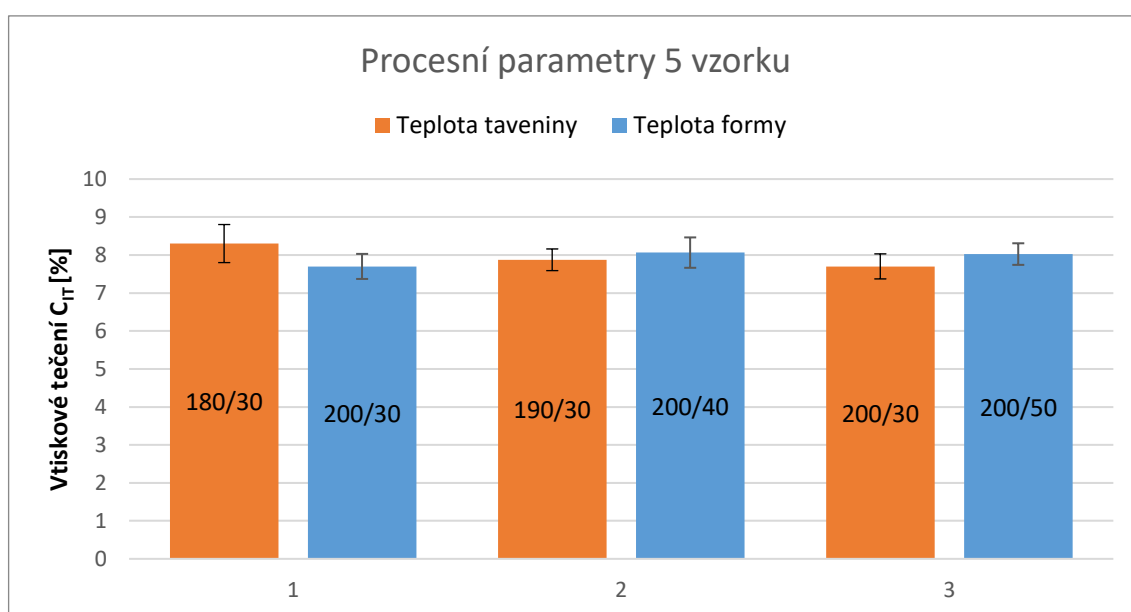
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 50 % hrubě mletého dřeva není pro teplotu taveniny spatřen žádný trend vývoje vtiskového tečení. V porovnání s materiálem plněným jen 20 % hrubě mletého dřeva, jsou větší rozdíly vtiskového tečení při změně teploty taveniny, ale při tom lze zpozorovat určitou podobnost s méně plněným materiálem. Nejmenší vtiskové tečení bylo naměřeno pro teplotu taveniny 190 °C a největší vtiskové tečení pro teplotu taveniny 180 °C. Rozdíl mezi těmito naměřenými hodnotami je 30 %.

Z naměřených hodnot nevyplývá žádný trend vtiskového tečení pro změnu teploty formy. Nejvyšší vtiskové tečení bylo naměřeno pro teplotu formy 40 °C, a bylo o 7 % větší než pro nejnižší hodnotu naměřenou při teplotě formy 30 °C. Tedy je patrné, že změna teploty formy velmi neovlivní vtiskové tečení materiálu.

5 Vzorek složení materiálu: 80 % LDPE a 20 % břidlice

Tab. 38 Vyhodnocená naměřená data pro 5 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	8,302		7,874		7,7		8,064		8,025	
Směrodatná odchylka	0,501		0,285		0,33		0,4		0,284	



