

UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2021

Petr Janíček

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
ÚCHTML  
Oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie

Studium vlivu zesítnění polyethylenu při zpracování metodami vstřikování  
a rotomoulding na mechanické vlastnosti a chemickou odolnost

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Janíček**  
Osobní číslo: **C19506**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Technologie výroby a zpracování polymerů**  
Téma práce: **Studium vlivu zesílení polyethylenu při zpracování metodami vstřikování a rotomoulding na mechanické vlastnosti a chemickou odolnost**  
Zadávací katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

### Zásady pro vypracování

1. V literární rešerši se zabývejte problematikou různých typů polyethylenu, jejich vlastnostmi a zaměřte se na síťování polyethylenu, jejich způsoby a vlivem na výsledné vlastnosti.
2. V teoretické části se dále zaměřte na oblast technologie zpracování různých typů polyethylenu, včetně příkladů aplikací s důrazem na technologie vstřikování a rotomoulding.
3. Z polyethylenových vzorků připravených metodami vstřikování a rotomoulding nařežte zkušební tělíška daných rozměrů a proměřte jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti. Dále otestujte chemickou odolnost daných vzorků v různých kapalinách souvisejících s použitím v dopravních prostředcích.
4. Studujte vliv zesílení v připravených vzorcích vzhledem k technologii vstřikování a rotomoulding na sledované vlastnosti.
5. Srovnajte a diskutujte zjištěné výsledky mechanických vlastností a chemické odolnosti v závislosti na typu polyethylenu a jeho zesílení.

Rozsah pracovní zprávy:  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Prokůpek, Dr.**  
Ústav chemie a technologie makromolekulárních  
látek

Datum zadání diplomové práce: **7. prosince 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **7. května 2021**

L.S.

---

**prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.**  
děkan

---

**doc. Ing. David Veselý, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2020

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 15. 6. 2021

Petr Janíček

## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Luboši Prokúpkovi Dr. za vedení práce, pomoc a cenné připomínky, které pro mě byly při tvorbě diplomové práce velmi přínosné.

Diplomová práce vznikla za podpory projektu Modernizace praktické výuky a zkvalitnění praktických dovedností v technicky zaměřených studijních programech, reg. číslo CZ.02.2.67/0.0/0.0/16\_016/0002458 operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií.



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

## **ANOTACE**

Naplní této diplomové práce je studium vlivu zesíťování polyethylenu na mechanické vlastnosti a chemickou odolnost. Teoretická část je zaměřena na charakteristiku jednotlivých typů polyethylenů, možnosti jejich zesíťování a zpracovatelské technologie. V experimentální části jsou zkoumány rozdíly chemické odolnosti zesíťovaného, nezesíťovaného LLDPE a jejich směsi (66,5 % zesíťovaný a 33,5 % nezesíťovaný LLDPE) ve 4 chemických médiích – benzínu, naftě, brzdové a chladicí kapalině během 6 měsíců. Dále je pozorován vliv použité zpracovatelské technologie (rotomoulding a vstřikování) a síťování polyethylenu na mechanické vlastnosti.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

polyethylen, síťování, vstřikování, rotomoulding, mechanické vlastnosti, chemická odolnost

## **TITLE**

Effect of crosslinking of polyethylene processing by injection and rotational moulding on mechanical properties and chemical resistance

## **ANNOTATION**

The aim of master thesis is study of effect crosslinking of polyethylene on mechanical properties and chemical resistance. Theoretical part of master thesis is focused on types of polyethylenes, methods of crosslinking and process technologies. In experimental part are researched differences of chemical resistance between crosslinked, uncrosslinked LLDPE and mixture both of them (66,5 % crosslinked and 33,5 % uncrosslinked LLDPE) in four chemical agents – petrol, diesel oil, brake a coolant fluid during 6 months. Also is observed effect of process technology (rotational and injection moulding) and crosslinking of polyethylene on mechanical properties. Lastly, the measured values were compared and evaluated.

## **KEYWORDS**

polyethylene, crosslinking, injection moulding, mechanical properties, chemical resistance

## OBSAH

ÚVOD .....	10
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	11
1.1 Polyethylen.....	11
1.1.1 LDPE (nízko-hustotní polyethylen).....	12
1.1.2 HDPE (vysoko-hustotní polyethylen).....	15
1.1.3 LLDPE (lineární polyethylen s nízkou hustotou).....	17
1.1.4 UHMWPE (polyethylen s vysokou molekulovou hmotností).....	18
1.2 Síťování polyethylenu .....	20
1.2.1 Síťování peroxidy (PE-XA).....	21
1.2.2 Síťování silanovými sloučeninami (PE-XB) .....	22
1.2.3 Síťování zářením (PE-XC) .....	25
1.2.4 Ionomery .....	25
1.3 Technologie zpracování polyethylenu .....	26
1.3.1 Vstřikování.....	26
1.3.2 Rotomoulding .....	32
1.3.3 Vytlačování.....	36
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	39
2.1 Přehled použitých látek a materiálů .....	39
2.1.1 Polyethylen RX 102 Black .....	39
2.1.2 Polyethylen Revolve XL 400.....	39
2.1.3 Směs polyethylenu Revolve XL 400 a polyethylenu RX 102 Black.....	39
2.1.4 Chemické látky .....	39
2.2 Technologie přípravy zkušebních vzorků a tělísek .....	39
2.2.1 Rotomoulding .....	40
2.2.2 Vstřikování.....	40
2.3 Použité zkušební metody a zařízení .....	40
2.3.1 Zkouška v tahu polyethylenových tělísek.....	40
2.3.2 Zkouška v ohybu polyethylenových tělísek.....	41
2.3.3 Rázová houževnatost Charpy.....	42
2.3.4 Stanovení tvrdosti dle Brinella .....	43
2.3.5 Stanovení tvrdosti dle Vickerse .....	43
2.3.6 TMA – termomechanická analýza .....	43
2.3.7 DMA – dynamická mechanická analýza .....	44
2.3.8 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací .....	45
2.3.9 Mikroskopie .....	46
2.3.10 Měření hmotnosti.....	46
2.3.11 Chemická odolnost .....	46



3	VÝSLEDKY A DISKUZE .....	48
3.1	Mechanické zkoušky .....	48
3.1.1	Zkouška v tahu .....	48
3.1.2	Zkouška v ohybu .....	49
3.1.3	Rázová houževnatost .....	51
3.1.4	Tvrдость .....	52
3.2	Chemická odolnost .....	52
3.2.1	Měření hmotnosti .....	53
3.2.2	Tvrдость .....	63
3.2.3	Zkouška v ohybu .....	76
3.2.4	Mikroskopie .....	81
3.3	Doplňkové měření – charakteristika polyethylenů .....	87
3.3.1	TMA .....	87
3.3.2	DMA .....	88
3.3.3	Infračervená spektroskopie .....	88
4	ZÁVĚR .....	89
	POUŽITÁ LITERATURA .....	92
	SEZNAM ILUSTRACÍ .....	97
	SEZNAM TABULEK .....	99
	SEZNAM GRAFŮ .....	100
	SEZNAM ZNAKŮ A ZKRATEK .....	101

## ÚVOD

Polyethylen je termoplastický polymer s různou variabilitou krystalického podílu a rozsáhlou škálou aplikace. V současnosti se jedná o nejrozšířenější plast, jehož jsou produkovány stovky milionů tun ročně. Poprvé připravil polyethylen Hans von Pechmann v roce 1898 zahříváním diazomethanu. Průmyslová výroba byla uskutečněna až o 40 let později. Existuje mnoho variant polyethylenů, těmi nejvýznamnějšími jsou nízko-hustotní polyethylen (LDPE), vysoko-hustotní polyethylen (HDPE) a lineární polyethylen s nízkou hustotou (LLDPE). Tyto druhy polyethylenů se od sebe liší nejen hustotou a větvením řetězců, ale také způsobem výroby. LDPE označuje starší typ polyethylenu, který je vyráběn v autoklávových nebo trubkových reaktorech radikálovou polymerací. Výroba novějších typů HDPE a LLDPE byla umožněna díky objevu Ziegler-Nattových katalyzátorů. Tento výrobní proces se označuje jako polyinsertce nebo koordinační polymerace. Nyní má mnohem větší význam než původní radikálová polymerace. Zpracování probíhá nejčastěji stejně jako u ostatních termoplastů vstřikováním, vytlačováním a vyfukováním. Existuje však celá řada speciálních technologií, které nejsou tak často využívány, mezi ty se řadí i rotační tvarování. Obecně polyethyleny vykazují vynikající chemickou odolnost proti polárním látkám, rázovou houževnatost, elektrické vlastnosti a nízký koeficient tření. Velký vliv na vlastnosti polyethylenu má síťovací proces, kdy dochází ke vzniku příčných vazeb. Síťováním dochází k nárůstu molekulové hmotnosti, rázové houževnatosti i odolnosti proti oděru, naopak dochází k poklesu tažnosti. Zesítnění polyethylenu může být uskutečněno peroxidy, silanovými sloučeninami nebo UV zářením. V rámci experimentální části diplomové práce je zkoumán vliv zesítnění polyethylenu na chemickou odolnost a mechanické vlastnosti a rozdíl mechanických vlastností způsobený odlišnou zpracovatelskou technologií.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Polyethylen

Polyethylen je v dnešní době nejvíce používaným polymerem. Jedná se o termoplast, který společně s polypropylenem patří mezi polyolefiny. Velkou výhodou, která nejvíce podporuje každoroční růst produkce vyrobeného polyethylenu, je snadná dostupnost výchozího monomeru. Dalšími benefity jsou poměrně levné a snadné zpracování, chemická odolnost vyrobeného polymeru a pružnost materiálu. <sup>[1]</sup>

Polyethylen je tvořen pouze z atomů uhlíku a vodíku, rozdíl elektronegativit mezi těmito dvěma prvky je 0,35. Polyethylen lze označit jako nepolární polymer, od čehož se odvíjí jeho vlastnosti. Navlhavost je u čistého polyethylenu velmi nízká. Hodnoty navlhavosti se mění podle množství přidaných aditiv. Polyethylen vyniká výbornými elektroizolačními a dielektrickými vlastnostmi. Díky nepolárnímu charakteru je za běžných podmínek odolný vůči polárním rozpouštědlům, solím, ale i kyselinám a zásadám. Čistý polyethylen (obr. 1) má voskovitý charakter, bílou barvu, do jeho povrchu lze snadno udělat vryp. Pevnostní vlastnosti jsou nejnižší ze všech termoplastů. Předností je vysoká rázová houževnatost nejen za běžných teplot, ale i za teplot pod bodem mrazu. Teplota skelného přechodu je přibližně  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , teplota tání se pohybuje v rozmezí  $120\text{--}125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tvarová stálost výrobků z polyethylenu je maximálně do teplot okolo  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Všechny typy polyethylenu silně degradují vlivem působení UV záření. Pro venkovní použití je proto nutná stabilizace. Vhodnými UV stabilizátory jsou pro polyethylen saze, které jsou dodnes nejvíce používaným a zároveň nejúčinnějším UV stabilizátorem. <sup>[2]</sup>



Obr. 1 Granule čistého polyethylenu <sup>[3]</sup>

Obsahem krystalické fáze je ovlivněna hustota výsledného polymeru, hustota amorfní fáze polyethylenu je  $0,855\text{ g/cm}^3$ , hustota krystalické fáze je  $1,000\text{ g/cm}^3$ . Ve všech případech má tedy polyethylen menší hustotu než voda. Hustota je společně s tvarem řetězce molekul hlavním kritériem pro rozdělení typů polyethylenů. Základními třemi typy polyethylenů jsou

LDPE, HDPE, LLDPE. Méně využívanými polyethyleny jsou ULDPE (hustota pod  $0,915 \text{ g/cm}^3$ ) a MDPE, jehož hustota je  $0,925\text{--}0,940 \text{ g/cm}^3$ . Novými druhy polyethylenu jsou HMWPE a UHMWPE. Jedná se o polyethyleny s vysokou molekulovou hmotností. Přehledně jsou všechny druhy nejvýznamnějších polyethylenů společně s jejich hustotou zaznamenány v tab. 1. [4]

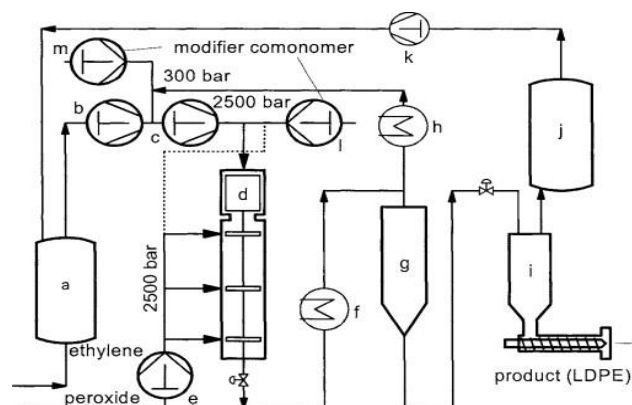
Tab. 1 Přehled jednotlivých typů polyethylenů [4]

Typ	Zkratka	Hustota ( $\text{g/cm}^3$ )
polyethylen s velmi nízkou hustotou	ULDPE	0,888–0,915
nízko-hustotní polyethylen	LDPE	0,915–0,935
lineární polyethylen s nízkou hustotou	LLDPE	0,910–0,925
polyethylen se střední hustotou	MDPE	0,925–0,940
vysoko-hustotní polyethylen	HDPE	0,941–0,967
polyethylen s vysokou molekulovou hmotností	HMWPE	0,944–0,954
polyethylen s ultra vysokou molekulovou hmotností	UHMWPE	0,955–0,967

### 1.1.1 LDPE (nízko-hustotní polyethylen)

Nízko-hustotní polyethylen je vysoce větvený. Na hlavní řetězec jsou navázány nejen krátké, ale i dlouhé řetězce, které dosahují velmi podobné délky jako hlavní řetězec. Jednotlivé body podél řetězce, na kterých je navázáno větvení, fungují jako narušovatelé uspořádání systému a zabraňují tak vzniku krystalické struktury. Nižší stupeň krystalické fáze je důvodem nižší hustoty LDPE, hodnoty jsou v rozmezí  $0,910\text{--}0,925 \text{ g/cm}^3$ . [5]

LDPE se vyrábí radikálovou polymerací při vysokých teplotách a tlacích, proto bývá někdy nízko-hustotní polyethylen označován jako vysokotlaký. V současné době se využívají dva technologické postupy – polymerace v trubkových reaktorech a v autoklávech. Obecné schéma výroby polyethylenu vysokotlakým procesem je na obr. 2. [4]



Obr. 2 Schéma aparatury pro výrobu LDPE [6]

*a – ethylenová zásobovací nádrž, b – hlavní kompresor, c – pomocný vedlejší kompresor, d – autoklávový reaktor, e – čerpadlo pro iniciátor, f – chlazení produktu, g – separátor, h – chlazení recyklu, i – nízkotlakový separátor a extrudér, j – nízkotlaká zásobovací nádrž, k – pomocný kompresor*

Trubkový reaktor je tvořen trubicí s délkou až 1500 m o vnitřním průměru 3 až 6 cm. Tato trubka je v reaktoru tvarována do smyček z důvodu co nejvyšší úspory prostoru (obr. 3). Během polymerace dochází ke značnému uvolňování tepla (přibližně 95 KJ/mol), proto je nutné, aby byly trubky v přímém kontaktu s teplosměnnou látkou, která umožňuje kontinuální chlazení. Právě chlazení ovlivňuje, jakou rychlostí může proudit ethylen trubkami. Rychlejší odvod tepla umožňuje zvýšení rychlosti proudění ethylenu. Důležité je uvést, že kritická teplota ethylenu se pohybuje okolo 10 °C a polymerace tedy probíhá v plynné fázi. Během polymerace je v jednotlivých částech reaktorů odlišná teplota. Na začátku reaktoru se pohybuje okolo 150 °C, postupně stoupá a zhruba ve druhé třetině reaktoru dosahuje svého maxima. Výsledné vlastnosti polymeru lze upravovat několika způsoby. Lze využít rozdílných teplot v jednotlivých částech reaktoru, rozdílné koncentrace iniciátoru či regulátoru molekulové hmotnosti. Změn vlastností výsledného polymeru lze dosáhnout i úpravou rychlosti proudění ethylenu. Polymerační doba nepřesahuje dvě minuty a během procesu se dosahuje 30% konverze ethylenu. Na závěr procesu je nutné odseparování zbytkového monomeru a voskových podílů. [4]



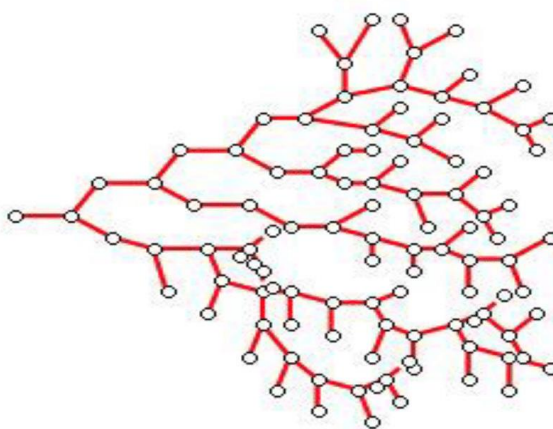
Obr. 3 Trubkový reaktor pro LDPE [7]

Druhou využívanou technologií výroby LDPE je výroba v míchaných jednostupňových nebo vícešupňových autoklávech. Jako autokláv se označuje reaktor konstruovaný pro reakce probíhající za vysokých teplot a tlaků. Hlavním kritériem pro rozdělení autoklávů je poměr výšky k šířce. U jednostupňových reaktorů nepřesahuje poměr výšky k šířce hodnotu 4, u vícešupňových autoklávů dosahuje poměr až hodnoty 20. Příklad autoklávu je na obr. 4. Teplota i tlak jsou při výrobě polyethylenu v autoklávech nižší v porovnání s podmínkami v trubkovém reaktoru. Tlak je okolo 125 MPa a teplota během celého procesu nepřesahuje 150 °C. Doba zdržení monomeru v autoklávech je okolo jedné minuty, dosažená konverze je maximálně 20 %. [4]



Obr. 4 Autokláv <sup>[8]</sup>

Typickým znakem radikálové polymerace je transfer radikálu na polymer. V takovém případě se rozlišují dva typy větvení, dlouhé a krátké. Intramolekulárním přenosem na vlastní řetězec vznikají krátké postranní řetězce. Při intermolekulárním přenosu, dochází k transferu radikálu na jinou molekulu a vytváří se dlouhé větvení. Vzniklé molekuly mají dendritický charakter, který je znázorněn na obr. 5. Charakter větvení lze ovlivnit technologickým postupem výroby, kdy v autoklávech vzniká mnohem více rozvětvený LDPE než v trubkových reaktorech. <sup>[4]</sup>



Obr. 5 Rozvětvený LDPE <sup>[9]</sup>

Nízko-hustotní polyethylen byl prvním komerčně vyráběným polyolefinem. Narozdíl od HDPE a LLDPE produkce nízko-hustotního polyethylenu každým rokem klesá, přesto má i v dnešní době nezastupitelný význam. Okolo 50 % vyrobeného LDPE se zpracovává na fólie a obalové materiály. Jedná se o široké spektrum výrobků, jako jsou technické obalové materiály, transparentní slabé fólie či pigmentované sáčky. Aplikace v potravinářství zahrnuje balicí materiály pro mléčné produkty, mražené potraviny, maso nebo sladkosti. Výrobky z LDPE jsou na obr. 6. Hlavní výhody nízko-hustotního polyethylenu představují nízká cena, ohebnost a tuhost. <sup>[4]</sup>



Obr. 6 Výrobky z LDPE <sup>[10]</sup>

### 1.1.2 HDPE (vysoko-hustotní polyethylen)

Vysoko-hustotní polyethylen je vyráběn odlišnou metodou oproti nízko-hustotnímu polyethylen. Z chemického hlediska se jedná o koordinační polymeraci neboli polyinserci. Koordinační polymerace jsou založeny na využití komplexních koordinačních iniciačních systémů. Jedná se o komplexní organokovové sloučeniny, které vykazují elektronově deficitní charakter a zároveň nemají plně obsazena všechna koordinační vazebná místa. Díky tomu je umožněna tvorba koordinačního komplexu s monomerem. Navázání monomeru do rostoucího řetězce je uskutečněno přeskupením ligandů při zachování elektronově deficitního charakteru nově vzniklé vazby. V oblasti komplexních koordinačních iniciačních systémů dochází k neustálému výzkumu a hledání nových variant. V současnosti jsou nejvýznamnějšími katalyzátory Ziegler-Nattovy a Kaminského. <sup>[11]</sup>

Tímto způsobem přípravy je ovlivněno výsledné větvení, vznikají lineární přímé řetězce. V průmyslové výrobě nejsou řetězce striktně lineární, ale obsahují krátké větvení, což je způsobeno přidáním malého množství komonomeru, především  $\alpha$ -olefinů. Toto krátké větvení je záměrně umístěno podél celého řetězce, neboť umožňuje snadnější zpracování polyethylen na finální výrobky. Vysoký stupeň linearit ovlivňuje obsah krystalické fáze. Stupeň krystalinity se u HDPE pohybuje v rozmezí 0,7–0,8. S množstvím krystalické fáze souvisí i hustota, která je v rozsahu 0,941–0,967 g/cm<sup>3</sup>. <sup>[5]</sup>

HDPE je průmyslově vyráběn třemi technologickými postupy – roztokovým, suspenzním a v plynné fázi. Suspenzní (slurry) proces je ze všech tří procesů nejstarší, ale přesto je i nadále hojně využíván. Principem suspenzního postupu výroby HDPE je srážecí (slurry) polymerace v uhlovodíkovém rozpouštědle, kdy nedochází k rozpouštění polymeru v rozpouštědle. Suspenzní polymerace musí vždy probíhat za teplot nižších, než je teplota tání polymeru, kterou lze ovlivňovat přidáním množstvím kopolymerovaných  $\alpha$ -olefinů. Volba polymerační

teploty má vliv na hustotu vyráběného HDPE. Při nižších teplotách vzniká polyetylen s nižší hustotou, a tedy vyšším amorfním podílem.

Při roztokovém způsobu se využívá rozpustnosti HDPE v blízkosti bodu tání ve vyšších uhlovodících. Použité uhlovodíky se liší dle výrobce, nejčastěji se využívají cyklohexan, buten, okten nebo jejich směsi. Polymerace probíhá při teplotách v rozmezí 150 až 300 °C. Tlak se během výroby pohybuje v intervalu 0,3–20 MPa. Tak široký interval tlaku je ovlivněn hned několika faktory, kromě teploty závisí na typu rozpouštědla, komonomeru a konverzi monomeru. Využívá se Ziegler – Nattových katalyzátorů, a také H<sub>2</sub>, který slouží k regulaci výsledné molekulové hmotnosti. Čas polymeru v reaktoru nepřesahuje 10 minut, konverze ethyleny je okolo 95 %. Roztok obsahující maximálně 25 % polymeru je následně zbaven katalyzátoru v adsorpční koloně.

Fluidní polymerace neboli polymerace v plynné fázi je novou technologií výroby HDPE. Jedná se o velice flexibilní proces, lze využít různých katalyzátorů, a kromě HDPE lze touto technologií připravit i LLDPE. Celý proces probíhá ve věžových reaktorech, k polymeraci ethyleny dochází ve fluidní vrstvě bez přítomnosti kapaliny. Polymerace je uskutečněna při tlaku 2 MPa a teplotě okolo 100 °C. Využívá se vysoce účinného katalyzátoru, kterého je třeba pouze malé množství a není nutné jeho odstranění z vzniklého polymeru. Velkým benefitem je, že ethylen působí jako chladicí médium a fluidizuje (uvádí částice do stavu vznosu) reakční směs. Odpadají také problémy související s viskozitou a rozpustností. Naopak velkou nevýhodou je nízká konverze ethyleny (okolo 2 %) a náchylnost katalyzátoru ke katalytickým jedům.

Lineární polyetylen je oproti rozvětvenému odolnější vůči organickým rozpouštědlům. HDPE má vyšší mléčný zákal, který souvisí s vyšším podílem krystalické fáze. S tou také souvisí vyšší modul pružnosti a tvrdost, naopak vyšší krystalinita snižuje propustnost pro plyny a odolnost proti korozi za napětí. HDPE je krátkodobě použitelný do teplot okolo 100 °C. <sup>[4]</sup>

HDPE je dostupný v mnoha kombinacích MFI (rozmezí 0,25–40) a hustoty 0,941–0,967 g/cm<sup>3</sup>, od toho se odvíjí i jeho zpracování a aplikace. HDPE je vhodný k výrobě sáčků, pytlů na odpadky, nákupních tašek a dutých předmětů. Širokou oblastí využití je výroba trubek různých typů (obr. 7 a 8). <sup>[12]</sup>



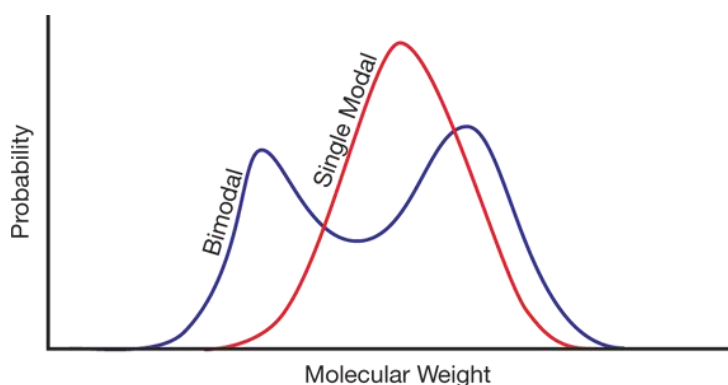


Obr. 7 Trubky <sup>[13]</sup>



Obr. 8 Svodové potrubí <sup>[14]</sup>

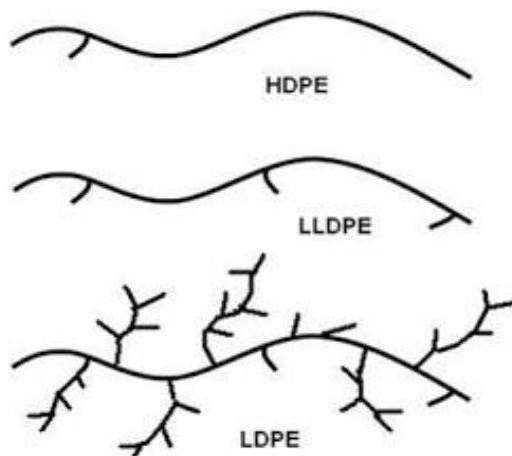
Ve stavebnictví se využívá pro výrobu tlakového potrubí polyethylenů s bimodální distribucí molekulové hmotnosti (znázorněno na obr. 9), jež poskytuje kombinaci vhodných vlastností. Vyšší molekulová hmotnost uděluje materiálu vyšší rázovou houževnatost, pevnost, tuhost a odolnost proti degradaci, zatímco nižší molekulová hmotnost poskytuje dobré tokové vlastnosti. <sup>[12]</sup>



Obr. 9 Rozdíl mezi bimodální a singlemodální distribucí molekulové hmotnosti <sup>[15]</sup>

### 1.1.3 LLDPE (lineární polyethylen s nízkou hutotou)

LLDPE má obdobnou strukturu jako vysoko-hustotní polyethylen. Je syntetizován stejným způsobem jako HDPE, tedy suspenzní, roztokovou a fluidní technologií. Hlavní rozdíl spočívá v procentu přidaného komonomeru, které je u LLDPE mnohem vyšší. Množství přidaného komonomeru má vliv na výsledné větvení polyethylenu. Kromě větvení lze množstvím komonomeru ovlivnit i stupeň krystalinity a tím i hustotu. LLDPE má v porovnání s HDPE větší počet krátkých řetězců navázaných na hlavním řetězci. Rozdíly ve větvení řetězců HDPE, LLDPE a LDPE jsou ukázány na obr. 10. <sup>[4][16]</sup>



Obr. 10 Větvení řetězců u jednotlivých typů polyethylenů <sup>[17]</sup>

Vlastnosti LLDPE závisí na typu a množství komonomeru, molekulové hmotnosti a hustotě. Rostoucí množství komonomeru snižuje hustotu polyethylenu a zároveň tedy i obsah krystalické fáze. S tím souvisí snížení teplotní odolnosti, pevnosti v tahu, rázové houževnatosti a chemické odolnosti. Naopak roste čírost materiálů a propustnost pro plyny. Hlavní využití LLDPE představují fólie a desky. Jedná se o fólie, které jsou použitelné v různých odvětvích, např. zemědělské fólie, průtažné obaly nebo bublinkové fólie. Na obr. 11 je průtažná fólie využívaná v potravinářském průmyslu. Důvodem je vynikající transparentnost oproti HDPE, strukturní pevnost a větší reverzibilní protažení oproti LDPE. Nicméně LLDPE se nezpracovává tak lehce jako LDPE, často se tak využívá směsi z obou typů polyethylenů. LLDPE poskytuje výrobkům pevnost a LDPE zlepšuje zpracovatelnost a teplotní odolnost. <sup>[18]</sup>

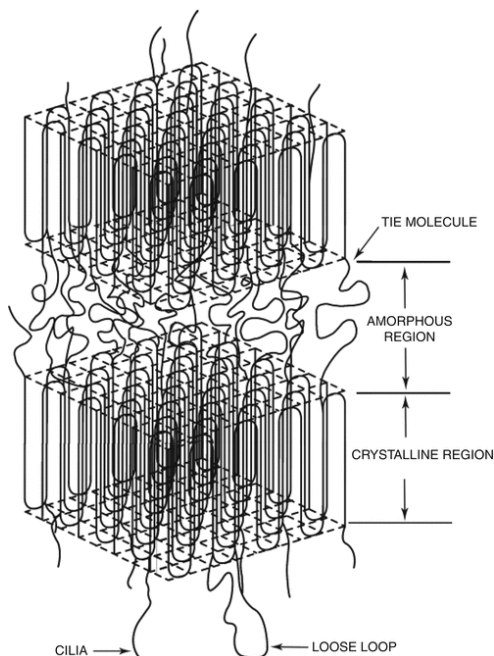


Obr. 11 Průtažné fólie <sup>[19]</sup>

#### 1.1.4 UHMWPE (polyethylen s vysokou molekulovou hmotností)

Jako UHMWPE se označuje skupina polyethylenů, které se skládají z extrémně dlouhých hlavních řetězců, které se vzájemně zaplétají. Právě díky této struktuře a částečnému zesíťování poskytuje výsledný materiál vynikající pevnost a odolnost proti opotřebení. Charakteristickou vlastností UHMWPE je vysoká viskozita taveniny, proto není možné

zpracování obvyklými procesy, vstřikováním nebo vytlačováním, které se využívají u jiných typů polyethylenů. Významným zpracováním UHMWPE je sintrování neboli spékání. Po stlačení, roztavení prášku a jeho následném ochlazení vznikají lamely s relativní tloušťkou okolo 20 nm a amorfni oblasti, které vyplňují prostor mezi lamelami. Vzniklá nadmolekulární struktura je na obr. 12. Další technologie, která je založena na slisování a extruzi prášku, se jmenuje „ram extrusion“. Při procesu vznikají válcové tyče o průměru okolo 50 mm, které jsou následně opracovány obráběním na výsledný produkt. Jinou často používanou technologií je „Hot Isostatic Pressing“ neboli „HIPing“. Proces se skládá ze dvou kroků. Nejdříve se zastudena slisuje prášek do jednoduchých tyčí. Tato část procesu je označována jako „Cold isostatic pressing“, v druhé fázi probíhá jejich finální zpevnění za horka „Hot isostatic pressing“.<sup>[20]</sup>

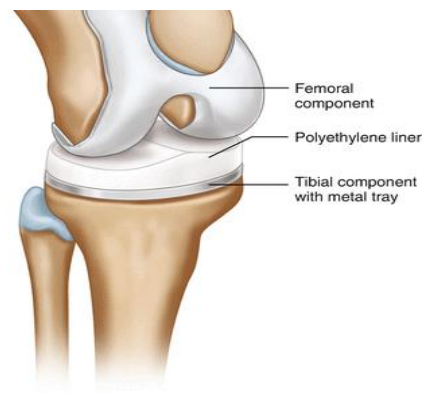


Obr. 12 Nadmolekulární struktura UHMWPE<sup>[21]</sup>

Polyethylen s vysokou molekulovou hmotností se uplatňuje ve zdravotnictví. Díky svým vlastnostem je materiál vhodný pro výrobu části kloubních jamek při artroplastikách, kde se využívá už od 60. let 20. století. U kloubních náhrad dochází k artikulaci konkávní jamkou tvořenou vysoko molekulárním polyethylenem (obr. 13) a konvexní hlavicí, která je nejčastěji kovová nebo keramická. Nákres celého náhradního kloubu je na obr. 14.<sup>[22]</sup>



Obr. 13 Kloubní jamka [23]

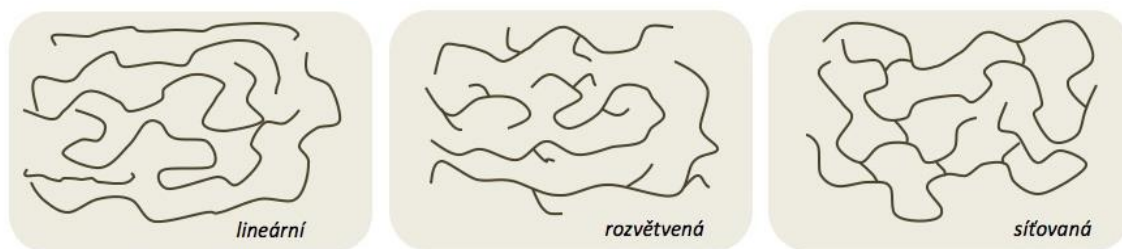


Obr. 14 Nákres kloubního spojení [24]

Neustále probíhá snaha o zlepšení fyzikálně-chemických vlastností. Hlavní problém představuje oxidační poškození polyethylenu, které následně způsobuje zkřehnutí a postupné mechanické poškození. V rámci studií probíhají pokusy modifikace používaného polyethylenu a tím dosažení mnohem lepší stabilizace. V současnosti se zkouší vitamin E, který je pro lidské tělo dobře snášenlivý. Jinou možností modifikace a zlepšení vlastností je ozářování, kdy dochází k částečnému nebo úplnému zesíťování. [25]

## 1.2 Síťování polyethylenu

Síťované polymery jsou makromolekulární látky, u kterých dochází ke spojení řetězců chemickými vazbami do trojrozměrné sítě. Síťované struktury lze vytvořit z lineárního polymeru, rozvětveného polymeru nebo lze využít reakce dvou nebo více monomerů o formální funkčnosti větší než 2. Porovnání struktur řetězců je na obr. 15. [26]



Obr. 15 Porovnání struktury řetězců (lineární, rozvětvený a zesíťovaný polymer) [27]

Dříve byly nejvíce síťovány kaučuky, u kterých se tento proces označuje jako vulkanizace. V dnešní době se čím dál častěji využívá síťování u lineárních polymerů, jedná se především o polyolefiny a polyvinylchlorid. Díky zesíťování materiály získávají výhodné vlastnosti, zejména tvarovou stálost při vysokých teplotách a dochází i ke zlepšení fyzikálně-chemických vlastností.

