

Vliv plniv na tokové vlastnosti polymerů stanovený pomocí splitting indexu

Svatava Geržová
PI31 / 3.ročník

Bakalářská práce
2011/2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Svatava GERŽOVÁ**

Osobní číslo: **T09410**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv plniv na tokové vlastnosti polymerů stanovený pomocí splitting indexu**

Zásady pro vypracování:

- 1 Zpracujte literární rešerši na dané téma**
- 2 Stanovte splitting index u zadaných polymerů**
- 3 Stanovte splitting index u polymerů plněných CaCO₃**
- 4 Vyhodnoťte zjištěné skutečnosti a porovnejte**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martina Hřibová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

13. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

25. května 2012

Ve Zlíně dne 13. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 11.7.2012

..... Geržová Svatava

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

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

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

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

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

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

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

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

ABSTRAKT

Předkládaná práce se zabývá srovnáním plněných a neplněných polymerů, tedy jaký mají vliv plniva a teplota na tokové vlastnosti polymerů. Teoretická část je zaměřená z velké části na polyetylény, na jejich strukturu, vlastnosti a použití. V druhé části je velká pozornost věnována tokovým zkouškám polymerů, a to především indexu toku taveniny a splitting indexu.

Praktická část práce se zabývá vyzkoušením nové metody měření tokových vlastností polymeru. Metoda se nazývá splitting index. Spliting index je založen na principu pozorování a vyhodnocování výsledků tokových vlastností polymerů s plnivem a bez plniv, při různých teplotách a různých zatíženích. Pro srovnání byla u některých vzorků provedena i metoda indexu toku taveniny.

Klíčová slova: polyetylen, plniva, index toku taveniny, splitting index

ABSTRACT

The present work deals with the comparison of filled and unfilled polymers, thus what impact affecting how fillers and temperature have on flow properties of polymers. The theoretical part is focused largely on polyethylenes, on their structure, properties and application. In the second part is a great deal of attention paid to flowing testing of polymers, most importantly to the melt flow index and splitting index.

The practical part of this piece of work deals with testing the new method of measuring flow properties of polymers. The method is called splitting index. Spliting index is based on the principle of observation and evaluation of results of flow properties of polymers with and without fillers, at different temperatures and different loads. For comparison, with some samples was also used the method of melt flow index.

Keywords: polyethylene, fillers, melt flow index, splitting index

Ráda bych poděkovala vedoucí bakalářské práce Ing. Martině Hřibové, Ph.D. za odborné vedení při vypracování této bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala Prof. Ing. Františku Rybníkáři, CSc za odborné rady k bakalářské práci.

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

Ve Zlíně, 10.5.2012

.....

Svatava Geržová

OBSAH

ÚVOD.....	10
I. TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 STRUKTURA POLYMERŮ.....	12
1.1.1 STRUKTURA POLYMERŮ ZÁVISÍ NA :	13
1.2 MOLEKULÁRNÍ STRUKTURA POLYMERŮ A JEJÍ VLIV NA TEPELNÉ CHOVÁNÍ.....	14
1.2.1 KONFIGURACE ŘETĚZCE POLYMERŮ.....	14
1.2.2 KRYSALIZACE POLYMERŮ	14
1.3 VLIV TEPLoty NA VLASTNOSTI POLYMERŮ.....	17
1.3.1 ZÁVISLOST MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ NA TEPLOTĚ	17
1.3.2 CHOVÁNÍ POLYMERŮ ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT	18
1.3.3 PROCESY PROBÍHAJÍCÍ PŘI ZAHŘÍVÁNÍ POLYMERU.....	18
1.4 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ	20
1.4.1 NEWTONSKÉ KAPALINY.....	20
1.4.2 NENEWTONSKÉ KAPALINY	20
1.5 VISKOZITA POLYMERŮ	22
1.5.1 ZÁVISLOST VISKOZITY TAVENINY NA TEPLOTĚ	23
1.5.2 ZÁVISLOST VISKOZITY TAVENINY NA MOLEKULOVÉ HMOTNOSTI (Mw).....	23
1.5.3 ZÁVISLOST VISKOZITY TAVENINY NA PLNIVECH	24
1.6 POLYETYLÉN	24
1.6.1 STRUKTURA A VLASTNOSTI POLYETYLÉNU	24
1.6.2 TEPELNÉ VLASTNOSTI PE.....	25
1.6.3 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI POLYETYLENŮ (RPE A LPE)	26
1.6.4 PRÁŠKOVÝ A GRANULOVANÝ POLYETYLÉN	28
1.6.5 PLNIVA A OSTATNÍ PŘÍMĚSI V PE	29
1.6.6 POUŽITÍ PE.....	30
1.6.7 KABELY Z PE	31
1.6.8 POTRUBÍ.....	31
1.6.9 OSTATNÍ POUŽITÍ PE	31
1.7 PLNIVA PRO POLYMERY	31
1.7.1 ČÁSTICE PLNIV (PRÁŠEK, VLÁKNO, ZRNO).....	32
1.7.2 UHLIČITAN VÁPENATÝ - CaCO_3	32
1.8 MATERIÁLY PE	33
1.8.1 PE – LITEN	33
1.8.2 NÍZKOHUSTOTNÍ POLYETYLÉN (LDPE)	35
1.9 ZKOUŠENÍ PLASTŮ	35

1.9.1	STANOVENÍ INDEXU TOKU TAVENINY (ITT = MFI)	35
1.9.2	SPLITING INDEX.....	36
1.9.3	STANOVENÍ ZST	37
1.9.4	TAHOVÉ ZKOUŠKY	37
1.9.5	ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	37
1.9.6	OSTATNÍ ZKOUŠKY.....	38
II.PRAKTICKÁ ČÁST		39
1.10	SEZNÁMENÍ S METODIKOU SPLITING INDEX.....	40
1.11	POUŽITÉ MATERIÁLY	40
1.11.2	LISOVÁNÍ DESTIČEK	43
1.11.3	VYSEKNUTÍ VZORKŮ	43
1.11.4	PŘÍPRAVA VZORKŮ K OHŘEVU	43
1.11.5	SAMOTNÝ PROCES OHŘEVU	43
1.12	VÝSLEDKY MĚŘENÍ PE-LITENU METODOU SPLITING INDEX	44
1.12.1	PE-LITEN – LINEÁRNÍ PE.....	44
1.12.2	PE-LITEN + 30% CaCO ₃	45
1.13	VÝSLEDKY MĚŘENÍ LDPE-BRALENU METODOU SPLITING INDEX	46
1.13.1	LDPE - BRALEN.....	46
1.13.2	LDPE (BRALEN) + 10% CaCO ₃	48
1.13.3	LDPE (BRALEN) + 25% CaCO ₃	49
1.14	SHRnutí METODY SPLITING INDEX.....	50
1.14.1	TLAK PŮSOBÍCÍ NA VZORKY U METODY SI.....	52
1.15	VÝSLEDKY MĚŘENÍ LDPE – BRALENU METODOU INDEXU TOKU TAVENINY (MFR)	52
1.15.1	LDPE ČISTÝ (BRALEN).....	52
1.15.2	LDPE (BRALEN) + 10% CaCO ₃	53
1.15.3	LDPE(BRALEN) + 25% CaCO ₃	54
1.16	SHRnutí METODY INDEX TOKU TAVENINY.....	55
1.16.1	TLAK PŮSOBÍCÍ NA POLYMER U METODY MFR.....	56
1.17	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ METODY SI A MFR.....	56
1.18	SROVNÁNÍ PE- LITENU LINEÁRNÍHO A LDPE- BRALENU ROZVĚTVENÉHO.....	59
ZÁVĚR		60
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:		61
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		63
SEZNAM OBRÁZKŮ		65
SEZNAM TABULEK.....		66
SEZNAM GRAFŮ		67

ÚVOD

V současné době patří polymerní materiály k nejpoužívanějším materiálům. V tomto ohledu předčily i další konstrukční materiály jako jsou kovy, dřevo, sklo, kámen a jiné. Polymery jsou oblíbené díky svým vlastnostem, dobrému zpracování, možnostem recyklace a ceně. Zpracování se u většiny polymerů provádí ve formě taveniny. Pro stanovení, který polymer je vhodný použít na určitý výrobek a jakou metodou ho zpracovávat, musí se provádět zkoušky. Jednou ze zkoušek je určení indexu toku taveniny, aby se stanovily tokové vlastnosti daného polymeru. Tato metoda je často používaná v praxi, ale má velkou nevýhodu a tou je velká spotřeba zkoumaného materiálu. Jedna zkušební dávka musí vážit minimálně 8g. Proto je vyvíjena nová metoda měření tokových vlastností polymerů, kterou nazýváme Spliting index. Při této metodě se roztavují vzorky velmi malých rozměrů (vzorky válcovitého tvaru o průměru 5mm a tloušťce 2mm) při určité teplotě taveniny, při zatížení 100 a 200g po určitou dobu.

Cílem předložené bakalářské práce je praktické vyzkoušení nové metody.

Dalším aspektem, kterým se tato práce zabývá, jsou plniva polymerů. Plniva se v praxi často používají například z důvodu upravení vlastností materiálu podle potřeby požadavků na vyráběný výrobek. Často používaným polymerem je polyetylén, a proto se praktická část této práce zabývá pozorováním tokových vlastností různých druhů polyetylénu s plnivem i bez plniv.

Výsledkem práce by mělo být ověření, jak se metoda Spliting index osvědčila v praxi a dále zjištění, jaký vliv mají některá plniva na tokové vlastnosti polymerů (PE).

I. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Struktura polymerů

Strukturu polymerů můžeme hodnotit jak ze stránky chemické, tak fyzikální. Strukturou z chemické stránky můžeme myslet konstituci a konfiguraci, a z fyzikální konformaci, orientaci, kristalinitu a nadmolekulární struktury. [1]

Konstituce (molekulová struktura) – popisuje, jak jsou jednotlivé atomy v polymeru vzájemně vázány, jaké druhy a délky řetězců se v něm vyskytují, dále popisuje druh substituentů a koncových skupin, polymerační stupeň a jeho distribuci. [1]

Konfigurace- je prostorové uspořádání atomů v polymeru. Ke změně konfigurace může dojít přetržením jednotlivých řetězců nebo novým uspořádáním primárních vazeb v řetězci. [1]

Konformace- je okamžité prostorové uspořádání řetězce polymeru vzniklé z důvodu rotace kolem jednoduchých primárních vazeb. Je časově proměnné a závisí na teplotě. [1]

Jednotlivá prostorová uspořádání, která se od sebe liší vnitřní energií, nazýváme konfomery. Rychlost rotace kolem vazeb roste s rostoucí teplotou. Aby došlo k přechodu mezi jednotlivými konfomery, je zapotřebí pouze malá energie. Například u etanolu není možné od sebe jednotlivé konfomery za pokojové teploty oddělit. Pokojová teplota stačí pouze k tomu, aby jednotlivé konfomery přecházely jeden v druhý. Konfomery lze od sebe oddělit teprve při dostatečně nízké teplotě (asi 50 K), kdy je rotace dostatečně pomalá. Při vyšší teplotě oddělené konfomery začnou opět přecházet jeden v druhý. Ne všechny konfomery se tak snadno přeměňují. [21]

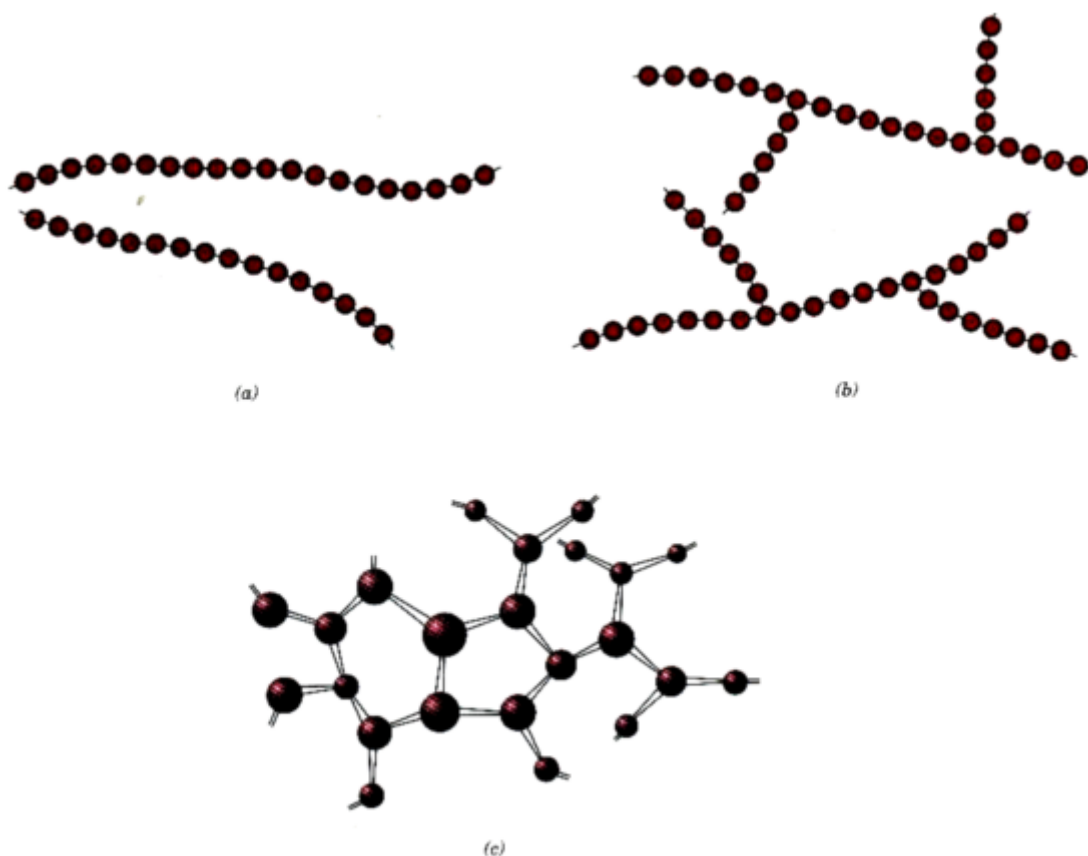
Strukturu polymerů ovlivňuje uspořádání merů, známe tři strukturní typy :

- a) Lineární polymery
- b) Rozvětvené polymery
- c) Síťované polymery

Lineární polymery – obsahují nejjednodušší typ řetězce, jednotlivé mery jsou seřazeny za sebou v jednom řetězci. Mezi řetězci působí slabé Van der Waalsovy síly. (Patří sem např. polyetylén, polystyren, polyvinylchlorid).

Rozvětvené polymery – skládají se z hlavního řetězce, ze kterého vybíhají menší vedlejší větve. Hustota rozvětveného polymeru je menší než hustota lineárního.

Síťované polymery – jedná se o trojrozměrnou síť složenou z trojfunkčních monomerů, které jsou spojeny kovalentními vazbami. Patří zde např. epoxidy. [9]



Obr. 1. Struktura polymerů, a) lineární polymer, b) rozvětvený polymer, c) síťovaný polymer. [9]

1.1.1 Struktura polymerů závisí na :

a) Existence makromolekul

Makromolekulární látky vznikají z mnoha částí jednodušší sloučeniny – monomeru (monos=jediný), a proto je nazýváme polymery (poly = mnoho, meros = část).