Obr. 65 Vtiskové tečení 80 % LDPE s 20 % břidlice

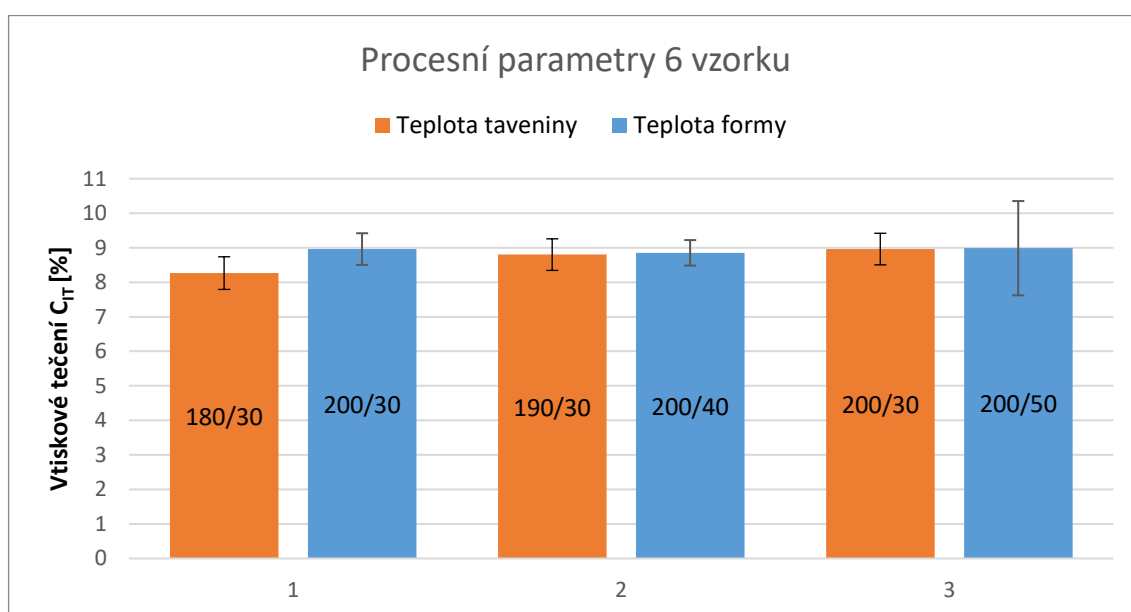
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 20 % břidlice pro teplotu taveniny lze spatřit klesající trend vtiskového tečení. Nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena pro teplotu taveniny při 180 °C, následně při zvyšování teploty taveniny vtiskové tečení klesalo, až dosáhlo své nejnižší hodnoty při teplotě taveniny 200 °C. Rozdíl mezi těmito teplotami činil 8 %.

Z naměřených hodnot není pro teplotu formy zřejmý žádný trend vývoje vtiskového tečení. Z grafu lze vyvodit, že změnou teploty formy dochází jen k nepatrným změnám vtiskového tečení. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou vtiskového tečení je 5 %. Pro teploty formy 40 °C a 50 °C byla naměřena téměř stejná hodnota vtiskového tečení a také hodnota nejvyšší.

6 Vzorek složení materiálu: 50 % LDPE a 50 % břidlice

Tab. 39 Vyhodnocená naměřená data pro 6 vzorek

	Teplota taveniny [°C], Teplota formy [°C]									
	180	30	190	30	200	30	200	40	200	50
Aritmetický průměr	8,265		8,8		8,961		8,852		8,987	
Směrodatná odchylka	0,473		0,457		0,458		0,369		1,365	



Obr. 66 Vtiskové tečení 50 % LDPE s 50 % břidlice

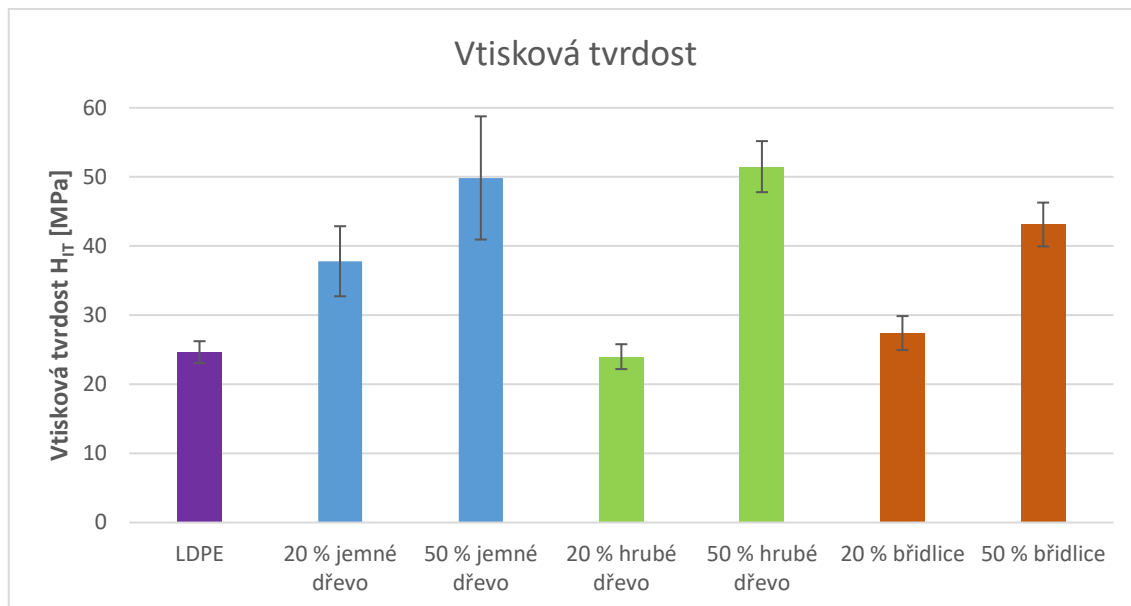
Z naměřených hodnot pro materiál plněný 50 % břidlice lze pro teplotu taveniny spatřit rostoucí trend vtiskového modulu. Kdy pro teplotu taveniny 180 °C byla naměřena hodnota vtiskového modulu nejnižší, ta se postupně se zvyšující se teplotou taveniny zvyšovala, až dosáhla svého maxima při teplotě taveniny 200 °C. Tyto hodnoty se mezi sebou lišily o 8 %.

