

Příprava a charakterizace chemicky lehčených polyolefinových a polyesterových vzorků kontinuálním a cyklickým procesem

Bc. Rostislav Zhejbal

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Rostislav Zhejbal
Osobní číslo:	T23314
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Příprava a charakterizace chemicky lehčených polyolefinových a polyesterových vzorků kontinuálním a cyklickým procesem

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární studii na dané téma.
- Připravte chemicky lehčené struktury kontinuálním a cyklickým procesem.
- Charakterizujte optimalizované chemicky lehčené vzorky z pohledu hustoty, statických a dynamických mechanických vlastností a tepelné vodivosti.

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

Seznam doporučené literatury:

EAVES, David. *Handbook of polymer foams*. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, U.K.: Rapra Technology, 2004. ISBN 1859573886.

KLEMPNER, Daniel, SENDIJAREVIC, Vahid. *Polymeric Foams and Foam Technology, 2nd Edition*. Carl Hanser Verlag, Munich 2004. ISBN 1569903360

WYPYCH, George. *Handbook of Foaming and Blowing Agents*. ChemTec Publishing, Toronto 2017. ISBN 978-1-895198-99-7

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Kolařík, Ph.D.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na popis polymerů použitých k přípravě pěn a na možnosti různých způsobů lehčení. Pozornost je dále věnována popisu nejčastěji využívaných technologií k přípravě pěn a možnostem testování jejich vlastností. Praktická část práce je rozdělena na dvě fáze, kdy v první fázi se zabývá nejen charakterizací vstupního materiálu převážně z pohledu tokových vlastností zvolených typů polymerů na bázi polyolefinů a polyesterů, ale je především soustředěna na optimalizaci přípravy chemicky lehčených vzorků technologiemi vytlačování a vstřikování. Ve druhé fázi praktické části diplomové práce je pozornost věnována charakterizaci a vyhodnocení vlastností takto připravených lehčených struktur, a to především z pohledu jejich struktury, mechanických vlastností, tvrdosti a tepelné vodivosti.

Klíčová slova: polymerní pěny, chemické lehčení, LDPE, PLA, vytlačování, vstřikování

ABSTRACT

The theoretical part of the thesis is focused on the description of polymers used for the preparation of foams and on the possibilities of different methods of foaming. Attention is also paid to the description of the most commonly used technologies for the preparation of foams and the possibilities of testing their features. The practical part of the thesis is divided into two phases, where the first phase deals not only with the characterization of the input material mainly in terms of flow behavior of selected types of polyolefins and polyester-based polymers but is mainly focused on the optimization of the preparation of chemically expanded samples by extrusion and injection moulding technologies. In the second phase of the practical part of the thesis, attention is paid to the characterization and evaluation of the properties of the prepared expanded structures, especially in terms of their structure, mechanical properties, hardness and thermal conductivity.

Keywords: polymer foams, chemical foaming, LDPE, PLA, extrusion, injection molding

Rád bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Romanu Kolaříkovi, Ph.D, za vynaložený čas, trpělivost a odborné vedení při vzniku této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lukáši Maňasovi, Ph.D. za pomoc při vstřikování vzorků a Ing. Barboře Hanulíkové, Ph.D. za FTIR analýzu. Poděkování za vstřícnost při řešení technických problémů a za pomoc při uvádění zařízení do provozu patří panu Aloisi Šťastnému. Největší poděkování patří mé rodině a přátelům, kteří mi byli oporou při studiu a psaní diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 LEHČENÉ STRUKTURY (PĚNY).....	15
1.1 STRUKTURA PĚNY	15
1.2 VLASTNOSTI PĚN	15
1.3 VYUŽITÍ PĚN.....	17
2 MATERIÁLY PĚN	20
2.1 POLYETHYLEN.....	20
2.2 KYSELINA POLYMLÉČNÁ (PLA)	21
3 PŘÍPRAVA PĚN	23
3.1 MECHANICKÉ LEHČENÍ.....	23
3.2 FYZIKÁLNÍ LEHČENÍ	23
3.2.1 Plynné fyzikální pěnicí činidla.....	24
3.2.2 Kapalně fyzikální pěnicí činidla.....	24
3.3 CHEMICKÉ LEHČENÍ	24
3.3.1 Endotermický rozklad	25
3.3.2 Exotermický rozklad	26
3.3.3 Anorganické pěnicí činidla	26
3.3.4 Organická pěnicí činidla	26
4 TECHNOLOGIE.....	27
4.1 VSTŘIKOVÁNÍ.....	27
4.1.1 Vstřikování strukturních pěn.....	28
4.2 VYTLAČOVÁNÍ	28
4.2.1 Vytlačování strukturních pěn	29
4.3 LISOVÁNÍ	30
5 REOLOGIKÉ VLASTNOSTI	32
5.1 ROTAČNÍ REOLOGIE.....	32
5.2 KAPILÁRNÍ REOLOGIE.....	33
5.2.1 Rabinowitschova korekce	34
5.2.2 Bagley korekce.....	35
5.3 FTIR SPEKTROSKOPIE	36
6 TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ LEHČENÝCH STRUKTUR.....	37
6.1 HUSTOTA	37
6.1.1 Hustotní gradientní sloupec.....	37
6.1.2 Archimedova metoda	37

6.2	STRUKTURA A VELIKOST PÓRŮ	38
6.2.1	Optický mikroskop	38
6.2.2	Skenovací elektronová metoda.....	38
6.3	TEPELNÉ VLASTNOSTI.....	39
6.3.1	Tepelná vodivost	40
6.4	MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	42
6.4.1	Statická zkouška tahem	42
6.4.2	Statická zkouška tlakem	44
6.4.3	Rázová houževnatost	45
6.4.4	Zkouška tvrdosti	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST	47
7	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	48
8	PŘÍPRAVA CHEMICKY LEHČENÝCH STRUKTUR	49
8.1	POUŽITÉ MATERIÁLY A NADOUVADLA.....	49
8.1.1	Nízkohustotní polyetylén (LDPE).....	49
8.1.2	Kyselina polymléčná (PLA)	50
8.1.3	Nadouvadla Budenheim Budit	51
8.2	CHARAKTERIZACE POUŽITÝCH MATERIÁLŮ.....	52
8.2.1	Analýza tokových vlastností materiálů	52
8.2.2	FTIR analýza nadouvadla.....	55
8.3	PŘÍPRAVA CHEMICKY LEHČENÝCH PĚN.....	56
8.3.1	Mikrohnětič	56
8.3.2	Vytlačování	58
8.3.3	Vstřikování	67
9	CHARAKTERIZACE VLASTNOSTÍ CHEMICKY LEHČENÝCH STRUKTUR.....	70
9.1	HUSTOTA.....	70
9.2	PÓROVITOST	71
9.3	MECHANICKÉ VLASTNOSTI PĚN	72
9.3.1	Statická mechanická zkouška v tahu	73
9.3.2	Dynamická mechanická zkouška – rázová houževnatost.....	73
9.4	TVRDOST	74
9.5	SOUČINITEL TEPELNÉ VODIVOSTI	75
10	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ANALÝZ	77
10.1	STANOVENÍ HUSTOTY LEHČENÝCH STRUKTUR	77
10.2	MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA LEHČENÝCH STRUKTUR	80
10.3	ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ LEHČENÝCH STRUKTUR.....	88
10.3.1	Analýza vlastností staticky namáhaných lehčených struktur	88
10.3.2	Analýza vlastností dynamicky namáhaných lehčených struktur.....	93

10.4	ANALÝZA TVRDOSTI LEHČENÉ STRUKTURY	94
10.5	ANALÝZA TEPELNÉ VODIVOSTI LEHČENÉ STRUKTURY	96
ZÁVĚR		99
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		101
SEZNAM OBRÁZKŮ		108
SEZNAM TABULEK.....		112
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		114
SEZNAM PŘÍLOH.....		115

ÚVOD

Lehčené struktury se vyrábí z různých druhů polymerů, jak z termoplastů, tak i z termosetů, které se připravují společně s fyzikálními či chemickými nadouvadly. Vzniklé polymerní pěny získávají pórovitou strukturu, a tak zajišťují snížení hmotnosti oproti jejím výchozím polymerům. Tyto vlastnosti se využívají jak v automobilovém průmyslu, tak i v letectví či ve stavebnictví. [1, 2]

K přípravě lehčených struktur se nejčastěji používají dvě metody lehčení, a to fyzikální či chemické. U fyzikálního lehčení se k termoplastům přidávají pěnicí činidla, která bývají kapalná, nebo plynná. Nevýhodou této metody je, že pro zpracování těchto směsí se musí použít speciální vstřikovací stroj s pomocným vybavením a vysokými technickými požadavky. V případě chemického lehčení pěn je proces řízen chemickými reakcemi, které způsobují organická, anorganická nadouvadla, kde jejich rozklad může být endotermický či exotermický. Nespornou výhodou této metody je to, že k jejich zpracování lze využít běžné zpracovatelské stroje. [1,2]

Tato práce je v první fázi soustředěna především na přípravu chemicky lehčených polyolefinových a polyesterových struktur kontinuálním a cyklickým procesem. Ve druhé fázi je takto připravená lehčená struktura analyzována dle navržené metodiky.

Význam řešení této problematiky je shledáván především z hlediska snížení hmotnosti výrobků, což je z pohledu celosvětově řešených projektů v rámci snížení uhlíkové stopy velmi aktuálním tématem. Toto téma mi umožňuje propojit teoretické znalosti získané během studia s praktickými experimenty, jako jsou příprava lehčených struktur a následná charakterizace jejich vlastností. Navíc, toto téma mi umožní rozšířit své znalosti v oblasti polymerního inženýrství a materiálového testování.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LEHČENÉ STRUKTURY (PĚNY)

Polymerní pěny se vyrábějí z různých materiálů a v různých podobách. [1]

1.1 Struktura pěny

Většina pěn je tvořena procesem, který zahrnuje nukleaci a růst plyných bublin v polymerní matrici, ale výjimkou jsou syntaktické pěny, kde jsou mikroskopické kuličky uzavřeného plynu přidány do polymerního systému. Růst bublin, struktura pěny procházejí několika fázemi a můžou být popsány:

- Na začátku se vytváří malé dispergované kulové bubliny v kapalně matrici, s malým snížením hustoty.
- Při růstu bublin, které zůstávají kulové, je dosaženo nejnižší hustoty pěny, když dosáhnou uspořádané hustoty.
- U dalšího růstu a nižší hustoty pěny se pak zahrnuje deformace buněk a tvoří polyhedralní struktury. Někdy idealizovaných jako pentagonální dodekaedry.
- Viskózní a povrchové napětí způsobuje, že materiál teče směrem k protínajícím se buněčným prvkům a vytváří spoje v trojúhelníkovém průřezu.
- Konečná fáze může zahrnovat prasknutí buněčných stěn, které vede k vytvoření pěny s otevřenými buňkami. [1,2]

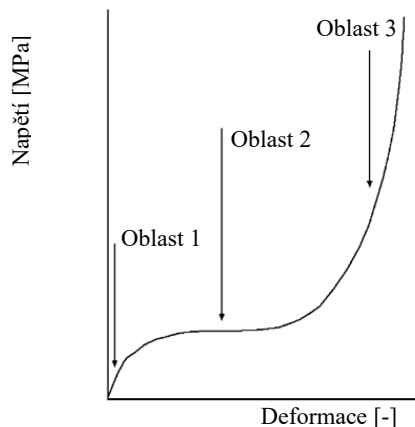
1.2 Vlastnosti pěn

Vlastnosti polymerních pěn se dají rozdělit do několika kategorií a některé jsou uvedeny tady:

Vlastnosti při stlačení

Všechny pěny můžeme znázornit v grafu v závislosti napětí na deformaci, kde tuto křivku můžeme rozdělit do třech oblastí:

- Oblast 1- lineární hookeovo chování
- Oblast 2- oblast plata napětí
- Oblast 3- zhutnění [1]



Obrázek 1 Graf stlačení v závislosti napětí na deformaci [1]

V oblasti 1 je lineární elastické chování, které je řízené ohybem buněčné stěny a u pěn s uzavřenými buňkami natahování buněčné stěny vlivem tlaku zadrženého plynu.

V oblasti 2 buňky kolabují skrze zborcení buněčných stěn, nebo křehkých pěn, drcením buněk a zlomením buněčných stěn.

V oblasti 3 dochází ke zhutnění.

S rostoucí hustotou pěny roste Youngův modul v oblasti 1, zvyšuje se hodnota napětí na plató a snižuje se deformace při které začne zhutňování. Při velkých kompresních deformacích křivka napětí-deformace prudce roste v důsledku zhutňování a směřuje k limitním hodnotám.[1]

Vlastnosti absorpce energie

Mnoho aplikací pěn využívá schopnost pěnových struktur absorbovat energii, což v tomto ohledu ukazuje mnohem lepší výkon než u základních polymerů, ze kterých jsou vyrobeny. To vychází ze schopnosti pěn udržet vrcholovou sílu (nebo zpomalení G). Energie je absorbována převážně v oblasti plata na křivce napětí-deformace, kde se buňky deformují elastickým zborcením, plastickým klouzáním nebo křehkým drcením.

Pěny z polyethylenu s uzavřenými buňkami jsou příkladem materiálu, který absorbuje energii hlavně plastickou deformací buněk. I když není okamžitá obnova po nárazu, tak takové pěny vykazují značnou obnovu v delším časovém horizontu díky tlaku plynu v buňkách a v síťovaných pěnách díky efektu obnovy sítě. [1, 2]

Tepelná vodivost

Hlavní aplikací polymerních pěn je tepelná izolace v oblastech, jako je stavebnictví (izolace stěn a potrubí, doprava, cisterny na zkapalněný plyn) a spotřebiče. I když se ve stavebnictví používá minerální vlna jako izolační materiál, vynikající vlastnosti polymerních pěn, jako je lepší izolace,

snadnější manipulace a žádná absorpce vody (u pěn s uzavřenými buňkami). Tepelnou vodivost pěn ovlivňují čtyři faktory:

- Vedení tepla skrze polymer
- Vedení tepla skrze plyn
- Konvekce tepla skrze buňky
- Radiace skrze buněčné stěny napříč dutinami

Konvekce má největší význam pouze u pěn s extrémně velkými velikostmi buněk většími než cca 10 mm, a proto může být zanedbána u většiny komerčně dostupných pěn, jejichž velikost dosahuje v rozmezí 0,1 -2 mm. Ostatní faktory přispívají významně u vedení tepla. [1,2]

Ostatní tepelné vlastnosti

Tání nebo bod změkčení pěny je v podstatě bod tání základního polymeru. Tento bod může být relativně ostrý, jako například u polyethylenu vysoké hustoty (přechod tání), nebo širší přechod jako u pěn z PE nízké hustoty (přechod tání), polystyrén (skelný přechod).

Specifická tepelná kapacita pěny je v podstatě stejná jako u pevného polymeru, jelikož příspěvek z obsaženého plynu je velmi malý.

Koeficient tepelné roztažnosti je podobně specifický jako u tepelné kapacity. V podstatě koeficient tepelné roztažnosti pevného polymeru, a většina polymerních pěn, má koeficient tepelné roztažnosti přibližně $10^{-4}/K$. Zatímco pěny s uzavřenými buňkami nebo elastické pěny s nízkou hustotou mají tendenci mít vyšší koeficienty roztažnosti kvůli tlaku, který na pěny vyvíjí obsažený plyn, jak teplota roste. [1,2]

1.3 Využití pěn

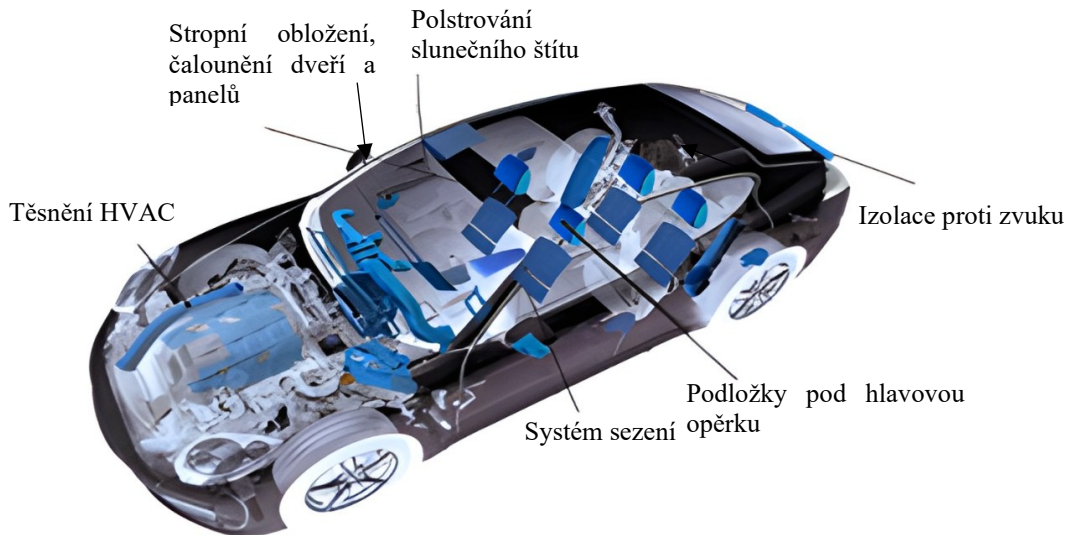
Polymerní pěny mají velmi široké spektrum aplikací a existuje jen málo průmyslových odvětví, kde by tyto pěny nebyly používány. Některé z těchto oblastí a konkrétních aplikací jsou uvedeny v následujícím rozdělení: [1,2]

Spotřebiče

U spotřebičů se pěny využívají jako těsnění nebo vibrační podložky. Tyto pěny mají hustoty v rozmezí od 15 do 60 kg/m³. [1,2]

Automobilový průmysl

V automobilovém průmyslu mají pěny velké spektrum využití například: těsnění, vodní bariery, podložky pod koberce, podložky pod koberce, zvuková izolace, stropní obložení, ochrana proti nárazům, vibrační podložky. Hustota pěn se pohybuje v rozmezí od 15 do 45 kg/m³. [1,2]



Obrázek 2 Použití polymerních pěn v autě [3]

Stavebnictví a výstavba

Ve stavebnictví se pěny využívají jako jsou těsnicí podložky, dilatační spáry, těsnění oken, výplně okapů, absorpce nárazu zvuku, izolace trubek. Pěny o hustotě od 15 do 50 kg/m³ se používají v různých aplikacích, přičemž pěny o vyšších hustotách se využívají tam, kde je potřeba podpora zátěže například podlahovými bloky pro absorpci nárazového zvuku. [1,2]

Letecký průmysl

V leteckém průmyslu je důležitým kritériem pro všechny aplikace odolnost proti ohni. V leteckém průmyslu se pěny využívají například jako těsnění, plovoucí polštáře, zvuková izolace, výstelky potrubí. [1,2]

Námořnictví

V námořnictví se využívají pěny pro záchranné vesty, záchranné kruhy, ochranné nárazníky, olejové bariéry, plovoucí hadice. Tyto pěny mají hustoty až 60 kg/m³. Pěny s nižší hustotou mají sice o něco větší plovatelnost, ale nižší fyzikální vlastnosti, a proto se používají tam, kde cena hraje důležitou roli. [1,2]

Zdravotnictví

Dlahování, límcové obvazy, ortopedické vložky do bot, cvičební podložky, držadla nástrojů, ortotické podpory. Pěny, které se používají v těchto aplikacích pokrývají velmi širokou škálu hustot

a polymerů. Výběr závisí na potřebné úrovni podpory neboli vysoké tuhosti pěny, nebo požadavku na pohodlí, tedy měkké flexibilní pěny. [1,2]

Sport a volný čas

Pomůcky pro plovatelnost, plavecké vesty, kickboardy, hry do bazénu, kempingové podložky, vodní skluzavky, vložky do batohů, sportovní obuvi a přileb, ochrana těla, sedadla do kánoí, hračky a hry, sportovní podložky či surfovací prkna. Stejně jako ve zdravotnictví se využívá velké spektrum hustot a polymerů podle specifických požadavků aplikace. [1,2]

Elektronika

Statické obaly na ochranu, obaly na pinové vložky, obaly s vodivou podložkou, stínění Faradayovy klece, pracovní podložky, vložky do boxů. Všechny tyto aplikace mají za úkol chránit citlivé elektronické komponenty před poškozením způsobené statickým výbojem. [1,2]

Vojenská aplikace

Spací podložky, obaly na rakety, obaly na zbraně, vložky do přileb, trauma padding, štíty proti výtržnostem. Vysoce kvalitní, trhlínám odolné, proříznutí odolné spací podložky. [1,2]

Balení

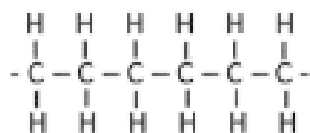
Ochranné rohové podložky, vložky do kufrů, obaly pro displeje, polštářové obaly, některé z těchto aplikací jsou relativně nenáročné a cena/vzhled jsou hlavními kritérii. Polštářkové obaly, ale vyžadují, aby pěna poskytovala konzistentní úroveň ochrany. [1,2]

2 MATERIÁLY PĚN

Polymerní pěny se vyrábí z mnoha materiálů, jako jsou například polypropylén (PP), polystyren (PS), polyethylentereftalát (PET), polyvinylchlorid (PVC), polyuretan (PU). V diplomové práci bude naše pozornost věnována pěnám z polyetylenu a kyseliny polymléčné. [4]

2.1 Polyethylen

Polyethylen (PE) je jeden z nejběžnějších a nejpoužívanějších polymerů, díky své ceně, flexibilitě, vynikající houževnatosti a flexibilitě. Homopolymery mají jednu z nejjednodušších struktur mezi polymery, skládající se pouze z atomu uhlíku a vodíku, který je znázorněn na obrázku 3. [4,6,7,8]



Obrázek 3 Chemická struktura polyethylenu [4,5]

I když polyethylen má nejjednodušší strukturu, přesto existuje polyethylen v mnoha variantách, ve kterých se liší krystalinitou, větvením, molekulovou hmotnostní distribucí. Nejprve byl PE znám ve třech obecných kategoriích:

- LDPE – nízkohustotní polyethylen
- LLDPE – lineární nízkohustotní polyethylen
- HDPE – vysokohustotní polyethylen

S pokrokem technologii jedno-místních katalyzátorů a konstrukcí reaktorů se zejména skupina LDPE rozrostla na několik různých typů. [4,6,7,8]



Obrázek 4 typy Řetězců polyethylenu [4,5]

a – HDPE, b – LLDPE, c – LDPE

1. Nízkohustotní polyethylen (LDPE)

LDPE byl vyvinut ve 30. letech 20. století a byl první polyethylen uveden na trh. Vyrábí se volnými radikály v autoklávech (míchací reaktor) a trubkových reaktorech při vysokých tlacích. [4,6,7,8]

Dlouhé postranní větve (LCB), které přispívají k většímu chování smykového napětí, což má za následek nižší tlak při zpracování. LDPE obecně vykazuje nižší konečnou pevnost, odolnost proti nárazu a pevnost v roztržení ve směru příčném. Jeho typická hustota se pohybuje mezi 0,92 a 0,94 g/cm³. Je to homopolymer a jeho hustota nebo krystalinita je řízena množstvím krátkých postranních větví vznikajících v procesu polymerace volnými radikály. [4,6,7,8]

1. Lineární nízkohustotní polyethylen

LLDPE, jak jeho název napovídá, se skládá převážně jen z lineárních řetězců s žádnými nebo jen malými postranními větvemi. Vyrábí se procesem s koordinačními katalyzátory. Původní katalyzátory vyvinuli Ziegler a Natta, typy vyráběné touto technologií jsou podle nich pojmenovány.

Hustota LLDPE se obvykle pohybuje mezi 0,885 až 0,94 g/cm³ a je řízena přidáváním komonomeru během polymerace. Komerčně se používají tři komonomery: buten, hexen, okten. Polydisperzní index LLDPE se pohybuje v rozmezí od 2 do 30. [4,6,7,8]

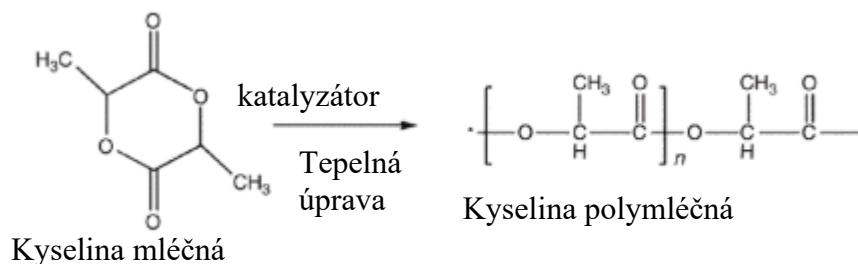
2. Vysokohustotní polyethylen

HDPE je lineární polyethylen s žádným nebo velmi nízkým obsahem komonomeru a jeho hustota se pohybuje v rozmezí 0,95-0,97 g/cm³. Vyrábí se pomocí koordinačních katalyzátorů podobně jako u procesu LLDPE. K výrobě HDPE se používají Ziegler-Natta katalyzátory. Tyto katalyzátory jsou na bázi chromu metalocenové katalyzátory. Vysokohustotní polyethylen má největší úroveň krystalinity ze všech polyethylenů, obvykle má kolem 50–60 %. Vysoká krystalinita má své výhody i své kompromisy ve srovnání LDPE a LLDPE. Mezi výhody patří vyšší tuhost a teplota tání, vysoká bariérová vlastnost proti vlhkosti, vynikající odolnost proti tukům a olejům. Mezi nevýhody nižší čírost, vyšší zákal. [4,6,7,8]

2.2 Kyselina polymléčná (PLA)

Kyselina polymléčná je syntetický biologický rozložitelný polyester, který se vyrábí z monomeru kyseliny mléčné, odvozený z přírodních zdrojů, tento proces můžeme vidět na obrázku 5. Kyselina mléčná se vyrábí z bakteriální fermentací sacharidů, jako je kukuřice, cukrová třtina, brambory a podobně. PLA s vysokou molekulovou hmotností může být syntetizována třemi způsoby:

- přímou kondenzací,
- azeotropickou dehydrativní kondenzací,
- polymerací kruhového laktidu.



Obrázek 5 Syntéza PLA [10]

PLA je známý jeho biokompatibilitou a biologickou rozložitelností. Kyselina polymléčná je také známa jako termoplastický polymer, který lze snadno zpracovávat pomocí stávajících zařízení a technik pro zpracování polymerů.

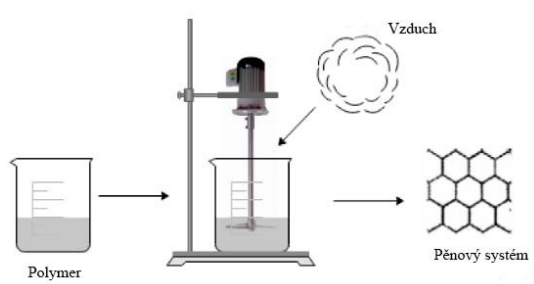
Vlastnosti PLA se mohou výrazně lišit díky přítomnosti methylové skupiny na alfa uhlíku. Homopolymer l-laktidu (PLLA) je polokrystalický polymer s typickou teplotou tání (T_m) 160–180 °C a s teplotou skelného přechodu (T_g) 55-65°C. Má vysokou pevnost v tahu a modul pružnosti, ale malé prodloužení, které jej činí vhodným polymerem pro aplikace, jako jsou ortopedické fixace a stehy. [9, 10,11]

3 PŘÍPRAVA PĚN

Existují tři způsoby, pomocí kterých lze získat z polymerního granulátu pěnovou strukturu. Jedná se o metody mechanické, fyzikální a chemické, které jsou detailně popsány v následujících kapitolách. [11]

3.1 Mechanické lehčení

Tato metoda lehčení je podobná šlehání smetany, kam se vmíchává vzduch (*Obrázek 6*). Vzduch se stává pěnicím plynem. Mechanické lehčení se používá u vinylových plastisolů na výrobu vinylových podlahových krytin. Tato metoda lehčení má využití u termoplastu omezené. [11, 13]



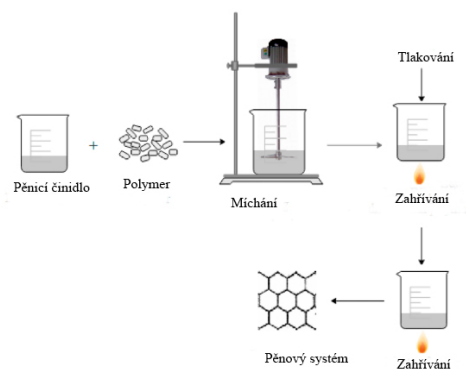
Obrázek 6 mechanické lehčení [12]

3.2 Fyzikální lehčení

U techniky fyzikálního pění (*Obrázek 7*) se k termoplastu přidává pěnicí činidlo, které se během tavení odpařuje, nebo expanduje. Toto činidlo může být kapalné nebo plynné. Pro podporu nukleace buněk, nebo kontrolu velikosti a počtu vytvořených buněk se může použít nukleační činidlo. Chemická struktura a složení polymeru určují podmínky pěnicího procesu, rychlost uvolňování plynu, tlak plynu, jeho zadržení v buňkách a absorpce/uvolňování tepla v důsledku degradace/aktivace pěnicího činidla. Pěnicí činidla jsou stlačené plyny, nebo těkavé kapaliny. [11, 13]

Mezi výhody fyzikálního lehčení můžeme zařadit nízké náklady na fyzikální činidlo, zejména u dusíku a oxidu uhličitého, metoda je ekologická a po napěnění nezůstávají žádné zbytky, které by měly vliv na vlastnosti pěny. [11]

Mezi nevýhody patří potřeba speciálního vstřikovacího stroje s pomocným vybavením a vysoké technické požadavky. [11]



Obrázek 7 Schéma fyzikálního lehčení [12]

3.2.1 Plyné fyzikální pěnicí činidla

Stlačené plyny, obvykle dusík, se za vysokého tlaku injektují do polymerní taveniny. Po uvolnění tlaku se plyn stává méně rozpustným v polymerní tavenině a expanduje, čímž se vytváří buňky. Dusík je inertní, nehořlavý a lze jej použít při jakékoliv teplotě zpracování. Produkuje hrubší pěny než dusík vzniklý z organických chemických pěnicích činidel. Pro jemnější buněčnou strukturu lze použít nukleační činidla. Mezi další plyny používané jako fyzikální pěnicí činidla kromě dusíku patří vodík, helium, vzduch, směs helia a vzduchu a CO_2 . [12,13,14]

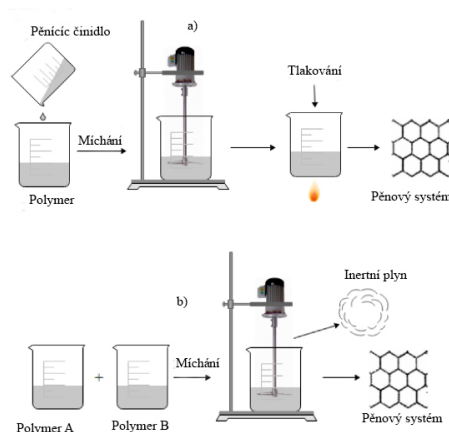
3.2.2 Kapalná fyzikální pěnicí činidla

Kapalná fyzikální pěnicí činidla jsou těkavá a při zahřátí na zpracovatelské teploty polymeru se mění z kapalně na plyné skupenství. Některá z nich jsou alifatické uhlovodíky, které mohou představovat bezpečnostní riziko kvůli své hořlavosti. Jiné, krátkořetězcové chlorované a fluorované uhlovodíky, byly ve většině formulací nahrazeny kvůli svému vlivu na redukci stratosférického ozonu hydrogenovanými CFC (HCFC).

Klíčovými proměnlivými jsou teplota, typ pěnicího činidla a rychlost chlazení expandované struktury, aby byla stabilizovaná její rozměrová stálost. Povaha pěnicího činidla a jeho koncentrace v polymeru hrají zásadní roli v celém procesu. [12,13,14]

3.3 Chemické lehčení

V této metodě je proces tvorby pěny řízen chemickými reakcemi. Tento proces může zahrnovat rychlost tvorby polymeru, tedy přeměny viskózní kapaliny na zesíťovanou (trojrozměrnou) strukturu, nebo expanzi částečně zesíťované polymerní taveniny (například polyolefinové pěny), či expanzi termoplastické taveniny s následným ochlazením. Chemie také určuje rychlost aktivace pěnicího činidla, a to buď poklesem jeho rozpustnosti v roztoku monomeru během probíhající reakce, nebo termálním rozkladem. [11,12]



Obrázek 8 Schéma chemického lehčení [11]

a) lehčení pomocí pěnicího činidla, b) lehčení mezi dvěma polymery

Pěnicí činidla se používají ke snížení hustoty polymeru, obvykle o 40-60 %, při koncentraci 0,5-20,5 hmot.% vzhledem k množství polymeru. Vlastnosti pěnicího činidla určují množství generovaného plynu, rychlost generace plynu, pěnicí tlak a čisté množství plynu zadržovaného v buňkách. Chemická pěnicí činidla lze rozdělit na organická a anorganická, přičemž jejich rozklad může být endotermický nebo exotermický. Často pěnicí činidla vyžadují aktivátory, jako jsou alkoholy, glykoly, antioxidanty a kovové soli, které snižují jejich teplotu tání. [11,12]

Do výhod u této metody zařazujeme, že vstřikování pěn můžeme provádět na běžných vstřikovacích strojích. Chemické pěnicí činidlo se může termicky rozkládat v určitém teplotním rozsahu a uvolňovat jeden nebo více plynů, což jej činí vhodným pro polymerní taveniny v daném teplotním rozsahu.

Nevýhodou chemického lehčení je, že se vyžaduje vysoká přesnost výroby forem, která zvyšuje náklady na formy [11,12,14]

3.3.1 Endotermický rozklad

Rozklad endotermických pěnicích činidel vyžaduje neustálý přísun tepelné energie. Tato energie je odebírána také z taveniny. Přesná regulace teploty během procesu může cíleně ovlivnit rozklad. Pro optimální výtěžnost plynu musí být pěnicí činidlo nebo směs polymeru a pěnicího činidla:

- Na krátkou dobu zahřáta výrazně nad teplotou rozkladu.
- Po delší dobu zahřáta mírně nad teplotu rozkladu.