Název polymer se obecně používá pro makromolekuly, které jsou charakterizovány specifickými vlastnostmi, příslušejícími molekulám s dlouhou řetězcovou strukturou složenou z jednoduchých částí-merů. [1]

b) Koncové skupiny

Konce dlouhých řetězců molekul jsou složeny z normálních valenčně nasycených struktur. [1]

c) Molekulová hmotnost

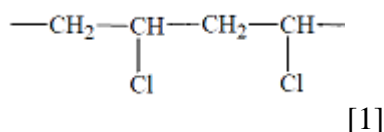
Molekulová hmotnost patří k nejvýznamnějším strukturním charakteristikám polymerů. Velikost molekulové hmotnosti udává fyzikální chování polymeru za různých podmínek. Řetězce téže makromolekulární látky mají různé délky, což způsobí odlišnost struktury polymerů. Polymery jsou tvořeny makromolekulami o různé velikosti, jsou tedy polydisperzní. [25]

1.2 Molekulární struktura polymerů a její vliv na tepelné chování

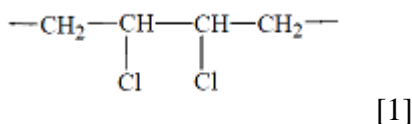
1.2.1 Konfigurace řetězce polymerů

Máme několik druhů spojení stavební jednotky (meru) v řetězci polymeru, avšak nejdůležitější jsou dva základní způsoby seřazení merů v řetězci: [1]

Hlava-pata :



Hlava-hlava :



1.2.2 Krystalizace polymerů

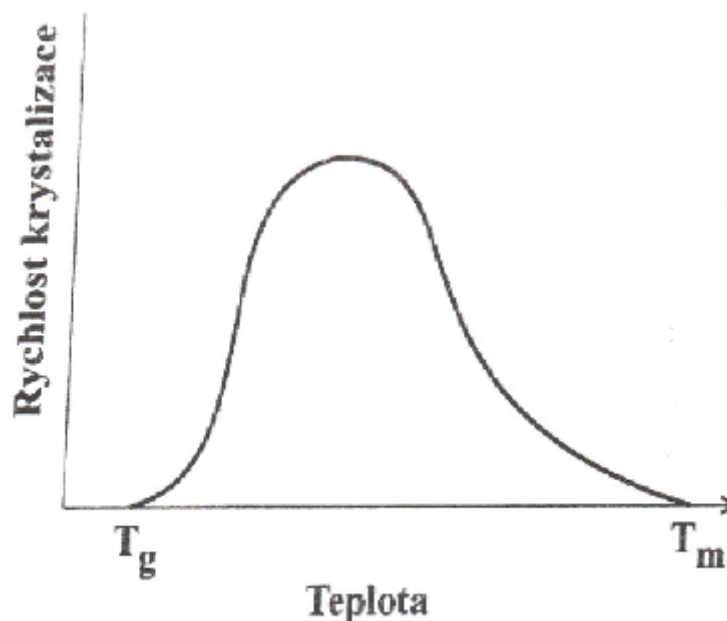
Ke krystalizaci může dojít, když se úseky polymerních řetězců uspořádají pravidelně v prostoru. Aby se tak stalo, musí být splněny vhodné termodynamické podmínky.

Krystalické polymery mají pravidelně uspořádané mery a tvoří tzv. krystalickou mřížku

Krystalizace polymerů je fázovým přechodem 1. řádu. Přeměna skupenství z kapalného do tuhého nebo z plynného do tuhého. Krystalizace závisí na dvou faktorech:

- a) Konfiguraci
- b) Mezimolekulárních silách řetězce polymeru [1]

Polymery krystalizují mezi teplotou skelného přechodu T_g a teplotou tání T_m rychlostí, která dosahuje maximálních hodnot mezi těmito teplotami. [1]



Obr. 2. Závislost rychlosti izotermní krystalizace polymerů na teplotě. [3]

Jako fázový přechod 1. řádu je krystalizace daná nukleací – tvorbou krystalických zárodků a jejich růstem.

Pokud je teplota krystalizace v oblasti blízké teplotě tání, je rychlost krystalizace velmi malá. Sníží-li se teplota, rychlost krystalizace se rychle zvýší. Současně se i zvyšuje viskozita taveniny polymeru, což způsobuje zpomalení krystalizačního procesu (růstu), a proto po dosažení maxima se rychlost krystalizace s klesající teplotou snižuje. V blízkosti teploty skelného přechodu T_g krystalizace ustává, protože pohyb segmentů řetězců je značně omezen. [3]

1.2.2.1 Krystalizace

Krystalizace probíhá ve dvou krocích:

1. Vznikne krystalizační zárodek (nukleus), který se začne rozrůstat v uspořádaný tvar řetězců, které pak vytvářejí paralelní uspořádaný třírozměrný útvar. Meziatomové síly přitahují tyto sítě k sobě, a stabilizují jejich polohu. Následné působení mezimolekulárních sil napomáhá k vytvoření trojrozměrného uspořádání molekul. [4]
2. V druhém kroku dochází k růstu krystalických oblastí. Na zárodek se připojují a stabilizují další řetězce. Tento proces, který se odehrává v blízkosti bodu tání, soupeří s tepelně aktivovanou pohyblivostí řetězců. [4]

Čím je větší podíl krystalické fáze, tím jsou lepší některé mechanické vlastnosti jako například vyšší pevnost a vyšší křehkost. [4]

1.2.2.2 (Semi)krystalický stav

Obsahují složku jak krystalickou tak i amorfni. Běžně jsou polymery částečně krystalické a obvykle ve formě sférolitů. V taveninách a roztocích se vyskytuje mnoho vzájemně propletených a neuspořádaných řetězců a tak dochází ke střídání krystalické a amorfni fáze. Semikrystalický stav má vyšší pevnost a chemickou odolnost, ale nižší viskozitu při zpracování. Většina polymerů se nachází v semikrystalickém stavu.

Mezimolekulární síly vzájemně přibližují řetězce a urovnávají je do poloh o nejnižší energii. Teplý pohyb jednotlivých segmentů makromolekul má opačný účinek.

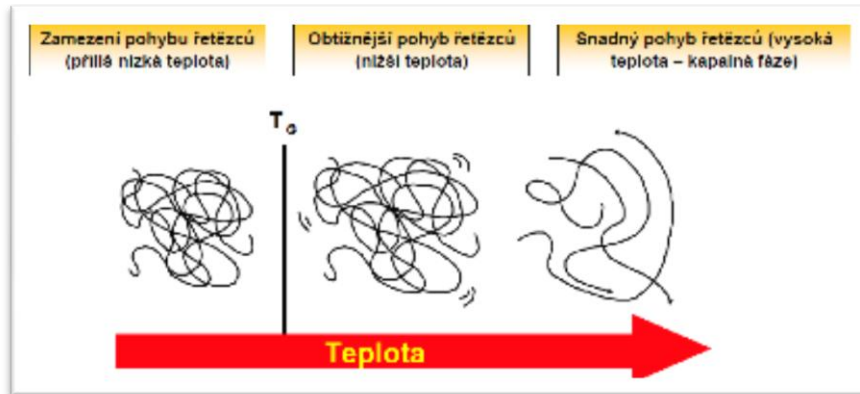
Bude-li kohezní energie (energie soudržných sil molekul, atomů a iontů) větší než energie tepelného pohybu, pak dojde k uspořádání struktury do pravidelných krystalů.

Má-li dojít k uspořádání struktury do pravidelných krystalů, musí být kohezní energie větší než energie tepelného pohybu. To vymezuje teplotu krystalizace na rozsah mezi T_g a T_m . [4]

1.2.2.3 Amorfni stav

Náhodné uspořádání atomů je do tvaru amorfniho klubka. Patří sem sklo, pryskyřice, vosk, asfalt, pasty atd. Polymery jsou zvláštní skupinou amorfniích látek organického původu

(PC, PS, PMMA..). Amorfní polymery se vyznačují (dle teploty T_g) vysokou tvrdostí, pevností a křehkostí, jsou průhledné a rozpustné v organických rozpouštědlech. [4]



Obr. 3. Zvyšující se teplota zvětšuje prostor mezi makromolekulárními řetězci, což usnadňuje jejich pohyb. [4]

1.3 Vliv teploty na vlastnosti polymerů

1.3.1 Závislost mechanických vlastností na teplotě

Termomechanická křivka - je závislost deformace, která vzniká působením určité síly po určitou dobu za dané teploty. Platí pro všechny polymery. [4]



Obr. 4. Termomechanická křivka.[4]

1.3.2 Chování polymerů za zvýšených teplot

Termoplast, např. polyetylen, polystyren, polypropylen, je za obvyklých teplot tvrdý, tuhý. Mezimolekulární síly brání makromolekulám jakýmkoliv změnám bez zásahu vnějších vlivů měnit vzájemnou polohu.

Zahříváním termoplastu se zvětší segmentální pohyb a dojde ke změně, stane se ohebným a elastickým. Poté začne měknout a stane se plastickým až kapalným.

Ochlazením dojde naopak ke křehnutí (segmentální pohyb molekul se zmenšuje) a termoplast přejde do sklovitého stavu (pod T_g).

Měknutí plastické hmoty lze zaznamenat v určitém teplotním rozmezí. Každý polymer má teplotní rozmezí jiné, závisí to na konfiguraci daného materiálu. Ostatní organické sloučeniny se od plastů podstatně liší tím, že mají ostrý bod tání, nikoliv širší teplotní rozmezí.

Snižováním teploty vzrůstá pevnost termoplastů, ale zmenšuje se tažnost a roste křehkost.

Mechanické vlastnosti jiných materiálů jako třeba kovů a dřeva nejsou tak závislé na teplotě pod T_m jako polymery.

Polymery mají větší sklon k tečení než kovy. Tekutost se zvyšuje v závislosti na teplotě.

U většiny plastických hmot může dojít při zatížení k pohybu makromolekul, což se projeví deformací. Tento jev se nazývá studený tok. [5]

1.3.3 Procesy probíhající při zahřívání polymeru

1.3.3.1 Termoplasty

Amorfní polymer se v závislosti na teplotě může vyskytovat ve třech základních fyzikálních stavech: sklovitém, kaučukovitým, plastickým a kapalném.

Zde máme i dvě přechodové oblasti, které se nachází mezi jednotlivými stavy:

- a) Teplota skelného přechodu (T_g) – mezi stavem sklovitým a kaučukovitým, je to střední teplota určitého intervalu, v němž probíhají výrazné změny vlastností amorfních polymerů.
- b) Teplota tečení amorfního polymeru (T_f) – mezi stavem kaučukovitým a plastickým. U polymerů krystalických se jedná o teplotu tání krystalické fáze (T_m).

T_g a T_f rozdělují teplotní oblast na tři části. [7]

1.3.3.1.1 Sklovitý stav

Sklovitý stav je při teplotách nižších než T_g . Polymer se podobá sklu, a to tím, že je tvrdý, elastický až křehký. Mezi makromolekulami působí silné mezimolekulové síly. Pod teplotou T_g ustává pohyb segmentů řetězců. Veškerý pohyb ustává u absolutní nuly. Deformace v této oblasti jsou velmi malé a zcela vratné. [7]

1.3.3.1.2 Kaučukovitý stav

Kaučukovitý stav je mezi teplotami T_g a T_f . Jedná se o kaučukovité chování polymeru. Zahřátím nad T_g dojde k oslabování mezimolekulových sil a segmenty se dají do pohybu (kmitání nebo rotace určitých částí řetězců).

Zde je tzv. časově zpožděná viskoelastická deformace. Jedná se o deformaci vratnou, která je způsobena působením vnějších sil.

Makromolekuly mají klubkovitý tvar, který se při deformaci mění na protaženější. Po uvolnění se makromolekuly vrací do sbalené polohy. [7]

1.3.3.1.3 Plastický stav

Plastický stav je při teplotě nad T_f (T_m). Jedná se o stav, ve kterém dochází k pohybu celých makromolekul, energie tepelného pohybu překonává mezimolekulové síly, řetězce mohou měnit vzájemné polohy těžiště, nastává tok. Deformace zde jsou závislé na čase, jsou velké a nevratné. Viskozní tok roste s rostoucí teplotou až po určitou hranici. Při dosažení této hranice dojde až k porušení chemických vazeb, rozkladu a znehodnocení polymeru. Plastický stav je využíván při tváření polymerů. [7]

1.3.3.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty se dříve nazývaly termosety. Při zahřátí reaktoplasty měknou a lze je i tvářet, ale jen do určité doby. Dalším zahříváním dojde k chemické reakci (k zesíťování struktury). Plast je v téhle fázi tzv. vytvzen a tvoří zjednodušeně jednu velkou makromolekulu. Tento děj je nevratný, vytvrzené plasty se již nedají roztavit. Dalším zahříváním může dojít k chemickému rozkladu (degradaci).

Do reaktoplastů se řadí např. epoxidové pryskyřice, polyesterové polymery, fenolformaldehydové polymery, nenasycené kaučuky, apod. [8]

1.4 Reologické vlastnosti polymerů

Reologie je vědní obor, který zkoumá vnitřní reakce pevných i tekutých látek na působení vnějších sil resp. její deformovatelnosti a tokovými vlastnostmi. Reologické chování tekutých materiálů je zapotřebí znát v řadě technologických odvětví. K charakterizování surovin nebo i produktů, k řešení mnoha technických úloh a inženýrských výpočtů je nutné znát některé reologické veličiny jako např. viskozitu, mez toku a modul pružnosti. Matematicky lze tokové vlastnosti kapalin vyjádřit reologickými stavovými rovnicemi. Tyto rovnice vyjadřují vztah mezi smykovým (tečným) napětím τ a deformací kapaliny. Jejich grafickou podobou jsou tokové křivky. [27]

1.4.1 Newtonské kapaliny

Pro tečné napětí ideálního viskozitního materiálu platí Newtonův zákon:

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dx} = \eta \cdot D$$

(kde η je dynamická viskozita, du je vzájemná rychlost pohybu smykových rovin vzdálených o dx a D je gradient rychlosti).

Gradient rychlosti charakterizuje tvarové změny v proudící kapalině. Dynamická viskozita vyjadřuje vnitřní tření newtonské kapaliny, jednotkou je Pa·s. Převrácená hodnota dynamické viskozity $\varphi = 1/\eta$ je tzv. tekutost. Kinematickou viskozitu pak vyjádříme jako podíl dynamické viskozity η a hustoty ρ vztahem: $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ [m²/s].

Tekutiny, které se řídí newtonským zákonem, nazýváme newtonské tekutiny a jsou to především nízkomolekulární látky. [27]

1.4.2 Nenewtonské kapaliny

Nenewtonské kapaliny se neřídí newtonským zákonem. Nazýváme je proto nenewtonské kapaliny a patří sem například roztoky a taveniny polymerů, suspenze a různé pasty. Platí pro ně rovnice: $\tau = \eta \cdot D$

(kde τ je tečné napětí, η je zdánlivá viskozita a D je rychlostní gradient).