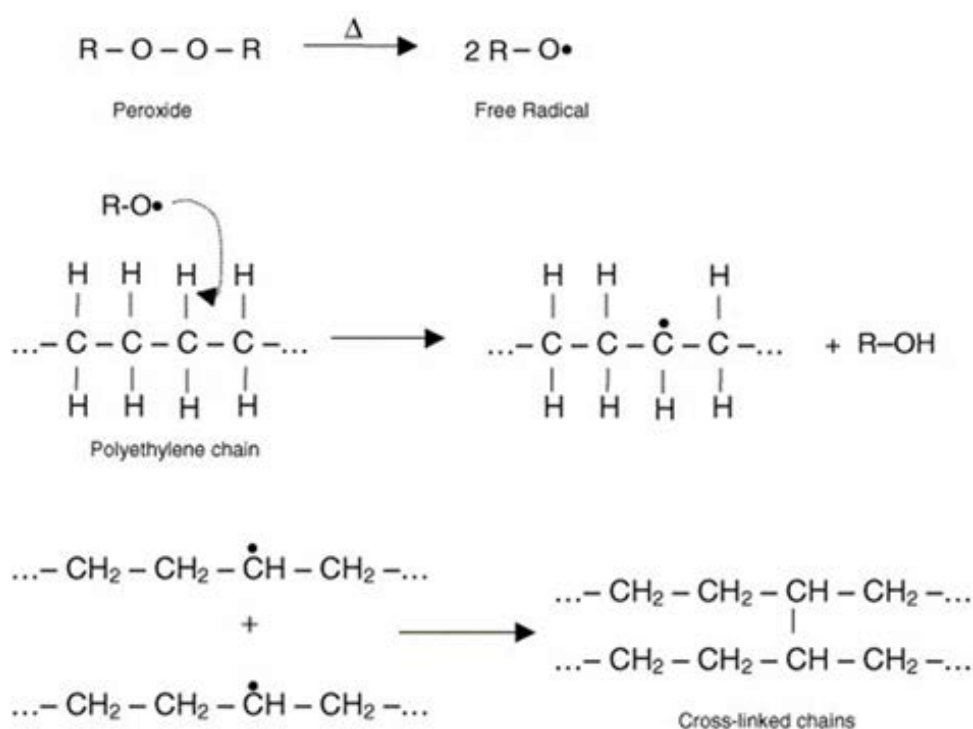
Na začátku síťovacího procesu dochází ke zvyšování molekulové hmotnosti polymeru bez vzniku trojrozměrné polymerní sítě. Při určité koncentraci příčných vazeb se začínají objevovat první známky trojrozměrné struktury, tzv. gel. Tento stav se označuje jako bod

gelovatění. Nad tímto bodem se vždy systém skládá ze dvou složek – gelu a solu. Gel je nerozpustný ve všech rozpouštědlech, dochází pouze k jeho bobtnání. Naopak sol je rozpustný a lze ho vyextrahovat. Zesíťované polymery se nerozpouští v rozpouštědlech, ve kterých se lineární řetězce rozpouští, dochází pouze k jejich bobtnání. Výsledný zesíťovaný polymer je netavitelný.

Síťování polyethylenu probíhá nejčastěji třemi různými způsoby – peroxidovými sloučeninami, silanovými sloučeninami a zářením. Obecně se zesíťovaný polyethylen označuje jako XLPE. Někdy však bývají jednotlivé typy odlišovány podle způsobu provedení procesu síťování. Jako PE-XA se označuje polyethylen zesíťovaný peroxidy, PE-XB je polyethylen zesíťovaný silikony a PE-XC je značení pro polyethylen zesíťovaný zářením. [26]

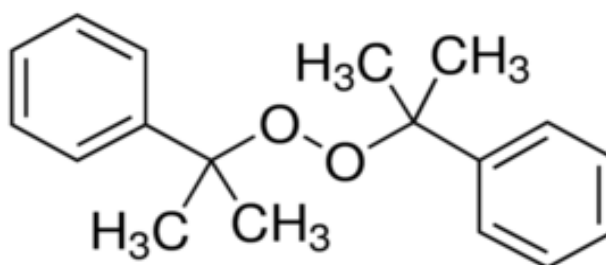
### 1.2.1 Síťování peroxidy (PE-XA)

Organická peroxidová činidla jsou nejvíce využívanými prostředky, které iniciují vznik zesíťované struktury. Peroxidy (ROOR) se za tepla rozkládají na peroxy radikály (RO•), které přemísťují vodíkové atomy z polymerního řetězce. Tím se vytváří volné radikály na řetězci, které mohou vytvořit vazbu s volnými radikály na jiných řetězcích. Ovšem tyto volné radikály nemusí reagovat pouze s volnými radikály na jiném řetězci, může docházet k reakcím s dalšími typy radikálů v systému. Tím je ovlivněna výsledná efektivita síťování. Princip mechanismu zesíťování polyethylenu pomocí peroxidů je na obr. 16. [28]



Obr. 16 Proces síťování peroxidy [29]

Velmi důležité je správné načasování síťovacího procesu. Peroxidy, které se rozkládají za nižších teplot, mohou iniciovat síťování předčasně. Z tohoto důvodu musí být zvoleny pro daný proces vhodné typy peroxidů. Míra vhodnosti peroxidu pro síťovací proces je určována poločasem rozpadu. Poločas rozpadu označuje dobu, během níž dojde k rozpadu poloviny molekul peroxidu na radikály. Poločas rozpadu je silně ovlivňován teplotou. Jako příklad lze uvést často využívaný dikumylperoxid (obr 17.), při teplotě 115 °C má poločas rozpadu 23 hodin, při teplotě 130 °C 1,8 hodiny a při teplotě 145 °C pouze 0,3 hodiny. <sup>[30]</sup> Dalšími často využívanými sloučeninami jsou peroxidy ketonů, hydroperoxidy, dialkylperoxidy či diacylperoxidy. Polyethyleny síťované organickými peroxidy jsou často využívány jako materiál na výrobu horkovodního potrubí, plynového potrubí či na kabelové izolace. <sup>[4]</sup>

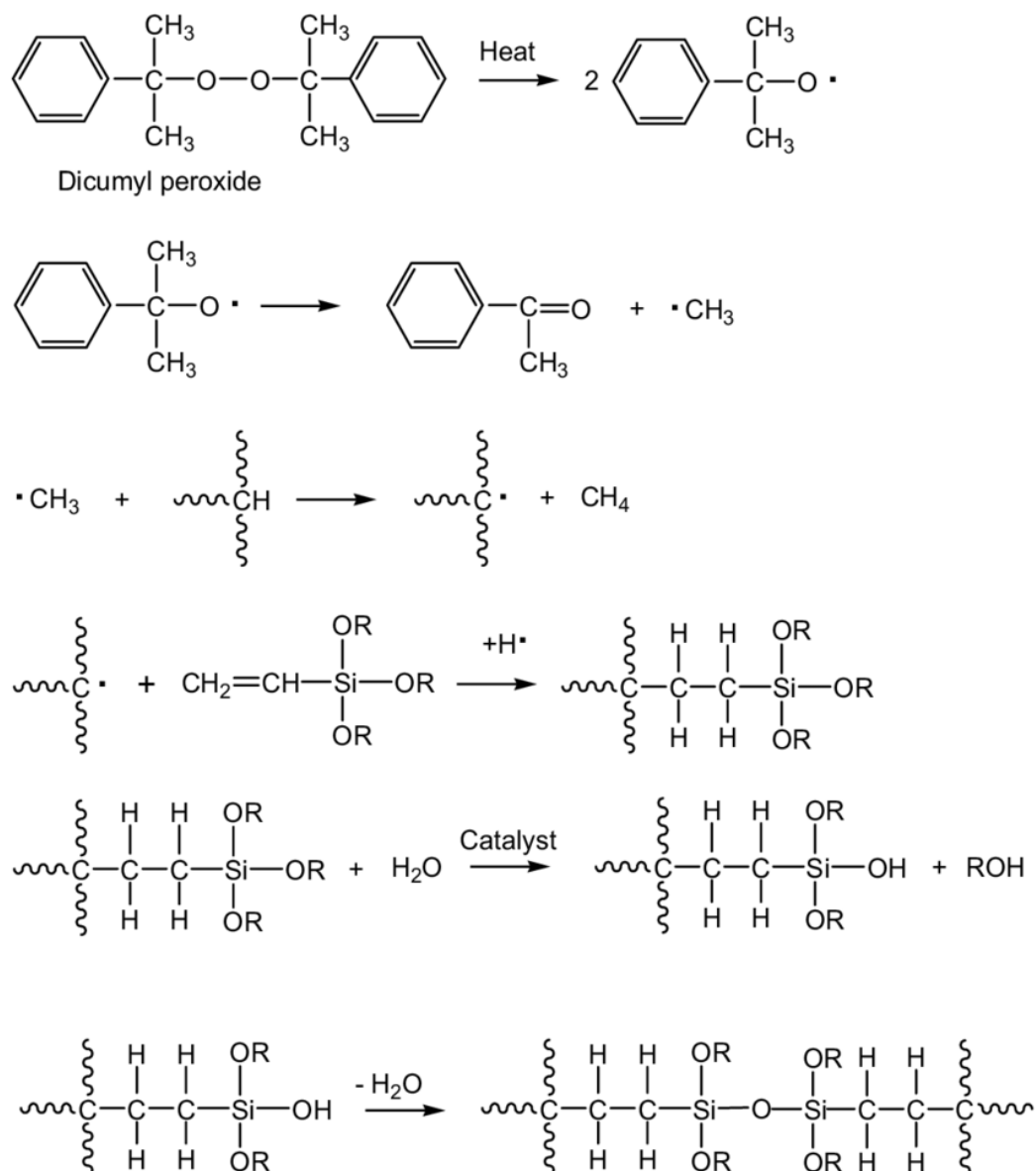


Obr. 17 Dikumylperoxid <sup>[31]</sup>

### 1.2.2 Síťování silanovými sloučeninami (PE-XB)

Zatímco PE-XA je vyráběn tzv. Engelovým procesem. Při tomto procesu k zesíťování dochází při vytlačovacím procesu. PE-XB je síťován až po vytlačení požadovaného výrobku. Síťovací reakce probíhá nejčastěji vlivem vlhkosti a vyšší teplotou. <sup>[32]</sup>

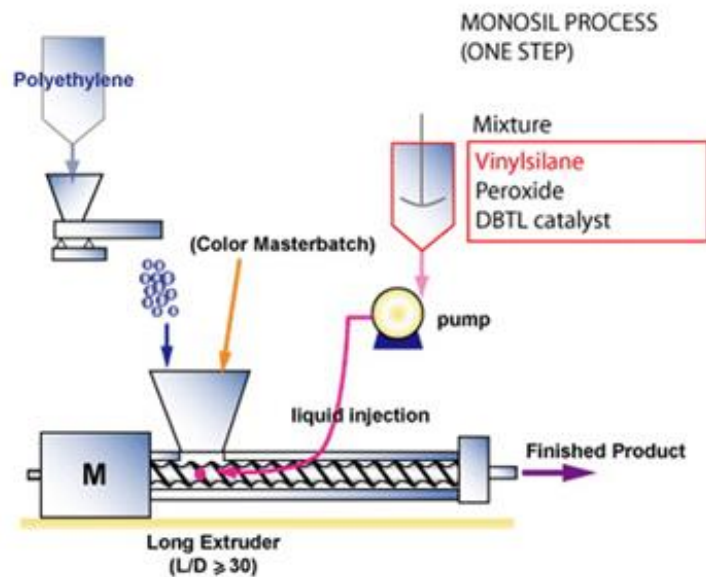
Silanová činidla jsou tvořena křemíkem vázaným na kyslík a různými uhlíkovými skupinami. V současné době se využívají dva hlavní postupy tvorby zesíťované struktury polyethylenu, jednokrokový proces Monosil a dvoukrokový proces Siopal. Princip vzniku síťovaného polyethylenu je znázorněn na obr. 18. <sup>[28]</sup>



Obr. 18 Princip vzniku síťovaného polyethylenu silanovými činidly <sup>[30]</sup>

### 1.2.2.1 Monosil proces

V případě Monosil procesu probíhá roubování a síťování v jednom kroku, kdy se využívá speciálně navržených extruderů s vysokým poměrem L:D (poměr délky k šířce šneku). Všechny komponenty (polyethylen, alkosiloxany, peroxidy, síťovací katalyzátory a ostatní aditiva) jsou naplněny do extrudéru. Vytvrzení vytlačeného výrobku je provedeno vlhkostí ve vodní lázni nebo parní sauně. Stručné schéma aparatury je na obr. 19. Hlavními nevýhodami jednokrokového procesu jsou především vysoké počáteční investice a nutnost vysoké odbornosti obsluhy výroby. <sup>[28]</sup>

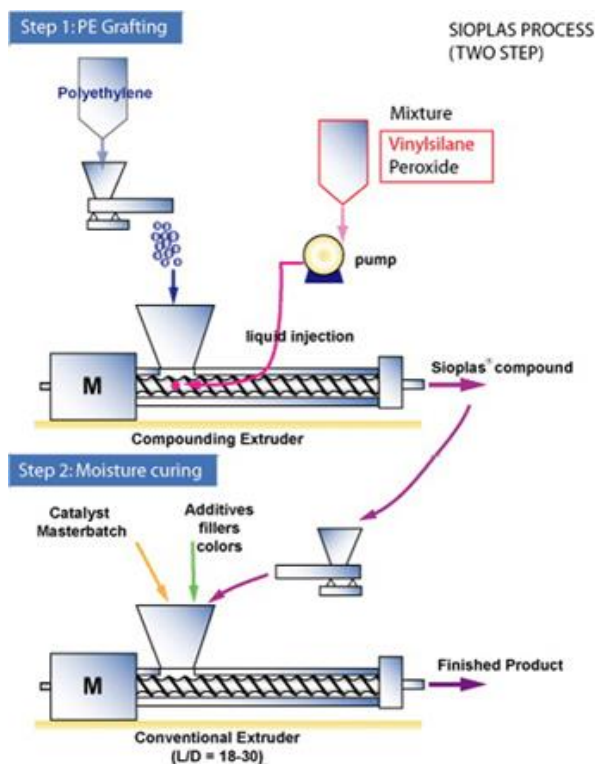


Obr. 19 Schéma výroby síťovaného PE procesem Monosil <sup>[33]</sup>

### 1.2.2.2 Siopal proces

Prvním krokem je při Siopal procesu roubování polyethylenu. Využívají se peroxidové katalyzátory, které se při zahřátí rozpadají za vzniku radikálů. Reakční podmínky jsou upravovány, tak aby byla většina radikálů spotřebována při roubovací reakci s alkoxyxilany. Typické alkosiloxany pro síťování obsahují koncové vinylové skupiny, které snadno reagují se sekundárními radikály v řetězci. Roubování se provádí nejčastěji v tavenině za teplot v rozmezí 140–240 °C. V následném kroku dochází k míchání naroubovaných polyethylenových pelet s masterbatchem, který obsahuje katalyzátory síťování, antioxidanty a stabilizátory. Po promíchání následuje vytlačení směsi do požadovaného výrobku. Následně probíhá síťovací reakce vystavením produktu vodě či páře při teplotách okolo 80 °C. Schéma aparatury je na obr. 20. <sup>[28]</sup>





Obr. 20 Schéma výroby síťovaného PE procesem Siopal <sup>[34]</sup>

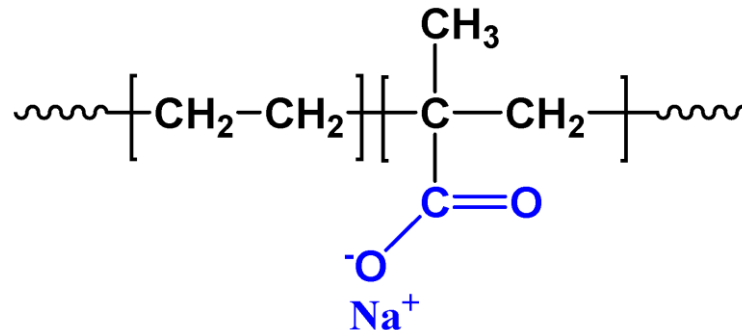
### 1.2.3 Síťování zářením (PE-XC)

K síťování polyethylenu lze využít radiační záření, nejčastěji je to vysoce energetické záření ( $\beta$ - a  $\gamma$ - záření). Kvalita tvorby příčných vazeb závisí na schopnosti záření proniknout do hloubky,  $\beta$ - záření proniká do 10 mm,  $\gamma$ - záření až do hloubky 100 mm. <sup>[35]</sup> Z tohoto důvodu je radiační síťování vhodnější pro tenké materiály. Lze ho použít u fólií, tenkých trubek, vláken, či pěn. Výhodou oproti chemickému síťování je absence chemických síťovadel. V některých případech (např. extrudované potrubí) má dokonce radiačně síťovaný polyethylen za vyšších teplot lepší odolnost proti prasknutí než polyethylen síťovaný silanovými činidly. Velkou nevýhodou je však vysoká cena celého procesu. <sup>[30]</sup>

### 1.2.4 Ionomery

Jako zvláštní případ síťování lze považovat ionomery. Termín ionomery původně označoval soli kopolymerů olefinů s malým množstvím monomerů obsahujících karboxylové skupiny, např. sůl kopolymeru ethylenu a kyseliny methakrylové. V současnosti se termín ionomery používá více obecněji. Jako ionomery se označují termoplastické elastomerní uhlovodíkové polymery s malým množstvím (nejčastěji do 10 %) částečně nebo úplně zneutralizovaných kyselých skupin, které poskytují materiálům typické vlastnosti. Vlastnosti ionomerů závisí na intramolekulární a intermolekulární interakci mezi jednotlivými segmenty. Kyselinové skupiny působí jako spojovací články a vytváří zesílení. Nejznámějším ionomerem je Surllyn

(kopolymer ethylenu, kyseliny methakrylové zneutralizované zinkovým nebo sodným iontem), jehož struktura je na obr. 21. Výhodou těchto materiálů je lepší průhlednost a mechanické vlastnosti. Nejčastěji se používají jako obalové materiály v kosmetickém i potravinářském průmyslu. [36]



Obr. 21 Surlyn [37]

### 1.3 Technologie zpracování polyethylenu

#### 1.3.1 Vstřikování

Vstřikování je nejvíce používanou technologií při zpracování termoplastů. Více než 25 % plastových výrobků je produkováno vstřikováním a význam této technologie stále roste. Celý proces zpracování probíhá během jednoho cyklu, kdy dochází k přeměně polymerní směsi na hotový výrobek. Hlavní přednost představuje produkce rozměrově přesných vystříknutých výrobků při poměrně nízkých nákladech. Díky navrhnutým formám u většiny výrobků nejsou nutné žádné další úpravy. Navíc toky a vtokové zbytky lze u termoplastů snadno rozemlít a znovu vstřikovat, což minimalizuje ztráty polymeru během celého zpracování. Velkým benefitem je také možnost automatizace a krátká doba vstřikovacího cyklu. [26]

#### Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus je tvořen sérií několika po sobě následujících kroků, které vedou k tvorbě vstřikovaných dílů. Nejčastěji se jako vstřikovací cyklus označují čtyři hlavní fáze, které mají značný vliv na celý proces i konečný vystříknutý výrobek. Někdy bývají do vstřikovacího procesu zahrnuty i strojní časy, které jsou taktéž nutné k správné činnosti celé vstřikovací jednotky.

#### Plastifikační fáze

V této části procesu dochází k přeměně polymerního prášku, granulátu či aglomerátu v homogenní taveninu. Důležitá je nejen shodná viskozita, ale i teplota. Dostatečná homogenita je základním předpokladem pro vytvoření kvalitního výrobku. Plastifikační fázi vstřikovacího procesu lze ovlivnit nastavením odlišných teplot v jednotlivých pásmech plastifikačního válce, zpětným odporem na šneku a rychlostí otáčení šneku. Kromě správného

naplnění formy má nedostatečná homogenita taveniny při vstříkovací fázi negativní vliv na kvalitu výrobku. Nejčastějšími povrchovými defekty, které lze nalézt při špatné plastifikaci jsou tokové čáry a studené spoje. Mnohdy dochází i k vnitřním, na první pohled nerozeznatelným změnám. Jedná se o nerovnoměrné rozložení plniva a polymeru, vnitřní pnutí či oblasti lišící se krystalinitou. Teplota je hlavním faktorem, který ovlivňuje orientaci makromolekul. Za vyšší teploty taveniny vykazují makromolekuly nižší orientaci a výrobek vykazuje mnohem vyšší izotropii, pokles vnitřního nežádoucího pnutí a mechanických vlastností ve směru toku taveniny.

### **Vstříkovací fáze**

Během této části procesu dochází k naplnění dutiny formy taveninou. Rychlost vstříkování významně ovlivňuje povrchové vlastnosti výrobku. Při nedodržení vhodné rychlosti vstříku vznikají na povrchu tokové čáry, vrásnění nebo drobné zvlnění označované jako tzv. pomerančová kůra (obr. 22).<sup>[38]</sup>



Obr. 22 Pomerančová kůra na povrchu polyethylenu<sup>[39]</sup>

Rychlost vstříkování závisí nejen na typu polymeru, velikosti výrobku, ale také na plnivech. Pro polymery, které mají větší množství částicového plniva, je vhodnější při zpracování kombinace vyšší teploty a menší vstříkovací rychlosti. Naopak pro polymery s vláknitými plnivy je lépe zpracovávat taveninu za vyšších rychlostí. Pokud je rychlost vstříkování příliš nízká, dochází k rychlému ochlazení taveniny u vstupu. S tím souvisí nechtěná vyšší anizotropie výrobku v jednotlivých částech, pokles povrchového lesku a pevnosti studených spojů.<sup>[38]</sup>

### **Dotlaková fáze**

K popisu průběhu dotlaku se používá tlaková odezva v dutině formy a doba působení. Dotlaková fáze ovlivňuje dosažení požadovaných rozměrů, tvarů a hmotnosti výrobku, zároveň je využívána ke korekci smrštění, k odstranění propadlin, trhlin, bublin i ke zlepšení povrchového vzhledu. Ke kontrole působení plnicí a dotlakové fáze se využívá tzv. polštář. Tímto pojmem se označuje množství taveniny, které zůstane před čelem šneku po skončení

dotlaku. Pokud se hodnota polštáře v jednotlivých cyklech nemění, je vstřikovací cyklus reprodukovatelný.

### Ochlazovací fáze

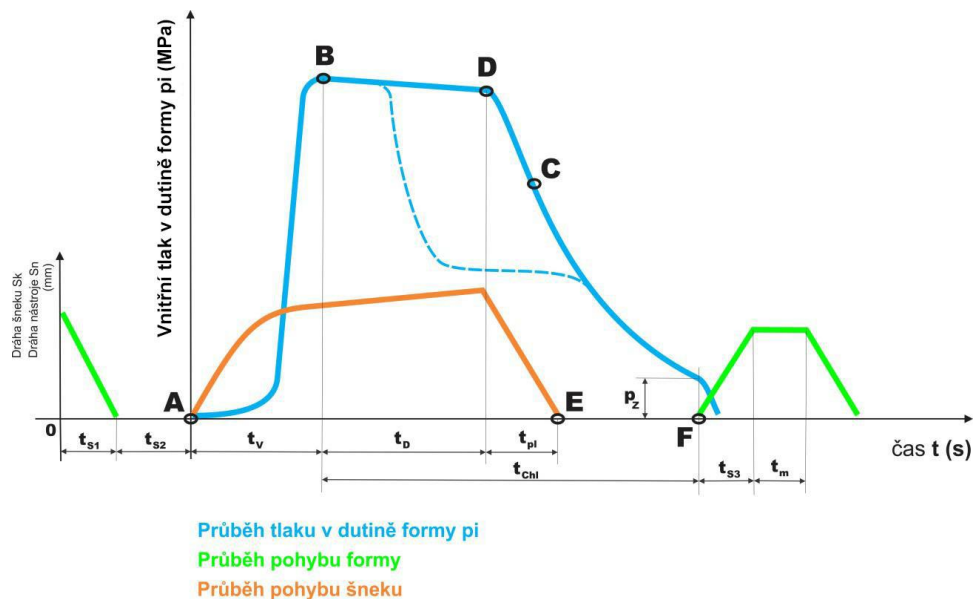
K chlazení dochází už na začátku plnění formy taveninou a pokračuje až do doby vyhození výrobku z formy. Průběh fáze ochlazování je popisován dobou chlazení a teplotou formy. Minimální doba chlazení je určena nutnou tuhostí výrobku při vyhození z formy. Je volena tak, aby nedošlo k žádné deformaci nebo vzniku skrytých vnitřních vad. Jakost výstřiků je silně ovlivněna teplotou formy. Rychlost chlazení ovlivňuje relaxační proces, který ovlivňuje stupeň orientace, orientační i teplotní pnutí, ale také krystalickou strukturu. Rychlost chlazení silně ovlivňuje podíl krystalické fáze, čím delší je doba chlazení, tím více mají makromolekuly času k uspořádání a roste obsah krystalické fáze. S delším dobou chlazení souvisí také větší smrštění, specifická hmotnost, tuhost, tvrdost i pevnost. [38]

### Strojní časy

Proces vstřikování obsahuje několik strojních časů. Jedná se o strojní časy potřebné k uzavření, přisunutí, odsunutí, otevření formy a vyhození výrobku. Délka jednotlivých strojních časů se odvíjí od rychlosti pohybu po dráze, kterou musí vstřikovací stroj nebo vstřikovací forma urazit. [40]

### Vstřikovací cyklus v diagramu $p_i - t$

Velmi často se používá k popisu vstřikovacího cyklu časová závislost tlaku. Graf znázorňující obecný diagram  $p_i - t$  je na obr. 23.

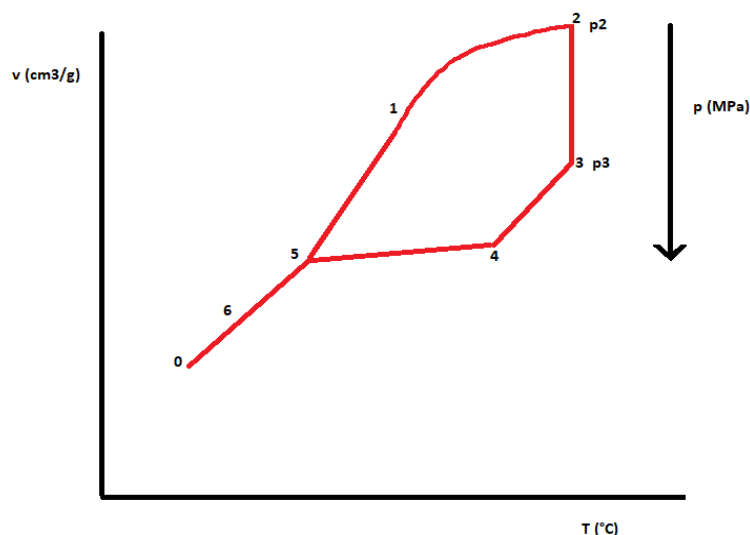


Obr. 23 Závislost tlaku v dutině formy na čase při vstřikování [41]

Samotný vstřikovací cyklus začíná v bodě 0. Během časového intervalu  $t_{s1}$  se uzavírá vstřikovací forma. Posun vstřikovací jednotky k formě probíhá v rámci časového intervalu  $t_{s2}$ . V bodě A začíná plastifikace v tavicí komoře a homogenní tavenina se vstřikuje do dutiny formy. Doba, během které probíhá plnění formy, se označuje jako doba plnění  $t_v$ . V rámci této fáze dosahuje tlak maximální hodnoty. Děj je ukončen v bodě B, kdy se objem taveniny ve formě pohybuje okolo 95 % celkového objemu dutiny vstřikovací formy. Chlazení probíhá po celou dobu až do otevření formy a vyjmutí výrobku. Tato doba se označuje jako doba chlazení  $t_{ch}$ . Chlazení lze dělit na dva typy, chlazení při plném vstřikovacím tlaku a při poklesu tlaku. Chlazení nekončí ani po vyhození výstřiku z dutiny vstřikovací formy, kdy dochází k chlazení mimo formu bez tlaku až do vyrovnání teploty výstřiku s okolní teplotou. V rámci snížení teploty při chlazení se vystříknutý výrobek smršťuje. Ke kompenzaci smrštění a zabránění nechtěnému vzniku propadlin a staženin slouží dotlak, který je charakterizován dobou dotlaku  $t_d$ . Dotlak může být konstantní a stejně velký jako maximální tlak (plná modrá čára) nebo může po několika sekundách poklesnout (přerušovaná modrá čára) a další chlazení probíhá při sníženém tlaku. Dotlak se dělí na izobarický (konstantní tlak) a izochorický (konstantní objem). Fáze dotlaku je ukončena v bodě D. Bod C označuje okamžik zatuhnutí roztavené hmoty. Po dotlaku se opět plastifikuje nová dávka plastu (časový úsek  $t_{pl}$ ). Během otáčení šneku je pod násypkou odebírán granulát, následně je plastifikován a vtlačován do prostoru před čelem šneku. Současně dochází k pohybu šneku zpět dozadu, během něhož musí překonávat zpětný tlak. Velikost zpětného tlaku ovlivňuje čas plastifikace, a především kvalitu prohnětení roztaveného plastu. Během pokračující fáze chlazení tlak ve vstřikovací formě dále klesá až na hodnotu zbytkového tlaku  $p_z$ . Jedná se o tlak, pod nímž se výstřik nachází ve formě těsně před jejím otevřením. Příliš vysoká hodnota zbytkového tlaku způsobuje vysoké vnitřní pnutí ve výrobcích. V bodě F je forma otevřena a vystříknutý výrobek je vyhozen. Tento časový interval představuje strojní dobu  $t_{s3}$ . V případě vyjímání výrobku manipulátorem přidává se k popisu celého procesu manipulační doba  $t_m$ .

