

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Výzkum polymerních kompozitních materiálů

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Autor práce: **Bc. Jan Pelinka**

© 2021 ČZU v Praze

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jan Pelinka

Zemědělská specializace
Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Výzkum polymerních kompozitních materiálů

Název anglicky

Research on polymeric composite materials

Cíle práce

Cílem diplomové práce je výzkum mechanických vlastností polymerních kompozitních materiálů podpořený obrazovou analýzou s důrazem na jejich ekonomické zhodnocení a použití v praxi. Student shromáždí literární poznatky o předmětné problematice. Vlastní experimentální část bude věnována výzkumu zejména v prostorách laboratoří katedry.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

Kompozitní materiály, mechanické vlastnosti, SEM, testování, vyztužující fáze

Doporučené zdroje informací

ÅSTRÖM, B. T.: Manufacturing of Polymer Composites. London: Chapman & Hall, 1997.

Časopis: International Journal of Adhesion and Adhesives, Composite structures, Research in Agricultural Engineering, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing Technology, Surface and Coating Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Strojírenská technologie, The journal of adhesion, Journal of material science, The Journal of Physical Chemistry, International Journal of Fatigue, Journal of materials processing technology, Polymer Degradation and Stability, Manufacturing technology

JANČÁR, J.: Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1.vydání. Brno: VUT – Brno, 2003.

LAŠ, V.: Mechanika kompozitních materiálů. 1.vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004.

LENERT, J.: Mechanika kompozitních materiálů. Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2002.

MACHEK, V., SODOMKA, J.: Polymery a kompozity s polymerní maticí. 1.vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008.

Normy, sborníky z konferencí, firemní literatura

Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 12. 1. 2019

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 14. 05. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Výzkum polymerních kompozitních materiálů vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“.

Vdne

Podpis autora

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval především mému výbornému vedoucímu diplomové práce, pomocí něž jsem vypracoval tuto práci včas, s potřebnými informacemi v dané problematice a jehož odborná pomoc, užitečné rady a průběžná konzultace vedly nejen k úspěšnému dokončení této práce, ale také mě motivovaly a zdravě postrčily k tomu znovu objevit lásku k oboru strojírenství. Dále bych chtěl poděkovat celé České zemědělské univerzitě a jejímu personálu za možnost publikovat toto dílo a zároveň za možnost být součástí studií na této univerzitě. Rád bych také poděkoval své rodině a přátelům za pevné nervy a nápomocné rady v období, ve kterém byla tato práce vypracována. V neposlední řadě bych rád poděkoval společnosti ETW s.r.o. která mi poskytla materiál pro technologii vstřikování, konkrétně pak panu Tomáši Loudovi, který mi byl nápomocen při výběru materiálu. Pevně věřím a zároveň doufám, že tato práce přinese zajímavé poznatky do života těch, kteří ji přečtou, a to jak široké veřejnosti, tak i odborníkům ve svém oboru.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je výzkum mechanických vlastností polymerních kompozitních materiálů podpořený obrazovou analýzou s důrazem na jejich ekonomické zhodnocení a použití v praxi. Student shromáždil literární poznatky o předmětné problematice. Vlastní experimentální část byla věnována výzkumu zejména v prostorách laboratoří katedry, kde byly pomocí přístrojů na měření tahových vlastností materiálu a přístroje pro měření tvrdosti, stanoveny mechanické vlastnosti daných materiálu, součástí práce bylo srovnání 4 různých granulátů, použitých pro vstřikování, z nichž 3 jsou recykláty různé kvality a jeden běžně používaný čistý LDPE granulát, který se běžně užívá v komerční výrobě. V práci byla důkladně rozebrána problematika znečišťování životního prostředí vlivem výroby polymerních materiálů a jejich zpracování, na základě čehož byl také vybrán granulát pro výrobu technologií vstřikování, zmiňovaný výše. Dále byla v ekonomické části této práce zhodnocena, za použití vícekritériální analýzy, vhodnost použití jednotlivých materiálů, s ohledem na cenu, kvalitu, mechanických vlastností a dalších kritérií. Na základě této práce bylo zjištěno, že granulát z recyklátu dosahuje lepších hodnot v mechanických i ekonomických aspektech než čistý materiál pro vstřikování polymerů a byl doporučen minimálně další výzkum, který by mohl tyto materiály zařadit do běžné komerční výroby s různými požadavky na konečné výrobky.

Klíčová slova: Kompozitní materiály, mechanické vlastnosti, SEM, testování, vyztužující fáze.

Research on polymeric composite materials

Summary

The aim of the diploma thesis is the research of mechanical properties of polymeric composite materials supported by image analysis with emphasis on their economic evaluation and use in practice. The student gathered literary knowledge about the subject matter. The experimental part was devoted to research, especially in the laboratories of the department, where the mechanical properties of the material were determined using instruments for measuring the tensile properties of materials and instruments for measuring hardness, part of the work was a comparison of 4 different granules used for injection various qualities and one commonly used pure LDPE granulate, which is commonly used in commercial production. The work thoroughly analyzed the issue of environmental pollution due to the production of polymeric materials and their processing, on the basis of which was also selected granulate for the production of injection molding technologies, mentioned above. Furthermore, in the economic part of this work was evaluated, using multicriteria analysis, the suitability of the use of individual materials, with respect to price, quality, mechanical properties and other criteria. Based on this work, it was found that recycled granulate achieves better values in mechanical and economic aspects than pure polymer injection material and recommended at least further research that could include these materials in normal commercial production with different requirements for final products.

Keywords: Composite materials, mechanical properties, SEM, testing, reinforcing phases.

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod..... | 1 |
| 2 | Literární Rešerše..... | 3 |
| 2.1 | Kompozitní koncepce..... | 3 |
| 2.2 | Vazby v polymerních materiálech..... | 5 |
| 2.2.1 | Kovalentní vazba..... | 6 |
| 2.2.2 | Molekulární (Van den Waalsova) vazba..... | 11 |
| 2.2.3 | Vodíková Vazba..... | 11 |
| 2.3 | Chemie polymerních řetězců..... | 12 |
| 2.3.1 | Struktura krystalických polymerů a vláken..... | 13 |
| 1.1 | | 15 |
| 2.4 | Různorodost polymerů..... | 15 |
| 2.5 | Polymery a přísady..... | 16 |
| 2.5.1 | Změkčovadla..... | 16 |
| 2.5.2 | Stabilizátory..... | 17 |
| 2.5.3 | Plniva..... | 17 |
| 2.5.4 | Retardéry hoření..... | 18 |
| 2.5.5 | Barviva..... | 18 |
| 2.6 | Kompozity s polymerní matricí..... | 18 |
| 2.7 | Výrobky z polymerů..... | 20 |
| 2.7.1 | Dělení Polymerů..... | 25 |
| 2.8 | Polyethyleny (LDPE, HDPE, PE)..... | 32 |
| 2.8.1 | Výroba a charakteristika HDPE a LDPE..... | 32 |
| 2.8.2 | Výroba vysokotlakého, nízkohustotního LDPE..... | 33 |
| 2.8.3 | Výroba nízkotlakého (vysokohustotního) HDPE..... | 34 |
| 2.8.4 | Zpracování Polyethylenů..... | 34 |
| 2.9 | Úvod do problematiky plastového odpadu..... | 36 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.9.1 | Mikroplasty..... | 37 |
| 2.9.2 | Recyklační symboly plastů..... | 39 |
| 2.9.3 | Dělení plastových produktů: | 39 |
| | • PET..... | 40 |
| | • HDPE..... | 40 |
| | • PVC..... | 40 |
| | • LDPE | 40 |
| | • PP | 40 |
| | • PS..... | 40 |
| | • OSTATNÍ PLASTY | 40 |
| 2.9.4 | Recyklační symboly kompozitních polymerů | 41 |
| 3 | Cíl Práce | 43 |
| 4 | Metodika práce..... | 44 |
| 5 | Praktická část práce..... | 44 |
| 5.1 | Výroba..... | 45 |
| 5.1.1 | Vstřikování plastů (ČSN EN ISO 294-2 (640210))..... | 45 |
| 5.1.2 | Volba materiálu výstřiku..... | 48 |
| 5.1.3 | Faktory ovlivňující výběr materiálu výstřiku – požadavky na materiál | 49 |
| 5.1.4 | Stárnutí a koroze dílů z plastů | 50 |
| 5.1.5 | Faktory ovlivňující dobu životnosti plastových dílů..... | 51 |
| 5.2 | Technologie vstřikování | 52 |
| 5.2.1 | Fáze cyklu vstřikování | 53 |
| 5.2.2 | Fáze plastikační..... | 53 |
| 5.2.3 | Fáze vstřikovací..... | 54 |
| 5.2.4 | Fáze dotlaková | 55 |
| 5.2.5 | Fáze ochlazovací | 55 |
| 5.3 | Postup při výrobě prvních výstřiků | 56 |
| 5.3.1 | Příprava vstřikování | 56 |
| 5.3.2 | První nastavení strojních a technologických parametrů vstřikování | 57 |

| | | |
|-------|---|-----------|
| 5.3.3 | Výroba prvních výstřiků | 58 |
| 5.3.4 | První optimalizace vstřikovacího procesu | 58 |
| 5.3.5 | Vstřikovací stroj | 59 |
| 5.4 | Plastové obaly a jejich alternativy | 61 |
| 5.4.1 | Třídění a recyklace vysokotlakého (nízkohustotního) polyethylenu..... | 64 |
| 5.4.2 | LDPE - recyklace..... | 64 |
| 5.5 | Ekonomické zhodnocení a použití v praxi..... | 66 |
| 5.5.1 | Vícekritériální analýza dat | 67 |
| | <i>Zdroj Tabulka 1-3: Vlastní tvorba</i> | <i>68</i> |
| 5.6 | Měření a výroba v laboratořích | 69 |
| 5.6.1 | Zkouška tvrdosti | 69 |
| 5.6.2 | Zkouška tahem..... | 72 |
| 5.6.3 | Naměřené hodnoty v laboratořích | 74 |
| 6 | Závěr | 82 |
| 7 | Použitá Literatura | 84 |

1 Úvod

Polymery z přírodního materiálu, jejichž příkladem může být například bavlna, dřevo, vlna, slonovina, nebo kůže používali lidé tisíce let. Nezabývali se prakticky ničím, než jejich užitečnými vlastnostmi. Vše se změnilo nástupem vědy s moderními nástroji během průmyslového období, kdy se lidé začali zajímat o strukturu polymerů a kdy Berkelid přišel na způsob, jak synteticky vyrobit první umělý polymer. Byl to vůbec první polymer s technickým využitím. Tento polymer později dostal jméno bakelit. Tímto objevem se začalo o polymery zajímat více a více odvětví a vědců, a především nově i chemiků. Ti tehdy začali připravovat nové polymery pomocí syntézy drobných organických molekul. V inženýrské praxi se ve velkém objevili polymery s příchodem první a druhé světové války, respektive zejména v poválečném období. Na akademické půdě se objevuje studium polymerů až v padesátých letech 20. století, kdy vznikají odborná výzkumná pracoviště, zabývající se především vlastnostmi a strukturou polymerů a tvoří se tak základy vědy o polymerech neboli anglicky Physical Polymer Science. Ne dlouho poté věda a praxe ověřuje, že syntetické polymery dokáží poměrně snadno svými vlastnostmi nahradit polymery přírodní, ale také přichází k objevu, že polymery mohou konkurovat a mnohdy dosahovat dokonce lepších vlastností, než kovy, sklo, nebo keramika. To byl veliký zvrat v inženýrství a strojírenství, jelikož polymery se dají vyrábět z dostupných a zejména levných surovin a zároveň se snadno zpracovávají. Dochází tedy k obrovskému rozvoji polymerních materiálů a dnes se polymery běžně zahrnují do kategorie tzv. civilizačních materiálů, jako tomu bylo dříve u bronzu a následně pak u slitin železa. (1)

V současnosti do kompozitních materiálů řadíme takové materiály, jejichž složení obsahuje dva, nebo více složek, složky jsou nejen z kompletně odlišného chemického složení, ale zároveň mají i zcela odlišné fyzikální vlastnosti.

Jejich základní součástí je tzv. matrice, tj. spjitá fáze, v níž jsou uloženy tzv. fáze vyztužující, tvořené obvykle vlákny nebo částicemi různého druhu a použití. Od slitin kovů se kompozity liší tím, že jednotlivé složky vložené do systému si ponechávají své přednostní materiálové charakteristiky, které nemohou být dosaženy jiným běžným složením. Vlastnosti kompozitu jsou pak dány jednak vlastnostmi těchto jednotlivých složek, jednak vzájemnou akcí jejich povrchů, protože vyztužná fáze působí jako armatura. Vlastní matrice musí mít dobrou soudržnost s vyztužnou matricí a obvykle má i menší pevnost a vyšší plastické vlastnosti.

Podle druhu matrice se užívají kompozity s matricí kovovou, polymerní nebo s matricí na bázi skel nebo keramiky. (2) V současné době se polymery využívají hojně ve světě pro výrobu různých produktů, jejich hlavní výhody jsou snadná a nízkonákladová výroba, lehká

opracovatelnost, rychlost výroby a jejich všestranné využití a rozmanitost druhů. S roční produkcí tohoto materiálu jsou však spojeny i negativní účinky tohoto materiálu na životní prostředí, dochází ke kontaminaci půdy, vodních toků a dalších druhů environmentálních zdrojů. Polymerní materiály se ve většině případů nesnadno recyklují, a pokud jde o kompozitní materiály, tak u nich dokonce často nejsme schopni materiál recyklovat vůbec.

V tuto chvíli je hlavním zájmem výzkumu v České republice objevovat nové způsoby využití odpadů a recyklátů a proto pro výše uvedené důvody si tato diplomová práce klade za cíl, výzkum kompozitního recyklovaného polymerního materiálu a jeho vlastností a možnosti použití v praxi tak, aby byl efektivně zpracován a využit odpad z polymerních materiálů. Proto byl pro praktickou část vybrán materiál recyklovaný LDPE, který se vyrábí z fólií a dalších těžce zpracovatelných plastových odpadů, pro lepší porovnání bylo zpracováno více recyklátů a jeden materiál přírodní, který je přímo vyráběn právě pro použitou technologii vstřikování. V teoretické části této práce byly definovány pojmy z oblasti polymerních kompozitních materiálů a byla řešena problematika výroby a zpracování plastů, stejně jako jejich zpracování a recyklace, na základě použité odborné literatury. Praktická část práce se zabývá samotnou výrobou materiálu a z větší části je tvořena měřeními v laboratořích technické fakulty na České zemědělské univerzitě. Konkrétněji pak budou v praktické části porovnány 4 různé materiály pro výrobu produktů z různých druhů plastů se zaměřením na recykláty a konkrétně kategorii polyethylenů. Bude zde uveden výsledek testování a výroby materiálu v laboratořích, s ekonomickým zhodnocením a důrazem na porovnání mechanických vlastností a ekonomického využití daných materiálů při komerční výrobě.

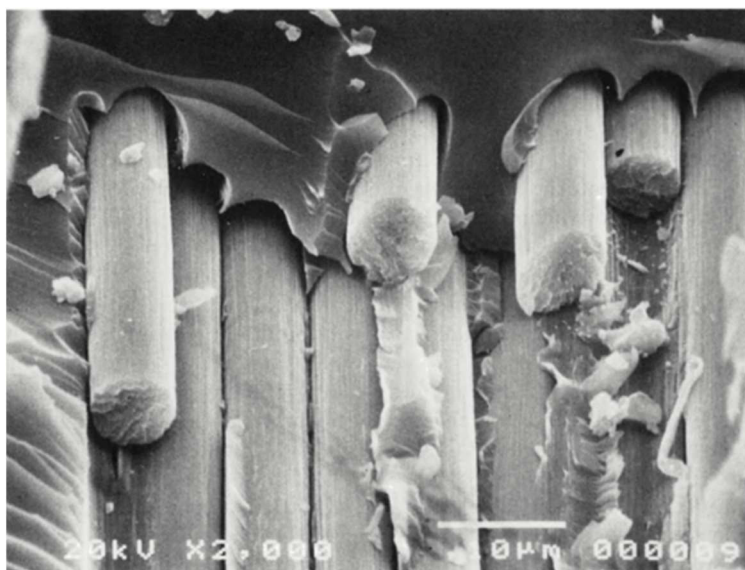
2 Literární Rešerše

2.1 Kompozitní koncepce

V nosných nebo konstrukčních aplikacích kompozity ve většině případů obsahují objemovou fázi obklopující vláknitou výztužnou fázi; neboli v konvenční terminologii jde o matici a výztuž. Cílem matice je integrovat dohromady výztuž tak, aby účinně působila na výztuž vnějším zatížením a chránila ji před nepříznivými vlivy prostředí. I když matice dává kompozitu svůj tvar, vzhled povrchu, toleranci prostředí (vůči vysoké teplotě, vodě, ultrafialovému světlu atd.) a celkovou trvanlivost, je to vláknitá výztuž, která nese většinu strukturálních zatížení, a tak do značné míry určuje makroskopickou tuhost a pevnost. Ačkoli v každodenním životě lze rozlišit řadu příkladů kompozitního konceptu, včetně papíru, kraftového papíru, dřevotřískových (třískových) desek a železobetonu, abychom zmínili jen několik, nejvíce specializované inkarnace jsou těmi, které jsou hlavním předmětem této knihy. Prakticky všechny úspěšné strukturální kompozity mají umělé složky. Matrice může být kovového, keramického nebo polymerního původu. Zatímco kovové a do jisté míry i keramické matrice se používají ve strukturálních kompozitních aplikacích, polymerní matice jsou v současné době velmi významnou kategorií matric, a proto se tato kniha soustředí na polymerní kompozity. Existují dva hlavní

rodiny polymerů; termosety a termoplasty. Drtivá většina současných kompozitních aplikací využívá termosety, které tuhnou chemickou reakcí zvanou zesíťování nebo vytvrzování. Termoplasty se liší v tom, že je možné je roztavit, a proto tuhnou ochlazením taveniny, aniž by došlo k jakékoli chemické reakci. V kompozitech polymer-matice jsou běžnými typy výztuže (v pořadí podle klesající důležitosti) sklo, uhlík a polymer. Kompozitní výztuž může být diskontinuální („krátká vlákna“) nebo spojitá („nekonečná vlákna“) a náhodně orientovaná nebo vyrovnaná, viz Obr. č. 1. (2)

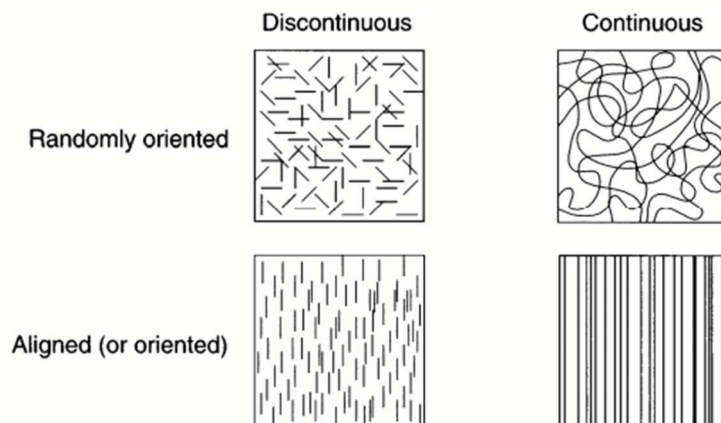
Obr. č. 1: Řez povrchem kontinuálního uhlíkového vlákna v kompozitu vyztuženého uhlíkovými vlákny.