Zdánlivá viskozita není látkovou konstantou, ale závisí na rychlosti deformace nebo tečném napětí. [27]

1.4.2.1 Základní typy nenewtonské kapaliny

- a) Pseudoplastické kapaliny – s rostoucím gradientem rychlosti se zdánlivá viskozita snižuje. Pseudoplastické kapaliny můžeme dále rozdělit na pravé pseudoplastické kapaliny a strukturně viskozní kapaliny. U strukturně viskozních kapalin můžeme stanovit dvě limitní hodnoty zdánlivé viskozity. Patří sem například roztoky a taveniny polymerů, roztoky mýdel a suspenze. Pseudoplasticita snižuje energetickou náročnost např. při míchání nebo při toku kapalin potrubím. [27]
- b) Dilatantní kapaliny – s rostoucím gradientem rychlosti roste zdánlivá viskozita. Toto chování se objevuje velmi málo. Dilatace komplikuje technologické procesy, proto je žádoucí ji potlačit změnou složení. K vyjádření průběhu tokových křivek pseudoplastických a dilatantních kapalin se užívá empirická rovnice :

$$D = K \cdot \tau^n$$

n < 1 pro dilatanci
n > 1 pro pseudoplastickou

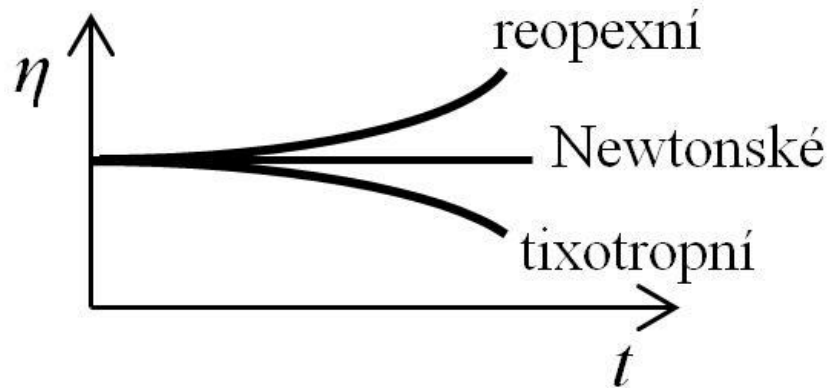
(kde K a n jsou empirické látkové parametry, které charakterizují tok nenewtonské kapaliny a závisejí na teplotě). [27]

- c) Binghamské kapaliny – k toku dochází až po překonání meze toku (kluzu) τ_k , kdy dojde k překonání mezimolekulárních sil. Pro binghamské kapaliny platí vztah :

$$\tau - \tau_k = \eta_0 \cdot D$$

Patří sem například kašovitě suspenze křídly a vápna. [27]

- d) Látky tixotropní – jedná se o časově závislou látku. V klidovém stavu se viskozita zvyšuje a působením smykového napětí viskozita s časem klesá. Tento jev je vratný. V klidovém stavu působí mezi částicemi mezimolekulární síly a tím vzniká síťová struktura podobná gelu. Tato struktura se pak se smykovým napětím rozrušuje. [7]
- e) Látky reopexní – viskozita se zvyšuje s časem působení smykového napětí. Jedná se tedy o časově závislou látku. Polymer je schopný téci tím více, čím menší je jeho průměrná relativní molekulová hmotnost, čím vyšší je jeho teplota a čím více obsahuje nízkomolekulárních látek. [7]



Obr. 5. Závislost viskozity na čase. [26]

1.5 Viskozita polymerů

Viskozitu η lze charakterizovat jako koeficient úměrnosti mezi tečným napětím τ [Pa] a rychlostním gradientem $\frac{dv}{dy}$ [s^{-1}] při laminárním proudění. Jednotkou viskozity je pascal-sekunda [Pa.s]. [6]

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy}$$

Newtonská viskozita odpovídá síle, která vzniká, pohybuje-li se jedna vrstva kapaliny o průměru 1cm^2 a relativní rychlosti 1cm/s ve vzdálenosti 1cm vzhledem k druhé vrstvě kapaliny. Pojem Newtonská kapalina zavádíme, je-li viskozita η konstantou. U makromolekulárních tavenin a roztoků je viskozita η konstantní zřídka. Tyto poměry si můžeme představit tak, jako by viskozita závisela na tečném napětí nebo rychlostním gradientu. V takovém případě se jedná o strukturální viskozitu. Viskozita tavenin se pohybuje v rozmezí 10^2 - 10^5 Pa.s. [6]

K měření viskozity se používají viskozimetry. Jejich provedení může být různé a to podle rozmezí viskozitních hodnot, které mají být stanoveny. Nejčastěji se používají: rotační viskozimetry, výtlačné a rotační plastometry, průtok kapilárou, pád kuličky, probublávání nebo kapání oleje atd. [18]

Viskozita závisí na:

1. Teplotě
2. Molární hmotnosti
3. Tlaku
4. Tvaru a velikosti částic
5. Smykovém napětí a rychlosti
6. Koncentraci
7. El. náboji
8. Přísadách a plnivech
9. Způsobu měření

1.5.1 Závislost viskozity taveniny na teplotě

S rostoucí teplotou se snižuje viskozita v důsledku intenzivnějšího pohybu částic. Aby polymer mohl téci, pak musí dosáhnout minimálně teploty T_g .

Pro teploty nad T_g lze závislost viskozity polymerních tavenin na teplotě popsat Arrheniovým vztahem : $\eta = \eta_0 \cdot e^{E/RT}$

(η je viskozita při teplotě T , η_0 je limitní (newtonská) viskozita, E je aktivační energie potřebná k překonání bariéry, kterou musí molekula překonat, R je plynová konstanta, T je teplota).

Arrheniový vztah vychází z tzv. energetické teorie. Teorie říká, že přeskok částic se uskuteční pouze v případě, když během toku získá energii E . Energie E jí pak pomůže překonat energetickou bariéru, oddělující její polohu od polohy vakance. Pravděpodobnost že ji získá je $e^{E/RT}$. [26]

1.5.2 Závislost viskozity taveniny na molekulové hmotnosti (M_w)

Řetězce polymerů jsou v klidu značně svinuté a vzájemně zapletené. Začne-li na polymer působit napětí, řetězce se začnou narovnávat a rozplétat. Čím jsou delší řetězce, tím je vyšší pevnost a vyšší viskozita. Viskozita roste s molekulovou hmotností M_w přímo úměrně až do tzv. kritické molekulové hmotnosti M_c .

$$M_w < M_c$$

$$\log \eta_0 = K \cdot \log M_w$$

Nad touto kritickou molekulovou hmotností M_c roste viskozita strměji. Hodnota směrnice závislosti newtonské viskozity na molekulové hmotnosti je 3,4.

$$M_w > M_c \quad \log \eta_0 = K \cdot \log M_w^{3,4}$$

Molekulová hmotnost zapletenin řetězců (M_e) u polyetylenů je 1250 a kritická molekulová hmotnost (M_c) polyetylenů je 3800. [26]

1.5.3 Závislost viskozity taveniny na plnivech

Reologické vlastnosti polymerů nebo i kaučukových směsí závisí na druhu a koncentraci použitého plniva. U neplněných polymerů nebo směsí je při nízkých smykových rychlostech obvykle pozorován newtonský tok. Plniva způsobují zvýšení viskozity a výrazné odchylky od newtonského chování.

Při rostoucí koncentraci plniva se snižuje objemový zlomek polymeru a zvyšuje se podíl polymerních řetězců vázaných na více než jednu částici plniva, což zvyšuje viskozitu. Každé plnivo, které má průměr částic menší než cca $1\mu\text{m}$, způsobí ztužení polymeru (vulkanizátu). Nezáleží pak na jeho chemickém složení ani na mikrostruktuře.

Viskozita závisí i na dosažené disperze plniva. S rostoucí disperzí plniva viskozita směsi postupně klesá. Ke snížení viskozity se používají změkčovadla. Změkčovadla zlepšují houževnatost a zpracovatelnost materiálů. [20]

1.6 Polyetylén

1.6.1 Struktura a vlastnosti polyetylénu

Máme dva typy polyetylenů. Polyetylén s lineárním řetězcem označován jako IPE nebo i HDPE (vysokohustotní), který vzniká koordinační polymerací za nízkého tlaku. Polyetylén s rozvětveným řetězcem označován jako rPE nebo i LDPE (nízkohustotní), který vznikne radikálovou polymerací za vysokého tlaku. [22]

Vlastnosti HDPE: Hustota je v rozmezí $0,93 - 0,97 \text{ g/cm}^3$ a teplota tání je 137°C . Má vysokou pevnost v tahu, je odolný vůči kyselinám, alkoholům a olejům, dále odolává dlouhodobému zahřívání až do 110°C . Je houževnatý, odolný proti oděru, dobrý izolant a ponechává si své vlastnosti i při velmi nízkých teplotách. [23]

Vlastnosti LDPE: Vyznačuje se poměrně malou tvrdostí, pevností v tahu, odolává velmi dobře vlhkosti. Oproti HDPE má horší odolnost vůči kyselinám a organickým látkám. Hustota je v rozmezí 0,91 – 0,93 g/cm³ a teplota tání je 110-128°C. [23]

Struktura polyetylenu se projeví uspořádáním řetězců. Jsou-li řetězce polymeru zcela neuspořádané (což je u PE v tavenině), se jedná o amorfní strukturu. Jsou-li naopak měry řetězce uspořádané do pravidelných útvarů, jedná se o lineární řetězce, které mohou krystalizovat.

V polyetyleny jsou vždy amorfní a krystalické oblasti. Segmenty molekul za působení vnějších podmínek krystalizují ve formě kulových sferolitů. Tepelným a mechanickým působením se může ovlivnit velikost sferolitů a lamel z nichž jsou tvořeny. [10]

1.6.2 Tepelné vlastnosti PE

Do tepelných vlastností polyetylenů můžeme zařadit například měrné teplo, tepelnou roztažnost, teplotu tání, teplotu tečení, teplotu skelného přechodu atd. [10]

1.6.2.1 Měrné teplo (C_p)

Měrné teplo (někdy nazýváno jako měrná tepelná kapacita) polyetylenu při 20 °C je přibližně 0,55 cal/g °C. [10]

Měrné teplo lze definovat jako množství tepla, které je potřebné k ohřátí 1kg látky o 1 teplotní stupeň (o 1°C nebo o 1K). Jednotkou je joule na kilogram a kelvin [JKg⁻¹K⁻¹] nebo i kalorie na kilogram a stupeň [cal/kg°C]. [24]

1.6.2.2 Tepelná roztažnost

Tepelná roztažnost je u polyetylenu vysoká. Při zpracování PE je velmi důležité znát hodnotu tepelné roztažnosti, a musí se brát v úvaze hlavně při konstrukci forem. [10]

Teplota [°C]	Lineární koeficient tepelné roztažnosti. .10 ⁵	Objemový koeficient tepelné roztažnosti. .10 ⁵
-35	10,0	30
-20	13,7	41
0	18,3	55
20	23,7	71
25	24,8	74,5
40	29,0	87
60	33,7	101
80	40,3	121
100	46,6	140
110	51,0	153
115	25,0	75
115-150	25,0	75
150	25,0	75

Tab. 1. Tepelná roztažnost polyetylénu. [10]

1.6.2.3 Teplota tání (T_m)

U rozvětveného rPE je teplota tání 112 – 117°C a u lineárního lPE 128 – 135°C.

Teplota tání je u polyetylénu definován jako teplota, při které zmizí poslední krystalinity.

Stanovuje se v polarizovaném světle pomocí polarizačního mikroskopu přímým pozorováním, diferenční kompenzační kalorimetrií (DSC), termomechanickou analýzou při dynamickém namáhání (DMA), volumetricky a mnoha dalšími způsoby. [10]

1.6.3 Základní vlastnosti polyetylenů (rPE a lPE)

- a) Mechanické vlastnosti PE
- b) Tepelné a elektrické vlastnosti PE
- c) Fyzikální vlastnosti PE

1.6.3.1 *Mechanické vlastnosti PE*

Vlastnosti	Polyetylén			
	rozvětvený	lineární		
		Phillips	Ziegler	HD
Modul pružnosti v tahu [kg/cm ²]	980-2460	-	3515-7030	-
Mez průtažnosti [kg/cm]	84-126	-	196-246	-
Pevnost v tahu [kg/cm ²]	84-175	267	196-386	203
Celkové protažení [%]	400-650	400	100-800	200
Relativní tuhost [kg/cm ²]	773-1897	9842	3515-8787	3515
Vrubová houževnatost [kg.cm/cm ²]	nenarušen	1,63	0,544-2,72	-
Rázová houževnatost [kg.cm/cm ²]	nenarušen	-	>16,25	-
Strukturní pevnost [kg/mm]	asi 9,0	17,8	17,8-50	-

Tab. 2. Mechanické vlastnosti PE. [10]

1.6.3.2 *Tepelné a elektrické vlastnosti PE*

Vlastnosti	Polyetylén			
	rozvětvený	lineární		
		Phillips,Marlex	Ziegler	HD
Elektrická pevnost [kV/mm]	17-23	20	20-27,5	Stejně jako u rozvětveného PE
Izolační odpor [ohm.cm]	>10 ¹³	>6.10 ¹³	>10 ¹³	
Tavný index [g/10min]	0,2-30	0,6-0,8	0,1-4	0,7
Bod tání krystalů [°C]	108-120	126-135	126-135	-
Bod křehnutí [°C]	-80-(-55)	< -118	< -140-(-100)	< -70
Teplota tečení při 4,6 kg/cm ² [°C]	41-49	74-80	57-63	-
Tepelná vodivost [10 ⁴ cal/cm.s,°C]	6-8	-	asi 10	-

Tab. 3. Tepelné a elektrické vlastnosti PE. [10]

1.6.3.3 Fyzikální vlastnosti PE

Vlastnosti	Polyetylén		
	rozvětvený	lineární	
		Phillips,Marlex	Ziegler
Krystalinita [%]	40-60	93	65-85
Velikost krystalitů [Å]	180-190	390	200-350
Index lomu [nD]	1,51-1,53	-	1,526-1,534
Propustnost pro vodní páry [cm ³ /cm.s.at.10 ⁻⁸]	40-60	-	15-30

Tab. 4. Fyzikální vlastnosti PE. [10]

1.6.4 Práškový a granulovaný polyetylén

Polyetylén se dodává ve dvou formách a to buď v granulích, různého rozměru a tvaru, nebo ve formě jemného prášku.

1.6.4.1 Příprava práškového polyetylenu

Lineární typy PE se dostanou do práškové podoby přímo z polymerace, kdežto rozvětvené PE je potřeba do práškové formy dostat určitou přípravou.

Nejpoužívanější jsou tyto dvě metody přípravy prášku:

- První postup závisí na tom, že rozpustnost PE se zmenšuje s klesající teplotou. Roztok PE např. v petrolejovém éteru se za zvýšených teplot připraví a následně se ochladí pod 60°C. To způsobí, že se PE vysráží ve formě jemného prášku. Poté se prášek odfiltruje, suší a prosévá, aby se odstranily větší kusy.
- Druhý postup je založen na mechanickém rozmělnování. Provádí se, za velmi nízkých teplot a při vysokých rychlostech. PE se přitlačuje k brusným kotoučům, které mají rychlost 600 až 1000 m/min. A tlak přitlačování se pohybuje mezi hodnotami 0,05 až 0,25 kg/cm². Po celou dobu procesu, musí docházet k vydatnému chlazení stlačeným vzduchem.

Mezi další avšak méně používané metody patří například metoda separace vysráženého prášku nebo příprava práškového PE v hnětáku.

Práškový PE se připravují dle požadavků v různých barvách. Barviva se můžou přidávat buď přímo do roztoku před srážením, nebo až dodatečně po vysrážení. Přidání přímo do roztoku je efektivnější, neboť dojde k rovnoměrnému probarvení. Používanější je ale druhý způsob, protože základní aparatura se nemusí při změnách barev čistit. [10]

1.6.4.2 Příprava granulí

Granule můžou mít tvar krychlí, válečků nebo kulovitých tělísek.

Krychlový tvar granulí se získává z pásů, které se řezou podélně i příčně. Válcový tvar granulí se vyrábí na granulovací lince s vytlačovacím strojem. [10]

1.6.5 Plniva a ostatní příměsi v PE

Při výrobě se do PE přidávají tepelné stabilizátory, barviva a plniva.

Přídavkem plniv do PE se dosáhne zpravidla zlevnění výrobku, zvýšení váhy a tuhosti. Pro odstranění vzniku statické elektřiny nebo snížení hořlavosti se používají speciální plniva.

PE s plnivou může tvořit dva druhy směsi a to směs čistou a směs zakalenou.

Do směsí čirých lze zařadit např.:

- parafín
- kyselinu olejovou
- PVC
- Polyizobutylene (PIB)
- thiokol či některé kaučuky

Do směsí zakalených lze zařadit např.:

- minerální plniva, křída, saze, mastek, Al_2O_3
- chlór kaučuk
- polystyren, polypropylen, polybuten...
- kalafuna a šelak

Polyetylén není příliš vhodný pro plnění, protože plněný PE má většinou horší vlastnosti než neplněný PE.

Srovnání některých vlastností plněného a neplněného PE:

Vlastnost	Neplněný PE	Plněný PE 40 % kaolínu
Mrazuvzdornost [°C]	-90	-15
Pevnost v tahu [kg/cm ²]	137	126
Tažnost [%]	150	45
Elektrická pevnost při 25 °C [kV/mm]	40	39
Elektrická pevnost při 80 °C [kV/mm]	25	21
Nasákavost [%]	0,01	0,1

Tab. 5. Srovnání vlastností PE plněného a neplněného. [10]

Často se v praxi používají minerální plniva jako uhličitán vápenatý, síran barnatý, kaolín, chlorid hořečnatý, křemenné moučky apod. Aby se dosáhlo rovnoměrné distribuce plniva, je zapotřebí dostatečně jemných plniv a dokonalá homogenizace.