Z naměřených hodnot pro teplotu formy není patrný žádný trend vývoje vtiskového tečení. Nejvyšší naměřená hodnota vtiskového tečení byla naměřena pro teplotu formy 50 °C, této hodnoty téměř dosáhl i vzorek vytvořený při teplotě formy 30 °C. Pro teplotu formy 40 °C byla naměřena o 2 % menší hodnota vtiskového tečení. Jednalo se o hodnotu nejnižší.

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V diskuzi získaných výsledků bude provedeno porovnání čistého LDPE a jeho plniv pro jedny dané procesní parametry, a to 200 °C teplota taveniny a 30 °C teplota formy.

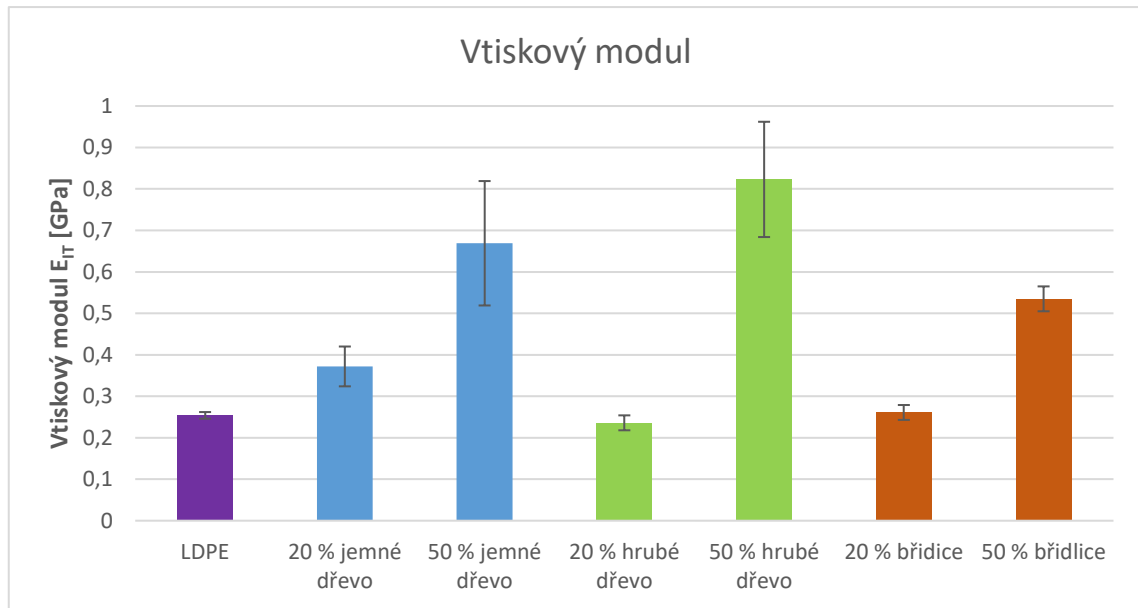
Vtisková tvrdost H_{IT}



Obr. 67 Zhodnocení vtiskové tvrdosti pro dané procesní parametry

Referenční hodnoty pro vtiskovou tvrdost byly získány z neplněného LDPE. U dalších materiálů bylo přidáno plnivo. Plnivo přidáváme do základního materiálu z důvodu zlepšení jeho mechanických vlastností, snížení ceny nebo za účelem úpravy vzhledu např. dřevěné piliny dodávají u WPC vzhled dřeva. Z grafu je patrné, že s rostoucím objemem daného plniva v materiálu se zlepšují dané mechanické vlastnosti materiálu. Z grafu lze vyčíst, že při objemu plniva 20 % má nejlepší vtiskovou tvrdost jemně mleté dřevo. Za to nejmenší vtiskovou tvrdost má vzorek, u kterého bylo použito jako plnivo hrubě mleté dřevo v objemu 20 %. To se ovšem mění při použití objemu plniva v objemu 50 %. Z grafu je patrné, že hrubě mleté dřevo má nejlepší vtiskovou tvrdost. Nejhorší vtiskovou tvrdost má břidlice.

Z grafu lze vyčíst, že nejmenší rozdíl vtiskové tvrdosti je u jemně mletého dřeva, zato u hrubě mletého dřeva je vtisková tvrdost velmi rozdílná podle podílu plniva.