### **Vstřikovací cyklus v diagramu p – v – T**

Vstřikovací cyklus lze také popsat pomocí stavových termodynamických veličin. Takový graf se označuje jako p-v-T diagram, jeho obecný průběh je znázorněn na obr. 24.

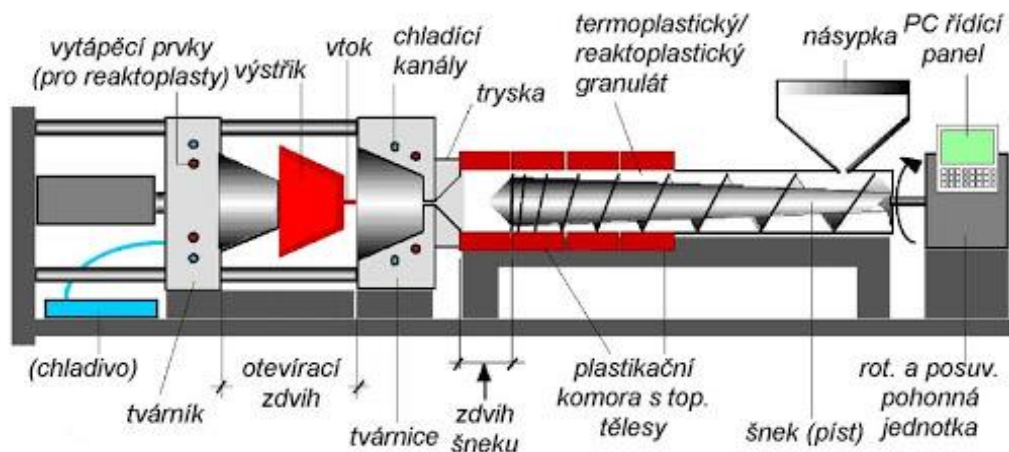


Obr. 24 Průběh p-v-T diagram vstřikovacího cyklu

Hodnoty stavových veličin nejsou v jednotlivých místech výstřiku stejné, závisí na několika faktorech. Těmi hlavními jsou typ použitého plastu, tvar a tloušťka stěn výrobku, vstřikovací tlak, dotlak, vstřikovací rychlost, teplota taveniny a formy. V dnešní době řízení vstřikovacího cyklu pomocí p-v-T diagramů nabývá na významu. Stručný popis p-v-T diagramu je následující. Před samotným vstřikovacím cyklem je forma uzavřena. Bod 0 charakterizuje počátek vstřikovacího cyklu. Následně dochází k ohřevu a plastifikaci polymerní směsi. V bodě 1 se začíná uplatňovat tavení i komprese. To dokazuje rostoucí tlak, který stoupá až na hodnotu  $p_2$ . Zároveň se vlivem topení a tření zvyšuje i teplota taveniny, znázorněno bodem 2. Samotný vstřikovací cyklus začíná v bodě 2, kdy axiální pohyb šneku způsobí rychlý nárůst tlaku. Pro zjednodušení je předpokládáno, že tento krok probíhá izotermně. Tlak neustále roste až na maximální hodnotu  $p_3$  v bodě 3. Následně dochází k poklesu tlaku a vstřikovací tlak je přepnut na dotlak, který probíhá ve dvou fázích. Jedná se o dotlak izobarický (mezi body 3, 4) a dotlak izochorický. V bodě 5 je dosaženo opět počátečního tlaku a fáze dotlaku je ukončena. Umístění bodu 5 je významné pro výsledné vlastnosti výstřiku (hmotnost, smrštění a tloušťka). Chlazení probíhá ve fázi výstřiku i ve fázi dotlaku. Během celé této fáze chlazení dochází zároveň k působení tlaku. Naopak mezi body 5 a 6 dochází pouze ke chlazení bez jakéhokoliv působení tlaku. V bodě 6 dochází k otevření formy a vyhození výrobku z formy. Mezi body 6 a 0 je výrobek chlazen okolním vzduchem mimo vstřikovací formu. <sup>[40]</sup>

### Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj je složen ze vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky, ovládání a regulace. Stručný náčrt vstřikovacího stroje i s popisem je na obr. 25. <sup>[42]</sup>



Obr. 25 Vstřikovací stroj <sup>[43]</sup>

### Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka má dva hlavní úkoly, přeměnu granulátu na homogenní taveninu a vstříknutí taveniny do formy. Podle konstrukce vstřikovacích jednotek se rozlišují vstřikovací stroje bez předplastifikace a s předplastifikací. Pro malé výrobky jsou dostačující i vstřikovací jednotky bez předplastifikace. V dnešní době převládají jednotky s předplastifikací, které zaručují dostačenou homogenitu taveniny a tím pádem i kvalitu výsledného výrobku. Podle typu plastifikační jednotky se rozlišují šnekové a pístové vstřikovací stroje. Pístové plastifikační jednotky jsou vhodné do 500 g polymerní směsi. U větších množství směsi a polymerů náročnějších na zpracování (neměkčený polyvinylchlorid, polytetrafluoretylen) se využívají pouze šnekové plastifikační stroje, které zajišťují lepší převod tepla a dokonalejší homogenizaci. <sup>[26]</sup>

### Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka slouží k otevírání, uzavírání formy a zajištění uzavření formy dostatečnou silou po celou dobu vstřikovacího procesu.

### Forma

Forma je pro vstřikovací technologii velmi důležitou komponentou. Existuje několik požadavků, které musí vstřikovací forma splňovat. Musí odolávat vysokým tlakům, poskytovat rozměrově přesné výrobky, uskutečňovat snadné vyjmutí výrobku a být plně automatizovaná. Konstrukce a materiál na formy se odvíjí od mnoha faktorů. Těmi hlavními jsou cena, použitý polymer, velikost a tloušťka výrobku, počet kusů, tepelná i mechanická odolnost. Části vstřikovací formy lze rozdělit na funkční a konstrukční. Jako funkční části se označují prvky, které jsou v přímém kontaktu s polymerní taveninou a udávají její tvar. Části funkční zajišťují správnou činnost. Těmi nejdůležitějšími částmi vstřikovací formy jsou díly,

vymežující dutinu formy, temperační, vtokový a vyhadzovací systém, upínací a vodící elementy. Příklad vstřikovací formy je na obr. 26. <sup>[42]</sup>



Obr. 26 Vstřikovací forma <sup>[44]</sup>

### 1.3.2 Rotomoulding

Rotomoulding neboli rotační tvarování je zpracovatelská technologie, která se nejvíce využívá k produkci dutých plastových předmětů. Příklad formy a pece pro zpracování polyethylenu technologií rotomouldingu je na obr. 27. <sup>[45]</sup>

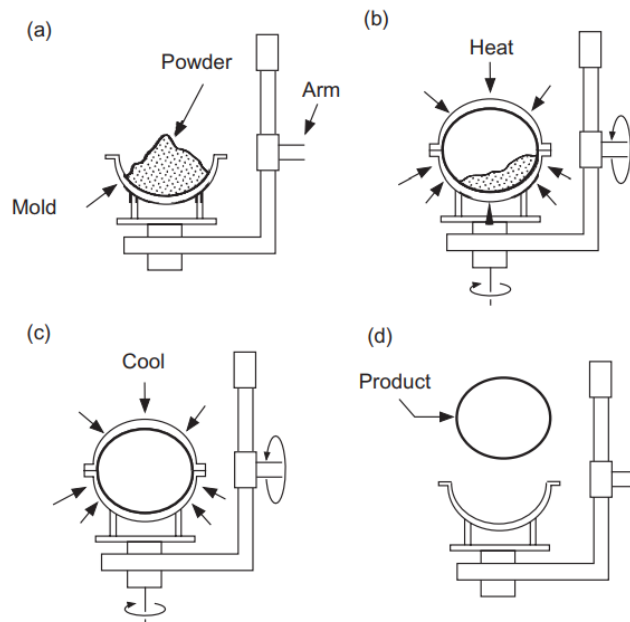


Obr. 27 Forma a pec pro rotomoulding <sup>[46]</sup>

Před samotným zpracovatelským procesem je nutné vyrobiť formu. Ta se skládá ze dvou částí a je otvíratelná, což umožňuje snadné plnění polymerním práškem. Požadavky na tloušťku stěny se liší podle typu polymeru, velikosti dílu a požadavků na aplikaci. Ze znalostí geometrie formy, zejména oblasti vnitřního povrchu, hustoty polymeru a tloušťky cílové stěny výrobku se vypočítá přesná hmotnost polymerního prášku potřebná k výrobě konkrétního výrobku. Vnitřní prostor formy neobsahuje žádné překážky či výstupky, je tedy umožněn volný pohyb prášku po celém povrchu. Formy jsou vyráběny s tenkými stěnami, aby bylo dosaženo co nejrychlejšího prostupu tepla během zahřívání i následném chlazení. Celá výrobní forma je poměrně lehká v porovnání k jiným procesům, kde je využíváno vysokých tlaků.



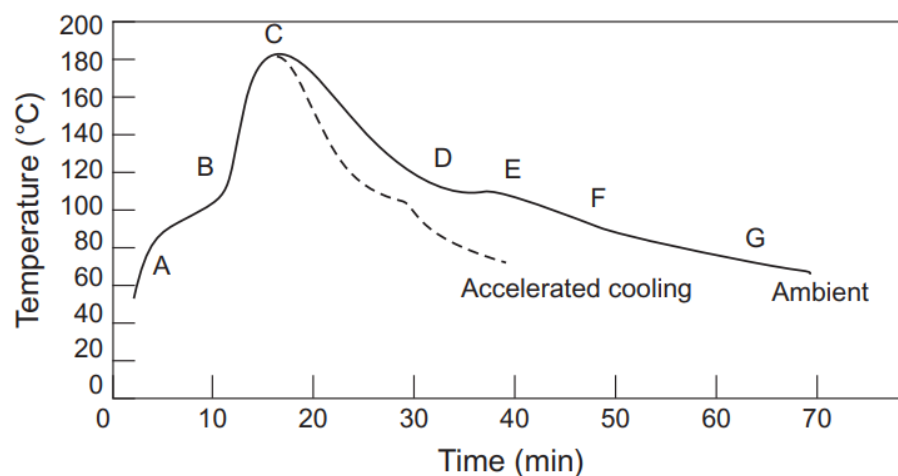
Samotný proces rotačního tvarování se skládá ze čtyř hlavních kroků (obr. 28). V prvním kroku je do otevřené formy vložen polymerní prášek a dochází k uzavření formy. Celý první krok tedy probíhá mimo pec.



Obr. 28 Jednotlivé kroky zpracování rotačním tvarováním <sup>[45]</sup>

*a – vložení prášku do otevřené formy, b – uzavření formy a ohřev, c – chlazení formy, d – otevření formy a vyjmutí výrobku*

Druhý krok představuje vložení formy do předem vyhřáté pece na požadovanou teplotu, dochází k rotaci celé formy v peci. Během druhého kroku dochází k transformaci polymerního prášku na polymerní taveninu, která vytváří souvislou vrstvu. Třetí a čtvrtý krok představují ochlazení a vyjmutí hotového výrobku. Ke kontrole celého procesu je využíváno měření teploty uvnitř formy. Změny teploty během celého procesu jsou zaznamenány na obr. 29.



Obr. 29 Teplotní průběh rotomouldingu <sup>[45]</sup>

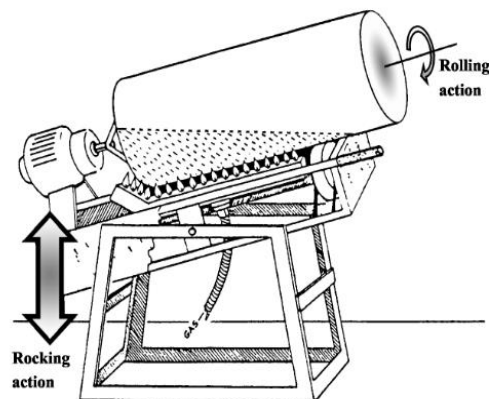
Teplota v peci je v tomto daném případě nastavena na 250 °C, v počáteční fázi teplota stoupá poměrně strmě (do bodu A). Přenos tepla z horkého vzduchu kovu na polymer je rychlá. Postupně dochází k poklesu gradientu růstu teploty, což je způsobeno přilnutím vrstvy polymeru k povrchu formy. Polymer má oproti kovu mnohem nižší tepelnou vodivost a zpomaluje přenos tepla. Dále je tedy teplo potřebné k roztavení samotného polymeru dodáváno ze vzduchu, tento proces zpomaluje nárůst vnitřní teploty. Na konci této fáze tání (bod B) se rychlost vnitřního nárůstu teploty opět zvyšuje. Vzniklá polymerní vrstva, obsahuje póry naplněné vzduchem. Vzduchové bubliny stoupají na povrch a unikají, což je hlavní příčina zvyšující se teploty. Druhý krok rotačního formování je dokončen, když je vytvořena jednotná polymerní vrstva. Dále (bod C) je rotující forma vyjmuta z pece. Během chlazení vrstva polymerní taveniny tuhne, neustále však pokračuje otáčení formy. Forma je mimo pec, venkovní teplota je nižší než vnitřní teplota, rychlost chlazení je určována okolními podmínkami. Závislost rychlosti chlazení na okolních podmínkách ukazují dvě rozdílné křivky. První z nich popisuje zrychlené chlazení, které zahrnuje vzduch a vodu směřující k povrchu formy, druhá chlazení okolním vzduchem. Vzhledem k údajům o okolním chlazení je rychlost poklesu teploty po určitou dobu mírná (bod D). Následně se chlazení zpomaluje, hlavním důvodem je krystalizace, která je exotermická. Když je krystalizace dokončena (bod E), chlazení pokračuje. Zároveň dochází ke smršťování pevné polymerní vrstvy a odděluje se od formy (bod F). V určitém okamžiku po ztuhnutí lze výrobek efektivně vyjmout a ochladit formu venku.

Proces rotačního tvarování trvá delší dobu ve srovnání s jinými technologickými zpracováními, především vstřikováním a vyfukováním. Hlavní benefit představuje cena a schopnost vyrobit velké výrobky se složitými tvary či proměnnou tloušťkou na jednotlivých místech výrobku. Celý proces je nízkotlaký, což umožňuje použití tenkostěnných forem s nižší pevností. Pořizovací cena strojů, pece a forem je v porovnání s jinými procesy nižší. Naopak postup výroby není vhodný pro velké výrobní série menších dílů. Zde je mnohem vhodnější využít vyfukování či vstřikování. Počet materiálů, které jsou k dispozici pro rotační tvarování je ve srovnání s jinými procesy omezený. Doba cyklu je ve srovnání s jinými procesy delší, protože forma i materiál musí být zahřívány a chlazeny. Během výroby je potřeba neustálá kontrola, aby nedošlo k nalepení na formu při otírání formy. Vyztužení a žebra nelze snadno tvarovat z důvodu špatného uchycení materiálů. <sup>[45]</sup>

### **Stroj typu Rock and Roll**

Označení stroje vychází z rotačních pohybů, které jsou uskutečňovány v rámci výroby. Během celého procesu dochází ke kývání v jedné ose (*rock*) a k otáčení o 360 ° v ose druhé

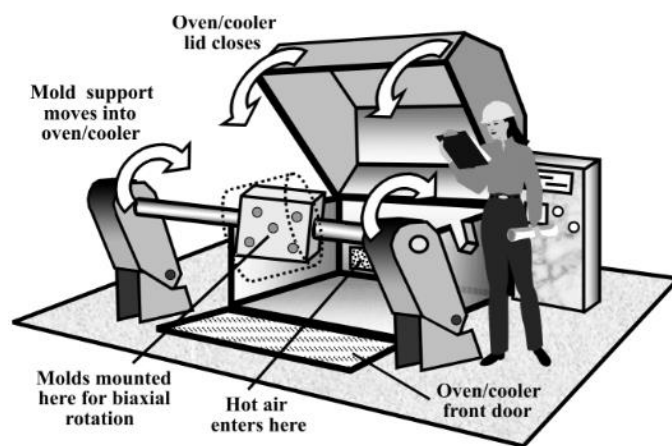
(roll), kolmé na první osu. Patří mezi nejstarší typy rotačního tvarování. Stručný náčrt stroje je na obr. 30.



Obr. 30 Náčrt stroje typu Rock and Roll [47]

### Stroj typu Clamshell

Název stroje je odvozen od způsobu uzavírání pece nad formou. Označení vychází z angl. *clamshell* – mušle. Charakteristikou těchto strojů je poměrně malý půdorys. Zároveň však umožňují plnou biaxiální rotaci. Ohřev i chlazení je uskutečněno v jedné komoře. To představuje výhodu z hlediska požadavku na prostor, nevýhodou je nižší produktivita. Z důvodu možnosti umístění podpěrných ramen na obou koncích, jsou stroje typu Clamshell (obr. 31) vhodné pro produkci objemných kontejnerů a nádrží.

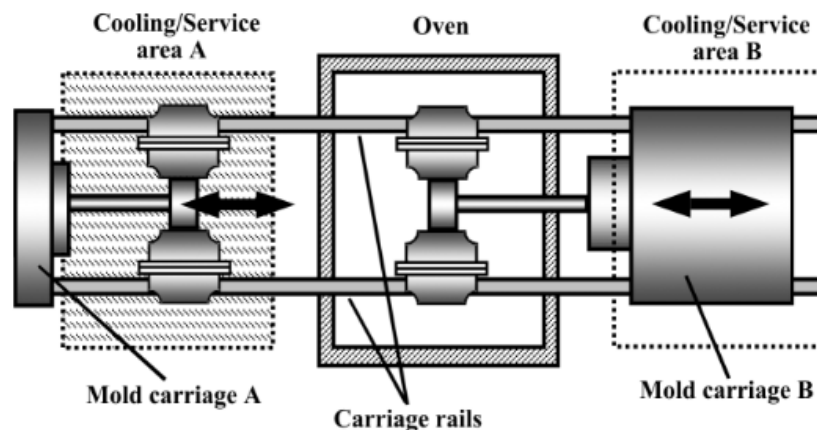


Obr. 31 Náčrt stroje typu Clamshell [47]

### Stroj typu Shuttle

Stroje typu Shuttle (obr. 32) byly vyvinuty jako snaha o ušetření co nejvíce prostoru. Název je odvozen podle pohybu, který stroj provádí (*shuttle* – pendlovat). Existuje mnoho variant strojů typu Shuttle lišících se pouze drobnými úpravami. Jeden z nejvíce využívaných typů představuje forma namontovaná na kolejném vozíku, který se pohybuje mezi jednotlivými chladicími stanicemi a pecí. Efektivita je zlepšována použitím konstrukce s dvojitým

vozikem, přičemž pec je vždy obsazena zahříváním formy, zatímco je druhá forma ochlazována nebo servisována. Pro správnou a dlouhodobou funkčnost je nutná kvalitní ochrana hnacího motoru před vysokými teplotami pece při ohřevu, ale i vodou, se kterou by se mohl motor dostat do kontaktu při chlazení. [47]



Obr. 32 Nákres stroje typu Shuttle [47]

### 1.3.3 Vytlačování

Vytlačování neboli extruze označuje zpracovatelský proces, během něhož je předplastikovaný polymer vytlačován z tlakové komory profilovacím zařízením. Z hlediska zpracování polymerů na výrobky nekonečné délky se extruze podobá válcování. Typem tváření se podobá vstřikování. U vstřikování získává polymer tvar formy, u vytlačování je tvar dán pouze vytlačovací hlavou. [26]

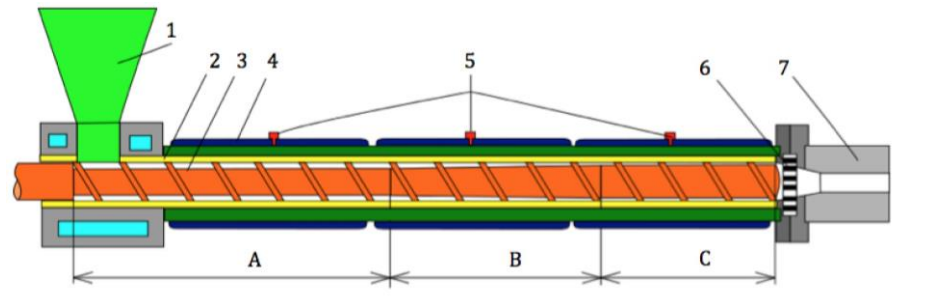
#### Pístové vytlačovací stroje

Pístové stroje jsou v současné době používány především pro zpracování polytetrafluorethylenu a vysokomolekulárního polyethylenu. Kvůli vysoké viskozitě nelze tyto polymery zpracovávat běžnými metodami. Při zpracování PTFE práškový polymer je během extruze postupně slinován v kroužky, které jsou následně pod vysokým tlakem (10 až 40 MPa) a teplotou okolo 300 °C postupně spékány. Tímto způsobem se vytváří vzorky různých délek i průměrů. [48]

#### Šnekové vytlačovací stroje

V současnosti jsou nejvíce využívány šnekové vytlačovací stroje. Dvěma hlavními typy jsou jednošnekové a dvoušnekové vytlačovací stroje. První typ je vhodnější pro zpracování termoplastů ve formě granulátu, pelet či aglomerátu, dvoušnekové vytlačovací stroje jsou výhodnější pro práškové polymery. [26] U šnekového vytlačovacího stroje se rozlišuje několik funkčních pásem. Ve vstupní neboli plnicí části dochází k zachycení a dopravení polymerní směsi směrem k vytlačovací hlavě. Následuje plastifikační pásmo, ve kterém se polymerní

hmota důsledně plastifikuje a homogenizuje. Ve výstupním (dávkovacím, vytlačovacím) pásmu se pod tlakem dávkuje homogenní tavenina do vytlačovací hlavy, skrz kterou dochází k vytlačení polymeru do požadovaného tvaru. Popis jednošnekového vytlačovacího stroje je na obr. 33 [48]



Obr. 33 Jednošnekový extrudér [49]

*A – plnicí zóna, B – plastifikační zóna, C – kompresní zóna,  
1 – násypka, 2 – válec, 3 – šnek, 4 – elektrické topení, 5 – termočlánky, 6 – lamač,  
7 – vytlačovací hlava*

### Vytlačovací hlavy

Hlava vytlačovacího stroje označuje tu část stroje, která dává tavenině výsledný tvar. Důležité je, aby konstrukce hlavy zajišťovala kontinuální a pravidelný tok materiálu a nedocházelo ke vzniku mrtvých míst, kde by mohlo dojít k zastavení materiálu. Mezi koncem šneku a hlavou se nachází lamač. Jedná se o děrovanou desku s otvory okolo 5 mm. Hlavním úkolem lamače je zajistit finální homogenizaci plastu taveniny vycházející z šneku. Podle konstrukce se vytlačovací hlavy dělí do několika základních kategorií. Jedná se o přímé, nepřímé, širokoštěrbinové a speciální hlavy.

### Přímé hlavy

Přímé hlavy se využívají pro vytlačování trubek. Vnitřní a vnější průměr trubky je ovlivňován pomocí vyměnitelných hubic a trnů. Velkou nevýhodou této konstrukce hlavy je tvorba slabých míst v místě spojování proudu taveniny rozdělené žebry rozdělovače. Tento nedostatek je nejčastěji řešen využitím spirálového rozdělovače.

### Nepřímé hlavy

Největší využití nepřímých hlav je v rámci opláštění vodičů, kabelů, či profilů. Všechny nepřímé hlavy obsahují vrtaný trn, skrz který prochází opláštěvaný výrobek. Mají různý úhel odklonu od osy šnekového vytlačovacího stroje. U příčných hlav je tento úhel 90 °, u šikmých hlav je menší, zhruba od 30 do 60 °. S rostoucím odklonem od osy šnekového vytlačovacího stroje rostou potíže související s nerovnoměrným tokem taveniny polymeru v dutině vytlačovací hlavy. Řešení spočívá ve využití děrovaného rozdělovače, který slouží jako

korekce. Princip vyrovnání rozdílných délek dráhy spočívá v rozdílných velikostech, kdy na vnitřní straně se nachází menší díry, které zvyšují odpor. Naopak na vnější straně jsou otvory větší.

### **Širokoštěrbinové hlavy**

K výrobě folií a desek je nutné, aby tavenina vycházející z vytlačovacího stroje byla rozvedena do široké štěrbině, k tomu slouží širokoštěrbinové hlavy. <sup>[48]</sup>

## **2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

### **2.1 Přehled použitých látek a materiálů**

#### **2.1.1 Polyethylen RX 102 Black**

Polyethylen RX 102 Black je obchodní název pro LLDPE od společnosti Resinex. Z hlediska složení se nejedná o čistý polyethylen, ve své struktuře obsahuje přibližně 25 % sazí. Polyethylen RX 102 Black je určený především ke zpracování technologií rotomouldingu. Hlavními benefity jsou vysoká odolnost proti napětí, rázová houževnatost a odolnost proti ohybu. Polyethylen RX 102 Black je zároveň poměrně snadno zpracovatelný. Hustota je  $0,935 \text{ g/cm}^3$ . MFI je 7 g/10 min.

#### **2.1.2 Polyethylen Revolve XL 400**

Polyethylen Revolve XL 400 je označení pro zesíťovaný polyethylen od společnosti Matrix Polymers. Nejčastěji je dodáván ve formě černého prášku a je určen především pro zpracování rotačním tvarováním. Tento typ polyethylenu vykazuje velmi dobrou pevnost a chemickou odolnost. Často je zpracováván na produkty, které se dostávají do kontaktu s chemickými médii, např. palivové nádrže. Hustota je  $0,955 \text{ g/cm}^3$ .

#### **2.1.3 Směs polyethylenu Revolve XL 400 a polyethylenu RX 102 Black**

Směs byla vytvořena smícháním polyethylenu Revolve XL 400 a RX 102 Black. Obsahovala 33,5 % polyethylenu RX 102 Black a 66,5 % polyethylenu Revolve XL 400.

#### **2.1.4 Chemické látky**

##### **Benzin**

Byl použit benzin Efecta 95 od společnosti Benzina.

##### **Nafta**

Byla použita nafta Efecta Diesel od společnosti Benzina.

##### **Brzdová kapalina**

Byla použita brzdová kapalina DOT 4 od společnosti Carline.

##### **Chladicí kapalina**

Byla použita vodou naředěná chladicí kapalina Antifreeze G12 od společnosti Carline v poměru 1:1.

### **2.2 Technologie přípravy zkušebních vzorků a tělísek**

Polyethylenové vzorky byly připraveny dvěma technologiemi – rotačním tvarováním a vstřikováním.

### **2.2.1 Rotomoulding**

Polyethylenové vzorky byly vyrobeny rotačním tvarováním z prášků ve firmě CZ PLAST spol. s r.o. Kostěnice. Všechny typy polyethylenů byly zpracovávány při shodných podmínkách. Pečení vzorků bylo provedeno při teplotě 280 °C a trvalo 20 minut. Následně byly vzorky chlazeny 30 minut. Nejdříve bylo 15 minut využito statického chlazení a následně probíhalo chlazení 15 minut foukáním vzduchu z ventilátoru. Po celou dobu docházelo k otáčení formy při rychlosti 6,1 otáček za 2 minuty. Vzorky RX 102 Black byly nařezány z desky o tloušťce 5 mm, vzorky Revolve XL 400 a směsi (33,5 % RX Black a 66,5 % Revolve XL 400) o tloušťce přibližně 2,5 mm byly nařezány z palivových nádrží.

### **2.2.2 Vstřikování**

Polyethylenové vzorky byl připraveny vstřikovací technologií z polymerního prášků polyethylenů RX 102 Black, Revolve XL 400 a jejich směsi (33,5 % RX 102 Black + 66,5 % Revolve XL 400) ve společnosti RADKA spol. s r.o. Pardubice. Všechny typy polyethylenů byly vyráběny za stejných podmínek. Nejdříve byla provedena granulace ve 4 sekcích za teplot 170 °C, 180 °C, 190 °C, 190 °C při 180 otáčkách za minutu. Následně byly vystříknuta tělíska v jednotlivých sekcích, kde byly postupně teploty 170 °C, 180 °C, 180 °C, 180 °C. Další 4 hodiny byly vzorky sušeny. Ve všech případech byl vstřikovací tlak 40 barů. Doba chlazení ve formě byla přibližně 30 sekund. Vstřikováním byly vyrobeny 3 typy vzorků, polyethylen RX 102, Revolve XL 400 a polyethylen vzniklý jejich smícháním granulátu v poměru 33,5:66,5. Vzorky pro jednotlivé mechanické zkoušky byly vystříknuty v požadovaných rozměrech, a proto nebyla nutná jejich žádná další úprava.

## **2.3 Použité zkušební metody a zařízení**

### **2.3.1 Zkouška v tahu polyethylenových tělísek**

Tahové zkoušky byly provedeny na trhacím stroji MTS-4/M, který je na obr. 34. Maximální možná síla přístroje je 20 kN. Pro tahovou zkoušku byla použita norma ČSN ISO 527-1,2. Princip zkoušky spočívá v zatěžování zkoušeného tělíska tahem, které je upevněno mezi dvěma mechanickými čelistmi stroje, kdy upínací délka mezi čelistmi byla nastavena na 100 mm. Zatěžování tělísek bylo provedeno tahem při posunu čelistí o 20 mm za minutu. Pro každý typ vzorků polyethylenu bylo provedeno 5 měření. Připravená tělíska měla rozměry 150x10x4 mm. Vzorky vytvořené rotačním tvarováním byly nařezány z palivových nádrží a v případě vzorků RX 102 z rovných desek. Tělíska připravená vstřikováním již měla požadované rozměry. Touto metodou byly u všech vzorků naměřeny hodnoty pro mez pevnosti v tahu (N, MPa) a prodloužení při maximu – tažnost (%).





Obr. 34 Trhací stroj MTS-4/M

### 2.3.2 Zkouška v ohybu polyethylenových tělísek

K měření ohybových zkoušek byl využit trhací stroj MTS-4/M. Použita byla norma ČSN EN ISO 178. Podstata zkoušky spočívá v zatěžování zkoušeného vzorku, který je umístěn na podpěrách. Vzdálenost mezi podpěrami není konstantní, ale závisí na velikosti vzorku. Dle rozměrů tělísek byla nastavena při měření vzdálenost podpěr na 64 mm. Rychlost posunu příčnicku byla 2 mm/min. Hlavy, které byly využity pro ohybové zkoušky, jsou zobrazeny na obr. 35. Měření bylo pro každý vzorek 5x opakováno. Měřené vzorky měly rozměry 80x10x4 mm. Tělíska vyrobená rotomouldingem byla nařezána z palivových nádrží a desek. Vzorky připravené vstříkáním byly předem vystříknuty v požadovaném rozměru. Touto metodou byla určena mez pevnosti v ohybu (N, MPa) a průhyb při maximu (%).



Obr. 35 Hlavy na měření ohybu

### 2.3.3 Rázová houževnatost Charpy

Podstatou zkoušky je zjištění rázové práce nutné k porušení zkušební vzorku, který je umístěn na dvou podpěrách. Při zkoušce dopadne nos nárazového kladiva na prostředek zkušebního tělíska a kinetickou energií kladiva dojde k jeho přeražení. Jako rázová houževnatost se označuje poměr práce nutné k přeražení tělíska a plochy průřezu měřeného tělíska. Jednotkou rázové houževnatosti je  $\text{kJ/mm}^2$ . Měření bylo provedeno na kyvadlovém kladivu typu PIT 501J-3 (obr. 36) podle normy ČSN EN ISO 179-1, vzdálenost podpěr byla 62 mm. Používané vzorky měly rozměry 80x10x4 mm. Tělíska vyrobená rotačním tvarováním byla nařezána z palivových nádrží. Vystříknuté vzorky měly požadované rozměry, takže u nich nebyla potřeba žádná úprava. Z důvodu vysoké houževnatosti byly na všech polyethylenových tělískách vytvořeny dvoumilimetrové vruby (vrubovací zařízení CEAST 6525), čímž bylo zajištěno přeražení vzorků po dopadu nosu nárazového kladiva. Pro každý vzorek bylo měření 5x opakováno.