Kysličník antimony nebo chlórované parafíny se do polyetylénů přidávají, aby se dosáhlo snížené hořlavosti. [10]

1.6.6 Použití PE

Polyetylén má velmi široké spektrum uplatnění. Nejvíce se však používá v obalové technice.

1.6.6.1 Obalové materiály z PE

Z obalových materiálů jsou nejpoužívanější fólie, sáčky, tuby a láhve. [10]

1.6.6.1.1 Obalové fólie a sáčky

Při výrobě fólií je potřeba dbát na požadované fyzikální vlastnosti. Důležitá je hlavně jejich pevnost, tažnost, nasákavost, chemická odolnost a propustnost pro plyn a vodní páru. Například PE sáčky a fólie lze použít na zeleninu a ovoce, protože mají velkou propustnost pro kyslík a malou pro vodní páry. Dále se využívají na balení květin, cukrů, prášků atd. Nevhodné jsou pro balení tuků a olejů, protože PE může v nich botnat. (Dále je nevhodné

balení za horka, snižuje se tak pevnost obalu). Fólie a sáčky se zhotovují v různých velikostech o různých tloušťkách. [10]

1.6.6.1.2 Polyetylenové lamináty

Mezi nejrozšířenější obalový polyetylenový laminát patří papír s nánosem PE. Papír zajistí laminátu potřebnou pevnost a tuhost. Nános naopak zajistí vodovzdornost, odolnost proti chemikáliím. Toto balení je vhodné pro zboží, které nesmí vysychat. [10]

1.6.6.1.3 Láhve, tuby a uzávěry

Láhve, tuby a uzávěry se používají pro balení potravin, agresivních kapalin i čistých chemikálií. Láhve mají výhodu tu, že jsou lehké, nerozbitné, neznečišťují náplň. Pasty a tekutiny se často balí do tub. Tuby jsou dokonale těsné. Uzávěry mají různé podoby např. zátky lahví, rozprašovací uzávěry na parfémy, nebo obyčejné šrubovací uzávěry. [10]

1.6.7 Kabely z PE

Polyetylén se používá jako výborná izolační materiál tedy na výrobu různých kabelů (izolační pláště, fólie, pásy). PE zde funguje jako velmi dobrý izolant. Může se jednat o telefonní kabely, kabely různé elektroniky, prodlužovací kabel atd. [10]

1.6.8 Potrubí

Potrubí může být vyráběno v několika druzích. Dělají se větrací komíny, odsávací a klimatizační zařízení, aparatury, vodovodní a odpadní trubky atd. [10]

1.6.9 Ostatní použití PE

Použití PE je velmi široké. Polyetylen se také hojně používá i ve stavebnictví, zemědělství a při výrobě spotřebního zboží a hraček. [10]

1.7 Plniva pro polymery

Plniva obecně můžeme definovat jako materiály, které se přidávají do polymerů s cílem zlepšit některé jejich vlastnosti nebo snížit náklady výrobku. Používají se v pevném, plyném i kapalném skupenství. Plniva lze rozdělit do dvou kategorií:

- aktivní
- inertní

Inertní:

Jejich hlavním cílem je nahradit část dražšího polymeru, což celkově sníží náklady. Plniva by měla splnit následující vlastnosti:

- a) zachování anizotropních vlastností
- b) nezpůsobit chemické reakce
- c) nízká měrná hmotnost
- d) potřebný index lomu a barva
- e) Nízká cena [11]

Aktivní:

Aktivní plniva mají naopak za úkol zajistit nové vlastnosti. Například zlepšení pevnosti, tepelné roztažnosti, odolnost proti ohni, vodě atd. Plniva, která jsou pro jeden polymer aktivní, mohou být pro druhý polymer inertní. [11]

1.7.1 Částice plniv (prášek, vlákno, zrno)

Výplň se může lišit:

- a) Průměrnou velikostí částic a stupněm distribuce
- b) Tvarem částic, pórů a dutin
- c) Chemickou povahou povrchu
- d) Příměsemi - nečistotou (písek nebo kovové ionty)

Bylo zjištěno, že směsi s plnivou s jemnějšími částicemi mají vyšší pevnost v tahu a tvrdost. [11]

1.7.2 Uhličitan vápenatý - CaCO_3

Uhličitan vápenatý je bílá krystalická látka, používá se například jako hnojivo nebo jako plnivo do polymerních materiálů. V přírodě ho můžeme najít ve formě vápence. Zahřátím uhličitanu vápenatého dojde k jeho rozkladu a vznikne oxid vápenatý CaO a oxid uhličitý CO_2 . Tomuto procesu se odborně říká pálení vápna.

Uhličitan vápenatý je málo rozpustný ve vodě. Vyskytuje se v některých nerostech a horninách např. aragonit, křída, kalcit, vápenec, mramor, travertin... [12]

Uhličitan vápenatý technický se nejčastěji používá pro speciální účely v kosmetickém průmyslu, jako plnivo do papíru, pryže, plastů, laků, barev, nátěrových hmot, tiskových barev atd. Výrobek obsahuje nebezpečnou látku, hydroxid vápenatý a to 0,2 %.

Látka není toxická, je stálá, nepodléhá degradaci, není hořlavá, nezpůsobuje explozi. Jedná se o minerální látku (vápenec).

Uhličitan vápenatý se průmyslově vyrábí elektrolýzou taveniny chloridu vápenatého.

Skladovat by se měl v původních obalech, v suchých a krytých skladech. [13]

Vzhled: skupenství - pevná látka, bílý prášek

barva – bílá

zápach – bez zápachu [13]

1.8 Materiály PE

1.8.1 PE – Liten

Polyetylén liten je lineární polyetylén a je to obchodní název materiálů společnosti Unipetrol RPA,s.r.o. Jedná se o termoplastické materiály, které se řadí do skupiny polyolefinů.

Liten se používá při výrobě vyfukovaných výrobků, vstřikovaných výrobků, folií, trubek a desek. [14]

Vyfukováním se z litenu zhotovují např:

- Láhve
- Kanystry
- Kontejnery
- Nádrže
- Sudy
- Kbelíky
- Folie [14]

Vstřikováním se z litenu zhotovují např:

- Hračky

- Přepravky
- Víčka na láhve
- Potřeby pro domácnost
- Popelnice
- Technické díly [14]

Vytlačováním se z litenu zhotovují např:

- Trubky
- Folie [14]

Folie z litenu se zhotovují pro různé účely např:

- Tašky
- Folie pro balení potravin
- Obaly průmyslového zboží [14]

Trubky z litenu se zhotovují pro různé účely např:

- Chrániče kabelů
- Vícevrstvé trubky pro vytápění
- Tlakové rozvody vody [14]

Desky z litenu se zhotovují pro různé účely např:

- Desky pro svařování nádob
- Izolační desky [14]

1.8.1.1 PE-Liten BB 29

Jedná se o kopolymer polyetylenu, který má širokou distribuci molekulových hmotností a základních aditivací. Výrobcem je společnost Unipetrol RPA,s.r.o.

Liten BB 29 se nejčastěji používá pro vyfukování nádob do objemu 120 litrů, jako třeba láhve a sudy. Dále se používá pro vytlačování trubek, výrobu hraček a obalů pro farmaceutické použití. [14]

1.8.2 Nízkohustotní polyetylén (LDPE)

Nízkohustotní polyetylén patří k nejstaršímu typu polyetylénu. Vyrábí se z etylenu za použití vysokého tlaku. Struktura LDPE je vysoce rozvětvená. Je měkký, pevný a ohebný. Hustota se pohybuje v rozmezí 915 až 935 kg/m³. Používá se pro pevné a poddajné předměty. Nejčastěji se používá na folie, dopravní pytle, balicí materiály...

Pro výrobu LDPE jsou používány dva typy reaktorů, buď míchaná nádoba (autokláv) nebo trubkový reaktor. Uvedené typy reaktorů ale vyrábějí produkty, které mají rozdílné molekulové struktury a jsou proto používány v různých aplikacích dle výrobku. Výrobcem je společnost Slovnaft,a.s. [15]

1.8.2.1 LDPE-Bralen Va 20-60

Bralen

Bralen je obchodní název LDPE firmy Slovnaft,a.s.. Jedná se o rozvětvený nízkohustotní polyetylén. Vyrábí se vysokotlakou polymerací etylénu. Vyznačuje se výbornými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi. Je houževnatý, pružný a stálý v teplotním rozmezí -50 až 85°C. Je stálý vůči neoxidujícím kyselinám, luhům, solím a jejich roztokům. [16]

Bralen – Va 20-60

Jedná se o nízkohustotní polyetylén, který se díky dobrým tokovým vlastnostem používá pro vstřikování.

Nejčastěji se používá pro výrobky pro domácnost, technické výrobky a hračky. Nedoporučuje se používat pro výrobky vystavené vysokému mechanickému namáhání a pro výrobky vystavené účinkům korozivních médií. Lze jej používat na výrobky, které přicházejí do kontaktu s potravinami nebo pro výrobky farmaceutického průmyslu. [16]

1.9 Zkoušení plastů

Zkoušky polymerů se provádí z důvodu určení jejich vlastností, které je potřeba znát pro kontrolu výrobního procesu při výrobě a zpracování těchto hmot, pro vývoj nových výrobků, pro stanovení užitečných vlastností výrobků apod. [7]

1.9.1 Stanovení indexu toku taveniny (ITT = MFI)

Index toku taveniny charakterizuje tokové vlastnosti polymeru. Měří na výtlačném kapilárním viskozimetru, což je kovový válec s pístem a kapilárou. Parametry a podmínky sta-

novení jsou stanoveny normou ČSN EN ISO 1133 (např. tlak na píst, teplota, rozměry vytlačné kapiláry i jiných částí viskozimetru). Index toku taveniny se udává jako množství vytlačeného polymeru za 10 minut. Jednotkou je tedy g/10min. [7]

MFR (melt flow rate) = hmotnostní index toku taveniny [g/10min]

$$\text{MFR}(T, m_{\text{nom}}) = \frac{t_{\text{ref}} \cdot m}{t}$$

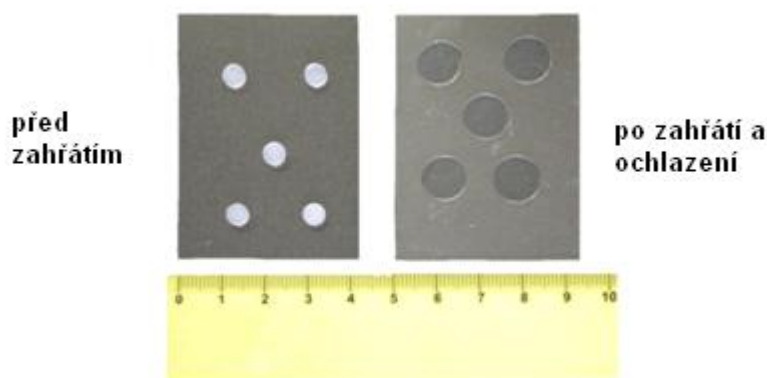
Kde: T je zkušební teplota taveniny [°C], m_{nom} je nominální zatížení [kg], m je průměrná hmotnost odřezků [g], t_{ref} je referenční čas [s] (10min=600s), t je interval odřezávání [s]. [17]

1.9.2 Splitting index

Splitting index je nově vyvíjená termoreologická metoda měření tekutosti polymerů. Metoda je vyvíjena za účelem jednoduchého, rychlého a snadno dostupného charakterizování tekutosti (viskozity) polymeru. Při měření indexu toku taveniny je např. na rozdíl od metody splitting index velká spotřeba materiálu, a proto je snahou zavádět metodu splitting index v laboratořích, kde je často k dispozici jen malé množství zkoumaného materiálu. Další výhodou je, že je možné měřit několik vzorků současně a rychle. Splitting index se vyjádří jako změna původního rozměru vzorku v milimetrech nebo procentech.

Pro užití metody splitting indexu v laboratorních podmínkách je zapotřebí nejprve připravit lisováním destičky. Destička se vylisuje v laboratorním lisu. Po vychladnutí se z destičky vyrazí požadovaný tvar vzorků. Vzorky se můžou zhotovit ve formě koleček, obdélníčků i jiných tvarů. Nejsnadněji se však pracuje se vzorky kruhových tvarů, kdy průměr by neměl být menší než 5 mm. Vzorky se pak položí mezi rovná mikroskopická sklíčka zatížená zvoleným závažím (obvykle 100 a 200g) a vyhřívají se na topném stolku o požadované teplotě. Vzorky se taví po zvolenou dobu (obvykle 10minut). Po ochlazení se změří změny rozměrů vzorků.

Další výhodou je, že na změřený vzorek (bez úprav) je možné dále aplikovat další měření struktury a morfologie polymerů (např. krystalinitu, fázové změny, orientace, atd.).



Obr. 6. Laboratorní sklička se vzorky.

1.9.3 Stanovení ZST

Zkouška ZST (zero strength time) = doba do ztráty pevnosti. Jde o měření času, který je potřebný k tomu, aby se namáhané zkušební tělísko při určité teplotě přetrhlo. Zkušební tělísko, které má požadované rozměry se zatíží $7,5 \pm 0,1$ g. Stanovení ZST u PE se provádí při 130, 140, 150, 160 a 175°C. U nízkomolekulárních typů musí být zkušební teplota nižší (130 nebo 140°C), aby doba do ztráty pevnosti byla dostatečně dlouhá. Naopak u vysokomolekulárních typů lze použít vyšších teplot. [10]

1.9.4 Tahové zkoušky

Tahové zkoušky jsou nejpoužívanější. Zkušební vzorek o rozměrech dle ČSN je jednosměrným tahem deformován, až dojde k jeho porušení (přetržení). Tahové zkoušky se provádí na trhacích strojích s určitým rozsahem zatížení. [7]

Používají se dva tvary zkušebních těles: těleso ve tvaru oboustranných lopatek a ve tvaru kroužku. Kroužky se používají pouze pro pryže. Rozměry a tvary zkušebních těles jsou normalizované podle ČSN. [7]

Při zkoušce se měří dvě věci: deformace vzorku a síla nutná k deformaci. Výsledkem je tahová křivka materiálu znázorňující průběh zkoušky jako závislost napětí na deformaci. [7]

1.9.5 Zkoušky tvrdosti

Tvrdot je definována jako odpor materiálu proti vnikání tvrdšího tělesa (identor). Metody měření tvrdosti jsou rozděleny podle tvaru identoru:

- Kuličkou nebo tyčkou s kulovým ukončením
- Kuželem nebo jehlanem
- Komolým kuželem

Tvrдость pryží a měkkých polymerů se nejčastěji měří na tvrdoměru Shore. Tvrdoměr Shore je založen na měření odporu hmoty proti vtlačování ocelového hrotu daného tvaru.

Tvrдость tvrdých materiálů se nejčastěji měří metodou vtisku kuličky. Z naměřených hodnot (zatížení kuličky, průměr kuličky, hloubka vtisku kuličky) se vypočítá tvrdost. [7]

1.9.6 Ostatní zkoušky

V praxi se používá velké množství různých zkoušek. Provádí se ty zkoušky, které jsou potřebné znát pro daný budoucí výrobek s ohledem na jeho používání. Mezi další často používané zkoušky patří:

- Tlakové zkoušky
- Ohybové zkoušky
- Relaxační zkoušky
- Zkoušky rázové a vrubové houževnatosti
- Zkoušky opotřebení
- Zkoušky při zvýšených teplotách
- Zkoušky přirozeného stárnutí
- Zkoušky chemické koroze atd. [7]

V této práci byly aplikovány zkoušky indexu toku taveniny a splitting indexu.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

1.10 Seznámení s metodikou Spliting index

Metodika splitting index spočívá ve zkoumání tekutosti polymerních vzorků. Daný vzorek polymerního materiálu se umístí mezi dvě sklíčka, a ta položí na vyhřátý teplotní stolek a zatíží se závažím. Po určitém čase se vzorek vyjme, ochladí a porovnají se jeho počáteční a konečné rozměry.