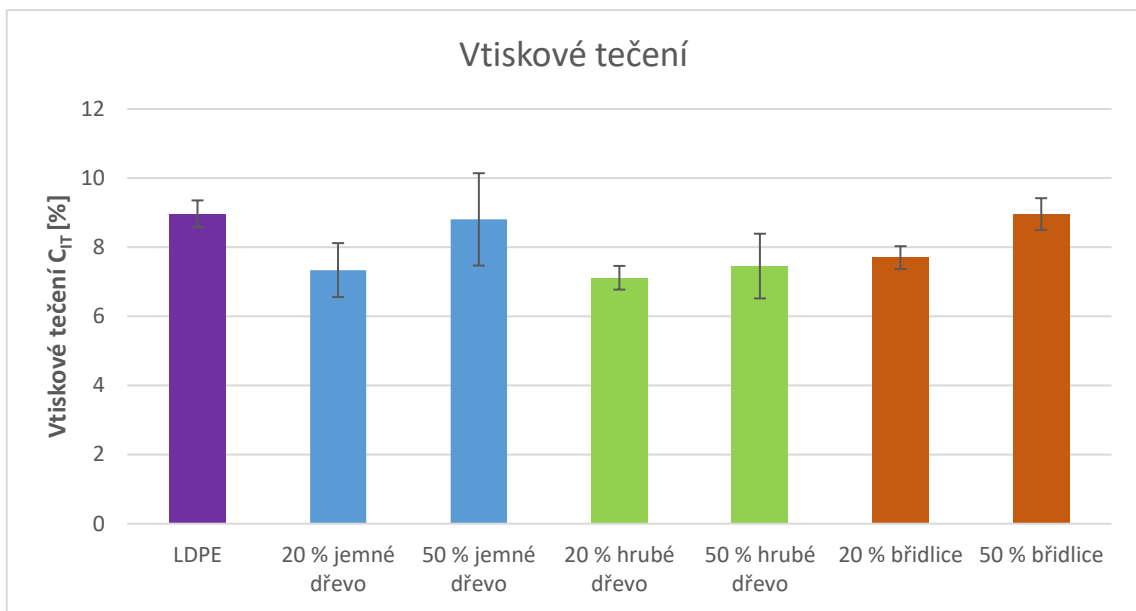
Vtiskový modul E_{IT} 

Obr. 68 Zhodnocení vtiskového modulu pro dané procesní parametry

Referenční hodnoty pro vtiskový modul byly získány z neplněného LDPE. Z grafu lze upozorovat, že při objemu plniva 20 % má nejlepší vtiskový modul jemně mleté dřevo. Nejmenší vtiskový modul má vzorek, u kterého bylo použito jako plnivo hrubě mleté dřevo v objemu 20 %. Vzorky plněné z 50 % se chovají odlišně než vzorky plněné z 20 %. Proto lze z grafu vyčíst, že hrubě mleté dřevo má nejlepší vtiskový modul, přitom při menším plnění byl vtiskový modul velmi malý. Nejhorší vtiskový modul má břidlice.

Z grafu lze vyplývá, že nejmenší rozdíly vtiskového modulu jsou u vzorků plněných jemně mletým dřevem a břidlicí. Přitom u vzorků plněných hrubě mletým dřevem je vtiskový modul velmi rozdílný.

Z grafu vtiskového modulu lze upozorovat podobnost s grafem vtiskové tvrdosti.

Vtiskové tečení (creep) C_{Tt} 

Obr. 69 Zhodnocení vtiskového tečení pro dané procesní parametry

Referenční hodnota vtiskového tečení byla získána z neplněného LDPE. Z grafu lze vypočítat chování materiálů s velkým objemem plniva, jenž mají vysoké hodnoty vtiskového tečení, které jsou podobné neplněnému vzorku. Jediný vzorek, který nepodléhá tomuto chování je vzorek plněný 50 % hrubě mletým dřevem, který se přibližuje vzorkům plněným pouze 20 %. Z grafu lze vyčíst že vzorek plněný 20 % hrubě mletým dřevem má ze všech vzorků nejmenší vtiskové tečení.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala porovnáním mikro-mechanických vlastností plněného nízko hustotního polyethylenu. Jako plnivo bylo zvoleno jemně mleté bukové piliny, hrubě mleté bukové piliny a břidlice. Tato plniva byla vyhotovena ve dvou objemových variantách. První objemová varianta je 20 % plniva a druhá objemová varianta je 50 % plniva. Tyto materiály byly vstřikovány při třech různých teplotách taveniny (180 °C, 190 °C, 200 °C) a při třech různých teplotách formy (30 °C, 40 °C, 50 °C).

Zkušební vzorky pro dané varianty byly měřeny pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti (DSI) k získání mikro-mechanických vlastností. Měření se uskutečnilo na zařízení Micro Combi Tester. Měření probíhalo za zvolených parametrů zkoušky, a to aplikované zatížení 0,5 N, rychlost zatěžování 1 N/min a výdrž na maximálním zatížení 90 s. Naměřená data byla vyhodnocena pomocí metody Oliver a Pharr a následně vynesena do grafů závislosti vtiskové tvrdosti (vtiskového modulu, vtiskového tečení) na druhu a objemu použitého plniva pro různé procesní parametry.