Mezi nejběžnější endotermická činidla patří uhličitán sodný, deriváty kyseliny citronové, nebo směs obou látek. [11,12,14]

3.3.2 Exotermický rozklad

Exotermická pěnicí činidla uvolňují energii ve formě tepla během své rozkladné reakce, což může vyžadovat dodatečné chlazení systému. Jakmile rozkladná reakce začne, nelze ji již dále řídit běžným zpracovatelským postupem. Mezi nejběžnější exotermický činidla jsou Azodikarbonamidy, Toluen-sulfonylhydrazid, Tetrazoly, Oxybis (beenzensulfonhydrazid). [11,12,14]

3.3.3 Anorganické pěnicí činidla

Zahrnují hydrogenuhličitan sodný (jedlá soda), borohydrid sodný, polykarboxysolé kyseliny a kyselina citronovou. Při termálním rozkladu tyto látky uvolňují primárně oxid uhličitý. Hydrogenuhličitan sodný je nejpoužívanější pěnicí činidlo z této skupiny. Rozkládá se v širokém teplotním rozsahu. [11,12,14]

3.3.4 Organická pěnicí činidla

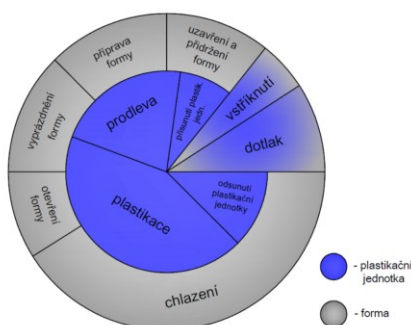
Uvolňují plyn v úzce definovaném teplotním rozmezí. Produkují směs plynů složenou převážně z dusíku. [11,12,14]

4 TECHNOLOGIE

Lehčené struktury jsou připravovány kontinuálními a cyklickými procesy, běžně používanými při výrobě plastových dílů. [15]

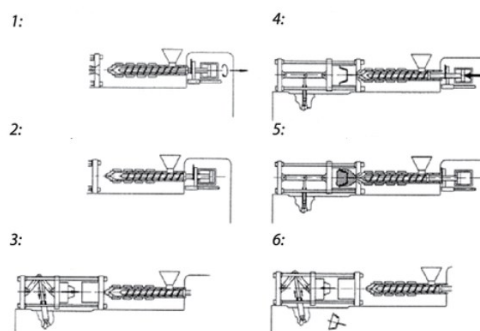
4.1 Vstřikování

Vstřikování je cyklický proces, při kterém se polymerní granule roztaví a následně vstříknou do dutiny formy. U většiny plastů dochází ke ztuhnutí taveniny v dutině formy, což umožňuje vyhození výrobku z formy. Proces představuje cyklus, který můžeme vidět na *Obrázku 9*. [15,16]



Obrázek 9 Vstřikovací cyklus [15]

V prvním kroku jsou polymerní granule přiváděny do šneku pomocí násypky. Otáčivý pohyb šneku posouvá do předu granule. Při pohybu šneku vzniká tření, kde společně s vyhříváním válce, změnou průměru jádra šneku a zvýšeného tlaku dochází k tavení granulátu. Dokud je tryska na straně válce blíže formy uzavřená, tak se tavenina hromadí před špičkou šneku a tlačí zpět. Proces tavení se zlepšuje tím, že třecí koeficient má vysokou hodnotu. Za tímto účelem se ve vstřikovacím válci vytváří zpětný hydraulický tlak, který zpomaluje zpětný pohyb šneku a tím se zajišťuje delší doba dávkování taveniny. Objem taveniny potřebný pro proces vstřikování se dávkuje během plastifikace v předkomoře šneku. [15, 16, 17, 18]



Obrázek 10 Proces vstřikování [17]

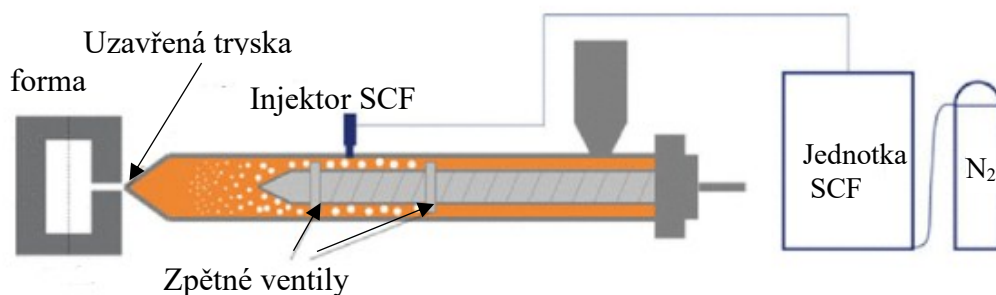
1- Začátek plastifikace, 2- konec plastifikace, 3- uzavření formy, 4- vstřikování,
5- dotlak, chlazení, 6- odformování výrobku

4.1.1 Vstřikování strukturních pěn

Výrobky, které se vyrábějí ze strukturních pěn mají kompaktní povrchovou vrstvu a napěněné jádro. Tyto plasty jsou napěněny nadouvadly přidávkou 0,7 až 3 % chemického nadouvadla nebo fyzikálních nadouadel. Objemem přidaného nadouvadla lze získat výrobek buď lehký nebo těžký. Strukturní pěnu lze vstřikovat na běžných vstřikovacích strojích s dostatečnou vstřikovací rychlostí buď nízkotlakým nebo vysokotlakým způsobem (*Obrázek 11*).

Proces plnění u nízkotlakého vstřikování je analogií krátkého vstřiku a plný objem výrobku se vytváří v důsledku expanze plynu (tlak plynu je v rozmezí 2,1-3,4 MPa). Chlazení strukturních pěn bývá na rozdíl od vstřikování termoplastů mnohem delší, protože se špatně přenáší teplo.

U vysokotlakého vstřikování je proces plnění s plným vstřikem. Tlak plynu u této metody je vyšší než 3,4 MPa. Nevýhodou této metody jsou vzhledové vady na povrchu a dlouhý čas pro vytékání zbytku nadouvadla (24 a 48 hodin) před zbytkem doplňovacích operací. [7]



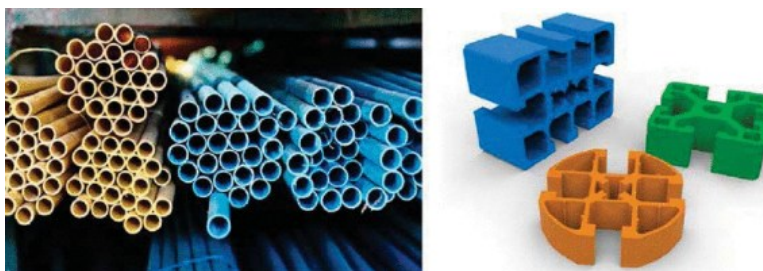
Obrázek 11 Vstřikovací zařízení strukturních pěn [7]

4.2 Vytlačování

Vytlačování je kontinuální technologický proces, během kterého je polymerní tavenina vytlačována přes vytlačovací hlavu do volného prostoru. Tato technologie slouží k výrobě konečných tvarů nebo polotovárů.

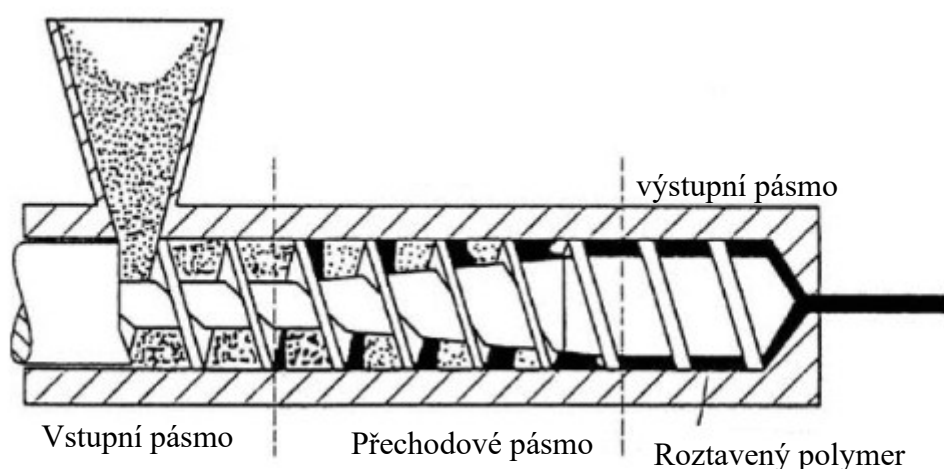
Podle tvaru konečného výrobku nebo polotovaru můžeme technologii vytlačování rozdělit do tří skupin:

- Vytlačování trubek a profilů
- Vytlačování folií
- Ostatní vytlačování (oplášťování vodičů, výroba vláken, apod) [17, 18, 19]



Obrázek 12 Aplikace vytlačování [18]

Vytlačování spočívá v přepravě tuhého polymerního granulátu v extrudéru pomocí šneku, tavení tohoto granulátu, homogenizace taveniny a protlačování taveniny tryskou ve tvaru výrobku.



Obrázek 13 Schéma vytlačování [18]

Šnek plastifikačního vytlačování je rozdělen do tří geometricky odlišných pásem (Obrázek 13), kde jeho funkce lze popsat takto:

- Vstupní pásmo: slouží k transportu a předehřevu polymerního granulátu.
- Přechodové pásmo: slouží ke kompresi a plastifikaci taveniny.
- Výstupní pásmo: slouží k přepravě taveniny a jejímu míchání a dopravě směrem k trysce.

Avšak, funkce jednotlivých pásem nejsou omezeny pouze na danou oblast. Tyto procesy mohou probíhat i v sousedních pásmech. [17, 18, 19]

4.2.1 Vytlačování strukturních pěn

Proces vytlačování pěn je považován za nejmodernější pro pěnové profily, trubky, fólie a desky. Také je uzpůsobena pro širokou škálu polymerů jako jsou PE, PS, PET, PVC. Vytlačovací zařízení můžeme rozdělit na dvě kategorie:

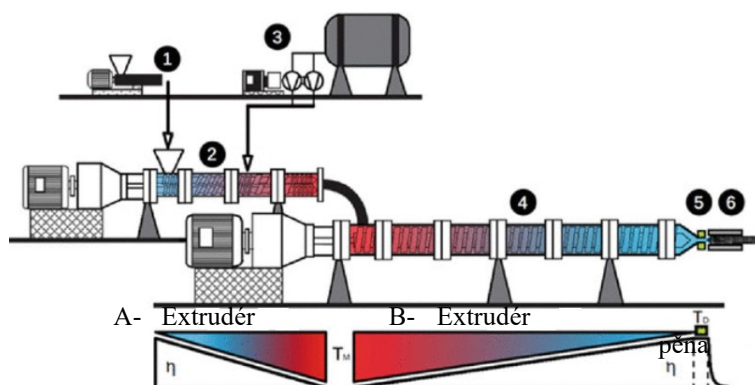
- Jednoduchý extrudér

- Tandemové vytlačovací zařízení

Jednoduchý extrudér má kompaktní uspořádání a je převážně používán na výzkum a pro výrobu s nižším průtokem, protože ekonomický průtok je omezen na 300 kg/h.

Tandemové vytlačovací zařízení je stále více využíváno v průmyslu, jelikož proces vytlačování dělá na dva kroky, které usnadňují schopnost kontroly procesu. Typické sestavení je s dvěma extrudéry v uspořádání v řadě z KO – rotujícího dvoušnekového tavení a jednosměrného šnekového chladicího B-extrudéru. Nicméně toto sestavení lze kombinovat i jiným způsobem.

Na začátku procesu máme granule a možné přísady, které jsou zaváděny do A-extrudéru. Rotující šneky přepravují materiál do zahřáté válcové komory, kde vznikají smykové síly, které generují dodatečné teplo. To vede k plastifikaci materiálu. Dvoušnekové uspořádání umožňuje správnou dopravu a plastifikaci s homogenizací polymeru, přísad a činidel. Jakmile je tavenina plastifikována a v komoře je vytvořen určitý tlak, je možné injekčně přidat fyzikální činidla, jako je například oxid uhličitý, nebo Penten. Následně je tavenina dopravena do B-extrudéru, kde probíhá další homogenizace a reakce, aby se doladila morfologie pěny. Doba pobytu taveniny v jednotlivých extrudérech závisí na rozměrech válce, rychlosti šneku, poměru šneku L/D (Obrázek 14). [7,19]



Obrázek 14 Schéma principu tandemového vytlačování pěn [7]

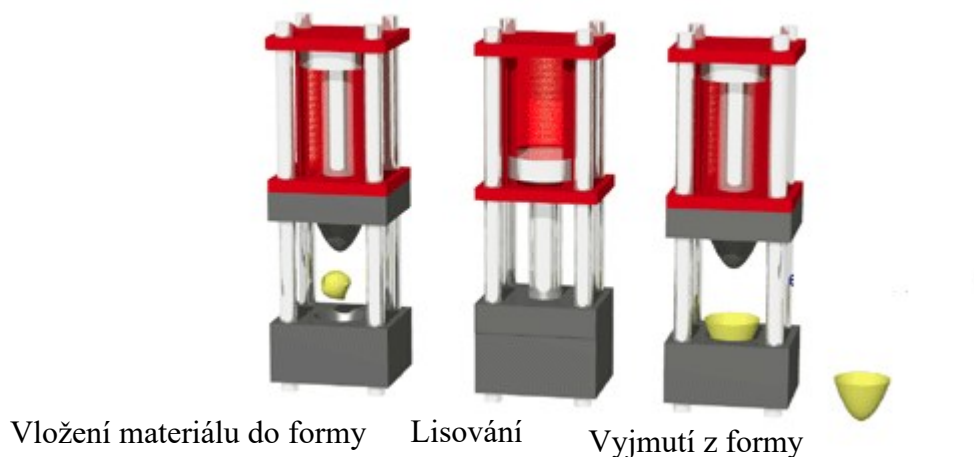
- 1 – Dávkovací zařízení pro granule a pevné přísady, 2- dvoušnekový extrudér, 3- plynné nebo kapalné přísady, 4- jednosměrný B-extrudér, 5- forma, 6- downstream jednotka

4.3 Lisování

Lisování je proces tváření polymeru ve vyhřívané formě, kdy na materiál po definovanou dobu působí tlak pro dosažení požadovaného tvaru výrobku.

Jednoduché lisování, kde lisovací tlak ovlivňuje kvalitu povrchu vylisku. Smrštění ovlivňuje druh hmoty, geometrie výrobku a závisí na teplotě předehřevu, teplotě lisování.

Postup lisování (*Obrázek 15*) je takový, že napřed se forma naplní materiálem o přesně stanoveném objemu. Při styku materiálu s formou dochází k plastifikaci a tlakem tvárníku se dokončí plastifikace a také k zaplnění tvarové dutiny formy. Následuje odlehčení formy, které je důležité z hlediska odvzdušnění formy a dokončení lisování. V materiálu, v důsledku dodávání tepla, proběhne vytvrzení. Kde toto je nejdelší část lisovacího cyklu. [20, 21,22,23]



Obrázek 15 Princip lisování jednoduchým způsobem [20]

5 REOLOGIKÉ VLASTNOSTI

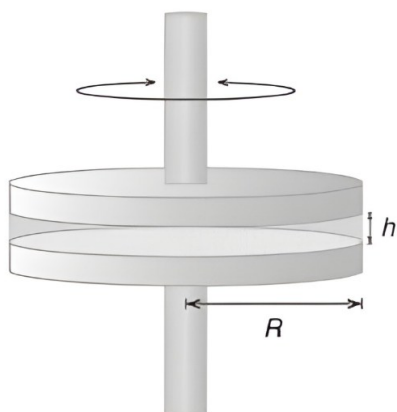
Znalost tokových vlastností polymerní taveniny je důležitá z pohledu jejího zpracování v průběhu některé ze zpracovatelských technologií. Reologické vlastnosti lze charakterizovat pomocí rotačního anebo kapilární reometru. [24,25]

5.1 Rotační reologie

Nejčastěji používanými přístroji pro reologická měření jsou rotační reometry. Mezi hlavní využívané měřicí geometrie rotačních reometrů patří: [24,25,27,37]

Měřicí geometrie typu deska-deska

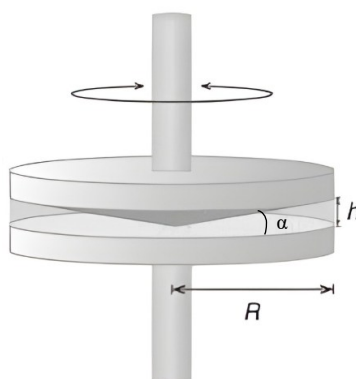
Nejčastěji využívaná měřicí geometrie typu deska-deska se vyznačuje dvěma rovnoběžnými deskami o poloměru R a vzdálenosti h mezi nimi (Obrázek 16). V tomto uspořádání závisí gradient rychlosti na poloměru desky a výšce mezery. Smykovou rychlost lze měnit změnou vzdálenosti mezi deskami nebo úhlové rychlosti. Smykové napětí se počítá z točivého momentu. [24,25,27,37]



Obrázek 16 Měřicí geometrie typu deska-deska [27]

Měřicí geometrie typu kužel-deska

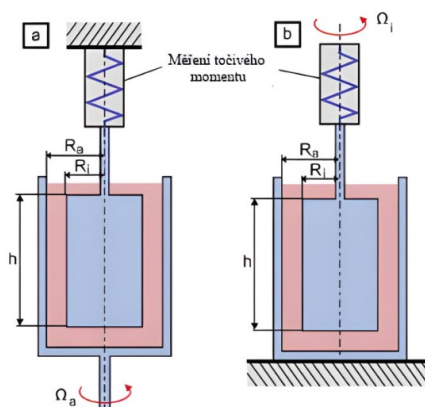
Měřicí geometrie typu kužel-deska se skládá z rovné desky a tupého kužele uspořádaných souose (Obrázek 17). Geometrie mezery je určena poloměrem R a úhlem α mezi deskou a kuželem. Protože úhel je velmi malý a obvodová rychlost je úměrná poloměru, smyková rychlost závisí pouze na úhlové rychlosti a úhlu. Díky své specifické geometrii se reometr vyznačuje homogenním rozložením smykové rychlosti v celé smykové mezeře. [24,25,27,37]



Obrázek 17 Měřicí geometrie typu kužel-deska [27]

Měřicí geometrie typu válec-válec

Měřicí geometrie typu válec-válec se skládá z vnějšího většího válce a vnitřního válce, které jsou souosé. Smykové zatížení lze generovat otáčením buď vnějším válcem (Obrázek 18 a), nebo vnitřního válce (Obrázek 18 b), zatímco druhý válec zůstává nehybný. [24,25,27,37]



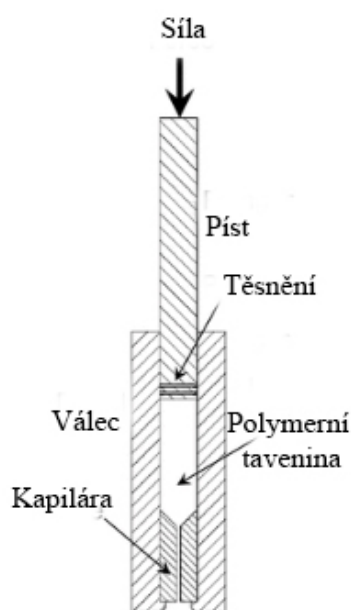
Obrázek 18 Měřicí geometrie typu válec-válec [38]

5.2 Kapilární reologie

Kapilární reometr (Obrázek 19) je konstrukčně jednoduchý přístroj, který se používá k měření viskozity polymerních tavenin na základě změny tlaku v závislosti na rychlosti pístu. [24, 24, 26, 28]

Materiál, který má být charakterizován je zahříván ve válcovém zásobníku a je vytlačován pístem, skrze kapiláru umístěnou na dně válce. Kapilára má délku L a průměr D . Pohyb pístu danou rychlostí vyvolává objemový průtok polymeru kapilárou. Tlakový rozdíl se měří na dně zásobníku. Výsledky se často vyjadřují ve formě závislosti smykového napětí či viskozity v závislosti na rychlosti smykové deformace. [22, 24, 26, 28]

Pokud je smyková viskozita měřena pouze pomocí jedné kapiláry, pak její výsledná hodnota není skutečná, avšak zdánlivá a slouží tak pouze k porovnání materiálů mezi sebou. Pokud je vyžadována skutečná hodnota smykové viskozity, pak je zapotřebí provést měření na kapilárním reometru pomocí alespoň dvou kapilár za účelem provedení potřebných korekcí, které jsou popsány v následující části. [22, 24, 26, 28]



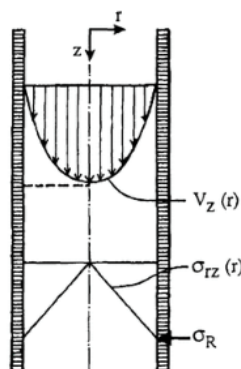
Obrázek 19 Schéma Kapilárního – pístového reometru [25]

5.2.1 Rabinowitschova korekce

Tato korekce je určena na nenewtonské chování látek a týká se rychlosti smykové deformace.

Měření viskozity pomocí kapilárních reometrů je založeno na vztazích mezi poklesem tlaku napříč kapilárou a průtokovou rychlostí (Obrázek 20). Toto není přímé měření, a proto je nejprve nutné zvolit konstitutivní vztah pro danou kapalinu (např. newtonské chování, mocninný zákon, Ellisův model). U newtonských kapalin lze viskozitu zjistit snadno pomocí vztahu Hagen-Poiseulle. U nenewtonovských kapalin je komplikace s volbou vhodného modelu viskozity.

Předpoklady Rabinowitschovi korekce: laminární proudění ($Re < 2000$), stacionární stav, plně rozvinuté jednosměrné proudění nestačitelné kapaliny, bez uklouznutí na stěnách kapiláry, viskozita je jednoznačnou funkcí smykové rychlosti nebo smykového napětí. [24, 25, 26, 27]

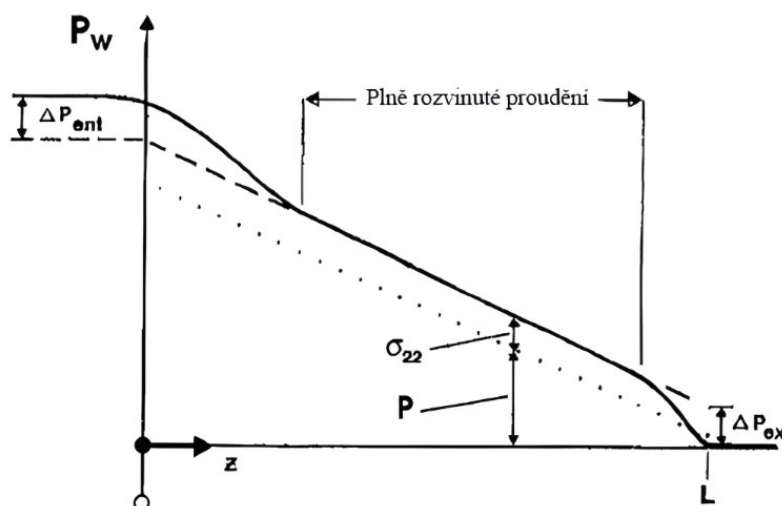


Obrázek 20 Proudění v kapiláře [25]

5.2.2 Bagley korekce

Bagley korekce se používá na koncové jevy v kapiláře, kde se týká tlaku, ze kterého se počítá smykové napětí na stěně. Pro použití této korekce musí být splněna podmínka, že musí být použity kapiláry o stejném průměru, ale různém poměru L/D . Pokud není použita velmi dlouhá kapilára ($L/D > 100$), mohou konečné efekty (nadměrný pokles tlaku při vstupu a výstupu) výrazně ovlivnit přesnost stanovené viskozity. Empirická metoda navržená Bagleym umožňuje korekci těchto efektů a může být rovněž použita k odhadu elasticity kapaliny.

Princip Bagleyho korekce spočívá v určení nadměrného poklesu tlaku při vstupu a výstupu kapiláry. Typický tlakový profil je znázorněn na *Obrázek 21*, kde je vidět příspěvek normálového napětí σ_{22} , které se vyvíjí v polymerních kapalinách při smyku na stěnách kapiláry. [24, 25, 26, 27]



Obrázek 21 Tlakový profil podél osy kapiláry [28]

Korekce smykového napětí na stěně se provádí ze vztahu:

$$\sigma_R = \frac{(\Delta P) \cdot R}{2 \cdot (L + e_0 \cdot R)} \quad (1)$$

, kde:

σ_R – smykové napětí na stěně kapiláry [MPa]

ΔP – celkový pokles tlaku v kapiláře [MPa]

R – poloměr kapiláry [mm]

L – délka kapiláry [mm]

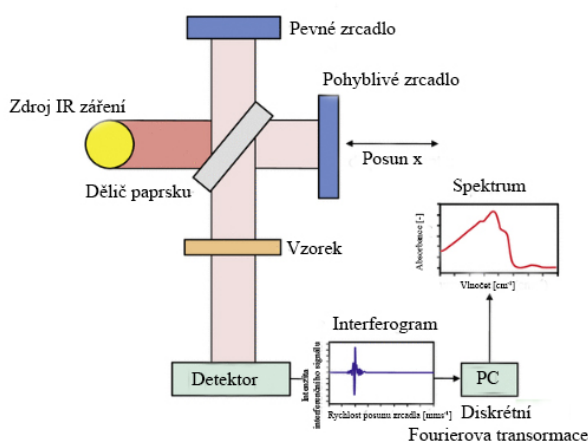
e_0 – korekční faktor koncového efektu [-] [31]

5.3 FTIR spektroskopie

Fourierova transformovaná infračervená spektroskopie (FTIR) její hlavní oblastí využití je identifikace polymerů. IR spektroskopie je absorpční metoda, která pracuje s vlnovými délkami v rozsahu 780 nm – 1 mm. Nejdůležitější oblasti pro analýzu polymeru je střední infračervené spektrum s vlnovými délkami mezi 2,5-25 μm . Spektrální rozsah se uvádí jako vlnčet v jednotce cm^{-1} , kde střední IR odpovídá rozsahu 4000-400 cm^{-1} .

Absorpční pásy, které se zobrazují v IR spektru, souvisejí s kmitáním specifických vazeb uvnitř molekul polymeru nebo celých funkčních skupin. Tyto pásy se identifikují pomocí databází IR spekter, proto je FTIR spektroskopie vhodnou metodou pro analýzu polymerů a jejich příměsí.

Kvalitativní i kvantitativní analýzy pomocí FTIR spektroskopie vycházejí vlnově závislé interakce mezi IR zářením a molekulami nebo jejich skupin. [30, 31, 37]



Obrázek 22 Princip FTIR spektroskopie [37]

Vzorky, které jsou příliš silné nebo nevhodné pro přenosové měření, se měří pomocí reflexní spektroskopie nebo ATR. Při ATR měření je do povrchu vzorku lehce přitlačen IR neutrální, opticky vysoce refraktivní, krystalický materiál například diamant. Při vhodných uhlech k totální reflexi na hraniční vrstvě. Tato metoda umožňuje charakterizaci povrchu bez náročných příprav. [30, 31, 37]

6 TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ LEHČENÝCH STRUKTUR

Polymerní pěny poskytují unikátní fyzikální, mechanické a tepelné vlastnosti, které jsou dány polymerní matricí, buněčnou strukturou a jejich hustotou. Tyto vlastnosti lze testovat různými metodami a některé z nich jsou detailně popsány v následujících kapitolách.

6.1 Hustota

Měření hustoty je zavedená metoda pro hodnocení stárnutí polymeru. Jelikož oxidace dominuje degradačnímu procesu polymerů vystavených vzduchu, oxidační produkty obvykle vedou ke zvýšení hustoty, i když u některých materiálu může hustota klesat. Měření hustoty lze měřit dvěma způsoby, které jsou popsány v další kapitole. [31]

6.1.1 Hustotní gradientní sloupec

Hustotní gradientový sloupec je metoda pro měření hustoty vhodná pro velmi malé vzorky například pro odřezky izolačních a plastových materiálu. Sloupec se skládá z graduované skleněné trubice o délce zhruba 1 m, která je zavěšena vertikálně ve vodní lázni udržované na konstantní teplotě obvykle 20-25 °C.

Sloupec je naplněn dvěma mísitelnými kapalinami o různých hustotách, tak aby vznikl lineární gradient hustoty, který se snižuje odspodu nahoru. Sloupec se kalibruje pomocí speciálně připravených skleněných kuliček, jejichž rovnovážná poloha určuje hustotu v daném bodě. Vzorky se následně vloží do sloupce a nechá se jim dosáhnou rovnovážné polohy, ze které lze změřit jejich hustotu. Přesnost metody dosahuje 0,0005 g/cm³. [32, 33, 34]

6.1.2 Archimedova metoda

Archimedova metoda se obvykle provádí na vzorcích o hmotnosti v desítkách miligramů. Vzorek se nejprve zváží na vzduchu, poté se zváží v kapalině o známe hustotě. Následně hustotu zjistíme z rovnice:

$$\rho = \frac{W_{vz}}{W_{vz} - W_{kap}} \cdot \rho_{kap} \quad (2)$$

, kde:

ρ – hustota vzorku [g/cm³]

ρ_{kap} – hustota kapaliny [g/cm³]

W_{vz} – hmotnost vzorku na vzduchu [g]

W_{kap} – hmotnost vzorku ve vodě [g] [31, 32]

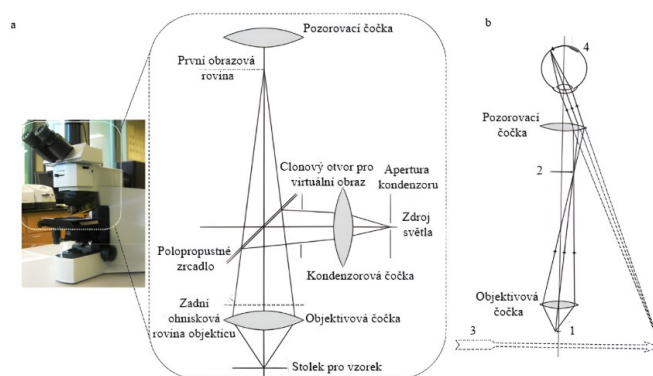
6.2 Struktura a velikost pórů

Struktura lehčených vzorků je charakterizována v makro měřítku pomocí optického mikroskopu v mikro měřítku pomocí skenovací elektronové mikroskopové analýzy. [34]

6.2.1 Optický mikroskop

Optický nebo světelný mikroskop je univerzální přístroj, který se používá v metalografii ke zkoumání, hodnocení a kvantifikaci mikrostruktury materiálů. Optické mikroskopy pracují buď v přenosovém, nebo odrazovém režimu, přičemž obrazy mají typické rozlišení přibližně 250 nm. Režim odrazu je obzvláště vhodný pro zkoumání neprůhledných vzorků materiálu.

Moderní optický mikroskop se skládá ze tří hlavních komponent: osvětlovací systém, zobrazovací systém a stolek pro vzorek, který drží a pohybuje se vzorkem ve směrech x, y, z, přičemž mechanická stabilita odpovídá hloubce ostrosti přístroje. Zobrazovací systém má dvě čočky: objektiv s velmi krátkou ohniskovou vzdáleností a okulár (nebo oční čočka) s delší ohniskovou vzdáleností. [34]

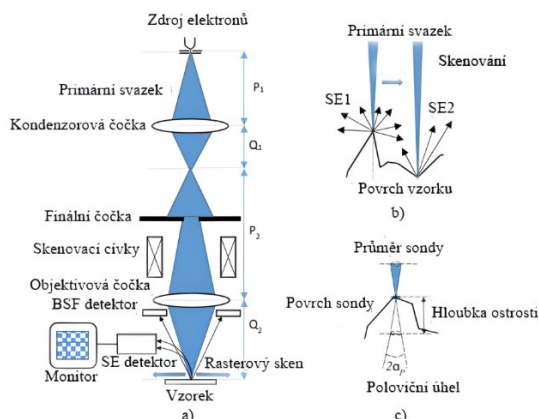


Obrázek 23 Hlavní části optického mikroskopu [35]

a – optický mikroskop a jeho hlavní části, b – schéma dráhy paprsku, 1- světlo dopadá na vzorek a odráží se, 2- první zvětšený obraz je vytvořen v první obrazové rovině, 3- obraz je zvětšen okulárem, který vytvoří virtuální obraz, 4- konečný obraz, který je vytvořen na sítnici oka pozorovatele

6.2.2 Skenovací elektronová metoda

Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) umožňuje pozorování při mnohem vyšším zvětšení než optická mikroskopie. SEM zobrazuje povrchovou strukturu detekcí sekundárních elektronů, které jsou uvolňovány ze vzorku po ozáření elektronovým svazkem (Obrázek 24). [36]



Obrázek 24 Schematický náčrt funkce SEM [35]

- a) elektronová optika primárního svazku elektronů, b) emise sekundárních elektronů z povrchu vzorku, c) hloubka ostrosti sondy

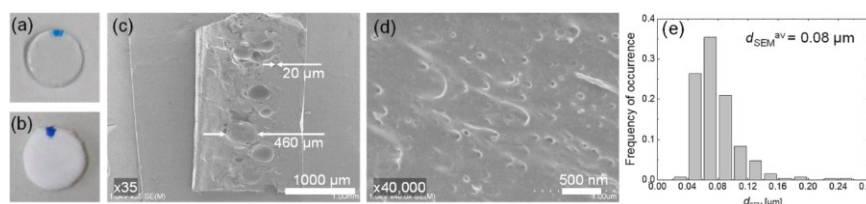
Intenzita sekundárních elektronů závisí na úhlu dopadu svazku na povrch vzorku. Díky tomuhle lze detekovat i nepatrné nerovnosti povrchu na základě inzerity těchto elektronů. Postupným posunováním (skenováním) elektronového svazku po povrchu SEM vytváří 3D obraz povrchu s velkou hloubkou ostrosti a vysokým zvětšením. [36]

Vyhodnocování výsledku pomocí SEM

Pórovitost založená na SEM analýze, lze určit z distribuce velikosti z následující rovnice:

$$\varphi_{SEM} = \left(\frac{n}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{3}{4} \pi \cdot \left(\frac{d_{SEM}^{av}}{2}\right)^3 \cdot 100 \quad (3)$$

, kde n je celkový počet buněk, A je celková plocha mikrosnímků SEM, d_{SEM}^{av} je směrodatná odchylka. [39]



Obrázek 25 SEM obraz [39]

- a – Disk PMMA před napětím, b – po napětí, c – SEM mikrofotografie nízké zvětšení, d – velké zvětšení, e – distribuce buněk

6.3 Tepelné vlastnosti

V současném testování polymerů se metody pro určování jejich tepelných vlastností souhrnně označují jako metody tepelné analýzy, kterými jsou Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC),

Termogravimetrická analýza (TGA), Termomechanická analýzy (TMA) a Dynamická mechanická analýza (DMA). Tyto metody umožňují měřit fyzikální a chemické vlastnosti polymery jako funkce času a teploty. K tomuto jsou vzorky vystaveny řízenému teplotnímu programu ve speciálních pecích v definované atmosféře (např. vzduch, inertní plyn). Záznam zahřívacích a chladících křivek umožňuje stanovení teploty skelného přechodu, teploty tání, entalpii tání, a také vymezit sekundární relaxace, tepelná degradace a stupeň krystalinity. Pomocí metod tepelné analýzy lze sledovat:

- Strukturální změny (skelný přechod, zesíťování, fázové přeměny atd.) - DSC, TGA, TMA,
- Mechanické vlastností (elastické chování, tlumení atd.) - DMA
- Tepelné vlastnosti (roztavnost/smrštění, měrná tepelná kapacita, atd.) - DSC, TMA
- Chemická reakce (rozklad a tepelná stabilita, chemická reakce v roztocích atd.) - TGA, DSC, [37]

6.3.1 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost vyjadřuje množství tepla, které projde pevnou látkou při teplotním gradientu 1 K za určitý časový úsek. Je tedy mírou přenosu energie v materiálu, lze ji popsat jako kvantizovaný přenosový proces, který probíhá rychlostí zvuku. Tepelnou vodivost lze vypočítat ze vztahu podle Debye:

$$\lambda = c_p \cdot \rho \cdot c \cdot l \text{ [W/m}\cdot\text{K]} \quad (4)$$

Kde:

C_p – měrná tepelná kapacita [J/kg·K],

ρ – hustota [kg/m³],

c – rychlost zvuku v materiálu [m/s],

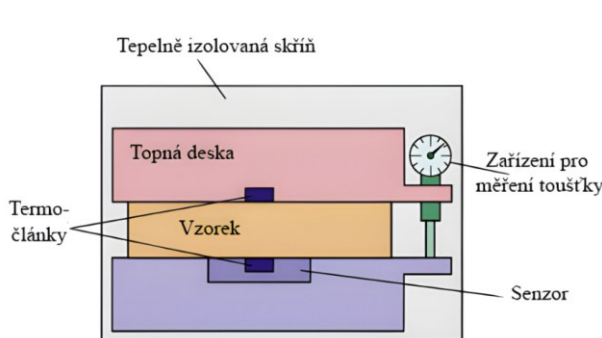
l – vzdálenost mezi molekulami [m].