Hlavní výhodou této srovnávací metody je nízká spotřeba zkušebního materiálu.

Metoda splitting index byla nově vyvinuta na Ústavu inženýrství polymerů na UTB ve Zlíně.

1.11 Použité materiály

PE-liten BB 29, LDPE – Bralen Va 20-60, plnivo – uhličitán vápenatý

Měření se provádělo na pěti destičkách z různých materiálů:

- Č.1 - PE-liten BB29
- Č.2 - PE-liten + 30% CaCO₃
- Č.3 - LDPE čistý
- Č.4 - LDPE + 10% CaCO₃
- Č.5 - LDPE + 25% CaCO₃

Destička PE Litenu a PE litenu + 30% CaCO₃ byla již k dispozici, ostatní destičky bylo nutné vylisovat z prášků.

Směs č.1: LDPE čistý

Směs č.2: LDPE+10% CaCO₃

Směs č.3: LDPE+25% CaCO₃

1.11.1.1 Uhličitan vápenatý

Fyzikální a chemické vlastnosti uhličitanu vápenatého:

hodnota pH [°C]	8 - 12 (výluh 5%)
bod tání [°C]	nad 700 °C se rozkládá
hořlavost	je nehořlavá
bod varu [°C]	nemá
bod vzplanutí [°C]	nemá
oxidační vlastnosti	neoxiduje
hustota [kg/dm³]	2710 kg/dm ³
sypná hmotnost	300-360 kg/m ³
rozpustnost ve vodě/n-oktanol	malá
výbušnost [obj %]	nemá

Tab. 6. Fyzikální a chemické vlastnosti uhličitanu vápenatého sraženého. [13]

Výrobce:

EURO-Šarm, spol. s. r.o.

Těšínská 222, 739 34 Šenov

Česká republika

www.eurosarm.cz

1.11.1.2 PE-Liten BB 29

Typické vlastnosti polyetylénu litenu BB 29:

VLASTNOST	HODNOTA	JEDNOTKA
INDEX TOKU TAVENINY (190/2,16)	0,15	g/10 min
INDEX TOKU TAVENINY (190/5)	0,7	g/10 min
INDEX TOKU TAVENINY (190/21,6)	17	g/10 min
HUSTOTA	950	kg/m ³
NAPĚTÍ NA MEZI KLUZU	24	MPa
TAŽNOST NA MEZI KLUZU	10	%
OHYBOVÝ MODUL	1050	MPa
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY 23°C	12	kJ/m ²
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY -30°	5	kJ/m ²
TEPLOTA MĚKNUTÍ DLE VICATA	125	°C
TVRDOST SHORE D	60	-

Tab. 7. Vlastnosti polyetylénu litenu BB 29. [14]

Výrobce:

UNIPETROL RPA, s.r.o.

Záluží 1, 436 70 Litvínov

Česká republika

www.unipetrolrpa.cz

1.11.1.3 LDPE – Bralenu Va 20-60

Vlastnosti Bralenu Va 20-60

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Index toku taveniny (190°C/2,16kg)	20	g/10min
Hustota (23°C)	914	kg/m ³
Mez pevnosti v tahu	8	Mpa
Teplota měknutí dle Vicata	84	°C
Tvrdość Shore D	41	-

Tab. 8. Vlastnosti Bralenu Va 20-60. [16]

Výrobce:

SLOVNAFT, a.s.

Vlčie hrdlo 1, 824 12 Bratislava

Slovenská republika

www.slovnaft.sk

1.11.2 Lisování destiček

Stroj: hydraulický lis

Teplota: 160°C

Čas: 2 minuty

Navážka: 4g

Tloušťka destičky: 2mm

Sušení prášku:

Před lisováním byly prášky sušeny 22 hodin při 60°C v sušárně Binder.

1.11.3 Vyseknutí vzorků

Z destiček o tloušťce 2mm se ručně vysekly vzorky o průměru 5 mm. (K vyseknutí se použil ruční děrovač, dřevěná destička a kladívko).

1.11.4 Příprava vzorků k ohřevu

Vzorky se přilepily na sklíčko pomocí PVAL- polyvinylalkoholu (zabrání posunutí vzorků) a přikryly dalším sklíčkem. Takto připravená sklíčka se vzorky se vložila na topný stůlek vyhřátý na zvolenou teplotu. Některé materiály se roztavily do té míry, že sklíčka po ohřevu nešla odlepit od sebe. Tenhle problém se vyřešil potřením sklíček saponátem (Jarem).

1.11.5 Samotný proces ohřevu

Vzorky ve sklíčkách se na určenou dobu položily na topný stůlek, který měl nastavenou požadovanou teplotu, a zatížily se požadovaným závažím. Čas, zatížení a teploty se pak změnilo a zkoumalo se, jak se tyto veličiny projeví u různých materiálů. Měření se opakovalo minimálně 5x za různých podmínek (teplota, tlak, zatížení).

1.12 Výsledky měření PE-litenu metodou splitting index

Výchozí vzorek byl kotouč o průměru 5mm a tloušťce 2 mm. Bylo měřeno paralelně 5 vzorků.

SI je tedy procentuální změna lineárního rozměru při dané teplotě za 10 minut.

1.12.1 PE-líten – lineární PE

Změna průměru vzorku po zahřátí a zatížení:

T [°C]	čas [min]	zatížení [g]	konečný průměr [mm]	SI [%]
160	10	100	8,4	68
170	10	100	8,6	72
180	10	100	8,6	72
190	10	100	8,8	76

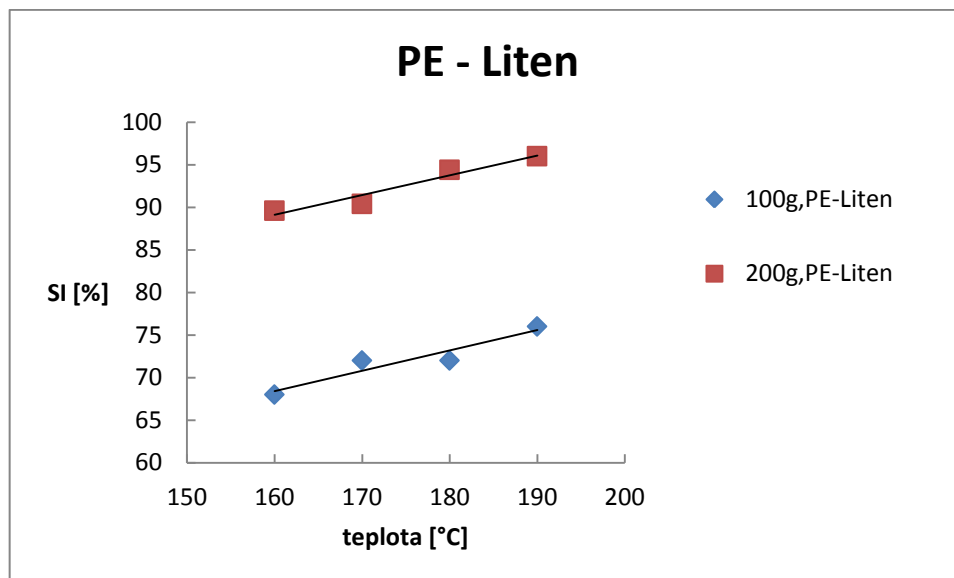
Tab. 9. Výsledné hodnoty PE-litenu při zatížení 100g metodou splitting index.

T [°C]	čas [min]	zatížení [g]	konečný průměr [mm]	SI [%]
160	10	200	9,48	89,6
170	10	200	9,52	90,4
180	10	200	9,72	94,4
190	10	200	9,8	96

Tab. 10. Výsledné hodnoty PE-litenu při zatížení 200g metodou splitting index.

1.12.1.1 Graf pro PE-líten

V grafu je znázorněn vliv zatížení a vliv teploty. Změnou zatížení ze 100g na 200g došlo ke zvýšení SI přibližně o 20% a změnou teploty o 10°C došlo ke zvýšení SI přibližně o 3%.



Graf 1. Výsledné hodnoty PE-litenu metodou splitting index.

1.12.2 PE-Liten + 30% CaCO₃

Změna průměru vzorku po zahřátí a zatížení:

T [°C]	čas [min]	zatížení [g]	konečný průměr [mm]	SI [%]
160	20	100	5,8	16
170	20	100	6,48	29,6
180	20	100	6,56	31,2
190	20	100	6,92	38,4

Tab. 11. Výsledné hodnoty PE-Liten + 30% CaCO₃ při zatížení 100g metodou splitting index.

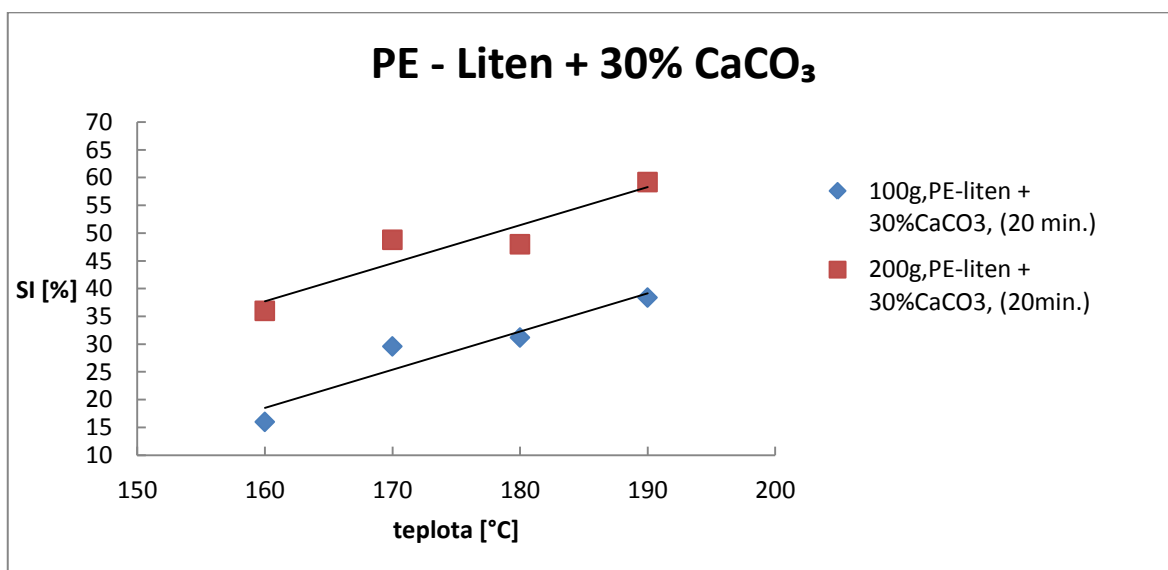
T [°C]	čas [min]	zatížení [g]	konečný průměr [mm]	SI [%]
160	20	200	6,8	36
170	20	200	7,44	48,8
180	20	200	7,4	48
190	20	200	7,96	59,2

Tab. 12. Výsledné hodnoty PE-Litenu + 30% CaCO₃ při zatížení 100g metodou splitting index.

1.12.2.1 Graf pro PE-liten + 30% CaCO₃

V grafu je znázorněn vliv zatížení, vliv teploty a vliv plniv. Změnou zatížení ze 100g na 200g došlo ke zvýšení SI přibližně o 20% a změnou teploty o 10°C došlo ke zvýšení SI přibližně o 6%.

Vliv plniv se projevil výrazně. SI u PE-litenu čistého je vyšší přibližně o 50% než u PE-litenu s 30% CaCO₃.



Graf 2. Výsledné hodnoty PE – Litenu + 10 %CaCO₃ metodou splitting index.

1.13 Výsledky měření LDPE-bralenu metodou splitting index

1.13.1 LDPE - Bralen

Změna průměru vzorku po zahřátí a zatížení:

T [°C]	čas [min]	zatížení [g]	konečný průměr [mm]	SI [%]
160	10	100	14,32	186,4
170	10	100	15,6	212
180	10	100	16,76	235,2
190	10	100	17,6	252

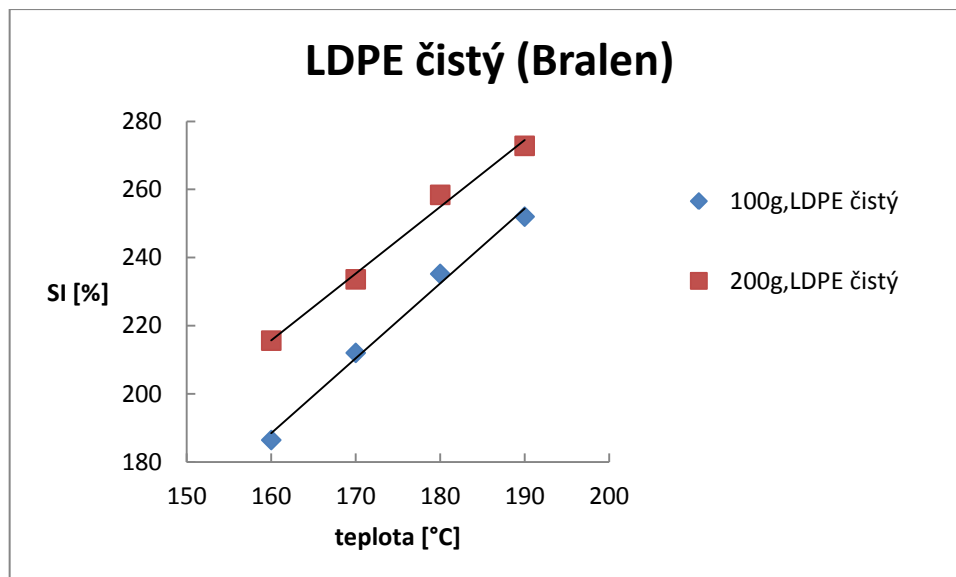
Tab. 13. Výsledné hodnoty LDPE čistého (Bralenu) při zatížení 100g metodou splitting index.

T [°C]	čas [min]	zatížení [g]	konečný průměr [mm]	SI [%]
160	10	200	15,78	215,6
170	10	200	16,68	233,6
180	10	200	17,92	258,4
190	10	200	18,64	272,8

Tab. 14. Výsledné hodnoty LDPE čistého (Bralenu) při zatížení 200g metodou splitting index.

1.13.1.1 Graf pro LDPE čistý (Bralen)

V grafu je znázorněn vliv zatížení a vliv teploty. Změnou zatížení ze 100g na 200g došlo ke zvýšení SI přibližně o 25% a změnou teploty o 10°C došlo ke zvýšení SI přibližně o 14%.



Graf 3. Výsledné hodnoty LDPE čistého (Bralenu) metodou splitting index.

1.13.2 LDPE (Bralen) + 10% CaCO₃

Změna průměru vzorku po zahřátí a zatížení:

T [°C]	čas [min]	zatížení [g]	konečný průměr [mm]	SI [%]
160	10	100	13,78	175,6
170	10	100	15,24	204,8
180	10	100	16,12	222,4
190	10	100	16,76	235,2

Tab. 15. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 10% CaCO₃ při zatížení 100g metodou splitting index.