Naměřená data byla vyhodnocena dvěma způsoby. Prvním způsobem bylo vyhodnocení daného materiálu (např. 50 % základního materiálu a 50 % plniva) z pohledu změny vstřikovacích parametrů a sledování vývoje těchto dat. Z naměřených dat nelze získat specifický trend pro vtiskovou tvrdost. Změněné procesní parametry jednou ovlivní naměřenou vtiskovou tvrdost kladně a pro další vstřikovaný materiál negativně. Tento jev přetrvával i pro vtiskový modul a vtiskové tečení (creep).

Druhým způsobem vyhodnocení bylo porovnání naměřených dat materiálů mezi sebou za stejných procesních parametrů vstřikování, a to pro teplotu taveniny 200 °C a teplotu formy 30 °C. V tomto případě už lze sledovat specifický trend kdy při použití stejného plniva vzorky s větším objemem měly lepší mechanické vlastnosti (vtiskovou tvrdost, vtiskový modul). Při použití materiálů s objemem plniva 20 % tak zásadní zlepšení vtiskové tvrdosti proběhlo pouze u jemně mletých bukových pilin. Zato hrubě mletých bukových pilin a břidlice byla vtisková tvrdost obdobná základnímu nízko hustotnímu polyethylenu. Při použití vzorků s objemem plniva 50 % lze z dat zpozorovat skokový nárůst vtiskové tvrdosti. Největší skokový nárůst byl spatřen u vzorku s hrubě mletými bukovými pilinami, který dosáhl stejné hodnoty jako vzorek s jemně mletými bukovými pilinami. Pro vtiskový modul lze spatřit obdobné chování materiálů jako u vtiskové tvrdosti, kdy pouze vzorek s 20 % jemně mletých bukových pilin dosahuje zpozorovatelného nárůstu vtiskového modulu. Zato u

vzorků s objemem plniva 50 % opět lze zpozorovat skokový nárůst vtiskového modulu, kdy nejvyšší vtiskový modul dosahuje vzorek s 50 % hrubě mletých bukových pilin, u kterého byl taky zpozorován největší rozdíl mezi vzorky plněnými 20 % a 50 %. Pro vtiskové tečení z naměřených dat lze vyčíst, že lepších hodnot vtiskového tečení dosahují vzorky plněné menším objemem plniva. Zato vzorky s objemem plniva 50 % dosahují podobných hodnot jako neplněný materiál. U jediného vzorku, který obsahoval 50 % hrubě mletých bukových pilin lze vypořadovat zlepšení vtiskového tečení, které dosahuje podobných hodnot jako u vzorků plněných pouze 20 % plniva.

V dnešní době, kdy je hojně využíván WPC materiál například k výrobě obkladových materiálů nebo rámu oken, je potřeba znát jeho vlastnosti. Podstatný vliv na vlastnosti WPC určuje použitý druh plniva. V minulosti paradoxně nebylo věnováno příliš pozornosti vlivu z hora uvedených plniv na mechanické vlastnosti při vstřikování například vtiskovou tvrdost, vtiskový modul. Proto cílem této práce bylo posoudit tento vliv při lišících se procesních parametrech vstřikování, a to při změně teploty taveniny a změně teploty formy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WEISS, Viktorie a Elena STŘIHAVKOVÁ. *Polymery*. 1. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, Fakulta výrobních technologií a managementu, 2014. ISBN 978-80-7414-738-8.
- [2] LENFELD, Petr. Vstřikování. *Technická univerzita Liberec.: Katedra strojírenské technologie* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [3] *Avance Europe: Vstřikování plastů* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.vyrobaplastu.eu/vstrikovani-plastu/>
- [4] LENDFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. 1. Pardubice: publi, 2016 [cit. 2019-05-12]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Impresum.html>
- [5] MAŇAS, Miroslav. *Výrobní stroje a zařízení: Gumárenské a plastikářské stroje II*. 1. Brno: Vysoké učení technické, 1990. ISBN 80-214-0213-X.
- [6] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. 1. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [7] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. 1. Svitavy: publi, 2016 [cit. 2019-05-12]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Impresum.html>
- [8] LENFELD, Petr. Vytlačování. *Technická univerzita Liberec.: Katedra strojírenské technologie* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/06.htm
- [9] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 1. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-720-4193-2.
- [10] OVŠÍK, Martin. *Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů*. Zlín, 2013, 179 s. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [11] ČTVRTLÍK, Radim. *Fyzikální vlastnosti tenkých vrstev*. Olomouc, 2009, 155 s. Disertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [12] DUŠEK, Jiří. *Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost – čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008, 171 s. Disertační práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [13] ČSN EN ISO 14577-1. *Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů: Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2016, 44 s.