Tepelnou vodivost lze měřit dvěma způsoby:

1) Desková metoda

Vzorek je umístěn mezi dvě dvojice desek (*Obrázek 26*), kde jedna je zahřívána, druhá chlazená, čímž dochází k teplotnímu gradientu. Aby se zabránilo bočním ztrátám tepla, je topná deska obklopena tepelným prstencem. To zajišťuje, že elektricky generované teplo za jednotku času prochází pouze testovací deskou a nemůže se rozptýlovat. Teplotní rozdíl je měřen pomocí termočlánků, které se nacházejí mezi topnými a chladícími deskami.

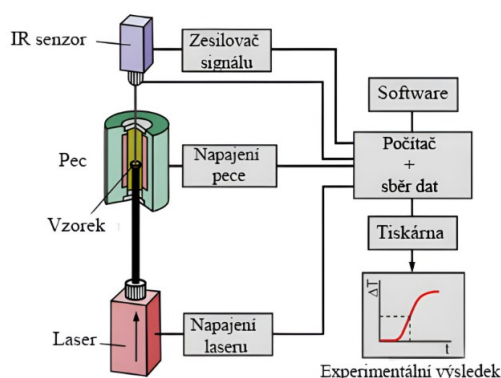
Velmi dobrý tepelný kontakt mezi jednotlivými deskami je klíčový pro bezproblémový přenos tepla. Toto lze dosáhnout buď pevným sevřením nebo testovacím uspořádáním.



Obrázek 26 Zařízení pro deskovou metodu

2) Laserová metoda (pulzní)

Laserová metoda, tedy nestacionární metoda, pracuje rychleji, i když je méně přesná. Jedna strana vzorku je vystavena tepelnému impulzu nebo periodické změně teploty, zatímco teplota je měřena na opačné straně vzorku pomocí IR senzoru. Struktura tohoto zařízení je zobrazeno na Obrázku 27.



Obrázek 27 Princip laserové metody [44]

Tepelná difuzita se vypočítá na základě změny teploty v čase, následně je vypočítaná tepelná vodivost ze vztahu:

$$\lambda = a \cdot \rho \cdot c_p \text{ [W/m}\cdot\text{K]} \quad (5)$$

Kde:

a – tepelná difuzita [m^2/s]

ρ – hustota [kg/m^3]

c_p – měrná tepelná kapacita [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]. [37]

6.4 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti polymerů jsou klíčovou rolí pro jejich využití. Požadavky na metodiku testování jsou odpovídajícím způsobem vysoké. Mechanickým chováním rozumíme reakci jakéhokoliv materiálu na mechanické zatížení. Když na těleso působí síla, výsledkem je deformace. To, jakým je těleso deformováno, závisí na jeho mechanickém chování a geometrii, stejně jako na hodnotě a směru zatížení. [37]

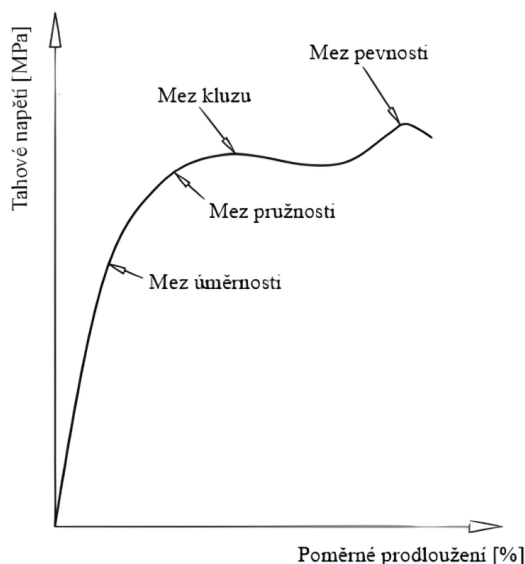
6.4.1 Statická zkouška tahem

Pro charakterizaci tahových vlastností plastů se rozlišují dva druhy zkoušek s různými rychlostmi přičinění:

- Zkouška pro stanovení elastických parametrů, zejména modulu pružnosti (Youngův)
- Tahová zkouška pro stanovení pevnostních a deformačních vlastností.

Vzhledem k široké škále modifikací u polymerů existuje řada různých přístupů k provedení tahových zkoušek, které vyžadují různé typy tělísek, zatěžovací podmínky nebo upínací zařízení.

Při tahové zkoušce podle ISO je zkoušená tyč upnuta do tahového zkušebního stroje. Oba konce jsou upevněny do čelisti stroje, které táhnou od sebe vzorek. Napětí je automaticky vykreslováno jako funkce deformace (*Obrázek 28*). [37, 38, 39, 40, 41]



Obrázek 28 Průběh tahové zkoušky [37]

Mez úměrnosti je úměrný vztah mezi silou a prodloužením nebo napětí a deformací, trvá do té doby, než prodloužení přestane odpovídat Hookovu zákonu úměrnosti.

Mez pružnosti nachází se za mezí úměrnosti, dochází u plastového materiálu k rychlejšímu nárustu prodloužení. Mez pružnosti je nejvyšší napětí, které materiál může vydržet, aniž by po odlehčení došlo k trvalé deformaci.

Mez kluzu se nachází za mezí pružností, kde způsobuje další pohyb čelistí trvalé prodloužení nebo deformaci vzorku. Existuje bod, za kterým se plastový materiál začne výrazně prodlužovat, aniž by docházelo k výraznému nárustu zatěžovací síly, kde tento bod se nazývá mez kluzu.

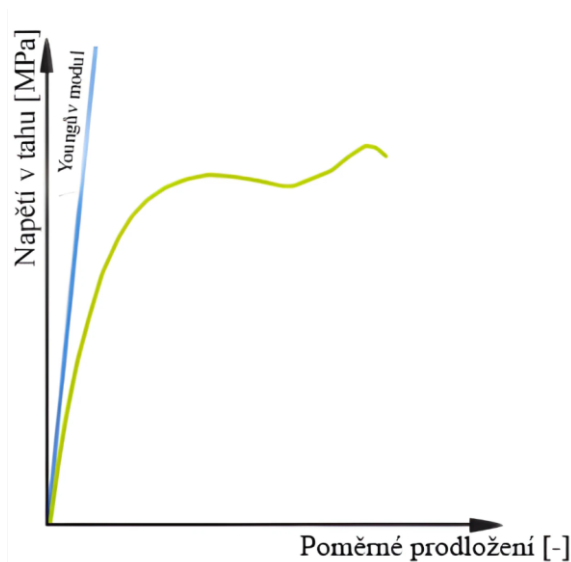
Mez pevnosti je nejvyšší napětí, které materiál unese před jeho poručením. Po překročení meze pružnosti se způsobuje zúžení vzorku a rychlé prodloužení. [37, 38, 39, 40, 41]

Stanovení modulu pružnosti

Youngův modul neboli modul pružnosti se obvykle definuje jako směrnice křivky napětí – deformace v jejich počátku. Poměr mezi napětím a deformací je v oblasti pružnosti konstantní a řídí se Hookovým zákonem.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

, kde σ je tahové napětí [MPa], ε je poměrné prodloužení [-], E je modul pružnosti v tahu (Youngův modul) [MPa].



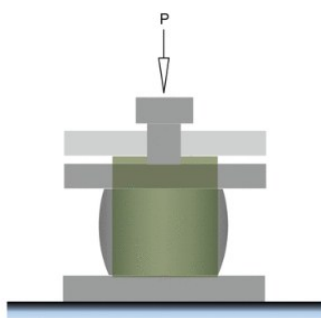
Obrázek 29 Ukázka stanovení modulu pružnosti [37]

Hookův zákon platí obecně pro většinu kovů, termoplastů a termosetů, dokud nedojde k překročení meze úměrnosti. [37, 38, 39, 40, 41]

6.4.2 Statická zkouška tlakem

Tlakové napětí je tlaková síla dělená průřezovou plochou, která se udává v jednotce pascal. Při návrhu dílů se předpokládá, že pevnost v tlaku se rovná pevnosti v tahu, ale konečná pevnost v tlaku je často mnohokrát vyšší než v tahu.

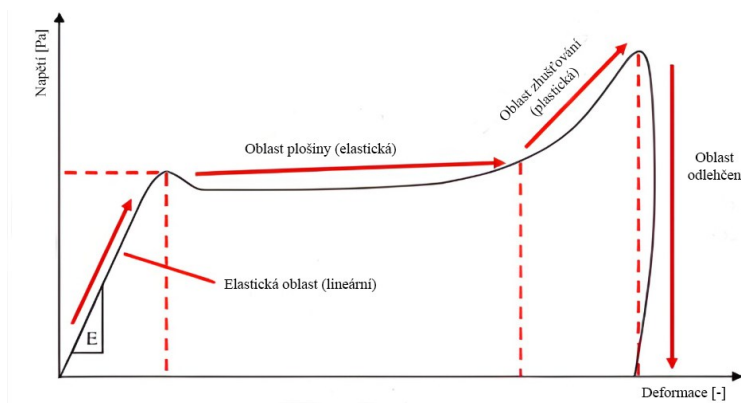
Tlaková zkouška je podobná zkoušce v tahu. Vzorek je stlačován mezi dvěma rovnoběžnými deskami (*Obrázek 30*) až do porušení. Konečná tlaková pevnost se měří ve chvíli, kdy se vzorek poruší. [41]



Obrázek 30 Schéma tlakové zkoušky [41]

Statická zkouška strukturálních pěn

U zkoušky tlakem u pěn lze odezvy na napětí/deformace rozdělit na tři oblasti, které vidíme na *Obrázek 31*. V první oblasti vidíme pěny, které vykazují lineární elastickou deformaci, kvůli důsledku elastického ohýbání okrajových buněk a natahování čel buněk. Druhá oblast začíná, když se okraje zhroutnou kvůli plastickému ohýbání nebo vyboulení. Jelikož všechny buňky v jakékoliv specifické pěně mají konstantní meze průtažnosti, proto pěny vykazují většinou oblast plata napětí. Když je většina buněk plasticky zhroucena, buněčné stěny začnou integrovat, což způsobuje rychlé zvýšení napětí, při mírném zvýšení deformace. Toto chování je hlavní charakteristikou pro třetí oblast, tedy pro oblast zhutňování. [37, 41]



Obrázek 31 Typická tlaková/deformační odezva polymerní pěny [37,41]

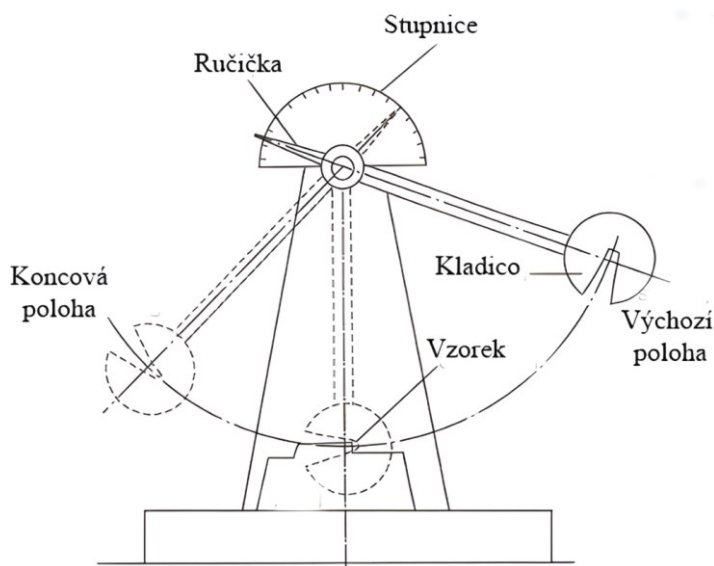
6.4.3 Rázová houževnatost

Existuje několik konfigurací rázového zatížení pomocí kyvadlových rázových zkušebních přístrojů. Vzorek může být:

- Umístěn ve středu mezi dvě podpory (Charpyho uspořádání)
- Pěvně upnut na jedné straně (Izod uspořádání)

Charpyho rázová zkouška (*Obrázek 32*) na vzorcích s/bez vrubus tříbodovým podepřením a slouží ke stanovení houževnatosti plastů při rázovém namáhání. Tato metoda je standardizována normou ISO 179.

Pro rázovou zkoušku se používají kladiva s nominální rázovou energií od 0,5 do 50 J a nárazovými rychlostmi 2,9 a 3,8 m/s, kde tyto hodnoty jsou udány v normě ISO 13802. [37, 43, 44]



Obrázek 32 Schéma Charpyho kladiva

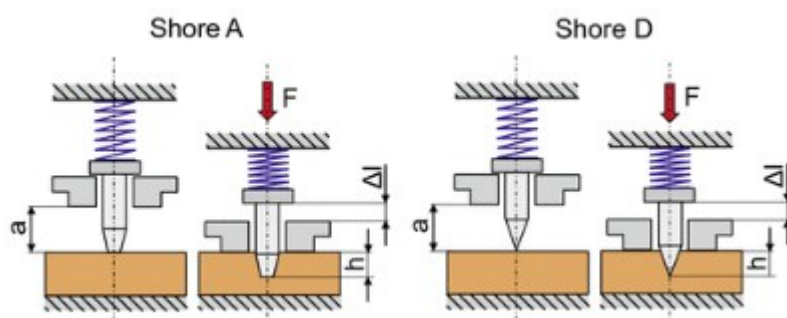
6.4.4 Zkouška tvrdosti

Zkoušky tvrdosti u polymeru vychází z původně vyvinutých metod pro kovové materiály, zejména pro oceli. V normalizovaných zkouškách tvrdosti, které se dnes nejčastěji používají, je tvrdý vtláčovač, který je vtlačen do povrchu vzorku. Zkouška tvrdosti patří mezi nejčastější mechanické zkoušení materiálu protože: jednoduchá zkouška, rychlá, efektivní z hlediska vybavení.

Tvrdost dle Shore

Měření tvrdosti můžeme rozdělit na Shore A a Shore D (*Obrázek 33*). U zkoušky Shore A je do vzorku pomocí pružiny vtlačován zkrácený kužel. U Shore D je vtlačován do vzorku zkrácený

kužel s kulovou čepičkou. Shore A se nejčastěji používá pro měkké pryže a velmi měkké plasty. Shore D se používá pro tvrdé pryže, termoplasty. [37, 41,46]



Obrázek 33 Princip tvrdosti Shore A, D [37]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je připravit polyolefinové a polyesterové chemicky lehčené struktury kontinuálním a cyklickým procesem. Následně, po optimalizaci přípravy lehčených vzorků, provést charakterizaci jejich vlastností především z pohledu jejich hustoty, statických a dynamických mechanických vlastností a tepelné vodivosti.

Pozornost diplomové práce byla tedy nejprve směřována k popisu použitých materiálů a jejich tokovým vlastnostem. Následovala časově náročná optimalizace přípravy chemicky lehčených struktur procesem vytlačování a vstřikování. Připravené chemicky lehčené struktury byly následně porovnány mezi sebou, a to z pohledu jejich hustoty přímou metodou, pórovitosti pomocí softwaru NIS Elements Ar 5.2 vyhodnocujícího snímky z optického mikroskopu, mechanických vlastností v tahu, tvrdosti dle Shore D a tepelné vodivosti pomocí přístroje C-Therm technologies TCi.

K přípravě chemicky lehčených struktur byly použity dva extruzní nízkohustotní polyetylény s nízkým (LDPE RB 03-23) a vyšším indexem toku taveniny (LDPE 770 G) a tři typy kyseliny polymléčné (extruzní typ 4032D a zvláknovací typy 6752D a 6100D) s rozdílnými indexy toku taveniny. Jako nadouvadlo bylo použito komerční typ Budit řada F od firmy Budenheim.

8 PŘÍPRAVA CHEMICKY LEHČENÝCH STRUKTUR

K přípravě polymerních pěn byly použity dvě technologie, vytlačování a vstřikování. Použité vstupní materiály byly nejprve charakterizovány z pohledu reologických vlastností a chování daného polymeru s nadouvadlem bylo ověřováno v malém množství pomocí mikrohnětiče.

8.1 Použité materiály a nadouvadla

Pro výrobu polymerních pěn byly použity dva typy nízkohustotního polyetylenu, který zastupují polyolefiny a tři druhy kyseliny polymléčné, které zastupují polyestery. Pro pěny byly použity chemická nadouvadla od firmy Budenheim. Charakteristické a jejich vlastnosti jsou popsány v následujících kapitolách.

8.1.1 Nízkohustotní polyetylén (LDPE)

Z řady polymerní skupiny polyolefinů byly pro výrobu polymerních pěn vybrány dva typy nízkohustotního polyetylenu s rozdílnou hodnotou indexu toku taveniny.

LDPE 770G

Jedním z použitých polyolefinů pro polymerní pěny byl použit nízkohustotní polyetylén, pro potravinářské a průmyslové obaly. Mezi její hlavní vlastnosti patří vysoká pevnost v tavenině, zajišťuje stabilitu bubliny nebo pásu v monovrstvách, koextrudovaných nebo směsných konfiguracích. Je používán pro litou nebo vyfukovanou folii a extrudované desky. Charakteristické vlastnosti materiálu LDPE 770G jsou shrnuty v *Tabulce 1*. [47]

Tabulka 1 Charakteristické vlastnosti materiálu LDPE 770G [47]

Veličina	Typická hodnota	Jednotka
ITT (190 °C/2,16 kg)	2,3	g/10 min
Hustota	0,918	g/cm ³
Modul pružnosti v tahu	218	MPa
Napětí v tahu (při přetržení)	12,4	MPa
Poměrné prodloužení	690	%
Teplota tání	110	°C

LDPE RB 03-23

Dalším nízkohustotním polyethylenem, který byl použit pro výrobu pěn je typ Bralen RB 03-23 od firmy MolGroup. LDPE RB 03-23 je různoučelový typ polyethylenu s dobrými mechanickými vlastnostmi. A také podle materiálového listu je dobře zpracovatelný na vytlačovacích linkách při teplotě v rozmezí od 170 do 210°C. Charakteristické vlastnosti LDPE RB 03-23 jsou shrnuty v *Tabulce 2*. [48]

Tabulka 2 Charakterizace vlastnosti materiálu LDPE RB 03-23 [48]

Veličina	Typická hodnota	Jednotka
ITT (190 °C/2,16 kg)	0,35	g/10 min
Hustota (23 °C)	919	kg/m ³
Mez pevnosti v tahu	24	MPa
Poměrné prodloužení	450	%
Tvrdost Shore D	47	-

8.1.2 Kyselina polymléčná (PLA)

K přípravě polyesterových polymerních pěn byl vybrán biologicky odbouratelný polyester kyselina polymléčná, PLA, tzv. polylaktid. Byly vybrány extruzní a zvláknovací typy PLA lišící se především v hodnotě indexu toku taveniny. PLA je poměrně hodně navlhavý polymer, proto byl tento polymer před každým použitím sušený při teplotě 65°C po dobu 12h. Detailní popis vybraných PLA typů je uveden v následujících podkapitolách.

PLA 4032D

Jedním z použitých PLA byl zvolený typ Ingeo™ Biopolymer 4032D od firmy NatureWorks. PLA 4032D má skvělé optické vlastností, dobrou zpracovatelnost. Lze jej zpracovávat na standardních typech extrudérů s univerzálními šneky o délce 24D až 30D a kompresním poměrem 2,5:1 až 3:1. Zpracovatelské teploty pro tento typ PLA jsou v rozmezí 180 až 200°C. Tento typ je nejčastěji používán pro laminace a jiné obalové aplikace. Charakteristické vlastnosti tohoto PLA jsou shrnuty v *Tabulce 3*. [49]

Tabulka 3 Charakterizace vlastnosti materiálu PLA 4032D [49]

Veličina	Typická hodnota	Jednotka
ITT (210 °C / 2,16 kg)	7	g/10 min
Hustota	1240	kg/m ³
Mez pevnosti v tahu	103·10 ³	MPa
Poměrné prodloužení	180	%
Teplota tání	155-170	°C

PLA 6752D

Další zastupujícím typem PLA je Ingeo™ Biopolymer 6752D od firmy NatureWorks. Tento typ PLA se využívá pro výrobu vláken. Lze jej zpracovávat na běžném vytlačovacím stroji jako u PLA 4032D o stejném poměru L/D a s kompresním poměrem 3:1. Typické teploty pro zpracování jsou v rozmezí 220 až 240°C. V následující tabulce jsou uvedené vlastnosti z materiálového listu (*Tabulka 4*). [50]

Tabulka 4 Charakterizace vlastností materiálu PLA 6752D [50]

Veličina	Typická hodnota	Jednotka
ITT (210 °C / 2,16 kg)	15	g/10 min
Hustota	1240	kg/m ³
Teplota skelného přechodu	55–60	°C
Poměrné prodloužení	10-70	%
Teplota tání	145-160	°C

PLA 6100D

Posledním typem PLA je Ingeo™ Biopolymer 6100D od firmy Natureworks. Tento typ PLA jej také použít na běžném vytlačovacím stroji s univerzálním šnekem s poměrem L/D 24:1 až 30:1 a kompresním poměrem 3:1. Typické teploty zpracování jsou 220-240 °C. V následující tabulce vidíme některé vlastnosti z materiálového listu (Tabulka 5). [51]

Tabulka 5 Charakterizace vlastností materiálu PLA 6100D [51]

Veličina	Typická hodnota	Jednotka
ITT (210 °C / 2,16 kg)	24	g/10 min
Hustota taveniny (230 °C)	1240	kg/m ³
Teplota skelného přechodu	55-60	°C
Poměrné prodloužení	10-70	%
Teplota tání	165-180	°C

8.1.3 Nadouvadla Budenheim Budit

Pro napěnění polymerů byly použity nadouvadla Budit® F series od firmy Budenheim. Tato řada je založena na speciálních anorganických fosfátech bez nebezpečných azodikarbonamidů, tudíž se jedná o ekologická nadouvadla. Jedná se o endotermický rozpad anorganického pěnicího nadouvadla pro procesy chemického napěňování. Mezi výhody nadouvadla patří zlepšení toku taveniny a mechanických vlastností či kontrolovatelná tvorba buněk. V následující tabulce vidíme, některé vlastnosti z materiálového listu (Tabulka 6). [52]

Tabulka 6 Charakterizace vlastností nadouvadla [52]

Produkt	Bod tání [°C]	Teplota rozkladu [°C]	Procesní teplota [°C]	Obsah nadouvadla [%]	Výtěžnost plynu [ml/g]	Hustota [g/l]
Budit F20	107	150	>180	70	115	550
Budit F26	107	220	>240	70	60	600

8.2 Charakterizace použitých materiálů

Analýza čistých materiálů byla provedena z pohledu jejich tokových vlastností. V případě použitého nadouvadla byla provedena FTIR analýza za účelem charakterizace jeho složení.

8.2.1 Analýza tokových vlastností materiálů

U výchozích materiálů, uvedených v předchozí kapitole, byla provedena charakterizace jejich tokových vlastností pomocí kapilárního reometru RG 50 od firmy Göttfert (Obrázek 34). Pro měření tokových vlastností byly použity dvě kapiláry o průměru 1 mm, a to dlouhá kapilára o délce 20 mm a nulová kapilára o výrobní délce 0,2 mm (Obrázek 34).

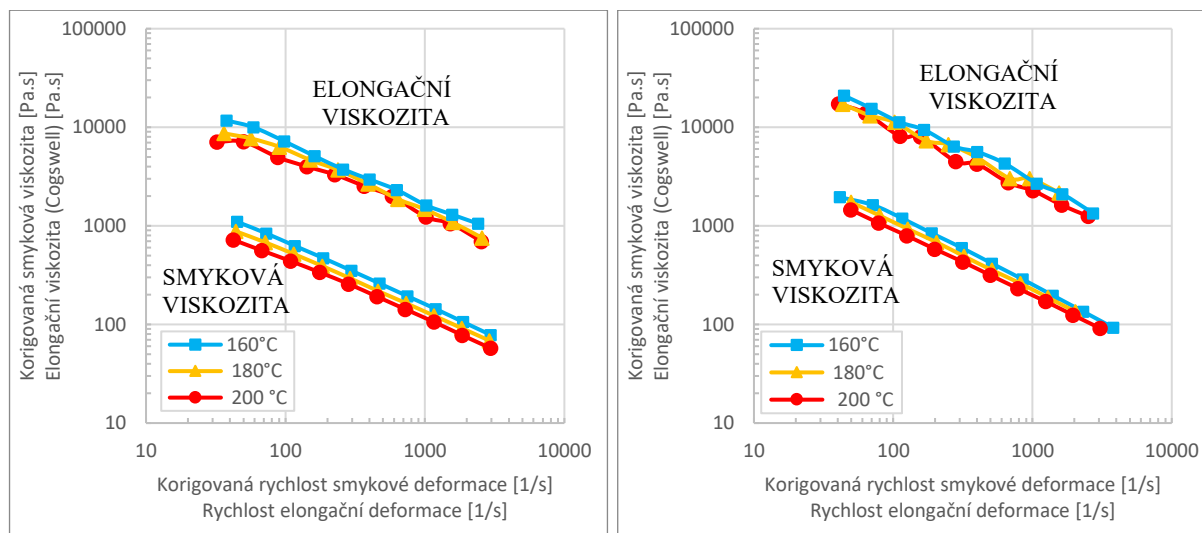


Obrázek 34 Kapilární reometr Göttfert RG50 (vlevo) a kapiláry o průměru 1 mm (vpravo) s délkou 20 mm (nahore) a 0,2 mm (dole)

V průběhu experimentu byla polymerní tavenina protlačována skrz kapiláry pomocí pístů o průměru 15 mm. Ze zaznamenaných tlakových spádů byly provedeny korekce na koncové jevy v kapiláře (Bagley korekce) a korekce rychlosti smykové deformace (Rabinowitsch korekce). Následně byla vyhodnocena korigovaná hodnota smykové viskozity a jednoosá elongační viskozita (metoda Cogswell) při teplotách 160°C, 180°C, 200°C pro polymerní granulát LDPE a 180°C, 190°C, 200°C pro polymerní granulát PLA.

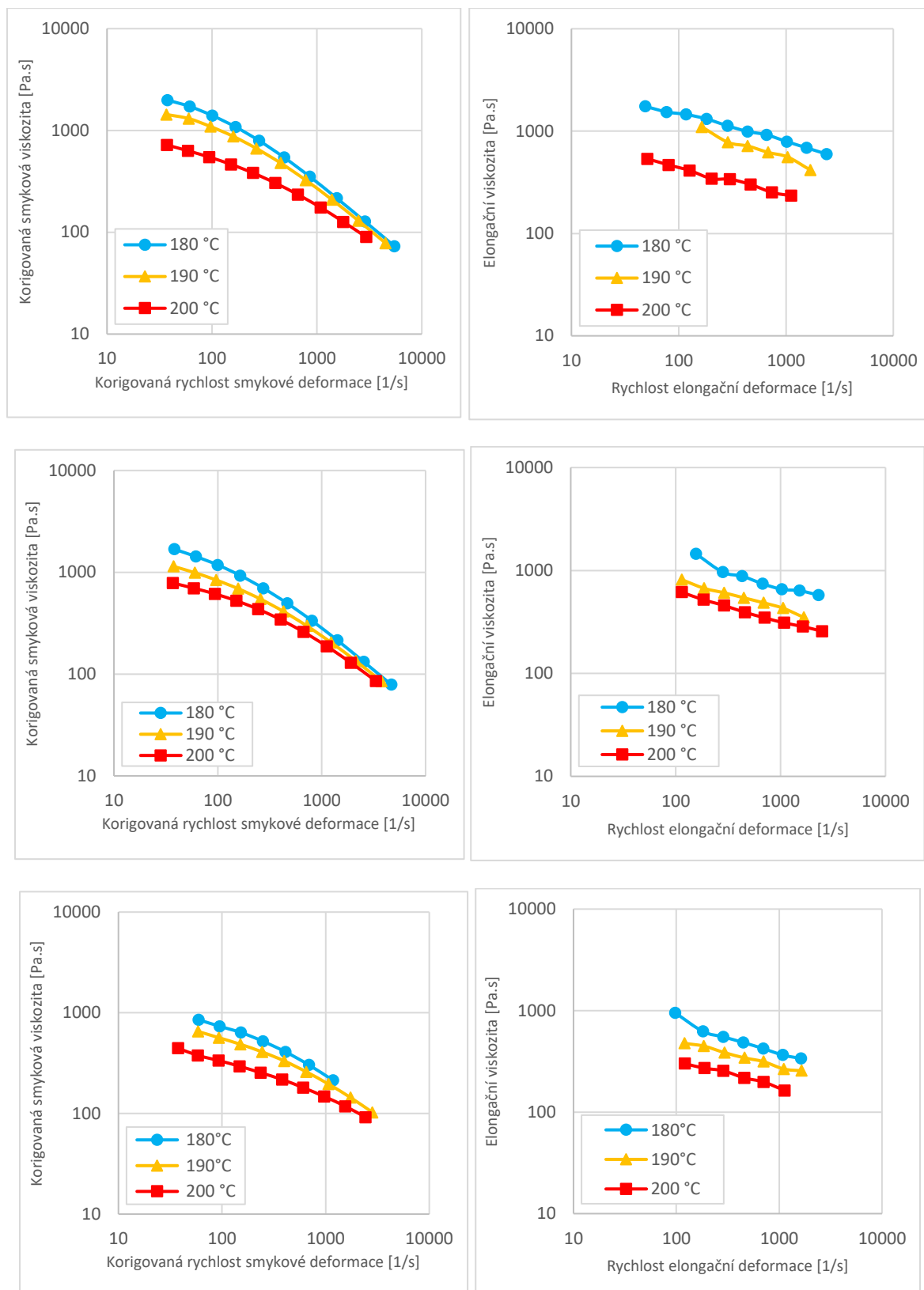
Z výsledků vyhodnocených tokových křivek materiálů 770G (Obrázek 35 vlevo) a 03-23 (Obrázek 35 vpravo) je zřejmé, že oba materiály mají charakteristický průběh pseudoplastických látek, kde při zvyšování rychlosti smykové deformace dochází k poklesu smykové viskozity. Dále vykazují ne příliš významnou závislost tokových vlastností na změně teploty zpracování. Navíc, oba materiály vykazují podobné směrnice tokových křivek (index nenewtonského chování), čili jejich záměnou ve zpracovatelském stroji či změnou jeho výkonu, bude vždy změna smykové viskozity podobná, což je výhodné z hlediska zpracování. Z Obrázek 35 je zřejmé, že odezva materiálu 03-23 na smykové namáhání je výrazně vyšší než v případě materiálu 770G, což podporuje

hodnoty výše uvedených indexů toku taveniny těchto materiálů. Materiál 03-23 bude tedy při jeho toku více viskózním a pro jeho lepší zpracovatelnost, a tak snížení opotřebení funkčních částí zpracovatelského stroje, bude vhodné zvýšit zpracovatelské teploty. Obdobné chování obou materiálů nastává i v případě jejich elongačního toku (Obrázek 35), který byl charakterizován pomocí nulové kapiláry metodou Cogswell.