Zdroj: Kniha: Manufacturing of Polymer Composites, B. T. Astrom

Protože výztuž je primární nosnou složkou, je její konfigurace (forma a stupeň orientace v matici) rozhodující pro makroskopické vlastnosti kompozitu. Není proto žádným překvapením, že se vyskytují výborné mechanické vlastnosti u kompozitů se spojitou a vyrovnanou výztuží, (viz obr. č. 2). I když jsou jasně strukturálně horší, kompozity s náhodně orientovanou výztuží jsou běžné jak v konstrukčních, tak v polostrukturálních aplikacích; to, zda je výztuž v takových kompozitech diskontinuální nebo spojitá, má ze strukturálního hlediska druhořadý význam. V mnoha aplikacích jsou různé konfigurace výztuže smíchány v jedné a stejné součásti. Pravděpodobně častým důvodem, proč se polymerní kompozity používají ve strukturálních aplikacích, je to, že nabízejí danou vlastnost, často tuhost, při nižší hmotnosti než konkurence, kterou je většinou kov, ale někdy i plast, dřevo nebo beton. Mluví se tedy o vynikající specifické tuhosti a pevnosti, tj. Vlastnosti normalizované s (děleno) hustotou. Existuje mnoho potenciálních výhod kompozitů kromě jejich vynikajících konstrukčních schopností, včetně odolnosti proti korozi, elektrické izolace, snížení nákladů na nástroje a montáž a mnoho dalších. (2)

Obr. č. 2 Schéma různých konfigurací výztuže.



Zdroj: Kniha: Manufacturing of Polymer Composites, B. T. Astrom

Je důležité si uvědomit, že tyto potenciální výhody předpokládají, že jsou zvoleny vhodné složky, protože pokud jsou vybrány nevhodné složky, výsledkem může být místo toho to, že složená alternativa bude mnohem horší. I když je snadné nechat se fascinovat potenciálními výhodami kompozitních materiálů, nesmíme ignorovat nevýhody, které jako každý materiál mají i polymerní kompozitní materiály. V zásadě lze říci, že pokud se neberou v úvahu náklady, polymerní kompozit může překonat jakýkoli jiný inženýrský materiál ve všech ohledech kromě teplotní tolerance. Málokdy však při jakékoliv produkci platí, že cena není brána v úvahu a v oblasti výroby materiálu a inženýrství tomu není jinak. Je tedy jasné, že inženýrství se nezaměřuje jen na vlastnosti materiálu, ale důležitá je cena a náklady spojené s výrobou. Proto je také třeba vzít v úvahu méně žádané vlastnosti kompozitů, jako jsou vysoké náklady na suroviny, nedostatek znalostí a zkušeností a obtížná výroba. Kompozity proto rozhodně nejsou vhodné pro všechny aplikace; vždy musí být provedeno kritické posouzení alternativ materiálu z hlediska poměru výkon / cena. Je vysoce nepravděpodobné, že pokles nákladů na suroviny způsobený samotným zvýšením objemu výroby způsobí, že kompozity budou přímo nákladově konkurenceschopné s jinými materiály v jakémkoli širokém spektru aplikací, ale pokud jde o znalosti, zkušenosti a výrobní záležitosti lze výrazně vylepšit proces k zvýšení konkurenceschopnosti kompozitů.

(2)

2.2 Vazby v polymerních materiálech

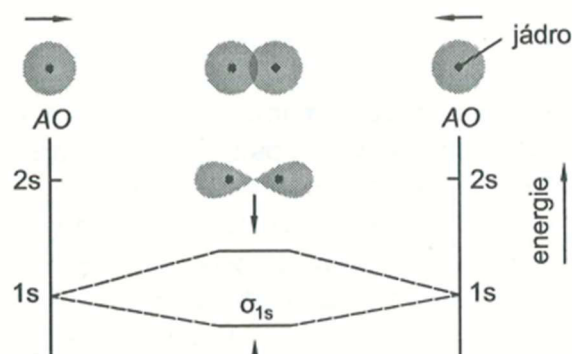
Podstatným a také výchozím bodem pro určování chemických a fyzikálních vlastností polymerů je znalost jejich struktury. Pro určování jejich struktury se musí zjistit, z jakých

molekul či atomů jsou kompozity složeny, další důležitým aspektem je zjištění, jak jsou tyto nejprimitivnější stavební částice uspořádány, jaké je jejich rozložení a jaké síly je vzájemně vážou k sobě. U některých polymerů je zapotřebí zkoumat složité struktury, a to zejména pak polymery, které se vyskytují jako kaučukovité elastomery, dále musíme podrobněji studovat polymery s vlákny s vysokou pevností, adheziva, povlaky, neboli veškeré materiály s různým využitím. Tyto struktury, jakožto nositelky charakteristických vlastností polymerů, jsou nejvíce závislé na druhu vazby. Vazebných sil v polymerech je mnoho, důležité z těchto vazeb jsou hlavně van der Waalsova, vodíková a kovalentní vazba a další vazby s nimi spojené. Jako první si v následujícím odstavci definujeme vazbu kovalentní. (3)

2.2.1 Kovalentní vazba

V Polymerech tato vazba tvoří hlavní vazební typ. Její základ tkví ve sdílení elektronů mezi dvěma atomy, tudíž se vytvářejí společné orbitály pro dva atomy. Dle kvantové mechaniky můžeme orbitál označovat za část prostoru, kde se může vyskytovat elektron s nenulovou pravděpodobností. Za velmi účinnou techniku, pro stanovení kovalentních vazeb můžeme považovat metodu molekulárních orbitálů. Tato metoda spočívá ve vytváření molekulárních orbitálů /MO/ ze známých atomových orbitálů /AO/ volných atomů 1s, 2s, 2p atd. Pokud se spojí minimálně dva atomy nebo více v molekulu, vzniknou příslušné MO z AO. Pouze MO s nejmenší energií jsou pak zaplněny valenčními elektrony atomů v molekule. Jak vzniká molekulární orbitál molekuly vodíku pak můžeme vidět na obrázku č. 3. Pro vysvětlení obrázku, MO molekuly vodíku vzniká překrytím atomového orbitálu 1s+ a 1s-, kde znaménka (+) a (-) vyznačují spiny elektronů s opačnou orientací. Zjednodušeně řečeno pak vyjádříme kvantově mechanický výpočet sečtením hustot těchto dvou atomových orbitálů, které tvoří vazebný MO. (2)

Obr. č. 3: Schéma tvorby vazby σ_{1s} MO v molekule vodíku z orbitálů 1s volných atomů.

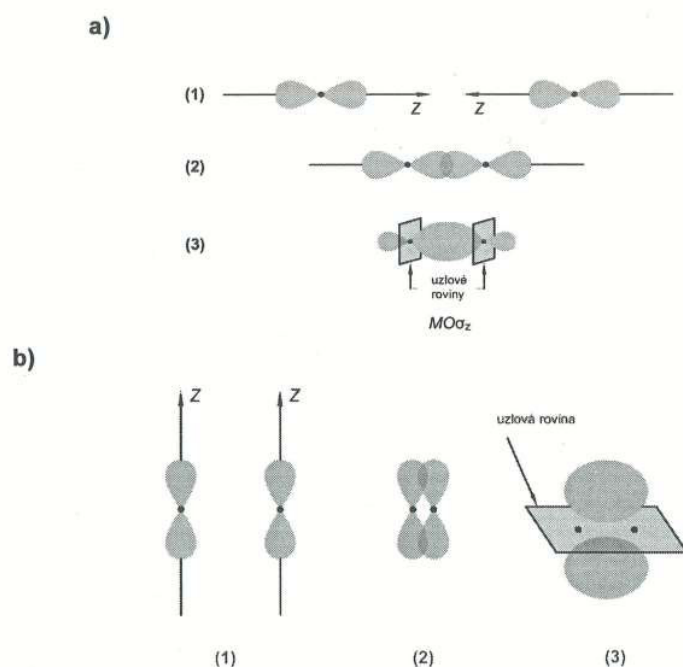


Zdroj: Polymery a kompozity polymerních maticí, Machek - Sodomka

Pokud vezmeme v potaz 2p atomového orbitálu, snadno přijdeme na to, že ka samotnému překrytí AO může dojít několika různými případy. Pokud se tedy překrývají dva atomové orbitály stejného typu 2p a například 2p_z hlava k hlavě jak můžeme vidět na obrázku 4a pak výsledkem bude MO σ_z a to z toho důvodu, že jejich uzlové roviny jsou oddělené a zároveň tvoří kolmici na osu z. V dalším případě však může nastat situace, že AO typu 2p_z se budou překrývat stranově, jak je vidět na obr. č. 4b, a výsledkem pak bude MO – σ , kde uzlové roviny budou společné. (2)

Obr. č. 4: a) Překrývání hlava k hlavě dvou AO 2p_z.

b) Stranové překrývání dvou 2p AO.

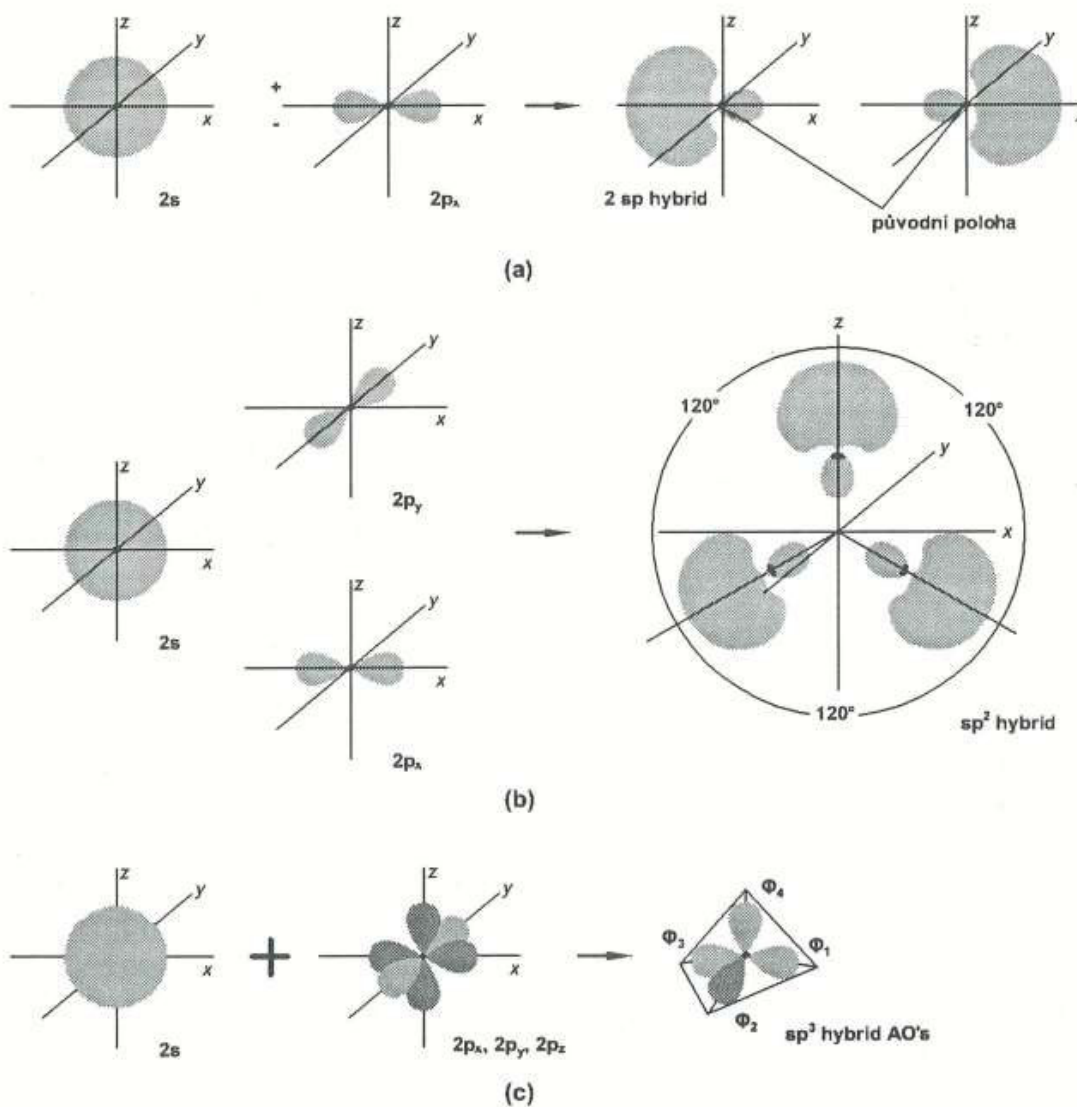


Zdroj: Polymery a kompozity polymerních maticí, Machek - Sodomka

Po překrytí orbitálu 3d vzniká opět MO – σ a MO – π . K tomu se však vytvoří ještě MO – δ . Občas se stane, že v atomech, které mají určité energetické hladiny blízké, dojde občas mezi nimi k recipročnímu působení (interakci) a také vzniknou hybridní AO. Může se tedy například stát, že AO-2s a 2p vytvoří po interakci hybridní AO-sp, který leží na přímce, jak můžeme vidět na Obr.č.5a. Pokud dojde k interakci mezi jedním 2s a dvěma AO - 2p, pak vznikne hybridní AO-sp² rovinného trojúhelníkového tvaru. Nakonec je možné aby došlo ke vzniku prostorového tetraedrického AO – sp³, vlivem hybridizace pomocí interakce mezi

jedním 2s a třemi AO-2p (Obr.č.5c). Takto směšované atomové orbitály jsou příčinou anizotropních a směrovaných charakterů v nespočtu kovalentních vazbách. (2)

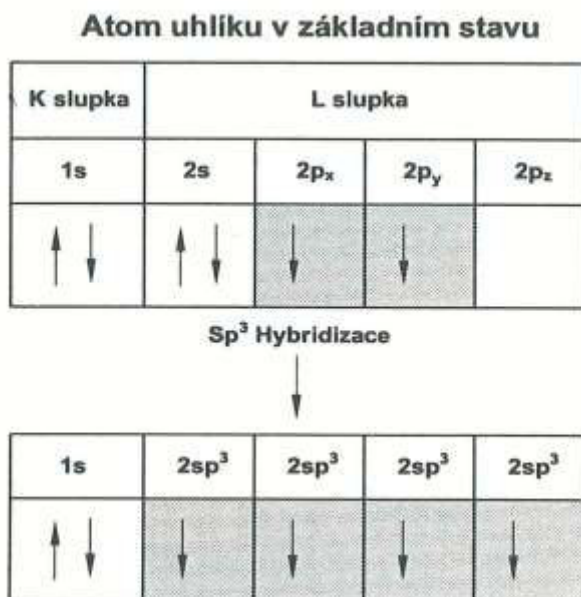
Obr. č. 5 a) Vytváření dvou lineárních sp hybridních AO, b) tří rovinných sp² hybridních AO, c) čtyř tetradrálních sp³ hybridních AO



Zdroj: Polymery a kompozity polymerních maticí, Machek – Sodomka

Jak vzniká hybridizace sp³ u uhlíků můžeme vidět při porovnání s jeho základním stavem. (Obr.č. 6)

Obr. č. 6 Čtyři hybridizované elektronové stavy $2sp^3$ vznikají ze čtyř elektronů v základním stavu $2s$, $2p_x$, $2p_y$.



Zdroj: Polymery a kompozity polymerních maticí, Machek – Sodomka

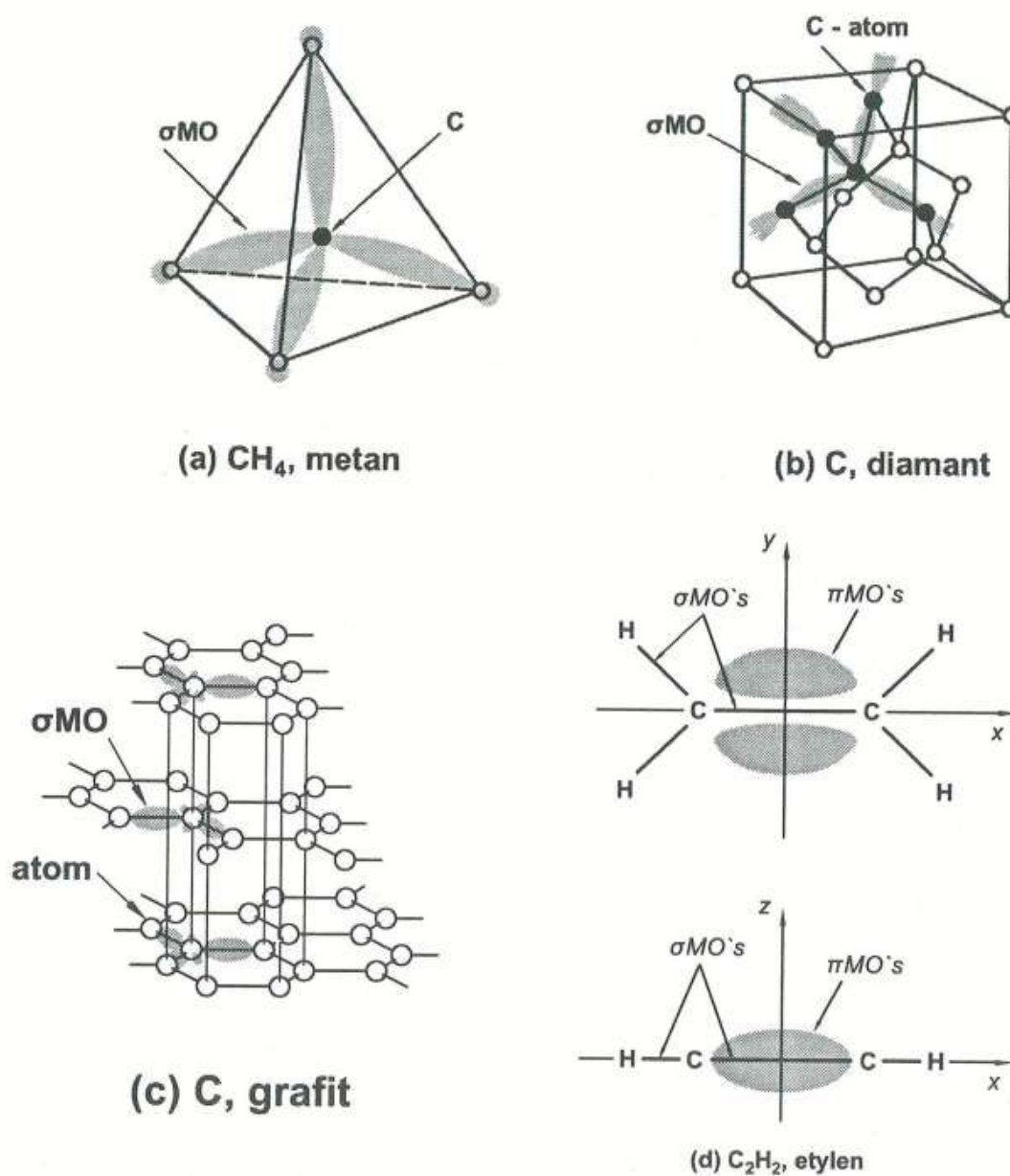
Molekulární orbitály několika příznačných látek zobrazených na Obr.č.7, ukazují směrovost a hybridizaci vazeb. V případě, že atom uhlíku v metanu CH_4 využije k sestavení MO s atomy H nehybridizovaných atomových orbitálů ($2s$, $2p_x$, $2p_y$, $2p_z$), vzniknou pak dva druhy vazeb. Původní tetragonální hybridizace sp^3 nám ale vytváří MO – σ jedné molekule a tím dochází ke snižování energie molekuly. (Obr.č.7a).