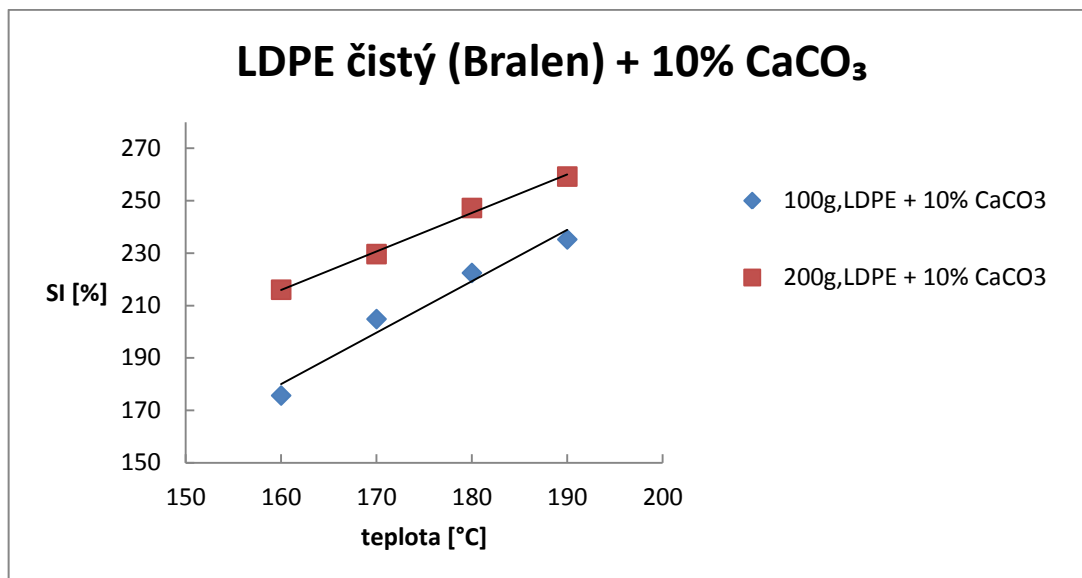
T [°C]	čas [min]	zatížení [g]	konečný průměr [mm]	SI [%]
160	10	200	15,8	216
170	10	200	16,48	229,6
180	10	200	17,36	247,2
190	10	200	17,96	259,2

Tab. 16. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 10% CaCO₃ při zatížení 200g metodou splitting index.

1.13.2.1 Graf pro LDPE (Bralen) + 10% CaCO₃

V grafu je znázorněn vliv zatížení, vliv teploty a vliv plniv. Změnou zatížení ze 100g na 200g došlo ke zvýšení SI přibližně o 30% a změnou teploty o 10°C došlo ke zvýšení SI přibližně o 15%.

Vliv plniv se projevil nepatrně. SI u LDPE čistého (Bralenu) je vyšší přibližně o 10% než u LDPE (Bralenu) s 10% CaCO₃.



Graf 4. Výsledné hodnoty LDPE (Bralen)+ 10% CaCO₃ metodou spliting index.

1.13.3 LDPE (Bralen) + 25% CaCO₃

Změna průměru vzorku po zahřátí a zatížení:

T [°C]	čas [min]	zatížení [g]	konečný průměr [mm]	SI [%]
160	10	100	13,28	165,6
170	10	100	13,9	178
180	10	100	14,36	187,2
190	10	100	14,8	196

Tab. 17. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 25% CaCO₃ při zatížení 100g metodou spliting index.

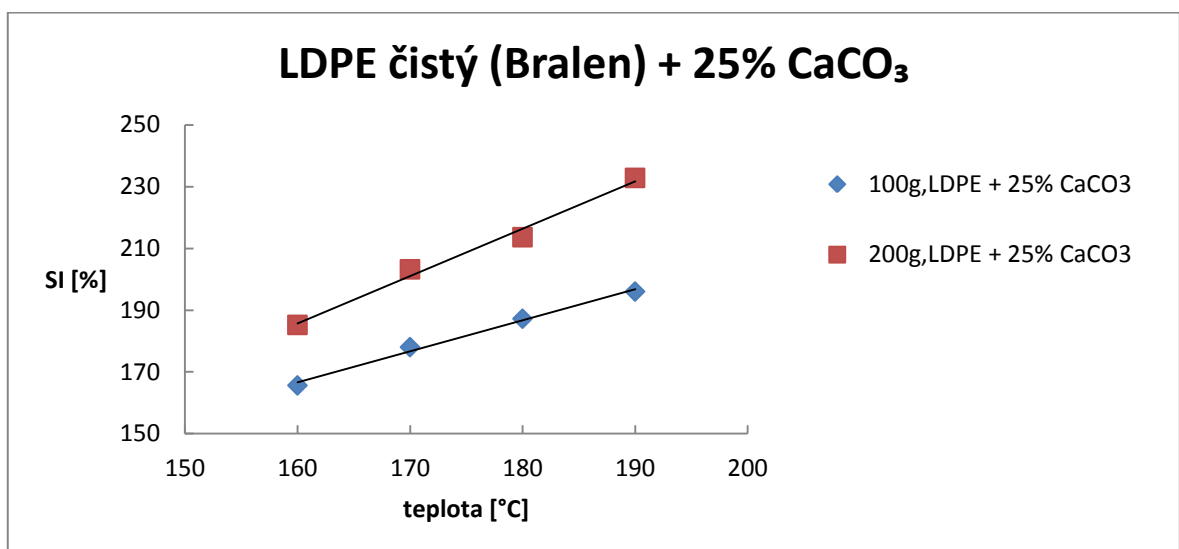
T [°C]	čas [min]	zatížení [g]	konečný průměr [mm]	SI [%]
160	10	200	14,26	185,2
170	10	200	15,16	203,2
180	10	200	15,68	213,6
190	10	200	16,64	232,8

Tab. 18. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 25% CaCO₃ při zatížení 200g metodou spliting index.

1.13.3.1 Graf pro LDPE (Bralen) + 25% CaCO₃

V grafu je znázorněn vliv zatížení, vliv teploty a vliv plniv. Změnou zatížení ze 100g na 200g došlo ke zvýšení SI přibližně o 25% a změnou teploty o 10°C došlo ke zvýšení SI přibližně o 15%.

Vliv plniv se projevil značně více než u LDPE (Bralenu) s 10% CaCO₃. SI u LDPE (Bralenu) s 10% CaCO₃ je vyšší přibližně o 30% než u LDPE (Bralenu) s 25% CaCO₃. A přibližně o 40 % než u LDPE (Bralenu) čistého.



Graf 5. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 25% CaCO₃ metodou splitting index.

1.14 Shrnutí metody splitting index

SI citlivě reaguje na:

- Molekulovou hmotnost polymeru, snižuje se s rostoucí molekulovou hmotností
- Teplotu, zatížení a dobu měření, zvyšuje se při vyšší teplotě a delší době měření
- Obsah plniv, s rostoucím obsahem plniva se snižuje

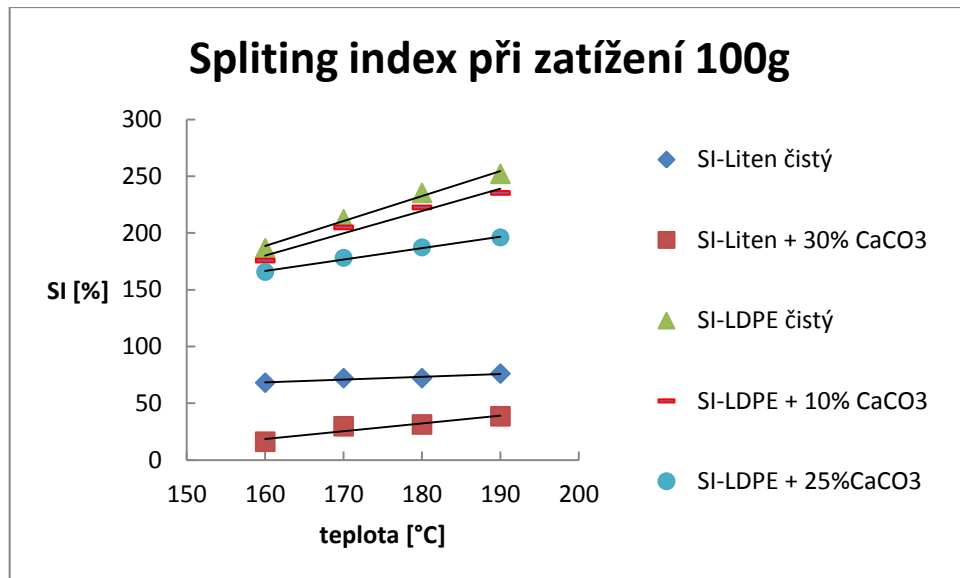
Menší množství práškového plniva (10%) snižuje SI jen nepatrně.

Vliv teploty: v rozmezí teplot 160 – 190 °C se při zatížení 100g (i 200g) zvýší SI o 3-15% na 10°C.

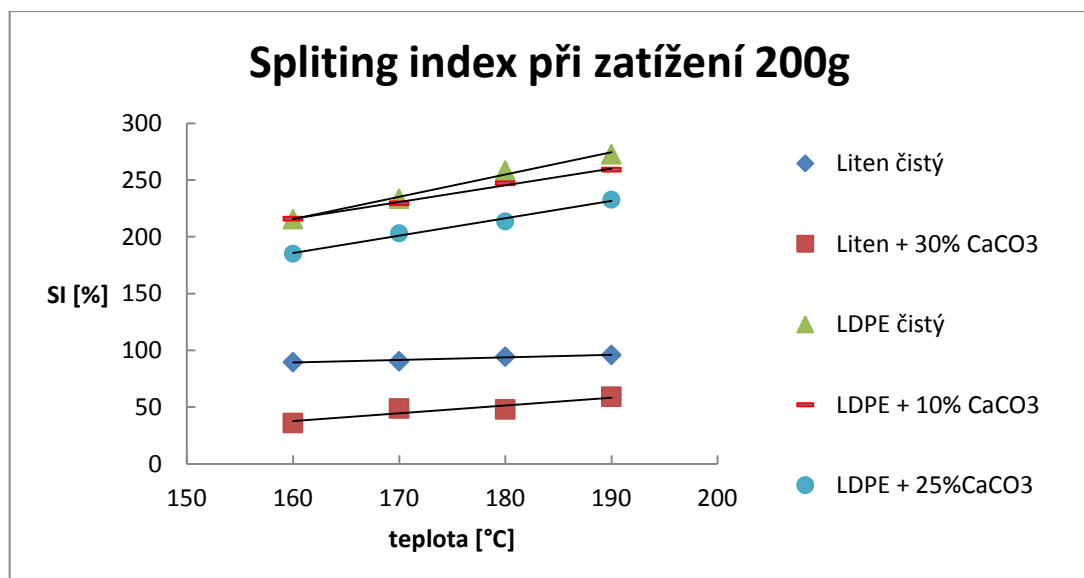
Vliv zatížení: změnou zatížení ze 100 na 200g došlo ke zvýšení SI o 20-30%.

U metody SI působily na vzorky poměrně malé tlaky. Při zatížení 100g zde působil tlak 50Pa a při zatížení 200g byl tlak 100Pa.

Je potřeba počítat s chybami měření, které se mohly vyskytnout vlivem nepřesnosti zařízení nebo nepřesným odečítáním hodnot pozorovatelem. Teplota se tedy může pohybovat v tolerancích $\pm 2^\circ\text{C}$. Tolerance odečítání hodnot průměrů vzorků je přibližně $\pm 0,5\text{mm}$.



Graf 6. Shrnutí výsledných hodnot všech materiálů při zatížení 100g.



Graf 7. Shrnutí výsledných hodnot všech materiálů při zatížení 200g.

1.14.1 Tlak působící na vzorky u metody SI

Tlak se vyjádří jako podíl síly ku ploše : $p = \frac{F}{S}$ [Pa]

Závaží u splitting indexu bylo 100 a 200g a kruhová plocha působení síly (plocha vzorku) byla o průměru 5 mm.

Síla se vyjádří jako součin hmotnosti a tíhového zrychlení: $F = m \cdot g$ [N]

Tlak SI při zatížení 100g:

$$p = \frac{0,1 \cdot 9,81}{\frac{\pi \cdot 5^2}{4}} = \frac{0,981}{0,0000196} = 50 \text{ kPa}$$

Tlak SI při zatížení 200g:

$$p = \frac{0,2 \cdot 9,81}{\frac{\pi \cdot 5^2}{4}} = \frac{1,962}{0,0000196} = 100 \text{ kPa}$$

Tlaky působící na vzorky u metody splitting index byly 50 kPa u zatížení 100g a 100 kPa u zatížení 200g.

1.15 Výsledky měření LDPE – bralenu metodou Indexu toku taveniny (MFR)

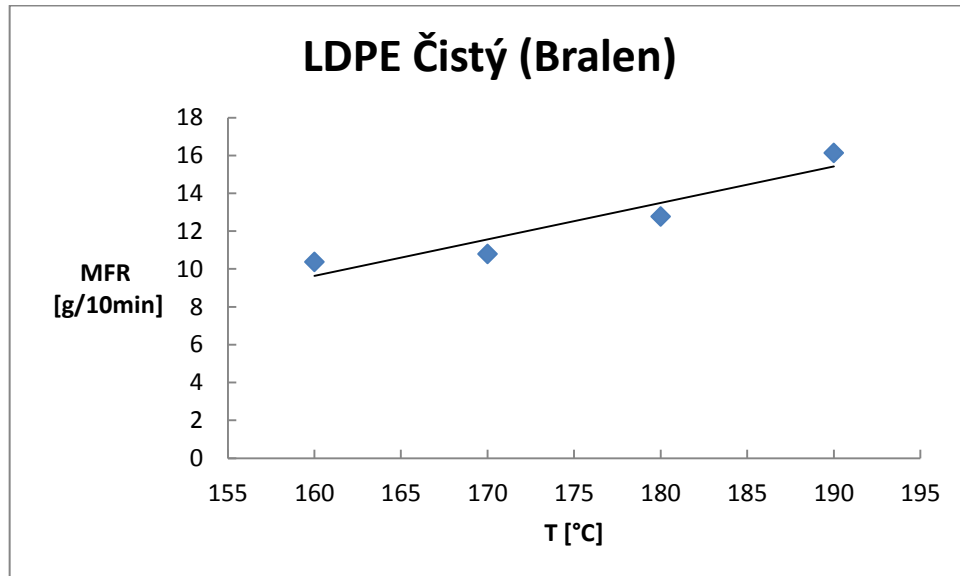
1.15.1 LDPE Čistý (Bralen)

T [°C]	t _{ref} [s]	t [s]	m [g]	MFR [g/10min]
160	600	10	0,173	10,38
170	600	10	0,18	10,8
180	600	10	0,213	12,78
190	600	10	0,269	16,14

Tab. 19. Výsledné hodnoty LDPE Čistého (Bralenu) metodou MFR.

1.15.1.1 Graf pro LDPE čistý (Bralen)

V grafu je znázorněn vliv teploty. Změnou teploty o 10°C došlo ke zvýšení MFR přibližně o 2 g/10min.



Graf 8. Výsledné hodnoty LDPE čistého (Bralenu) metodou MFR.

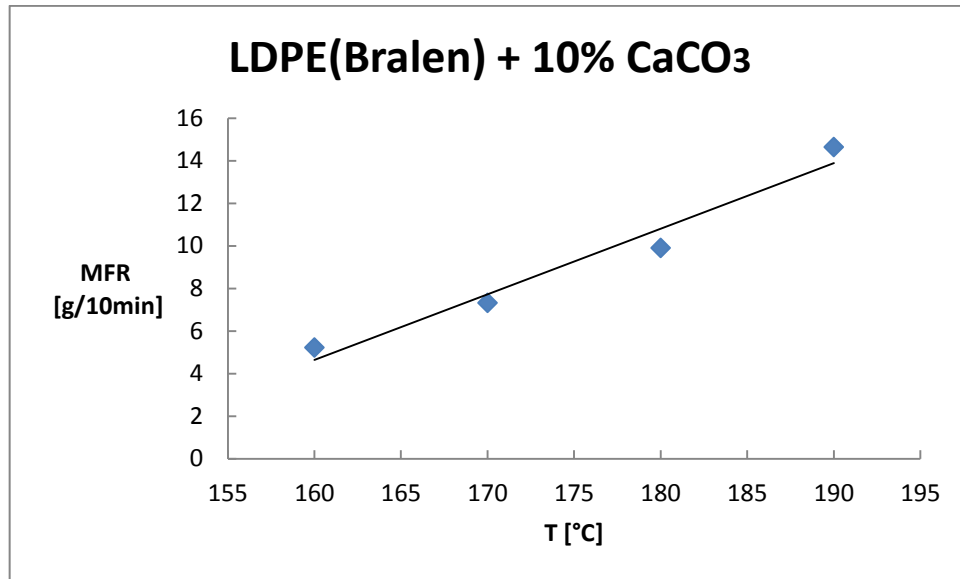
1.15.2 LDPE (Bralen) + 10% CaCO₃

T [°C]	t _{ref} [s]	t [s]	m [g]	MFR [g/10min]
160	600	10	0,087	5,22
170	600	10	0,122	7,32
180	600	10	0,165	9,9
190	600	10	0,244	14,64

Tab. 20. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 10% CaCO₃ metodou MFR.