Obrázek 35 Závislost korigované smykové viskozity (skupina dolních křivek) a elongační viskozity (skupina horních křivek) na korigované rychlosti smykové/elongační deformace LDPE materiálů 770G (vlevo) a 03-23 (vpravo)

Z výsledků vyhodnocených tokových křivek ve smyku PLA materiálů 4032D (Obrázek 36 nahoře), 6752D (Obrázek 36 uprostřed) a 6100D (Obrázek 36 dole) je zřejmé, že všechny PLA materiály mají charakteristický průběh pseudoplastických látek tedy, smyková viskozita klesá s rostoucí rychlostí smykové deformace. Vliv teploty na smykovou viskozitu je v případě PLA materiálů mnohem významnější než v případě PE materiálů. S rostoucí teplotou smyková viskozita klesá, výrazně pak v případě PLA 4032D při změně teploty ze 190 na 200°C. PLA materiály vykazují rozdílné směrnice tokových křivek, kdy vyšší index newtonského chování je dosahován při nejnižší teplotě 180°C. Tyto rozdílné směrnice křivek mohou způsobit méně stabilní proces vytlačování při změnách teplot v průběhu zpracování, jelikož změna smykové viskozity může být skoková. Z Obrázek 36 je zřejmé, že odezva materiálů PLA 4032D a 6752D na smykové namáhání je výrazně vyšší než v případě materiálu PLA 6100D, který má index toku taveniny 2x až 3x vyšší a bude tudíž při stejné teplotě méně viskózním, a méně tak namáhat částí zpracovatelského stroje. Z výsledků elongační viskozity je zřejmé, že není tak významná jako v případě PE, což by mohlo mít souvislost s celkovou tažností, která je v případě PLA nižší než v porovnání s PE.

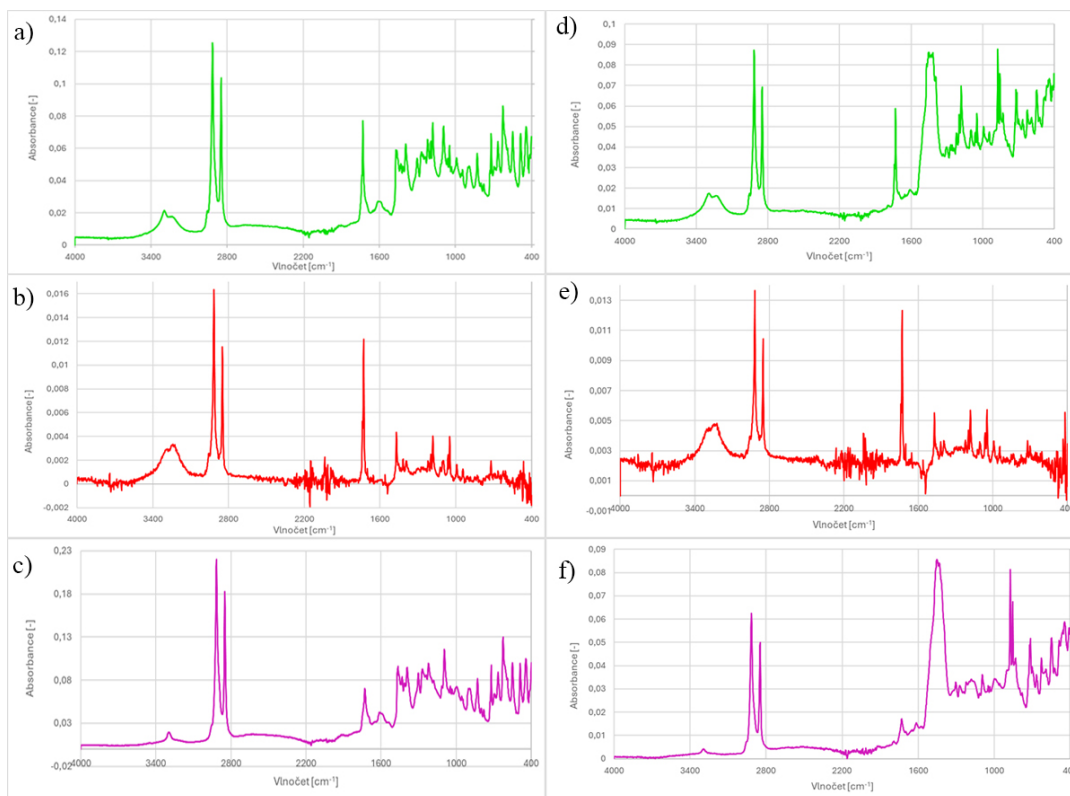


Obrázek 36 Závislost korigované smykové (vlevo) a elongační (vpravo) viskozity na korigované rychlosti smykové/elongační deformace materiálů PLA 4032D (nahore), PLA 6752D (uprostřed) a PLA 6100D (dole).

8.2.2 FTIR analýza nadouvadla

Charakterizace granulátu nadouvadla byla provedena na přístroji FT-IR spektrometr Nicolet 6700 s diamantovým ATR krystalem od firmy Thermo Fisher Scientific. Studovanými nadouvadly byly F20 a F26 pro která byl změřen jejich chemický charakter. Zmíněný diamantový ATR krystal umožňuje analýzu povrchové vrstvy vzorku do cca 2 μm . Podmínky měření byly zvoleny následovně: počet skenů byl 64, rozlišení spektra 4 cm^{-1} a spektrální rozsah byl 4000–400 cm^{-1} .

Spektra F20 jsou uvedena na *Obrázku 37* vlevo a spektra F26 na *Obrázku 37* vpravo. Spektra obou vzorků byla změřena z jejich povrchu, poté z otisku, který vznikl na ATR krystalu (residuum z povrchu vzorku) a z vnitřní části vzorku pod povrchem. Oba typy nadouvadla jsou pravděpodobně složeny z několika chemických složek, protože jejich spektra vykazují přítomnost nasycených C-H skupin (valenční vibrace 3000–2800 cm^{-1} a deformační vibrace 1470–1350 cm^{-1}), C=O skupin (valenční vibrace 1730 cm^{-1}), C-O skupin (valenční vibrace 1200–1000 cm^{-1} , pravděpodobně ester) a také OH skupin (valenční vibrace 3600–3100 cm^{-1}). Dle spektrálního projevu se jedná pravděpodobně o směs esterů a alkoholů. Tento předpoklad byl potvrzen porovnáním spekter s FTIR knihovnamí. Bylo zjištěno, že obě nadouvadla obsahují na povrchu povlak, který se přenesl na ATR krystal a bylo možné ho zanalyzovat zvlášť. Tato spektra jsou označena *otiskATR*. V obou případech odpovídají glycerol monostearátu (či velmi podobnému esteru). Pro porovnání s databázemi byla využita spektra označená *uvnitř*. Spektrum nadouvadla F20 bylo identifikováno jako citrát sodný a dále obecněji jako nadouvací systém polyethylenu Hostatron Systém P-1940 (pozn. databáze obsahují i spektra komerčně značených vzorků, zvláště jedná-li se o polymerní aditiva či směsi). Nadouvadlo F26 bylo identifikováno jako vinyl ester a vápenec (monohydrate calcite). Vzhledem k tomu, že oba vzorky jsou bílé, je přítomnost anorganických složek pravděpodobná. Obrázky s uvedeným porovnáním s knihovnamí jsou uvedeny v příloze I.



Obrázek 37 Charakterizace nadouvadel typu F20 (vlevo), F26 (vpravo)

a) F20, b) F20 otisk ATR, c) F20 uvnitř, d) F26, e) F26 otisk ATR, f) F26 uvnitř

8.3 Příprava chemicky lehčených pěn

Pro přípravu polymerních pěn byly použity technologie vytlačování a vstřikování, přičemž byly nejprve provedeny prvotní experimenty v malém objemu materiálu pomocí dvoušnekového mikrohnetiče. Tyto technologie jsou detailně popsány v této kapitole.

8.3.1 Mikrohnetič

Před zpracováním polymerních pěn byl využit dvoušnekový mikrohnetič Xplore MC 15 se souběžným smyslem otáčení (Obrázek 38). Na tomto přístroji se zjišťovalo, jak se polymer s nadouvadlem, které bylo zkoušeno v různém množství, bude chovat při zpracování při různých teplotách.



Obrázek 38 Mikrohnětič

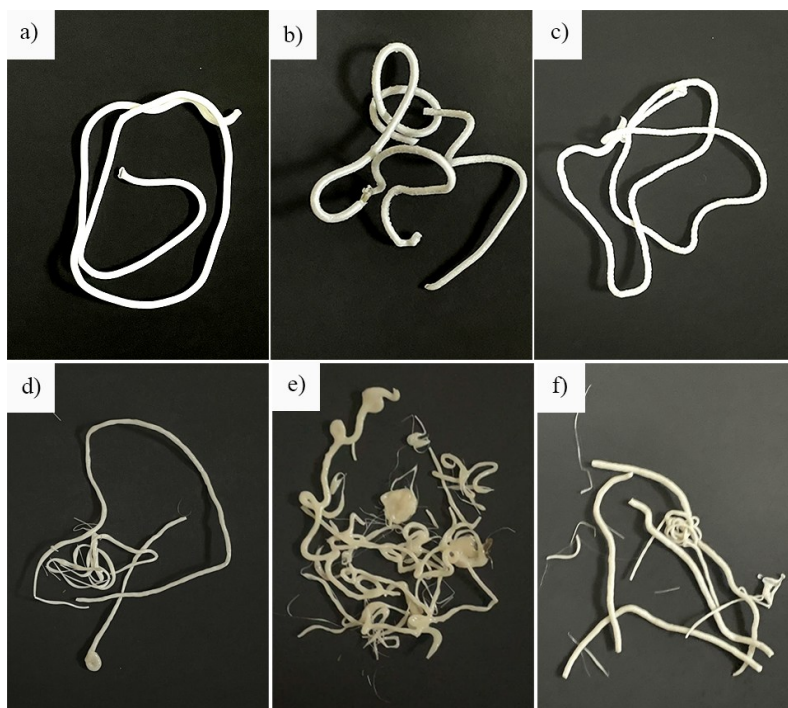
Podmínky pro míchaní jednotlivých polymerů a typů nadouvadel jsou uvedeny v *Tabulka 7*.

Tabulka 7 Podmínky a poměry směsí

Materiál	Typ nadouvadla	Množství nadouvadla (%)	Teplota [°C]	Doba míchání [min]	Otáčky [ot/min]		
LDPE 770G	F20	5	160	6	50		
	F26						
	F20		200				
	F26						
PLA 6752	F26		220				
PLA 4032	F20						
	F26						

Na *Obrázku 39* jsou znázorněny polymerní struny z mikrohnětiče, kde v horní řadě lze porovnat LDPE s dvěma typy nadouvadla a různými teplotami. Při porovnání nadouvadla F20 a F26 pro LDPE jsou vidět, že u F26 výsledné polymerní struny jsou stejně napěté, ale u F26 je hladší povrch s porovnáním s F20 pro stejné teploty. Při srovnání stejných nadouvadla tedy F20 pro LDPE s rozdílnou teplotou, lze vidět stejný zvrásněný povrch a u teploty 160 °C je struna více napětá, tedy je o něco silnější než u 200 °C.

V dolní řadě jsou znázorněny PLA s nadouvadlem F26, kde na prvním a posledním jsou struny vytlačeny pro teploty 220 °C. Tady, lze vidět, že u PLA se nedařilo vytlačit souvislou strunu, jak to bylo u LDPE. U tohoto materiálu se měnily podmínky míchání jako bylo například čas míchání. Nejlépe vytlačená struna je znázorněná na posledním obrázku, která byla získaná při 220 °C a čas míchání byl 1,5 minuty.

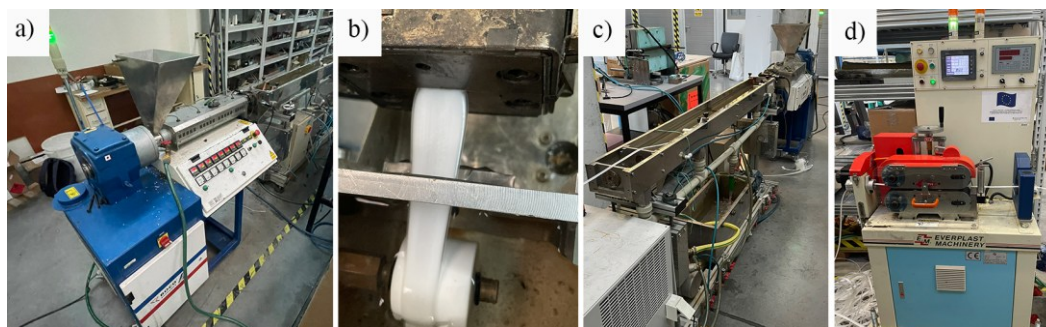


Obrázek 39 Vzorky z mikrohnětiče

a) LDPE 770G + F26, 160 °C, b) LDPE 770G + F20, 160 °C, c) LDPE 770G + F20, 200 °C,
d, e), f) PLA 4032D + F26, 220 °C

8.3.2 Vytlačování

Proces vytlačování probíhal na extruderu od firmy Boco Pardubice. Jedná se o jednošnekový stroj, na kterém byla připojena vytlačovací hlava s obdélníkovou šterbinou. Za extrudérem byla umístěna chladicí vana s odtahem (Obrázek 40).



Obrázek 40 Vytlačovací linka

a) extruder, b) vytlačovací hlava, c) chladicí vana, d) odtah

Obdélníková šterbina ve vytlačovací hlavě měla rozměry 30x2 mm, byla vytápěna půlenými topnými pásy. Vytlačovací stroj byl vyhříván pomocí čtyř topných pásů, které jsou rozděleny do jednotlivých pásem šneku.

- **Příprava směsi**

Před vytlačováním bylo důležité si nachystat polymer s nadouvadlem. Příprava směsi probíhala ručním smícháním základního polymeru s nadouvadlem, které bylo v množství 2, 4, 6 a 12 %.

- **Vytlačování LDPE 770G**

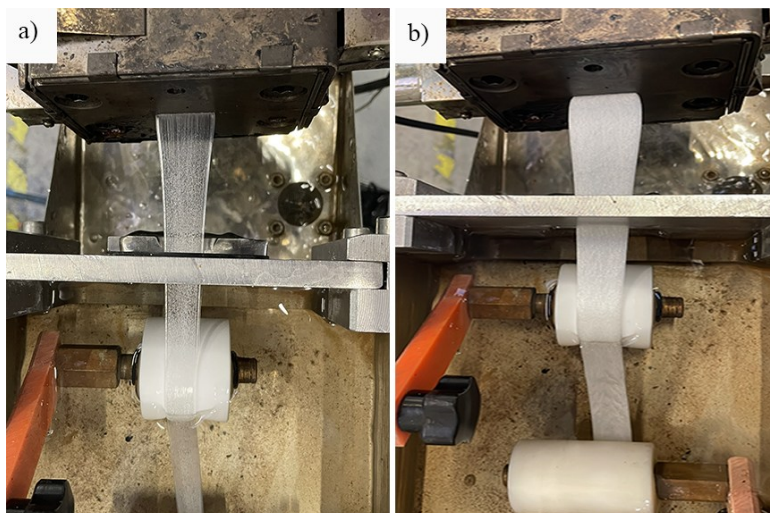
Extruzní experimenty byly nejprve provedeny s materiálem LDPE 770G s indexem toku taveniny 2,3 g/10 min. Na tomto typu LDPE se zkoušely teploty, při kterých polymer co nejlépe napění. S tímto typem LDPE se pracovalo nejlépe a podařilo se vytlačit vzorky s homogenně napěněnou strukturou, a to ve všech zvolených případech plnění nadouvadlem. Teplotní a procesní podmínky vytlačování jsou podrobněji uvedeny v *Tabulce 8*.

Tabulka 8 Teplotní profily podél šneku a vytlačovací hlavy při zpracování vzorku LDPE 770G s přídavkem nadouvadla F20 od 2 do 6 % při otáčkách šneku 8 ot/min, rychlosti odtahu za hlavou 1,1 m/min a mezery mezi vytlačovací hlavou a chladicí vanou o velikosti 64mm.

Množství nadouvadla [%]	Teploty topných pásů extrudéru [°C]				Teplota na hlavě [°C]
	1	2	3	4	
0	129,8	160,2	179,8	179,4	180,1
2	129,3	159,7	189,5	207,7	210,1
4	129,2	159,6	190,6	210,3	210,1
6	129,6	159,6	189,5	210,6	210,1

Proces extruze začal pokaždé tak, že na začátku se vytlačoval základní polymer bez nadouvadla, který se protáhl skrz sérii podpůrných válečků v chladicí vaně s vodou o teplotě 12 °C. Následně byl vzorek odtahován pomocí pásů odtahovacího zařízení. Po protažení pásu se seřizoval odtah tak, aby nedocházelo k protahování vzorku od vytlačovací hlavy. Po ustálení nastavených procesních podmínek se použila směs polymeru s nadouvadlem, na *Obrázek 41* můžeme vidět přechod z čistého LDPE na směs polymeru s nadouvadlem a vedle něj napěněný pásek.

Při nastavování mezery mezi vytlačovací hlavou a začátkem chladicí vany se zkoušely různé vzdálenosti, jelikož mezera měla vliv na šířku vzorku. Při menší mezeře je polymerní pěna užší a má sklon k borcení. Z provedených experimentů byla zvolena optimální mezera o velikosti 64 mm.



Obrázek 41 Vytlačovaný vzorek LDPE 770G

a) přechod z čistého polymeru do napěněného polymeru, b) napěněný pásek

Byl také zjišťován vliv rychlosti šneku na výsledné rozměry lehčené struktury. Při zvolené nejvyšší rychlosti 16 ot/min dosahoval lehčený pásek největší šířky a tloušťky. Naopak při rychlosti 6 ot/min dosahoval lehčený pásek nejmenších rozměrů. K analýze lehčených struktur byla zvolena rychlost 8 ot/min především z pohledu množství spotřeby materiálu a výsledných rozměrů lehčeného pásku vhodných pro využití vodicích válečků a štěrbin ve stávající chladicí vaně. Při otáčkách šneku 8 ot/min byl celkový výkon vytlačovacího stroje přibližně 1 kg/h.

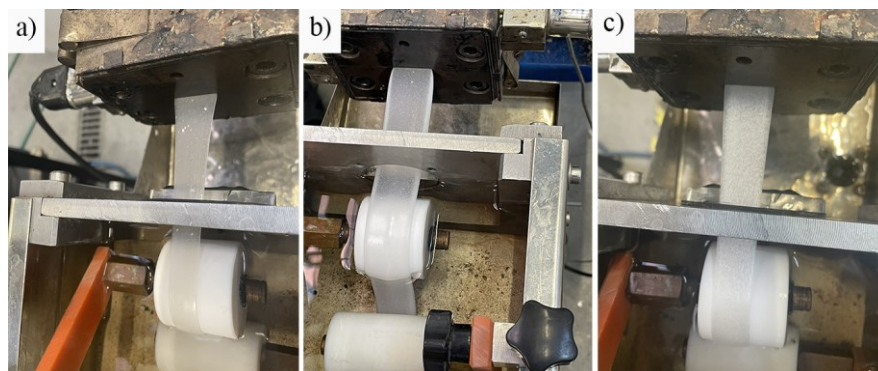
• Vytlačování LDPE RB 03-23

Následně probíhala extruze LDPE typu granulátu RB 03-23 s indexem toku taveniny 6x nižším a to 0,35 g/10 min. Další jeho základní vlastnosti jsou uvedeny v Tabulce 2. Při extruzi čistého LDPE nastal první problém a to, že se nedařilo nastavit extruzi tak, aby byly stejnoměrné a rovné pásy, jak můžeme vidět na obrázku níže (*Obrázek 42*). Tento problém byl vyřešen změnou teplotního profilu a rychlosti odtahu.



Obrázek 42 Nerovnoměrné pásy vzorku

Při vyřešení tohoto problému se odebral vzorek a pokračovalo se vytlačováním se směsí polymeru a nadouvadla. Při použití zpracovatelských podmínek shodných s předchozím typem LDPE, se v případě LDPE RB 03-23 při stejných teplotách objevovaly neroztavené kousky nadouvadla (Obrázek 43). Proto bylo nutné nastavit jiný vhodný teplotní profil. Po nastavení vhodného teplotního profilu 144,2/180,3/220,3/226,9 °C podél šneku (ve směru od násypky) a teploty vytlačovací hlavy 235,1 °C došlo k napěněnímu vzorku (Obrázek 44).



Obrázek 43 Nenapěněný vzorek

a) neroztavené nadouvadlo, b) napěněné kraje + neroztavené kousky nadouvadla, c) částečně napěněný pásek

Po optimalizaci teplotního profilu byl polymer napěněn, avšak po vytlačení zhruba 5 m vzorku, docházelo k opětovnému vytlačování částečně nenapěněného pásu. Tento problém nastal v důsledku kolísání teplot a byl vyřešen tak, že o tolik co teploty kolísaly byly tyto teploty zvýšeny.

Na Obrázku 44 můžeme vidět výsledný napěněný vzorek LDPE RB 03-23. Takto napěněný vzorek byl po optimalizaci teplot stabilní. Se změnou množství nadouvadla ve směsi docházelo ke změně šířky výsledného vzorku. Teplotní a procesní podmínky jsou podrobněji uvedeny v Tabulce 9.



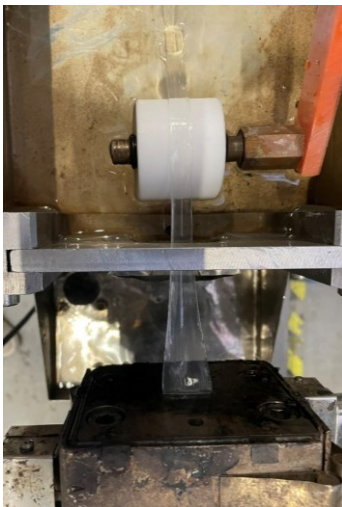
Obrázek 44 Výsledný napěněný vzorek pro LDPE RB 03-23

Tabulka 9 Teplotní profily podél šneku a vytlačovací hlavy pro materiál LDPE RB 03-23 při otáčkách šneku 8 ot/min, rychlosti odtahu za hlavou 6 m/min a mezery mezi vytlačovací hlavou a začátkem chladicí vany o velikosti 64 mm

Množství nadouvadla [%]	Teploty topných pásů extrudéru [°C]				Teplota na hlavě [°C]
	1	2	3	4	
0	129,7	160,1	188,8	211,4	210,1
2	145,5	185,6	219,0	227,3	235,0
4	146,1	185,4	221,2	227,7	235,2
6	145,2	185,8	218,7	228,5	235,1
12	146,1	186,0	220,6	228,0	235,2

- **Vytlačování PLA 4032D**

Příprava polymerní pěny z PLA 4032D procesem vytlačování probíhala při nastaveném teplotním profilu, který je doporučován v materiálovém listu. Během vytlačování se teplotní profil podél šneku 145/180/190/200°C musel snižovat na teplotní profil uvedený v *Tabulce 10*, jelikož vytlačený pásek byl moc tekutý a nebylo možné jej protáhnout skrz chladicí vanu. (*Obrázek 45*).



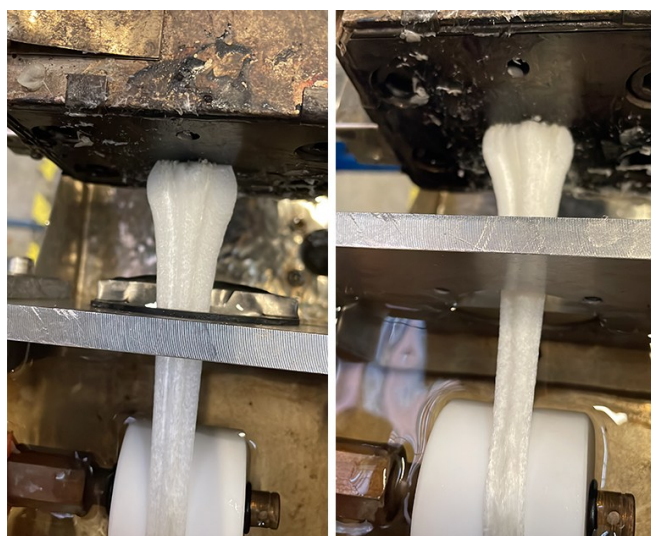
Obrázek 45 Protažené vzorky čistého PLA

Po protažení čistého vzorku PLA se použila směs s nadouvadlem. Po vytlačení pásku při stejném teplotním profilu čistého PLA byla směs příliš tekutá, čímž docházelo ke ztrátě pevnosti taveniny a k trhání vzorku, či až k ukapávání vzorku od hlavy (*Obrázek 46*).



Obrázek 46 Nestabilní napěněné vzorky PLA

Po snížení teplotního profilu (*Tabulka 10*) se podařilo napěněné PLA protáhnout skrz chladicí vanu a následně odebrat vzorky (*Obrázek 47*). Při vložení čistého polymeru do extrudéru při nižším teplotním profilu nastala další překážka, která byla nutná vyřešit a to bylo, že při nižších teplotách PLA zatuhlo ve válci u hlavy, tudíž bylo nutné teploty zvýšit a vyčistit. Tato situace přidala další poznatek v extruzi polymerních pěn a to takový, že na začátku je výhodné vytlačovací stroj nejdříve nahřát na vyšší teploty a pak je postupně snižovat na požadované či vhodné.



Obrázek 47 Napěněný vzorek PLA 4032D

Tento typ PLA byl nejobtížnější na zpracování, z důvodu značného lepení na hlavu a válce (*Obrázek 47*), a také horšího protahování přes válečky v chladicí vaně, protože se pásek hodně natahoval až následně praskl. V tabulce níže vidíme teplotní profily a další procesní podmínky při kterých se podařilo vytlačit vzorky s homogenně napěněnou strukturou (*Tabulka 10*). S neúspěchem se setkalo zvýšení otáček na 8 ot/min tak, aby byly vzorky odebírané při stejných otáčkách, kdy se vytlačený pásek vždy hodně natahoval a následně se přetrhl. Z tohoto důvodu byly vzorky odebírány při nižších otáčkách (*Tabulka 10*).

Tabulka 10 Teplotní profily podél šneku a vytlačovací hlavy pro materiál PLA 4032D při otáčkách šneku 5 ot/min, rychlosti odtahu za hlavou 2 ot/min a mezery mezi vytlačovací hlavou a začátkem chladicí vany o velikosti 60, 50 a 25 cm pro množství nadouvadla ve směsi 0, 2 a 4 až 6 %.

Množství nadouvadla [%]	Teploty topných pásů extrudéru [°C]				Teploty na hlavě [°C]
	1	2	3	4	
0	144,8	180,6	180,2	200,2	165,1
2	144,7	170,2	186,2	185,1	135,1
4	150,3	175,7	187,1	184,8	134,7
6	150,3	174,9	186,2	185,5	136,8

• Vytlačování PLA 6752D

Další typem PLA, který byl použit k extruzi byl 6752D. Příprava polymerní pěny z tohoto typu PLA probíhala procesem vytlačování a začátek procesu byl stejný jako u předchozího typu PLA, tedy nastavení teploty z materiálového listu.

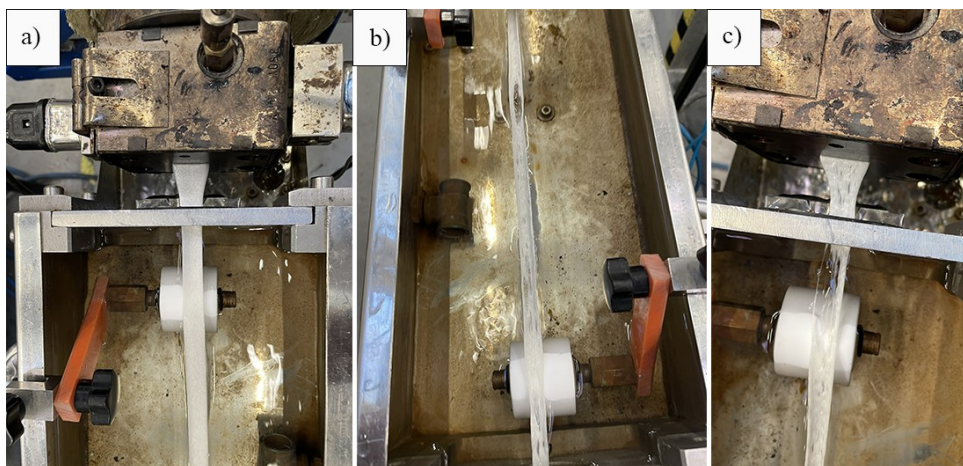
Na obrázku níže můžeme vidět protažený vzorek pásku z čistého PLA 6752D, který se protáhl bez obtíží, bez natahování a prasknutí (*Obrázek 48*), ale jen s jednou změnou a to takovou, že pásek nebyl protahován přes válečky v chladicí vaně, ale byl jen položen na první váleček, který taveninu podepíral a následně byl pásek položen na hladinu vody v chladicí vaně. Tato změna byla provedena z důvodu toho, že pásek při protažení přes válečky se deformoval. I když nebyl vzorek ponořený ve vodě jako u ostatních materiálů, tak i u tohoto způsobu byl dostatečně uchlazen. Deformaci pásku by zcela jistě pomohlo použití kalibru.



Obrázek 48 Protažený pásek PLA 6752D

U napěněných pásků, s vyšším obsahem nadouvadla docházelo k trhlinám. K tomuto jevu pravděpodobně docházelo z důvodu překročení pevnosti taveniny daného materiálu vlivem vysokého stupně plnění nadouvadlem. Docházelo k tomu, že za hlavou kde materiál pění, se vytvořil velký

pór, který následně praskl. V případě obsahu 2% nadouvadla ve směsi vznikaly celistvé pásy s homogenní strukturou, bez trhlin (Obrázek 49). V případě vyššího obsahu nadouvadla ve směsi (6% nadouvadla), obsahoval připravený pásek velký počet trhlin, někdy i větších rozměrů, kde v tomto místě mohlo dojít k přetržení.



Obrázek 49 Napěněné vzorky PLA 6752D

a) napěněné PLA pro 2% nadouvadla, b), c) napěněné pásy s trhlinami pro vyšší % nadouvadla

Teplotní a procesní podmínky vytlačování jsou uvedeny v Tabulce 11.

Tabulka 11 Teplotní profily podél šneku a vytlačovací hlavy pro materiál PLA 6752D při otáčkách 8 ot/min, rychlosti odtahu za hlavou 2 m/min a mezery mezi vytlačovací hlavou a začátkem chladicí vany o velikosti 30 mm.

Množství nadouvadla [%]	Teploty topných pásů extrudéru [°C]				Teploty na hlavě [°C]
	1	2	3	4	
0	165,1	175,5	185,4	190,2	189,4
2	164,9	175,4	183,5	190,3	189,4
4	165,2	175,3	184,2	189,9	190,1
6	164,6	174,6	184,6	190,2	190,1

• Vytlačování PLA 6100D

Posledním typem PLA, který se vytlačoval, byl typ 6100D s nejvyšší index toku taveniny ze všech použitých PLA materiálů, a to 24 g/10 min (kapitola 8.1.2).

Teplotní profil pro vytlačování tohoto typu PLA byl zvolen dle doporučení v materiálovém listu, a to při teplotách podél šneku 165/180/200/220°C a teplotě na hlavě 220°C. Při tomto nastavení se podařilo protáhnout vytlačované pásy vzorku skrz chladicí vanu do odtahovacího zařízení a seřídít tak, aby byly pásy souměrné (Obrázek 50).



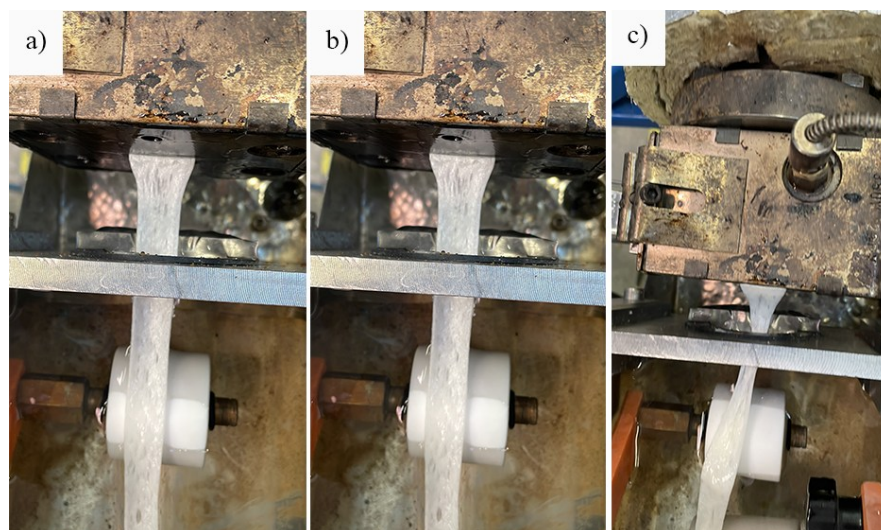
Obrázek 50 Vytlačovaný a ustálený vzorek PLA 6100D

Po ustálení čistého PLA se do násypky vysypala nachystaná směs s nadouvadlem, jelikož při těchto teplotách byla vytlačována moc tekutá tavenina, bylo nutné teploty postupně snižovat tak, aby se pásek podařilo protáhnout do odtahu.

Při vytlačování směsi s 2 hmot.% nadouvadla se vytlačovaly pásy s homogenně napěněnou strukturou. Tak jak u ostatních typů PLA (*Obrázek 51 a*) při vytlačování s vyšším obsahem nadouvadla, tedy konkrétně u 4 % (*Obrázek 51b*) se znova musely snižovat teploty, tak aby se vytlačený pásek neprotahoval a následně neutrl.

Teploty se musely snižovat také u 6 % (*Obrázek 51c*), kde docházelo k trhlinám od bublin, a navíc se u tohoto procenta nadouvadla nedokázalo seřídit odtah s rychlosti šneku tak, aby se pásek v chladicí vaně nekroutil. Po přidání válečků a protažení mezi ně se pásek přetrhl, tudíž plaval po hladině vody ve vaně. Přiblížení extruderu k chladicí vaně také nepomohlo, proto jsou vzorky občas zvlněné, ale toto nebránilo k následnému odebrání vzorku na další testování.

Jak vidíme na obrázku (*Obrázek 51c*), tak u všech typů PLA byla použita izolace, aby nedocházelo k zatuhnutí taveniny ve válci, toto opatření bylo přidáno hned po prvním zatuhnutí u PLA 4032D.