Germanium, uhlík a křemík jsou schopny vytvořit krystalické modifikace, kde všechny atomy jsou vázány ke čtyř susedním. V takovém případě jsou opět upřednostňovány tetraedrické AO a dochází k vytvoření diamantové kubické krystalické struktury, kterou můžeme sledovat na Obr.č.7b. Při normálních podmínkách se však stabilní uhlíková modifikace projeví jako grafit (Obr.č. 7c). Grafit obsahuje primárně atomy z nichž každý je vázán třemi susedními atomy uhlíku, jenž vytváří hybridní sp^2 konfiguraci. Pak je struktura grafitu vrstvená. Jednotlivé atomy ve vrstvě se k sobě vzájemně váží slabými druhořadými van der Waalsovými vazbami. Nakonec v posledním příkladu můžeme vidět, částečnou hybridizaci C_2H_4 etylenu (Obr.č.7d). V tomto případě nám tři z atomových orbitálů každého atomu vodíku utváří planární hybridy sp^2 a je zde zachován jeden AO-2p kolmý na jeho rovinu. MO – σ je tvořena čtyřmi atomy vodíku a uhlíkové atomy vytváří mezi sebou vazbu druhu – σ (C-C), při čemž využijí hybridů sp^2 . Zároveň však dochází k stranovému překrytí dvou MO - 2p (Obr.č.4b) při vzniku MO – π , které vytvářejí další vazbu mezi uhlíky C-C.

Především díky nesymetrické povaze MO – π , pak nedochází k rotování kolem dvojné uhlíkové vazby a je stabilizováno rovinné uspořádání etylenu.

Hodnota pevnosti jednotlivých vazeb při kovalentně vázaných molekul se odvíjí především od činitelů stupně iontového charakteru atomů, typu násobnosti vazeb (tj. jednoduchá apod.) a resonanci vazeb napříč jednotlivými pravděpodobnými v polohami. (2)

Obr. č. 7 Ukázky MO se silnou strukturální orientací vybraných důležitých látek.



Zdroj: Polymery a kompozity polymerních maticí, Machek – Sodomka

2.2.2 Molekulární (Van den Waalsova) vazba

Tato vazba funguje mezi molekulami, skládajíc se z atomů kovalentně vázaných. Předpokládáme při prvním přiblížení dipólové vzájemné reakci částic. K celkové dipólové přilnavosti částic se podílí tři základní procesy:

- Disperzní (Londonův)
- Orientační (Keesonův)
- Indukční (Bebyeův)

Orientační proces počítá s tím, že základní, celkově neutrální částice mají trvalé dipóly s dipólovými momenty. E_0 je pak potenciální energií v orientačním mechanismu při vzájemném působení mezi dvěma takovými částicemi.

Za předpokladu, že jedna z těchto částic, která vstupuje do interakce s druhou takovou neutrální částicí a má trvalý tzv. dipólový moment, pak dochází k indukci jejím elektrickým dipólovým polem dipólu v další částici. Jak dipól indukovaný, tak i dipól trvalý se přitahují a energie mezi nimi, neboli energie vzájemného působení E_i , je přímo závislá na stálém dipólovém momentu jedné částice, ale také na polarizovatelnosti druhé částice a v neposlední řadě na vzájemné vzdálenosti částic. K dipólové vzájemné reakci dochází za předpokladu, že dvě neutrální částice nemají trvalé dipólové momenty. Při přiblížení těchto částic nastává stav, kdy elektrony jedné částice se dostávají nejbližší k jádru částice druhé, zatímco elektrony druhé částice se nachází na opačné straně jádra. Tento stav nastává vlivem přitahování jádra jedné částice s elektrony obalu druhé částice a odpuzování elektronů obalu. V případě synchronizace oběhu se neutrální částice přetvářejí na dipóly, ty pak tvoří přitažlivé disperzní síly s energií E_d . Tyto síly pak přímo vychází ze závislosti na synchronní frekvenci elektronového obalu všech částic. Součtem tří jednotlivých složek získáme pomocí výpočtu naši celkovou energii vzájemného působení E_w .

$$E = E_0 + E_d + E_j$$

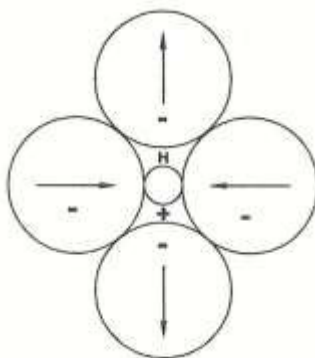
Molekulární síly mají malý dosah a dochází k jejich působení teprve ve chvíli, kdy se částice přiblíží na velmi malou vzdálenost. Tepelný pohyb pak částice snadno rozruší. (2)

2.2.3 Vodíková Vazba

Vodíková vazba vzniká ve chvíli, kdy dva elektronegativní atomy jsou k sobě přitahování pomocí vodíkového atomu. Ačkoliv vodíková vazba se neřadí do typu krystalové vazby, je charakteristická svými zvláštními vlastnostmi, díky čemuž je velmi důležitá. Energie vodíkových vazeb se pohybuje na dosti široké stupnici, čímž se také dosti mění vzdálenosti

mezi atomy utvořené právě touto vazbou. Vyjádřeno v číslech je energie vazby vodíkové o jeden řád větší než energie molekulové vazby a jeden řád nižší než kovalentní, kovové a iontové vazby. Vodíkovou vazbu můžeme tedy výhodněji považovat za iontovou vazbu. Z atomu vodíku mizí jeho elektron, ten se stane protonem, který se může obklopit ionty opačného znaménka v co největším počtu. V důsledku velmi malého poloměru protonu, stávají se jeho nejbližšími částicemi pouze dva ionty, ti brání pomocí svého rozměru a záporným nábojem v přitažlivosti dalších iontů. (Obr.č. 8) Vodíková vazba se tak stává směrovanou, proto lze v tuto chvíli formálně označit tuto vazbu za shodnou s kovalentní vazbou. Často se ke studiu vazeb používá rentgenografie, v případě vodíkových vazeb však používáme metodu neutronografickou, v důsledku slabé rozptylové schopnosti vodíku, díky které se vodík nedá rentgenograficky určovat. (2)

Obr. č. 8: Schéma vodíkové vazby – dochází k zamezení přitahování dalších iontů vlivem rozměrů dvou iontů.



Zdroj: Polymery a kompozity polymerních maticí, Machek – Sodomka

2.3 Chemie polymerních řetězců

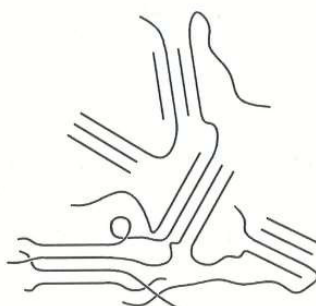
Struktura polymerů je závislá na několika faktorech, z nichž významné je především chemické složení základních částic, ty se stále v makromolekule opakují. Dalšími faktory jsou molární hmotnost a její distribuce, prostorové uspořádání atomů – konfiguraci, kterou můžeme měnit pomocí rotace kolem jednoduchých vazeb, a v neposlední řadě zde vystupuje tvar makromolekul.

Organické polymery jsou pak tvořeny základním skelete, kde skelet vytvářejí atomy S, O, C, N, na které se váží další atomy typu B, F, H, Cl atd. a dále různá atomová seskupení jako například CH_3 , $-\text{C}_6\text{H}_5$ apod. Oproti tomu pak základní skelet anorganických polymerů je vytvářen z různých anorganických prvků – Si a P například.

2.3.1 Struktura krystalických polymerů a vláken

V důsledků omezené pohyblivosti makromolekul v polymerech, dochází k nemožnosti přípravy těchto látek výhradně s krystalickou strukturou. Pomocí mnoha vědeckých experimentů došlo k prokázání výskytu menšího či většího množství amorfních podílů v každém polymeru, který je schopen krystalizace. Neboli můžeme říci, že každý polymer schopný krystalizace má určitý stupeň krystalinity. Vysvětlení této složité struktury bylo cílem mnoha modelů v průběhu několika desetiletí. Mezi první modely můžeme řadit tzv. model roztřepených micel. (Obr.č. 9)

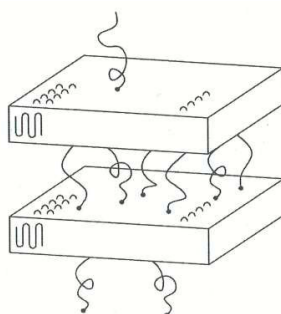
Obr. č. 9: Model roztřepených micel



Zdroj: Polymery a kompozity polymerních maticí, Machek – Sodomka

Řetězce zde procházejí určitým počtem krystalických a amorfních oblastí. Ke skutečnému objevu došlo roku 1957, kdy se Kellerovi podařilo vypěstovat monokrystal polyetylénu ze zředěného roztoku. Z této jeho práce vzniká model skládaných řetězců do lamel (Obr. č. 10). (2)

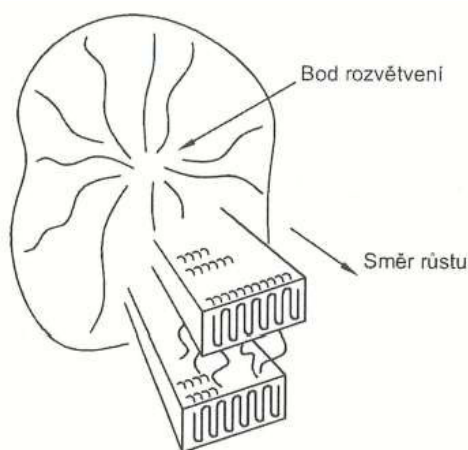
Obr. č. 10: Model skládaných řetězců do lamel



Zdroj: Polymery a kompozity polymerních maticí, Machek – Sodomka

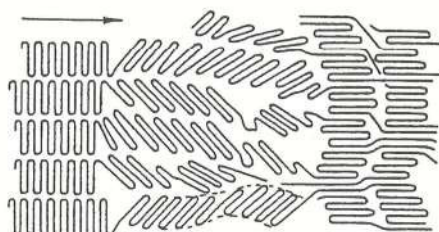
Ohyby nejsou tvořeny řetězci u celé řady polymerů, a tak dochází ke vzniku krystalů s napřímenými řetězci. Při krystalizaci polymerů či koncentrovaných roztoků se utváří tvary s radiálně vyrůstajícími lamelami, ty mají tvar nejbližší ke tvaru koule, můžeme je vidět na Obr. č. 11 a nazýváme je sferolity. Můžeme také pozorovat amorfní podíl, který vzniká mezi lamelami. Vlákna mají zvláštní strukturu, ty se zase skládají z zkrystalizovaných mikrofirbril, které se skládají do fibril. Fibrila může být tvořena až tisíci mikrofirbrilami. Uspořádání struktury takové fibrily si ukážeme na Obr.č.12, dále můžeme pozorovat řízenou krystalizaci roztoku nebo dodatečné dlužení, které zobrazuje zmiňované schéma. (2)

Obr. č. 11: Růst lamel ve sferolitu



**Zdroj: Polymery a kompozity polymerních maticí,
Machek – Sodomka**

Obr. č. 12: Struktura mikrofirbrily – dlužení.

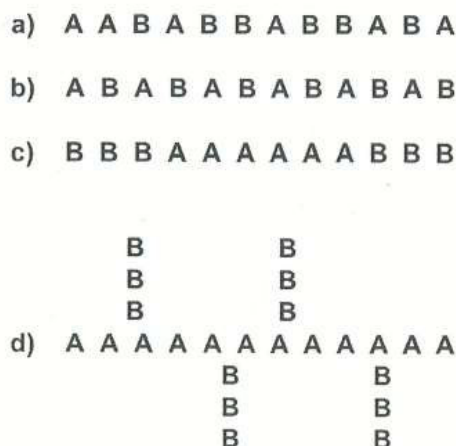


**Zdroj: Polymery a kompozity polymerních maticí,
Machek – Sodomka**

2.4 Různorodost polymerů

Polymer jsou velice různorodým materiálem, nemají prakticky žádné hranice, co se týče počtu druhů, takto si můžeme představit i prakticky neomezený počet různých vlastností a jejich kombinací. Během výroby polymerů se v dnešní době využívá přes sto různých monomerů. Existuje několik druhů polymerace, které se dnes využívají a od kterých se odvíjí jejich struktury řetězců molekul. Jedná se o tyto druhy: kopolymerace, bloková polymerace, homopolymerace nebo polymerace roubováním (Obr. č. 13) (2)

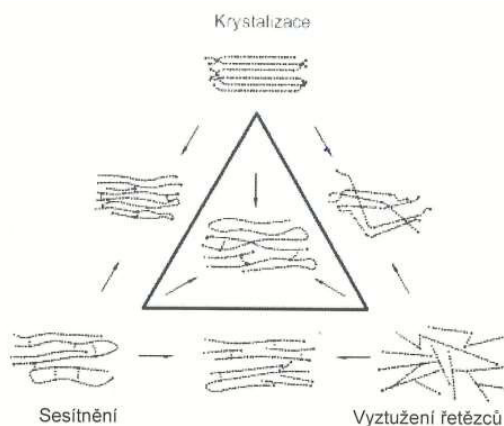
Obr. č. 13: Schéma kopolymerů dle rozprostření monomerů v makromolekulárních řetězcích a) statistický, b) alternační, c) blokový, d) roubovaný



Zdroj: Polymery a kompozity polymerních maticí, Machek – Sodomka

Polymerace obecně mohou vznikat buď v kombinaci, nebo i jednotlivě. Pomocí roubované polymerace vznikají dlouhé postranní skupiny na základních polymerech. U tzv. žebříčkovitých molekul jsou řetězce opatřeny dojitými řetězci, které mají pravidelné příčné vazby mezi dvěma sousedními, je to podobné příčkám u žebříku, odtud pochází jejich zvláštní název. Pokud se podíváme na obr. č. 14, můžeme sledovat početnost kombinací polymerových struktur. Z těchto struktur je zřejmé to, co již bylo napsáno výše – máme možnost vytvářet polymery s různými vlastnostmi, a to jak pro současné, tak i pro budoucí aplikace. Je zde tedy patrná velká diverzifikace polymerních kombinací. (2)

Obr. č. 14 Tři hlavní způsoby zpevnování v polymerech – vyztužené řetězce, krystalizace, sesítnění. Je zde vidět vzájemná kombinace v ternárním diagramu.



Zdroj: *Polymery a kompozity polymerních maticí, Machek – Sodomka*

2.5 Polymery a přísady

Vlastnosti kopolymerů a homopolymerů závisí na typu meru, jejich počtu (kopolymer) a od jejich molekulárních struktur.

Zásadní výhodou polymerů jsou především přísady, kterými lze často měnit vlastnosti jak chemické, tak fyzikální, ale také třeba mechanické, čímž mohou polymery vyhovět široké škále požadavků. Přísady mají tu výhodou, že tyto vlastnosti lze měnit i v rozsahu, v jakém to za normálních okolností není možné jen pomocí změny molekulární struktury. Na podobném principu například jako v polymerech fungují přísady prvků v ocelích. Druhů těchto přísad je opravdu celá řada a nebudu zde proto zmiňovat všechny. Obecně lze říci, že se přísady liší dle typu základního polymeru, technologického postupu při zpracování polymeru, a v neposlední řadě závisí i na finálním produktu.