Obr. 36 Kyvadlové kladivo typu PIT 501J-3

### 2.3.4 Stanovení tvrdosti dle Brinella

Metoda je založena principu vtlačování kuličky o průměru 5 mm do zkoušeného materiálu. Tvrdost dle Brinella je vyjadřována jako poměr síly, kterou je kulička vtlačována do vzorku, a plochy důlku vzniklého po určité době působení zatížení. Pro všechna měření bylo použito zatížení 31,25 kgf, tedy 306,5 N. Měřena byla tělíska připravená vstřikováním i rotačním tvarováním. Měření bylo opakováno 5x pro každý vzorek.

### 2.3.5 Stanovení tvrdosti dle Vickerse

Tvrdost dle Vickerse je založena na stejném principu jako tvrdost dle Brinella. Namísto kuličky je do materiálu vtlačován pravidelný čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu  $136^\circ$ . U všech měření bylo použito zatížení 5 kgf, tedy 49 N. Měření bylo opakováno 5x pro každý vzorek.

Tvrdost dle Brinella a Vickerse byla změřena na univerzálním tvrdoměru Nemesis 9000, který je na obr. 37.



Obr. 37 Tvrdoměr Nemesis 9000

### 2.3.6 TMA – termomechanická analýza

Princip metody spočívá v měření změn výšky studovaného materiálu v závislosti na teplotě, čase a vložené síle. Metoda TMA slouží ke stanovení teploty skelného přechodu  $T_g$ , koeficientu teplotní roztažnosti ( $\alpha$ ) v určitém teplotním intervalu i zjištění průběhu koeficientu v závislosti na teplotě. Dále lze stanovit teplotu tání materiálu, popřípadě interval tání. Zkušební vzorky měly přibližně rozměry 5x5x2 mm a byly proměřeny v daném teplotním režimu. Hodnota teploty skelného přechodu  $T_g$  je zjištěna z grafické závislosti výšky vzorku na teplotě. Jedná se o proložení tečny ve skelné a kaučukovité fázi. Všechna měření byla provedena na přístroji CX04R firmy RMI (obr. 38). Použitá síla byla 50 mN. Pro změření teploty skelného přechodu jednotlivých typů polyethylenů byl použit následující měřicí mód:

1. krok -90 °C / 3 °C

2. krok 0 °C / 3 °C

3. krok -90 °C / 3 °C

4. krok 0 °C / 3 °C

Odečet byl proveden z křivky (kroku) č. 4 – 2. ohřev.

Pro změření hodnot teploty tání byl použit mód:

1. krok 200 °C / 3 °C



Obr. 38 Přístroj pro měření TMA

### 2.3.7 DMA – dynamická mechanická analýza

Princip DMA spočívá v mechanickém namáhání vzorku předem určenou silou (resp. napětím) a sledováním jeho deformační odezvy za proměnlivých podmínek, nejčastěji je měněnou veličinou teplota. Nejjednodušší je klasická dynamická analýza, kdy má mechanické namáhání sinusový průběh. Z naměřených průběhů napětí a deformace lze získat závislosti modulu pružnosti a ztrátového uhlů na teplotě, čase či frekvenci síly. Tyto závislosti dále slouží k určení teploty skelného přechodu, ztrát v materiálu, creepu, stupně orientace nebo míry orientace makromolekul. Dynamická termická analýza byla využita ke zjištění stupně zesílení polyethylenů Revolve XL 400 a směsi RX 102 a XL 400 v poměru 33,5:66,5. Pomocí DMA je změřen modul pružnosti v tahu při určité teplotě (z oblasti kaučukovitého plata) a následně je hustota zesílení vypočítána z rovnice, která je zobrazena na obr. 39. <sup>[50]</sup> Celé měření bylo provedeno na zařízení DMA DX04T firmy RMI (obr. 40).

$$v_{\varepsilon} = \frac{G'}{RT} = \frac{E'}{RT}$$

Obr. 39 Rovnice výpočtu stupně zesílení <sup>[50]</sup>

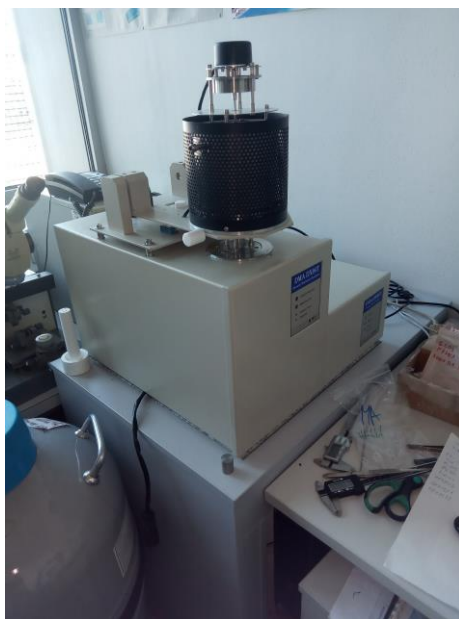
$v_{\varepsilon}$  – hustota zesílení,  $G'$  – modul pružnosti ve smyku,  $E'$  – modul pružnosti v tahu,  $R$  – plynová konstanta,  $T$  – teplota

Měření bylo provedeno za následujících podmínek:

- měřicí mód: tah,
- frekvence: 1 Hz,
- upínací délka: 30 mm,
- konstantní deformace: 0,15 mm.

Zvolený teplotní režim zahrnoval:

- ochlazení na teplotu -90 °C rychlostí 10 °C/min a setrvání na ní po dobu 10 minut,
- ohřátí na teplotu 200 °C rychlostí 3 °C/min.
- odečet hodnoty  $E'$  při 150 °C



Obr. 40 Přístroj pro měření TMA

### 2.3.8 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

Infračervená spektroskopie označuje spektroskopickou metodu, která slouží k identifikaci látek a určení jejich struktury. Princip metody je založen na měření absorpce infračerveného záření s různými vlnovými délkami zkoumanou látkou. Oproti UV záření nemá infračervené záření dostatečnou energii pro excitaci elektronů z jejich valenčních stavů. Přijmutím energie z infračerveného záření dojde pouze ke změně rotačně vibračních stavů molekul. Výsledkem měření je infračervené spektrum, které vyjadřuje závislost transmitance na absorbanci. Infračervená spektra jednotlivých typů polyethylenů byla naměřena na přístroji FTIR Nicolet

iS50 (Thermo Scientific, USA). K měření byly využity vlnové délky v rozsahu 4000–500  $\text{cm}^{-1}$  a spektrální rozlišení 2  $\text{cm}^{-1}$ . Měření byly vzorky polyethylenu RX 102 BLACK, Revolve XL 400 a polyethylenu vzniklého smíchaní obou těchto typů polyethylenů.

### 2.3.9 Mikroskopie

Struktura povrchu jednotlivých vzorků polyethylenu před a po půlročním působení chemických médií byla zkoumána optickým mikroskopem (obr. 41). Celkové zvětšení bylo 4x. Vzorky byly vyfoceny pomocí fotoaparátu CANON EOS 60D.



Obr. 41 Optický mikroskop

### 2.3.10 Měření hmotnosti

V rámci pozorování vlivu chemických médií u jednotlivých polyethylenových vzorků bylo prováděno měření změn hmotností. Polyethylenové vzorky byly váženy na analytických vahách Kern ACJ 220-4M. (obr. 42).



Obr. 42 Analytické váhy

### 2.3.11 Chemická odolnost

Odolnost polyethylenových tělísek byla zkoumána ve 4 mediích – benzínu, naftě, brzdové a chladicí kapalině. Hlavním důvodem pro volbu těchto chemických médií byla aplikace těchto typů polyethylenů. Nejvíce jsou využívány v automobilovém průmyslu, kde slouží

k výrobě palivových nádržek pomocí technologie rotačního tvarování. Po celou dobu byla měřena hmotnost a tvrdost dle Brinella i Vickerse. Navíc před vložením tělísek do jednotlivých chemických prostředích a po jejich vyjmutí po půl roce byly provedeny zkoušky v ohybu a zhodnocení strukturních změn povrchu. Časový interval, ve kterém byla měření prováděna, je zaznamenán v tab. 2.

Tab. 2 Časový interval měření chemické odolnosti

<b>Den</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>29</b>	<b>59</b>	<b>81</b>	<b>127</b>	<b>155</b>	<b>179</b>
------------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------	------------	------------

### 3 VÝSLEDKY A DISKUSE

#### 3.1 Mechanické zkoušky

Pro základní charakterizaci polyetylenových tělísek byly provedeny mechanické zkoušky – zkouška v tahu, zkouška v ohybu, rázová houževnatost a tvrdost dle Brinella i Vickerse.

##### 3.1.1 Zkouška v tahu

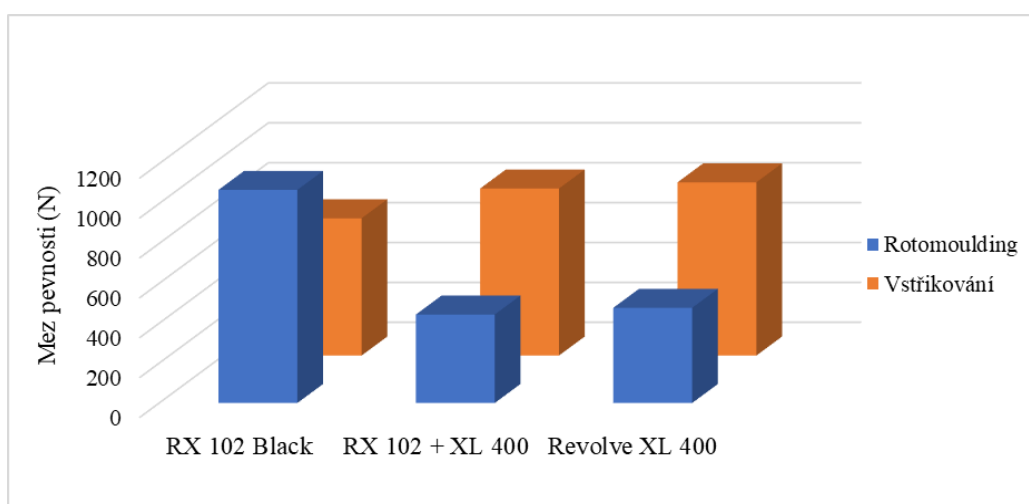
Pro zkoušku tahem byla vytvořena polyetylenová tělíska vstřikováním i rotačním tvarováním. Sledován byl vliv síťování a použité zpracovatelské technologie. Naměřené hodnoty pro tělíska zpracovaná technologií rotomoulding jsou zaznamenány v tab. 3, hodnoty pro tělíska zpracovaná vstřikováním jsou zaznamenány v tab. 4. Z obou tabulek byly vytvořeny grafy 1 a 2 pro mez pevnosti a prodloužení při maximu.

Tab. 3 Hodnoty zkoušky v tahu (rotomoulding)

vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	prodloužení při max (%)	±
<b>RX 102 Black</b>	1068,36	19,34	15,85	0,53	17,41	0,97
<b>RX 102 + XL 400</b>	443,32	38,40	22,39	2,71	15,01	2,05
<b>Revolve XL 400</b>	476,88	39,10	19,40	1,41	12,35	1,85

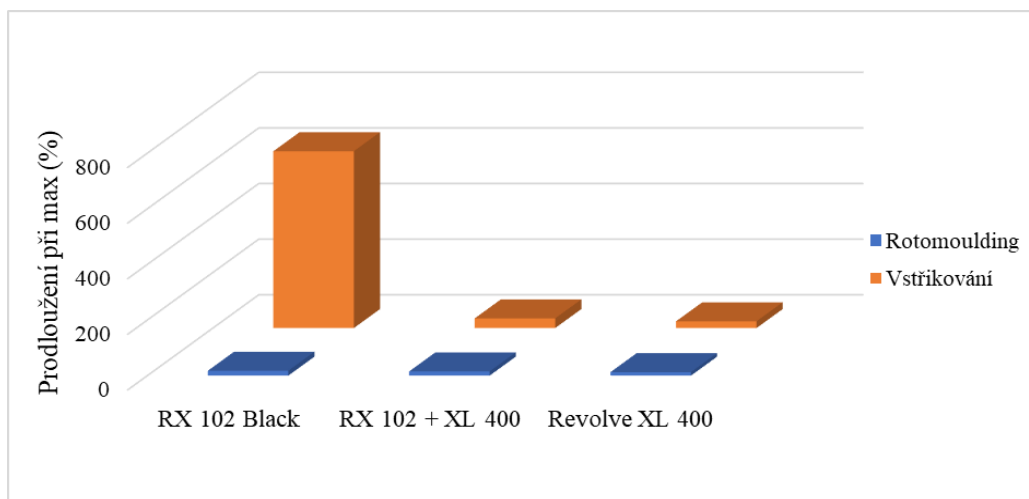
Tab. 4 Hodnoty zkoušky v tahu (vstřikování)

vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	prodloužení při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	687,80	15,60	17,05	0,40	635,82	7,73
<b>RX 102 + XL 400</b>	837,00	1,80	20,73	0,33	34,71	3,11
<b>Revolve XL 400</b>	868,12	11,80	21,54	0,35	24,10	1,59



Graf. 1 Porovnání meze pevnosti v tahu





Graf. 2 Porovnání tažnosti

Graf 1 ukazuje vliv síťovaného polyethylenu na zvýšení meze pevnosti především u vstřikovaných tělísek. U tělísek připravených rotačním tvarováním vykazuje nejvyšší mez pevnosti polyethylen RX 102 Black, což mohlo být způsobeno použitím mnohem tlustších vzorků, okolo 5 mm oproti 3 mm u ostatních tělísek. Z grafu 2 je patrný silný vliv použité zpracovatelské technologie na prodloužení při namáhání v tahu. Největší rozdíl je v tažnosti u polyethylenu RX 102, kdy tažnost vstřikovaných vzorků je téměř 37x větší než vzorků připravených rotačním tvarováním. Dále lze z grafu vyčíst pokles tažnosti nezávisle na použité technologii u tělísek připravených ze zesíťovaného polyethylenu i směsi síťovaného polyethylenu s polyethylenem RX 102 Black.

### 3.1.2 Zkouška v ohybu

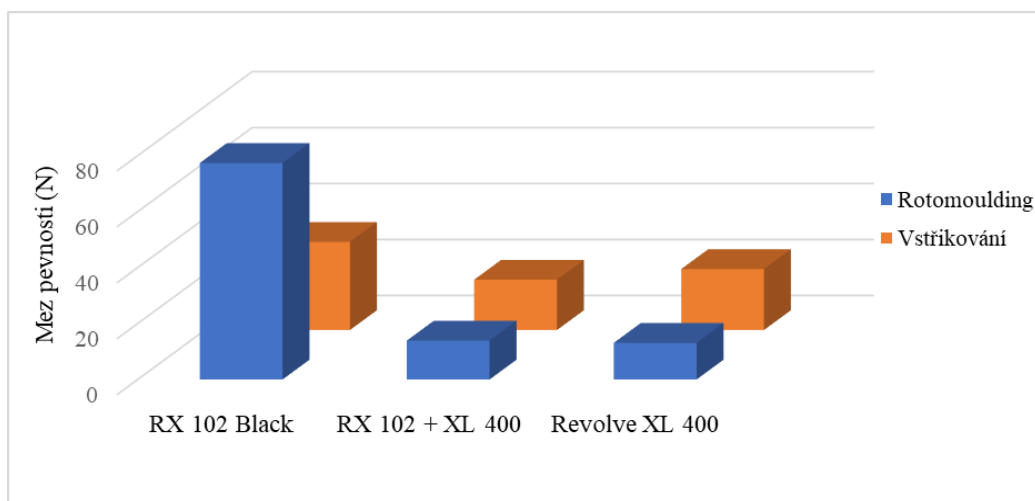
Tato zkouška byla provedena pro vzorky polyethylenu RX 102, Revolve XL 400 a jejich směsi zpracované rotomouldingem i vstřikováním. U tělísek byl sledován vliv síťování a použité zpracovatelské technologie. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v tab. 5 a 6, ze kterých jsou vytvořeny příslušné grafy 3 a 4.

Tab. 5 Hodnoty zkoušky v ohybu (rotomoulding)

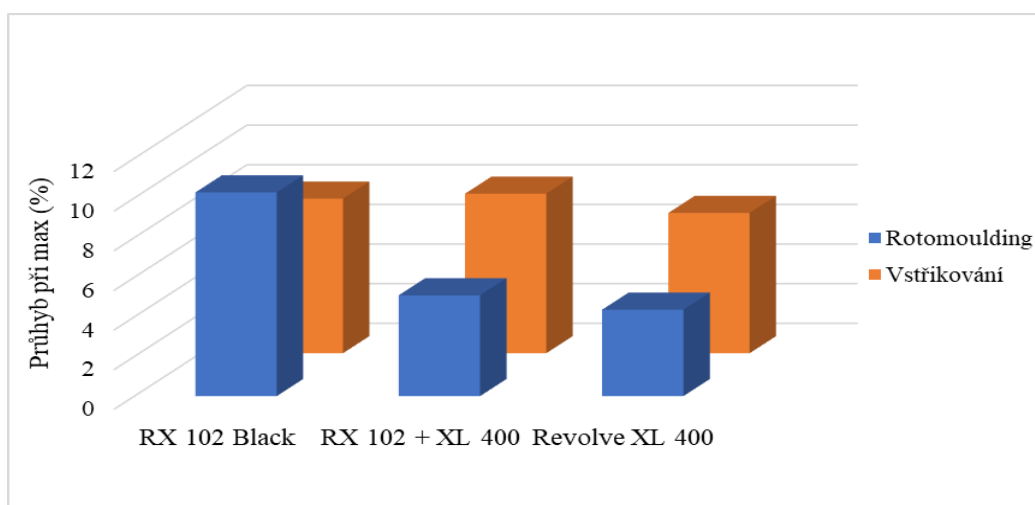
vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	průhyb při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	77,40	8,30	23,00	2,37	10,28	0,07
<b>RX 102 + XL 400</b>	13,90	2,10	13,93	1,19	5,09	0,21
<b>Revolve XL 400</b>	13,10	1,85	18,41	1,50	4,36	0,51

Tab. 6 Hodnoty zkoušky v ohybu (vstřikování)

vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	průhyb při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	31,50	1,20	18,79	0,82	7,80	0,13
<b>RX 102 + XL 400</b>	18,00	1,20	10,57	0,75	8,05	0,17
<b>Revolve XL 400</b>	21,00	1,60	12,77	1,00	7,08	0,58



Graf. 3 Srovnání meze pevnosti v ohybu



Graf. 4 Porovnání průhybu

Z grafu 3 není patrný velký vliv ani síťování ani použité zpracovatelské technologie na mez pevnosti v ohybu. Velký rozdíl oproti ostatním vzorkům vykazuje stejně jako u meze pevnosti v tahu vzorek RX 102. Tuto odchylku lze s největší pravděpodobností vysvětlit vyšší tloušťkou testovaných tělísek. Z grafu 4 je zřejmý větší procentuální průhyb pro tělíska zpracovaná vstřikovací technologií. Prokazatelný vliv síťování na procentuální průhyb vzorků nebyl z naměřených hodnot patrný. Opět lze předpokládat drobné zkreslení naměřených hodnot u vzorku RX 102 z důvodu větší tloušťky vzorku.

### 3.1.3 Rázová houževnatost

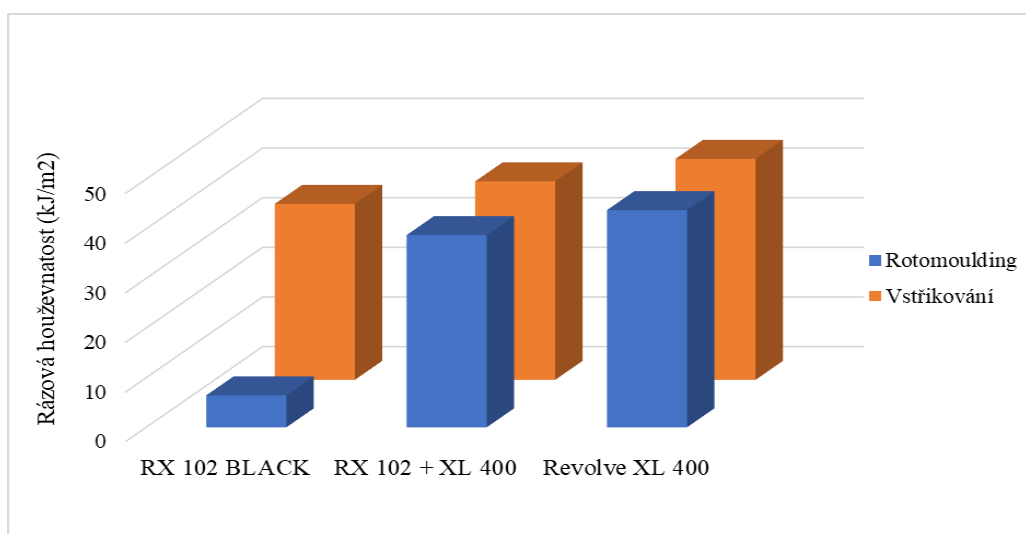
Rázová houževnatost byla změřena pro vzorky z polyethylenu RX 102, Revolve XL 400 a jejich směsi (3x rotomoulding, 3x vstřikování). Tělíska byla v obou případech příliš houževnatá a nedošlo k jejich porušení při nárazu kladiva, proto bylo nutné vytvořit vruby o velikosti 2 mm. Na takto upravených tělískách bylo provedeno měření. Výsledky měření jsou zaznamenány v tab. 7 a 8. z nich byl vytvořen graf 5.

Tab. 7 Rázová houževnatost (rotomoulding)

vzorek	rázová houževnatost (kJ/m <sup>2</sup> )	±
<b>RX 102 BLACK</b>	6,444	0,44
<b>RX 102 + XL 400</b>	38,722	1,54
<b>Revolve XL 400</b>	43,750	1,88

Tab. 8 Rázová houževnatost (vstřikování)

vzorek	rázová houževnatost (kJ/m <sup>2</sup> )	±
<b>RX 102 BLACK</b>	35,451	2,15
<b>RX 102 + XL 400</b>	39,980	3,12
<b>Revolve XL 400</b>	44,512	3,55



Graf. 5 Porovnání rázové houževnatosti

Nejnižší hodnota rázové houževnatosti byla naměřena u vzorku RX 102, oproti ostatním byla hodnota více než 5x nižší. Ze zkušenosti získané při měření rázové houževnatosti v rámci bakalářské práce vzorkům lze přisoudit rozdíl u vzorků RX 102 zpracovatelské technologii. Vstřikovací tělíska vykazují mnohem vyšší rázovou houževnatost oproti tělískům připravených rotačním tvarováním. Dále lze z grafu vyčíst zvýšení rázové houževnatosti vlivem zesílení polyethylenu.

### 3.1.4 Tvrdost

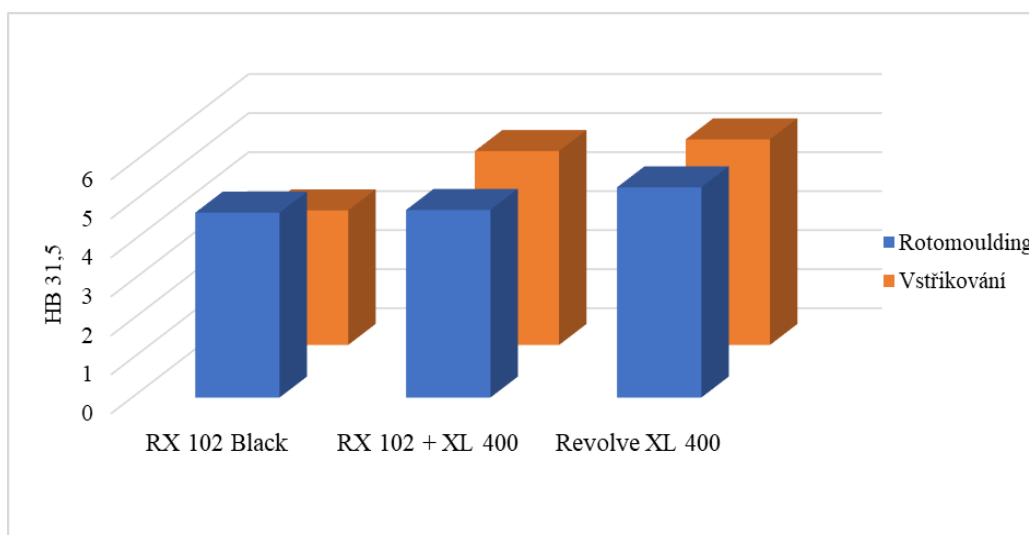
U vzorků byly měřena tvrdost dle Brinella a Vickerse. Výsledky měření tvrdosti jsou zaznamenány v tab. 9 a 10. Obdobnou závislost vykazovala tvrdost dle Brinella a Vickerse, proto byl vytvořen pouze graf pro tvrdost dle Brinella (graf 6).

Tab. 9 Tvrdost dle Brinella a Vickerse (rotomoulding)

vzorek	Brinell	±	Vickers	±
<b>RX 102 BLACK</b>	4,74	0,05	4,12	0,03
<b>RX 102 + XL 400</b>	4,81	0,06	4,40	0,12
<b>Revolve XL 400</b>	5,39	0,12	4,89	0,14

Tab. 10 Tvrdost dle Brinella a Vickerse (vstřikování)

vzorek	Brinell	±	Vickers	±
<b>RX 102 BLACK</b>	3,45	0,17	3,79	0,02
<b>RX 102 + XL 400</b>	4,97	0,27	4,70	0,32
<b>Revolve XL 400</b>	5,27	0,09	5,61	0,11



Graf. 6 Srovnání tvrdosti dle Brinella

Z naměřených hodnot vyplývá, že síťování zvyšuje tvrdost polyethylenu, což dokazují nejen tvrdosti dle Brinella, ale i tvrdosti dle Vickerse. V případě vzorků rotačního tvarování nebyla změna příliš velká. Daleko vyšší nárůst tvrdosti byl naměřen u vzorků zpracovaných vstřikovací technologií, kdy se zvýšil z hodnot 3,5 až na 5,3. Vliv použité zpracovatelské technologie na tvrdost byl patrný především u vzorků RX 102.

### 3.2 Chemická odolnost

Tato část experimentu byla věnována studiu vlivu chemických médií na jednotlivé typy polyethylenu (RX 102 Black, Revolve XL 400 a jejich směsi v poměru 33,5:66,5). Použitými médii byly benzin, nafta, brzdová a chladicí kapalina. Kromě vlivu síťování, byly sledovány

i rozdíly chemické odolnosti mezi tělísky připravených rotačním tvarováním a vstřikováním. Sledované období, během kterého docházelo ke změnám, bylo 6 měsíců (viz. tab. 2). Po celou dobu byly sledovány změny hmotnosti a tvrdosti tělísek, navíc na konci sledovaného období byla provedeny zkoušky v ohybu.

### 3.2.1 Měření hmotnosti

Měření hmotnosti bylo prováděno dle časového rozpisu v dané dny. Naměřené hodnoty hmotnosti a vypočítané procentuální změny byly zpracovány do tab. 11–18. Z nich byly vytvořeny grafy 7 až 16. První část grafů 7–12 je věnována rozdílům mezi jednotlivými chemickými médii v rámci jednoho typu polyethylenu. V grafech 13–16 je sledován rozdíl bobtnání polyethylenů v jednom médiu způsobený síťováním a rozdílnou zpracovatelskou technologií.

Tab. 11 Změna hmotnosti polyethylenových tělísek v benzínu

Den	Rotomoulding				Vstřikování		
	RX 102 (g)	SMĚS (g)	XL 400 (g)		RX 102 (g)	SMĚS (g)	XL 400 (g)
0	21,5681	11,4459	10,7999		14,7154	14,8611	15,0133
1	21,9045	11,7740	11,0984		15,2100	15,1634	15,2385
3	22,0891	12,0236	11,3068		15,4877	15,3853	15,3981
7	22,4355	12,2389	11,4702		15,8667	15,7611	15,7180
14	22,9040	12,2600	11,4751		15,9600	15,8745	15,9648
29	23,2301	12,2740	11,4761		15,9623	15,8748	15,9678
59	23,4131	12,2807	11,4765		15,9622	15,8849	15,9733
81	23,4257	12,2345	11,4773		15,9611	15,8852	15,9742
127	23,4511	12,2895	11,4861		15,9855	15,8849	15,9875
155	23,4514	12,2930	11,5143		15,9975	15,9085	15,9987
179	23,4585	12,2815	11,5168		15,9983	15,9344	16,0143

Tab. 12 Procentuální změny hmotnosti polyetylenových tělísek v benzínu

Den	Rotomoulding				Vstřikování		
	RX 102 (%)	SMĚS (%)	XL 400 (%)		RX 102 (%)	SMĚS (%)	XL 400 (%)
1	1,56	2,87	2,76		3,36	2,03	1,50
3	2,42	5,05	4,69		5,25	3,53	2,56
7	4,02	6,93	6,21		7,82	6,06	4,69
14	6,19	7,11	6,25		8,46	6,82	6,34
29	7,71	7,21	6,26		8,47	6,82	6,36
59	8,55	7,29	6,26		8,47	6,89	6,39
81	8,61	7,30	6,27		8,47	6,89	6,40
127	8,73	7,31	6,35		8,63	6,89	6,49
155	8,73	7,31	6,61		8,71	7,05	6,56
179	8,76	7,31	6,64		8,72	7,22	6,67

Tab. 13 Změna hmotnosti polyetylenových tělísek v naftě

Den	Rotomoulding				Vstřikování		
	RX 102 (g)	SMĚS (g)	XL 400 (g)		RX 102 (g)	SMĚS (g)	XL 400 (g)
0	22,4634	11,4908	9,7951		14,6973	14,7079	15,2100
1	22,5547	11,5739	9,8624		14,8412	14,7855	15,2951
3	22,6116	11,6553	9,9213		14,8938	14,8285	15,3294
7	22,7248	11,6559	9,9607		15,0000	14,8979	15,3819
14	22,7462	11,7627	10,0138		15,0909	15,0119	15,4525
29	22,8794	11,9088	10,1474		15,3281	15,0942	15,5056
59	23,0245	12,0975	10,2224		15,4365	15,2977	15,6730
81	23,0514	12,1507	10,2931		15,5164	15,3101	15,7440
127	23,2365	12,1951	10,3552		15,6005	15,4902	15,8525
155	23,3451	12,1968	10,4001		15,7301	15,5021	15,9141
179	23,3572	12,2107	10,4011		15,7397	15,5821	15,9886

Tab. 14 Procentuální změny hmotnosti polyetylenových tělísek v naftě

Den	Rotomoulding				Vstřikování		
	RX 102 (%)	SMĚS (%)	XL 400 (%)		RX 102 (%)	SMĚS (%)	XL 400 (%)
1	0,41	0,72	0,69		0,98	0,53	0,56
3	0,66	1,43	1,29		1,34	0,82	0,79
7	1,16	1,44	1,69		2,06	1,29	1,13
14	1,26	2,37	2,23		2,68	2,07	1,59
29	1,85	3,64	3,60		4,29	2,63	1,94
59	2,50	5,28	4,36		5,03	4,01	3,04
81	2,62	5,74	5,08		5,57	4,09	3,51
127	3,44	6,13	5,72		6,15	5,32	4,22
155	3,93	6,14	6,18		7,03	5,40	4,63
179	3,98	6,27	6,19		7,09	5,94	5,12

Tab. 15 Změna hmotnosti polyetylenových tělísek v brzdové kapalině

Den	Rotomoulding				Vstřikování		
	RX 102 (g)	SMĚS (g)	XL 400 (g)		RX 102 (g)	SMĚS (g)	XL 400 (g)
0	21,7630	11,1539	10,3403		14,6098	14,7855	15,1480
1	21,8329	11,1617	10,3429		14,6355	14,8056	15,1941
3	21,8327	11,1655	10,3455		14,6409	14,8143	15,2011
7	21,8326	11,1729	10,3512		14,6582	14,8177	15,2060
14	21,8333	11,1723	10,3549		14,6760	14,8241	15,2069
29	21,8329	11,1799	10,3625		14,6799	14,8258	15,2122
59	21,8344	11,1855	10,3655		14,6845	14,8258	15,2159
81	21,8641	11,1914	10,3684		14,7085	14,8268	15,2193
127	21,8741	11,2015	10,3699		14,7099	14,8278	15,2251
155	21,8801	11,2111	10,3711		14,7105	14,8289	15,2248
179	21,8963	11,2155	10,3721		14,7143	14,8329	15,2279