Obrázek 51 Napěněné vzorky PLA 6100D

a) Napěněné PLA + 2 % F20, b) PLA + 4 % F20, c) PLA + 6 % F20

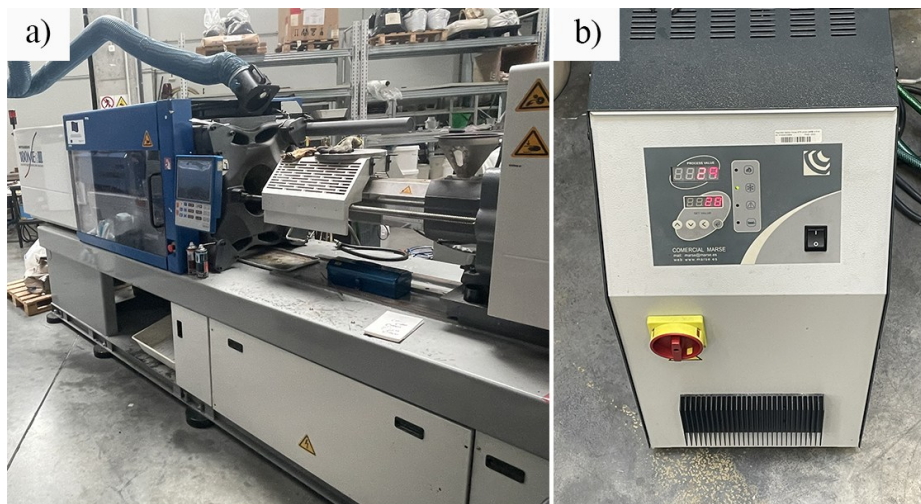
V Tabulce 12 jsou shrnuty procesní podmínky, které byly použity během vytlačování tohoto typu PLA.

Tabulka 12 Teplotní profily podél šneku a vytlačovací hlavy pro materiál PLA 6100D při otáčkách šneku 8 ot/min, rychlosti odtahu za hlavou 2 m/min a mezery mezi vytlačovací hlavou a začátkem chladicí vany o velikosti 30 mm

Množství nadouvadla [%]	Teploty topných pásů extrudéru [°C]				Teploty na hlavě [°C]
	1	2	3	4	
0	165,1	180,2	190,3	204,8	205,1
2	165,1	179,8	191,4	195,2	181,8
4	164,4	179,7	188,4	194,5	170,9
6	164,4	179,9	188,4	196,6	165,2

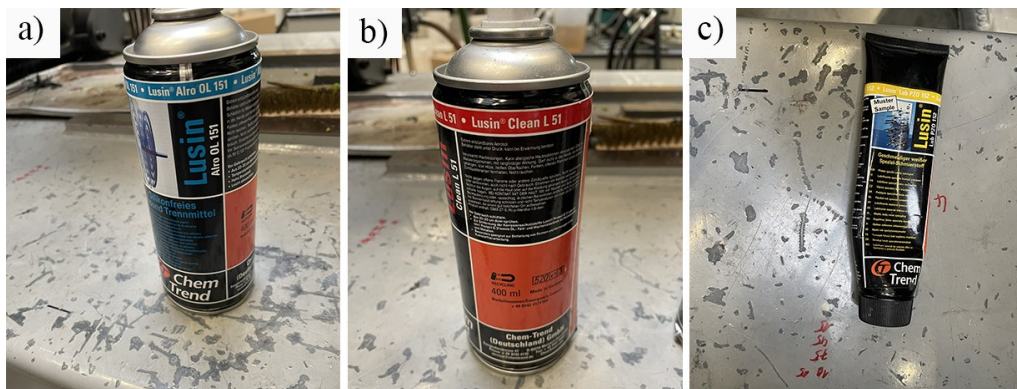
8.3.3 Vstřikování

Proces vstřikování probíhal na vstřikovacím stroji od firmy Mitsubishi a typ 180 MET III-15h (Obrázek 52) vybaveného formou s výměnnými vložkami se čtvercovou dutinou.



Obrázek 52 Vstřikovací stroj Mitsubishi 180MET III-15h (a), temperační zařízení (b)

Před začátkem vstřikování se musela dutina vyčistit pomocí čistícího prostředku a textílie. Následně se dutina formy naseparovala univerzálním separátorem a vyhazovací systém se namazal speciálním bílým mazivem (Obrázek 53). Po nahřátí plastikační jednotky se použila směs polypropylénu a talku, aby se vyčistila a nezůstali tam zbytky předchozího materiálu.



Obrázek 53 Použité přípravky pro vstřikování

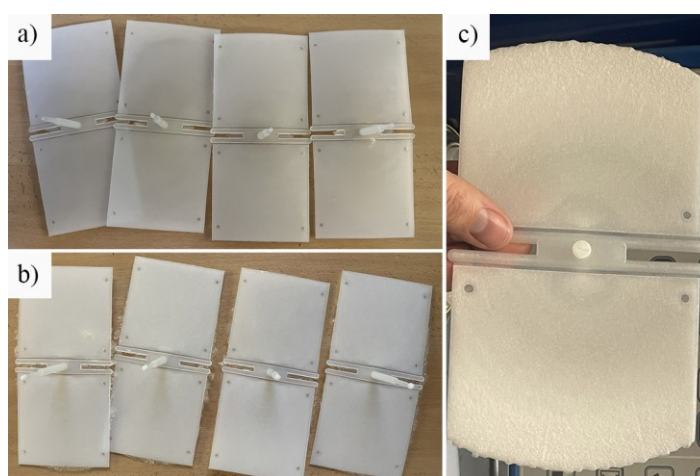
a) separační prostředek pro formy, b) čistící prostředek, c) mazací prostředek na vyhazovací systém

V Tabulce 13 jsou uvedeny procesní podmínky pro zpracování materiálu LDPE 770G s teplotním profilem podél šneku 220/210/190/180/170°C a teplotou formy 30°C.

Tabulka 13 Procesní podmínky vstřikování materiálu LDPE 770G

Označení vzorků	Čas plastifikace [s]	Čas plnění [s]	Rychlost vstřikování [mm/s]	Tlak vstřikování [MPa]	Dotlak [MPa]	Čas dotlaku [s]	Doba chlazení [s]
Vzorek 0	18,36	6,85	30	48	25	5	35
Vzorek 1	17,32	2,35	30	60	40	5	
Vzorek 2	17,34	3,82	10	60	5	3	

Na *Obrázku 54* jsou znázorněné vstřikované vzorky pro LDPE 770G, kdy se nejprve vstřikoval čistý materiál, za účelem optimalizace procesních podmínek, stejně jak to probíhalo u technologie vytlačování. U vstřikování se vzorky pěn připravovali pouze se 2 hmot. Procenty. U vzorku 1 se zvýšeným dotlakem na 40 MPa (*Obrázek 54 b*) tavenina zatekla do všech rohů a povrch vypadal podobně jako v případě čistého LDPE. U vzorku 2 (*Obrázek 54c*) byla dosažena požadovaná struktura pěny, i když tavenina nedotekla do všech rohů, kde tento proces je nutné ještě optimalizovat. Při porovnání procesních parametru Vzorku 1 a vzorku 2 zjistíme, že rychlost vstřikování byla trojnásobně snížena s výrazně nižší hodnotou dotlaku, což zase ovlivnilo nedotečení taveniny do všech rohů.



Obrázek 54 Vstřikované vzorky

a) vzorek s 0 hmot.% (vzorek 0), b) vzorek s 2 hmot.% (vzorek 1), c) vzorek s 2 hmot.% (vzorek 2)

• **Optimalizace vstřikování**

Pro optimalizaci technologie vstřikování pro LDPE 770G se dvěma procenty nadouvadla, by se mohla zkrátit doba chlazení, jelikož vyšší teplota formy, která bude delší dobu, umožní větší napětí materiálu.

Další možnou optimalizací pro dosažení lepší struktury pěny je snížení vstřikovacího tlaku a kratší doba dotlaku, kde tyto změny umožní větší napětí. Toto řešení sice může zlepšit strukturu pěn, ale negativně může ovlivnit zaplnění formy.

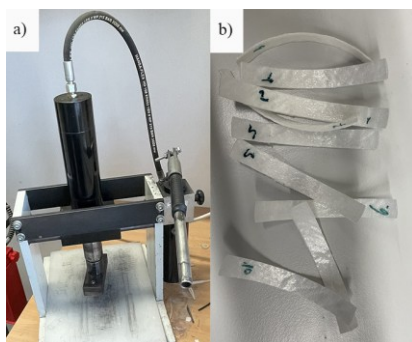
Poslední možností pro dosažení lepší struktury pěny a zatečení taveniny do všech rohů, je zvýšení teplotního profilu podél šneku, jelikož je možnost, že nadouvadlo nemělo dostatečnou teplotu a čas reagovat a vytvořit tak požadovanou strukturu pěny.

9 CHARAKTERIZACE VLASTNOSTÍ CHEMICKY LEHČENÝCH STRUKTUR

Vlastnosti připravených lehčených vzorků z PE a PLA polymerních směsí vyrobených pomocí technologií vytlačování a vstřikování, jsou charakterizovány následujícími analýzami.

9.1 Hustota

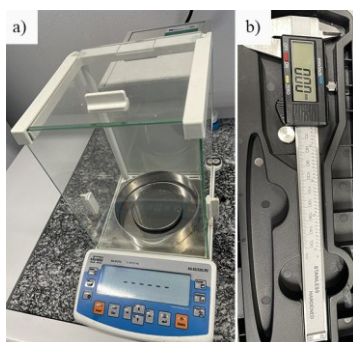
Měření hustoty probíhalo přímou metodou na vzorcích o rozměrech 10 x 80 mm připravených pomocí vysekávacího lisu. (Obrázek 55).



Obrázek 55 Vysekávání vzorků

a) vysekávací lis, b) vysekané vzorky

Měření tloušťky bylo provedeno použitím posuvného měřítka od firmy Stainless Hardened, které má rozsah měření 0–150 mm a rozlišení 0,01 mm (Obrázek 56b). Vážení probíhalo na laboratorní váze od firmy Radwag s rozlišením 0,01/0,1 mg (Obrázek 56a).



Obrázek 56 Přístroje použité pro měření hustoty

a) laboratorní váha, b) posuvné měřítko

Po zvážení všech vzorků byla pomocí posuvného měřítka změřena jejich tloušťka a určena její průměrná hodnota a směrodatná odchylka.

Za účelem zjištění objemu lehčených vzorků byly změřeny jejich délky a šířky. Následně se z těchto hodnot vypočítala hustota a podíl dutin.

- Výpočet objemu:

$$V = d \cdot \bar{s} \cdot \bar{x}_t \quad (7)$$

, kde d je délka, $\bar{s}$ je šířka a $\bar{x}_t$ je průměrná tloušťku vzorku

Pro výpočet objemu se použila šířka, délka a průměr hodnot z měřené tloušťky. Výsledek vyšel v milimetrech krychlových, který byl nutný převést pro další výpočet.

- Výpočet hustoty:

$$\rho = \frac{\bar{x}_m}{V} \quad (8)$$

, kde $\bar{x}_m$ je průměrná hmotnost, V je objem.

- Výpočet podílu dutin:

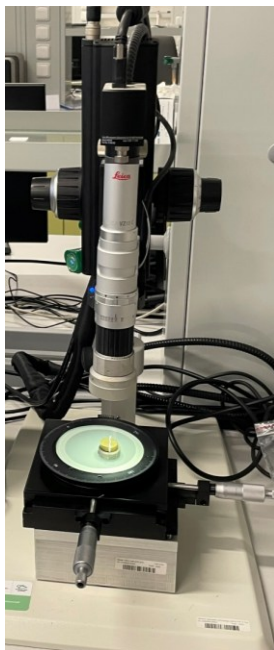
$$V_f = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p} \right) \quad (9)$$

, kde ρ_f je hustota vzorku s nadouvadlem, ρ_p je hustota vzorku bez nadouvadla.

Následně byl definován podíl dutin v jednotkách procent, vypočítaný jako poměr hustoty vzorku s nadouvadlem k hustotě vzorku čistého polymeru.

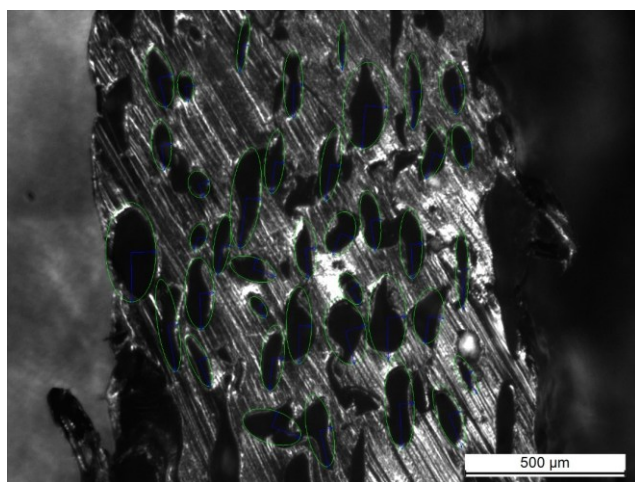
9.2 Pórovitost

Analýza pórovitosti vzorků, byla provedena na optickém mikroskopu Leica VZ80 C (Obrázek 57) s využitím softwaru Las v 4.8.



Obrázek 57 Optický mikroskop Leica

Pro následné vyhodnocení struktury lehčených vzorků byly použity programy NIS-Elements AR 5.20.00 a MS Excel. Vyhodnocení pórovitosti bylo provedeno pomocí programu NIS-elements, kde byly jednotlivé póry popisovány pomocí elips (Obrázek 58) a následně tyto data byly vyhodnoceny v programu MS Excel jako poměr delší a kratší osy elipsy.



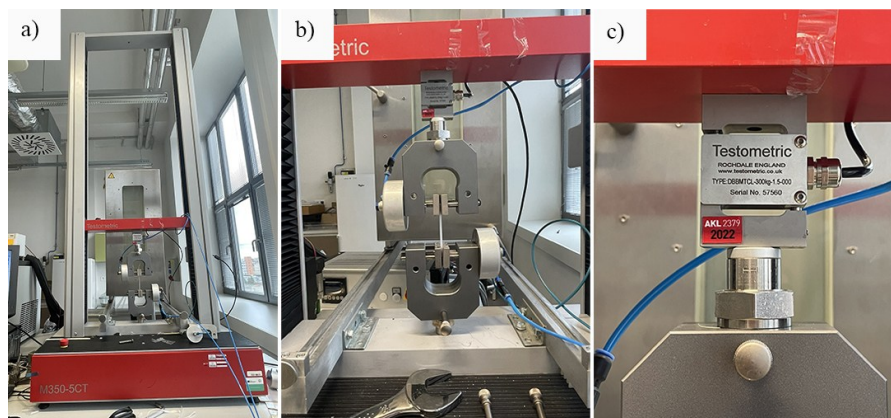
Obrázek 58 Vyhodnocení pórovitosti pomocí programu NIS – Elements AR.

9.3 Mechanické vlastnosti pěn

Mechanické vlastnosti lehčených struktur byly zjišťovány pomocí statické a dynamické metody.

9.3.1 Statická mechanická zkouška v tahu

Statická mechanická zkouška v tahu proběhla na univerzálním zkušebním stroji Testometric MT 350-5CT. Pro tahovou zkoušku byly použity pneumatické čelisti a zátěžový snímač, který má měřicí rozsah až 300 kg (Obrázek 59). Tahová zkouška byla provedena v programu Win Test analyzis.



Obrázek 59 Univerzální trhací stroj pro tahovou zkoušku

a) univerzální zkušební stroj Testometric MT 350-5CT, b) čelisti pro upnutí vzorku, c) použitý senzor 300 kg

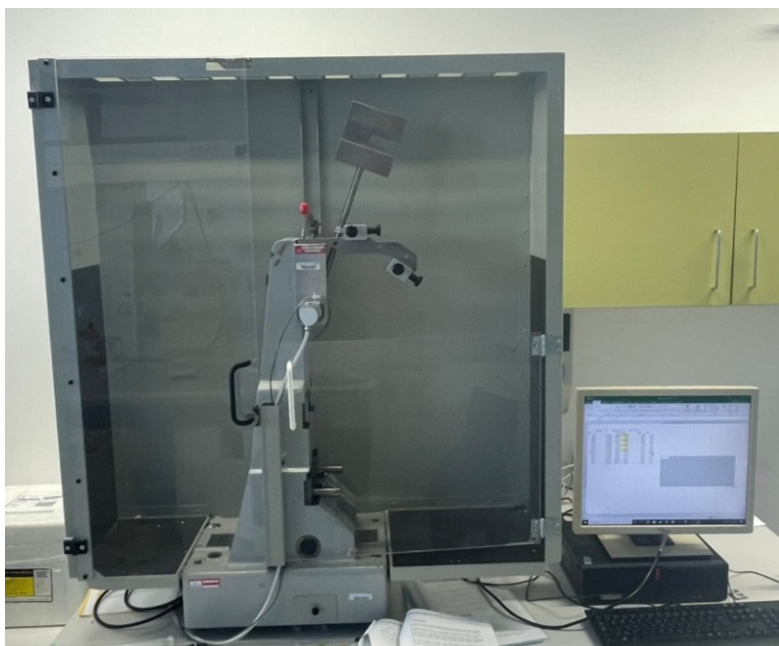
Tahová zkouška probíhala ve dvou fázích, kde první fáze byla využita k definování Youngova modulu a byla měřena při rychlosti posuvu 1 mm/min do 3 % poměrného prodloužení vzorku. Následně byla rychlost posuvu zvýšena na 300 mm/min a trvala až do přetržení vzorku.

9.3.2 Dynamická mechanická zkouška – rázová houževnatost

Pro zjištění dynamických mechanických vlastností bylo použito rázové kladivo Zwinck 5113 s použitým kladivem 15 J (Obrázek 60). Rázová houževnatost byla vyhodnocována jen pro PLA vzorky, jelikož LDPE vzorky byly příliš houževnaté, a nedocházelo k přeražení vzorku. Testování rázové houževnatosti bylo provedeno podle normy ISO 180. Rázovou houževnatost vzorku lze vypočítat z následujícího vzorce:

$$a_{iu} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (10)$$

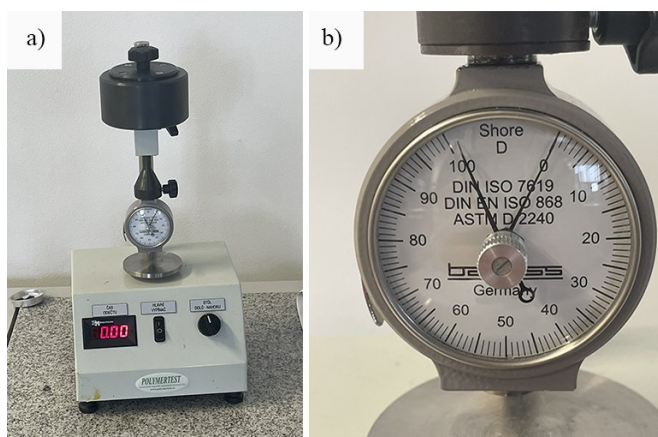
, kde: a_{iu} – rázová houževnatost [kJ/m²], E_c – korigovaná energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělíska [J], h – tloušťka tělíska [mm], b – šířka tělíska [mm].



Obrázek 60 Charpyho kladivo

9.4 Tvrdost

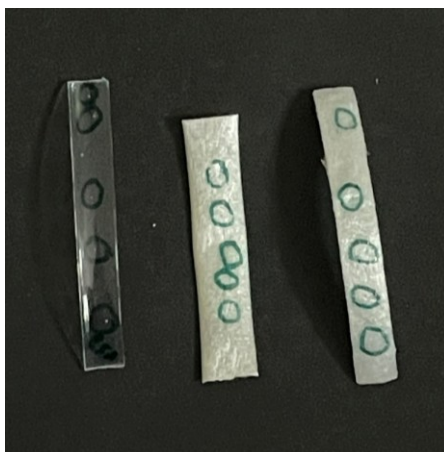
Tvrdost vzorků byla měřena podle normy ČSN ISO 7619-1. Typ tvrdoměru se volil dle stupnice. Jelikož při použití Shore A hodnoty tvrdosti vzorků překračovaly na stupnici hodnotu 90, byla tvrdost vzorků měřena dle Shore D (*Obrázek 61*).



Obrázek 61 Tvrdoměr

a) přístroj k měření tvrdosti, b) tvrdoměr Shore D

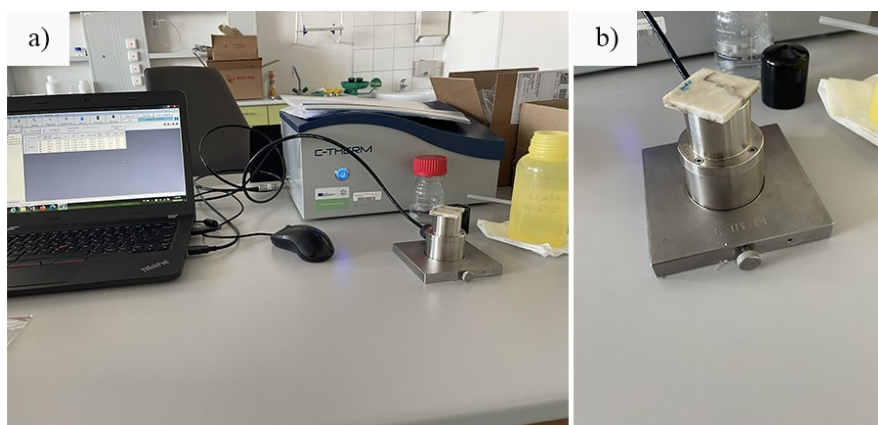
Na *Obrázku 62* je znázorněný postup měření tvrdosti vzorku, kde se tvrdost měřila pomocí hrotu, který se zabodl do zakroužkované oblasti.



Obrázek 62 Pozice měření tvrdosti na vzorcích

9.5 Součinitel tepelné vodivosti

Tepelná vodivost materiálů, která se vyjadřuje hodnotou součinitele tepelné vodivosti v jednotkách W/mK, se měřila pomocí analyzátoru tepelné vodivosti C-Therm technologies, TCI (Obrázek 63). Naměřená data se následně vyhodnocovala v programu MS excel.

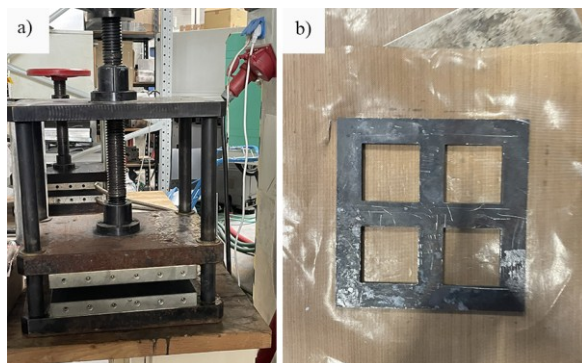


Obrázek 63 Analyzátor tepelné vodivosti

a) Zařízení pro měření tepelné vodivosti, b) senzor pro měření tepelné vodivosti

- **Příprava vzorků**

Příprava vzorků probíhala na ručním lisu, s použitím lisovacího rámečku s dutinami o rozměrech 35x35x3 mm Pro LDPE byla zvolena teplota lisování 135°C a pro PLA teplota 180°C.



Obrázek 64 Lisování vzorků pro tepelnou vodivost

a) Rušní lis s topnými deskami, b) Rámeček pro výrobu destiček

10 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ANALÝZ

V následující kapitole jsou uvedeny výsledky pro jednotlivé charakteristiky polymerních pěn, vyrobené technologiemi vytlačování a vstřikování.

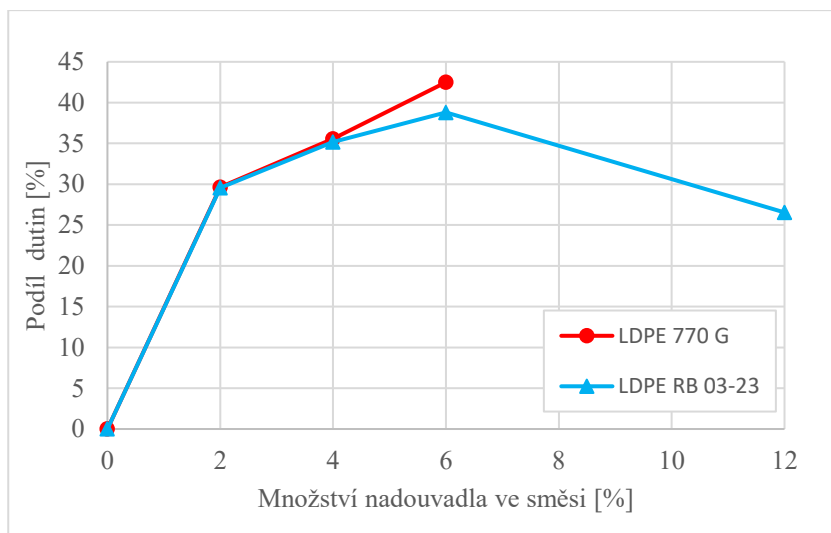
10.1 Stanovení hustoty lehčených struktur

Hustota pro LDPE se měřila na deseti vzorcích, z kterých byla následně vytvořena průměrná hodnota se směrodatnou odchylkou. (*Tabulka 14*).

Tabulka 14 Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorky LDPE, plněné nadouvadlem o rozměrech tělíska 80x10 mm

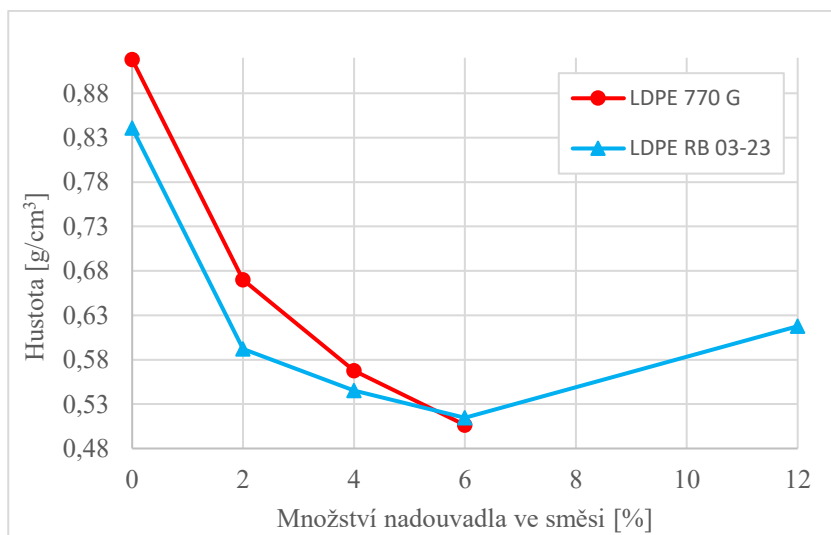
Materiál	Množství nadouvadla [%]	Průměrná hmotnost [g]	Průměrná tloušťka vzorku [mm]	Vypočtená hustota vzorku [g/cm ³]	Podíl dutin [%]
LDPE 770G	0	0,64±0,03	0,91±0,04	0,918	0
	2	0,67±0,02	1,35±0,01	0,620	29,6
	4	0,57±0,01	1,26±0,02	0,568	35,6
	6	0,61±0,02	1,51±0,40	0,506	42,5
LDPE RB 03-23	0	0,78±0,05	1,16±0,08	0,841	0
	2	0,80±0,02	1,74±0,03	0,592	29,6
	4	0,79±0,04	1,80±0,09	0,545	35,2
	6	0,73±0,02	1,76±0,11	0,515	38,8
	12	1,10±0,08	2,23±0,11	0,618	26,6

Za účelem přehlednějšího srovnání stupně napěnění vzorků byl zaveden parametr Podíl dutin vyjádřený v procentech a definovaný jako poměr mezi hustotou napěněného vzorku a hustotou čistého vzorku bez nadouvadla. Z výsledných hodnot Podílu dutin (*Tabulka 14* a *Obrázek 65*) je zřejmé, že zvyšováním množství nadouvadla ve směsi LDPE 770G dochází k nárůstu dutin až o téměř 43 % (6 hmot.% nadouvadla). V případě LDPE s nižším indexem toku taveniny je nárůst dutin nižší, a to necelých 39 %. V případě vyššího plnění (12 hmot.% nadouvadla) dochází k poklesu podílu dutin (27 %), způsobeného pravděpodobně borcením lehčené struktury ihned při výstupu z vytlačovací hlavy, z důvodu přesycení směsi nadouvadlem.



Obrázek 65 Závislost podílu dutin na množství nadouvadla ve směsi

Srovnání změny hustoty dvou různých typů LDPE směsí v závislosti na množství nadouvadla lze pozorovat na *Obrázku 66* trend hustoty vychází z parametru podíl dutin. Tedy vidíme, že s rostoucím množstvím nadouvadla má hustota klesající trend. V případě LDPE RB 03-23 lze pozorovat velmi prudký pokles hustoty mezi nenapěněným a napěněným vzorkem (2 hmot.% nadouvadla). Je zřejmé, že přidávání dalšího množství nadouvadla do směsi má smysl pouze do množství 6 hmot.%. Vyšší hodnoty plnění již nezaručují žádané další snižování hustoty.



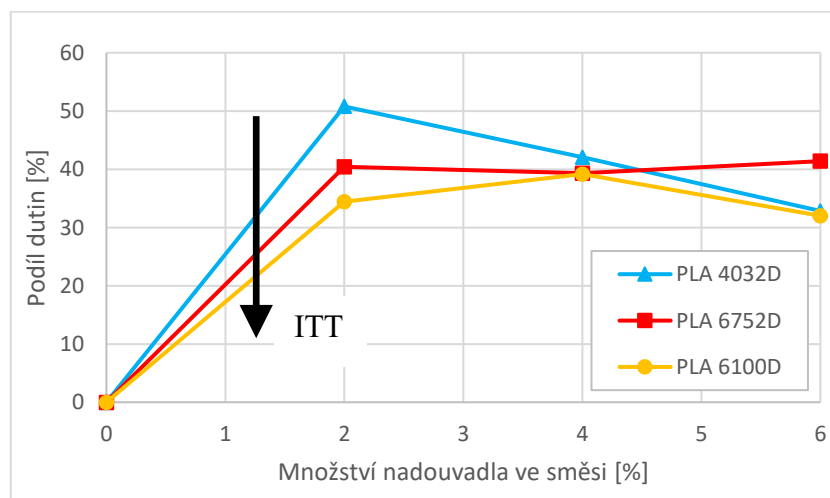
Obrázek 66 Graf hustoty v závislosti na množství nadouvadla v LDPE směsi

Obdobný postup vyhodnocení stupně napěnění byl aplikován i v případě PLA vzorků. (*Tabulka 15*).

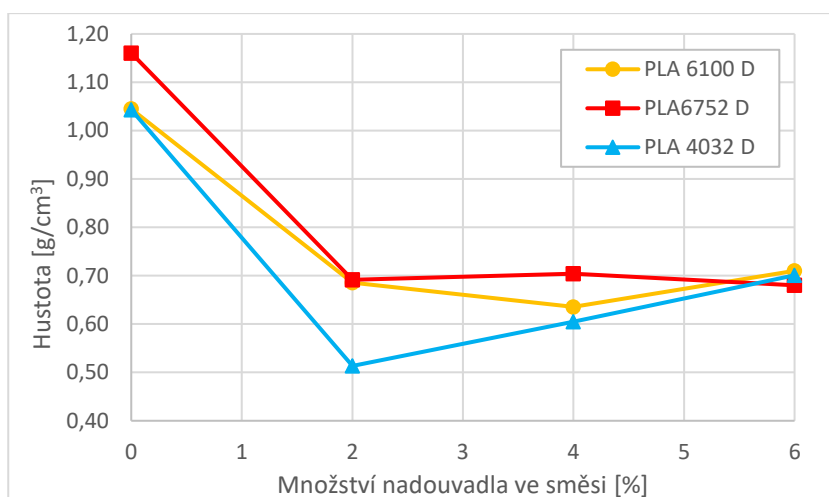
Tabulka 15 Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorky PLA , plněné nadouvadlem o rozměrech 80x10 mm

Materiál	Množství nadouvadla [%]	Průměrná hmotnost [g]	Průměrná tloušťka vzorku [mm]	Vypočtená hustota vzorku [g/cm ³]	Podíl dutin [%]
PLA 4032D	0	0,66±0,02	0,88±0,07	1,043	0
	2	0,74±0,02	1,80±0,04	0,513	50,8
	4	0,84±0,03	1,74±0,07	0,605	42,0
	6	1,09±0,04	1,94±0,09	0,701	32,8
PLA 6752D	0	1,01±0,03	1,09±0,06	1,161	0
	2	0,81±0,01	1,47±0,07	0,692	40,4
	4	0,94±0,06	1,66±0,10	0,704	39,3
	6	0,95±0,02	1,74±0,06	0,680	41,4
PLA 6100D	0	0,95±0,01	1,32±0,04	1,045	0
	2	0,88±0,04	1,60±0,08	0,685	34,4
	4	1,56±0,17	3,07±0,11	0,636	39,2
	6	1,25±0,15	2,20±0,28	0,710	32,0

Z vyhodnocení podílu dutin je zřejmé (Obrázek 67), že použitím 2 hmot.% nadouvadla ve směsi dochází s rostoucím indexem toku taveniny (PLA 4032D < PLA 6752D < PLA 6100D) k poklesu stupně napětí vzorků, a to z 50ti % na 34 %. Z výsledků uvedených v Tabulce 15 a Obrázku 67 PODÍL DUTIN i HUSTOTA je zřejmé, že do 2 hmot.% plnění nadouvadlem u všech tří typů PLA dochází k poklesu hustoty. Avšak, při dalším vyšším plnění dochází v případě PLA 4032D k negativnímu opětovnému nárůstu hustoty, v případě PLA 6752 se hustota již dále nemění, stejně tak i v případě PLA 6100. Zaznamenaný pokles podílu dutin ve struktuře PLA 4032D při vyšším plnění je pravděpodobně způsoben borcením struktury z důvodu nízké pevnosti taveniny.