Proto zde uvedu jen omezený počet druhů těchto přísad: změkčovadla, stabilizátory, plniva, retardanty, koloranty. (3),(28)

2.5.1 Změkčovadla

Slouží především pro zlepšení vlastností, jako je například houževnatost, tažnost a pružnost – dochází ke snížení tuhosti a tvrdosti. Principem dostávání se molekul změkčovadla mezi

polymerní řetězce dochází ke zvětšování vzdáleností mezi nimi a zároveň dochází ke snížení sekundárních molekulárních vazeb (například Van der Waalsova vazba). Změkčovadla použijeme tam, kde jsou polymery za normálních teplot velice křehké, dochází tak ke změně teploty skelného přechodu T_g . Změkčovadla se mohou aplikovat na trubky, filmy, folie, atd. (3)

2.5.2 Stabilizátory

Velké množství polymerních materiálů je náchylné na deteriorizace, tj. dochází k degradování vlastností, za běžných podmínek vyplývajících z okolí. Běžně vyskytujícím se okolním jevem, jejímž důsledkem dochází k tomuto porušování, bývá UV záření, či oxidace. Následkem UV radiace dochází k poškozování vybraných kovalentních vazeb v řetězci, což často vede k zhuštění. Oxidaci lze zase popsat jako jev, při kterém pozorujeme vzájemné interakci mezi kyslíkovými atomy a molekulami polymeru. Stabilizátory mají za úkol stabilizovat, neboli odstranit, či potlačit nepříznivé vlastnosti okolního prostředí, působícího na polymer. Vlivem různých druhů a tím i jejich vlastností stabilizátorů často dochází k tzv. synergii. Proto se například využívá tepelných stabilizátorů v kombinaci se světelnými při snaze stabilizovat polymery se sníženou odolností vůči povětrnostním vlivům. Proti oxidaci se na druhou stranu často používají v kombinaci saze a antioxidanty. Antioxidanty napomáhají ke zlepšení neboli snížení hořlavosti polymerů, a tudíž pomáhají splňovat podmínky pro požární bezpečnost, dále je nimi ovlivněna tepelná stabilita polymerů a potlačují tepelnou oxidaci. Jelikož zatím nebyl objeven žádný univerzální stabilizátor, je řešení stabilizace často nelehkým úkolem. Přesto existují polymery, které jsou velmi dobře stabilizované například proti povětrnostním vlivům, odolné jsou například neměkčené polyvinylchloridy nebo rozvětvené lineární polyethyleny. S ne tak dokonalými, ale stále dobrými vlastnostmi můžeme ale dále zařadit například polystyreny, polypropyleny a ABS tj. akrylonitril-butadien-styren. (3)

2.5.3 Plniva

Využívají se běžně pro modifikaci a zlepšování různých mechanických vlastností. Přidáváním různých druhů plniv lze docílit zlepšení meze pevnosti v tlaku a tahu, houževnatosti, odolnosti proti opotřebení, ale také lze zlepšit tepelnou a rozměrovou stabilitu materiálu a další tepelné vlastnosti. Velikost plniv může být rovněž různá od malých tj. 10 nm až po makroskopické velikosti částic plniva. Pro dosažení různých vlastností se používá široká paleta druhů plniv. Některé druhy polymerů, které budou použity i v našem případě pro praktickou část práce. Dále se ale běžně používá skelný písek, křemenná rozemletá drť,

mastek, dále jíly a, nebo vápence. U plniva se klade velký důraz na cenu, jelikož je použito většinou velké množství plniva, je dobré mít plnivo za rozumnou a přijatelnou cenu, tím můžeme dosáhnout snížení nákladů na výrobu daného polymeru. (3)

2.5.4 Retardéry hoření

U polymerních materiálů se často řeší právě hořlavost, jelikož je to citlivá vlastnost, kterou zároveň polymery mají. V některých případech může hořlavost rozhodnout o finálním užití polymeru a často se tak i děje. Bohužel však odstranění této vlastnosti je stále nedořešenou bariérou. Ke zlepšení vlastností a k potlačení stupni hořlavosti mohou sloužit právě retardéry hoření, tj. látky které zpomalují hoření materiálu, v některých případech dokonce i k jejímu zastavení. Rozlišujeme 2 druhy retardérů, prvním druhem jsou retardéry inertní a druhým chemicky aktivní, jejich účinek je pak pochopitelně různý. Podobně jako u plniva i u retardérů je kladen důraz na požadavky, které jejich vlastnosti musí splňovat. Optimalizace těchto vlastností vede k možnosti použití ideálně jednoho druhu retardéru v malém množství pro různé druhy polymerů, zároveň však je nutno dodržet, aby retardéry neovlivňovali jiné důležité vlastnosti polymerů, dále by neměli být toxické a zplodiny vzniklé při hoření nesmí být korozivní. Mezi další klíčové vlastnosti retardérů řadíme dobrou rozpustnost, schopnost tvorby disperse v polymerech a v neposlední řadě nám záleží na ceně, stejně jako u plniva. (3)

2.5.5 Barviva

Posledním aditivem do polymerů, které zde proberu, jsou barviva. Jak jinak slouží to látky především k finální úpravě barvy polymeru. Pro tento účel se používají pigmenty a barvy. Díky rozpustnosti molekul barev v polymeru se mohou stát součástí molekulární struktury polymerního materiálu a tím vyhovět požadavkům estetickým. Pigmenty fungují na trochu jiném principu, podobně jako plnivo slouží na principu plnění mezer v polymeru, kde vytváří vlastní strukturu a nerozpouští se tedy přímo do polymeru. Hovoříme zde o mikroskopických rozměrech barviva, které společně dohromady vytváří pro oko barvu. (3)

2.6 Kompozity s polymerní maticí

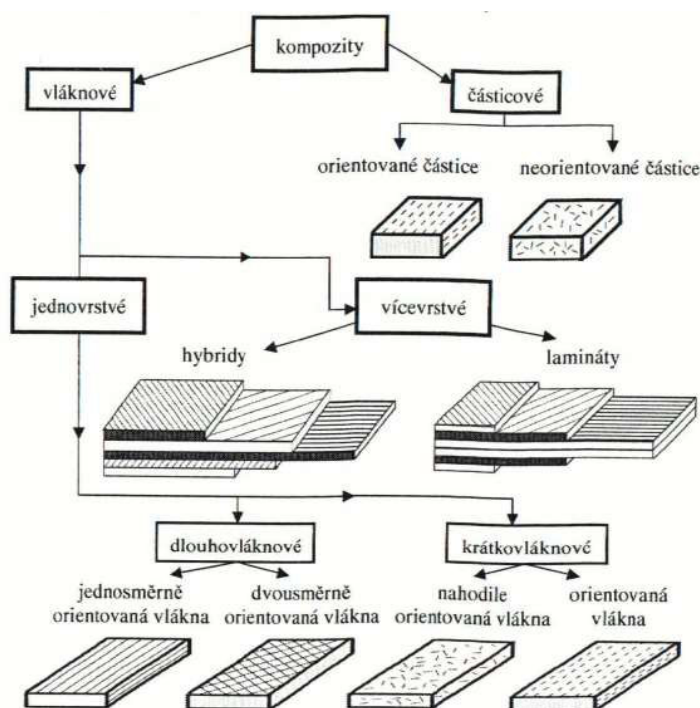
Jak už zde bylo řečeno, kompozitní materiál, je materiál heterogenní, který je složen z nejméně dvou odlišných materiálových složek. Výsledné vlastnosti tohoto materiálu

nemá nejen žádná složka materiálu samostatně, ve většině případů dokonce nedosahuje těchto vlastností ani prostě složení těchto dvou různých materiálů. Neboli pokud jsou materiály složeny do kompozitu, společně benefitují s různých vlastností a vytváří nové ojedinělé vlastnosti charakteristické právě pro vzniklý kompozitní materiál, kterých by prostým spojením nedosáhli. Tento jev můžeme nazývat jako synergický, proto by bylo snazší pro pochopení materiály označovat jako synergické, v takovém případě by bylo jasné, že materiály ve vzájemné kooperaci nejen tvoří nový materiál, jak je chápáno často u kompozitu, ale také vytváří nové vlastnosti, kterých materiály prostým spojením dosáhnout nemohou.

Polymerní matrice za synergického působení s pevnými a tuhými vlákny je krásným příkladem toho, jak dosáhnout vlastností materiálu, které jen těžko lze dosáhnou u tradičních monolitních materiálů. Kompozity jsou hlavním materiálem v průmyslu letectví, automobilovém a v kosmickém výzkumu. Proto za použití kompozitů jsme dosáhli výrazného technického pokroku v těchto, ale i dalších oborech. Polymerní kompozity se často využívají v automobilovém průmyslu a nemají žádného zástupce.(28)

Jednoduše si můžeme kompozit představit z následujícího schéma, které nám značně zjednodušuje představu ohledně konstrukce kompozitního materiálu. (viz obr. č. 15) (3)

Obr. č. 15: Schéma složení kompozitních materiálů:



Zdroj: LAŠ, Vladislav. Mechanika kompozitních materiálů.

Složky, které tvoří kompozit, jsou často odlišné mechanickými, či fyzikálními vlastnostmi, nejčastější složkou jsou materiály pevné, ale mohou být i ve výjimečných případech plynné.

U kompozitu s plastovou maticí je základní složkou reaktoplast, či termoplast, které mají většinové zastoupení v kompozitu, v těchto materiálech je uloženo více složek, které jsou většinou nespojitě, jenž nazýváme výztuž, ta je potom, jak již název napovídá tužší a pevnější než matrice. Mohou ji tvořit vlákna či částice. Matrice má funkci ochrany vláken a k přenosu napětí do nich. Nejčastěji chrání matrice vlákna proti nepříznivým vlivům zvenčí jako je koroze, mechanické poškození apod. Atypickým příkladem kompozitů mohou být ty, které mají tuhoun plastovou maticí z měkčích kaučukových částic, nebo ty které obsahují vzduch. K přenášení napětí na výztuž se využívá adheze, neboli třením na hranici matrice-výztuž. Čím větší je adheze, tím větší je zpravidla pak pevnost daného kompozitního materiálu. Abychom dostali dobrou hodnotu adheze, musí materiály (výztuž a matrice) splňovat podmínku vysoké přilnavosti. Oproti tomu soudržnost vláken s maticí pak ovlivňuje jejich smáčivost, která je charakterizovaná kontaktním úhlem α . Zcela odlišná je však situace s rázovou odolností, zde je zapotřebí ošetřit absorpci energie porušením soudržnosti matrice s výztuží, aby došlo k rozvoji trhlin podél povrchu výztuže. (3)

2.7 Výrobky z polymerů

Plasty jsou syntetické nebo polosyntetické, nebo přírodní materiály, které jsou většinou tvořeny polymery – řetězci (což je struktura molekul řetězcového charakteru, odlišující běžné materiály od polymerních materiálů, která je charakteristická svojí dlouhou lineární řadou, kde jsou vzájemně propojené atomy nebo skupiny atomů) čítající hlavně uhlovdíkové sloučeniny. Na výrobu těchto materiálů je převážně používaná ropa, uhlí a poté další přírodní látky jako jsou například škroby. Plasty se často označují jako umělé hmoty v běžné hovorové mluvě a toto označení je naprosto nesprávné podobně jako již zmiňovaný igelit, ten vznikl jako obchodní název měkčeného PVC od společnosti IG Farben, kde se jedná o složeninu slov IG a elit – první netřeba asi vysvětlovat a druhá část slova pochází z nejpoužívanějšího materiálu té doby označovaného jako bakelit, správně se tzv. igelit vyrábí u PP a LDPE, to znamená, že označení igelitová taška, je naprosto chybně užívané.

Jak naznačují následující čísla, je patrné, že plasty jsou hojně používaným materiálem, které ale nesou velké riziko spojené se znečišťováním životního prostředí, nicméně je to materiál, který hraje markantní roli v technologickém pokroku a rozvoji lidských technologií a není

proto snadné ho nahradit ani přestat ze dne na den vyrábět. Nicméně situace se vyvíjí ve prospěch udržitelných technologií a lidstvo se s problematikou, která je spojená s plastovým materiálem snaží bojovat a zároveň zachovat technologický pokrok. Je proto potřeba si uvědomit, že kdykoliv společnost hovoří o redukcí používání plastů, je patrné, nezahrnovat do řešení pouze ekologická hlediska, ale také způsoby, jakými lze plasty nahradit a zároveň nezastavit technologické pokroky společnosti. (4)

Dle zprávy „Strategická výzkumná agenda“ z června 2017 od České technologické platformy PLAST, se na konci 19. století po celém světě vyrobilo bezmála 10 tisíc tun plastů za rok. Koncem roku 1930 tato roční světová produkce plastů s nárůstem 20 tis. tun přesáhla hodnotu 30 tisíc tun, dále pak roku 1949 čítala produkce již více než 1 milion tun, tedy za pouhých 19 let se vlivem průmyslového pokroku produkce zvýšila 33 krát a nyní ve 21. století je světová výroba plastů na úrovni 335 miliónů tun/rok. Za rok 2018 byla celosvětová produkce na úrovni 359 milionů tun a za rok 2020 se odhaduje celosvětová produkce přes 400 milionů tun, data ale nejsou ještě zpracovaná, jde jen o odborný odhad, zároveň nám však pandemická situace v souvislosti s COVID-19 přinesla navýšení plastového odpadu především kvůli obalovým materiálům, kdy byly například restaurace odkázány na výdejní okénka po celé Evropě, což je zároveň kontinent s nejvíce vyváženým plastovým odpadem na světě, měsíčně vyveze až 150 tis. tun odpadu především do Asie, Afriky a Jižní Ameriky. Celosvětově se již problematika plastového odpadu řeší a pracuje se na regulaci produkce, nicméně i tak se odhaduje, že v roce 2050 přesáhne výroba 700 milionů tun plastů, předpovědi typu jako je například od MacArthur Foundation, pak mluví až o 1,1 miliard tun vyrobených plastů. Největší podíl v produkci mají polyolefiny tedy PP a PE následované PVC PS a EPS, dále PET, tyto produkty tvoří 85% z celkového množství spotřeby. Prognózy hovořili o nárůstu 4,4% spotřeby plastů od roku 2018 do roku 2020, data a současná světová situace však naznačují, že tento nárůst bude nejspíš ještě větší. Například spotřeba tzv. inženýrských plastů jako je PBT, ABS, POM, PA a nebo by měla růst meziročním tempem v průměru o 7,4% až do roku 2026. Evropa v roce 2016 vyprodukovala 52 milionů tun plastového odpadu a na Českou republiku z tohoto množství připadlo 1,145 milionů tun, což je v přepočtu na obyvatele přes 100 kg na osobu. Je nutné si uvědomit, že produkce a spotřeba plastů jsou dvě rozdílné věci, proto je nutné uvažovat o podílu odpadních plastů. (4)

V celosvětovém měřítku došlo k recyklaci méně než 10% plastů z cca. 6 300 milionů tun odpadu, který byl vyprodukován mezi lety 1950 – 2015. Celkově 60% z množství vyprodukováného od roku 1950 skončilo v přírodě (skládky, oceány a další přírodní plochy). Zbylá procenta odpadu buď byla spálena, nebo o něm nejsou data. (Z tohoto vyprodukováného množství bylo zároveň 99% plastu vyrobeno z fosilních paliv.)

V Evropě toto číslo (podíl odpadních plastů) dosahuje hodnoty přibližně 54% z ročně produkovaného množství. Za předchozí rok, tedy 2015, pak čísla činili na zpracování 25,8 milionu tun plastu, z čehož okolo 30% ulehlo na skládkách, dalších 30% se recyklovalo a okolo 40% bylo využito jako energie ve spalovnách. Tedy recyklace se zlepšila, ale celkově stejně skončilo více odpadu v přírodě, než za minulý rok, díky narůstající celkové produkci. Česká republika vykazuje 500 000 tun odpadních plastů za rok 2019 s mírou recyklace na úrovni 79%, tj. 395 000 tun odpadu skončilo ve tříděných kontejnerech na odpad. Je však nutné si uvědomit, že tato data vypovídají o odpadu, který je zvážen na základě jakéhokoliv obsahu kontejneru, v praxi to znamená, že pokud ve žlutém kontejneru na plast skončí papír, je velice pravděpodobné, že tento odpad nebude recyklován, ale zároveň je počítán jako plastový odpad v recyklačním schéma. Z celkového množství vyprodukovaného odpadu tedy reálně 63,5 % skončilo na skládkách. Z tohoto je zároveň patrné, že spotřebitel pravděpodobně nehraje zásadní roli v recyklačním schéma, nýbrž zpracovatel odpadu. Nelze to však přesně určit, jelikož data mohou být zkreslená i na základě toho, že by spotřebitel neuměl třídít materiály, které do kontejnerů vhazuje, množství odpadu, který končí na skládce z celkového množství vytríděného odpadu je tak velké, že je vysoká míra zkreslení špatným tříděním spotřebitele velice nepravděpodobná. Tento problém je způsobený tím, že i kdybychom předpokládali, že materiály jsou správně vytríděné a odmaštěné, zkrátka spotřebitel by postupoval dle doporučení pro třídění odpadu, pak materiály v daném kontejneru ještě dále mohou skončit na skládce z ekonomického hlediska, to je zapříčiněné tím, že se některé plasty nevyplatí recyklovat zpracovateli, protože buď po daném zpracovaném materiálu není poptávka, nebo je jeho zpracování velice nákladné. Proto zde vysoké číslo nerecyklovaného plastu, které je na první pohled nepříznivé s ohledem na ekologii.(5), (6)

Jako náhrada tradičního plastového obalu přišla na trh v posledních 30 letech alternativa v podobě bioplastu. Bioplasty jsou definovány jako plasty, které mají vazbu na přírodu a to ve dvou podmínkách, které nemusí být splněny zároveň. Zaprvé jsou to plasty, které jsou tvořeny z biomasy, hlavní složku plastu pak tedy tvoří například kukuřice, cukrová třtina a podobně, které však mohou mít opět v přírodě nerozložitelné. Zadruhé to mohou být plasty, které jsou naopak biologicky rozložitelné, které mohou být vyrobeny z fosilních paliv, jejich rozpad přitom může trvat roky. Z tohoto je patrné, že bioplast není tím pravým řešením v problematice neekologického plastu. Co se týče výroby, jsou v případě bioplastu různá data, která se liší dle zdrojů, ze kterých pochází a nedá se tady jednoznačně určit oficiální údaj. Uvedu zde některá z nich, kde například dle společnosti Nova-Institut činila výroba v roce 2016 2,4 milionů tun, a jejich prognóza byla 3,6 milionu tun do roku 2021. Asociace European Bioplastics uvedla pro rok 2016 4,2 milionu tun a počítá s 6,1 miliony

tun v roce 2021. Přičemž nejvíce plastů má vzniknout v Asii a to až téměř polovina a čtvrtina pak v Evropě a nejvíce se má vyrábět bio-PET, bio-PA a bio-PE. Velké německé zpravodajství K-Zeitung uvedlo 23.2.2017 svá data ohledně bioplastů, kde uvedli, že podíl bioplastů v roce 2017 činil 4% z výroby s očekávaným nárůstem na produkci 8,5 milionů tun bioplastů. (7), (27)

Plasty jsou makromolekulární materiály, které je možno tvarovat a tvářet, eventuálně je lze pomocí dalších technologií dále zpracovat na jiné výrobky či polotovary, které jsou určené k dalšímu zpracování, tak jako je v této práci v praktické části použitý granulát ke vstřikování, k výrobě polotovarů, které se dají dále zpracovat. Do zpracovatelských technologií konkrétněji spadají operace přípravné, hnětení a míchání, granulace, dále může probíhat tabletování, či recyklace, řadíme zde i přidávání aditiv, sušení materiálu, může docházet k barvení, dalšími možnými úpravami je kategorie hlavních zpracovatelských technologií jako je kalandrování, přetlačování, přímé lisování, válcování, vytlačování, vstřikování tváření polotovarů ve vakuu či za tepla.