- [14] BALTA-CALLEJA, F. J. a Stoyko FAKIROV. *Microhardness of polymers*. 1. Cambridge, [England]: Cambridge University Press, 2000. ISBN 05-216-4218-3.
- [15] LANGE, H. *Improving the proces efficiency of WPC extrusion by a production loss monitoring system* [online]. LAHTI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCIES, 2013 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://es.scribd.com/document/154570675/Lange-Herman>
- [16] ROWELL, Roger M. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. 1. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2005. ISBN 08-493-1588-3.
- [17] VASILE, Cornelia a G. E. ZAIKOV. *New trends in natural and synthetic polymer science*. 1. New York: Nova Science Publishers, c2006. ISBN 15-945-4772-6.
- [18] VASILE, Cornelia a G. E. ZAIKOV. *New trends in natural and synthetic polymer science*. 1. New York: Nova Science Publishers, c2006. ISBN 15-945-4772-6.
- [19] KLYOSOV, A. A. *Wood-plastic composites*. 1. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2007. ISBN 04-701-4891-8.
- [20] BENEŠOVÁ, Anna. *Optimalizace složení dřevoplastových kompozitů s ohledem na jejich využití ve stavebnictví*. Brno, 2017, 178 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně
- [21] LEMON, Craig M., XANTHOS, Marino, ed. *Functional fillers for plastics*. 2. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 978-3527323616.
- [22] CAMPILHO, Raul D. S. G. *Natural fiber composites*. 1. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 14-822-3900-0.
- [23] MLEZIVA, Josef. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 1. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901-5704-1.
- [24] KIM, Jin-Kuk a Kaushik PAL. *Recent advances in the processing of wood-plastic composites*. 1. New York: Springer, c2010. Engineering materials. ISBN 36-421-4877-8.
- [25] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [26] TEUBER, Laura, Victoria-Sophie OSBURG, Waldemar TOPOROWSKI, Holger MILITZ a Andreas KRAUSE. Wood polymer composites and their contribution to cascading utilisation. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, [cit. 2019-02-03]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.009. ISSN 09596526. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615003522>
- [27] *Kojo* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://cz.kojo2006.com/wpc-door/door-frame/eco-friendly-wpc-interior-painting-door-frame.html>

- [28] *OBI: Terasová prkna* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.obi.cz/terasova-prkna/kovalex-wpc-terasove-prkno-masivni-se-strukturou-sedohnedep/1191907>
- [29] *UNIHOBBY: WPC plotovky* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://eshop.uni-hobby.cz/stavba-drevo-a-wpc-ploty-a-prislusenstvi-wpc-plotovky-plotovka-wpc-tmave-drevo-obly-konec-1500x70x11mm/137399p/>
- [30] *Flexform: Technologies* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.naturalfibers-forautomotive.com/?m=201402>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

WPC	Wood plastic composites.
PVC	Polyvinylchlorid.
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren.
PTFE	Polytetrafluoretylen.
PF	Fenolformaldehyd.
p_i	Vnitřní tlak.
p_v	Vnější tlak.
F_p	Prisouvací síla.
F_u	Uzavírající síla.
T_F	Teplota formy.
t_{S1}	Strojní čas 1.
t_{S2}	Strojní čas 2.
t_{S3}	Strojní čas 3.
T_{tav}	Teplota taveniny.
p	Vstřikovací tlak.
t_d	Doba dotlaku.
t_{pl}	Doba plastikace.
DSI	Depth Sensing Indentation.
P_{max}	Maximální zatěžující síla.
h_{max}	Maximální indentační hloubka.
S	Kontaktní tuhost.
h	Hloubka.
H_{IT}	Vtisková tvrdost.
HM	Martenzova tvrdost.

HV	Vickersova tvrdost.
E_{IT}	Vtiskový modul.
E_r	Redukovaný modul.
A_p	Kontaktní průmět plochy.
C	Kontaktní poddajnost.
E^*	Komplexní modul.
C_{IT}	Vtiskové tečení.
W_{total}	Celková práce.
W_{plast}	Plastická práce.
W_{elast}	Elastická práce.
η_{IT}	Koeficient zpětné relaxace.
\bar{x}	Aritmetický průměr
s	Směrodatná odchylka
x_i	i-tá hodnota měřené veličiny
n	Počet měření