Obrázek 67 Závislost podílu dutin na množství nadouvadla ve směsi



Obrázek 68 Graf hustoty v závislosti na množství nadouvadla v LDPE směsi

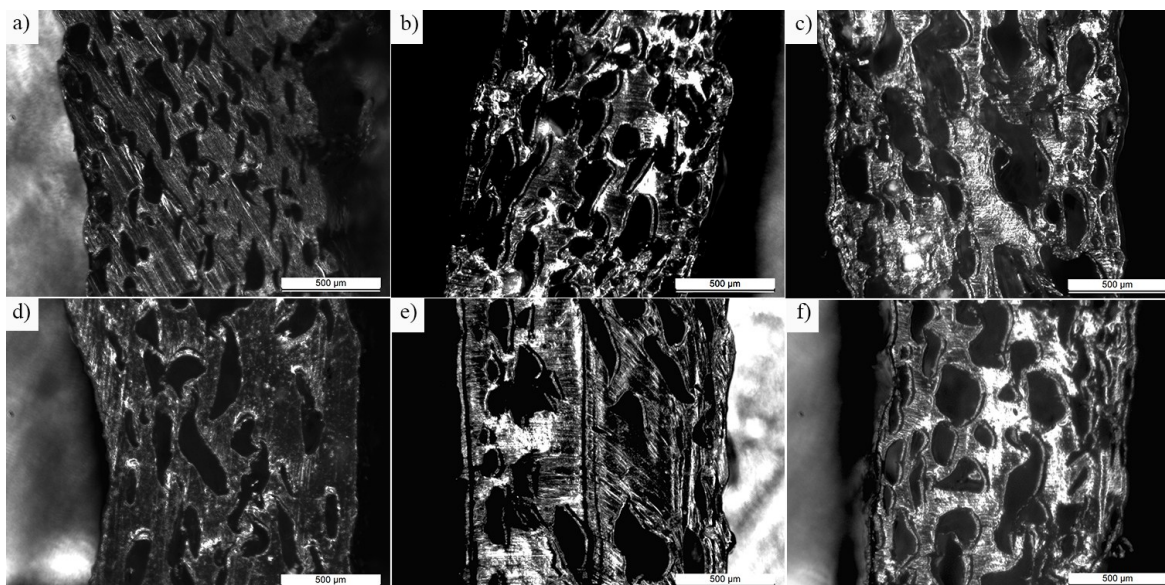
Obdobný postup vyhodnocení stupně napěnění byl aplikován i v případě napěněného LDPE 770G vzorku technologií vstřikování. (Tabulka 16). Hustota čistého LDPE 770G vyšla obdobně jako u vytlačování a s porovnání s materiálovým listem se skoro neliší. Při porovnání polymerních pěn (2 hmot. % nadouvadla) lze říci, že hustota klesá s procesními podmínkami.

Tabulka 16 Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorky LDPE, plněné nadouvadlem o rozměrech 80x10 mm, vyrobené procesem vstřikování

Označení vzorku	Průměrná hmotnost [g]	Průměrná tloušťka [mm]	Hustota [g/cm³]	Podíl dutin [%]
Vzorek 0	2,08±0,01	2,83±0,01	0,921	0
Vzorek 1	2,10±0,01	2,90±0,02	0,904	1,9
Vzorek 2	1,80±0,30	2,88±0,03	0,795	13,7

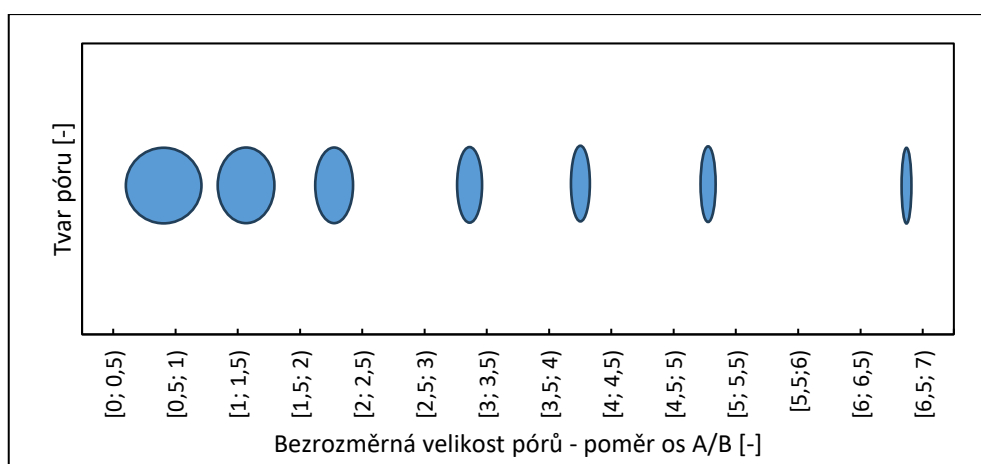
10.2 Mikroskopická analýza lehčených struktur

Na Obrázku 69 jsou znázorněny mikroskopické snímky pro LDPE s přidavkem nadouvadla F20 v množství 2, 4 a 6 hmot.%. Při porovnání pěn se dvěma procenty nadouvadla je vidět, že póry u LDPE RB 03-23 jsou větší a nesymetricky rozmístěné. Naopak, v případě LDPE 770G pěn jsou póry menší a dá se říct, že i symetricky rozmístěné. Obdobně lze říct i v případě pěn s množstvím nadouvadla 4 hmot.%. Avšak, při 6 hmot.% nadouvadla ve směsi jsou homogenněji rozmístěné póry ve struktuře více patrné v případě materiálu RB 03-23.



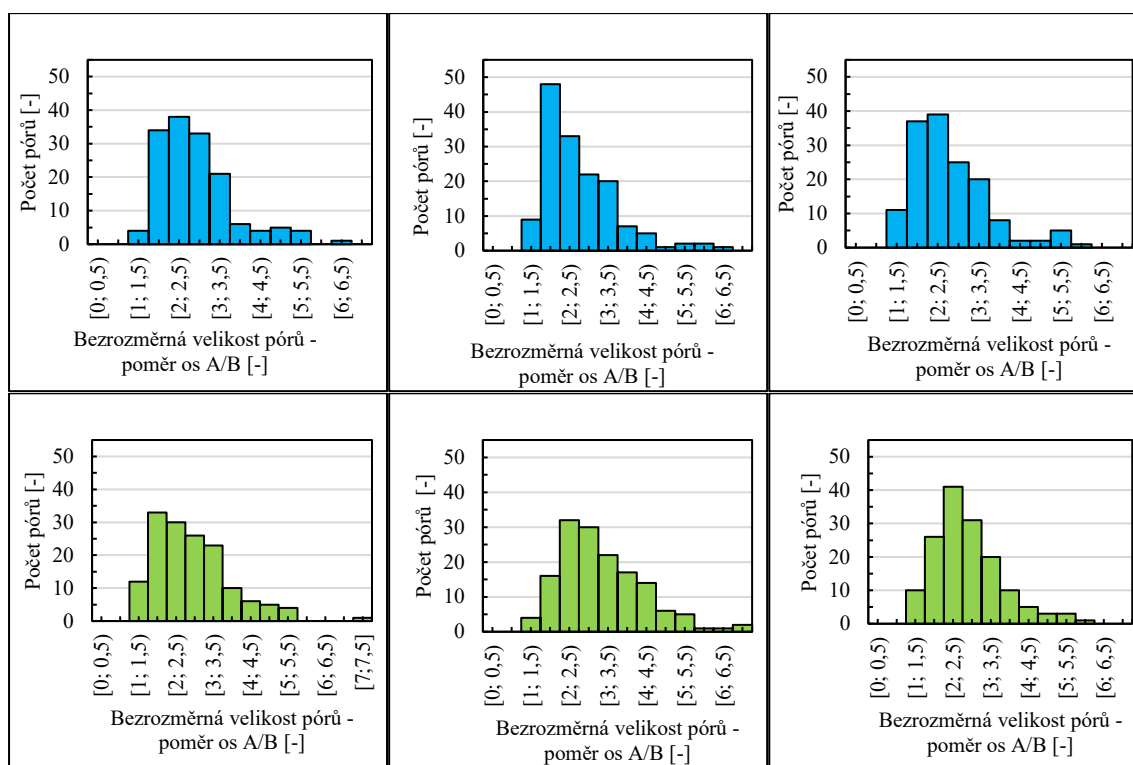
Obrázek 69 Mikroskopické snímky polymerních pěn z LDPE 770G (horní řada) a LDPE RB 03-23 (dolní řada) s přidavkem nadouvadla F20 v množství 2 hmot.% (vlevo), 4 hmot.% (uprostřed) a 6 hmot.% (vpravo).

Analýza velikosti pórů byla provedena jejich proložením elipsou definovanou dlouhou osou A a krátkou osou B. Následně poměr os A a B definuje četnost pórů ve struktuře v uvedených intervalech. Obecně, velikosti elips (pórů) v daných intervalech četnosti jsou znázorněny na Obrázku 70.



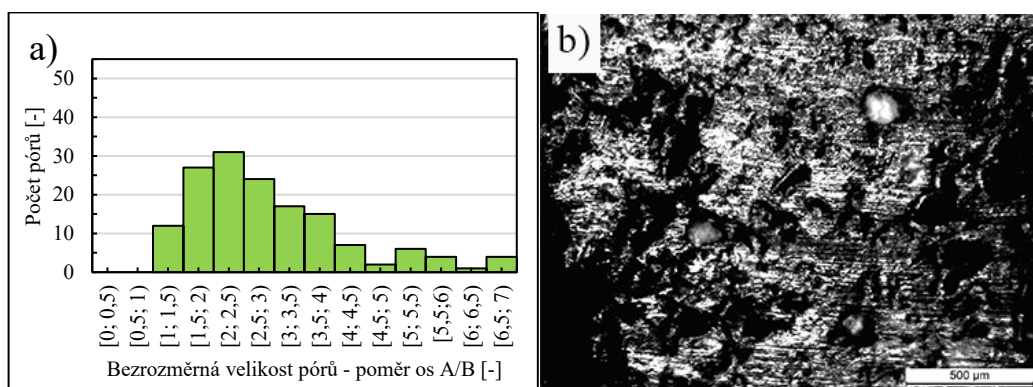
Obrázek 70 Tvary pórů (elips) v daných intervalech četnosti

Četnost pórů ve struktuře vzorku je vyjádřena pomocí histogramů (Obrázek 71) v intervalech definovaných jako poměr dlouhé a krátké osy elipsy, kterou je pór popsán. Z výsledků lze pozorovat, že užší distribuce pórů se vyskytuje v případě vzorků LDPE 770G (vyšší index toku taveniny), a to především při plnění nadouvadlem v množství 2 a 4 hmot.%. Každý z uvedených histogramů pro LDPE se vyhodnocoval ze 150 elips, ručně zaznamenaných na snímcích z mikroskopu.



Obrázek 71 Histogramy polymerních pěn z LDPE 770G (horní řada) a LDPE RB 03-23 (dolní řada) s přidavkem nadouvadla F20 v množství 2 hmot.% (vlevo), 4 hmot.% (uprostřed) a 6 hmot.% (vpravo).

V případě 12 hmot.% nadouvadla v LDPE RB 03-23 (Obrázek 72) je na mikroskopickém snímku vidět, že póry jsou roztahané a soudržné v jedné části. V pravém horním rohu je také vidět neroztavená granule nadouvadla. Vedle mikroskopického snímku je znázorněný histogram, na kterém je vidět, že distribuce velikosti pórů je značně širší než při nižším dávkování nadouvadla a navíc, v oblasti velkých rozměrů pórů (pravá část histogramu) je mnohem vyšší četnost pórů než v předešlých případech.

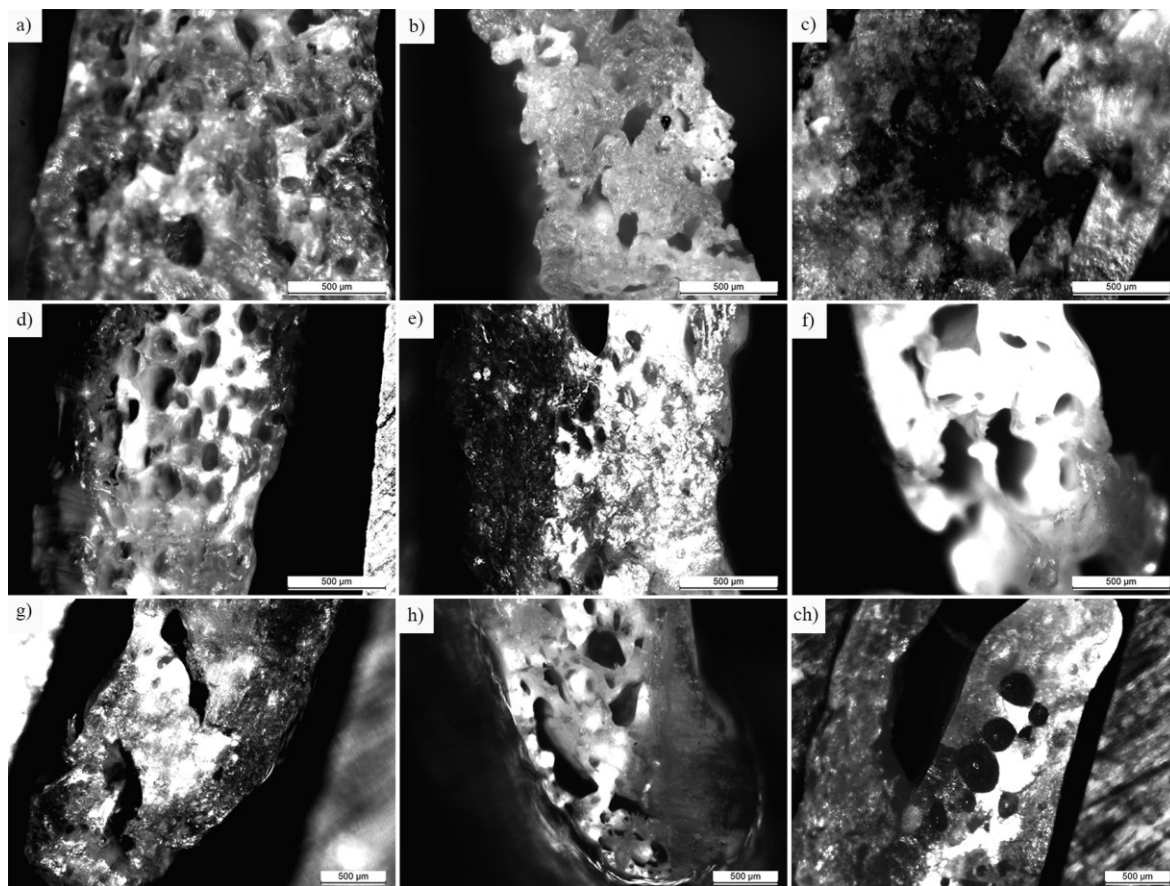


Obrázek 72 Polymerní pěna z LDPE RB 03-23 s přidavkem nadouvadla v množství 12 hmot.%

a) Histogram, b) Mikroskopický snímek

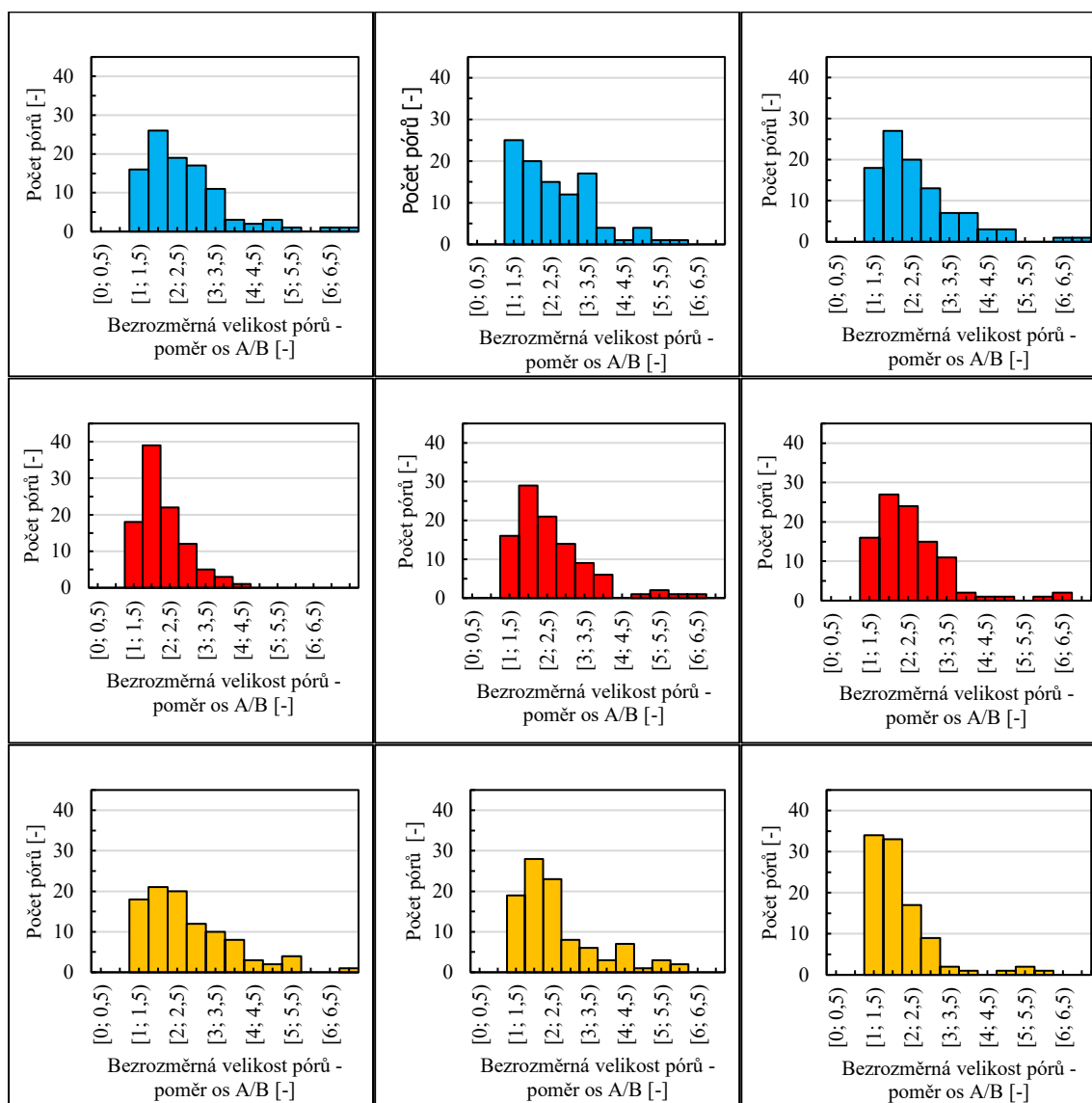
Na Obrázku 73 jsou vyobrazené mikroskopické snímky pro polymerní pěny z PLA s různými přísadami nadouvadla F20, které jsou poskládané pod sebou se stejným poměrem. Při

porovnání prvního sloupce, tedy se dvěma procenty nadouvadla vidíme, že symetricky rozložené póry se vyskytují v případě PLA 6752D (prostřední obrázek). Největší póry pro 2 hmot.% nadouvadla vznikly pro typ 6100D. U 4 hmot.% nadouvadla vidíme, že póry jsou v poměru větší, kromě typu PLA 6100D, kde póry v porovnání s 2 hmot.% jsou menší.



Obrázek 73 Mikroskopické snímky polymerních pěn z PLA 4032D (horní řada), PLA 6752D (prostřední řada) a PLA 6100D (dolní řada) s přidavkem nadouvadla F20 v množství 2 hmot.% (vlevo), 4 hmot.% (uprostřed) a 6 hmot.% (vpravo).

Každý z uvedených histogramů (Obrázek 74) pro PLAse vyhodnocoval ze 100 elips, které byly ručně získány z mikroskopických snímků. Z těchto histogramů vyplývá, že celkově rovnoměrně rozložené póry lze pozorovat ve struktuře vzorků z PLA 6752D. V případě PLA 6100D lze říci, že póry jsou naopak nejvíce nerovnoměrně rozložené.



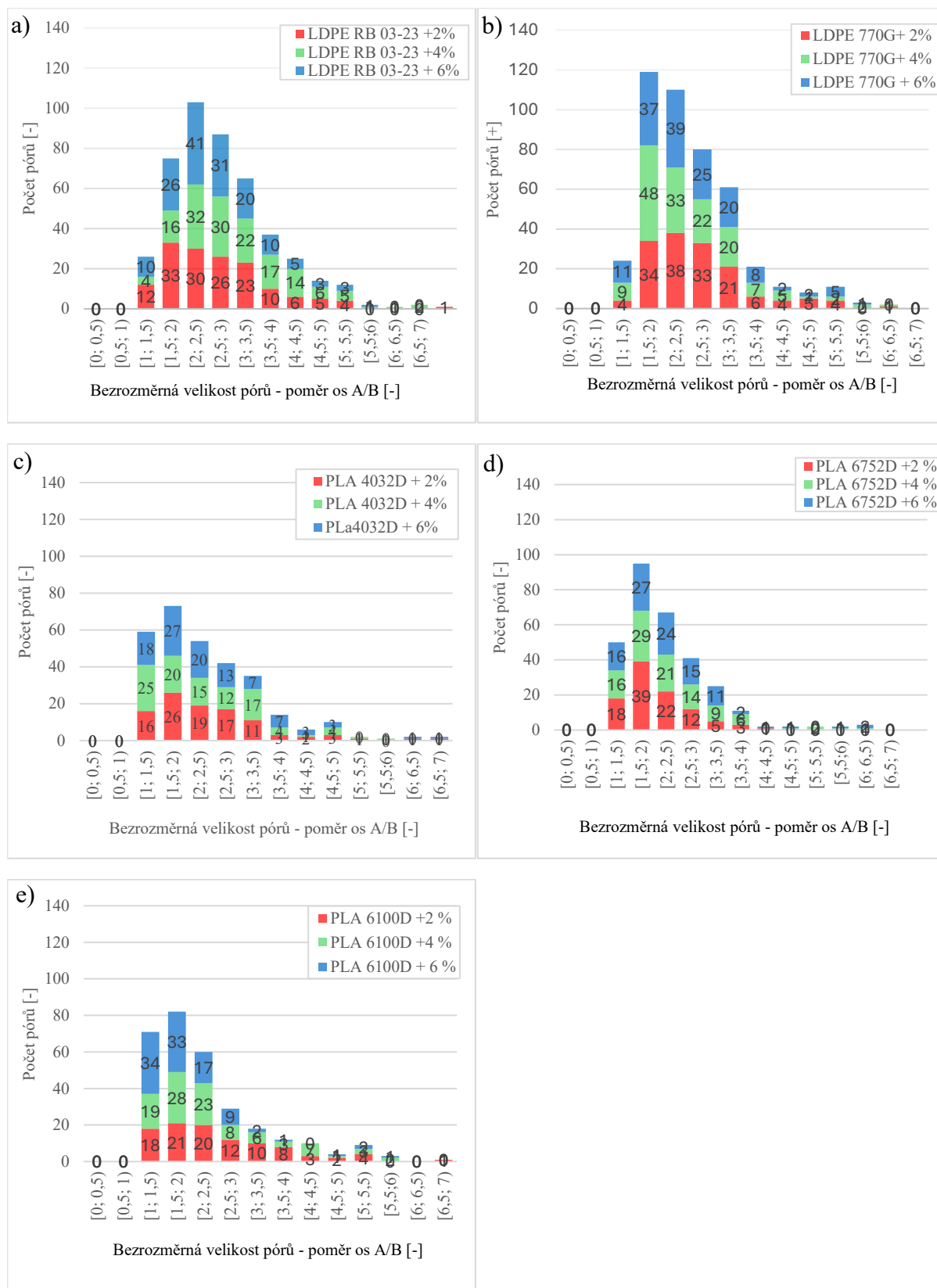
Obrázek 74 Histogramy polymerních pěn PLA 4032D (horní řada), PLA 6752D (prostřední řada) a 6100D (dolní řada) s přidavkem nadouvadla F20 v množství 2 hmot.% (vlevo), 4 hmot.% (uprostřed) a 6 hmot.% (vpravo).

V Tabulce 17 jsou uvedené průměrné hodnoty se směrodatnou odchylkou pro všechna měření, z kterých byl následně vypočítán obsah elipsy. Z této tabulky, lze vyčíst, že největší obsah, a tedy i největší pórovitost dosahuje LDPE RB 03-23 se dvěma procenty nadouvadla a PLA 6100D se dvěma a čtyřmi procenty nadouvadla.

Tabulka 17 Vyhodnocení pórovitosti

Materiál	Množství nadouvadla [%]	Osa A [μm]	Osa B [μm]	Poměr os A/B [-]	Vypočítaný obsah [μm^2]
LDPE 770 G	2	98 $\pm$ 34	38 $\pm$ 12	2,67 $\pm$ 0,94	11699
	4	110 $\pm$ 46	46 $\pm$ 19	2,55 $\pm$ 1,21	15896
	6	133 $\pm$ 71	55 $\pm$ 25	2,52 $\pm$ 0,91	19525
LDPE RB 03-23	2	143 $\pm$ 61	60 $\pm$ 31	2,66 $\pm$ 1,02	26955
	4	127 $\pm$ 61	42 $\pm$ 25	3,59 $\pm$ 2,73	17954
	6	121 $\pm$ 50	50 $\pm$ 25	2,62 $\pm$ 0,89	19007
	12	86 $\pm$ 56	30 $\pm$ 17	3,23 $\pm$ 1,83	8105
PLA 4032D	2	100 $\pm$ 76	43 $\pm$ 28	2,49 $\pm$ 1,17	13509
	4	62 $\pm$ 38	27 $\pm$ 16	2,52 $\pm$ 1,55	5259
	6	68 $\pm$ 61	29 $\pm$ 30	2,65 $\pm$ 2,59	6195
PLA 6752D	2	71 $\pm$ 22	37 $\pm$ 13	2,04 $\pm$ 0,63	8253
	4	73 $\pm$ 35	33 $\pm$ 19	2,48 $\pm$ 1,40	7568
	6	88 $\pm$ 57	40 $\pm$ 32	2,30 $\pm$ 0,98	11058
PLA 6100D	2	127 $\pm$ 111	52 $\pm$ 42	2,60 $\pm$ 1,46	20747
	4	121 $\pm$ 191	55 $\pm$ 64	2,50 $\pm$ 1,35	20907
	6	85 $\pm$ 119	45 $\pm$ 49	1,95 $\pm$ 0,88	12017

Na *Obrázku 75* jsou shrnuty četnosti výskytů všech pórů (v případech plnění nadouvadlem ve 2, 4 a 6 hmot.%) v jednotlivých intervalech pro každý materiál zvlášť. Je zřejmé, že nejužší celkovou distribuci četnosti všech pórů vykazuje materiál PLA 6752D. Naopak, nejširší distribuci vykazuje materiál LDPE RB 03-23.

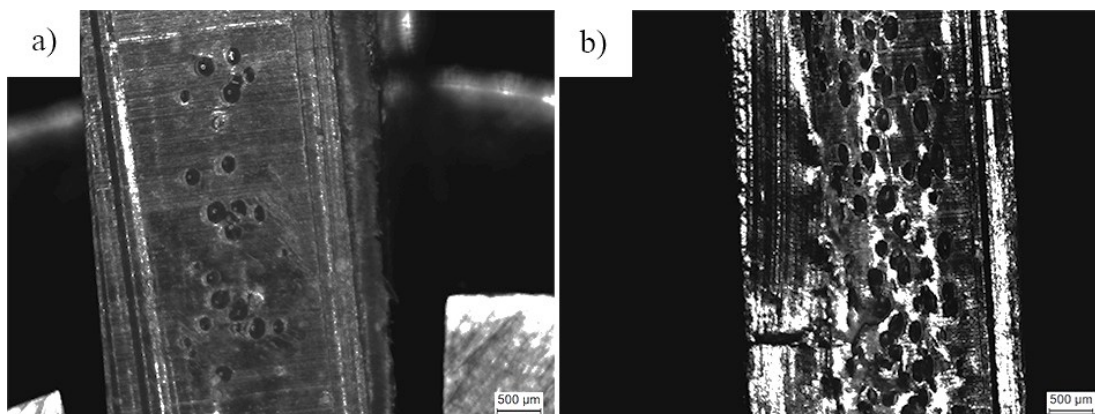


Obrázek 75 Porovnání pórovitosti u jednotlivých materiálů

a) LDPE RB 03-23, b) LDPE 770G, c) PLA 4032D, d) PLA 6752D, e) PLA 6100D

V případě procesu vstřikování, proběhlo vyhodnocování pórovitosti stejným způsobem jako při výše uvedeném vyhodnocování procesu vytlačování. Z mikroskopických snímků, uvedených na

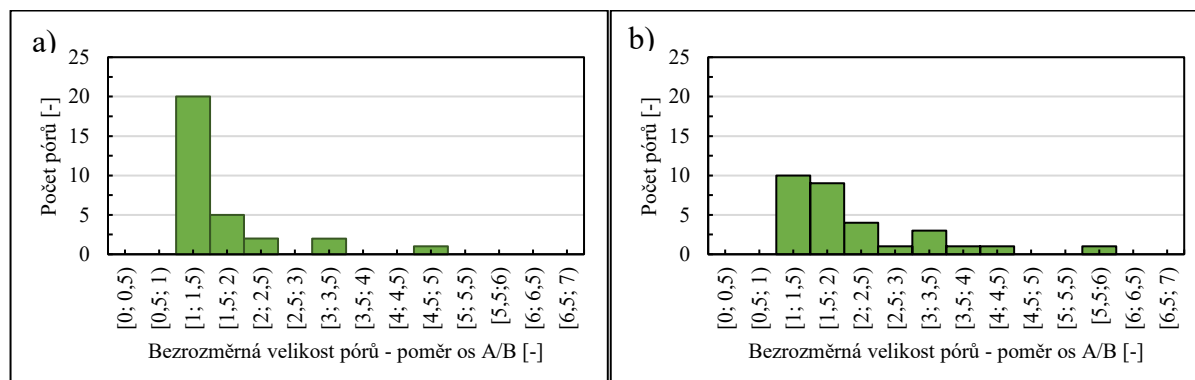
Obrázku 76 lze říci, že póry u vstřikovaných výrobků jsou malé a rovnoměrně rozložené. Na některých snímcích vidíme, jednotlivé vrstvy materiálu. Při porovnání snímku a) a snímku b) vidíme, že u druhého snímku jsou póry rovnoměrně rozložené. Rozdíl mezi vzorky spočívají v rozdílných procesních podmínkách, a to u vzorku 2 je trojnásobně nižší rychlost vstřikování s nižším dotlakem.



Obrázek 76 Mikroskopické snímky vzorků připravených technologií vstřikování

a) Vzorek 1, b) Vzorek 2

Na Obrázku 77 jsou znázorněné histogramy pórovitosti pro vzorky vyrobené procesem vstřikování. Při porovnání jednotlivých histogramů vidíme, že jednotlivé vzorky mají různé zastoupení pórů. V případě Vzorku 1.



Obrázek 77 Histogram pórovitosti vzorků připravených technologií vstřikování

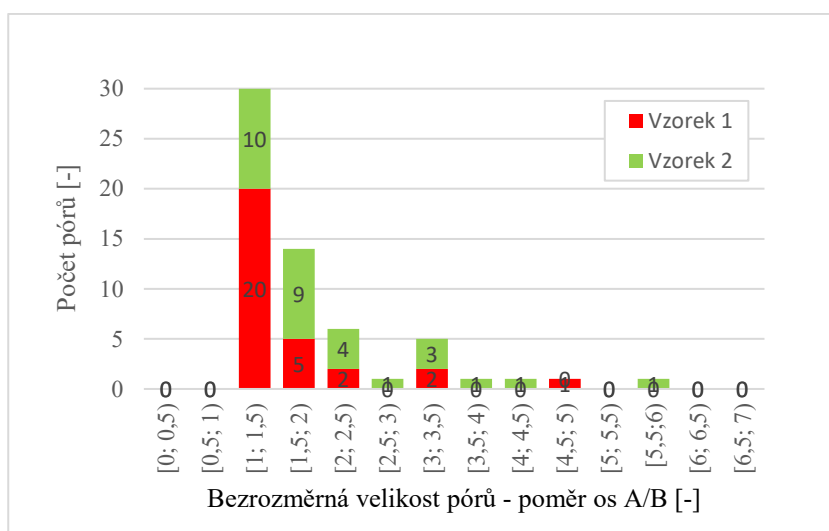
a) Vzorek 1, b) Vzorek 2

V Tabulce 18 jsou uvedené průměrné hodnoty se směrodatnou odchylkou, které byly získány ze všech změřených hodnot elips. Následně ze změřených hodnot elips byly vypočítán jejich obsah. Největší pórovitost je u Vzorek 1, a to jak z pohledu vypočteného obsahu, tak i z rozměrů os elips.

Tabulka 18 Vyhodnocení pórovitosti pro vstřikování

	Osa A [μm]	Osa B [μm]	Poměr os A/B [-]	Obsah [μm ²]
Vzorek 1	158±82	103±35	1,58±0,78	51277
Vzorek 2	180±66	90±22	2,14±1,07	50646

Na *Obrázku 77* můžeme v grafu porovnat jednotlivé vzorky a jejich pórovitost v intervalu velikosti pórů. Nejpočetnější interval pórovitosti vzorků připravených procesem vstřikování je 1-1,5.



Obrázek 78 Porovnání pórovitosti vzorků připravených technologií vstřikování

10.3 Analýza mechanických vlastností lehčených struktur

Mechanické vlastnosti polymerních pěn, vyrobené technologiemi vytlačování a vstřikování, byly charakterizovány z pohledu tahové zkoušky a rázové houževnatosti. U tahové zkoušky byl zjišťován Youngův modul a další výsledky jsou uvedené v následujících kapitolách.