Ostatní způsoby zpracování plastů – technologie kapalných systémů – impregnace, natírání, máčení, zalévání, lití, odlévání, zvláknování, reakční vstřikování (RIM). Zpracování způsobem nerozebíratelného spojování – lepení plastů a svařování. Výroba vyztužených plastů a laminátů, lisování za tepla, tažení navíjení, zpracování plastů pomocí laseru, například navařování, svařování, spojování plastů s kovy, leštění, oprava tvaru, odstranění přetoků vzniklým nechtěně při vstřikování, značení, rotační natavování, spékání či lehčení polymerů laserem. Dále jsou technologie pro povrchové úpravy jako je potisk plastů, leštění, lakování, kaširování, desénování polymerů, povrchové ochrany a pokovování plastů apod. Plasty se mohou obrábět, například se zhotovují rozebíratelná a nerozebíratelná spojení, nebo radiační síťování. Konečně se dostáváme k technologii, která je jednou z nejpoužívanějších za posledních desítek let a tou je technologie tvářecí: vstřikování. První záznamy o vstřikování jsou známy z roku 1870, tohoto roku byl ve Spojených státech amerických patentován materiál, z něhož byl časem vyvinut celuloid. Patent definoval i přístroj pro jeho vstřikování. Po první světové válce došlo k velkému rozvoji, především ve zpracování reaktoplastů. vstřikování. Ze zpětného pohledu, ze současnosti, na tuto technologii nastal největší pokrok v 50. letech 20. století, kdy vyšel patent na šnekový vstřikovací lis, a byl vyroben první elektroerozivní hloubicí stroj, který sloužil pro zhotovení tvarových dílů vstřikovací formy, byl také představen první horký rozvod a ve výrobním procesu vstřikovacích forem se začalo užívat normalizovaných dílů ve velkém množství. Na konci 60. let a v 70. letech 20. století se začala zavádět zpětnovazební regulace při provozu vstřikovacích strojů a do přístroje byl vložen mikroprocesor, který usnadnil řídicí proces, dále se začaly sušit granuláty suchým vzduchem a položil se základ pro robotizaci celého

procesu. V 80. letech 20. století se objevily simulační programy, dále přístroje pro technologie Rapid Prototyping, a začala se využívat statistická kontrola procesu. V této době také došlo k rozvoji automatizace výrobního procesu vstřikování, především díky technologickému vývoji vstřikování polymerů a zároveň samotných strojů pro vstřikování, popřípadě periferním zařízením jako jsou nasávače, dávkovače aditiv, sušárny apod. V roce 1983 pak vznikly první automatizované pracoviště na světě, které nezávisle na sebe prezentovali společnosti Netstal a Battenfeld na výstavě v německém Düsseldorfu. Toto byly počátky automatizace, ale stále bylo potřeba doladit cenu a pružnost celých systémů, které byly představeny. V realu se potom objevila automatizace v praxi jen samotné jednotky vstřikovacího stroje, protože celé systémy pracovaly neefektivně. Nyní je proces výroby vstřikování polymerů, stejně jako stroje používané v této technologii na daleko vyšší úrovni než byla v počátcích, nicméně je zde stále mnoho nových požadavků na tuto výrobu a tato technologie se má stále kam vyvíjet. Požadavky, které jsou v současné době kladeny na tuto technologii, lze zařadit do několika hlavních kategorií:

- čas potřebný pro výrobní proces od vstupního materiálu až po hotový výrobek,
- minimalizace doby dodání výtříku na trh,
- urychlení inovačních cyklů,
- narůstající komplexita výrobků – zahrnutí více funkcí do jednoho komponentu,
- požadavky na práci s velkým objemem dat,
- zvyšování pružnosti vlastností,
- kolísání zájmu trhů,
- nárůst individuálních poptávek po výrobcích,
- individualizace komerční výroby,
- požadavek na velkou produktivitu výroby,
- zvyšování efektivity výroby,
- tlak na minimalizaci výrobních nákladů,
- minimalizace energetické náročnosti procesu,
- požadavek na udržitelnost materiálových zdrojů, environmentální požadavky.

Pro vyhovění uvedených požadavků je k dispozici pouze jedna technologie: právě automatizace, která transformuje do aktivit pod označením Průmysl 4.0. Automatizaci lze definovat čtyřmi charakteristickými obdobími:

- minulost: oddělené automatizační procesy,
- současnost: navzájem propojená automatizace,
- blízká budoucnost: nový inovativní software, který optimalizuje výrobní proces

- vzdálená budoucnost: lepší výrobní organizace a optimalizace pomocí kyberneticko-fyzických (CPS) procesů, mohli by vzniknout tzv. chytré soběstačné továrny, Průmysl 4.0.

Aby bylo dosaženo cílů Průmyslu 4.0, je zapotřebí propojit průmysl se vzděláním. Toto tvrzení vychází z faktu, že výrobní zařízení je možné nakoupit relativně snadno a bez časové náročnosti, ale personál pro výrobní proces s důležitými znalostmi je důležité zajistit s předstihem a naučit je znalostem již v procesu školního systému. Každý výstřik je v ohledu na vlastnosti a použití originální a před komerční výrobou, pro splnění požadavků na kvalitu, musí projít etapou vývoje součásti (Product Development), následovanou etapou výzkumu proveditelnosti (FS, Feasibility Study). Tato studie by měla být, pokud možno, co nejobsáhlejší a koherentní, neboli co nejbliže ke konkrétnímu výstřiku. Liší se od sebe nejen samotné výstřiky, ale také struktura témat daných ve výzkumu proveditelnosti pro tyto díly. V projektu je kladen důraz na jednotlivé kapitoly výzkumu. Objem vývoje výstřiku a studie proveditelnosti je proto obecně možné vymezit do výše zmíněných bodů, přičemž je třeba si uvědomit, že se často tyto body v různých případech navzájem prolínají. (8)

2.7.1 Dělení Polymerů

Plastové materiály vyrobené člověkem se dělí v zásadě do dvou hlavních skupin, termoplasty, které tvoří až 80 % z celkového množství plastových materiálů a tou zbylou skupinou jsou reaktoplasty. Termoplasty tvoří rozvětvené nebo lineární molekuly, které postrádají určité chemické vazby. Termoplasty se jim říká především kvůli tomu, že po zahřátí jdou lépe zpracovávat, když se ochladí, znovu ztvrdnou se zachováním vysoké houževnatosti. Nejvíce se v současné době používá polyethylen (PE) – jehož produkce byla v roce 2010 podílově 29 % z celkové produkce plastů, tedy cca. 77 milionů tun za rok 2010), dalším v pořadí byl PP – 19% = 32 Mt a posledním PVC – polyvinylchlorid (12 % = 32 Mt v r. 2010). Ve srovnání s termoplasty pak reaktoplasty tvoří mezi molekulami vazby, které zaručují vyšší prostorovou stabilitu, nejde tedy pomocí zahřátí dále upravovat. Příkladem produkce reaktoplastů mohou být dle počtu jejich zastoupení sestupně polyuretany, epoxidové pryskyřice, polyimidy, dále melaminy a močovinoformaldehydové pryskyřice. Největším světovým producentem plastů je stále Čína, jak tomu již je minimálně 15 let. Ovšem v přepočtu na obyvatele je tomu již jinak, v čele s EU, následovanou USA. (9),(4)

Tři nejvíce produkováné plasty PE, PP a PVC jsou si ve struktuře velmi podobné. Skládají se z řady uhlíkových atomů, ale PE váže pouze vodíkové atomy, oproti tomu PP váže

metyhlovou skupinu CH_3 na každém druhém svém uhlíku a PVC střídá ve svých vazbách vodík s chlorem. Dále se ethylen a propylen podobají ještě v jiných aspektech, oba tyto materiály se například polymerizují za pomoci stejné třídy katalyzátorů, mají hodně společných fyzikálních vlastností a používají se často ve stejných odvětvích, jako jsou obalové materiály, stavebnictví nebo potřeby pro domácnosti, či průmyslové součásti. Velkým rozdílem u těchto materiálů tvoří pohled veřejnosti na negativní dopad na životní prostředí. PVC bylo ještě do nedávno vnímáno daleko nejhorší z těchto řady materiálů, napomohlo tomu prezentace tohoto materiálu, jako nebezpečný pro životní prostředí, jelikož jeho syntéza se váže s nebezpečnými chemikáliemi, není snadné tento materiál recyklovat a jeho likvidace má velký dopad na životní prostředí, bez ohledu na jeho zpracování, tedy jestli skončí na skládce, nebo se spálí. Jenže v porovnání s PE je například jeho produkce prakticky třetinová a PE se ve zraku veřejnosti začalo vnímat jako potenciálně nebezpečné pro životní prostředí teprve nedávno, vlivem této změny bylo nalezeno rozsáhlého množství plastového odpadu v mořích a oceánech po celém světě, zároveň PE společně s PP se zasloužilo pro vznik pojmu tzv. mikro-plastů, o této problematice je pojednáváno ještě v samotné kapitole této práce. (9), (10)

PE je nejdůležitějším plastem na světě přibližně již 50 let. Vznik polyethylenu se datuje k roku 1936, kdy jako první se začal vyrábět nízko-hustotní LDPE za pomoci chromového katalyzátoru. Stalo se tak v předvečer vstupu Velké Británie do 2. světové války. V průběhu války byl nový LDPE hojně využíván pro izolaci kabelů nebo také pro výrobu krytů radarů. Jeho výroba byla náročná na vysokou teplotu a tlak při 100 MPa a teploty až 200 °C. V roce 1953 však došlo ke změně objevem smíšených organokovových katalyzátorů Karlem Zieglerem a jeho skupinou. Došli k objevu, že nikl v kombinaci s triethylhliníkem dimerizuje olefiny. Dále bylo objeveno, že i jiné katalyzátory, když obsahují těžké kovy, jako například titan ve formě TiCl_4 dokážou polymerizovat ethylen, potažmo i vysoko-hustotní polyethylen – HDPE. Nejdříve se zkoušel vyrobit za pomoci jen 20 MPa tlaku, později se výroba ustálila v běžném okolním prostředí. Ziegler za podpory italského vědce Natta, který použil katalyzátory k výrobě polymerů z propylenu, získal společně s ním Nobelovu cenu za chemii. HDPE je v porovnání s LDPE pevnější materiál za hustoty o trochu vyšší než LDPE (0,95 - 0,97 g/cm^3 oproti 0,91 – 0,94 g/cm^3 u LDPE), teplota tání HDPE je o dost vyšší (135 °C, kdežto u LDPE dosahuje hodnoty jen 115 °C), vyniká i v pevnosti v tahu, kde jeho hodnota dosahuje až 32 MPa (LDPE – 9 MPa). Oproti tomu LDPE je však pružnější a je průhlednější. Oba tyto materiály jsou pak inertní. (4), (10), (11)

První vyrobené HDPE se z počátku měly tendenci lámat s narůstajícím stářím materiálu, nicméně tento problém byl vyřešen za pomoci syntézy materiálu s nízkým podílem větví v lineárním řetězci. K dalšímu pokroku došlo při přidání MgCl do katalyzátorů na bázi titanu,

čímž byla značně navýšena jejich účinnost, díky tomuto pokroku začala komerční syntéza LLDPE – nízkohustotního polyethylenu. LLDPE vyniká vyšší pevností než klasický LDPE a je možné z něj vyrábět tenčí fólie. S dalším pokrokem přišel UHMWPE – polyethylen s ultravysokou molekulární hmotností – 0,915 až 0,925 milionů s hustotou 0,93 – 0,935 g/cm³. Dále pak MDPE – středněhustotní polyethylen a síťovaný polyethylén – PEX/XLPE. Původ tyto materiály mají v ethanu. Ethan lze běžně separovat ze zemního plynu, díky nízkým cenám zemního plynu v Severní Americe a na Středním východě, neboli díky jeho dostupnosti, se pak tyto materiály dostávají doslova do celého světa. V Evropě, kde je cena dováženého zemního plynu daleko vyšší, se pak na výrobu těchto materiálů využívá naftu, která vzniká destilací surové ropy.

Dochází ke štěpení ethanu na ethylen ($C_2H_6 \rightarrow C_2H_4 + H_2$) a po následné několika úrovněvé purifikaci vzniká sloučenina s 99,9% čistotou, ta se poté v eotermické katolické konverzi přeměňuje na práškové PE. K výběru techniky, kterou se přemění různé druhy PE se jako hlavní kritérium používá konkrétní účel výrobku. Technik je celá řada, z těch nejznámějších můžeme jmenovat: extruzi, tvarování (stlačení, vyfukování, rotační odlévání), dále můžeme zpracovávat pomocí lití, nebo vyfukováním plátů. Samotné PE má také řadu nevýhod jako jsou například, nízká tuhost, hořlavost, špatná odolnost proti povětrnostním vlivům, lámání pod tlakem, teplotní rozpětí stability. Výrobky z PE mají širokou škálu použití, lze z nich dělat pohledově atraktivní materiály, skryté materiály nebo i výplně. Nejrozšířenějšími materiály jsou tenké fólie LLDPE, LDPE a MDPE, ty se totiž používají především pro výrobu průhledné a neprůhledné obaly, které známe například z obchodů, do nich totiž denně balíme ovoce/zeleninu, používáme je pro balení svačtin, nebo do nich v podobě odpadkových pytlů do koše vyhazujeme veškerý odpad z domácnosti. Z těchto fólií se také například v zemědělství vyrábí skleníky, nebo se s nimi rostliny zakrývají, dále se hojně využívají jako potravinářské fólie, plastové nádoby jako jsou například nádoby na med. Konkrétně z HDPE se pak vyrábí odpadkové koše, kanystry nebo také známé hračky jako jsou kostky od společnosti LEGO. Jako příklady skrytých PE potom můžeme jmenovat těsnicí fólie, z HDPE a PEX např. vodovodní potrubí, dále izolace elektrického vedení z PEX. UHMWPE například pro náhradní kolenní a kyčelní klouby. Z LLDPE se, díky jeho vlastnostem, vyrábí například bazénové fólie, geomembrány na staveništích, nebo obaly mražených produktů – zeleniny, ovoce, zmrzliny. Velikostně jsou produkty z PE různorodé, z LDPE se například běžně využívají velké cisterny na vodu o objemu 50 000 l, ale také se ve formě UHMWPE používá pro výrobu kuličkových ložisek, převodů a dalších malých strojních součástí. PE má zároveň enormní různorodost vlastností, ať už ve formě LDPE v podobě bublinkových nebo potravinářských fólií v kontrastu s UHMWPE v podobě neprůstřelných oděvů, které tvoří alternativu k aramidu (Kevlaru). Produkty HDPE označované recyklační

značkou s dvojkou uprostřed trojúhelníku tvořeného šipkami (viz obr. č. 14), se dnes běžně recyklují a obecně tento trend roste. Tyto produkty se tedy znovu vrací do oběhu v podobě odpadkových košů, nádob na čisticí/ mycí prostředky, nebo například květináčů. LDPE se označují stejným znakem, namísto dvojký je uprostřed čtyřka a z recyklátu se vytváří například nové tašky, tento trend je však v porovnání s HDPE nižší, jelikož cena recyklátu není tak vysoká a tak se ekonomicky méně vyplatí. (4)

Dalším plastovým materiálem je PP. Propen je bezbarvý, zároveň vysoce hořlavý a dusivý plyn, který se vyrábí za pomoci uhlovodíkového krakování a k jeho první polymeraci na krystalickou izotaktickou sloučeninu došlo v roce 1954 italem G. Nattou a němcem K. Rahnem. K výrobě PP se opět využívá schopností kovových katalyzátorů, ne však u synditaktického PP, který má pravidelně se střídající protilehlé monomery. K výrobě tohoto typu propylenu se používají jako katalyzátory rozpustné metaloceny, pomocí kterých je možno upravovat molekulární strukturu a tím vyrábět polymery s požadovanými vlastnostmi. Komerčně se dnes vyrábí například kopolymery a často směsi, které jsou modifikovány kaučukem. Mezi největší nevýhody PP patří jeho degradace slunečním zářením (opět dochází ke vzniku mikro a nano částic, které se uvolňují do ovzduší, půdy a vody), PP je také velice náchylné na korozi pomocí chlorovaných rozpouštědel a má nízkou houževnatost při nízkých teplotách. Některé z těchto vlastností, především pak odolnost proti UV záření a hořlavost, lze zlepšit použitými přísadami. Z PP opět vznikají produkty v potravinářství jako u PE. Nejčastěji vyráběné jsou obaly pro mléčné výrobky – smetany, jogurty, ale i například majonézy, uzávěry a víka k těmto obalům, různé druhy košů, kbelíků a trubek – často mohou v tomto případě sloužit jako náhrada za PVC. (4), (11). Přehled dělení polymerů a vstupních materiálů pro výrobu je pro úplné pochopení uveden na obrázcích č. 17 – č. 21.

Obr. č. 16: Značka pro recyklovatelný výrobek.