Tab. 16 Procentuální změny hmotnosti polyethylenových tělísek v brzdové kapalině

Den	Rotomoulding				Vstřikování		
	RX 102 (%)	SMĚS (%)	XL 400 (%)		RX 102 (%)	SMĚS (%)	XL 400 (%)
1	0,32	0,07	0,03		0,18	0,14	0,30
3	0,32	0,10	0,05		0,21	0,19	0,35
7	0,32	0,17	0,11		0,33	0,22	0,38
14	0,32	0,17	0,14		0,45	0,26	0,39
29	0,32	0,23	0,21		0,48	0,27	0,42
59	0,33	0,28	0,24		0,51	0,27	0,45
81	0,46	0,34	0,27		0,68	0,28	0,47
127	0,51	0,43	0,29		0,69	0,29	0,51
155	0,54	0,51	0,30		0,69	0,29	0,51
179	0,61	0,55	0,31		0,72	0,32	0,53

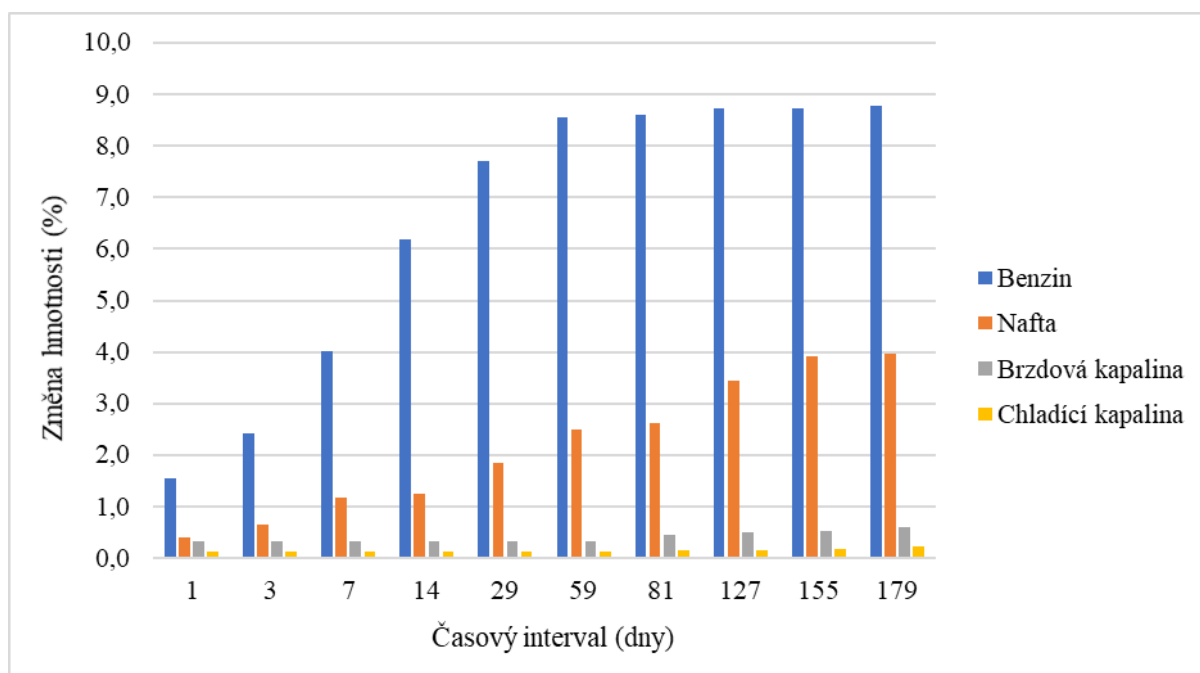
Tab. 17 Změna hmotnosti polyethylenových tělísek v chladicí kapalině

Den	Rotomoulding				Vstřikování		
	RX 102 (g)	SMĚS (g)	XL 400 (g)		RX 102 (g)	SMĚS (g)	XL 400 (g)
0	24,5376	11,8377	11,6504		14,6553	14,7190	14,9467
1	24,5701	11,8401	11,6544		14,6635	14,7199	14,9534
3	24,5708	11,8425	11,6595		14,6640	14,7236	14,9544
7	24,5709	11,8497	11,6685		14,6639	14,7256	14,9576
14	24,5709	11,8501	11,6707		14,6642	14,7285	14,9602
29	24,5711	11,8512	11,6765		14,6648	14,7299	14,9651
59	24,5721	11,8555	11,6772		14,6649	14,7312	14,9688
81	24,5741	11,8595	11,6798		14,6659	14,7316	14,9691
127	24,5754	11,8602	11,6825		14,6675	14,7325	14,9697
155	24,5788	11,8645	11,6913		14,6678	14,7341	14,9700
179	24,5930	11,8688	11,6938		14,6679	14,7347	14,9704



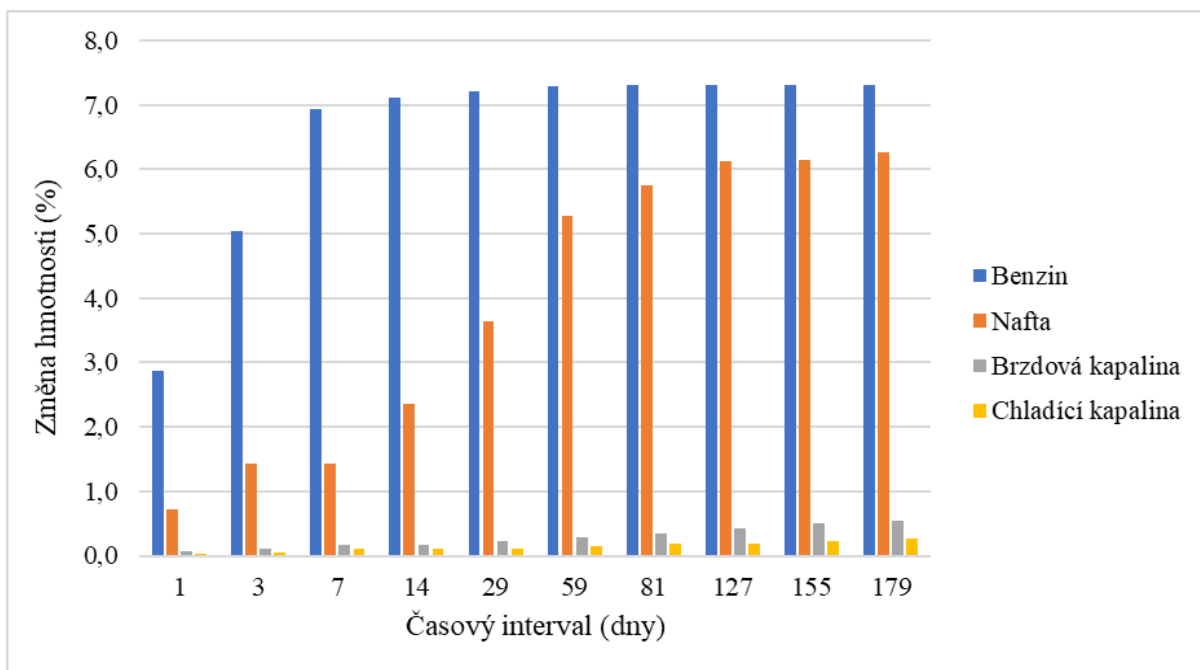
Tab. 18 Procentuální změny hmotnosti polyetylenových tělísek v chladící kapalině

Den	Rotomoulding				Vstřikování		
	RX 102 (%)	SMĚS (%)	XL 400 (%)		RX 102 (%)	SMĚS (%)	XL 400 (%)
1	0,13	0,02	0,03		0,06	0,01	0,04
3	0,14	0,04	0,08		0,06	0,03	0,05
7	0,14	0,10	0,16		0,06	0,04	0,07
14	0,14	0,10	0,17		0,06	0,06	0,09
29	0,14	0,11	0,22		0,06	0,07	0,12
59	0,14	0,15	0,23		0,07	0,08	0,15
81	0,15	0,18	0,25		0,07	0,09	0,15
127	0,15	0,19	0,28		0,08	0,09	0,15
155	0,17	0,23	0,35		0,09	0,10	0,16
179	0,23	0,26	0,37		0,09	0,11	0,16



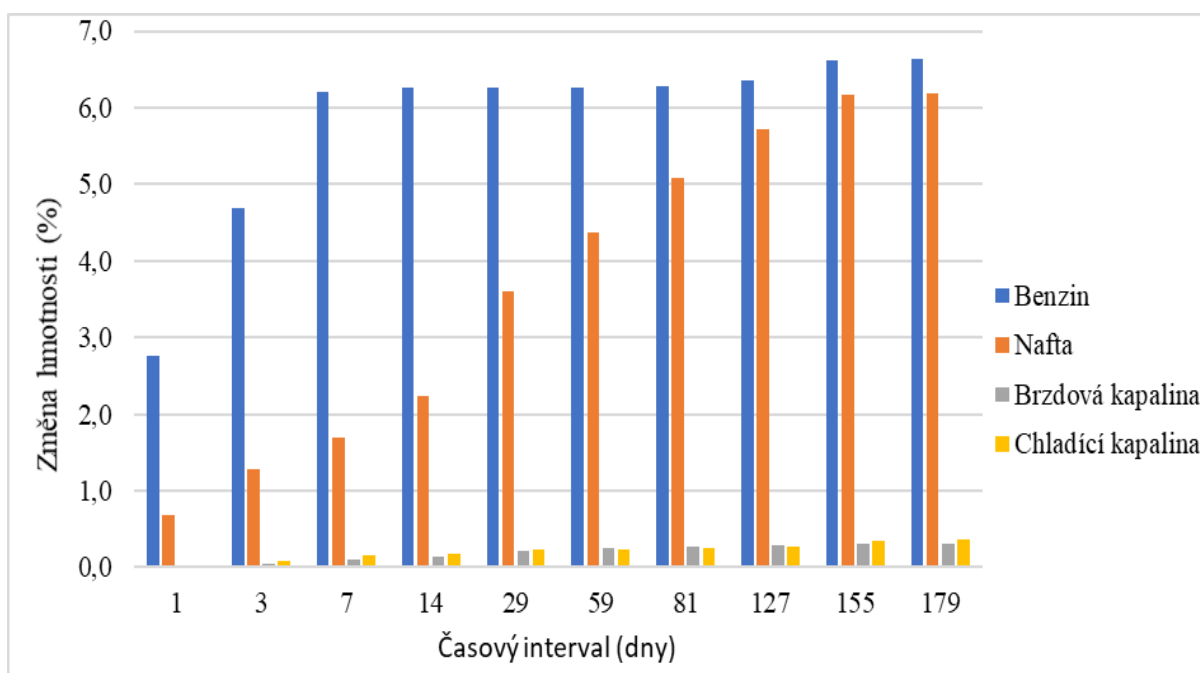
Graf. 7 Změny hmotnosti RX 102 (rotomoulding)

Z grafu je patrné, že největší změna hmotnosti byla u tělísek v benzínu. U těchto vzorků byl největší růst hmotnosti zaznamenán během prvních dvou měsíců. Další 3 měsíce už nebyla změna hmotnosti příliš výrazná. Hmotnost vzorků se v naftě zvýšila za půl roku o 4 %, oproti benzínu byl nárůst hmotnosti pozvolnější. V případě vzorků v brzdové kapalině nepřesáhla změna hmotnosti 0,7 %. Dle očekávání v chladící kapalině byla bobtnavost ze všech médií nejnižší, po půl roce nedosahovala ani 0,5 procenta.



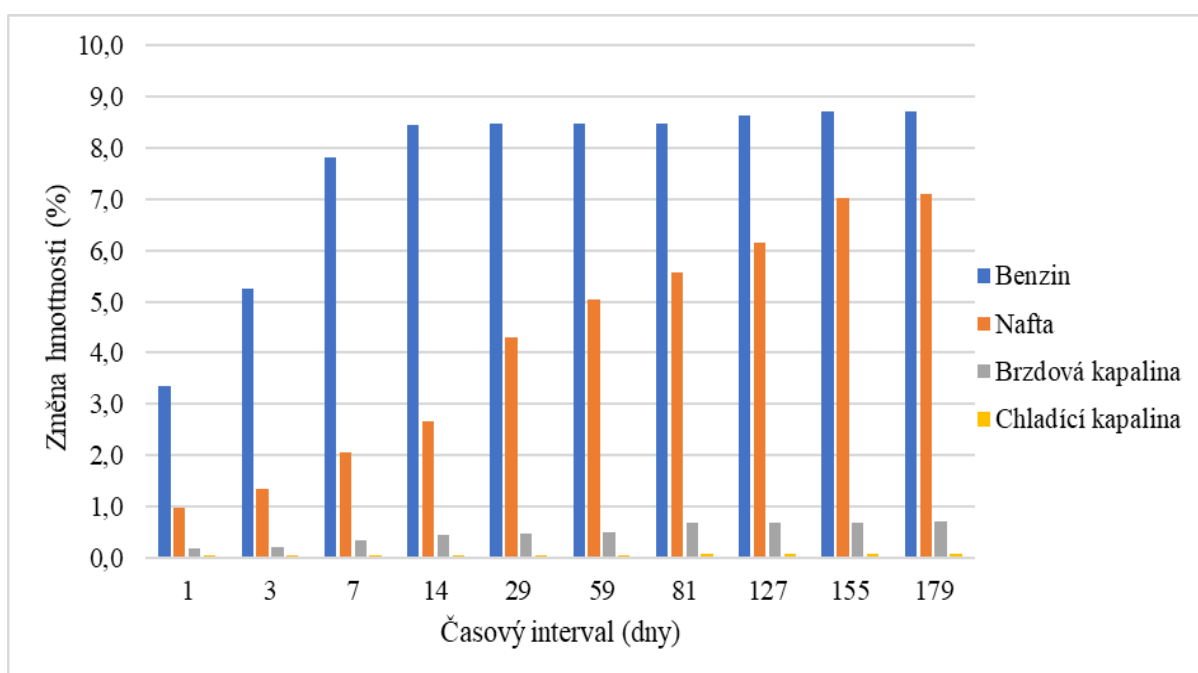
Graf. 8 Změny hmotnosti směsi (rotomoulding)

Největší nárůst hmotnosti byl u vzorků v benzínu během prvních 14 dnů, další změny už nebyly tolik výrazné. U tělísek v naftě rostla hmotnost oproti benzínu pozvolněji, největší nárůst byl v období mezi 14. a 59. dnem. V porovnání byl nárůst hmotnosti u vzorků v benzínu po půl roce o procento vyšší oproti naftě. Mnohem větší byl však rozdíl během prvního měsíce, kdy tělíska v benzínu bobtnala mnohem rychleji. Stejně jako u vzorků RX 102 byla velmi malá změna hmotnosti jak u tělísek v brzdové, tak u tělísek v chladící kapalině.



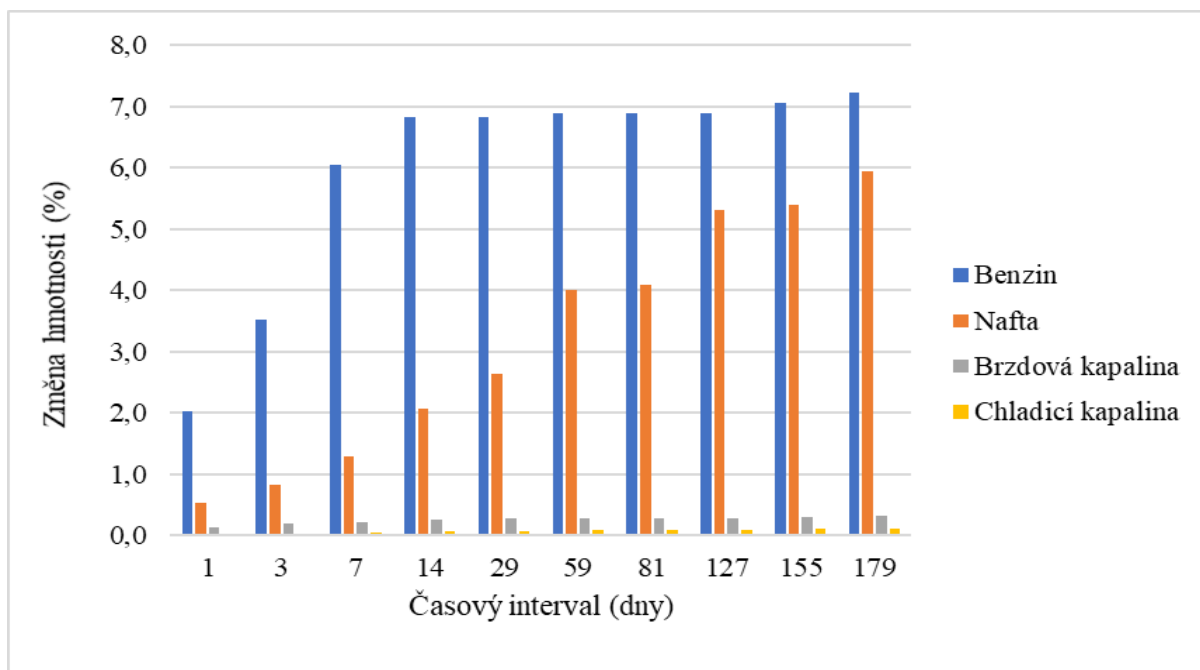
Graf. 9 Změny hmotnosti XL 400 (rotomoulding)

Hmotnost vzorků polyethylenu XL 400 v benzínu vzrostla nejvíce během prvního týdne. Během této doby dosáhla změna hmotnosti 6 %, dále už téměř nerostla. Růst hmotnosti tělísek v naftě vykazoval lineární průběh až do pátého měsíce, šestý měsíc už se hmotnost nezměnila. Po půl roce byl nárůst hmotnosti v benzínu a naftě srovnatelný. Avšak hmotnost tělísek v naftě rostla oproti benzínu mnohem pomaleji. Změny v brzdové a chladicí kapalině dosáhly po půl roce necelého půl procenta původní hmotnosti.



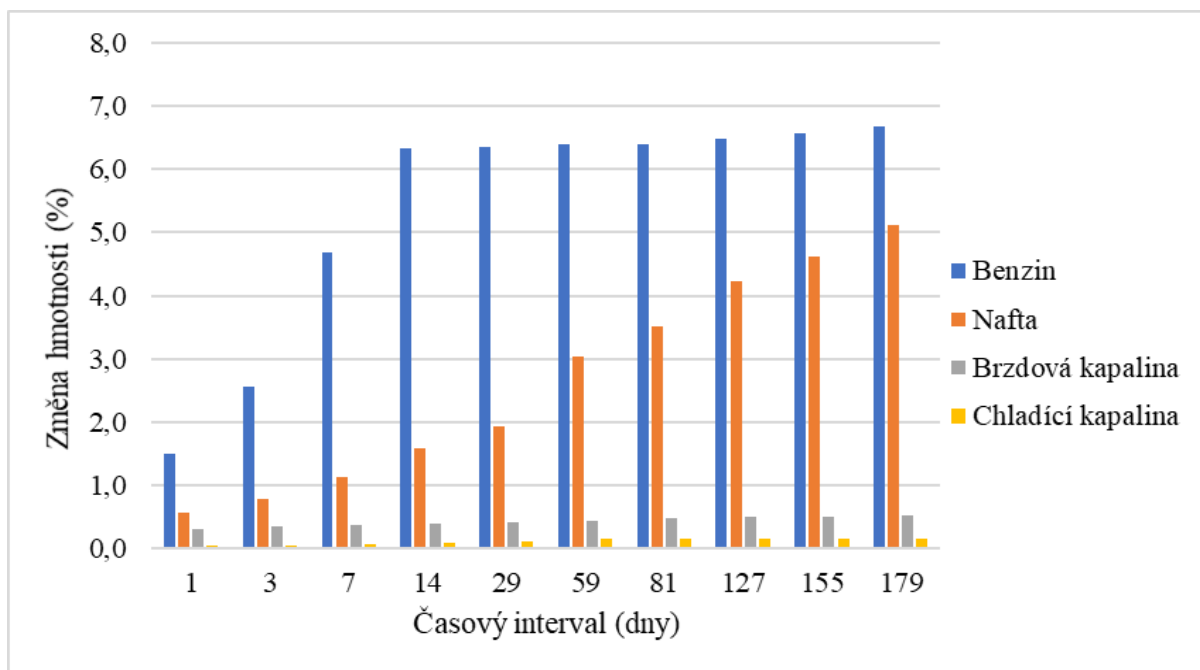
Graf. 10 Změny hmotnosti RX 102 (vstříkování)

Hmotnost vzorků v benzínu narostla nejvíce v prvním týdnu, kdy procentuální změna byla necelých 8 %. Během dalších 5 a půl měsíce byl nárůst mnohem nižší, po 6 měsících byl 8,7 %. Růst hmotnosti tělísek v naftě byl rovnoměrnější, kdy dosáhl po 6 měsících 7 %. Změna hmotnosti vzorků v brzdové kapalině probíhala postupně, po 6 měsících byla 0,7 %. Tělíska v chladicí kapalině po dobu půl roku nezměnila hmotnost.



Graf. 11 Změny hmotnosti směsi (vstřikování)

Hmotnost vzorků v benzínu narostla nejvíce během prvních 14 dnů. Za toto období vzrostla hmotnost o 7 %. Během dalších 5 a půl měsíce nedošlo ke skoro žádné změně, po 6 měsících byl 7,2 %. Narůst hmotnosti tělísek v naftě byl pozvolný. Po 6 měsících byla změna hmotnosti 5 %. Změny v brzdové a chladicí kapalině byly nízké, nepřesahovaly po půl roce 0,3 %.

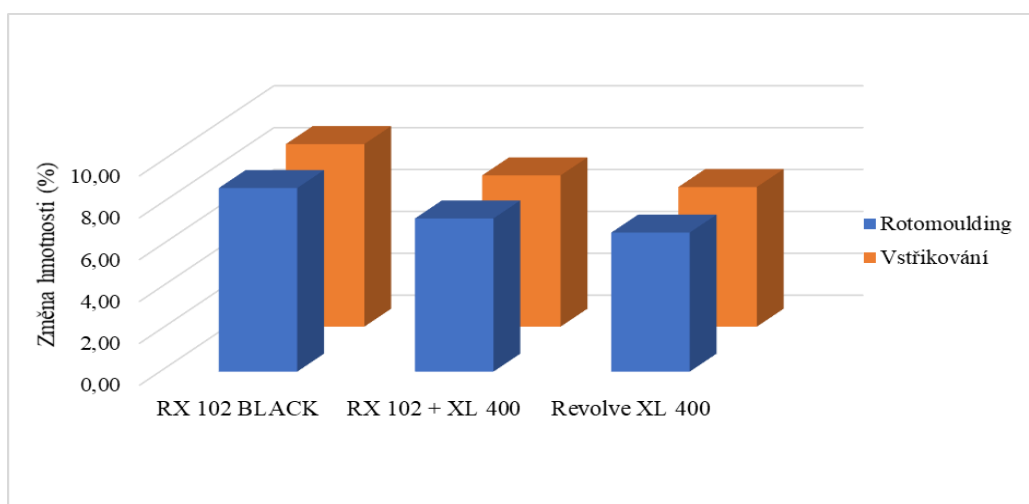


Graf. 12 Změny hmotnosti XL 400 (vstřikování)

Vzorky v benzínu změnily během prvních dvou týdnů hmotnost o 6 %, dále už příliš nerostly. Hmotnost tělísek v naftě rostla pozvolna až do 6. měsíce, kdy změna dosáhla 5 % procent,

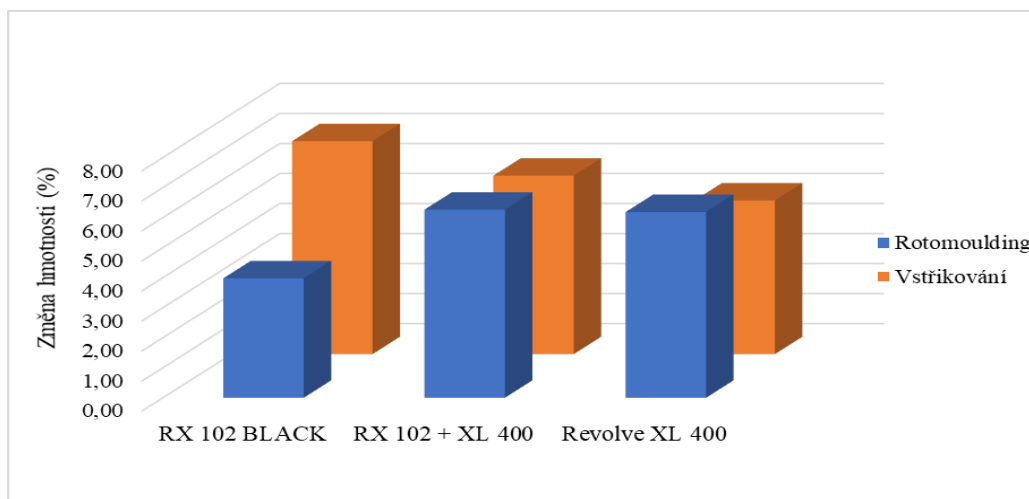
tedy o 1,5 % méně než v benzínu. U vzorků v brzdové a chladicí kapalině nebyla změna výrazná.

Z všech grafů porovnávající změny hmotnosti jednoho typu polyethylenu v různých mediích je patrné, že největší nárůst hmotnosti byl u nepolárních látek, tedy benzínu a nafty. Polyethylenová tělíska v benzínu bobtnala mnohem rychleji než ty v naftě. Největší nárůst byl během prvních 14 dnů. U vzorků v naftě byl nárůst hmotnosti pozvolnější, v mnoha případech vykazoval téměř lineární charakter. V benzínu se změna hmotnosti u vzorků pohybovala v rozmezí 6,6 až 8,8 %, v naftě v rozmezí 4 až 7,1 %. V brzdové kapalině nebyla změna hmotnosti tělísek příliš výrazná. U žádného vzorku v tomto médiu nepřesáhla jedno procento. U polyethylenových tělísek v chladicí kapalině za celé období vzrostla hmotnost maximálně o 0,5 procent.



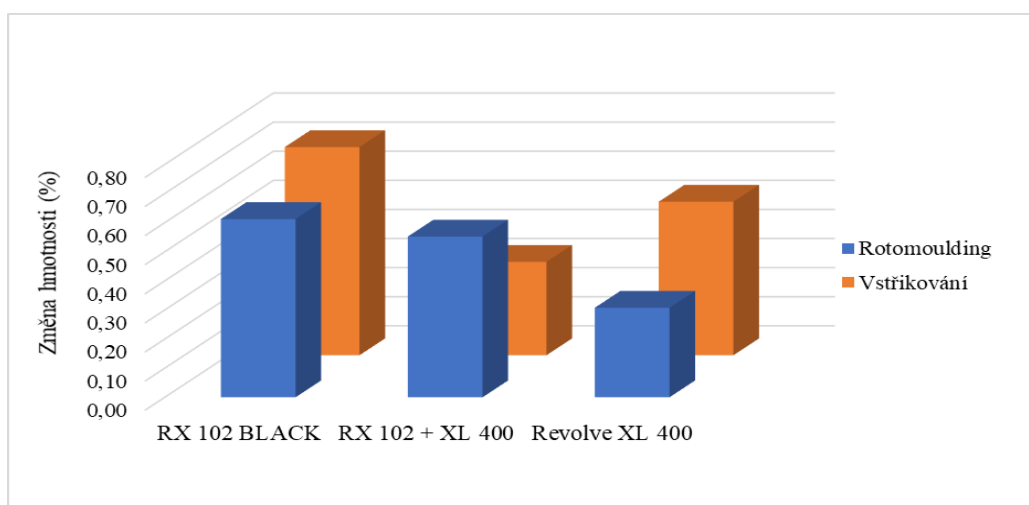
Graf. 13 Porovnání změny hmotnosti polyethylenů (benzin)

Graf 13 ukazuje vyšší bobtnavost u nezesíťovaného RX 102, kdy vzrostla hmotnost během půl roku o necelých 9 %. Tělíska připravená ze směsi RX 102 a Revolve XL 400 změnila hmotnost o 7,5 %, hmotnost vzorků z čistě zesíťovaného polyethylenu Revolve XL 400 vzrostla o 6,5 %. Síťování polyethylenu mírně snížilo bobtnavost tělísek v benzínu. Zároveň z grafu vyplývá, že vliv zpracovatelské technologie nemá na změnu hmotnosti žádný vliv.



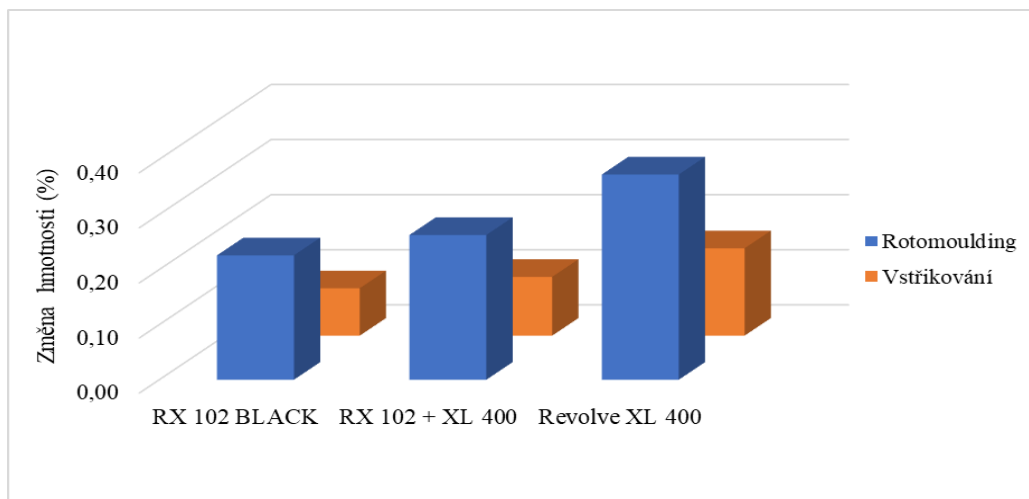
Graf. 14 Porovnání změny hmotnosti polyethylenů (nafta)

Změna hmotnosti u polyethylenových vzorků vykazovala obdobnou závislost jako u benzínu, hodnoty však byly o 1,5 % nižší než v případě benzínu. Odchytku představuje vzorek RX 102 připravený rotomouldingem, který má nejmenší změnu hmotnosti, necelá 4 %. Vzhledem k ostatním naměřeným závislostem nelze předpokládat, že nižší procentuální změna byla způsobena vlivem vzorku. Spíše lze předpokládat, že se jednalo o chybu měření. Vzorky RX 102 v naftě byly příliš blízko u sebe, čímž mohla být zmenšena difundující plocha.



Graf. 15 Porovnání změny hmotnosti polyethylenů (brzdová kapalina)

V brzdové kapalině nebyla u vzorků prokázána žádná závislost na použité zpracovatelské technologii ani na síťování. Ve všech případech nepřesáhl vzrůst hmotnosti 0,8 % původní hmotnosti. Nejnižší změna hmotnosti byla u zesíťovaného XL 400 připraveného rotačním tvarováním, nejvyšší hodnota byla naměřena u vstřikovaného vzorku RX 102.



Graf. 16 Porovnání změny hmotnosti polyethylenů (chladící kapalina)

Tělíska připravená rotomouldingem vykazovala lehce vyšší změnu hmotnosti oproti vzorkům připraveným vstřikováním. Nejvyšší hodnoty změny hmotnosti byly naměřeny u vzorků XL 400, nejnižší u vzorků RX 102. U žádného vzorku však nevzrostla hmotnost o více, jak 0,4 %.

### 3.2.2 Tvrdost

U vzorků byla v dané dny měřena hmotnost dle Brinella a Vickerse. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tab. 19–34. Z důvodu obdobné závislosti změny tvrdosti dle Brinella i Vickerse byly vytvořeny grafy (17–22) pouze pro změnu tvrdosti dle Brinella.