1.15.2.1 Graf pro LDPE (Bralen) + 10% CaCO₃

V grafu je znázorněn vliv teploty. Změnou teploty o 10°C došlo ke zvýšení MFR přibližně o 3 g/10min.



Graf 9. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 10% CaCO₃ metodou MFR.

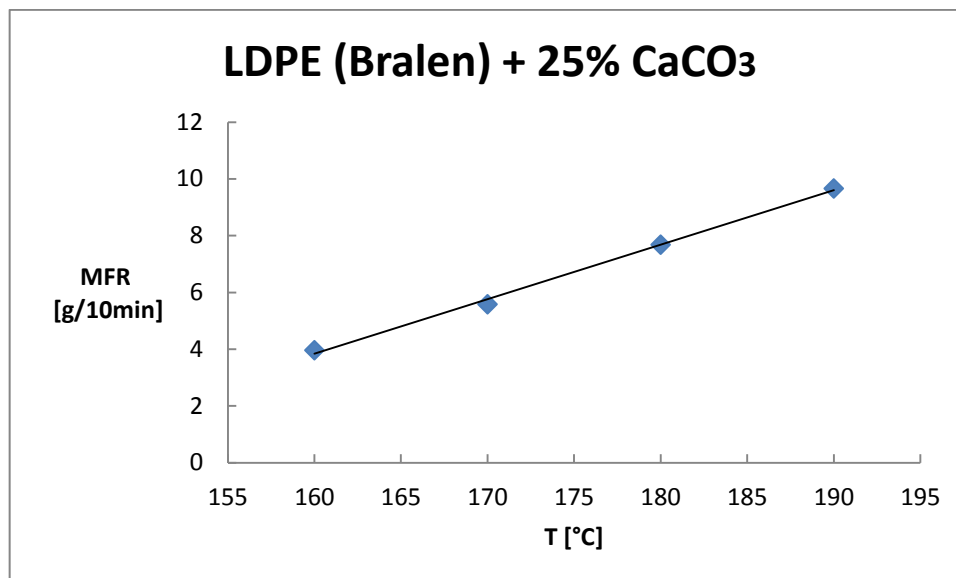
1.15.3 LDPE(Bralen) + 25% CaCO₃

T [°C]	t _{ref} [s]	t [s]	m [g]	MFR [g/10min]
160	600	10	0,066	3,96
170	600	10	0,093	5,58
180	600	10	0,128	7,68
190	600	10	0,161	9,66

Tab. 21. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu)+ 25% CaCO₃ metodou MFR.

1.15.3.1 Graf pro LDPE (Bralen) + 25%CaCo₃

V grafu je znázorněn vliv teploty. Změnou teploty o 10°C došlo ke zvýšení MFR přibližně o 2 g/10min.



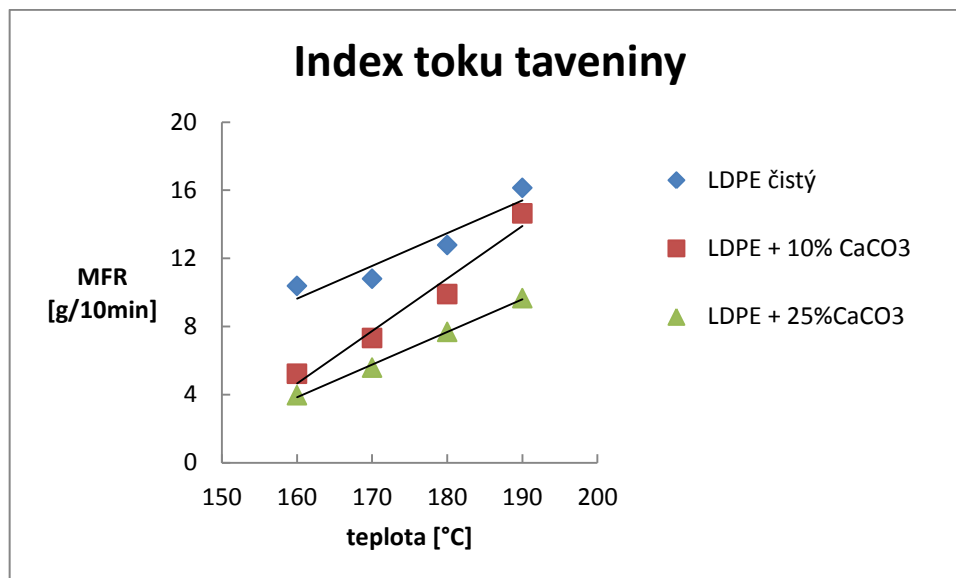
Graf 10. Výsledné hodnoty LDPE (Bralen) + 25% CaCO₃ metodou MFR.

1.16 Shrnutí metody Index toku taveniny

Z grafu vyplývá, že při použití metody index toku taveniny, se zvyšujícím množstvím plniv se snižuje hodnota MFR v g/10min (hmotnostní index toku taveniny). MFR plněných i neplněných vzorků se zároveň zvětšuje se zvyšující se teplotou. Metoda index toku taveniny ukázala, že MFR u LDPE čistého je o dost větší než u LDPE + 10% CaCO₃ a pak MFR u LDPE + 25% CaCO₃ je nepatrně menší než u LDPE + 10% CaCO₃.

U metody MFR působil na polymer daleko vyšší tlak než u metody SI. Při zatížení 2,16 kg zde působil tlak 6 748Pa.

Je potřeba počítat s chybami měření, které se mohly vyskytnout vlivem nepřesnosti zařízení nebo nepřesným odečítáním hodnot pozorovatelem. Teplota se tedy může pohybovat v tolerancích $\pm 2^\circ\text{C}$. Tolerance času stříhání vzorků je přibližně $\pm 2\text{s}$.



Graf 11. Shrnutí výsledných hodnot všech materiálů měřených metodou MFR.

1.16.1 Tlak působící na polymer u metody MFR

Tlak se vyjádří jako podíl síly ku ploše : $p = \frac{F}{S}$ [Pa]

Závaží u indexu toku taveniny bylo 2,16 kg a plocha působení síly (kapilára) byla o průměru 2mm.

Síla se vyjádří jako součin hmotnosti a tíhového zrychlení: $F = m \cdot g$ [N]

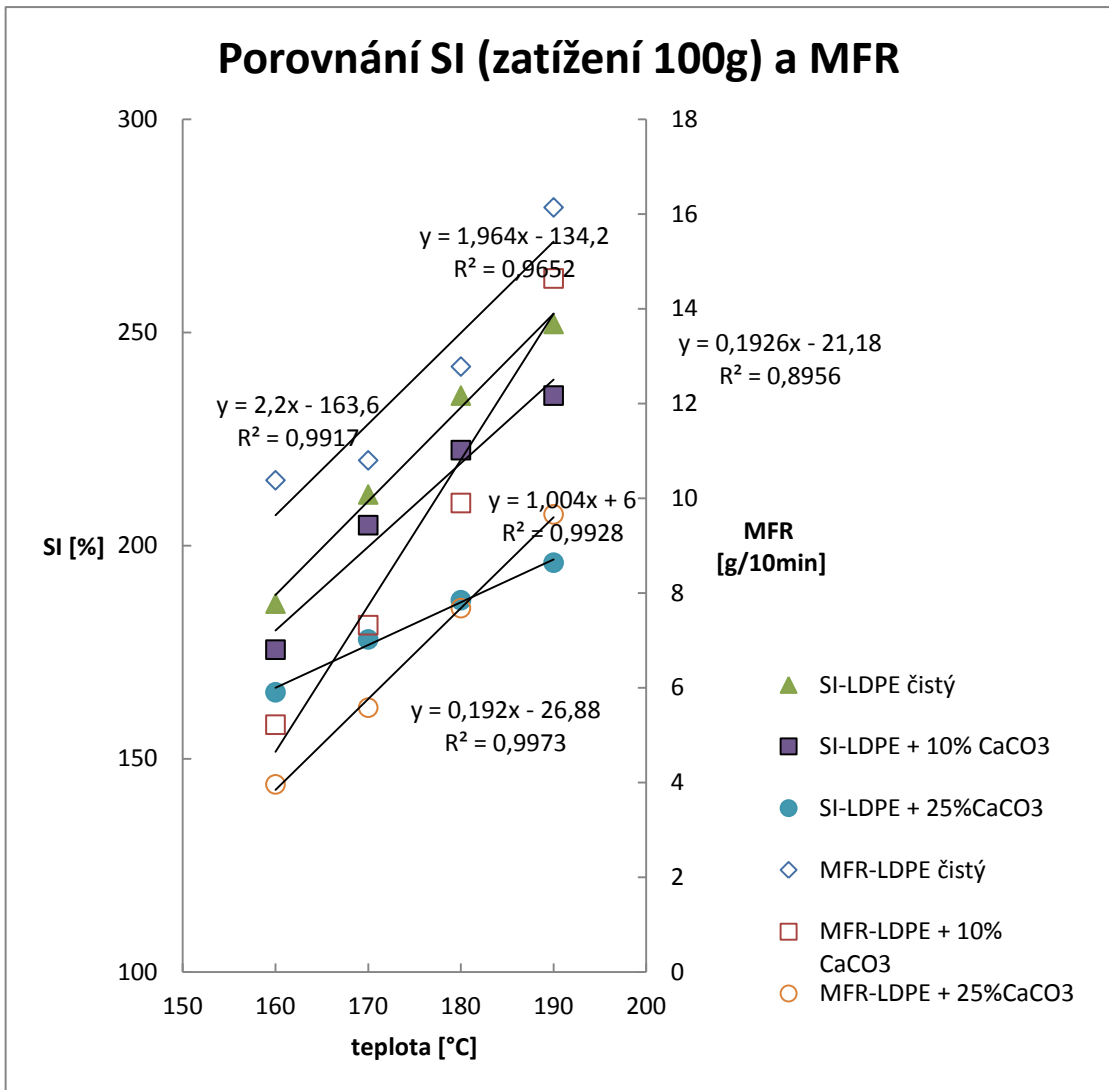
$$p = \frac{2,16 \cdot 9,81}{\frac{\pi \cdot 2^2}{4}} = \frac{21,19}{0,00000314} = 6\,748 \text{ kPa}$$

Tlak působící na polymer u metody indexu toku taveniny je 6748 kPa.

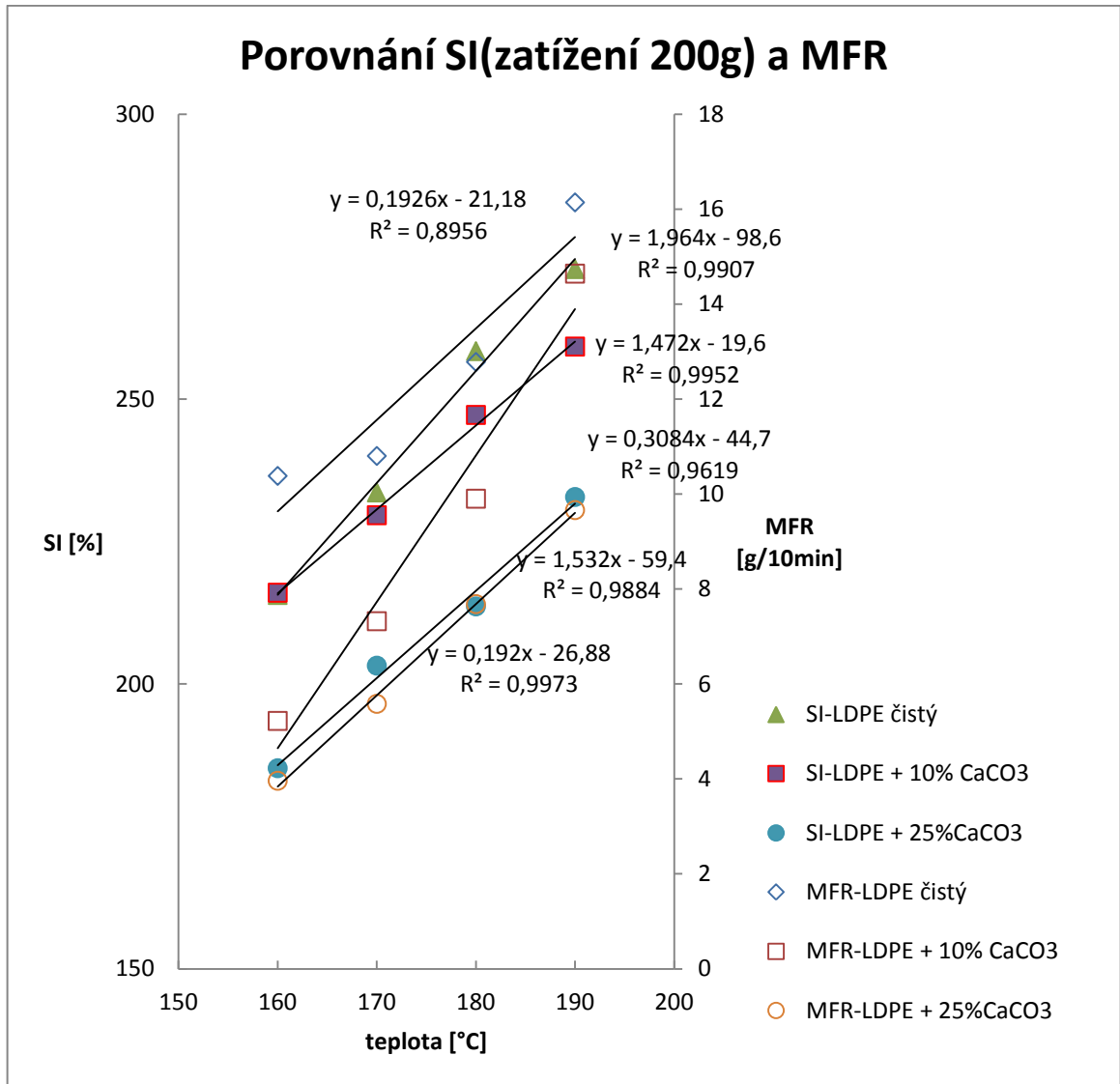
1.17 Srovnání výsledků metody SI a MFR

Jak u metody SI tak i u metody MFR se zpracovávaly hodnoty několika vzorků, a proto je potřeba se zmínit o chybě měření, která se u metody SI pohybuje přibližně v rozmezí 0,1 - 0,3% a u metody MFR v rozmezí 0,002 – 0,01%.

Z grafů můžeme vyčíst citlivost obou metod. Přičemž platí, že čím vyšší je směrnice přímky, tím vyšší je citlivost metody. Směrnice přímek obou metod se příliš neliší, ale přesto lze z grafů vyčíst, že citlivost u metody MFR je o řád vyšší než u metody SI.



Graf 12. Srovnání metody splitting index (zatížení 100g) a index toku taveniny.