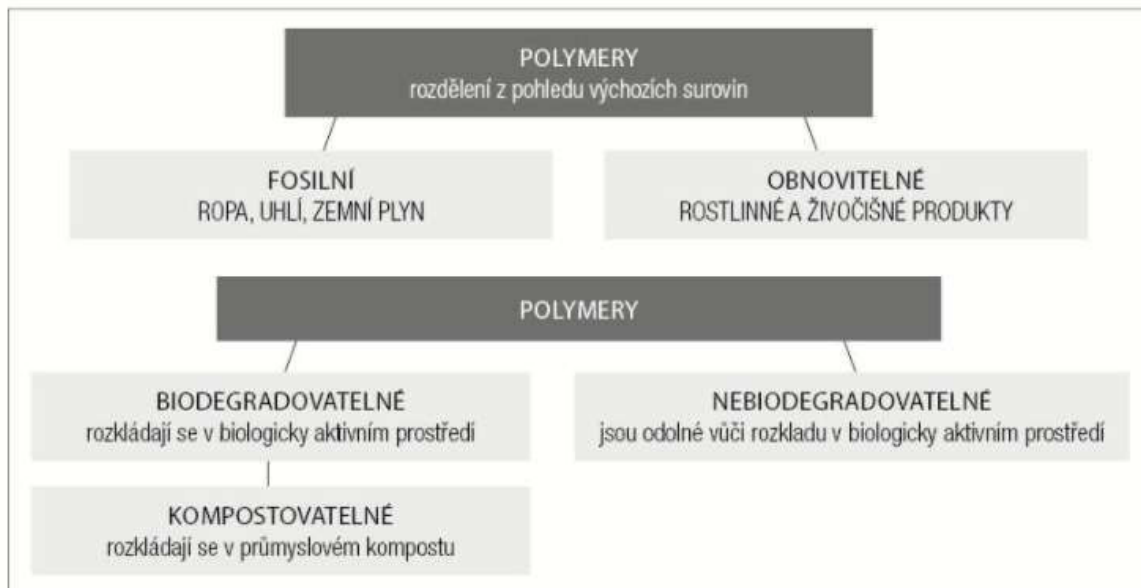
ZDROJ: PIXABAY.COM

Obr. č. 17: Základní dělení polymerních materiálů



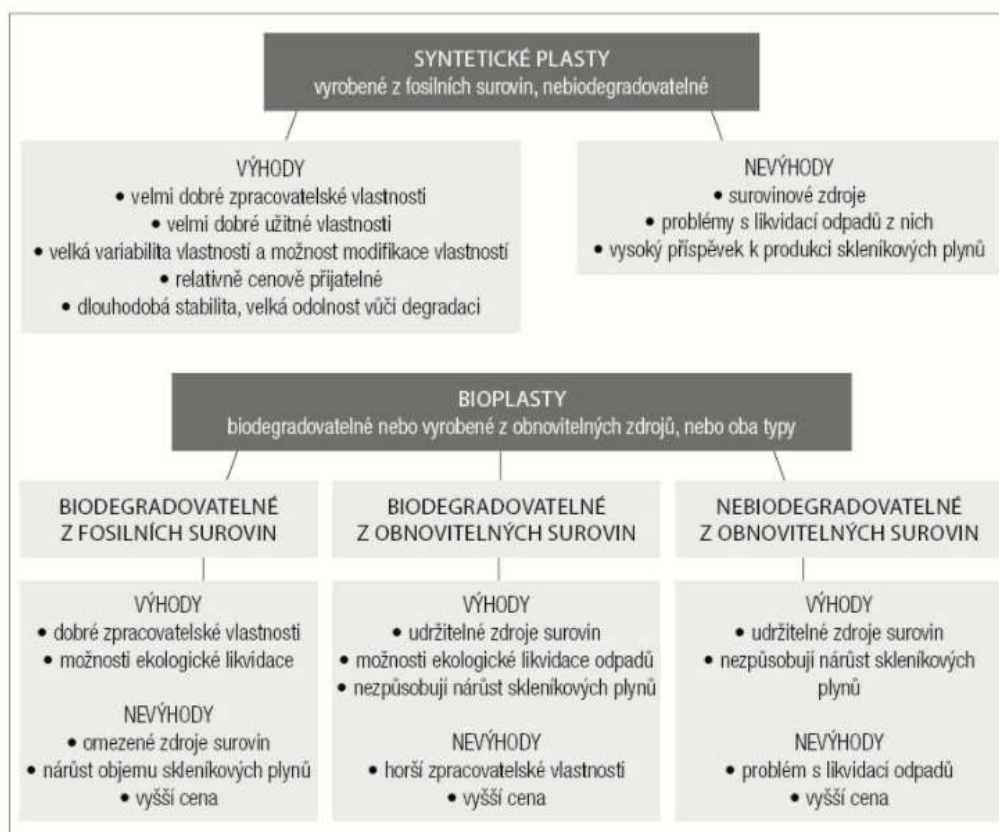
Zdroj: ZEMAN, Lubomír, Vstřikování plastů 2018

Obr. č. 18: Dělení polymerů dle vstupních surovin



Zdroj: ZEMAN, Lubomír, Vstřikování plastů 2018

Obr. č. 19: Přehled plastů z fosilních surovin a bioplastů.



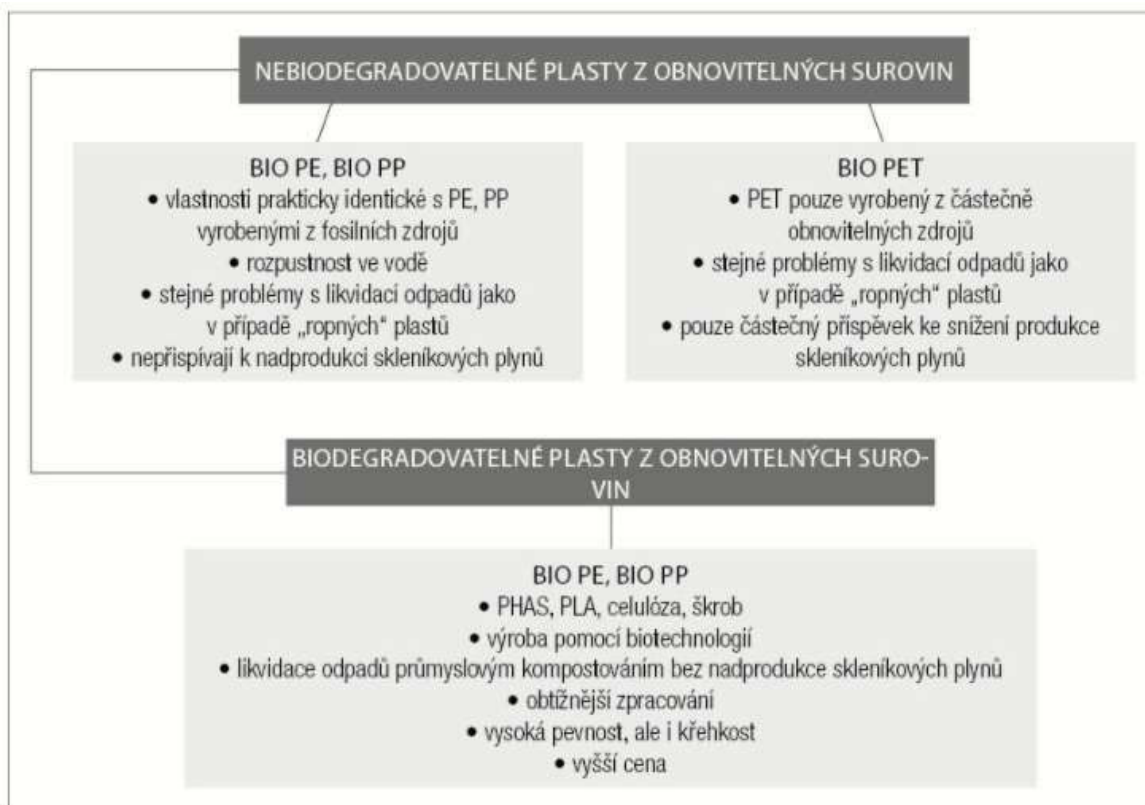
Zdroj: ZEMAN, Lubomír, Vstřikování plastů 2018

Obr. č. 20: Přehled biodegradovatelných plastů z fosilních surovin.



Zdroj: ZEMAN, Lubomír, Vstřikování plastů 2018

Obr. č. 21: Přehled biologicky a nebiologicky rozložitelných plastů z obnovitelných surovin.



Zdroj: ZEMAN, Lubomír, Vstřikování plastů 2018

2.8 Polyethyleny (LDPE, HDPE, PE)

Polyethylen byl objeven na konci 19. století a dočkal se svého průmyslového využití v roce 1939 v Anglii. Za rozvoj průmyslového beztlakového způsobu polymerace se posléze zasloužil Karl Ziegler na základě odborných prací vydaných v roce 1955.

Polyethyleny spadají do složky termoplastů, tyto tři druhy v závorce jsou zároveň nejpoužívanějšími plasty v současné době. LDPE fólie se někdy nesprávně označují v hovorové řeči jako „igelity“, označením „igelit“ však byly značeny fólie z PVC, tedy odlišný materiál. (4), (11)

2.8.1 Výroba a charakteristika HDPE a LDPE

Surovinou potřebné k výrobě těchto termoplastů je ethylen, označovaný někdy jako ethen, což je plyn s bodem varu na 104 °C. Pro jeho polymeraci (chemická reakce, při níž dochází k přeměně jednoduchých molekul (monomerů) na vysokomolekulární látky – makromolekuly (polymery)), je zapotřebí dokonalé čistoty, což bylo zároveň jedním z největších problémů při snaze jeho průmyslového využití. Přičemž mechanicko-fyzikální vlastnosti výrobku (konečný produkt lze vidět na obr. č 18 a č.19) jsou potom přímo odvozené od stupně polymerace.

Obr. č. 23: Konečný produkt ve formě granulí (běžný válečkovitý tvar)



Zdroj: www.PIXABAY.COM

Obr. č. 22: Netradiční granulátový produkt z recyklace LDPE (šupinatý tvar)



Zdroj: Archiv autora 2021

2.8.2 Výroba vysokotlakého, nízkohustotního LDPE

K výrobě LDPE se využívá polymerace ethylenu za vysokých teplot okolo 150-200 °C a při použití tlaku 15 000 – 20 000 MPa. LDPE se vyznačuje dobrými elektroizolačními vlastnostmi v porovnání s HDPE. Zároveň je netoxický a stálý vůči bezkyslíkatým kyselinám, luhům a solím. Lze jej rozpouštět za vysokých teplot v organických rozpouštědlech. Má nízký bod nasákavosti a je bez zápachu. Nevýhodou tohoto materiálu je jeho vysoká hořlavost, dále je ale měkký a poddajný, tudíž se dá relativně dobře zpracovávat. Čím vyšší je teplota jeho zpracování, tím je zpravidla vyšší jeho pevnost a v tahu, tvrdost a tuhost. Při narůstajícím polymeračním stupněm klesá flexibilita LDPE a stoupá jeho odolnost vůči korozi a napětí. K narušení LDPE dochází vlivem aromat, chlorovaných uhlovodíků, a vlivem tenzoaktivního prostředí. Jeho hlavní výhodou je zdravotní nezávadnost. Po recyklaci tohoto materiálu je konečným produktem granulát (Obr.č.16) stabilní vůči kyslíku a UV záření. Jeho značnou nevýhodou je snášenlivost teplot okolního prostředí, kdy je stabilní do 80 °C za dlouhodobého působení a nezmění své mechanické vlastnosti při krátkodobém působení 95 °C. Mechanické vlastnosti si zachovává zároveň do -40 °C, není tedy jeho použití vhodné v extrémních prostředích. (15), (4)

2.8.3 Výroba nízkotlakého (vysokohustnotního) HDPE

Karl Ziegler vymyslel způsob výroby za teploty 60-75 °C, při atmosférickém tlaku a jako katalyzátor použil chlorid titaničitý. Tento způsob výroby se zachoval dodnes, a to z toho důvodu, že nízkotlaký polyethylen má podstatně vyšší mechanickou pevnost než vysokotlaký. Proto například pomocí nízkotlakého polyethylenu můžeme zhotovit výrobky s podstatně tenčí stěnou profilu, za pomoci vstřikovací technologie. Dále má nižší propustnost par a plynů. Další výhodou je jeho teplotní stálost, zachovává si vlastnosti až do teploty rozkladu přibližně 200 °C a mrazuvzdornost má do teploty -50°C.

Výroba středotlakého HDPE, LDPE

V podstatě jde o obdobný způsob polymerace, jako při nízkém tlaku, jen je u něho zvýšen tlak. (15), (11)

2.8.4 Zpracování Polyethylenů

Především díky různorodým mechanickým a fyzikálním vlastnostem jednotlivých druhů polyethylenů, je zde celá řada typů zpracování těchto materiálů s různými technologickými vlastnostmi.

Vstřikování polyethylenů

Vstřikování polyethylenů je poměrně starý způsob zpracování a velmi využívaný v dnešní době. Polyethylen ve formě granulí je při vstřikování roztaven, k tomuto procesu dochází v komoře vstřikovacího lisu a to při teplotě okolo 200 až 300 °C, dále se hmota vstřikuje důsledkem tlaku pístu přímo do formy, která je rozežhátá na teplotu 30 až 60 °C. Tento proces je známý především při výrobě denní potřeby, jako jsou kbelíky, kartáčky, pohárky apod. Předlisek je dobrý pro vyfukování i dutých předmětů, jako jsou láhve.

Technologie vtlačování

Tento způsob výroby je jeden z nejdůležitějších pro zpracování polyethylenu. Ten je tvarován na vytlačovacích lisech vybavených vytlačovacími šneky se zvláště modifikovanými hubicemi. Tímto postupem se vyrábí různorodé druhy profilů a trubky do poloměru 150 mm. Odstředivým litím lze pak vyrobit trubky až do poloměru 750 mm, popřípadě je lze vyrobit i svařením desek.

Tlustší PE fólie se vytlačují z hubice, fólie pod 0,1 mm se vytlačují speciálními vytlačovacími lisami se šterbinou kruhového průřezu a vyfukováním za pomoci horkého vzduchu.

Polyethyleny můžeme nalisovat za tepla na kovové fólie, textil nebo papír. Tímto způsobem zhotovujeme vlákna, jejichž tloušťka se pohybuje v rozmezí od 0,1 do 0,2 mm a slouží k tvorbě filtračních tkanin.

Technologie odstředivého lití

Tato technologie slouží pro výrobu trubek o velkých průměrech. Dávka granulí proudí do otočné formy, kde se za ohřevu točí. Tím dochází k stejnoměrnému rozvrstvení taveniny na stěny formy.

Povrchová úprava pomocí polyethylenů

Tato technologie se využívá k ochraně povrchu kovů a je realizována stříkáním práškového polyethylenu na předehřátý povrch kovu mezi teplotami 150 až 250 °C. Pokud se jedná o menší díly kovu, ty se mohou při správném předehřátí nořit do jemného polyethylenového prášku, který je nadlehčován plynem.

Lehčení polyethylenů

Lehčení slouží především ke zlepšení dielektrických vlastností PE a využívá se hojně pro výrobu kabelů. Provádí se pomocí technologie vytlačování, kde se rozkládá nadouvadlo vlivem vyšší teploty.

Lisování polyethylenových desek

Vyrábí se pomocí topných desek zasazených do etážového lisu. Tyto desky se hojně využívají v místě, kde působí korozivní kapaliny, například v nádobách určené pro tyto kapaliny.

Recyklace PE

Použité materiály se buď mísí s čistými, nebo se z nich vytváří recyklát, který se používá pro výrobu méně jakostních dílů. V této práci byla testována právě možnost využití recyklátu pro nejvíce používanou technologii výroby polymerů, kterou je vstřikování.

Možnosti spojování a opracování PE

Díky své nízké tvrdosti, se dobře obrábí nástroji, ale vlivem své nepolárnosti, se obtížně lepí. Spojují se proto nejčastěji svařováním, za pomoci elektrických tepelných impulsů, nebo sálavým teplem. Dále se mohou svařovat pistolí za použití PE svařovacího drátu, jedná se

především o desky z lineárního PE. Polyethyleny se často potiskají po speciální úpravě povrchu.(11)

Výroba 3D tiskem

Moderním trendem dnešní doby ve zpracování materiálů je 3D tisk. Pomocí této technologie dnes můžeme vyrábět nejen materiály jednoho druhu, nebo homogenní materiály, dnes se již 3D tisk používá i k výrobě některých kompozitů, je však potřeba říci, že zatím 3D tisk není tak vyvinutý, aby zvládnul veškeré složitější kompozitní materiály pro příklady například letectví, či automobilového průmyslu, respektive pomocí 3D tisku nedokážeme ještě dnes tvořit materiály, které by se svojí druhovou paletou vyrovnali tradičním metodám výroby. Nicméně tato technologie je zároveň již tak pokročilá, že pomocí ní jsou běžně vyráběné výrobky speciálního typu, kusové výrobky s náročnějšími požadavky na tvar, 3D dokáže zhotovit dnes i části domů ve stavebnictví, nebo dokonce jídlo v kulinářských oborech. Polyethyleny jako samotné se zatím pro 3D tisk moc nehodí, ale určitě lze počítat s technologickým pokrokem v tomto odvětví, kde by mohli mít zastoupení i tyto materiály. (17)

2.9 Úvod do problematiky plastového odpadu

Ve 20. století dosáhla světová produkce plastů hranice 320 milionů tun za rok, z toho 40% plastů byly jednorázové obaly neboli plasty na jedno použití. Z celkové produkce pak 58 milionů tun dosáhla v roce 2014 Evropa. Dnes se všeobecně ví, že degradující plast, který prochází rozkladem, uvolňuje do životního prostředí nežádoucí látky, teprve v posledních 10 letech se však řeší zároveň uvolňování takzvaných mikroplastů. Tyto mikro/nano částice vznikají za působení vnějších atmosférických jevů, jako jsou vlny, otěr, UV záření, fotooxidace v kombinaci s bakteriemi, které pomáhají v rozkladu plastových dílů na tyto částice.

Většina probádaného mořského dna po celém světě, je dnes pokryta plasty, který byl roznesen důsledkem cirkulace proudů světových oceánů, tyto plasty pochází z odpadu shromážděného na pobřežích, které jsou ve většinovém množství sem dopraveny vodními toky ze středo-zemí. Nejvíce postihnutým místem je v tuto chvíli středozemní moře. Tyto částice dnes můžeme pozorovat v potravinách, v pitné vodě, v půdě, v sedimentu vodních toků, na hladinách oceánů, moří, v zažívacích traktách živočichů (lidí i zvířat – především

pak mořských savců a ryb), ale také v tkáních lidského organismu a v nedávné době byly tyto částice nalezeny i například v placentách těhotných žen. Všeobecně jsou tyto částice v lidském organismu považovány za cizí tělesa a vyvolávají místní imunoreakce, do jaké míry, však škodí lidskému organismu je nejasné. V tuto chvíli je jejich negativní účinek působení na živý organismus potvrzen nezávisle na sobě několika set pitvami ptáků a ryb na celém světě, které zemřely v důsledku přítomnosti plastů v jejich těle. Dále jsou mikroplasty nosiči dalších chemických látek, které znečišťují životní prostředí, nebo přísad do plastů, které se dále uvolňují do vody/ovzduší a jsou známé svými škodlivými účinky. (29), (30)

2.9.1 Mikroplasty

Mikroplasty jsou jedním ze zásadních problémů při nakládání s odpady polymerů. Jedná se o mikroskopické částice, často nepozorovatelné lidským okem, které se oddělují opotřebením, či nesprávnou likvidací polymerů, mikroplast je definovaný jako částice degradovaného plastu menší než 5 mm, nebo jsou v těchto rozměrech přímo komerčně vyráběny pro účel dalšího použití. Zvětráváním a působením eroze se umělé hmoty rozpadávají na množství malých částic, které se dále mohou dělit na další menší částice, čímž vzniká hmota, která se může rozkládat v běžném prostředí stovky let. Tyto částice jsou zpravidla vlivem přírodních živlů zaneseny do vodních toků, které pak částice zanesou až do moře. Mikroplasty ale byly podle nových výsledků studie, o obsahu mikroplastů ve sněhu na Mt. Everestu, objeveny od dna moře až právě k vrcholu nejvyšší hory světa, což zdůrazňuje rozsah globálního znečištění plasty ve vzdálených prostředích. Navíc může vítr transportovat takové plasty na dlouhé vzdálenosti; například velké prachové částice jsou transportovány na vzdálenost 3 500 km ze Sahary do severního Atlantiku. Cirkulace vzduchu a nálezy mikroplastů již dříve naznačovaly, že mikroplast se transportoval na vzdálenost až 95 km. Nejizolovanější oblasti ve Spojených státech, národní parky a oblasti národní divočiny, mohou hromadit částice MP poté, co jsou tam transportovány větrem a deštěm; odhaduje se, že více než 1 000 tun ročně spadá do chráněných oblastí na jihu a na středozápadě USA. (30) Toto se stává být problémem, nejen pro životní prostředí, ale také pro lidi samotné, kteří v dnešní době mohou běžně konzumovat tyto mikročástice společně například s tekutinami, které požívají právě z plastových nádob. Další částice mohou vznikat například při praní prádla ze syntetických materiálů nebo při běžném používání polymerů a dalších plastových spotřebních výrobků každý den. Pro příklad si můžeme vzít Frauenhoferovu studii z roku 2018, která vypovídá o tom, že v Německu na průměrného obyvatele spadá čtyři kilogramy mikroplastů/rok/obyvatele. (10), (4), (29)

Vznik mikroplastů

Většina mikroplastů pochází z vyráběných produktů, které se štěpí degradací, chemickým procesem, který dramaticky rozkládá polymery. Protože integrita plastů je založena na jejich významné molekulové hmotnosti, podstatná degradace materiál oslabuje a podstatně degradované plasty se mohou stát dostatečně křehkými, aby se rozpadly na malé kousky. I tyto fragmenty, které často nejsou viditelné pouhým okem, mohou projít další degradací, přičemž uhlík v polymeru je modifikován na CO₂, který může být následně absorbován do mořské biomasy.