Tab. 19 Změna tvrdosti dle Brinella rotomuldingových vzorků (benzin)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
0	4,74	0,05	4,81	0,06	5,39	0,12
1	4,55	0,16	4,62	0,14	5,31	0,14
3	4,53	0,12	4,32	0,21	4,58	0,17
7	4,41	0,11	3,76	0,29	4,29	0,05
14	4,13	0,21	3,63	0,13	4,25	0,12
29	3,81	0,09	3,59	0,15	4,31	0,23
59	4,05	0,15	3,58	0,09	4,35	0,19
81	3,71	0,14	3,63	0,07	4,29	0,17
127	3,58	0,11	3,79	0,16	4,25	0,21
155	3,67	0,09	3,65	0,21	4,19	0,09
179	3,62	0,07	3,76	0,12	4,21	0,06

Tab. 20 Změna tvrdosti dle Brinella vstříkovaných vzorků (benzin)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
<b>0</b>	3,45	0,17	4,97	0,27	5,27	0,09
<b>1</b>	3,08	0,17	4,75	0,21	4,95	0,15
<b>3</b>	2,81	0,21	4,03	0,16	4,75	0,25
<b>7</b>	2,61	0,12	3,69	0,14	4,15	0,11
<b>14</b>	2,58	0,07	3,65	0,11	4,09	0,12
<b>29</b>	2,61	0,16	3,71	0,09	4,09	0,14
<b>59</b>	2,66	0,11	3,69	0,05	4,18	0,17
<b>81</b>	2,71	0,09	3,69	0,14	4,15	0,21
<b>127</b>	2,74	0,14	3,71	0,09	4,20	0,09
<b>155</b>	2,69	0,05	3,67	0,11	4,05	0,08
<b>179</b>	2,71	0,07	3,78	0,07	3,99	0,06

Tab. 21 Změna tvrdosti dle Vickerse rotomuldingových vzorků (benzin)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
<b>0</b>	4,12	0,03	4,40	0,12	4,89	0,14
<b>1</b>	4,14	0,12	4,43	0,11	4,48	0,09
<b>3</b>	4,12	0,09	4,22	0,16	4,25	0,06
<b>7</b>	4,05	0,21	3,88	0,20	4,15	0,17
<b>14</b>	4,01	0,16	3,81	0,02	4,13	0,06
<b>29</b>	4,04	0,11	3,85	0,16	4,09	0,17
<b>59</b>	3,97	0,06	3,71	0,18	4,17	0,11
<b>81</b>	3,98	0,12	3,65	0,07	4,00	0,13
<b>127</b>	3,97	0,10	3,60	0,05	4,05	0,09
<b>155</b>	3,67	0,16	3,58	0,19	4,13	0,10
<b>179</b>	3,63	0,07	3,51	0,14	4,18	0,05



Tab. 22 Změna tvrdosti dle Vickerse vstříkovaných vzorků (benzin)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
0	3,79	0,02	4,70	0,32	5,21	0,11
1	3,78	0,12	4,37	0,24	4,64	0,25
3	3,63	0,21	3,99	0,16	4,54	0,14
7	3,51	0,18	4,04	0,19	4,53	0,05
14	3,65	0,12	4,06	0,09	4,41	0,12
29	3,76	0,09	3,90	0,06	4,26	0,18
59	3,81	0,07	4,10	0,11	4,12	0,16
81	3,66	0,15	4,06	0,12	4,33	0,22
127	3,72	0,14	4,01	0,07	4,28	0,19
155	3,69	0,08	3,91	0,03	4,13	0,17
179	3,62	0,05	3,83	0,08	4,10	0,08

Tab. 23 Změna tvrdosti dle Brinella rotomouldingových vzorků (nafta)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
0	4,74	0,05	4,81	0,06	5,39	0,12
1	4,76	0,11	4,84	0,10	5,45	0,14
3	4,74	0,15	4,66	0,19	5,44	0,12
7	4,72	0,21	4,57	0,01	5,40	0,11
14	4,69	0,12	4,61	0,07	5,32	0,14
29	4,53	0,08	4,56	0,10	5,10	0,05
59	4,49	0,11	4,28	0,12	4,84	0,18
81	4,33	0,17	4,30	0,14	4,66	0,14
127	4,27	0,21	4,27	0,19	4,57	0,13
155	4,05	0,24	4,32	0,07	4,38	0,11
179	3,64	0,03	4,19	0,06	4,15	0,21

Tab. 24 Změna tvrdosti dle Brinella vstříkovaných vzorků (nafta)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
0	3,45	0,17	4,97	0,27	5,27	0,09
1	3,39	0,16	4,83	0,12	4,98	0,21
3	3,31	0,12	4,49	0,18	5,09	0,08
7	3,21	0,11	4,24	0,19	4,90	0,14
14	3,17	0,23	4,29	0,02	4,82	0,08
29	3,21	0,12	4,23	0,09	4,66	0,11
59	3,12	0,11	3,94	0,07	4,55	0,23
81	2,97	0,09	3,85	0,15	4,51	0,19
127	3,01	0,13	3,89	0,14	4,38	0,14
155	3,07	0,10	3,95	0,09	4,28	0,18
179	3,04	0,13	3,84	0,14	3,99	0,18

Tab. 25 Změna tvrdosti dle Vickerse rotomuldingových vzorků (nafta)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
0	4,12	0,03	4,40	0,12	4,89	0,14
1	4,38	0,14	4,35	0,11	4,89	0,11
3	4,44	0,19	4,17	0,15	4,76	0,12
7	4,22	0,05	4,02	0,21	4,81	0,15
14	4,16	0,09	4,11	0,08	4,65	0,16
29	4,21	0,11	3,91	0,22	4,41	0,09
59	4,07	0,12	3,89	0,15	4,53	0,21
81	4,08	0,07	4,01	0,09	4,29	0,19
127	4,21	0,15	4,15	0,17	4,31	0,09
155	4,07	0,09	4,17	0,09	4,33	0,11
179	4,05	0,07	4,04	0,07	3,94	0,05

Tab. 26 Změna tvrdosti dle Vickerse vstřikovaných vzorků (nafta)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
0	3,79	0,02	4,70	0,32	5,21	0,11
1	3,85	0,05	4,67	0,15	4,93	0,12
3	3,81	0,07	4,61	0,12	5,16	0,17
7	3,79	0,10	4,67	0,10	5,21	0,14
14	3,76	0,16	4,56	0,14	5,14	0,09
29	3,74	0,10	4,58	0,09	4,98	0,11
59	3,59	0,07	4,57	0,07	4,87	0,09
81	3,61	0,14	4,50	0,09	4,83	0,18
127	3,44	0,18	4,45	0,13	4,85	0,04
155	3,51	0,14	4,49	0,02	4,81	0,13
179	3,45	0,12	4,39	0,07	4,70	0,16

Tab. 27 Změna tvrdosti dle Brinella rotomouldingových vzorků (brzdová kapalina)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
0	4,74	0,05	4,81	0,06	5,39	0,12
1	4,76	0,11	4,84	0,10	5,45	0,14
3	4,74	0,15	4,66	0,19	5,44	0,12
7	4,72	0,21	4,57	0,01	5,40	0,11
14	4,69	0,12	4,61	0,07	5,32	0,14
29	4,53	0,08	4,56	0,10	5,10	0,05
59	4,49	0,11	4,28	0,12	4,84	0,18
81	4,33	0,17	4,30	0,14	4,66	0,14
127	4,27	0,21	4,27	0,19	4,57	0,13
155	4,05	0,24	4,32	0,07	4,38	0,11
179	3,64	0,03	4,19	0,06	4,15	0,21

Tab. 28 Změna tvrdosti dle Brinella vstřikovaných vzorků (brzdová kapalina)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
0	3,45	0,17	4,97	0,27	5,27	0,09
1	3,39	0,16	4,83	0,12	4,98	0,21
3	3,31	0,12	4,49	0,18	5,09	0,08
7	3,21	0,11	4,24	0,19	4,90	0,14
14	3,17	0,23	4,29	0,02	4,82	0,08
29	3,21	0,12	4,23	0,09	4,66	0,11
59	3,12	0,11	3,94	0,07	4,55	0,23
81	2,97	0,09	3,85	0,15	4,51	0,19
127	3,01	0,13	3,89	0,14	4,38	0,14
155	3,07	0,10	3,95	0,09	4,28	0,18
179	3,04	0,13	3,84	0,14	3,99	0,18

Tab. 29 Změna tvrdosti dle Vickerse rotomouldingových vzorků (brzdová kapalina)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
0	4,12	0,03	4,40	0,12	4,89	0,14
1	4,38	0,14	4,35	0,11	4,89	0,11
3	4,44	0,19	4,17	0,15	4,76	0,12
7	4,22	0,05	4,02	0,21	4,81	0,15
14	4,16	0,09	4,11	0,08	4,65	0,16
29	4,21	0,11	3,91	0,22	4,41	0,09
59	4,07	0,12	3,89	0,15	4,53	0,21
81	4,08	0,07	4,01	0,09	4,29	0,19
127	4,21	0,15	4,15	0,17	4,31	0,09
155	4,07	0,09	4,17	0,09	4,33	0,11
179	4,05	0,07	4,04	0,07	3,94	0,05

Tab. 30 Změna tvrdosti dle Vickerse vstřikovaných vzorků (brzdová kapalina)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
0	3,79	0,02	4,70	0,32	5,21	0,11
1	3,85	0,05	4,67	0,15	4,93	0,12
3	3,81	0,07	4,61	0,12	5,16	0,17
7	3,79	0,10	4,67	0,10	5,21	0,14
14	3,76	0,16	4,56	0,14	5,14	0,09
29	3,74	0,10	4,58	0,09	4,98	0,11
59	3,59	0,07	4,57	0,07	4,87	0,09
81	3,61	0,14	4,50	0,09	4,83	0,18
127	3,44	0,18	4,45	0,13	4,85	0,04
155	3,51	0,14	4,49	0,02	4,81	0,13
179	3,45	0,12	4,39	0,07	4,70	0,16

Tab. 31 Změna tvrdosti dle Brinella rotomouldingových vzorků (chladicí kapalina)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
0	4,74	0,05	4,81	0,06	5,39	0,12
1	4,66	0,11	4,93	0,11	5,44	0,14
3	4,69	0,14	4,69	0,14	5,39	0,11
7	4,84	0,13	4,64	0,17	5,57	0,21
14	4,57	0,09	4,92	0,12	5,47	0,07
29	4,63	0,12	4,85	0,06	5,46	0,11
59	4,69	0,19	4,84	0,12	5,42	0,14
81	4,52	0,12	4,78	0,19	5,44	0,16
127	4,69	0,15	4,69	0,09	5,41	0,06
155	4,65	0,11	4,68	0,16	5,48	0,05
179	4,81	0,14	4,64	0,08	5,45	0,09

Tab. 32 Změna tvrdosti dle Brinella vstříkovaných vzorků (chladící kapalina)

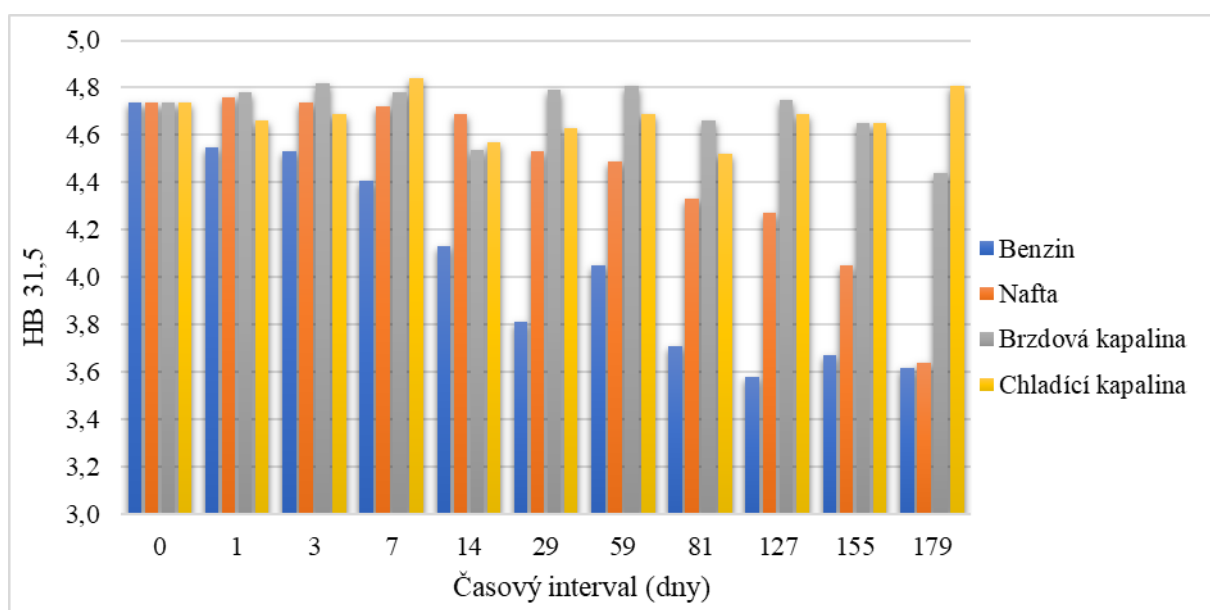
Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
<b>0</b>	3,45	0,17	4,97	0,27	5,27	0,09
<b>1</b>	3,30	0,21	4,83	0,12	5,35	0,16
<b>3</b>	3,47	0,15	4,86	0,15	5,39	0,12
<b>7</b>	3,26	0,16	4,85	0,17	5,21	0,14
<b>14</b>	3,31	0,11	4,91	0,09	5,26	0,13
<b>29</b>	3,33	0,09	4,83	0,16	5,41	0,11
<b>59</b>	3,24	0,14	4,87	0,15	5,36	0,16
<b>81</b>	3,35	0,11	4,77	0,21	5,36	0,19
<b>127</b>	3,42	0,05	4,75	0,18	5,39	0,15
<b>155</b>	3,49	0,06	4,85	0,09	5,45	0,11
<b>179</b>	3,58	0,17	4,99	0,05	5,54	0,12

Tab. 33 Změna tvrdosti dle Vickerse rotomouldingových vzorků (chladící kapalina)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
<b>0</b>	4,12	0,03	4,40	0,12	4,89	0,14
<b>1</b>	4,38	0,12	4,83	0,12	5,22	0,16
<b>3</b>	4,00	0,14	4,58	0,04	5,04	0,12
<b>7</b>	4,03	0,09	4,48	0,17	4,91	0,07
<b>14</b>	4,41	0,12	4,81	0,07	4,83	0,09
<b>29</b>	4,10	0,17	4,71	0,14	4,97	0,11
<b>59</b>	4,24	0,02	4,69	0,11	5,30	0,14
<b>81</b>	4,20	0,19	4,24	0,08	5,05	0,09
<b>127</b>	4,25	0,16	4,54	0,06	5,14	0,07
<b>155</b>	4,19	0,07	4,62	0,15	5,01	0,08
<b>179</b>	4,24	0,06	4,64	0,11	5,21	0,13

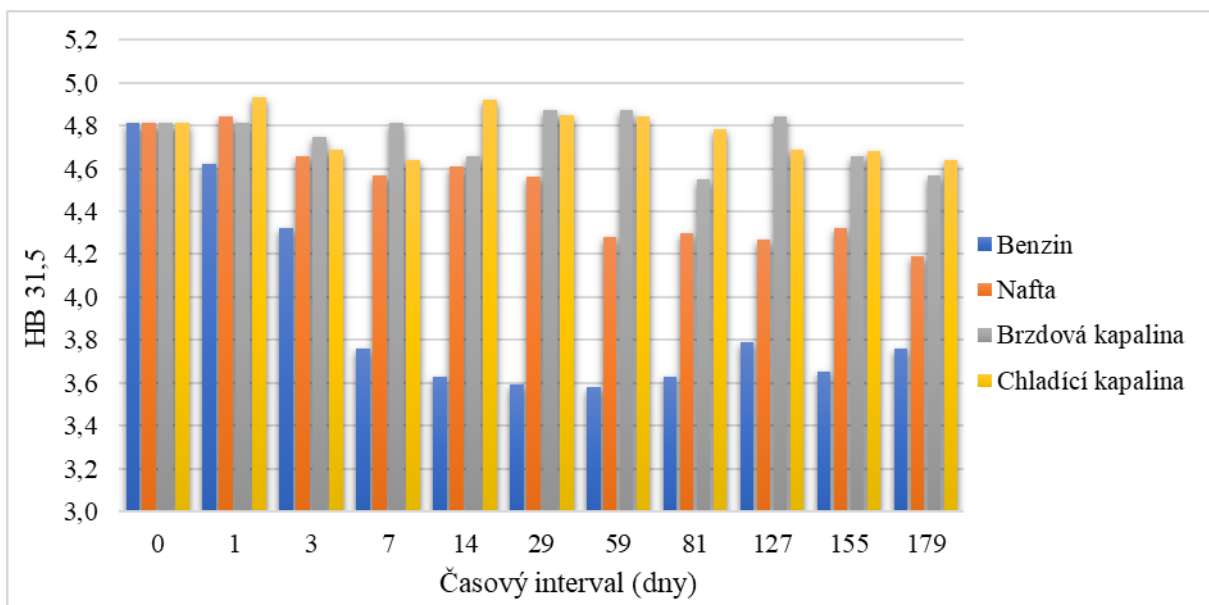
Tab. 34 Změna tvrdosti dle Vickerse vstřikovaných vzorků (chladicí kapalina)

Den	RX 102	±	SMĚS	±	XL 400	±
0	3,79	0,02	4,70	0,32	5,21	0,11
1	3,65	0,16	4,49	0,14	5,27	0,16
3	3,74	0,05	4,76	0,22	4,89	0,22
7	3,97	0,19	4,56	0,21	4,99	0,19
14	3,63	0,14	4,55	0,14	5,25	0,05
29	4,02	0,21	4,80	0,17	5,25	0,07
59	3,89	0,07	4,48	0,25	5,29	0,12
81	4,06	0,12	4,69	0,09	5,16	0,11
127	4,01	0,16	4,71	0,21	5,18	0,14
155	3,99	0,09	4,93	0,19	5,09	0,02
179	4,02	0,07	4,89	0,21	4,91	0,14



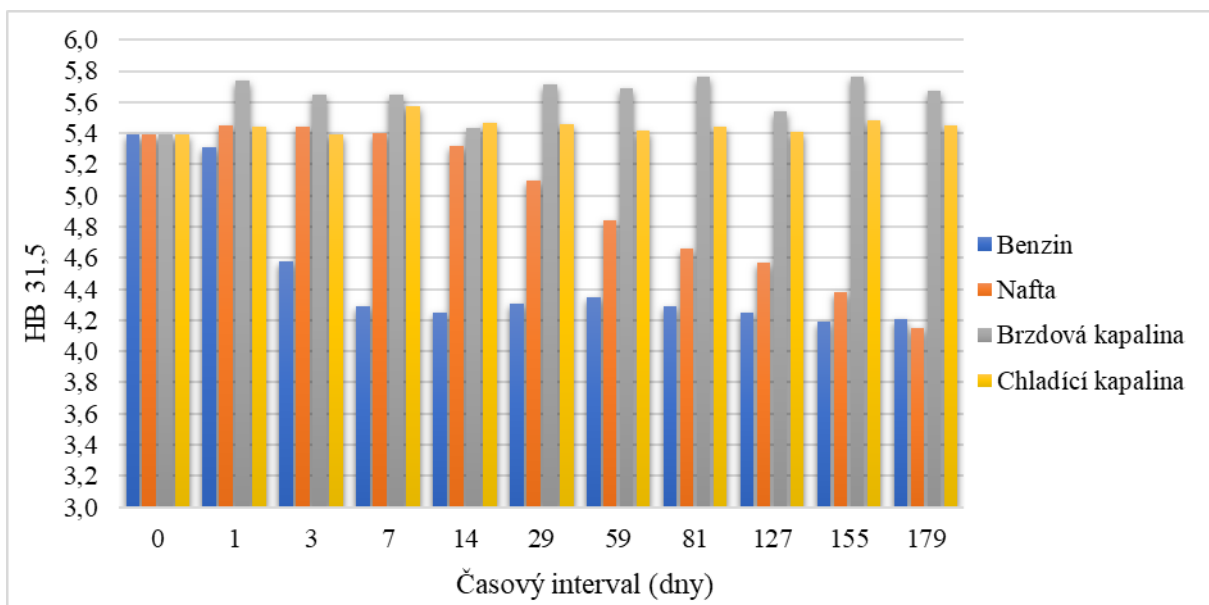
Graf. 17 Změny tvrdosti dle Brinella RX 102 (rotomoulding)

Z grafů je patrné, že největší pokles tvrdosti byl zaznamenán u tělísek v benzínu a naftě. Pokles tvrdosti u tělísek v benzínu byl rychlejší než v případě nafty. Drobné snížení tvrdosti bylo zaznamenáno u tělísek v brzdové kapalině, ale jednalo se o velmi malou změnu, u které nelze prokázat, zda byla způsobena chybou měření nebo vlivem chemického média. Pokles tvrdosti nebyl zaznamenán u tělísek v chladicí kapalině. Dokonce došlo k nepatrnému navýšení hodnot tvrdosti, což bylo ale s velkou pravděpodobností způsobeno chybou měření. Důvodem pro občasné výkyvy v hodnotách měření byla kromě chyby měření nedostatečná homogenita materiálu. V některých případech byl rozdíl v tvrdosti na různých místech povrchu materiálu značný.



Graf. 18 Změn tvrdosti dle Brinella směsi (rotomoulding)

Největší pokles tvrdosti je u polyethylenových tělísek v benzínu. Během půl roku došlo k poklesu tvrdosti dle Brinella z 4,8 na 3,7. U nafty byl zaznamenán méně výrazný pokles tvrdosti než u tělísek v benzínu. Z počáteční hodnoty 4,8 došlo k poklesu na hodnoty 4,2. V brzdové kapalině byla změna velmi malá, obdobná jako u vzorku RX 102. Drobné snížení tvrdosti bylo zaznamenáno i u vzorků v chladicí kapalině. Dle ostatních výsledků však lze předpokládat, že pokles byl způsobený nehomogenitou materiálu a rozdíly v tvrdosti povrchu v různých částech měřených destiček.

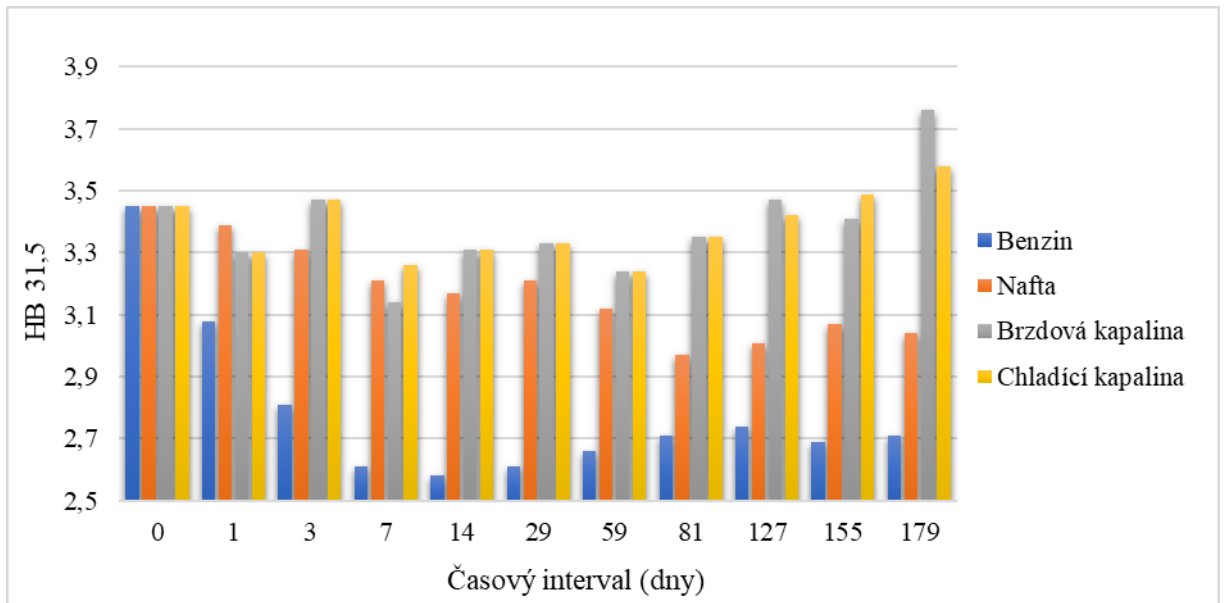


Graf. 19 Změny tvrdosti dle Brinella XL 400 (rotomoulding)

U polyethylenu XL 400 byl nejvýznamnější pokles v benzínu a naftě. Snížení bylo v obou případech téměř identické. Došlo k poklesu z hodnoty 5,4 na hodnotu 4,2. Odlišný byl proces

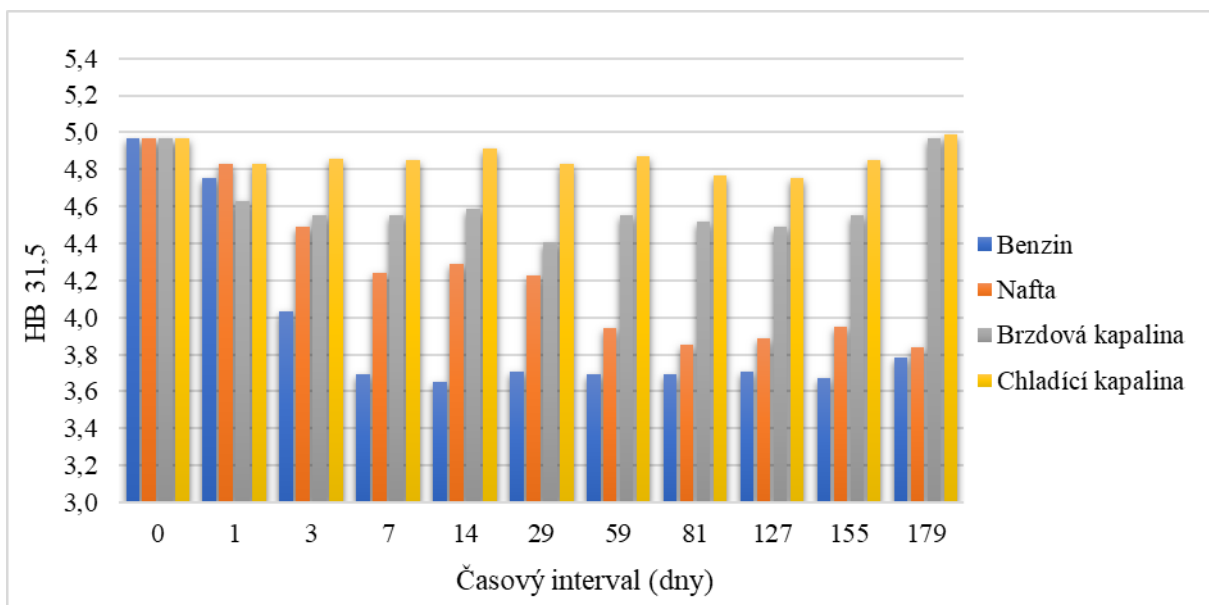


snížení tvrdosti u benzínu, došlo k mnohem výraznějšímu poklesu během prvního týdne, u nafty byl pokles tvrdosti postupnější. V brzdové ani chladicí kapalině nebyl zaznamenán jakýkoli pokles v měřeném období. V případě brzdové kapaliny byly dokonce naměřeny hodnoty až 0,3 větší než u výchozího vzorku. To však nelze přisuzovat vlivu brzdové kapaliny, ale rozdílům tvrdosti v různých částech měřené destičky.



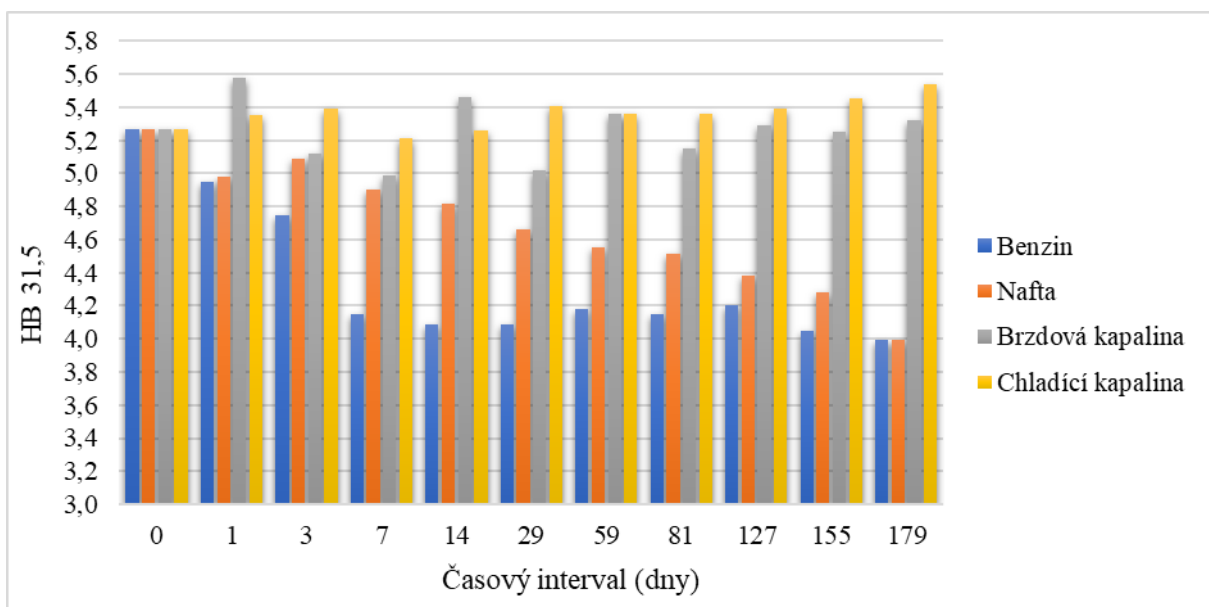
Graf. 20 Změny tvrdosti dle Brinella RX 102 (vstříkování)

Pokles tvrdosti byl zjištěn u tělísek v benzínu a naftě. V případě benzínu byl pokles výraznější, z hodnot 3,4 na 2,7. U nafty byl pokles méně strmý. Naměřená tvrdost po půl roce v naftě byla 3,0. Stejně jako u XL 400 (vstříkování) nebyl naměřen žádný pokles u vzorků polyethylenu RX 102 v brzdové a chladicí kapalině. Výkyvy hodnot, především v posledním měsíci lze přisuzovat rozdílům tvrdosti v jednotlivých částech vzorku.



Graf. 21 Změny tvrdosti směsi dle Brinella (vstříkování)

U vzorků směsi polyethylenu RX 102 a XL 400 připravených vstříkovací technologií bylo naměřeno snížení tvrdosti povrchu vzorků u tělísek v benzínu a naftě. Výsledná hodnota tvrdosti byla téměř shodná, ale pokles v benzínu byl mnohem rychlejší. K nejvýraznějšímu poklesu došlo v prvním týdnu. Brzdová a chladicí kapalina neměly na tvrdost vzorků žádný vliv.



Graf. 22 Změny tvrdosti dle Brinella XL 400 (vstříkování)

Jako u většiny ostatních vzorků byla naměřená hodnota tvrdosti dle Brinella po půl roce u nafty a benzínu identická. U tělísek v benzínu byl pokles tvrdosti výrazný v rámci prvního týdne, u nafty docházelo k postupnému snižování tvrdosti. U brzdové a chladicí kapaliny

nedošlo k žádnému poklesu tvrdosti, hodnoty po celou dobu vlivem rozdílné tvrdosti v různých částech vzorku oscilovaly okolo hodnoty 5,3.

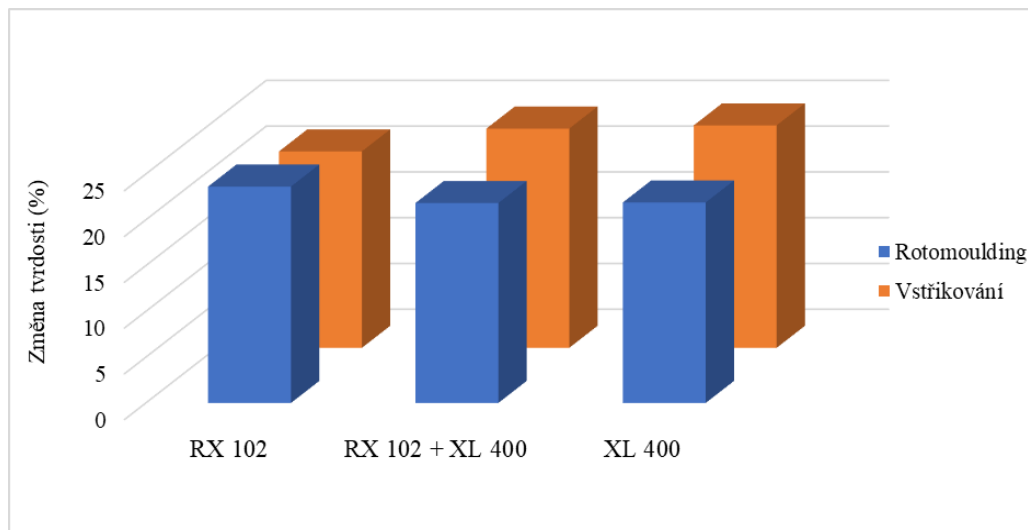
Ze všech měření byl zjištěn silný vliv benzínu a nafty na tvrdost u všech typů polyethylenů. V obou případech došlo k poměrně značnému poklesu tvrdosti. Pro přehlednost, jsou procentuální změny tvrdosti po 6 měsících zaznamenány v tab. 35 a 36. Z těchto tabulek byly vytvořeny grafy 23 a 24. Brzdová a chladicí kapalina neměly na tvrdost povrchu polyethylenových vzorků téměř žádný vliv.