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Dveřní zárubně [27]</i>	18
<i>Obr. 2 Podlaha WPC [28]</i>	19
<i>Obr. 3 WPC plot [29]</i>	19
<i>Obr. 4 WPC výplň automobilových dveří [30]</i>	20
<i>Obr. 5 Jednošnekový vytlačovací stroj [7]</i>	22
<i>Obr. 6 Rozdělení vytlačovacích strojů [5]</i>	23
<i>Obr. 7 Pístový vytlačovací stroj [5]</i>	24
<i>Obr. 8 Diskový vytlačovací stroj [5]</i>	25
<i>Obr. 9 Šnekový vytlačovací stroj [5]</i>	26
<i>Obr. 10 Třísekční vytlačovací šnek [7]</i>	26
<i>Obr. 11 Granulace na hlavě [8]</i>	27
<i>Obr. 12 Granulace za studena [7]</i>	28
<i>Obr. 13 Vstřikovací cyklus [3]</i>	30
<i>Obr. 14 Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování [4]</i>	31
<i>Obr. 15 Plnění volným tokem (jettingem) a laminárním tokem [4]</i>	34
<i>Obr. 16 Laminární tok taveniny plastů [4]</i>	34
<i>Obr. 17 Průběhy tlaků při přepnutí na dotlak [4]</i>	35
<i>Obr. 18 Použitelné dávkovací dráhy u vstřikovacích strojů [4]</i>	36
<i>Obr. 19 Porovnání doby chlazení pro plněný a neplněný plast [4]</i>	37
<i>Obr. 20 Vliv teploty taveniny na průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje [4]</i>	38
<i>Obr. 21 Vliv teploty vstřikovací formy na průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje [4]</i>	39
<i>Obr. 22 Indentační křivka (a), časový diagram indentační zkoušky (b). [10]</i>	41
<i>Obr. 23 Průběh zatěžování a odlehčování indentoru: a) zatížení, b) odlehčení, c) opětné zatížení [10]</i>	42
<i>Obr. 24 Schématické znázornění hloubky vtisku [11]</i>	42
<i>Obr. 25 Indentační křivka [10]</i>	43
<i>Obr. 26 Nespojitý průběh indentačních křivek (a) fázová transformace, (b) praskání při transformaci [10]</i>	44
<i>Obr. 27 Závislost zatížení – čas (a), hloubka průniku – čas (b) [10]</i>	44
<i>Obr. 28 Schéma zatěžování a odlehčování [10]</i>	45
<i>Obr. 29 Vyjádření vtiskového tečení [10]</i>	47
<i>Obr. 30 Indentační křivka – deformační práce [10]</i>	47

<i>Obr. 31 Planetární vytlačovací linka</i>	50
<i>Obr. 32 Planetární sekce A) centrální šnek, B) planetární šneky, C) opěrný kroužek</i>	50
<i>Obr. 33 Strunová vytlačovací hlava</i>	51
<i>Obr. 34 Zbavování struny přebytečné vody</i>	51
<i>Obr. 35 Nízko hustotní polyetylen BRALEN VA 20-60</i>	52
<i>Obr. 36 Bukové dřevo a) jemně mleté b) hrubě mleté</i>	53
<i>Obr. 37 Tok materiálu vytlačovací linkou pro 1 vzorek</i>	55
<i>Obr. 38 Tok materiálu vytlačovací linkou pro 2 vzorek</i>	56
<i>Obr. 39 Tok materiálu vytlačovací linkou pro 3 vzorek</i>	57
<i>Obr. 40 Tok materiálu vytlačovací linkou pro 4 vzorek</i>	58
<i>Obr. 41 Břidlice</i>	59
<i>Obr. 42 Tok materiálu vytlačovací linkou pro 5 vzorek</i>	60
<i>Obr. 43 Tok materiálu vytlačovací linkou pro 6 vzorek</i>	61
<i>Obr. 44 Zkušební tělíska a) s jemně mletým dřevem, b) s hrubě mletým dřevem,</i> <i>c) s břidlicí</i>	63
<i>Obr. 45 Micro-combi tester</i>	65
<i>Obr. 46 Vtisková tvrdost neplněné LDPE</i>	66
<i>Obr. 47 Vtisková tvrdost 80 % LDPE s 20 % jemně mletého dřeva</i>	67
<i>Obr. 48 Vtisková tvrdost 50 % LDPE s 50 % jemně mletého dřeva</i>	68
<i>Obr. 49 Vtisková tvrdost 80 % LDPE s 20 % hrubě mletého dřeva</i>	69
<i>Obr. 50 Vtisková tvrdost 50 % LDPE s 50 % hrubě mletého dřeva</i>	70
<i>Obr. 51 Vtisková tvrdost 80 % LDPE s 20 % břidlice</i>	71
<i>Obr. 52 Vtisková tvrdost 50 % LDPE s 50 % břidlice</i>	72
<i>Obr. 53 Vtiskový modul neplněného LDPE</i>	73
<i>Obr. 54 Vtiskový modul 80 % LDPE s 20 % jemně mletého dřeva</i>	74
<i>Obr. 55 Vtiskový modul 50 % LDPE s 50 % jemně mleté dřevo</i>	75
<i>Obr. 56 Vtiskový modul 80 % LDPE s 20 % hrubě mletého dřeva</i>	76
<i>Obr. 57 Vtiskový modul 50 % LDPE s 50 % hrubě mletého dřeva</i>	77
<i>Obr. 58 Vtiskový modul 80 % LDPE s 20 % břidlice</i>	78
<i>Obr. 59 Vtiskový modul 50 % LDPE s 50 % břidlice</i>	79
<i>Obr. 60 Vtiskové tečení neplněné LDPE</i>	80
<i>Obr. 61 Vtiskové tečení 80 % LDPE s 20 % jemně mletého dřeva</i>	81