10.3.1 Analýza vlastností staticky namáhaných lehčených struktur

V *Tabulce 19* jsou znázorněny průměrné hodnoty se směrodatnou odchylkou pro naměřené data. Měření tahové zkoušky se vyhodnocovalo na deseti vzorcích. Tahová zkouška probíhala ve dvou fázích rychlostí zkoušky, a to nejprve při rychlosti 1 mm/min do hodnoty prodloužení 3 % a následně zvýšení rychlosti zkoušky na 300 mm/min. Z hodnot Youngova modulu pružnosti v tahu při rychlosti 1 mm/min vidíme, že tento modul při větším plnění nadouvadla klesá, a to téměř na polovinu neplněného polymeru. Když Youngův modul klesá, znamená to, že je pěna měkčí, pružnější a méně tuhá. Stejný trend lze vidět i v případě napětí při přetržení. Naopak, v případě poměrného prodloužení

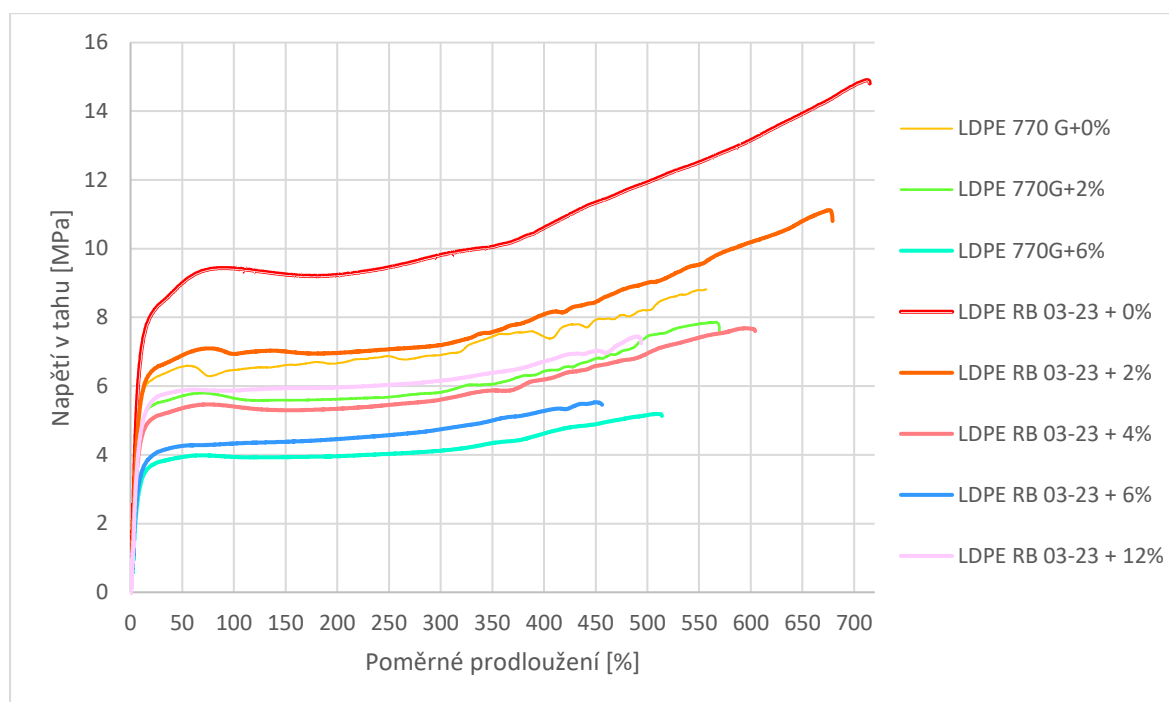
dochází s rostoucím množstvím nadouvadla (2 hmot.%) k nárůstu dloužení, avšak při dalším zvýšení množství nadouvadla prodloužení prudce klesá, a to výrazně pod hodnoty dloužení čistého materiálu.

Při porovnání použitých polymerů, lze říct, že větší pevnost má LDPE RB 03-23, jak nenaplněný, tak i plněný, avšak v případě dávkování 6 hmot.% nadouvadla se tyto materiály téměř dostanou na stejnou hodnotu. Přesto je Youngův modul u LDPE RB 03-23 vždy vyšší.

Tabulka 19 Vyhodnocení statické mechanické zkoušky v tahu pro LDPE

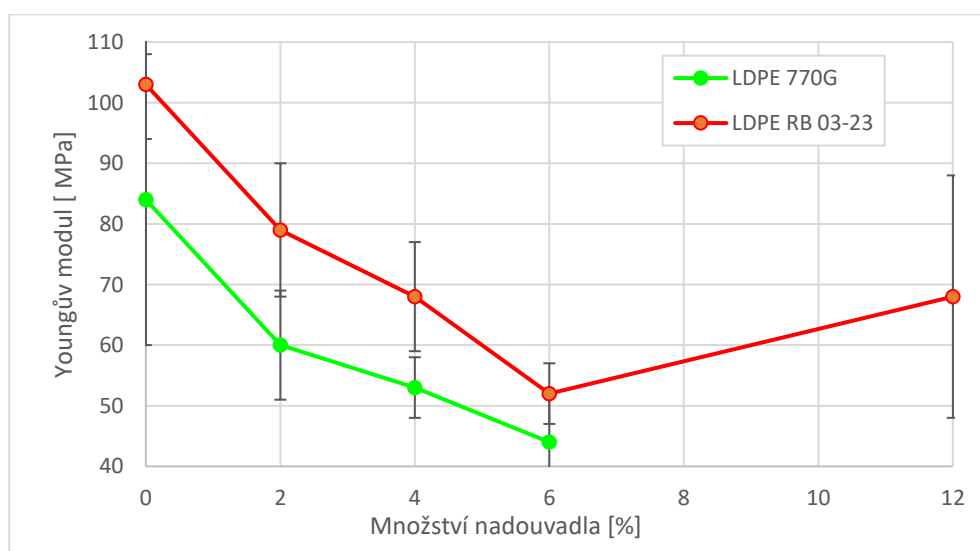
Materiál	Množství nadouvadla [%]	Youngův modul [MPa]	Napětí při přetržení [MPa]	Prodloužení [%]	Síla při přetržení [N]
LDPE 770G	0	84 ± 24	7,9 ± 2,2	460 ± 165	107 ± 28
	2	60 ± 9	6,0 ± 1,0	507 ± 49	105 ± 6
	4	53 ± 5	5,2 ± 0,5	372 ± 73	71 ± 8
	6	44 ± 8	4,4 ± 0,8	312 ± 124	76 ± 14
LDPE RB 03-23	0	103 ± 9	12,8 ± 1,2	560 ± 69	166 ± 15
	2	79 ± 11	9,9 ± 1,1	624 ± 48	153 ± 8
	4	68 ± 9	7,1 ± 0,7	495 ± 158	139 ± 16
	6	52 ± 5	4,9 ± 0,3	318 ± 83	95 ± 8
	12	68 ± 20	6,4 ± 0,9	281 ± 155	137 ± 20

Na *Obrázku 79* je znázorněný průběh tahové zkoušky, ve kterém je vždy uvedena jedna reprezentativní křivka zastupující danou směs s nadouvadlem. Lze zde vidět, že nejvyšší napětí při přetržení má LDPE RB 03-23 bez nadouvadla naopak nejmenší má LDPE 770G s přídavkem 6 hmot.% nadouvadla.



Obrázek 79 Průběh statické mechanické zkoušky v tahu při počáteční rychlosti 1mm/min s následným zvýšením na 300 mm/min. Vzorky LDPE plněné nadouvadlem 2-6% a 12%

Na Obrázku 80 je znázorněná zavislost Youngova modulu na množství nadouvadla 2 až 6 % a 12 %. Na této závislosti je vidět, že při zvýšení množství nadouvadla ve směsi dochází k poklesu modulu pružnosti v tahu. Avšak, v případě dalšího vyššího plnění nadouvadlem dochází k jeho opětovnému nárůstu.



Obrázek 80 Grafické znázornění Youngova modulu pružnosti v tahu v závislosti na množství nadouvadla ve směsi LDPE

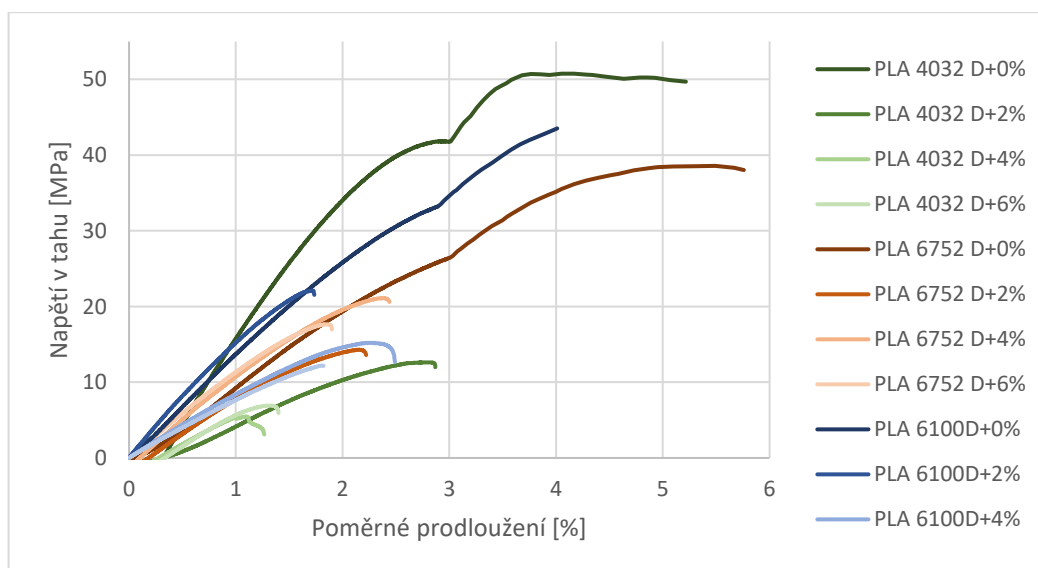
Tahová zkouška pro PLA probíhala ve dvou fázích tak, jak pro polyetylén. V Tabulce 20 jsou uvedeny průměry se směrodatnou odchylkou, které se vzaly z deseti měření pro danou směs PLA. Při porovnání Youngova modulu, lze z tabulky vyčíst, že nejvyšší hodnoty dosahuje typ 4032D bez

přídavku nadouvadla. U typu 6752D Youngův modul dosahuje přibližně stejné hodnoty pro napěněný polymer, stejně tak i pro čistý. U napětí při přetržení dosahuje největších hodnot rovněž čistý PLA 4032D. Největší pevnost z napěněných vzorků PLA dosahuje typ 6752D.

Tabulka 20 Vyhodnocení statické mechanické zkoušky v tahu pro PLA

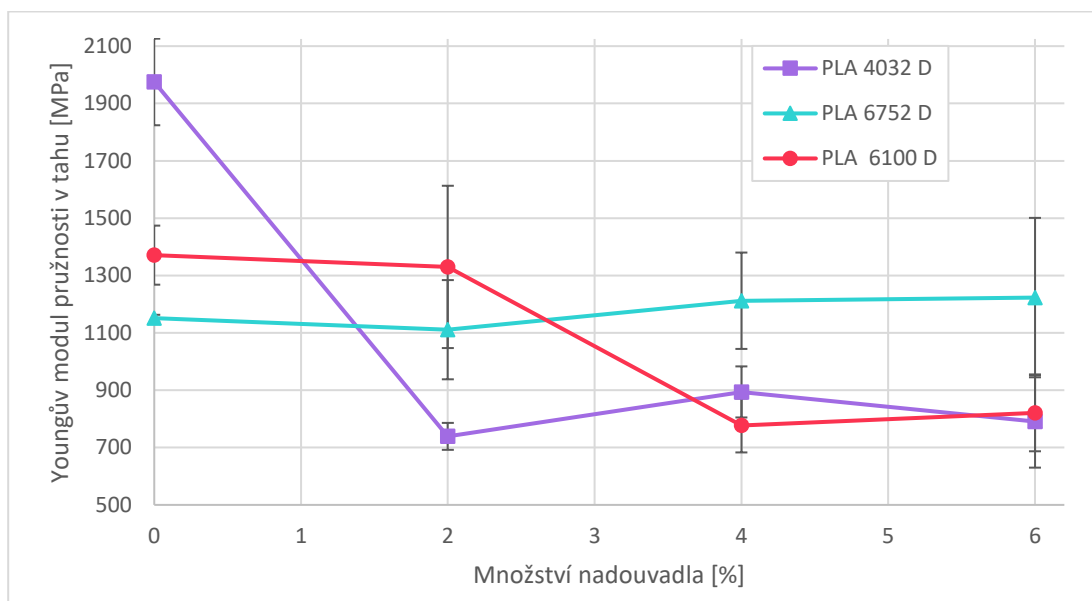
Materiál	Množství nadouvadla [%]	Youngův modul [MPa]	Napětí při přetržení [MPa]	Prodloužení [%]	Síla při přetržení [N]
PLA 4032D	0	1975±151	49±7	3,9±0,5	321±61
	2	739±47	12±0,2	2,5±0,1	219±11
	4	894±89	8±1,7	1,4±0,2	122±30
	6	791±161	6±1	1,2±0,2	100±16
PLA 6752D	0	1151±12	44±4	5,6±0,4	629±12
	2	1111±173	21±9	2,8±0,8	288±96
	4	1212±168	16±6	1,8±0,6	220±85
	6	1223±278	16±5	1,6±0,2	204±55
PLA 6100D	0	1371±103	43±3	3,9±0,2	584±25
	2	1330±283	17±6	1,4±0,4	198±63
	4	777±94	12±3	1,9±0,5	345±84
	6	821±134	10±3	1,3±0,3	201±52

Na Obrázku 81 je znázorněna tahová zkouška pro PLA s rychlostí 1 mm/min se kterou se vyhodnocoval Youngův modul pružnosti v tahu a při překročení prodloužení nad 3 % byla rychlost zkoušky zvýšena na 300 mm/min.. Na diagramu vidíme vždy jednu reprezentativní křivku z každé směsi. Jak v tabulce, tak i v diagramu je zřejmé, že nejvyšší pevnosti dosahuje PLA je 4032D, a to hodnoty 50 MPa.



Obrázek 81 Průběh statické mechanické zkoušky v tahu pro nižší rychlosti 1 mm/min, vzorky PLA s přídavkem nadouvadla od 2 do 6 hmot. %

V závislosti Youngova modulu na množství nadouvadla od 2 do 6 hmot.% (Obrázek 82), jsou znázorněny všechny použité PLA typy. V případě typu 4032D vidíme, že s přidavkem nadouvadla (2 hmot.%) modul prudce klesá a následně s rostoucím množstvím nadouvadla zůstává konstantní. V případě vzorku PLA 6752D lze pozorovat, že Youngův modul pružnosti v tahu není příliš závislý na množství nadouvadla ve směsi. V případě typu PLA 6100D vidíme, že s přidavkem 2% nadouvadla se modul pružnosti nemění, s dalším přidavkem nadouvadla prudce klesá.



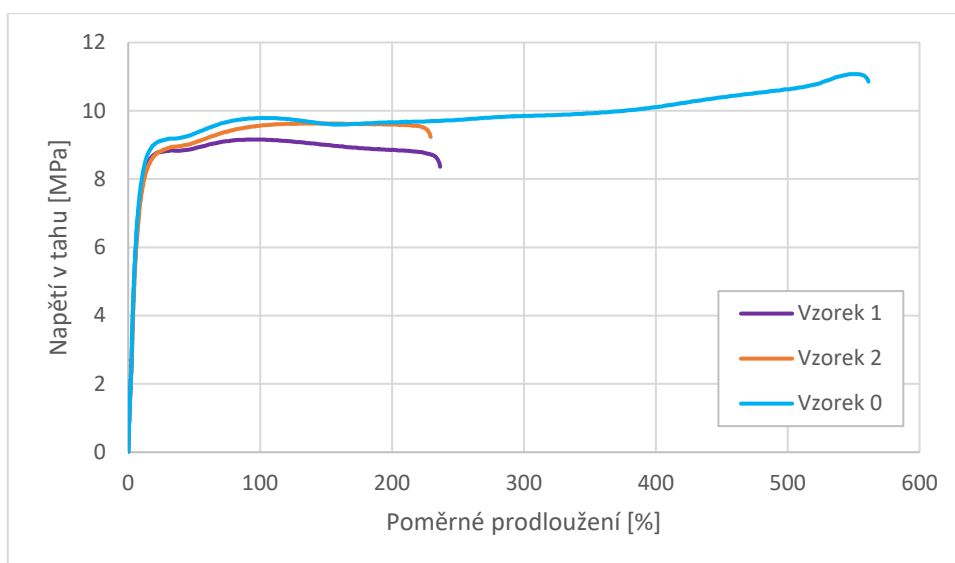
Obrázek 82 Znázornění Youngova modulu pružnosti v tahu v závislosti na množství nadouvadla

Zkouška tahem pro vstřikované výrobky probíhala rovněž ve dvou fázích rychlostí zkoušky, v první fázi probíhalo měření Youngova modulu při rychlosti 1 mm/min a při překročení prodloužení 1 % následovala vyšší rychlost, 300 mm/min. Charakteristické vlastnosti získané z tahové zkoušky jsou uvedeny v Tabulce 21.

Tabulka 21 Vyhodnocení statické mechanické zkoušky v tahu pro LDPE, vyrobené technologií vstřikování

Označení	Youngův modul [MPa]	Napětí při přetržení [MPa]	Prodloužení [%]	Síla při přetržení [N]
Vzorek 0	120 ± 4	10,5 ± 0,4	359 ± 170	300 ± 11
Vzorek 1	127 ± 4	9,2 ± 0,1	92 ± 1	270 ± 4
Vzorek 2	106 ± 20	8,5 ± 1,7	140 ± 70	247 ± 50

Průběh tahové zkoušky je znázorněn na Obrázku 83, kde vidíme, že největší napětí vydrží vzorek označený jako Vzorek 2. Největší poměrné prodloužení je u čistého materiálu LDPE 770G, který nese označení Vzorek 0.



Obrázek 83 Průběh statické mechanické zkoušky v tahu vzorků LDPE s přidavkem 2 hmot.% nadouvadla připravených technologií vstřikování

Při porovnání technologií, kterými byly vzorky vyrobené, lze vidět, že Youngův modul i napětí při přetržení je vyšší v případě vzorků připravených technologií vytlačování.

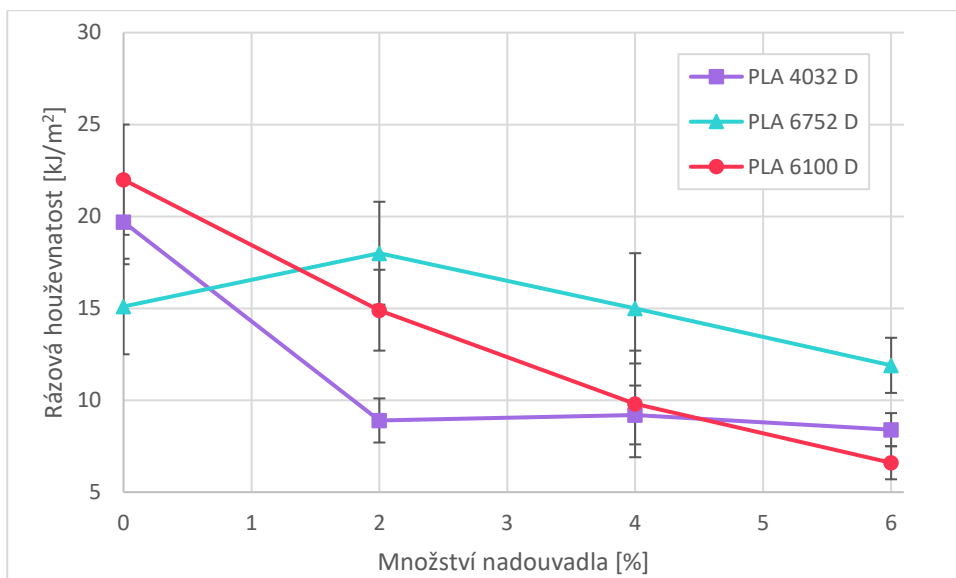
10.3.2 Analýza vlastností dynamicky namáhaných lehčených struktur

V Tabulce 22 jsou uvedeny průměry se směrodatnou odchylkou, které byly vypočítány dle normy ISO 2602. Vyhodnocení se provádělo podle uvedené normy, a to podle toho, jestli byl vzorek přeražen úplně (C), částečně (P) nebo nepřeražen (N). Rázová houževnatost byla prováděna na šesti vzorcích.

Tabulka 22 Vyhodnocení rázové dynamické zkoušky, vzorky plněné nadouvadlem 2-6 %

Materiál	Množství nadouvadla [%]	Rázová energie [J/m]	Rázová houževnatost [kJ/m]	Šířka vzorku B [mm]	Tloušťka vzorku H [mm]	Vyhodnocení
PLA 4032D	0	159±20	18,9±0,9	8,4±0,8	0,9±0,01	N
	2	91±13	8,9±1,2	10,2±0,3	2,0±0,1	C
	4	94±16	9,2±1,6	10,2±0,1	1,6±0,2	C
	6	72±10	8,4±0,9	8,9±0,6	1,9±0,2	C
PLA 6752D	0	160±28	15,1±2,6	10,6±0,2	1,4±0,1	C
	2	185±28	18,0±2,8	10,3±0,2	1,3±0,1	C
	4	159±30	15,4±3,0	10,4±0,2	1,4±0,1	C
	6	116±15	11,9±1,5	9,9±0,4	1,3±0,2	C
PLA 6100D	0	223±34	21,6±3,0	10,3±0,2	1,5±0,2	N
	2	152±21	14,9±2,2	10,2±0,4	1,4±0,1	C
	4	100±20	9,8±2,9	10,2±0,5	2,6±0,2	C
	6	69±10	6,6±0,9	10,4±0,2	2,2±0,3	C

Na *Obrázku 84* je znázorněná rázová houževnatost v závislosti na množství nadouvadla. U PLA 6100D vidíme, že s vyšším množstvím nadouvadla ve směsi rázová houževnatost lineárně klesá. U typu PLA 4032D po přidavku 2 hmot.% nadouvadla je zaznamenán prudký pokles houževnatosti, bez další změny při zvyšujícím se množství nadouvadla. V případě PLA 6752D je trend opačný než u 4032D, a to takový, že rázová houževnatost roste do 2 hmot.% nadouvadla a následně klesá.



Obrázek 84 Grafické znázornění rázové houževnatosti v závislosti na množství nadouvadla

10.4 Analýza tvrdosti lehčené struktury

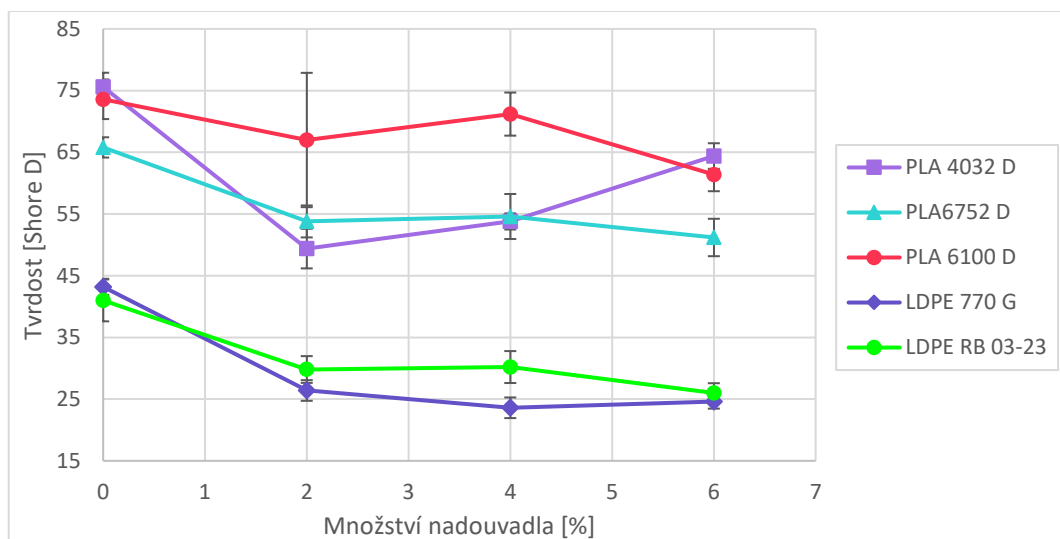
Výsledná průměrná tvrdost se směrodatnou odchylkou z pěti měření je uvedena v *Tabulce 23*. Při porovnání tvrdostí LDPE vzorků bez nadouvadla s tvrdostí vzorků LDPE s nadouvadlem je zřejmé, že změna tvrdosti vzorků po lehčení je nižší v případě vzorků LDPE RB 03-23. V případě PLA vzorků je změna tvrdosti největší u typu PLA 4032D, a to o více než 30 %, naopak, nejmenší změna tvrdosti je v případě typu PLA 6100D, přibližně o 15 %.

Tabulka 23 Průměrné hodnoty tvrdosti vzorků dle Shore D

Množství nadouvadla [%]	Tvrdost [Shore D]				
	LDPE 770G	LDPE RB 03-23	PLA 4032D	PLA 6752D	PLA 6100D
0	43,2±1,3	41,0±3,4	75,6±2,3	65,8±1,6	73,6±3,2
2	26,4±1,7	29,8±2,2	49,4±3,2	53,8±2,6	67,0±10,9
4	23,6±1,7	30,2±2,6	53,8±5,8	54,6±3,6	71,2±3,5
6	24,6±1,1	26,0±1,6	64,4±2,1	51,2±3,0	61,4±2,7
12		34,0±2,6			

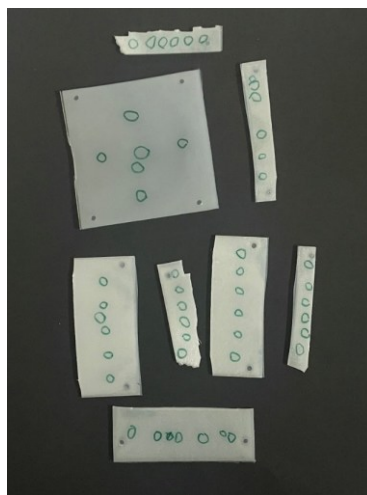
Závislost tvrdosti na množství nadouvadla je zobrazena na *Obrázku 85*, kde u LDPE vidíme, že s přidáním nadouvadla tvrdost dle Shore D prudce klesá a ustaluje se okolo hodnoty tvrdosti 23 až

30 Shore D. U PLA typů 6752D a 6100D s přidavkem nadouvadla tvrdost mírně klesá na hodnoty tvrdosti 51 a 60. U PLA typu 4032D je trend průběhu tvrdosti s přidavkem nadouvadla odlišný od předchozích typů PLA a to takový, že nejprve tvrdost prudce klesá s přidavkem nadouvadla do 2 hmot.% a následně roste až do hodnot blízkých tvrdosti čistého PLA 4032D.



Obrázek 85 Závislost tvrdosti dle Shore D na množství nadouvadla

Stejným způsobem se charakterizovala také tvrdost Shore D vzorků připravených technologií vstřikování. Postup měření zůstal stejný a počet měření se zvýšil na 6 (Obrázek 86).



Obrázek 86 Pozice měření tvrdosti vzorků pro vstřikování

V Tabulce 24 jsou uvedené průměrné hodnoty tvrdosti dle Shore D se směrodatnou odchylkou. Při porovnání jednotlivých vzorků zjistíme, že nejvyšší tvrdost pěn má vzorek s označením Vzorek 1.

Tabulka 24 Tvrdost vzorku LDPE dle Shore D

Označení vzorku	Tvrdost [Shore D]
Vzorek 0	47,2 ± 0,7
Vzorek 1	46,3 ± 0,5
Vzorek 2	36,8 ± 7,3

Při porovnání tvrdosti pro jednotlivé technologie vidíme, že tvrdší vzorky jsou z technologie vstřikování, což také dobře koreluje s výsledky hustot vzorků z těchto technologií.

10.5 Analýza tepelné vodivosti lehčené struktury

V Tabulce 25 jsou uvedené pro LDPE průměrné hodnoty se směrodatnou odchylkou pro naměřenou tepelnou vodivost, efuzivitu a vypočtenou tepelnou kapacitu, která byla vypočtená z následujícího vzorce:

$$C_p = \frac{e^2}{\lambda \cdot \rho} \quad (11)$$

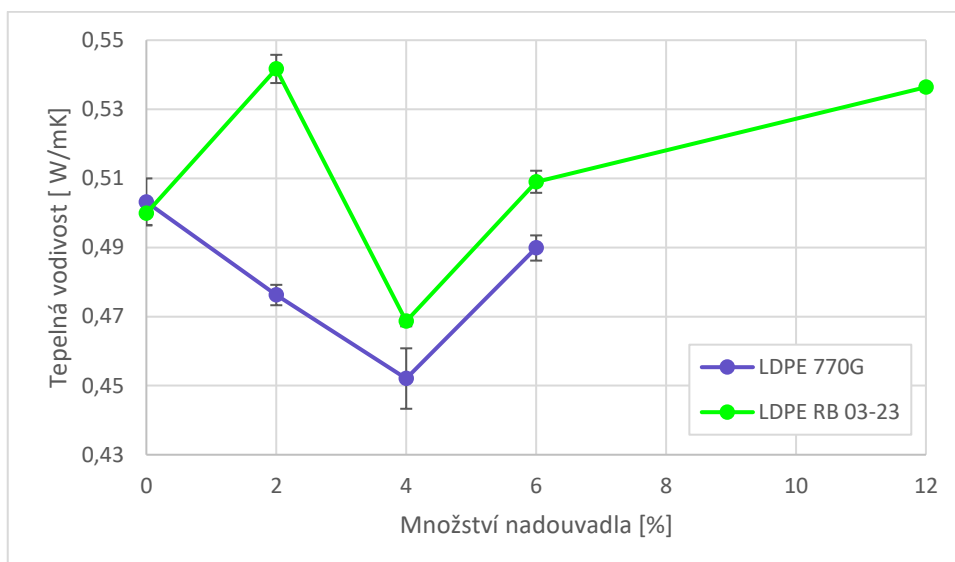
, kde: C_p je měrná tepelná kapacita [J/kgK], e – efuzivita [$W\sqrt{s/m^2K}$], λ – tepelná vodivost [W/mK], ρ – hustota vzorku [kg/m^3]

Tabulka 25 Naměřené a vypočtené hodnoty pro LDPE

Materiál	Množství nadouvadla [%]	Tepelná vodivost [W/mK]	Efuzivita [$W\sqrt{s/m^2K}$]	Měrná tepelná kapacita [J/kgK]
LDPE 770G	0	0,503±0,007	858±7	1661,2
	2	0,476±0,003	832±3	2344,4
	4	0,452±0,009	807±5	2150,2
	6	0,490±0,004	845±3	2566,3
LDPE RB 03-23	0	0,500±0,003	855±3	1739,0
	2	0,542±0,004	897±4	1721,2
	4	0,469±0,001	824±1	2447,3
	6	0,509±0,003	864±3	2690,9
	12	0,536±0,001	891±1	2873,7

Na Obrázku 87 je znázorněn součinitel tepelné vodivosti v závislosti na množství nadouvadla. U typu LDPE 770G vidíme, že s přidávkou nadouvadla součinitel klesá až do 4 %-tního plnění nadouvadlem. Následně vzrůstá téměř na původní hodnotu. V případě LDPE RB 03-23 má součinitel tepelné vodivosti kolísavý charakter, dokonce při 2 hmot.% nadouvadla je jeho hodnota vyšší než u čistého polymeru. Tyto trendy pravděpodobně ovlivňují póry, které jsou buď hustě uspořádány vedle sebe a brání odvodu tepla, nebo jsou řidce rozptýlené po vzorku. Také se v průběhu měření mohlo

stát, že se do místa měřicího senzoru umístil vzorek s velkým pórem a měření tak bylo nepřesné. U LDPE 770G se čtyřmi procenty nadouvadla lze říci, že tato pěna by mohla být použita jako izolant, jelikož nejméně vede teplo.



Obrázek 87 Závislost tepelné vodivosti na množství nadouvadla v LDPE

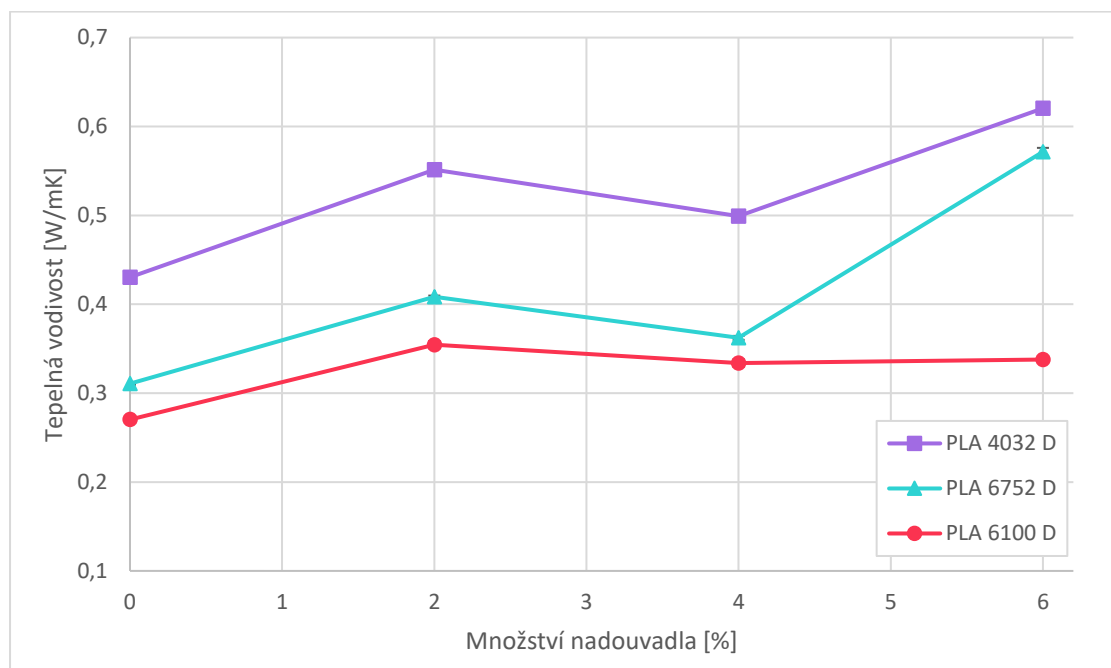
V Tabulce 26 jsou pro PLA uvedené průměrné hodnoty se směrodatnou odchylkou tepelné vodivosti, efuzivity a vypočtené tepelné vodivosti.