Tab. 35 Procentuální změna tvrdosti dle Brinella po 6 měsících (benzin)

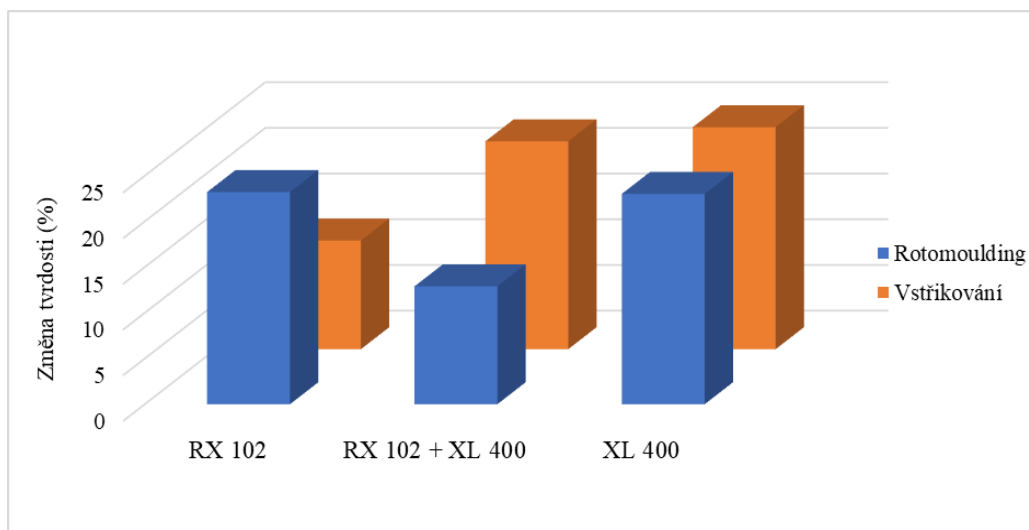
Typ	Rotomoulding (%)	Vstřikování (%)
<b>RX 102</b>	23,63	21,45
<b>RX 102 + XL 400</b>	21,83	23,94
<b>XL 400</b>	21,89	24,29

Tab. 36 Procentuální změna tvrdosti dle Brinella po 6 měsících (nafta)

Typ	Rotomoulding (%)	Vstřikování (%)
<b>RX 102</b>	23,21	11,88
<b>RX 102 + XL 400</b>	12,89	22,74
<b>XL 400</b>	23,01	24,29



Graf. 23 Tvrdost dle Brinella po 6 měsících (benzin)



Graf. 24 Tvrдость dle Brinella po 6 měsících (nafta)

Tvrдость dle Brinella poklesla u všech typů polyethylenu. Ve většině případu došlo k poklesu tvrdosti o více než 20 %, jen u vzorků RX 102 (vstřikování) a směsi XL 400 a RX 102 byl zaznamenán pokles tvrdosti o 12, respektive 13 %. Lze předpokládat, že se spíše jednalo o chybu měření, než vliv vzorků a médií. Z časového důvodu nemohly být vzorky znovu přeměřeny. Po půl roce v naftě měl největší tvrdost dle Brinella polyethylen XL 400. Naměřená tvrdost v benzínu byla 4,21 (rotomoulding), 3,99 (vstřikování). V naftě byla tvrdost rotomouldingových vzorků 4,15, vstřikovaných 3,99. Tvrдость tělísek zpracovaných ze směsi polyethylenů byla v benzínu 3,76 (rotomoulding) a 3,78 (vstřikování). V naftě byl pokles nižší, pro vzorky připravené rotačním tvarováním byla naměřena tvrdost 4,19 (rotomoulding) a 3,84 (vstřikování). Stejně jako u výchozích vzorků vykazovaly nejnižší tvrdost vstřikované vzorky polyethylenu RX 102. V benzínu hodnota poklesla na 2,71, v naftě na 3,04. Rotomouldingová tělíska RX 102 vykazovala vyšší tvrdost. V benzínu byla naměřena tvrdost 3,62, velmi obdobná hodnota byla i v naftě. Stejně jako u výchozích vzorků byly největší tvrdosti u zesíťovaných vzorků, nejnižší naopak u vzorků RX 102.

### 3.2.3 Zkouška v ohybu

Tato zkouška byla provedena pro polyethyleny RX 102, Revolve XL 400 a jejich směsi v poměru 33,5:66,5 zpracované rotačním tvarováním i vstřikováním. Porovnávány byly hodnoty naměřené u vzorků polyethylenů před vložením do chemických médií a hodnot vzorků naměřených po vyjmutí po půl roce v jednotlivých médiích. Sledován byl vliv chemických médií i zesíťování polyethylenu na mechanické chování při zkoušce v ohybu. Získané hodnoty jsou zaznamenány v tab. 37–46. Z těchto tabulek byly následně vytvořeny grafy 25 až 28.

Tab. 37 Výchozí hodnoty zkoušky ohybu (rotomoulding)

vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	průhyb při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	77,40	8,30	23,00	2,37	10,28	0,07
<b>RX 102 + XL 400</b>	13,90	2,10	13,93	1,19	5,09	0,21
<b>Revolve XL 400</b>	13,10	1,85	18,41	1,50	4,36	0,51

Tab. 38 Výchozí hodnoty zkoušky ohybu (vstřikování)

vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	průhyb při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	18,41	1,20	18,79	0,82	7,80	0,13
<b>RX 102 + XL 400</b>	18,00	1,20	10,57	0,75	8,05	0,17
<b>Revolve XL 400</b>	21,80	1,60	12,77	1,00	7,08	0,58

Tab. 39 Zkouška v ohybu polyethylenových tělísek (rotomoulding) v benzínu

vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	průhyb při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	67,5	12,3	16,76	1,89	10,65	0,25
<b>RX 102 + XL 400</b>	8,10	2,30	9,94	1,16	5,02	0,74
<b>Revolve XL 400</b>	9,50	1,20	14,81	1,35	5,03	0,20

Tab. 40 Hodnoty zkoušky v ohybu polyethylenových tělísek (vstřikování) v benzínu

vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	průhyb při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	12,10	1,30	7,11	0,69	7,92	0,84
<b>RX 102 + XL 400</b>	22,40	1,20	13,47	0,95	8,19	0,29
<b>Revolve XL 400</b>	24,20	1,90	14,90	0,59	8,32	0,26

Tab. 41 Zkouška v ohybu polyethylenových tělísek (rotomoulding) v naftě

vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	průhyb při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	71,40	11,40	18,70	2,41	9,81	0,76
<b>RX 102 + XL 400</b>	8,50	0,90	9,38	0,92	5,52	0,58
<b>Revolve XL 400</b>	7,80	1,90	11,61	0,40	4,76	0,64

Tab. 42 Zkouška v ohybu polyethylenových tělísek (vstřikování) v naftě

vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	průhyb při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	14,80	0,30	8,81	0,21	8,38	0,61
<b>RX 102 + XL 400</b>	22,87	0,47	14,49	0,67	7,61	0,08
<b>Revolve XL 400</b>	26,33	1,05	16,72	0,87	8,46	0,46

Tab. 43 Zkouška v ohybu polyetylenových tělísek (rotomoulding) v brzdové kapalině

vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	průhyb při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	58,00	6,80	20,16	1,67	8,16	0,75
<b>RX 102 + XL 400</b>	11,70	0,50	18,44	1,71	4,76	0,41
<b>Revolve XL 400</b>	11,10	1,20	20,93	0,61	4,67	0,28

Tab. 44 Zkouška v ohybu polyetylenových tělísek (vstřikování) v brzdové kapalině

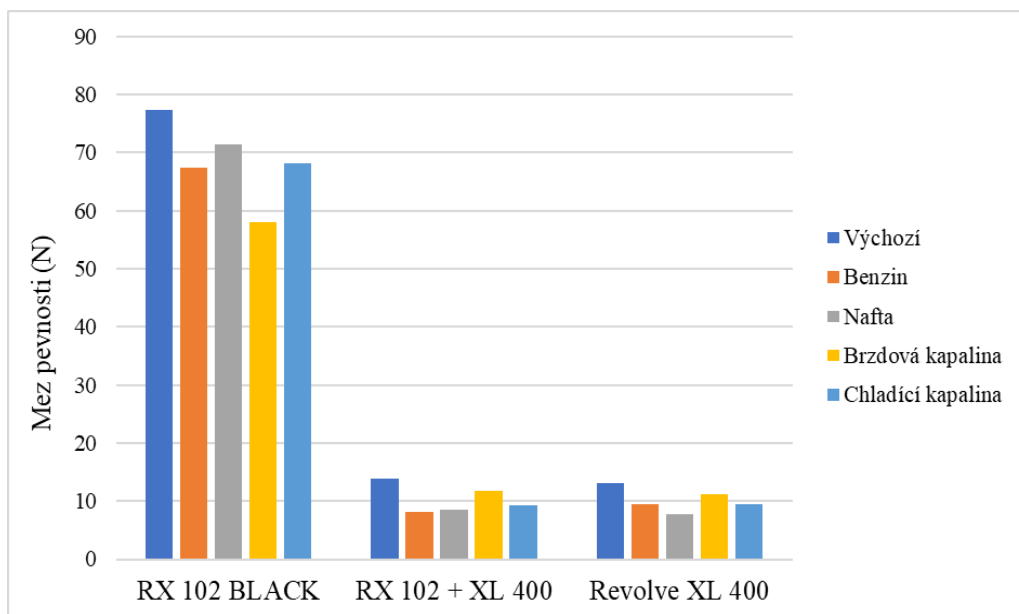
vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	průhyb při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	14,40	0,30	8,81	0,21	8,38	0,61
<b>RX 102 + XL 400</b>	22,07	0,98	13,92	0,66	7,71	0,08
<b>Revolve XL 400</b>	26,33	1,05	16,73	0,87	8,46	0,46

Tab. 45 Zkouška v ohybu polyetylenových tělísek (rotomoulding) v chladicí kapalině

vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	průhyb při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	68,20	2,60	17,77	0,60	9,45	0,36
<b>RX 102 + XL 400</b>	9,30	1,14	12,65	0,82	3,86	0,47
<b>Revolve XL 400</b>	9,50	1,20	14,81	1,35	5,03	0,20

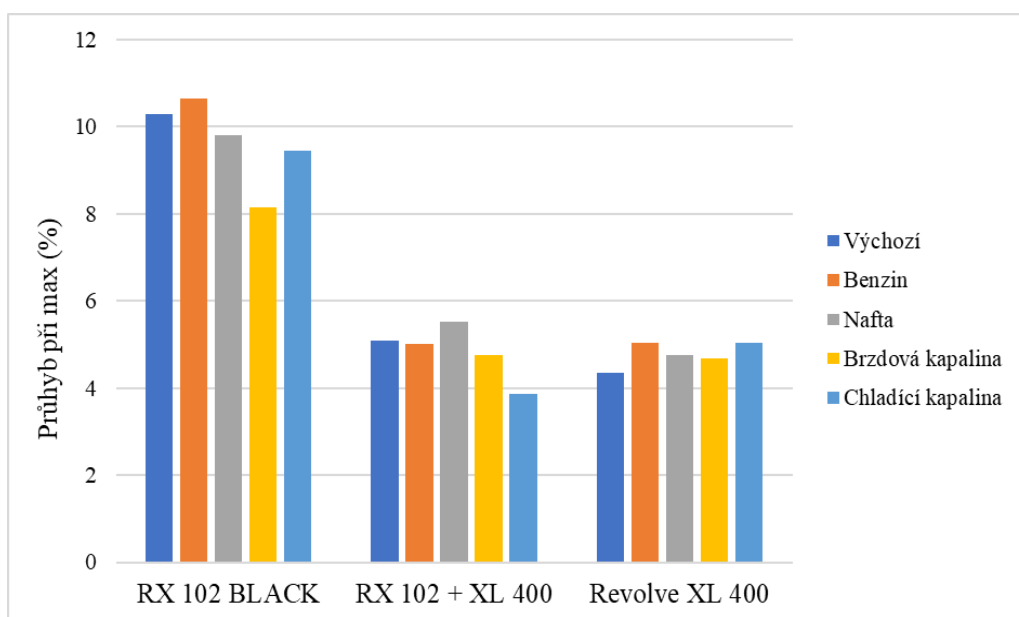
Tab. 46 Zkouška v ohybu polyetylenových tělísek (vstřikování) v chladicí kapalině

vzorek	mez pevnosti (N)	±	mez pevnosti (MPa)	±	průhyb při max (%)	±
<b>RX 102 BLACK</b>	16,20	0,40	11,55	1,11	6,73	0,33
<b>RX 102 + XL 400</b>	26,70	1,10	16,78	0,90	7,77	0,29
<b>Revolve XL 400</b>	29,60	0,80	18,35	0,20	6,73	0,12



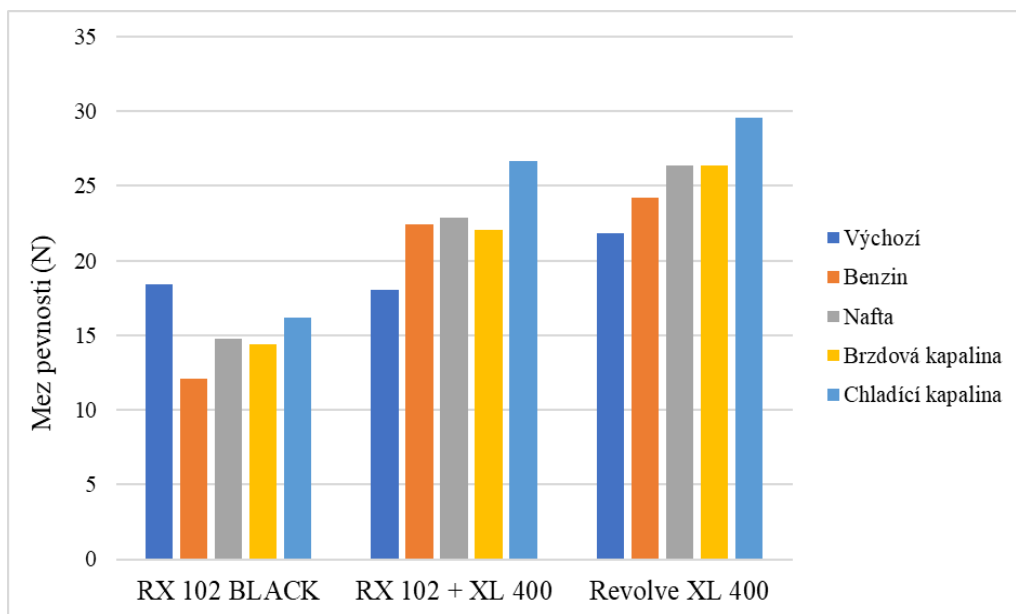
Graf. 25 Mez pevnosti rotomoulding (ohyb)

Nejvyšší hodnota meze pevnosti byla naměřena pro vzorky RX 102. Vzorky XL 400 a směsi RX 102 a XL 400 měly téměř 7x nižší mez pevnosti. Výsledky těchto hodnot mohly být ovlivněny dvojnásobnou tloušťkou tělísek RX 102. Vliv chemických médií na mez pevnosti nebyl u rotomouldingových vzorků prokázán.



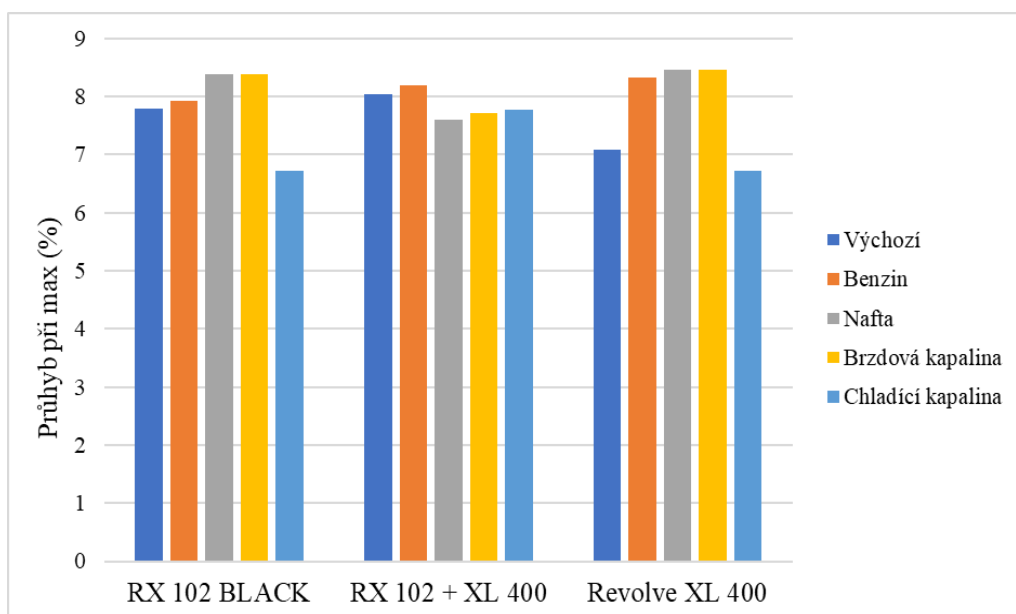
Graf. 26 Průhyb při max rotomoulding (ohyb)

Průhyb při maximu nebyl ovlivněn po půl roce tělísek ani jedním chemickým médiem. Nejvyšší hodnoty průhybu byly naměřeny pro vzorky RX 102. U vzorků XL 400 a směsi RX 102 + XL 400 byly hodnoty průhybu velmi podobné. Hodnoty se pohybovaly v rozmezí 5,5 až 4,0.



Graf. 27 Mez pevnosti vstřikování (ohyb)

Oproti hodnotám meze pevnosti rotomouldingových tělísek byla naměřena nejvyšší hodnota u zesíťovaného polyethylenu. Lze tedy předpokládat, že síťování nemělo vliv na mez pevnosti. U žádného vzorku nebyl prokázán vliv chemickým médií.



Graf. 28 Průhyb při max vstřikování (ohyb)

Z grafu jednoznačně vyplývá, že síťování ani půl rok v chemických médiích neovlivnily průhyb tělísek při maximu. Všechny hodnoty průhybu při maximu se pohybovaly okolo 8 %.

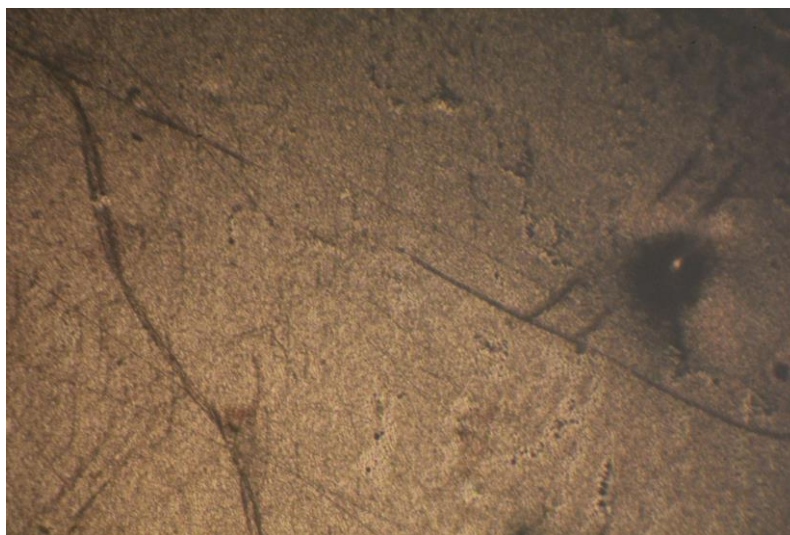
U zkoušky v ohybu nebyl u tělísek zjištěn vliv síťování polyethylenu ani vliv půl roku v benzínu, naftě, brzdové a chladicí kapalině. Všechny hodnoty se blížily výchozím hodnotám a rozdíly byly způsobeny odlišnou tloušťkou jednotlivých vzorků a nepřesnostmi při měření.



Rozdíl mezi zpracovatelskými technologiemi byl výraznější, větší průhyb při maximu a menší mez pevnosti byl naměřen u tělísek připravených vstřikováním. Výjimku tvořil polyethylen RX 102 (rotomoulding), u kterého byly hodnoty nejvyšší, hodnoty průhybu při maximu byly okolo 10 % a hodnoty meze pevnosti okolo 70 N. S velkou pravděpodobností, lze tyto vyšší hodnoty přisuzovat 2x větší tloušťce tělísek.

### 3.2.4 Mikroskopie

Dalším kritériem pro hodnocení chemických změn u jednotlivých vzorků polyethylenů byl popis vizuální změny působením médií a mikroskopické sledování strukturních změn povrchů. Fotografie ukazující tyto změny byly vytvořeny pomocí fotoaparátu propojeného s optickým mikroskopem. Nejdříve byly vyfoceny fotografie povrchů polyethylenů před vložením do chemických médií (obr. 43–48). Na obr. 49 až 54 jsou zobrazeny vybrané povrchy polyethylenů po 6 měsících v jednotlivých chemických médiích. Pro všechny fotografie je použito zvětšení 4x.



Obr. 43 Vzorek RX 102 (rotomoulding)

Vzorek RX 102 byl před vložením do chemických médií hladký s drobnými poškozeními na povrchu.



Obr. 44 Vzorek směs (rotomoulding)

Na vzorku směsi polyethylenu RX 102 a XL 400 byla patrná nedokonalá homogenizace, kdy byly pod mikroskopem patrné separované oblasti. Povrch byl oproti všem ostatním vzorkům hrubší.



Obr. 45 Vzorek XL 400 (rotomoulding)

Vzorek XL 400 měl hladký povrch, ale stejně jako u vzorku RX 102 se na povrchu nacházely drobné rýhy a prohloubeniny



Obr. 46 Vzorek RX 102 (vstřikování)

Vstřikovaný RX 102 byl naprosto hladký, ale po celém povrchu se nacházely drobné rýhy, které byly s největší pravděpodobností od formy.



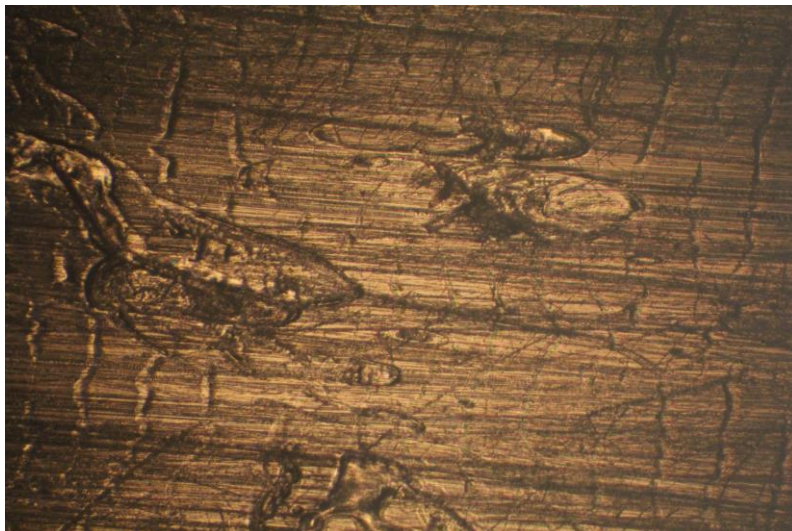
Obr. 47 Vzorek směs (vstřikování)

V případě vzorku směsi RX 102 a XL 400 zpracovaného vstřikovací technologií se na povrchu nenacházely žádné defekty. Povrch byl hladký.



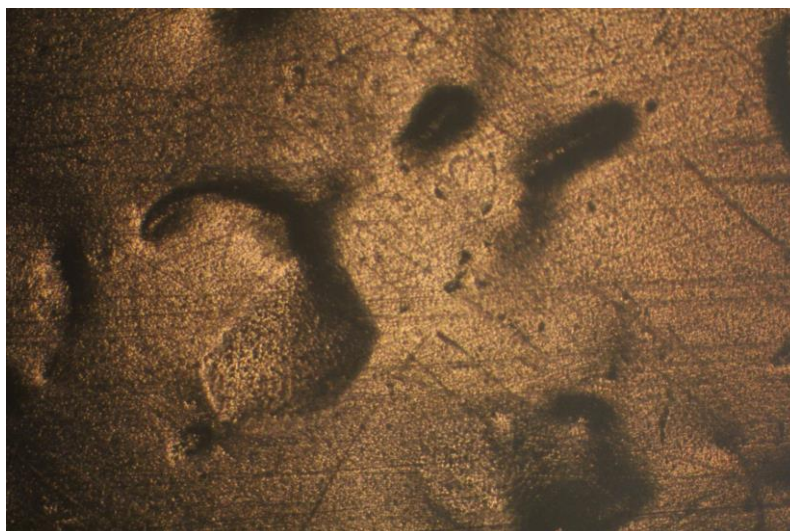
Obr. 48 Vzorek XL 400 (vstřikování)

Vstřikovaný vzorek měl téměř identický povrch se vstřikovaným vzorkem směsi polyethylenů RX 102 a XL 400.



Obr. 49 Vzorek RX 102 (vstřikování) po 6 měsících v benzínu

U vstřikovaného vzorku RX 102 bylo po jednom měsíci v naftě pozorováno zhrubnutí povrchu. Během druhého měsíce se na povrchu vytvořily drobné mapy, které se dále rozšiřovaly. Po 5 měsících se navíc začaly vytvářet drobné důlky, které jsou zaznamenány na obr. 49.



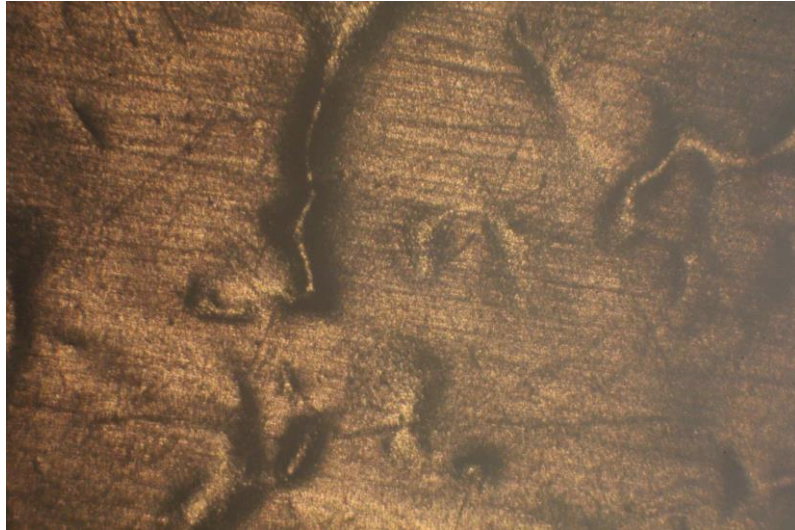
Obr. 50 Vzorek směs (rotomoulding) po 6 měsících v benzínu

U vzorku směsi RX 102 a XL 400 připravených rotačním tvarováním byly zaznamenány velmi podobné změny struktury jako u vstříkovaného vzorku RX 102. Byly však patrné ještě ve větším rozsahu. Především se jednalo o mnohem hlubší důlky, které jsou zaznamenány na obr. 50



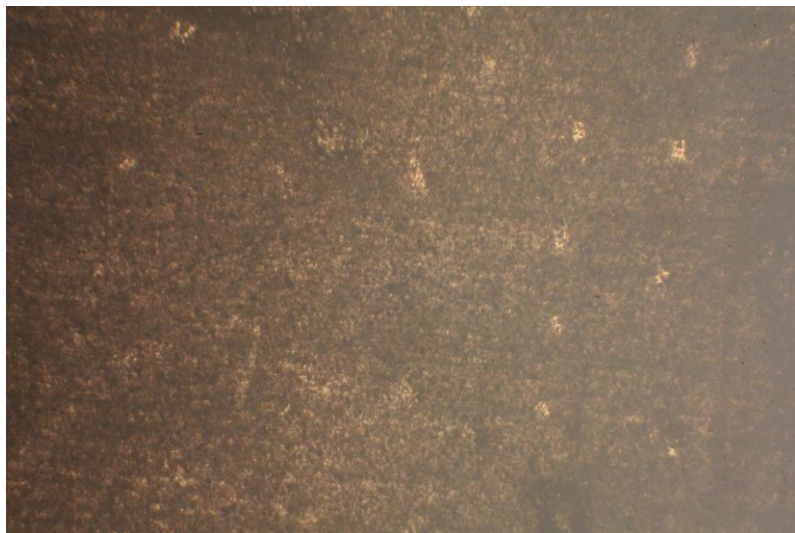
Obr. 51 Vzorek směs (rotomoulding) po 6 měsících v naftě

Působení nafty se u vzorku směsi RX 102 a XL 400 připraveného rotomouldingem projevilo až po dvou měsících. Během prvních dvou měsíců nebyly zaznamenány žádné změny. Během třetího došlo k vytvoření drobných map po celém povrchu vzorku, povrch zůstal hladký. Příliš výrazné změny struktury povrchu nebyly zaznamenány ani optickým mikroskopem.



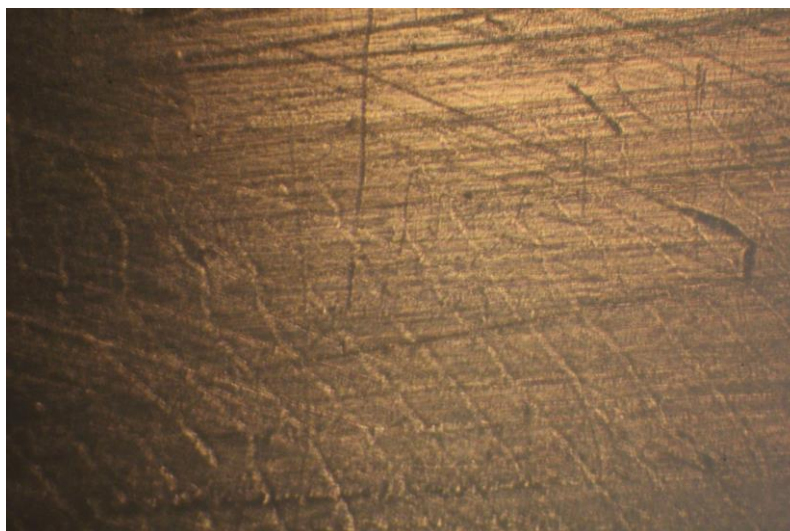
Obr. 52 Vzorek XL 400 (vstřikování) po 6 měsících v naftě

Vstřikovaný vzorek XL 400 obsahoval drobné defekty před vložením do nafty. Stejně jako u vzorku směsi polyethylenů v naftě vznikly během třetího měsíce na povrchu drobné mapy. Následně došlo také ke zvětšení defektů a zhrubnutí povrchu.



Obr. 53 Vzorek RX 102 (rotomoulding) po 6 měsících v brzdové kapalině

U vzorku RX 102 v brzdové kapalině nebyla zaznamenána téměř žádná změna pozorovatelná pouhým okem. Pod optickým mikroskopem bylo možné vidět drobné narušení povrchu ve formě teček.



Obr. 54 Vzorek RX 102 (vstřikování) po 6 měsících v chladící kapalině

U vzorku RX 102 v chladící kapalině nedošlo k žádným změnám povrchu po celou dobu 6 měsíců. Nebyly vizuálně pozorovány žádné změny povrchu. Pod optickým mikroskopem vypadala struktura vzorku polyethylenu beze změny.

V rámci hodnocení chemické odolnosti byly vybrány vzorky, na kterých byly změny nejlépe pozorovatelné. V případě benzínu a nafty došlo k drobným změnám struktury povrchu, především tvorbě map a drobných defektů nezávisle na typu polyethylenu i zpracovatelské technologii. Vzorky v brzdové kapalině nevykazovaly žádné pouhým okem pozorovatelné změny. U většiny vzorků pod mikroskopem byly nalezeny drobné tečky. Vzorky v chladící kapalině nevykazovaly žádné vizuální poškození ani pod optickým mikroskopem.