Pokud jsou standardní polymery jako LDPE, HDPE, PP a nylony v mořském prostředí, UV-B záření ze slunečního záření spouští primární proces rozpadu, fotooxidační degradaci. Jakmile je zahájena, probíhá tato degradace termooxidačně bez nutnosti dalšího vystavení UV záření. Tato degradační sekvence může postupovat, pokud je pro proces k dispozici kyslík.

Jiné druhy degradace jsou mnohem pomalejší ve srovnání s oxidací vyvolanou světlem. Hydrolyza obecně není značným degradačním procesem v mořské vodě. Zatímco všechny biomateriály, včetně plastů, se obvykle budou v mořském prostředí biologicky rozkládat, rychlost této sekvence je o řadu řádů pomalejší ve srovnání s oxidační degradací vyvolanou světlem. (10)

Velkou hrozbou pro člověka, je právě samotná velikost těchto vzniklých plastů, nejdou detekovat lidským okem, ale zároveň, tyto pro lidský organismus, cizí mikročástice požívané ve větším množství mohou způsobovat závažné nemoci, jako je například rakovina, dále se pojí s biologickými riziky a přenosu bakterií, především potom těch, které jsou spojená s gastrointestinálními infekcemi. Lze určit pravidlo, že čím menší je částice tohoto plastu, tím se s ním pojí vyšší riziko pro člověka z následujícího důvodu, nanočástice těchto plastů totiž mohou proniknout do krevního oběhu člověka, na rozdíl od mikro částic, které ve většině případů projdou trávicím traktem, mohou být totiž tyto částice menší, než je hodnota 240 nanometrů a na základě toho projdou různými biologickými bariérami. Nanočástice plastů byly objeveny například v lidské placentě několika žen v Itálii, kde byly italskými gynekology testovány zdravé ženy, pomocí Ramanovy mikrospektroskopie (=dobře hodnocená vibrační technika, široce a úspěšně používaná v biomedicínské oblasti, k charakterizaci biologických vzorků), které nosily lidský plod, z této studie však nejde vyvodit žádné zvláštní závěry, šlo o testy jen na šesti ženách a z toho čtyři placenty byly pozitivně testovány na přítomnost nanoplastů, v praxi to znamená, že narozené dítě by bylo „tvořeno“, zároveň z těchto částic. Jak jsou plody ovlivněny přítomností těchto částic, však nevyšvětlila zatím žádná studie. Objevené částice byly o velikosti deseti mikronů, proto se

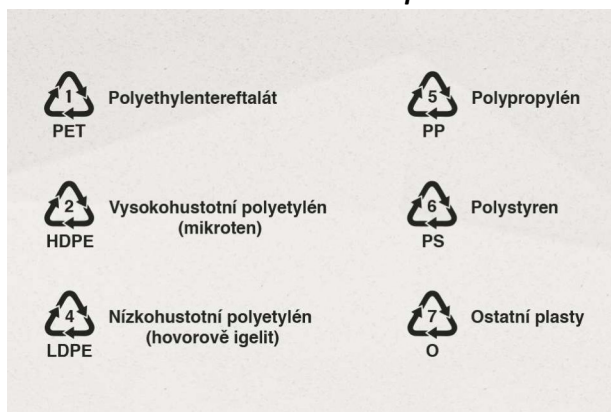
právě dostaly do krevního oběhu. Problémem jsou nyní i testované plastové láhve novorozenců, které jsou z nich krmeny, ty podle několika studií obsahují taktéž potenciálně škodlivé částice, které se při požívání tekutiny z těchto lahví dostávají do lidského organismu. (12)

Tyto částice se nejčastěji uvolňují z plastových folií jako je například LDPE, jenž byl použit pro výrobu zkušebních vzorků těles v praktické části této práce. Samotné plastové folie jako jsou například LDPE budou zmíněny ještě níže. (10)

2.9.2 Recyklační symboly plastů

Rozdělení plastových odpadů, není rozhodně jednoduché (viz. obr. 16.), i přes to co bylo řečeno výše v této práci, je jeho dělení velice komplexní, obzvláště pokud budeme mluvit o dělení plastových kompozitních odpadech. Členění plastových materiálů je ještě více komplexní, především pokud hovoříme o obalovém a odpadovém průmyslu. Každý obal je proto označený specifickými recyklačními značkami, jenž mají vypovídat o charakteristických vlastnostech a důležitých informací o složení daného obalu, dále díky nim poznáme, jak s daným druhem odpadu naložit. Pomocí recyklačních značek tedy můžeme rozeznávat důležité informace například o tom, do jakého kontejneru daný obal můžeme vhodit a za jakých podmínek (například při odstranění části obalu apod.). (13)

Obr. č. 24: Schéma složení kompozitních materiálů:



Zdroj: : www.samosebou.cz

2.9.3 Dělení plastových produktů:

- PET

Pod tímto označením je známý výrobek PET láhev, jedná se o označení, které přísluší polyethyltereftalátům, což jsou termoplasty spadající do skupiny polyesterů, v této skupině se nachází zároveň sáčky, fólie, nebo například polyesterové oblečení. Materiály ve skupině PET se obecně dobře recyklují a lze z nich vyrobit různé produkty, které mohou znovu posloužit společnosti.

- HDPE

Je zkratka charakteristická pro polyethylen, jedná se o vysokohustotní plast, který rovněž spadá do kategorie termoplastů. Tomu se přezdívá mikroten. Opět se však jedná, o chybné označení, které vyplývá z obchodní značky, podobně jako tomu je například u nápojových kartónů, kterým se přezdívá dle obchodního názvu tetrapak. Mimo obalové fólie se z HDPE vyrábí například víčka pro PET láhve, sáčky na vaření, láhve pro kojence a používá se hojně ve stavebnictví.

- PVC

Touto zkratkou se značí ty plastu s názvem polyvinylchlorid. Jedná se o velmi rozšířený typ plastu ve světě. PVC lze snadno vyrobit, ale recyklace je poměrně složitá. V praxi to znamená, že PVC není určeno k vytřídění do odpadu s plasty, ale do směsného odpadu.

- LDPE

Je značka pro materiál s názvem Polyethylen. LDPE se díky jeho hustotě a dalším mechanickým vlastnostem používá nejčastěji jako základ igelitových tašek, košů různého druhu, nebo přepravek na jídlo.

- PP

Polypropylen se nejčastěji využívá v potravinářství, jeho využití, ale hojně spatříme i v textilním průmyslu.

- PS

Toto je označení pro polystyren. Častou podobou PS je pěnová výplň jako izolace, jeho využití je ale opět široce variabilní, hodně se užívá v potravinářství, kde jsou z něho vyráběny lehké přístroje, kelímky, jeho charakteristikou je především pevnost a současně křehkost.

- OSTATNÍ PLASTY

Dalšími příklady plastů jsou například polyuretan, epoxidy, polykarbonáty, nebo polyamidy.

U některých plastů hovoříme o jejich nebezpečnosti na základě uvolňování chemikálií, zároveň ale podle nejnovějších vědeckých studií, zmíněných i v této práci je jasné, že je zde skupina plastů, které jsou nebezpečné i z hlediska uvolnění mikro a nano částic v čase užívání daného výrobku.

Z hlediska požadavků na vyříděné plasty, posílané do recyklačního procesu, je třeba dbát především na čistotu materiálu, proto například láhve od olejů a podobných mastných nečistot nejde bez opláchnutí vyřídít, v reálu ale i po důkladném vyčištění lze předpokládat, že většina těchto plastů, stejně skončí ve spalovnách či na skládkách. (13)

2.9.4 Recyklační symboly kompozitních polymerů

Již bylo v této práci vysvětleno, co jsou kompozitní materiály, nicméně ještě jednou si vysvětlení připomeneme v souvislosti s plastovým odpadem. Jde především o značky, kterými se různé plasty značí a co nám tedy napovídá, z čeho je daný obal či jiný druh plastu složený. Značky, které se používají pro značení kompozitních polymerů, nám tedy především ukazují, že se skládají z více různých druhů plastů, nebo z různých materiálů. Tyto značky nám stejně jako u jiných materiálů opět slouží k rozpoznání toho, jak s materiály dále nakládat ve formě odpadu.

Kompozitní obalové plasty

Plastové kompozitní materiály jsou často velmi náročné na recyklaci a to jak pro zpracovatele tohoto odpadu, tak pro spotřebitele, který daný odpad má zařadit a správně tedy zařadit do procesu recyklace.

Pro spotřebitele spočívá tato náročnost především v rozpoznání daného materiálu dle značky a poté následně znalost procesu recyklace, to znamená, že daný koncový spotřebitel musí tento materiál správně roztřídit do různých kontejnerů a to v případě kompozitu může často znamenat i oddělování různých částí materiálu. Proto v těchto případech končí tento materiál často ve směsném odpadu. Nemusí to být však ani chyba spotřebitele, jelikož mnoho kompozitních materiálů z plastu roztřídit zkrátka nelze.

Recyklační symboly u polymerních kompozitních materiálů začínají vždy písmenem C (z anglického “composite”).

Za lomítkem pak můžeme sledovat ten materiál, který v obalu převažuje. Občas jsou uvedeny i materiály dva. Posledním znakem ve značce je identifikační číslo. To specifikuje, o jakou kombinaci materiálů konkrétně jde. (14)

Recyklační značky pro kompozitní materiály z plastu: (14)

| | |
|-------------------|--------------------------------------|
| C / PAP / ALU | 84: papír a lepenka + plast + hliník |
| C / může se lišit | 90: plast + hliník |
| C / může se lišit | 91: plast + ocelový pocínovaný plech |
| C / může se lišit | 92: plast + různé kovy |
| C / může se lišit | 95: sklo + plast |

3 Cíl Práce

Cílem diplomové práce je výzkum mechanických vlastností polymerních kompozitních materiálů, vyráběných technologií vstřikování, při minimalizaci dopadu výroby na životní prostředí, tedy použitím vhodného materiálu. Proto jsou v praktické části práce použity materiály z recyklovaného LDPE v porovnání s materiálem prvotním. LDPE je druh polyethylenu s nízkou hustotou a vyrábí se z něho plastové fólie různých druhů, především pak polyethylenové sáčky, pytle, uzavíratelné (zipové) sáčky, paletizační a odpadové pytle, nebo tašky. Tyto výrobky se vyznačují složitým recyklačním procesem a jsou to materiály, které se ekonomicky nevyplatí recyklovat, proto práce hledá řešení problematiky odpadu z těchto výrobků.

Dále si za cíl dává ekonomické zhodnocení výroby produktů z LDPE recyklátu a použití v praxi. Vlastní experimentální část je věnována výzkumu, a to zejména v prostorách laboratoří katedry, kde jsou vyrobeny čtyři druhy materiálů, které jsou následně testovány na mechanické vlastnosti a dále je doporučeno jejich použití v praxi a srovnání s ostatními materiály, které mohou být použity při stejném účelu.

Dalším dílčím cílem této práce je seznámit čtenáře s problematikou kompozitních materiálů obecně a posléze především informovat čtenáře o polymerních kompozitních materiálech se zaměřením na plastové fólie LDPE a nebezpečí malých částic, které se uvolňují vlivem chemického procesu degradace LDPE a dalších plastových materiálů a vznikají tak úlomky plastového materiálu o velikosti menší než 5 mm, které se vlivem přírodních živlů dostávají do vodních toků, půdy nebo například i pitné vody, kde prokazatelně negativně ovlivňují životní prostředí a mají ekologicky negativní dopad na přírodní zdroje. K tomuto účelu práce čerpá z literatury a vědeckých poznatků, které pojednávají o problematice plastů v kontextu se znečišťováním životního prostředí a zhoršování kvality života živých organismů na planetě, včetně lidí. Z tohoto cíle dále vyplývá cíl této práce ukázat čtenáři alternativy při výrobě a užívání polymerních materiálu a zároveň použití materiálu v praxi, který může snížit výrobní náklady a zároveň produkci plastového odpadu, zpracováním plastu na druhotný výrobek s dostatečnými vlastnostmi, pro splnění různých požadavků na kvalitu výstřiků.

4 Metodika práce

Metodika práce je založena na literárním rozboru zdrojů z oblasti Polymerních kompozitních materiálů a zároveň je založena na měření a vlastního zpracování experimentální části v laboratořích. Práce sleduje moderní trendy v oboru polymerních kompozitních materiálů, jejich zpracování a to především v ohledu na vznikající odpad v souvislosti s výrobou a snížení dopadu na životní prostředí. Tyto poznatky práce čerpá z literárního rozboru za použití odborné literatury. Jsou zde použity zdroje českého i cizojazyčného původu a důležité informace jsou pak zaznamenány v teoretické části práce. Na tuto část pak navazuje část praktická, ve které jsou zohledněny informace z teoretické části a je zde provedena výroba pomocí technologie vstřikování, 4 výrobků ze 4 odlišných vstupních materiálů. Použité jsou materiály recyklované v porovnání s jedním čistým materiálem, aby šlo dobře udělat srovnání a navrnutí pro použití v praxi. V konečné části práce jsou provedena měření zkoušky tahem a tvrdosti materiálu s následným ekonomicko-matematickým zhodnocením za využití vícekriteriální analýzy, pro jejíž vstupní údaje v podobě vah, bylo osloveno 20 respondentů, tak aby hodnocení mohlo být objektivní. Závěrem je poté provedeno zhodnocení jednotlivých materiálů, jejich využití v praxi, jsou zhotoveny grafy ukazující mechanické vlastnosti materiálu a hodnoty měření jsou zaneseny do tabulek. Na úplný závěr je autorem práce zveřejněné doporučení pro využití materiálů z recyklátu LDPE.

5 Praktická část práce

Praktická část vychází z měření a práce v laboratořích, kdy byly vytvářeny 4 zkušební tělesa z 3 různých recyklovaných polyethylenových materiálů a jednoho přírodního materiálu LDPE. Tyto materiály byly vybrány s ohledem na teoretickou část této práce a to především kvůli hledání řešení zpracování polymerů s ohledem na životní prostředí. Recyklovaný materiál LDPE se vyrábí za pomoci granulace plastových fólií, které jsou vytříděny jako odpad spotřebitelem. K vytvoření zkušebních těles bylo použito vstřikovacího lisovacího stroje BOY E3, plnivo pro zkušební tělesa bylo použito LDPE regranulát ze společnosti ETW s.r.o., která sídlí v Nelahozevsi. Dále bylo provedeno měření a určení mechanických vlastností zkušebních těles. Postupně vše bylo v jednotlivých kapitolách vysvětleno, především jakým stylem se postupovalo při měření, při výběru materiálu, dále je zohledněno ekonomické zhodnocení výroby a nakonec je v praktické části vyhodnocena vhodnost použitého materiálu pro praktické využití a stanoveny vlastnosti materiálu na základě testování mechanický a chemických vlastností.

Důvodem, proč by vybrán tento materiál ke zpracování, vyplývá z předchozích kapitol, kde byla nastíněna problematika plastových odpadů, především poté mikro/nano-plastů a problematika LDPE a dalších plastových folií, které s sebou nesou vědecky podložená rizika pro životní prostředí. Recyklace je, jak vyplývá z předchozích kapitol velkým problémem především u použitých polymerních kompozitních materiálů, ale i kompozitů jiných druhů. Jelikož recyklace často vyžaduje rozložení materiálů na jednotlivé složky, je proto například recyklace kompozitních materiálů složených z různých druhů, jako jsou uhlíková vlákna společně například s polymerní matricí prakticky nemožná, pro svoji práci byl tedy vybrán polymerní kompozitní materiál, které byly do nedávna také nerecyklovatelné a ve 21. století jsou stále problémem při nakládání s odpady.

5.1 Výroba

5.1.1 Vstřikování plastů (ČSN EN ISO 294-2 (640210))

Přehled vstřikování

Většina vstřikovacích strojů přivádí malé nasekané plastové válečky ve formě granulátu z násypky do vratného šneku, který je posouvá přes vyhřívaný válec. Plast se taví a shromažďuje před šroubem, který se zasouvá, dokud není přítomno dostatek roztaveného plastu k naplnění formy. Smyk generovaný lety šroubu mísí taveninu tak, aby byla rovnoměrná. Šnek je poté hydraulicky tlačěn dopředu („výstřel“), čímž je tavenina vytlačována tryskou do formy, kde je distribuována běžci a prochází branami do částečných dutin. K tomu dochází při tlacích až 206 MPa. Voda nebo jiná tekutina cirkulující kanály vyříznutými ve formě odvádí teplo, aby se plast ochladil a ztuhl od stěn dutiny k jádru. Když jsou díly dostatečně tuhé, forma se otevře a vyhazovač je vyhodí. Další hmota se roztaví v hlavni, když části ochladí ve formě. Doba chlazení obecně řídí dobu cyklu vstřikovacího listu a tím i rychlost výroby. Existuje mnoho variant základního procesu vstřikování.

Celá výroba probíhala v souladu s normou ČSN EN ISO 294-2 (640210), (Plasty - Vstřikování zkušebních těles z termoplastů - Část 2: Malá tahová tělesa).

Double shot molding - dvoustupňový proces, který vstřikuje jednu barvu nebo materiál a po vytvrzení prvního výstřelu vstřikuje druhou barvu nebo materiál do původního tvaru nebo kolem něj.

Tvarování push-pull - snižuje anizotropii u plastů vyztužených vlákny nebo samovolně vyztužujících plastů (jako jsou polymery z tekutých krystalů) střídavým vyplňováním formy. Více vrstev má různou orientaci, takže součást má více uni-formových vlastností, než kdyby byla formována pouze jedním směrem.

Tavení jádra - umístěná do forem pro výrobu složitých, dutých struktur. Zahřátím součásti po tvarování se roztaví jádro, které vytéká ze součásti.