Tabulka 26 Naměřené a vypočtené hodnoty pro PLA

Materiál	Množství nadouvadla [%]	Tepelná vodivost [W/mK]	Efuzivita [$[W\sqrt{s/m^2K}]$]	Měrná tepelná kapacita [J/kgK]
PLA 4032D	0	0,430±0,004	786±4	1374,5
	2	0,551±0,003	906±3	2902,8
	4	0,499±0,005	854±5	2417,8
	6	0,620±0,005	973±5	2178,2
PLA 6752D	0	0,310±0,001	662±1	1217,2
	2	0,408±0,001	763±1	2063,9
	4	0,362±0,002	716±2	2009,9
	6	0,571±0,004	926±4	2205,6
PLA 6100D	0	0,270±0,002	620±2	1361,5
	2	0,354±0,004	708±4	2063,9
	4	0,334±0,004	687±5	2220,1
	6	0,338±0,002	691±2	1989,0

Na Obrázku 88 je grafické znázornění závislosti součinitele tepelné vodivosti na množství nadouvadla F20 pro PLA. U obou typů 4032D a 6752D vidíme podobný kolísavý trend, který se ale v porovnání s čistým PLA zvyšuje. U typu PLA 6100D se tepelná vodivost pěny s rostoucím

množstvím nadouvadla nejprve mírně zvyšuje a následně se s dalším nárůstem přídatku nadouvadla ustaluje.



Obrázek 88 Závislost tepelné vodivosti na množství nadouvadla u PLA

Při porovnání obou polymerů, které byly použity pro přípravu polymerní pěny je zřejmé, že lepším izolantem budou pěny z PLA, které dosahují nižších hodnot součinitele tepelné vodivosti. U PLA napěňování spíše zhoršuje tepelnou vodivost, jelikož vždy je součinitel tepelné vodivosti vyšší než při 0 hmot. % nadouvadla. Zatímco u LDPE součinitele tepelné vodivosti pěna snižuje, ale jen mírně.

ZÁVĚR

Hlavním cílem práce byla optimalizovaná příprava chemicky lehčených polyolefinových a polyesterových struktur kontinuálním a cyklickým procesem s následnou charakterizací jejich vlastností. V teoretické části jsou nejprve popsány použité polymerní materiály, příprava a technologie výroby lehčených pěn a následně jejich charakterizace v podobě hustoty, pórovitosti využitím optického mikroskopu, statické a dynamické mechanické vlastnosti a měření součinitele tepelné vodivosti.

Praktická část diplomové práce se nejprve zabývá charakterizací použitých materiálů z pohledu jejich tokových vlastností pomocí kapilárního reometru. Pro charakterizaci nadouvadla byla použita FTIR spektroskopie, ze které byla získána spektra a chemická složení. Použité nadouvadlo je složeno z několika chemických složek. Dle spektrálního projevu se jedná pravděpodobně o směs esterů a alkoholů. Navíc, na povrchu nadouvadla byl zjištěn povlak odpovídající glycerol monostearátu (či velmi podobnému esteru). Následně byly provedeny prvotní experimenty chování polymeru s nadouvadlem v malém objemu materiálu pomocí dvoušnekového mikrohnětiče. V dalším kroku byly procesem vytlačování připraveny lehčené vzorky s přídavkem nadouvadla od 2 do 6 hmot.%. V případě přípravy lehčených vzorků procesem vstřikováním byl aplikován pouze nejnižší přídavek nadouvadla (2 hmot.%) ve směsi na základě nejlepších výsledků z pohledu homogenity pórů ve struktuře a mechanických vlastností připravených pěn procesem vytlačování. Na takto připravených vzorcích byla provedena charakterizace vlastností lehčených struktur. Nejprve byla zjišťována hustota pomocí přímé metody. Následně byla zjišťována pórovitost využitím optického mikroskopu a programu NIS elements, mechanické statické zkoušky v tahu a mechanické dynamické zkoušky z pohledu rázové houževnatosti. Nakonec byla analyzována tvrdost a součinitel tepelné vodivosti lehčených struktur.

Z výsledků měření hustoty bylo zjištěno, že s rostoucím přídavkem nadouvadla dochází k snižování hustoty vzorku. Avšak, jakmile je překročeno optimální množství nadouvadla ve směsi (mezi 6 až 12 hmot.% nadouvadla) pak dochází k nárůstu hustoty borcením struktury, což je z pohledu lehčených struktur nežádoucím efektem.

Z výsledků mechanických vlastností lehčených vzorků je patrné, že index toku taveniny nemá výrazný vliv na mechanické vlastnosti. U obou případů LDPE s nárůstem množství nadouvadla klesá Youngův modul i napětí při přetržení. Avšak poměrné prodloužení nejprve naroste a s dalším zvýšením přídavku nadouvadla prudce klesá, a to výrazně pod hodnoty prodloužení čistého materiálu. Obdobně je to v případě vlastností PLA lehčených vzorků.

Rázová houževnatost byla analyzována pouze v případě PLA vzorků, z důvodu značné houževnatosti LDPE vzorků. Bylo zjištěno, že s rostoucím indexem toku taveniny použitých typů PLA dochází k výraznému poklesu rázové houževnatosti lehčených PLA vzorků s rostoucím přídatkem nadouvadla ve směsi.

Z výsledků tvrdosti lehčených vzorků je patrné, že v případě LDPE lehčených vzorků nemá index toku taveniny vliv na změnu tvrdosti lehčené struktury s rostoucím množstvím přídatku nadouvadla ve směsi. V případě PLA lehčených vzorků je zřejmé, že PLA typ s nejnižším indexem toku taveniny vykazuje se zvyšujícím se přídatkem nadouvadla rostoucí trend tvrdosti. Naopak, PLA typ s nejvyšším indexem toku taveniny vykazuje klesající trend tvrdosti. Technologií vstřikování bylo dosaženo vyšší tvrdosti lehčených vzorků než technologií vytlačování.

V případě analýzy součinitele tepelné vodivosti lehčených struktur LDPE bylo zjištěno, že pokles vodivosti je velmi mírný. Nejlépe se lehčená struktura jako izolant chová při použití 4 hmot.% nadouvadla ve směsi. V případě PLA lehčených vzorků se jako izolant více chovají vzorky připravené z PLA typu s vyšším indexem toku taveniny, kdy dosahují nejnižších hodnot součinitele tepelné vodivosti.

Pokud někdo bude na tuto diplomovou práci navazovat, bylo by vhodné připravit lehčené vzorky pro vstřikování ve stejném množství nadouvadla jako v případě procesu vytlačování, aby bylo možné tyto technologie mezi sebou lépe porovnat. Dále by byla možnost využití jiného dostupného typu nadouvadla s jeho rozkladem při vyšší teplotě, což by umožnilo využití vyššího teplotního profilu podél šneku k zajištění lepšího toku materiálu či použití materiálu s vyšší teplotou tání, například polypropylenu či polyethylentereftalátu. U technologie vytlačování bych doporučil použití vodou chlazeného kalibru za hlavou, k eliminaci nežádoucího zprohýbání některých lehčených vzorků. Bylo by také zajímavé srovnání kvality lehčené struktury, pokud by vstupní materiály (polymer a nadouvadlo) nebyly promíchány pouze ručně v kbelíku, ale byly by kompaundovány pomocí dvoušnekového vytlačovacího zařízení, a to při teplotách pod teplotou rozkladu nadouvadla. Nevýhodou by mohlo být, že by tímto způsobem byl vstupní materiál teplotně dvakrát namáhán, což může vést k jeho možné tepelné degradaci a zhoršení tokových vlastností.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Handbook of polymer Foams, 2004. Shawbury, Shawbury, UK: Rapra technology. ISBN 1-85957-388-6.
- [2] SHAU-TARNG LEE, 2016. *Polymeric Foams*. Online. Taylor & Francis Group. ISBN 9781315369365. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781315369365>. [cit. 2025-02-03].
- [3] *Polyurethane Foam Association: automotive component using foam*. Online. In: . Dostupné z: https://www.pfa.org/wpcontent/uploads/2022/05/caroverview.jpg?fbclid=IwY2xjawIAPeNleHRuA2FlbQIxMAABHB273G7BCKtMbeVJsTQ8X4HjQXB8Q9FEkHElcXaHAYOA2A916L0_U3K5vQ_aem_ESbTNm8ksr3uJhQrBNm0kg. [cit. 2025-01-24].
- [4] KISSIN, Yury V., 2020. *Polyethylene – End-Use Properties and Their Physical Meaning (2nd Edition)*. Online. 2. Hanser Publishers. ISBN 978-1-5231-4505-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?SWn8nN86>. [cit. 2025-01-05].
- [5] MORRIS, Barry A., 2022. *Science and Technology of Flexible Packaging - Multilayer Films from Resin and Process to End Use (2nd Edition)*. Online. Elsevier. ISBN 978-0-323-85574-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?mG8diEyR>. [cit. 2025-01-05].
- [6] WANG, Weiyu and ZENG, Yiming, 2020. *Polypropylene – Polymerization and Characterization of Mechanical and Thermal Properties*. Online. Intechopen. ISBN 978-1-83880-416-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.73995>. [cit. 2025-01-05].
- [7] KARGER-KOCSIS, József and BÁRÁNY, Tamás, 2019. *Polypropylene Handbook – Morphology, Blends and Composites*. Online. Springer Nature. ISBN 978-3-0301-2903-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?ZKMZJTLf>. [cit. 2025-01-05].
- [8] WEISS, Viktorie and ŠTRÍHAVKOVÁ, Elena, 2014. *Polymery*. Online. Skripta. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, Fakulta výrobních technologií a managementu. ISBN 978-80-7414-738-8.
- [9] KUTZ, Myer, 2017. *Applied Plastics Engineering Handbook – Processing, Materials, and Applications (2nd Edition)*. Online. 2. Elsevier. ISBN 978-0-323-39041-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?GuejRV6n>. [cit. 2025-01-05].

- [10] SIN, Lee Tin and TUEEN, Bee Soo, 2019. *Polylactic Acid - A Practical Guide for the Processing, Manufacturing, and Applications of PLA (2nd Edition)*. Online. 2. Elsevier. ISBN 978-0-1281-4473-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?DmRLOuRL>. [cit. 2025-01-05].
- [11] DROBNY, JIRI GEORGE, Jiri George, 2014. *Handbook of Thermoplastic Elastomers (2nd Edition)*. Online. 2. Elsevier. ISBN 978-0-32322-168-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?PAVoPCax>. [cit. 2025-01-27].
- [12] FAN-LONG, Jin; MIAO, Zhao and SOO-JIN, Park, 2019. *Recent Trends of Foaming in Polymer Processing: A Review*. Online. In: MDPI. 30.4.2019, 23.5.2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym11060953>. [cit. 2025-01-27].
- [13] KENIG, Samuel and OPHIR, Amos, 2024. *Processing of Biodegradable Polymers*. Online. Hanser Publishers. ISBN 978-1-56990-874-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?BrvXr8Fq>. [cit. 2025-01-27].
- [14] EBNESAJJAD, Sina, 2021. *Concise Handbook of Fluorocarbon Gases - Applications in Refrigeration and other Industries*. Online. John Wiley. ISBN 978-1-5231-4328-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?fbCRu1P4>. [cit. 2025-01-27].
- [15] CHRISTOPH, Jaroschek, 2024. *Injection Molding for Practitioners*. Online. Hanser Publishers. ISBN 978-1-56990-292-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?0oW8ZzWj>. [cit. 2024-12-27].
- [16] AGASSANT, Jean-François; PIERRE, Avenas; CARREAU, Pierre J.; VERGNES, Bruno and VINCENT, Michel, 2017. *Polymer Processing - Principles and Modeling (2nd Edition)*. Online. 2. Hanser Publishers. ISBN 978-1-5231-1187-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?TyqSeBEk>. [cit. 2024-12-27].
- [17] RAO, Natti S., 2017. *Basic Polymer Engineering Data*. Online. Hanser Publishers. ISBN 978-1-5231-1293-7. Dostupné z t: <https://app-knovel-com.proxy.k.utb.cz/s.v?G8WxnIe0>. [cit. 2024-12-27].
- [18] BĚHÁLEK, Luboš and HABR, Jiří, 2019. *Moderní plasty a vláknové kompozity. Díl I., Vstřikování plastů: materiály a technologie*. Liberec: BĚHÁLEK, Luboš a HABR, Jiří. Moderní plasty a vláknové kompozity. Díl I., Vstřikování plastů: materiály a technologie. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. ISBN 978-80-7494-458-1. ISBN 978-80-7494-458-1.

- [19] CHUNG, Chan I., 2019. *Extrusion of Polymers - Theory and Practice (3rd Edition)*. Online. 3. Hanser Publishers. ISBN 978-1-5231-2681-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpEPTPE005/toc?cid=kpEPTPE005>. [cit. 2024-12-27].
- [20] BIRON, Michel, 2018. *Thermoplastics and Thermoplastic Composites (3rd Edition)*. Online. 3. Elsevier. ISBN 978-0-0810-2502-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?BGNCmbee>. [cit. 2024-12-27].
- [21] SELKE, Susan E. M; CULTER, John D; AURAS, Rafael A a RABNAWAZ, Muhammad, 2021. *Plastics Packaging - Properties, Processing, Applications, and Regulations (4th Edition)*. Online. 4. Hanser Publishers. ISBN 978-1-5231-4502-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?GxvxqQdl>. [cit. 2024-12-27].
- [22] WYPYCH, George, 2023. *Handbook of Plasticizers (4th Edition)*. Online. 4. ChemTec Publishing. ISBN 978-1-5231-5124-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?elUtZsGt>. [cit. 2024-12-27].
- [23] WYPYCH, George, 2024. *Handbook of Curatives and Crosslinkers (2nd Edition)*. Online. 2. ChemTec Publishing. ISBN 978-1-5231-5795-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?Wi3p1rfl>. [cit. 2025-01-05].
- [24] MALKIN, Alexander Ya. a ISAYEV, Avraam I., 2022. *Rheology - Concept, Methods, and Applications (4th Edition)*. Online. 4. ChemTec Publishing. ISBN 978-1-5231-4491-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?WfSD7BP7>. [cit. 2025-01-27].
- [25] MALKIN, Alexander Ya., 2025. *Foundations of Rheology*. Online. ChemTec Publishing. ISBN 978-1-52316-336-6. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?an5dC6Tj>. [cit. 2025-01-27].
- [26] AGASSANT, JEAN-FRANÇOIS; AVENAS, PIERRE; CARREAU, PIERRE J.; VERGNES, BRUNO; VINCENT, MICHEL, 2017. *Polymer Processing - Principles and Modeling (2nd Edition)*. Online. 2. Hanser Publishers. ISBN 978-1-56990-605-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?TyqSeBEk>. [cit. 2025-05-06].
- [27] FERNANDEZ-NIEVES, ALBERTO; PUERTAS, ANTONIO MANUE, 2016. *Fluids, Colloids and Soft Materials - An Introduction to Soft Matter Physics*. Online. John Wiley. ISBN 978-1-5231-1461-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?0w8MtSUa>. [cit. 2025-02-12].

- [28] CARREAU, Pierre J.; DE KEE, Daniel C. R a CHHABRA, Raj P., 2021. *Rheology of Polymeric Systems – Principles and Applications (2nd Edition)*. Online. 2. Hanser Publishers. ISBN 978-1-5231-4497-6. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?i2SLtNst>. [cit. 2025-01-27].
- [29] TUNG NGUYEN A, AHMAD ARABI ŠAMSABADI, NAR., MONA BAVORSKÁ, 2023. *Propojení ATR-FTIR spektroskopie s multivariační analýzou pro výrobu polymerů a řízení molekulové hmotnosti polymerů*. Online. In: Science Direct. 26.1.2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100089>. [cit. 2025-05-06].
- [30] CHIARA BRUNO; MONICA FRANCESCA BLASI; DANIELA MATTEI; LORENZO MARTELLONE; ELEONORA BRANCALEONE et al., 2022. *Polymer composition analysis of plastic debris ingested by loggerhead turtles (Caretta caretta) in Southern Tyrrhenian Sea through ATR-FTIR spectroscopy*. Online. In: Science Direkt. 30.5.2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105676>. [cit. 2025-05-06].
- [31] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2012. *Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants*. Online. International Atomic Energy Agency (IAEA). ISBN 978-1-5231-3006-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?4oBmyh18>. [cit. 2025-02-02].
- [32] ZHANG, Chengqian; ZHAO, Peng; XIE, Jun; XIA, Neng a FU, Jianzhong, 8 března 2018. *Enlarging density measurement range for polymers by horizontal magneto-Archimedes levitation*. Online. In: Science Direct. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.008>. [cit. 2025-02-02].
- [33] BAGHBANBASHI, Mojhdeh a PAZUKI, Gholamreza, 21 června 2017. *Density and dynamic viscosity measurement and correlation of binary solutions containing hyperbranched polymer Boltorn H2004 and propanone, ethanol and dimethylformamide*. Online. In: Science Direct. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.07.030>. [cit. 2025-02-02].
- [34] YAMANAKA, Junpei; OKUZONO, Tohru a TOYOTAMA, Akiko, 2023. *Colloidal Self-Assembly*. Online. Springer Nature. ISBN 978-981-99-5052-2. [cit. 2025-02-02].
- [35] KRISHNAN, Kannan M., 2021. *Principles of Materials Characterization and Metrology*. Online. Oxford University Press. ISBN 978-1-5231-4126-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?KbSPpXaN>. [cit. 2025-02-02].

- [36] KHURSHEED, Anjam, 10 října 2023. Scanning electron microscopy. Online. In: Science Direct. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90800-9.00128-1>. [cit. 2025-02-02].
- [37] GRELLMANN, Wolfgang a SEIDLER, Sabine, 2022. *Polymer Testing (3rd Edition)*. Online. 3. Hanser Publishers. ISBN 978-1-56990-807-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?D5OJNT3J>. [cit. 2025-02-02].
- [38] NICHOLSON, John W., 2017. *Chemistry of Polymers (5th Edition)*. Online. 5. Royal Society of Chemistry (RSC). ISBN 978-1-5231-2148-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?Ym5DpRik>. [cit. 2025-02-02].
- [39] PEIHAO SONG A B , AKASH TRIVEDI A B , CLIVE R SIVIOUR, 2022. *Tensile testing of polymers: Integration of digital image correlation, infrared thermography and finite element modelling*. Online. In: Science Direkt. 22.8.2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2022.105161>. [cit. 2025-05-06].
- [40] SERNA, Sergio; PURWANTO, Nathan S; FENIMORE, Logan M. a TORKELOSON, John M., 2024. *Increasing the cross-link density in a dual dissociative and associative polythiourethane covalent adaptable network improves both creep resistance and extrudability*. Online. In: Science Direct. 1. června 2024. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127232>. [cit. 2025-02-02].
- [41] TRES, Paul A., 2024. *Designing Plastic Parts for Assembly (10th Edition)*. Online. 10. Hanser Publishers. ISBN 978-1-56990-939-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?NBfbXA6u>. [cit. 2025-02-02].
- [42] RAHIMIDEHGOLAN, Foad a ALTENHOF, William, 2023. *Compressive behavior and deformation mechanisms of rigid polymeric foams: A review*. Online. In: Science Direct. 15. března 2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110513>. [cit. 2025-02-02].
- [43] MOHAMMED HAMMAMY, DDS; SILVIA ROJAS-RUEDA, DDS; AMIR H. NEJAT DDS, MS; SULEIMAN HAMDAN, MCDT; HAIBIN NING, PHD et al., 2025. *Methods of evaluating mechanical properties of 3D printed occlusal device materials: Flexural strength, fracture toughness, and impact strength*. Online. In: Science Direkt. 23.4.2025. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.04.011>. [cit. 2025-05-06].

- [44] ZHEN WANG a GUIJUN XIAN, 2022. *Impact performances of fiber reinforced polymer composites and cables: A review*. Online. In: Science Direkt. 18.6.2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117128>. [cit. 2025-05-06].
- [45] SINGH, ALOK; SOLANKI, KIRAN; MANUEL, MICHELE V.; NEELAMEGGHAM, NEALE R., 2016. *Magnesium Technology 2016*. Online. Springer Nature. ISBN 978-3-319-48114-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?NOZgM2dg>. [cit. 2025-02-02].
- [46] SOCIETY FOR THE ADVANCEMENT OF MATERIAL AND PROCESS ENGINEERING (SAMPE), 2015. *AMPE Baltimore 2015 - Conference and Exhibition, May 18-21, 2015/May 19-20, 2015, Baltimore, Maryland/Baltimore Convention Center*. Online. Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE). ISBN 978-1-5231-2702-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?lRyXzOFQ>. [cit. 2025-02-02].
- [47] *Materiálový list DOW LDPE 770G*, <https://www.dow.com/en-us.html>. Online. In: DOW. DOW chemical. Dostupné z: <https://www.dow.com/en-us/document-viewer.html?docPath=/content/dam/dcc/documents/400/400-001/400-00115947en-dow-ldpe-770g-low-density-polyethylene-resin.pdf>. [cit. 2025-03-29].
- [48] *Materiálový list LDPE RB 03-23*. Online. In: MOLGROUP. *MOLGROUP CHemicals*. Dostupné z: https://slovnaft.sk/images/slovnaft/pdf/obchodni_partneri/vyrobky/PLASTY/vyrobky/LDPE_nizkohustotny_polyetylen/bralen/RB_03_23_sk_1807.pdf. [cit. 2025-03-29].
- [49] *Materiálový list PLA 4032D*. Online. In: NATUREWORKS. NatureWorks. Dostupné z: https://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_4032D_films_pdf.pdf. [cit. 2025-03-29].
- [50] *Materiálový list PLA 6752D*. Online. In: NATUREWORKS. NatureWorks. Dostupné z: https://www.natureworkslc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_6752D_fiber-melt-spinning_pdf.pdf?la=en. [cit. 2025-03-29].
- [51] *Materiálový list PLA 6100D*. Online. In: NATUREWORKS. NatureWorks. Dostupné z: https://www.natureworkslc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_6100D_fiber-melt-spinning_pdf.pdf. [cit. 2025-03-29].

[52] *Materiálový list Nadouvadla Budenheim Budit series F.* Budenheim.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Graf stlačení v závislosti napětí na deformaci [1]</i>	16
<i>Obrázek 2 Použití polymerních pěn v autě [3]</i>	18
<i>Obrázek 3 Chemická strukturu polyethylenu [4,5]</i>	20
<i>Obrázek 4 typy Řetězců polyethylenu [4,5]</i>	20
<i>Obrázek 5 Syntéza PLA [10]</i>	22
<i>Obrázek 6 mechanické lehčení [12]</i>	23
<i>Obrázek 7 Schéma fyzikálního lehčení [12]</i>	24
<i>Obrázek 8 Schéma chemického lehčení [11]</i>	25
<i>Obrázek 9 Vstřikovací cyklus [15]</i>	27
<i>Obrázek 10 Proces vstřikování [17]</i>	27
<i>Obrázek 11 Vstřikovací zařízení strukturních pěn [7]</i>	28
<i>Obrázek 12 Aplikace vytlačování [18]</i>	29
<i>Obrázek 13 Schéma vytlačování [18]</i>	29
<i>Obrázek 14 Schéma principu tandemového vytlačování pěn [7]</i>	30
<i>Obrázek 15 Princip lisování jednoduchým způsobem [20]</i>	31
<i>Obrázek 16 Měřicí geometrie typu deska-deska [27]</i>	32
<i>Obrázek 17 Měřicí geometrie typu kužel-deska [27]</i>	33
<i>Obrázek 18 Měřicí geometrie typu válec-válec [38]</i>	33
<i>Obrázek 19 Schéma Kapilárního – pístového reometru [25]</i>	34
<i>Obrázek 20 Proudění v kapiláře [25]</i>	35
<i>Obrázek 21 Tlakový profil podél osy kapiláry [28]</i>	35
<i>Obrázek 22 Princip FTIR spektroskopie [37]</i>	36
<i>Obrázek 23 Hlavní části optického mikroskopu [35]</i>	38
<i>Obrázek 24 Schematický náčrt funkce SEM [35]</i>	39
<i>Obrázek 25 SEM obraz [39]</i>	39
<i>Obrázek 26 Zařízení pro deskovou metodu</i>	41
<i>Obrázek 27 Princip laserové metody [44]</i>	41
<i>Obrázek 28 Průběh tahové zkoušky [37]</i>	42
<i>Obrázek 29 Ukázka stanovení modulu pružnosti [37]</i>	43
<i>Obrázek 30 Schéma tlakové zkoušky [41]</i>	44
<i>Obrázek 31 Typická tlaková/deformační odezva polymerní pěny [37,41]</i>	44
<i>Obrázek 32 Schéma Charpyho kladiva</i>	45
<i>Obrázek 33 Princip tvrdosti Shore A, D [37]</i>	46

<i>Obrázek 34 Kapilární reometr Göttfert RG50 (vlevo) a kapiláry o průměru 1 mm (vpravo) s délkou 20 mm (nahore) a 0,2 mm (dole).....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 35 Závislost korigované smykové viskozity (skupina dolních křivek) a elongační viskozity (skupina horních křivek) na korigované rychlosti smykové/elongační deformace LDPE materiálů 770G (vlevo) a 03-23 (vpravo).....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 36 Závislost korigované smykové (vlevo) a elongační (vpravo) viskozity na korigované rychlosti smykové/elongační deformace materiálů PLA 4032D (nahore), PLA 6752D (uprostřed) a PLA 6100D (dole).</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 37 Charakterizace nadouvadel typu F20 (vlevo), F26 (vpravo)</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 38 Mikrohnětič</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 39 Vzorky z mikrohnětiče</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 40 Vytláčovací linka</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 41 Vytláčený vzorek LDPE 770G</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 42 Nerovnoměrné pásy vzorku</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 43 Nenapěněný vzorek.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 44 Výsledný napěněný vzorek pro LDPE RB 03-23</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 45 Protážené vzorky čistého PLA.....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 46 Nestabilní napěněné vzorky PLA.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 47 Napěněný vzorek PLA 4032D</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 48 Protážený pásek PLA 6752D.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 49 Napěněné vzorky PLA 6752D</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 50 Vytláčený a ustálený vzorek PLA 6100D</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 51 Napěněné vzorky PLA 6100D</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 52 Vstřikovací stroj Mitsubishi 180MET III-15h (a), temperační zařízení (b)</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 53 Použité přípravky pro vstřikování</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 54 Vstřikované vzorky</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 55 Vysekávání vzorků</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 56 Přístroje použité pro měření hustoty</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 57 Optický mikroskop Leica</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 58 Vyhodnocení pórovitosti pomocí programu NIS – Elements AR.</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 59 Univerzální trhací stroj pro tahovou zkoušku</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 60 Charpyho kladivo</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 61 Tvrdoměr</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 62 Pozice měření tvrdosti na vzorcích</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 63 Analyzátor tepelné vodivosti</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 64 Lisování vzorků pro tepelnou vodivost.....</i>	<i>76</i>
<i>Obrázek 65 Závislost podílu dutin na množství nadouvadla ve směsi.....</i>	<i>78</i>

<i>Obrázek 66 Graf hustoty v závislosti na množství nadouvadla v LDPE směsi.....</i>	<i>78</i>
<i>Obrázek 67 Závislost podílu dutin na množství nadouvadla ve směsi</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 68 Graf hustoty v závislosti na množství nadouvadla v LDPE směsi.....</i>	<i>80</i>
<i>Obrázek 69 Mikroskopické snímky polymerních pěn z LDPE 770G (horní řada) a LDPE RB 03-23 (dolní řada) s přidavkem nadouvadla F20 v množství 2 hmot.% (vlevo), 4 hmot.% (uprostřed) a 6 hmot.% (vpravo).</i>	<i>81</i>
<i>Obrázek 70 Tvary pórů (elips) v daných intervalech četnosti</i>	<i>81</i>
<i>Obrázek 71 Histogramy polymerních pěn z LDPE 770G (horní řada) a LDPE RB 03-23 (dolní řada) s přidavkem nadouvadla F20 v množství 2 hmot.% (vlevo), 4 hmot.% (uprostřed) a 6 hmot.% (vpravo).</i>	<i>82</i>
<i>Obrázek 72 Polymerní pěna z LDPE RB 03-23 s přidavkem nadouvadla v množství 12 hmot.%</i>	<i>82</i>
<i>Obrázek 73 Mikroskopické snímky polymerních pěn z PLA 4032D (horní řada), PLA 6752D (prostřední řada) a PLA 6100D (dolní řada) s přidavkem nadouvadla F20 v množství 2 hmot.% (vlevo), 4 hmot.% (uprostřed) a 6 hmot.% (vpravo).....</i>	<i>83</i>
<i>Obrázek 74 Histogramy polymerních pěn PLA 4032D (horní řada), PLA 6752D (prostřední řada) a 6100D (dolní řada) s přidavkem nadouvadla F20 v množství 2 hmot.% (vlevo), 4 hmot.% (uprostřed) a 6 hmot.% (vpravo).</i>	<i>84</i>
<i>Obrázek 75 Porovnání pórovitosti u jednotlivých materiálů.....</i>	<i>86</i>
<i>Obrázek 76 Mikroskopické snímky vzorků připravených technologií vstřikování.....</i>	<i>87</i>
<i>Obrázek 77 Histogram pórovitosti vzorků připravených technologií vstřikování.....</i>	<i>87</i>
<i>Obrázek 78 Porovnání pórovitosti vzorků připravených technologií vstřikování</i>	<i>88</i>
<i>Obrázek 79 Průběh statické mechanické zkoušky v tahu při počáteční rychlosti 1mm/min s následným zvýšením na 300 mm/min. Vzorky LDPE plněné nadouvadlem 2-6% a 12% .</i>	<i>90</i>
<i>Obrázek 80 Grafické znázornění Youngova modulu pružnosti v tahu v závislosti na množství nadouvadla ve směsi LDPE</i>	<i>90</i>
<i>Obrázek 81 Průběh statické mechanické zkoušky v tahu pro nižší rychlosti 1 mm/min, vzorky PLA s přidavkem nadouvadla od 2 do 6 hmot.%.....</i>	<i>91</i>
<i>Obrázek 82 Znázornění Youngova modulu pružnosti v tahu v závislosti na množství nadouvadla.....</i>	<i>92</i>
<i>Obrázek 83 Průběh statické mechanické zkoušky v tahu vzorků LDPE s přidavkem 2 hmot.% nadouvadla připravených technologií vstřikování.....</i>	<i>93</i>
<i>Obrázek 84 Grafické znázornění rázové houževnatosti v závislosti na množství nadouvadla</i>	<i>94</i>
<i>Obrázek 85 Závislost tvrdosti dle Shore D na množství nadouvadla</i>	<i>95</i>
<i>Obrázek 86 Pozice měření tvrdosti vzorků pro vstřikování</i>	<i>95</i>
<i>Obrázek 87 Závislost tepelné vodivosti na množství nadouvadla v LDPE</i>	<i>97</i>
<i>Obrázek 88 Závislost tepelné vodivosti na množství nadouvadla u PLA.....</i>	<i>98</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Charakteristické vlastnosti materiálu LDPE 770G [47]</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 2 Charakterizace vlastnosti materiálu LDPE RB 03-23 [48]</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 3 Charakterizace vlastnosti materiálu PLA 4032D [49]</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 4 Charakterizace vlastnosti materiálu PLA 6752D [50]</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 5 Charakterizace vlastnosti materiálu PLA 6100D [51]</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 6 Charakterizace vlastnosti nadouvadla [52]</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 7 Podmínky a poměry směsí</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 8 Teplotní profily podél šneku a vytlačovací hlavy při zpracování vzorku LDPE 770G s přísádkou nadouvadla F20 od 2 do 6 % při otáčkách šneku 8 ot/min, rychlosti odtahu za hlavou 1,1 m/min a mezery mezi vytlačovací hlavou a chladicí vanou o velikosti 64mm.</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 9 Teplotní profily podél šneku a vytlačovací hlavy pro materiál LDPE RB 03-23 při otáčkách šneku 8 ot/min, rychlosti odtahu za hlavou 6 m/min a mezery mezi vytlačovací hlavou a začátkem chladicí vany o velikosti 64 mm</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 10 Teplotní profily podél šneku a vytlačovací hlavy pro materiál PLA 4032D při otáčkách šneku 5 ot/min, rychlosti odtahu za hlavou 2 ot/min a mezery mezi vytlačovací hlavou a začátkem chladicí vany o velikosti 60, 50 a 25 cm pro množství nadouvadla ve směsi 0, 2 a 4 až 6 %.</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 11 Teplotní profily podél šneku a vytlačovací hlavy pro materiál PLA 6752D při otáčkách 8 ot/min, rychlosti odtahu za hlavou 2 m/min a mezery mezi vytlačovací hlavou a začátkem chladicí vany o velikosti 30 mm.</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 12 Teplotní profily podél šneku a vytlačovací hlavy pro materiál PLA 6100D při otáčkách šneku 8 ot/min, rychlosti odtahu za hlavou 2 m/min a mezery mezi vytlačovací hlavou a začátkem chladicí vany o velikosti 30 mm</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 13 Procesní podmínky vstřikování materiálu LDPE 770G.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 14 Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorky LDPE, plněné nadouvadlem o rozměrech tělíska 80x10 mm.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 15 Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorky PLA , plněné nadouvadlem o rozměrech 80x10 mm</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 16 Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorky LDPE, plněné nadouvadlem o rozměrech 80x10 mm, vyrobené procesem vstřikování</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 17 Vyhodnocení pórovitosti</i>	<i>85</i>
<i>Tabulka 18 Vyhodnocení pórovitosti pro vstřikování</i>	<i>88</i>
<i>Tabulka 19 Vyhodnocení statické mechanické zkoušky v tahu pro LDPE.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabulka 20 Vyhodnocení statické mechanické zkoušky v tahu pro PLA.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabulka 21 Vyhodnocení statické mechanické zkoušky v tahu pro LDPE, vyrobené technologií vstřikování</i>	<i>92</i>
<i>Tabulka 22 Vyhodnocení rázové dynamické zkoušky, vzorky plněné nadouvadlem 2-6 % .</i>	<i>93</i>

<i>Tabulka 23 Průměrné hodnoty tvrdosti vzorků dle Shore D</i>	<i>94</i>
<i>Tabulka 24 Tvrdost vzorku LDPE dle Shore D</i>	<i>96</i>
<i>Tabulka 25 Naměřené a vypočtené hodnoty pro LDPE</i>	<i>96</i>
<i>Tabulka 26 Naměřené a vypočtené hodnoty pro PLA</i>	<i>97</i>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

n	otáčky šneku	[ot/min]
PLA	kyseliny polymléčná	
LDPE	nízkohustotní polyetylén	
ITT	index toku taveniny	[g/10 min]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: porovnání nadouvadel F20 a F26 s databází materiálů

**PŘÍLOHA P I: POROVNÁNÍ NADOUVADEL F20 A F26 S DATABÁZÍ
MATERIÁLŮ**