<i>Obr. 62 Vtiskové tečení 50 % LDPE s 50 % jemně mleté dřevo</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 63 Vtiskové tečení 80 % LDPE s 20 % hrubě mleté dřevo.....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 64 Vtiskové tečení 50 % LDPE s 50 % hrubě mletého dřeva.....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 65 Vtiskové tečení 80 % LDPE s 20 % břidlice</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 66 Vtiskové tečení 50 % LDPE s 50 % břidlice</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 67 Zhodnocení vtiskové tvrdosti pro dané procesní parametry</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 68 Zhodnocení vtiskového modulu pro dané procesní parametry</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 69 Zhodnocení vtiskového tečení pro dané procesní parametry</i>	<i>89</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Rozdělení polyethylenu [19]</i>	13
<i>Tab. 2 Vlastnosti polyethylenu [23]</i>	14
<i>Tab. 3 Vlastnosti polypropylenu [23]</i>	14
<i>Tab. 4 Vlastnosti polyvinylchloridu [23]</i>	15
<i>Tab. 5 Vlastnosti dřevní moučky [19]</i>	16
<i>Tab. 6 Vlastnosti materiálu</i>	52
<i>Tab. 7 Vzorky plněné dřevem</i>	53
<i>Tab. 8 Zpracovatelské teploty vytlačovací linky</i>	54
<i>Tab. 9 Další zpracovatelské vlastnosti 1 vzorku</i>	55
<i>Tab. 10 Zpracovatelské vlastnosti 2 vzorku</i>	56
<i>Tab. 11 Zpracovatelské vlastnosti 3 vzorku</i>	57
<i>Tab. 12 Zpracovatelské vlastnosti 4 vzorku</i>	58
<i>Tab. 13 Vzorky s břídlicí</i>	59
<i>Tab. 14 Zpracovatelské vlastnosti 5 vzorku</i>	60
<i>Tab. 15 Zpracovatelské vlastnosti 6 vzorku</i>	61
<i>Tab. 16 Procesní vstříkovací parametry</i>	62
<i>Tab. 17 Hlavní parametry vstříkovacího stroje</i>	63
<i>Tab. 18 Zkušební podmínky</i>	65
<i>Tab. 19 Vyhodnocená naměřená data pro 0 vzorek</i>	66
<i>Tab. 20 Vyhodnocená naměřená data pro 1 vzorek</i>	67
<i>Tab. 21 Vyhodnocená naměřená data pro 2 vzorek</i>	68
<i>Tab. 22 Vyhodnocená naměřená data pro 3 vzorek</i>	69
<i>Tab. 23 Vyhodnocená naměřená data pro 4 vzorek</i>	70
<i>Tab. 24 Vyhodnocená naměřená data pro 5 vzorek</i>	71
<i>Tab. 25 Vyhodnocená naměřená data pro 6 vzorek</i>	72
<i>Tab. 26 Vyhodnocená naměřená data pro 0 vzorek</i>	73
<i>Tab. 27 Vyhodnocená naměřená data pro 1 vzorek</i>	74
<i>Tab. 28 Vyhodnocená naměřená data pro 2 vzorek</i>	75
<i>Tab. 29 Vyhodnocená naměřená data pro 3 vzorek</i>	76
<i>Tab. 30 Vyhodnocená naměřená data pro 4 vzorek</i>	77
<i>Tab. 31 Vyhodnocená naměřená data pro 5 vzorek</i>	78
<i>Tab. 32 Vyhodnocená naměřená data pro 6 vzorek</i>	79

<i>Tab. 33</i>	<i>Vyhodnocená naměřená data pro 0 vzorek</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 34</i>	<i>Vyhodnocená naměřená data pro 1 vzorek</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 35</i>	<i>Vyhodnocená naměřená data pro 2 vzorek</i>	<i>82</i>
<i>Tab. 36</i>	<i>Vyhodnocená naměřená data pro 3 vzorek</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 37</i>	<i>Vyhodnocená naměřená data pro 4 vzorek</i>	<i>84</i>
<i>Tab. 38</i>	<i>Vyhodnocená naměřená data pro 5 vzorek</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 39</i>	<i>Vyhodnocená naměřená data pro 6 vzorek</i>	<i>86</i>

SEZNAM PŘÍLOH

P1 CD obsahující:

- Diplomovou práci (.pdf)
- Materiálový list PE BRALEN VA 20-60
- Naměřené data (.xlsx)