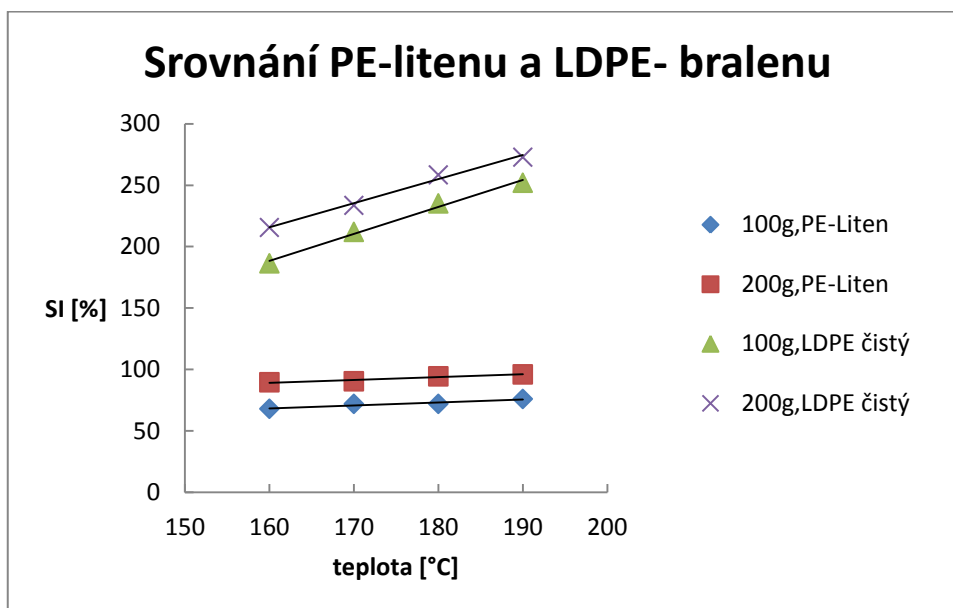


Graf 13. Srovnání metody splitting index (zatížení 200g) a index toku taveniny.

1.18 Srovnání PE- Liteny lineárního a LDPE- Bralenu rozvětveného

Čím jsou u polymeru delší řetězce, tím polymer pomaleji teče. Polymery lineární se vyznačují delšími řetězci, na rozdíl od polymerů rozvětvených, které mají naopak řetězce kratší. Toto pravidlo nemusí však vždy úplně stoprocentně platit. Závisí to i například na délce a hustotě větví řetězců.

Abychom se přesvědčili, zda PE-liten je opravdu lineární a LDPE-bralen rozvětvený polymer, srovnáme si je graficky.



Graf 14. Srovnání PE-litenu a LDPE-bralenu.

Z grafu vyplývá, že PE-liten zatížený 100 a 200g tekl víc jak dvakrát hůř než LDPE-bralen zatížený 100 a 200g. Z čehož můžeme určit, že PE-liten má delší řetězce a LDPE-bralen kratší řetězce. Tudíž se dá předpokládat že PE-liten je opravdu lineární polymer a LDPE-bralen rozvětvený polymer.

ZÁVĚR

Tokové vlastnosti polymerů (v tomto případě Polyolefinů) závisí především na teplotě. Čím je teplota vyšší, tím jsou lepší tokové vlastnosti polymerů. Změnou teploty o 10°C došlo ke zvýšení SI o 3-15% a u metody MFR došlo ke zvýšení o 2-3g/min u stejných vzorků. V druhé řadě tekutost závisí na zatížení. Při vyšším zatížení jsou tokové vlastnosti také lepší. Polymery u metody SI byly zatíženy závažím 100g a 200g. Změnou zatížení stejného vzorku ze 100 g na 200g došlo ke zvýšení SI přibližně o 20-30%. U metody MFR bylo pouze jedno normalizované závaží 2,16 kg. U různých vzorků, v tomto případě například porovnání LDPE čistého s LDPE s 25% CaCO₃ se zatížení 100g u SI projevilo tak, že SI u LDPE s 25% CaCO₃ bylo přibližně o 36% nižší jak u LDPE čistého. U zatížení 200g se SI projevilo tak, že LDPE s 25% CaCO₃ bylo přibližně o 32% nižší jak u LDPE čistého.

V poslední řadě tokové vlastnosti polymerů závisí na obsahu plniv v polymeru. Všeobecně je známo, že se tokové vlastnosti se zvyšujícím se množstvím plniv zhoršují. Výsledky této bakalářské práce to jen dokazují. Měření SI ukázalo, že PE-Liten neplněný tekli při stejném zatížení a stejné teplotě líp než PE-Liten s 30% CaCO₃. A to přesto, že neplněný PE-Liten byl zatížen dvakrát delší dobu než plněný, z čehož vyplývá, že při stejné době zatížení by byl rozdíl ještě větší. Ostatní vzorky byly zatěžovány stejně dlouhou dobou a to 10 minut.

Tokové vlastnosti neplněného LDPE byly také lepší než u plněného LDPE s 10% CaCO₃. A také LDPE s 10% CaCO₃ tekli značně lépe, než LDPE s 25% CaCO₃.

Obě metody charakterizují tekutost vzorků. Každá z metod se provádí jinak a obě mají jiné výsledné veličiny. U metody index toku taveniny je výslednou hodnotou MFR, což je hmotnostní index toku taveniny a jeho jednotkou je g/10min. U metody splitting index je výslednou hodnotou procentuální zvětšení původního rozměru vzorku. Přestože každá z metod má jiné výsledné hodnoty, lze z jejich pomocí charakterizovat tekutost daného materiálu. Metoda indexu toku taveniny se v praxi využívá již řadu let, ale pro rychlou charakterizaci není zcela vhodná. Důvodem je i větší spotřeba vzorku. Doba měření je u indexu toku taveniny delší, je zde náročnější zařízení a jeho údržba je složitější. Výhodou metody MFR je její vyšší citlivost, než je citlivost použitá v této práci u SI. Vyšší citlivost je způsobená užitím řádově většího závaží. Stejně citlivosti u SI je možno dosáhnout použitím většího závaží. Metoda splitting index je pro laboratorní účely praktičtější a to z více důvodů. U SI stačí menší množství vzorků, pořizovací náklady SI zařízení jsou nižší a je zde možnost vzorek dále využít na jiné či opakované měření, měření je snadné a rychlé.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] RYBNÍKÁŘ, František. *Makromolekulární chemie I.* první. Brno : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1987. 105 s.
- [2] MEISSNER, Bohumil; ZILVAR, Václav. *Fyzika polymerů : Struktura a vlastnosti polymerních materiálů.* Praha : Nakladatelství technické literatury, 1987. 308 s.
- [3] *Ufmi.ft.utb.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-09-20]. Studium kinetiky krystalizace polymerů. Dostupné z WWW: <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP1_lab_03.pdf>.
- [4] KŘENEK, Tomáš. *Ateam.zcu.cz* [online]. 2010 [cit. 2011-09-20]. Polymerní materiály. Dostupné z WWW: <http://ateam.zcu.cz/download/Polymery_2010.pdf>.
- [5] DOLEŽAL, Vladimír. *Plastické hmoty : Třetí, přepracované a doplněné vydání.* Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977. 385 s.
- [6] HOLZMULLER, Werner; ALTENBURG, Kurt. *Fyzika polymerů.* Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 625 s.
- [7] KRÁLOVÁ, Adéla; KLIMÁNEK, Leo. *Zpracování polymerů.* Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986. 271 s.
- [8] LENFELD, Petr. *Ksp.tul* [online]. 2002 [cit. 2011-10-17]. Technologie II. Dostupné z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/uvod.htm>.
- [9] *Ped.muni* [online]. 2006 [cit. 2011-10-18]. Fyzikální základy vědy o materiálu. Dostupné z WWW: <<http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/index.htm>>.
- [10] TOMIS, František . *Polyetylén* . Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1961. 261 s.
- [11] *Polymer-filler.blogspot.com* [online]. 2008 [cit. 2011-11-04]. Polymer & fillers. Dostupné z WWW: <<http://polymer-filler.blogspot.com/2008/08/chapter-1-introduction-fillers.html>>.
- [12] *Wikipedia.org* [online]. 2005 [cit. 2011-11-19]. Uhlíčan vápenatý. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhli%C4%8Ditan_v%C3%A1penat%C3%BD>.
- [13] *Ped.muni.cz* [online]. 16.3.2006 [cit. 2011-11-19]. Uhlíčan vápenatý sražený. Dostupné z WWW: <http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/labtech/pdf/bezp_listy/uhlicitan_vapenaty.pdf>.
- [14] *Unipetrolrpa.cz* [online]. [cit. 2011-12-22]. Polyolefiny: polyetylén litén. Dostupné z: <http://www.unipetrolrpa.cz/cs/nabidka-produktu/petrochemicke-produkty/polyolefiny/index.html>

- [15] *Petroleum.cz* [online]. 2007 [cit. 2011-12-22]. Nízkohustotní polyetylen. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyroby/ldpe.aspx>
- [16] *Slovnaft.sk* [online]. 2011 [cit. 2011-12-23]. LDPE nízkohustotný polyetylén. Dostupné z: http://www.slovnaft.sk/sk/obchodni_partneri/petchem/vyroby/tvk-ldpe/
- [17] *Ksp.tul.cz* [online]. 2006 [cit. 2011-12-25]. Reologie tavenin termoplastů v průmyslové praxi. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Reologie.pdf>
- [18] A.V.TOBOLSKY. *Vlastnosti a struktura polymerů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [19] ŠIŠKOVÁ, MARIE. BARTOVSKÁ LIDMILA. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. Praha: VŠCHT, 2005.
- [20] MALÁČ, Jiří. Gumárenská technologie: Gumárenské materiály. *Home.karneval.cz* [online]. 2010 [cit. 2012-01-27]. Dostupné z: <http://www.home.karneval.cz/0323339201/text/materialy.pdf>
- [21] ŠIMŮNEK, Petr. Organická chemie I. *Scribd.com* [online]. 6.5.2011 [cit. 2012-03-07]. Dostupné z: http://www.scribd.com/s%C5%BDivanovi%C4%87_1/d/57131646/13-Konformace
- [22] JONÁŠEK. Co je lineární a co rozvětvený polyetylén. *Pipelife.cz* [online]. 15.1.2010 [cit. 2012-03-07]. Dostupné z: http://www.pipelife.cz/media/cz/pdf_servis/faq/Co-je-to-linearni-a-co-rozvetveny-polyetylen.pdf
- [23] LDPE,HDPE. *Tiefziehen.com* [online]. 7.3.2012 [cit. 2012-03-07]. Dostupné z: <http://tiefziehen.com/cz/LDPE/>
- [24] Měrná tepelná kapacita. *Cs.wikipedia.org* [online]. 2011 [cit. 2012-03-08]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9Brn%C3%A1_tepeln%C3%A1_kapacita
- [25] DUCHÁČEK, V. *Polymery*. Praha: VŠCHT, 1995.
- [26] Závislost viskozity na procesních a molekulárních parametrech. *Ufmi.ft.utb.cz* [online]. 3.12.2009 [cit. 2012-03-14]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_03.pdf
- [27] Základy reologie a reometrie kapalin. *Is.muni.cz* [online]. 22.9.2006 [cit. 2012-03-14]. Dostupné z: http://is.muni.cz/el/1431/podzim2006/C5160/um/2457585/2457594/Reologie_a_reometrie_kapalin.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

T_g	Teplota skelného přechodu. [$^{\circ}\text{C}$]
T_m	Teplota tání. [$^{\circ}\text{C}$]
T_f	Teplota tečení. [$^{\circ}\text{C}$]
PE	Polyetylén.
LDPE	Nízkohustotní polyetylén.
HDPE	Vysokohustotní polyetylén.
PVC	Polyvinylchlorid.
PVAL	Polyvinylalkohol.
CaCO_3	Uhličitan vápenatý.
CaO	Oxid vápenatý.
CO_2	Oxid uhličitý.
MFI	Index toku taveniny. [g/10min]
MFR	Hmotnostní index toku taveniny. [g/10min]
t_{ref}	Referenční čas. [s]
m	Průměrná hmotnost odřezků. [g]
t	Interval odřezávání. [s]
ZST	Doba do ztráty pevnosti [s]
η	Dynamická viskozita [Pa.s]
ν	Kinematická viskozita [m^2/s]
φ	Objemový podíl suspendované látky
M_{rel}	Relativní molární hmotnost polymeru
SI	Splitting index [%]
PIB	Polyizobuten
τ	Tečné napětí [Pa]

D	Gradient rychlosti [s^{-1}]
ρ	Hustota [kg/m^3]
τ_k	Mez kluzu

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Struktura polymerů, a) lineární polymer, b) rozvětvený polymer, c) síťovaný polymer. [9].....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2. Závislost rychlosti izotermní krystalizace polymerů na teplotě. [3]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3. Zvyšující se teplota zvětšuje prostor mezi makromolekulárními řetězci, což usnadňuje jejich pohyb. [4].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4. Termomechanická křivka.[4]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 5. Závislost viskozity na čase. [26].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6. Laboratorní sklička se vzorky.....</i>	<i>37</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Tepelná roztažnost polyetylénu. [10]</i>	26
<i>Tab. 2. Mechanické vlastnosti PE. [10]</i>	27
<i>Tab. 3. Tepelné a elektrické vlastnosti PE. [10]</i>	27
<i>Tab. 4. Fyzikální vlastnosti PE. [10]</i>	28
<i>Tab. 5. Srovnání vlastností PE plněného a neplněného. [10]</i>	30
<i>Tab. 6. Fyzikální a chemické vlastnosti uhličitanu vápenatého sraženého. [13]</i>	41
<i>Tab. 7. Vlastnosti polyetylénu litenu BB 29. [14]</i>	42
<i>Tab. 8. Vlastnosti Bralenu Va 20-60. [16]</i>	42
<i>Tab. 9. Výsledné hodnoty PE-litenu při zatížení 100g metodou splitting index.</i>	44
<i>Tab. 10. Výsledné hodnoty PE-litenu při zatížení 200g metodou splitting index.</i>	44
<i>Tab. 11. Výsledné hodnoty PE-Liten + 30% CaCO₃ při zatížení 100g metodou splitting index.</i>	45
<i>Tab. 12. Výsledné hodnoty PE-Litenu + 30% CaCO₃ při zatížení 100g metodou splitting index.</i>	45
<i>Tab. 13. Výsledné hodnoty LDPE čistého (Bralenu) při zatížení 100g metodou splitting index.</i>	46
<i>Tab. 14. Výsledné hodnoty LDPE čistého (Bralenu) při zatížení 200g metodou splitting index.</i>	47
<i>Tab. 15. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 10% CaCO₃ při zatížení 100g metodou splitting index.</i>	48
<i>Tab. 16. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 10% CaCO₃ při zatížení 200g metodou splitting index.</i>	48
<i>Tab. 17. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 25% CaCO₃ při zatížení 100g metodou splitting index.</i>	49
<i>Tab. 18. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 25% CaCO₃ při zatížení 200g metodou splitting index.</i>	49
<i>Tab. 19. Výsledné hodnoty LDPE Čistého (Bralenu)metodou MFR.</i>	52
<i>Tab. 20. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu)+ 10% CaCO₃ metodou MFR.</i>	53
<i>Tab. 21. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu)+ 25% CaCO₃ metodou MFR.</i>	54

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1. Výsledné hodnoty PE-litenu metodou splitting index.</i>	45
<i>Graf 2. Výsledné hodnoty PE – Litenu + 10 %CaCO₃ metodou splitting index.</i>	46
<i>Graf 3. Výsledné hodnoty LDPE čistého (Bralenu) metodou splitting index.</i>	47
<i>Graf 4. Výsledné hodnoty LDPE (Bralen)+ 10% CaCO₃ metodou splitting index.</i>	49
<i>Graf 5. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 25% CaCO₃ metodou splitting index.</i>	50
<i>Graf 6. Shrnutí výsledných hodnot všech materiálů při zatížení 100g.</i>	51
<i>Graf 7. Shrnutí výsledných hodnot všech materiálů při zatížení 200g.</i>	51
<i>Graf 8. Výsledné hodnoty LDPE čistého (Bralenu) metodou MFR.</i>	53
<i>Graf 9. Výsledné hodnoty LDPE (Bralenu) + 10% CaCO₃ metodou MFR.</i>	54
<i>Graf 10. Výsledné hodnoty LDPE (Bralen) + 25% CaCO₃ metodou MFR.</i>	55
<i>Graf 11. Shrnutí výsledných hodnot všech materiálů měřených metodou MFR.</i>	56
<i>Graf 12. Srovnání metody splitting index (zatížení 100g) a index toku taveniny.</i>	57
<i>Graf 13. Srovnání metody splitting index (zatížení 200g) a index toku taveniny.</i>	58
<i>Graf 14. Srovnání PE-litenu a LDPE-bralenu.</i>	59