### 3.3 Doplnkové měření – charakteristika polyethylenů

#### 3.3.1 TMA

Měřicí metoda TMA byla využita k zjištění teploty skelného přechodu a teploty tání pro polyethylen RX 102 Black, Revolve XL 400 a jejich směsi v poměru 33,5:66,5. Získané hodnoty jsou uvedeny v tab. 47.

Tab. 47 Hodnoty  $T_m$  a  $T_g$

vzorek	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)
<b>RX 102 BLACK</b>	-78,1	132,2
<b>RX 102 + XL 400</b>	-79,9	130,5
<b>Revolve XL 400</b>	-79,2	123,4

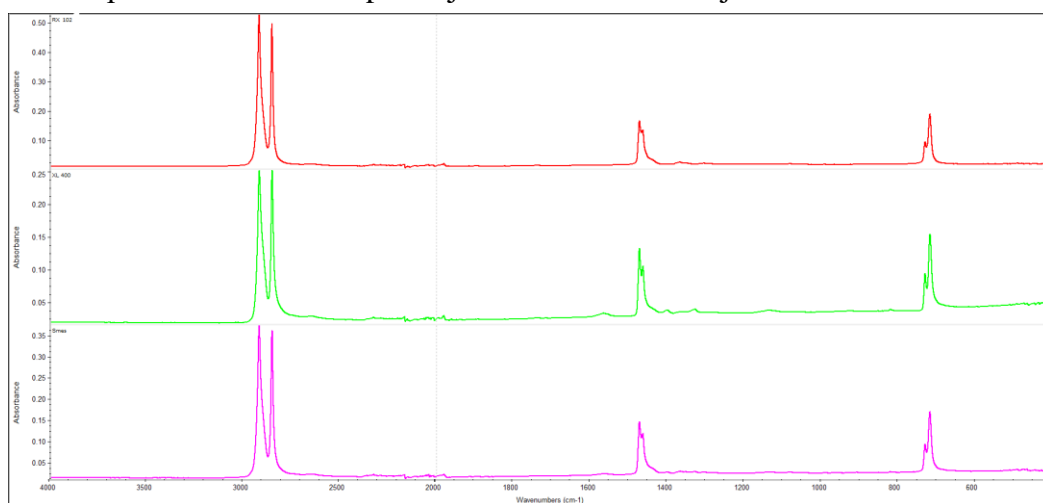
Naměřené hodnoty  $T_g$  byly pro všechny typy polyethylenů téměř shodné, síťování tedy nemělo žádný výrazný vliv na teplotu skelného přechodu. Naopak se prokázal vliv síťování polyethylenu na teplotu tání. Rozdíl  $T_m$  mezi síťovaným a nez síťovaným polyethylen tvořil téměř 10 °C.

### 3.3.2 DMA

Dynamickou mechanickou analýzou byl pro zesíťovaný polyethylen XL 400 a směs zesíťovaného polyethyleny XL 400 a RX 102 stanoven modul pružnosti v tahu při 150 °C. Pro vzorek XL 400 byl modul pružnosti v tahu 2,95 MPa, pro vzorek směsi polyethyleny byl modul pružnosti v tahu 2,75 MPa. Z modulu pružnosti v tahu byl vypočítán stupeň zesíťení (viz. obr. 39). Pro XL 400 byl vypočítán stupeň zesíťení 279,61 mol/m<sup>3</sup>, u směsi polyethyleny byl stupeň zesíťení 260,65 mol/m<sup>3</sup>.

### 3.3.3 Infračervená spektroskopie

Infračervená spektra naměřená na přístroji FTIR Nicolet iS50 jsou zaznamenána na obr. 55.



Obr. 55 Infračervená spektra polyethylenů

Charakteristické absorbující skupiny se nachází u polyethyleny při 720 cm<sup>-1</sup> (CH<sub>2</sub> rocking vibration), 1460 cm<sup>-1</sup> (CH<sub>2</sub> scissoring vibration), 2850 cm<sup>-1</sup> (CH<sub>2</sub> symmetric stretching vibration) a 2920 cm<sup>-1</sup> (CH<sub>2</sub> asymmetric stretching vibration). Nejvyšší absorbance se nachází u vzorku RX 102, nejnižší je u zesíťovaného XL 400. Vlivem zesíťování dochází k snižování absorbance.



## 4 ZÁVĚR

V teoretické části byla rozebrána jako hlavní témata polyethylen, možnosti síťování polyethylenů a technologie zpracování. První část teorie byla věnována polyethylenu a popisu nejvýznamnějších typů – LDPE, HDPE, LLDPE a UHMWPE. V druhé části bylo popsáno síťování polyethylenů. Rozebrány byly 3 nejvíce používané způsoby, tedy síťování peroxidy, silanovými sloučeninami a UV zářením. V této části byly navíc stručně popsány ionomery, na které lze nahlížet jako na zvláštní způsob síťování. Třetí část byla věnována zpracovatelským technologiím. Popsány byly dvě nejvyužívanější zpracovatelské technologie – vstřikování a vytlačování. Navíc byla podrobně rozebrána i technologie rotačního tvarování, kterou byly společně se vstřikováním připraveny testovací vzorky pro experimentální část.

V experimentální části byly definovány použité polyethyleny RX 102, XL 400 a jejich směs RX 102 a XL 400 v poměru 33,5:66,5. Stručně byla popsána použitá chemická média. Dále byly formulovány podmínky, za kterých byly vzorky připraveny vstřikováním a rotačním tvarováním. Zbývající popis se zabýval jednotlivými zkouškami a metodami hodnocení. Experimentální část dále zahrnovala popis podmínek a norem pro použité zkoušky. Jednalo se o zkoušku v tahu, zkoušku v ohybu, rázovou houževnatost Charpy, tvrdost dle Brinella, Vickerse, TMA, DMA, infračervenou spektroskopii, zkoumání struktury povrchu vzorků mikroskopem a vážení vzorků na analytických vahách.

V rámci poslední části byly zpracovány a interpretovány naměřené hodnoty a získaná data. Celá kapitola výsledky a diskuse byla rozdělena do třech částí. První část byla věnována mechanickým zkouškám, druhá část se zabývala chemickou odolností jednotlivých typů polyethylenů v chemických médiích. V rámci třetí části byla měřena doplňková měření pro charakterizaci vstupních materiálů – TMA, DMA a infračervená spektroskopie.

Z hodnot naměřených při zkoušce v tahu byl zjištěn silný vliv zpracovatelské technologie na tažnost. U vstřikovaných vzorků polyethylenů RX 102 byla naměřena 37x vyšší tažnost oproti vzorkům připravených rotačním tvarováním. Zároveň bylo prokázáno silné ovlivnění tažnosti síťováním polyethylenů. Nejvýraznější pokles byl zaznamenán u vstřikovaných vzorků. Zkouška v ohybu neprokázala vliv síťování polyethylenů na mez pevnosti ani na průhyb při maximu. Rozdíl byl pozorovatelný mezi jednotlivými zpracovatelskými technologiemi. Vstřikovaná tělíska vykazovala o 2,5 % větší průhyb při maximu oproti rotomouldingovým tělískům. Největší hodnotu průhybu při maximu i meze pevnosti vykazoval vzorek RX 102, což však bylo s největší pravděpodobností způsobeno dvojnásobnou tloušťkou testovaných tělísek. Houževnatost všech tělísek byla příliš vysoká,

před samotnou zkouškou byly proto vytvořeny na všech testovaných tělískách 2 mm vruby. Nejnižší hodnotu rázové houževnatosti vykazoval vzorek RX 102 připravený rotačním tvarováním. Vstříkovaný vzorek RX 102 měl hodnotu rázové houževnatost 5x vyšší. Z informací získaných během bakalářské práce, lze přisoudit tento rozdíl zpracovatelské technologii. Dále byl dle zjištěn nárůst rázové houževnatosti způsobený zesíťováním polyethylenu jak u vstříkovaných, tak rotomouldingových tělísek. V rámci měření tvrdosti byla zjištěna vyšší tvrdost dle Brinella i Vickerse u tělísek připravených ze síťovaného polyethylenu. U vzorků RX 102 byl patrný i rozdíl mezi zpracovatelskými technologiemi, vstříkované vzorky byly měkčí.

Při zkoumání chemické odolnosti polyethylenů v chemických médiích – benzinu, naftě, brzdové a chladicí kapalině byla sledována změna hmotnosti, tvrdosti dle Brinella a Vickerse po dobu 6 měsíců. Zároveň byly v průběhu pozorovány vizuální změny struktury povrchu a po 6 měsících byl povrch navíc studován pod optickým mikroskopem. Poslední metodou měření využitou pro charakterizaci změn způsobených chemickými médii byla zkouška v ohybu. Změna hmotnosti testovaných vzorků byla největší u tělísek v benzinu a naftě. V obou těchto médiích byla zaznamenána změna hmotnosti okolo 23 % původní hmotnosti. Výjimku představovaly vstříkované vzorky RX 102 a směs polyethylenu RX 102 a XL 400 připravených rotačním tvarováním v naftě. U těchto dvou vzorků byla změna hmotnosti 12, respektive 13 %. Tento pokles nasákavosti lze spíše než vlivu typů polyethylenu přisoudit chybě měření. Ta mohla být způsobena přílišnou blízkostí tělísek u sebe, čímž byla snížena difundující plocha pro médium. Výsledná změna hmotnosti byla obdobná pro tělíska v benzinu i naftě. Růst hmotnosti v benzinu byl však mnohem rychlejší během prvního měsíce a dále stoupal pozvolna. Tělíska v naftě vykazovala pozvolnější a pravidelnější nárůst hmotnosti až do 5. měsíce. V posledním měsíci byla změna hmotnosti i vzorků v naftě nízká. Změna hmotnosti tělísek v brzdové a chladicí kapalině nepřesáhla u žádného vzorku po 6 měsících 1 %. Nejvyšší pokles tvrdosti byl zaznamenán u tělísek v naftě a benzinu. Pro tělíska v naftě i benzinu byla výsledná tvrdost po půl roce obdobná. Stejně jako na začátku byla nejvyšší tvrdost naměřena u vzorků XL 400. U tělísek v brzdové a chladicí kapalině nedošlo během půl roku k prokazatelné změně tvrdosti povrchu. Při zkouškách v ohybu nebyl prokázán žádný vliv chemických médií na mez pevnosti ani průhyb při maximu u žádného typu polyethylenu. Z hlediska vizuálních změn povrchu byly vytvořeny defekty ve formě map a drobných důlků u vzorků všech typů polyethylenů v naftě a benzinu. Tělíska v brzdové kapalině nevykazovala žádnou okem viditelnou změnu struktury ani po 6 měsících. Pod mikroskopem však bylo zjištěno nepatrné poškození struktury povrchu ve formě

drobných teček. Změna struktury vzorků v chladící kapalině nebyla po půl roce pozorována vizuálně ani mikroskopem.

V rámci doplňkového měření, které sloužilo pro lepší charakterizaci jednotlivých typů polyethylenů, bylo provedeno měření TMA, DMA a infračervená spektroskopie. Pomocí TMA byly zjištěny hodnoty  $T_g$  a  $T_m$  pro jednotlivé typy polyethylenů. Síťování nemělo téměř žádný vliv na teplotu skelného přechodu. Rozdíl mezi nezesíťovaným RX 102 a zesíťovaným XL 400 představoval 1 °C. Vyšší vliv síťování byl zjištěn u teploty tání. Rozdíl mezi síťovaným XL 400 a nezesíťovaným RX 102 tvořil 10 °C. Velmi důležitou charakteristikou pro zesíťovaný polyethylen je stupeň zesíťení, který byl zjištěn dynamickou mechanickou analýzou. Přesněji pomocí DMA byl naměřen modul pružnosti v tahu pro polyethylen XL 400 a směs polyethylenů RX 102 a XL 400. Z hodnot modulu pružnosti v tahu byl vypočítán stupeň zesíťení (viz. obr. 39). Stupeň zesíťení byl u polyethylenu XL 400 279,61 mol/m<sup>3</sup>, pro směs polyethylenů RX 102 a XL 400 byl vypočítán stupeň zesíťení 260,65 mol/m<sup>3</sup>. Poslední metodou pro charakterizaci polyethylenů byla infračervená spektroskopie. Charakteristické píky pro polyethylen byly naměřeny při 720, 1460, 2850 a 2920 cm<sup>-1</sup>. Dle naměřených spekter síťování mírně snížilo hodnotu absorpance v jednotlivých píkách typických pro polyethylen.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MATAR, Sami; HATCH, Frederic Lewis. Chemistry of Petrochemical Processes (2nd Edition). Synthetic Petroleum-Based Polymers. Oxford: Elsevier Science, 2001, str. 324-329. ISBN 9780080501086.
- [2] Termoplasty – základní druhy. Publi.cz – platforma pro multimediální eBooky [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [3] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: [https://fotky-foto.cz/fotobanka/hdpe-transparentni-polyetylenove-granule-plastove-pelety-plastove\(4-194428400\)/](https://fotky-foto.cz/fotobanka/hdpe-transparentni-polyetylenove-granule-plastove-pelety-plastove(4-194428400)/)
- [4] MLEZIVA, Josef; ŠŇUPÁREK, Jaromír. Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přepracované vydání. Praha: Sobotáles, 2000, str. 20-485. ISBN 8085920727.
- [5] CANTOR, Kirk. Blown Film Extrusion (3rd Edition). Hanser Publishers. Oxford: Elsevier Science, 2006, str. 2-8 ISBN 9781569906972
- [6] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/high-pressure-polymerization>
- [7] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: [www.idinspections.com/on-line-acoustic-emission-inspection-of-tubular-low-density-polyethylene-reactors//](http://www.idinspections.com/on-line-acoustic-emission-inspection-of-tubular-low-density-polyethylene-reactors//)
- [8] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: [http://www.autoclaveengineers.com/products/custom\\_applications/low\\_density\\_polyethylene\\_vessels/index.html](http://www.autoclaveengineers.com/products/custom_applications/low_density_polyethylene_vessels/index.html)
- [9] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Structure-schematic-diagram-of-a-general-hyper-branched-polymer\\_fig2\\_305522676](https://www.researchgate.net/figure/Structure-schematic-diagram-of-a-general-hyper-branched-polymer_fig2_305522676)
- [10] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/529032287447699489/>
- [11] ŠŇUPÁREK, Jaromír. Úvod do makromolekulární chemie. Univerzita Pardubice, 2003, str. 112. ISBN 8071945625

- [12] GILBERT, Marianne. *Brydson's Plastics Materials* (8th Edition). Oxford: Elsevier Science, 2017. str. 247-278. ISBN 9780323358248
- [13] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://cz.depositphotos.com/stock-photos/hdpe.html>
- [14] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: [https://www.emas.cz/duoflex-110-94-chranicka?gclid=CjwKCAiAkan9BRAqEiwAP9X6UdGtK-J6k\\_gBILHAIKSM3MMYVDS5Us9jRFBSEktJaKbtLFM5bYBzJxoCvKEQAvD\\_BwE](https://www.emas.cz/duoflex-110-94-chranicka?gclid=CjwKCAiAkan9BRAqEiwAP9X6UdGtK-J6k_gBILHAIKSM3MMYVDS5Us9jRFBSEktJaKbtLFM5bYBzJxoCvKEQAvD_BwE)
- [15] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2015/september/making-plastics-monomer-polymer>
- [16] NIAOUNKIS, Michael. *Recycling of Flexible Plastic Package*. Oxford: Elsevier Science, 2019. str. 58,59. ISBN 9780128166031
- [17] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/che244group52011/home/polymerization-tobita-algorithm?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>
- [18] FARMER, Neil. *Trends in Packaging of Food, Beverages and Other Fast-Moving Consumer Goods*. Woodhead Publishing, 2013, str. 59-61. ISBN 9780857098979
- [19] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.balici-technika.cz/rucni-odvijec-stretch-folie.html>
- [20] ZHANG, Haichen; LIANG, Yong. Extrusion processing of ultra-high molecular weight polyethylene in *Extrusion of Metals, Polymers and Food Products*. IntechOpen, 2017.
- [21] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-0-387-92897-5\\_1279](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-0-387-92897-5_1279)
- [22] UHMWPE – polyethylen pro atrikulační povrchy kloubních náhrad [online]. Dostupné z: <https://www.prolekare.cz/casopisy/casopis-lekaru-ceskych/2016-8/uhmwpe-polyethylen-pro-artikulacni-povrchy-kloubnich-nahrad-60045>
- [23] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <http://www.campoly.com/blog/2012-05-uhmwpe-for-total-joint-arthroplasty/>

- [24][obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-68661-5\\_16](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-68661-5_16)
- [25] KURTZ, Steven. UHMWPE Biomaterials Handbook (2nd Edition). Academic Press, 2016. str. 136-399. ISBN 9780123747211.
- [26] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery – Výroba, vlastnosti, zpracování, použití, VŠCHT Praha. 2006, str. 43-257. ISBN 8070802413.
- [27][obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html>
- [28] TOLINSKI, Michael. Additives for Polyolefins - Getting the Most Out of Polypropylene, Polyethylene and TPO (2nd Edition). William Andrew Publishing. 2009. str. 159-163. ISBN 9780815520511.
- [29][obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-the-mechanism-of-peroxide-polyethylene-crosslinking-71\\_fig6\\_281687108](https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-the-mechanism-of-peroxide-polyethylene-crosslinking-71_fig6_281687108)
- [30] DODIUK, Hanna; GOODMAN, Sidney. Handbook of Thermoset Plastics (3rd Edition). Oxford: Elsevier Science, 2014. str. 697-734. ISBN 9781455731077.
- [31][obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: [https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/531715?lang=en&region=US&cm\\_sp=Insite\\_-prodRecCold\\_xviews\\_-prodRecCold10-5](https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/531715?lang=en&region=US&cm_sp=Insite_-prodRecCold_xviews_-prodRecCold10-5)
- [32] MASTRO, F. Paul. Plastics Products Design. John Wiley & Sons, 2016. str. 34. ISBN 9781118842713.
- [33][obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <http://www.kci.co.ir/en/pages/42-Silaine%20XLPE%20processing%20Types.html>
- [34][obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://polymer-additives.specialchem.com/selection-guide/silane-crosslinking-agents/trigger-crosslinking-at-desired-time>
- [35] OSSWALD, Tim A. Baur; BRINKMANN, Erwin; OBERBACH Sigrid; SCHMACHTENBERG Karl. International Plastics Handbook (4th Edition). Hanser Publishers, 2006. str. 508-533. ISBN 9781615837533.

- [36] WILEY, John. Ullmann's Polymers and Plastics: Products and Processes, 4 Volume Set. Wiley-VCH, 2016. str. 1351-1352. ISBN 9783527338238.
- [37] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/10/1565/htm>
- [38] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe Praha: Grada Publishing, 2018. str. 200-325. ISBN 9788027106141.
- [39] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <http://vietnamese.hsinda-powdercoating.com/sale-11085110-wrinkle-effect-powder-coat-orange-peel-paint-texture-corrosion-protection.html>
- [40] Technologie vstřikování plastů. Publi.cz – platforma pro multimediální eBooky [online]. <https://publi.cz/books/184/03.html>
- [41] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>
- [42] Technologie II. [online] Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/05.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/05.htm)
- [43] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/05.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/05.htm)
- [44] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <http://www.injectionmoulding.org/how-to-adjust-the-plastic-injection-mould.html>
- [45] LORRAINE, F. Francis. Materials Processing. Academic Press, 2016. str. 343-414. ISBN 9780123851321
- [46] [obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.globaltanks.com.au/rotational-moulding-and-injection-moulding-design-and-project-differences/>
- [47] CRAWFORD, Roy J.; Throne, James L. Rotational molding technology. William Andrew Publishing. 2002. str. 111-148. ISBN 9781884207853.
- [48] KUTA, Antonín. Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů. VŠCHT Praha, 2007. str. 15-145. ISBN 9788070803677.

[49][obrázek-online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/02.html>

[50] HILL, W. Loren. Calculation of crosslink density in short chain networks in Progress in Organic Coatings (31). Oxford: Elsevier Science, 1997.



## SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1 Granule čistého polyethylenu <sup>[3]</sup> .....	11
Obr. 2 Schéma aparatury pro výrobu LDPE <sup>[6]</sup> .....	12
Obr. 3 Trubkový reaktor pro LDPE <sup>[7]</sup> .....	13
Obr. 4 Autokláv <sup>[8]</sup> .....	14
Obr. 5 Rozvětvený LDPE <sup>[9]</sup> .....	14
Obr. 6 Výrobky z LDPE <sup>[10]</sup> .....	15
Obr. 7 Trubky <sup>[13]</sup> .....	17
Obr. 8 Svodové potrubí <sup>[14]</sup> .....	17
Obr. 9 Rozdíl mezi bimodální a singlemodální distribucí molekulové hmotnosti <sup>[15]</sup> .....	17
Obr. 10 Větvení řetězců u jednotlivých typů polyethylenu <sup>[17]</sup> .....	18
Obr. 11 Průtažné fólie <sup>[19]</sup> .....	18
Obr. 12 Nadmolekulární struktura UHMWPE <sup>[21]</sup> .....	19
Obr. 13 Kloubní jamka <sup>[23]</sup> .....	20
Obr. 14 Nákres kloubního spojení <sup>[24]</sup> .....	20
Obr. 15 Porovnání struktury řetězců (lineární, rozvětvený a zesíťovaný polymer) <sup>[27]</sup> .....	20
Obr. 16 Proces síťování peroxidy <sup>[29]</sup> .....	21
Obr. 17 Dikumylperoxid <sup>[31]</sup> .....	22
Obr. 18 Princip vzniku síťovaného polyethylenu silanovými činidly <sup>[30]</sup> .....	23
Obr. 19 Schéma výroby síťovaného PE procesem Monosil <sup>[33]</sup> .....	24
Obr. 20 Schéma výroby síťovaného PE procesem Siopal <sup>[34]</sup> .....	25
Obr. 21 Surlyn <sup>[37]</sup> .....	26
Obr. 22 Pomerančová kůra na povrchu polyethylenu <sup>[39]</sup> .....	27
Obr. 23 Závislost tlaku v dutině formy na čase při vstřikování <sup>[41]</sup> .....	28
Obr. 24 Průběh p-v-T diagram vstřikovacího cyklu .....	30
Obr. 25 Vstřikovací stroj <sup>[43]</sup> .....	31
Obr. 26 Vstřikovací forma <sup>[44]</sup> .....	32
Obr. 27 Forma a pec pro rotomoulding <sup>[46]</sup> .....	32
Obr. 28 Jednotlivé kroky zpracování rotačním tvarováním <sup>[45]</sup> .....	33
Obr. 29 Teplotní průběh rotomouldingu <sup>[45]</sup> .....	33
Obr. 30 Nákres stroje typu Rock and Roll <sup>[47]</sup> .....	35
Obr. 31 Nákres stroje typu Clamshell <sup>[47]</sup> .....	35
Obr. 32 Nákres stroje typu Shuttle <sup>[47]</sup> .....	36
Obr. 33 Jednošnekový extrudér <sup>[49]</sup> .....	37
Obr. 34 Trhací stroj MTS-4/M .....	41
Obr. 35 Hlavy na měření ohybu .....	42
Obr. 36 Kyvadlové kladivo typu PIT 501J-3 .....	42
Obr. 37 Tvrdoměr Nemesis 9000 .....	43
Obr. 38 Přístroj pro měření TMA .....	44
Obr. 39 Rovnice výpočtu stupně zesíťení <sup>[50]</sup> .....	45
Obr. 40 Přístroj pro měření TMA .....	45
Obr. 41 Optický mikroskop .....	46
Obr. 42 Analytické váhy .....	46
Obr. 43 Vzorek RX 102 (rotomoulding) .....	81
Obr. 44 Vzorek směs (rotomoulding) .....	82
Obr. 45 Vzorek XL 400 (rotomoulding) .....	82
Obr. 46 Vzorek RX 102 (vstřikování) .....	83
Obr. 47 Vzorek směs (vstřikování) .....	83
Obr. 48 Vzorek XL 400 (vstřikování) .....	84

Obr. 49 Vzorek RX 102 (vstřikování) po 6 měsících v benzínu .....	84
Obr. 50 Vzorek směs (rotomoulding) po 6 měsících v benzínu .....	85
Obr. 51 Vzorek směs (rotomoulding) po 6 měsících v naftě.....	85
Obr. 52 Vzorek XL 400 (vstřikování) po 6 měsících v naftě .....	86
Obr. 53 Vzorek RX 102 (rotomoulding) po 6 měsících v brzdové kapalině.....	86
Obr. 54 Vzorek RX 102 (vstřikování) po 6 měsících v chladící kapalině.....	87
Obr. 55 Infračervená spektra polyethylenů.....	88

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Přehled jednotlivých typů polyethylenů .....	12
Tab. 2 Časový interval měření chemické odolnosti.....	47
Tab. 3 Hodnoty zkoušky v tahu (rotomoulding).....	48
Tab. 4 Hodnoty zkoušky v tahu (vstřikování) .....	48
Tab. 5 Hodnoty zkoušky v ohybu (rotomoulding) .....	49
Tab. 6 Hodnoty zkoušky v ohybu (vstřikování) .....	50
Tab. 7 Rázová houževnatost (rotomoulding).....	51
Tab. 8 Rázová houževnatost (vstřikování) .....	51
Tab. 9 Tvrdost dle Brinella a Vickerse (rotomoulding).....	52
Tab. 10 Tvrdost dle Brinella a Vickerse (vstřikování) .....	52
Tab. 11 Změna hmotnosti polyethylenových tělísek v benzínu .....	53
Tab. 12 Procentuální změny hmotnosti polyethylenových tělísek v benzínu.....	54
Tab. 13 Změna hmotnosti polyethylenových tělísek v naftě .....	54
Tab. 14 Procentuální změny hmotnosti polyethylenových tělísek v naftě .....	55
Tab. 15 Změna hmotnosti polyethylenových tělísek v brzdové kapalině.....	55
Tab. 16 Procentuální změny hmotnosti polyethylenových tělísek v brzdové kapalině.....	56
Tab. 17 Změna hmotnosti polyethylenových tělísek v chladicí kapalině.....	56
Tab. 18 Procentuální změny hmotnosti polyethylenových tělísek v chladicí kapalině .....	57
Tab. 19 Změna tvrdosti dle Brinella rotomouldingových vzorků (benzín) .....	63
Tab. 20 Změna tvrdosti dle Brinella vstřikovaných vzorků (benzín) .....	64
Tab. 21 Změna tvrdosti dle Vickerse rotomouldingových vzorků (benzín).....	64
Tab. 22 Změna tvrdosti dle Vickerse vstřikovaných vzorků (benzín).....	65
Tab. 23 Změna tvrdosti dle Brinella rotomouldingových vzorků (nafta).....	65
Tab. 24 Změna tvrdosti dle Brinella vstřikovaných vzorků (nafta).....	66
Tab. 25 Změna tvrdosti dle Vickerse rotomouldingových vzorků (nafta) .....	66
Tab. 26 Změna tvrdosti dle Vickerse vstřikovaných vzorků (nafta) .....	67
Tab. 27 Změna tvrdosti dle Brinella rotomouldingových vzorků (brzdová kapalina) .....	67
Tab. 28 Změna tvrdosti dle Brinella vstřikovaných vzorků (brzdová kapalina) .....	68
Tab. 29 Změna tvrdosti dle Vickerse rotomouldingových vzorků (brzdová kapalina) .....	68
Tab. 30 Změna tvrdosti dle Vickerse vstřikovaných vzorků (brzdová kapalina).....	69
Tab. 31 Změna tvrdosti dle Brinella rotomouldingových vzorků (chladicí kapalina).....	69
Tab. 32 Změna tvrdosti dle Brinella vstřikovaných vzorků (chladicí kapalina) .....	70
Tab. 33 Změna tvrdosti dle Vickerse rotomouldingových vzorků (chladicí kapalina) .....	70
Tab. 34 Změna tvrdosti dle Vickerse vstřikovaných vzorků (chladicí kapalina) .....	71
Tab. 35 Procentuální změna tvrdosti dle Brinella po 6 měsících (benzín).....	75
Tab. 36 Procentuální změna tvrdosti dle Brinella po 6 měsících (nafta).....	75
Tab. 37 Výchozí hodnoty zkoušky ohybu (rotomoulding).....	77
Tab. 38 Výchozí hodnoty zkoušky ohybu (vstřikování).....	77
Tab. 39 Zkouška v ohybu polyethylenových tělísek (rotomoulding) v benzínu .....	77
Tab. 40 Hodnoty zkoušky v ohybu polyethylenových tělísek (vstřikování) v benzínu .....	77
Tab. 41 Zkouška v ohybu polyethylenových tělísek (rotomoulding) v naftě .....	77
Tab. 42 Zkouška v ohybu polyethylenových tělísek (vstřikování) v naftě.....	77
Tab. 43 Zkouška v ohybu polyethylenových tělísek (rotomoulding) v brzdové kapalině .....	78
Tab. 44 Zkouška v ohybu polyethylenových tělísek (vstřikování) v brzdové kapalině .....	78
Tab. 45 Zkouška v ohybu polyethylenových tělísek (rotomoulding) v chladicí kapalině.....	78
Tab. 46 Zkouška v ohybu polyethylenových tělísek (vstřikování) v chladicí kapalině .....	78
Tab. 47 Hodnoty $T_m$ a $T_g$ .....	87

## SEZNAM GRAFŮ

Graf. 1 Porovnání meze pevnosti v tahu.....	48
Graf. 2 Porovnání tažnosti .....	49
Graf. 3 Srovnání meze pevnosti v ohybu.....	50
Graf. 4 Porovnání průhybu .....	50
Graf. 5 Porovnání rázové houževnatosti.....	51
Graf. 6 Srovnání tvrdosti dle Brinella.....	52
Graf. 7 Změny hmotnosti RX 102 (rotomoulding).....	57
Graf. 8 Změny hmotnosti směsi (rotomoulding) .....	58
Graf. 9 Změny hmotnosti XL 400 (rotomoulding).....	58
Graf. 10 Změny hmotnosti RX 102 (vstřikování).....	59
Graf. 11 Změny hmotnosti směsi (vstřikování).....	60
Graf. 12 Změny hmotnosti XL 400 (vstřikování).....	60
Graf. 13 Porovnání změny hmotnosti polyethylenů (benzin).....	61
Graf. 14 Porovnání změny hmotnosti polyethylenů (nafta) .....	62
Graf. 15 Porovnání změny hmotnosti polyethylenů (brzdová kapalina).....	62
Graf. 16 Porovnání změny hmotnosti polyethylenů (chladící kapalina) .....	63
Graf. 17 Změny tvrdosti dle Brinella RX 102 (rotomoulding).....	71
Graf. 18 Změny tvrdosti dle Brinella směsi (rotomoulding) .....	72
Graf. 19 Změny tvrdosti dle Brinella XL 400 (rotomoulding).....	72
Graf. 20 Změny tvrdosti dle Brinella RX 102 (vstřikování).....	73
Graf. 21 Změny tvrdosti směsi dle Brinella (vstřikování) .....	74
Graf. 22 Změny tvrdosti dle Brinella XL 400 (vstřikování).....	74
Graf. 23 Tvrdost dle Brinella po 6 měsících (benzin) .....	75
Graf. 24 Tvrdost dle Brinella po 6 měsících (nafta) .....	76
Graf. 25 Mez pevnosti rotomoulding (ohyb).....	79
Graf. 26 Průhyb při max rotomoulding (ohyb).....	79
Graf. 27 Mez pevnosti vstřikování (ohyb).....	80
Graf. 28 Průhyb při max vstřikování (ohyb).....	80

## SEZNAM ZNAKŮ A ZKRATEK

D – průměr (*diameter*)

DMA – dynamická mechanická analýza

HDPE – vysoko-hustotní polyethylen

HMWPE – polyethylen s vysokou molekulovou hmotností

L – délka (*length*)

LDPE – nízko-hustotní polyethylen

LLDPE – lineární polyethylen s nízkou hustotou

MDPE – polyethylen se střední hustotou

MFI – index toku taveniny

PE-XA – polyethylen zesíťovaný peroxidy

PE-XB – polyethylen zesíťovaný silanovými činidly

PE-XC – polyethylen zesíťovaný UV zářením

PTFE – polytetrafluorethylen

$T_g$  – teplota skelného přechodu

$T_m$  – teplota tání

TMA – termomechanická analýza

UHMWPE – polyethylen s ultra vysokou molekulovou hmotností

ULDPE – polyethylen s velmi nízkou hustotou

UV – ultrafialové záření

XLPE – zesíťovaný polyethylen