Vstřikování plynu - vstřikování inertního plynu (často dusíku) do taveniny při vstupu do formy. Plyn tvoří kanály v silnějších částech a balí plast do formy, aby se zkrátila doba cyklu a minimalizovalo se napětí, poklesy a deformace.

Každá oblast formovacího stroje zahrnuje důležité proměnné, které ovlivňují součást. Například teplota válce pomáhá vymezovat teplotu pryskyřice a tím i viskozitu pryskyřice, zatímco tlak vyvíjený na taveninu řídí vstřikovací tlak a rychlost. Mezi další důležité podmínky stroje patří rychlost šneku, velikost výstřelu, tlak v dutině, upínací tonáž, velikost brány, teplota formy, odvodušnění a mnoho dalšího.

Vlastnosti použitého plastu, jako je jeho tekutost, schopnost přenosu tepla a smršťování chlazení, vliv na účinnost formování. Tekutost je relativní míra toho, jak daleko se plast dostane od brány. Často se měří jako spirálové průtokové křivky, které ukazují vzdálenost, kterou plast proudí při nastaveném tlaku a teplotě po vstřikování do středu spirálového běhounu ve formě. Tekutost závisí na viskozitě taveniny pryskyřice, smykové odolnosti a tepelné vodivosti a ovlivňuje typ brány, velikost a umístění, použitou teplotu a tlak a další faktory. Jakmile plast naplní formu, měl by mít dostatečný přenos tepla, aby se části neohýbaly kvůli rozdílnému chlazení ve formě. Relativně stejnoměrná teplota formy také pomáhá rozvíjet optimální charakteristiky součásti, když krystalické pryskyřice krystalizují nebo amorfní žíhají. Dutiny formy jsou dimenzovány tak, aby zohledňovaly smrštění, protože termoplast tuhne ze střely, takže rozměry hotového dílu spadají do tolerancí. Smrštění závisí na použitém plnidle a jeho orientaci (vláknitá plniva mohou způsobit větší smrštění v jednom směru než v jiném). Závisí to také na tloušťce a geometrii součásti (tenké oblasti se zmenšují méně), velikosti brány a výsuvu, vzdálenosti toku ve formě a chlazení a ohřevu nástroje.

Design formy

Dobře navržená forma umožňuje nejširší možnou dobu zpracování, takže krátkodobě mohou nastat krátkodobé změny viskozity pryskyřice, hydraulického tlaku a teploty válce a dlouhodobější změny, jako je opotřebení šroubu a válce, kvalita dílů. Forma nástroje a cena formy se často odvíjí od povahy součásti. Například složité součásti s hlubokými vybráními a šroubovými závity mohou vyžadovat nákladné uvolňovací mechanismy, jako jsou skládací jádra, boční tahy, skluzavky, vícenásobné desky, automatické odšroubování nebo složité dělicí linie. Kromě složitosti dílu musí konstruktéři forem vzít v úvahu mnoho dalších faktorů, včetně:

Typy brán, velikosti a umístění - ovlivňuje distribuci tlaku v dutině, jak se vyrovnávají molekuly pryskyřice a výplňové prvky, čas plnění formy a smrštění. Plast by měl plynule proudit z brány až k hranici formy. Problémy související s plněním formy (např. Potrubí toku a jiné povrchové vady nebo nepravidelná hustota) lze často opravit u brány. Například brány jsou často umístěny tak, aby se svarová vedení (kde se po proudění kolem jádra setkávají dva nebo více proudů taveniny) vyskytovala v nekritických oblastech součásti.

Počet dutin na nástroj - liší se podle velikosti dílu a objemu výroby, tj. Vyšší objem výroby a menší součásti obvykle znamenají více dutin na nástroj (někdy stovky na formu).

Koncept - umožňuje uvolnění dílu vytvořením vůle, jakmile se forma otevře. Jedná se o přidání mírného zúžení do formy, obvykle minimálně o 0,5 stupně na stranu a častěji 1,5 až 3 stupně na každou stranu. Stupeň zúžení je ovlivněn povrchovou úpravou, tj. Čím vyšší je lesk, tím menší je zúžení.

Velké plochy dílů – mohou být podrženy upínacím systémem, pokud stroj není dostatečně velký. Pokud je upínací síla příliš nízká, může se forma mírně otevřít a umožnit vytvoření okraje z plastu nebo přetok. Po formování musí být odstraněn lesk.

Běžce - povaha systému ovlivňuje generování zmetků. Konvenční studené vtoky produkují hodně zmetků, zatímco pouzdra horkých vtoků redukuje zmetky zasunutím trysky do formy. Systémy horkých vtoků nepřinášejí žádné vadné výrobky, ale stojí více a jejich provoz je těžší než u studených. Vadný výrobek lze často přebrousit a znovu použít v procesu. (18)

Designové prvky

Splnit úkol designového výrobku metodou vstřikování může být velmi složité. Pouhá potřeba splnit stanovené tolerance souvisí se všemi aspekty procesu formování, včetně velikosti a tvaru dílu, chemické struktury pryskyřice, použitých plniv, uspořádání dutiny formy, vtoku, chlazení formy a použitých uvolňovacích mechanismů. Samotný stroj je také

důležitý, sledujeme, jak dobře řídí teplotu, tlak a upínací síly, stejně jako opotřebení šroubů a hlavně. Vzhledem k této složitosti návrháři často používají počítačové nástroje pro návrh, jako je analýza konečných prvků (FEA) a analýza plnění forem (MFA), aby se zkrátila doba a náklady na vývoj. FEA určuje přetvoření, napětí a deformaci v části rozdělením struktury na malé prvky, kde lze tyto parametry dobře definovat. I když tato metoda shrnuje lineární elastický materiál a nejčastěji se používá u konstrukcí pod stálým zatížením, může modelovat nelineární chování, jako je dotvarování. Použití anizotropních materiálů činí výpočty složitějšími. MFA vyhodnocuje polohu a velikost brány pro optimalizaci toku pryskyřice. Rovněž definuje umístění svarových linií, oblasti nadměrného namáhání a způsob, jakým proudí stěny a žebra. Mezi další nástroje pro návrh konečných prvků patří analýza chlazení formy pro distribuci teploty a analýza doby cyklu a smrštění pro kontrolu rozměrů. Rozměrový rozdíl pro různé koncepty a předpověď tvarovaných napětí a deformací. Při řešení celkové problematiky designu pro vstřikované díly, zahrnující vysoké náklady na formu znamenají, že díly by měly mít co nejvíce vlastností a univerzálních funkcí použití. Schopnost toho do značné míry závisí na použitém plastu. Designéři by měli prozkoumat několik vybraných materiálů, aby našli nejlepší rovnováhu pro splnění požadovaného výkonu v provozním prostředí, omezení nákladů a dalších zvláštních požadavků. A konečně, designéři by se měli snažit používat co nejmenší množství plastu a zároveň splňovat požadavky na strukturální, funkční, vzhledové a formovací schopnosti.

(18)

5.1.2 Volba materiálu výstřiku

Volba materiálu výstřiku zohledňuje požadavky, které je nutno splnit u daného výstřiku po dobu jeho životnosti, jenž si žádá zadavatel a to včetně restrikcí plynoucích z podstaty materiálových vlastností plastů.

V tuto chvíli je z celého světa k dispozici nepřeberné množství druhů materiálu. Celkově se používají především granuláty přímo vyrobené pro vstřikování, v této práci se zaměřuji na přímo recyklovaný granulát, který výrobce pro vstřikování doporučuje pouze po předchozí konzultaci. Granulát nedosahuje totiž stejných vlastností, jako jsou přímo vytvořené materiály po vstřikování, jak vyplývá z měření v laboratořích, které je součástí této práce.

Co se týče konkrétních materiálů a jejich vlastností, je zde pár parametrů, které jsou důležité sledovat při volbě materiálu. **Nejdůležitějšími údaji jsou:**

Teploty zpracování: výrobce udává teploty taveniny a rozmezí teplot formy pro daný materiál. Údaje o sušení materiálu, na jaké procento má být materiál vysušený, tolerance vlhkosti, teplota sušení. Čas, po který může být tavenina vstřikována při teplotě zpracování.

Dalším parametrem je plnicí fáze: jaké jsou parametry pro vstřikování malou, střední a vysokou rychlostí + vhodnost použití materiálu při daných rychlostech. Dále je vhodné znát poměr tlaku vůči dotlaku.

Posledním z nejdůležitějších parametrů je **tokový index taveniny (MFR)**. (19)

5.1.3 Faktory ovlivňující výběr materiálu výstřiku – požadavky na materiál

Zadavatel výroby výstřiku bere spolu s konstruktérem a designérem v úvahu řadu faktorů, které přímo ovlivňují výběr nejlepšího materiálu a splnění zadaných požadavků. Zvažuje proto tyto faktory:

- finance: cena materiálu, náklady na výrobu, náklady na systém,
- rozměry: tvar výstřiku, přesnost rozměrů a tvaru, hmotnost výrobku, rozměrová stálost, tvarová stálost (deformace), vlastnosti prostředí, ve kterém bude díl používán, použití krystalického či amorfního materiálu, smrštění, použití kompozitu a druhu plniva, obsah plniva, dodatečné smrštění,
- mechanické vlastnosti: únavové vlastnosti, životnost, tuhost, houževnatost, rázová odolnost, tvrdost, odolnost proti abrazi,
- environmentální dopad: odolnost proti UV záření, odolnost proti vodě, chemická odolnost, času rozpadu materiálu, tepelná odolnost, únik chemických látek při rozkladu, původ materiálu, energetická náročnost na výrobu materiálu, dopad na životní prostředí vlivem výroby materiálu a jeho zpracování, popřípadě recyklace,
- předpisy a normy: vhodnost použití pro vodu/ potraviny, nezávadnost pro lidský organismus, možnost použití materiálu pro výrobu hraček a podobného zboží podléhající speciálním požadavkům, požární odolnost,
- požadavky na vodivost: –normy pro použití, stínění, tloušťka stěny výrobku,
- akustické vlastnosti: přenos frekvence, vodivost zvuku,
- výběr procesu zpracování: technologie pro zpracování: vyfukováním, vytlačováním, tvarováním, vstřikováním apod.,
- proveditelnost následné operace: svařování - konduktivní, vibrační, horkým vzduchem, laserové, ultrazvukové, další operace jako lepení, lakování, potiskování, metalizace, popisování laserem, galvanické pokovování atd. (16)

5.1.4 Stárnutí a koroze dílů z plastů

Koroze u plastů znamená stárnutí, či degradaci, což je poškození vlivem narušení struktury. Plasty oproti kovovým materiálům nepodléhají elektrochemickým vlivům. Stárnutí je trvalý chemicko – fyzikální proces, jenž způsobuje degradaci polymerů: jedná se o nevratné změny stavu chemické struktury materiálu, které způsobí ztrátu mechanických vlastností, chemické odolnosti, křehnutí, lesku nebo barvy. Stárnutí je ovlivněno fyzikálními vlivy, jako jsou vlivy atmosférické, radiace, teplota, UV záření, světlo, či mechanická namáhání. Další příčinou jsou chemické a fyzikálně chemické, jako bobtnání, poničení chemickou reakcí, či difúze, zároveň zde hrají roli i biologické vlivy, způsobené plísněmi nebo korozí účinkem mikroorganismů.

- Difúze: difundující látka mění pohyb v makromolekulách, což způsobuje změny vlastností. U amorfních materiálů je difúze, vlivem svého uspořádání snadnější než u polymerů krystalických, míra difúze se odvíjí od propustnosti polymerních materiálů.
- Bobtnání: jsou tvořeny sekundární vazby v makromolekulárním řetězci difundující látkou, dochází ke změně vlastností materiálu a jeho objemu vlivem oddalování řetězců.
- Poničení chemickou reakcí: Vlivem chemického působení na polymer, či na jeho aditiva, dochází ke změně na základě reakce polymeru s difundující látkou.
- Degradace plastů: makromolekuly jsou štěpeny na malé částice a tím dochází k rozkladu polymerních materiálů. Jev kdy dochází k štěpení na nízké oligomery a monomery nazýváme depolymerací.

Poté existují faktory stárnutí, které většinou působí v synergii a, nebo se jinak vzájemně ovlivňují: (16)

- Vlivy tepelné: tepelné stárnutí vzniká vlivem většinou extrémních teplot (nízké, či vysoké, ale zároveň může být i teplota běžného prostředí), u teploty se také uvažuje s dobou působení, vzniká tak narušení makromolekul, na základě čehož polymer křehne. Tepelné stárnutí může působit v inertní atmosféře, nebo ve vodní, olejové, či jiné lázni.
- Termooxidační vliv: vzniká tepelnou degradací vlivem teploty a kyslíku, kde kyslík působí jako katalyzátor procesu degradace.
- Fotochemické faktory: molekuly a jejich energetický stav je ovlivněn absorpcí světla a tím dochází k rozdělení neboli degradaci materiálu.

- **Radiační působení (gama záření, X paprsky):** negativně působí na chemickou strukturu.
- **Mechanické vlivy:** Nastává materiálová degradace vlivem působení namáhání při procesu granulace, ultrazvukovým namáháním, či smykovým napětím vznikajícím při toku taveniny apod.
- **Mechanické namáhání:** dochází k přerušení molekulární struktury vlivem nerovnoměrně rozloženého namáhání v ohybu, krutu, tlaku, či tahu.
- **Vlivem chemikálií:** dochází k narušení povrchu materiálu chemickou reakcí vyvolanou organickými médii, zásadami, vodou, či kyselinami.
- **Povětrnostní vlivy stárnutí:** Při působení kyslíku, vlhkosti, sucha a slunečního záření dochází ke stárnutí materiálu, vlivem křehnutí materiálu (rozrušení makromolekul). Dále může docházet ke barevného odstínu, lesku, žloutnutí, vzniku trhlin apod. Dochází k vytěkávání změkčovadla u termoplastů, které je obsahují jako je CA nebo měkčené PVC. Zároveň může být však efekt opačný, tj. po životnosti, může degradace trvat déle vlivem stabilizace. (16)

Stárnutí lze ošetřit na základě aditiv, jako je ochrana proti gama záření, použití antioxidantu, či stabilizátorů a ochrany vůči UV záření. Stárnutí mohou předcházet i zkoušky stárnutí, které nám za určitých podmínek pomůžou odhalit slabiny materiálu, ještě před samotným uvedením do provozu. Poslední ochranou je testování životnosti polymerů na základě zkoušek životnosti, jenž se modifikují dle požadavků na daný díl. (20)

5.1.5 Faktory ovlivňující dobu životnosti plastových dílů

Výroba plastových dílů podléhá požadavkům na kvalitu zhotovení jednotlivých dílů z termoplastu a to dle druhu využití, mezi důležité parametry, které se sledují je životnost jednotlivých dílů, která je dána jednotlivými faktory, které ji přímo ovlivňují:

- **Typ materiálu (fyzikální a chemické vlastnosti):** chemická rezistence proti vodě, různým olejům, čisticím prostředkům a odolnost proti nízkým a vysokým teplotám.
- **Další úpravy a operace:** úprava lepením, lakováním, svařováním.
- **Design, tvar a konstrukce:** velikost a tvary jednotlivých součástí, rádiusy, konstrukce a tloušťka stěn, poloha a druh rozvodu vtoku a ústí vtoku – ve fázi konstrukce je potom možná zpětná úprava a doladění jednotlivých dílů pomocí simulačních programů.
- **Postup výrobního procesu:** optimalizace parametrů postupu při samotném vstřikování termoplastů – fáze plnění a sušení – optimalizace parametrů povrchu výstřiků, fáze dotlaku

– nastavení rozměrů a určení deformací, doba odolnosti při zpracovatelské teplotě – hrozí degradace vlivem teploty.

•**Stanovení odhadu životnosti dílů:** zkoušky dílů pomocí testů – test stárnutí vlivem UV záření, oxidace při vyšší teplotě a vlhkosti, tahové zkoušky – stanovení mechanických vlastností, testování optických vlastností.

•**Stanovení závěru, který zvýší životnost dílů:** požadavek na nízké tahové napětí v dílu (tento bod lze ovlivnit konstrukcí výstřiku), vysoká výdrž materiálu (lze ovlivnit výrobním procesem), vhodný výběr materiálu (zacílení na důležité parametry, které ovlivní výdrž plastových produktů). (8)

5.2 Technologie vstřikování

Vstřikování je nepřetržitý produkční proces – o tomto postupu hovoříme jako o cyklické výrobě, z toho důvodu je patrné, že předpokládáme (pokud lze zajistit ostatní parametry ve kvalitě výroby) určitou stabilitu procesu. V praxi to znamená, že musíme být schopni dodržet podmínku, že každý vstřikovací cyklus bude mít stejný průběh. Abychom dokázali měřit takovouto podmínku, musíme se zaměřit na hmotnost vstřikovacího materiálu, která je potřeba změřit hned po vyjmutí výstřiku z formy, jedná se o hlavní ukazatel kvality výstřiku. Hmotnost (neboli naměřené hodnoty v každém cyklu) nám ale udává míru stability procesu a není přímým ukazatelem jakosti. Různé hodnoty hmotnosti mohou sloužit jako kvalitativní parametr (přesněji řečeno jako parametr, od které se mohou ostatní kvalitativní parametry odvíjet) jen v určitých případech a to u výstřiků které jsou naplněny při použití standardní studená vtoková soustava, neboli tam, kde často dochází ke korelaci hmotnosti s naměřenými hodnotami například smrštění (čím je hmotnost vyšší, tím nižší je smrštění).

V praxi takových případů není mnoho, celkově lze tedy spíše soudit, že mezi hmotností a dalšími kvalitativními parametry vztah není. Samotná kvalita výstřiků lze tedy hodnotit na základě jiných parametrů, jedná se především o stav těchto termoplastů, ve kterém se nachází po vytvarování dutinou od vstřikovací formy a následně jejich vyndáním a zanecháním v klidu po dobu min. 16 hodin. Obvykle se pro dobu relaxace vymezuje 24 hodin a zároveň by se neměla relaxace blížit k 48 hodinám. Pro relaxaci se volí běžné prostředí, které je vymezené teplotou a relativní vlhkostí ovzduší. (20)

Stav výstřiků můžeme definovat:

- Dle stupně a polohy makromolekul, popřípadě orientací u vyztužených kompozitů, či dle orientace výztužných plniv. NA tuto orientaci může mít velký vliv především teplota taveniny a také rychlost vstřikování, dále podíl tlakové a chladící fáze vstřikování, neboli jak rychle se tavenina ochlazuje.
- Podle velikosti a povahy vnitřního pnutí, nejlépe potom složka tepelného pnutí, která je samozřejmě ovlivněna teplotou formy a taveniny. Další základní složkou je pnutí následkem nestejně orientace, krystalizace, nebo také pnutí z přeplnění, které vzniká při stanovení nevhodné tlakové fáze vstřikování.
- Stav je také charakterizován přítomností krystalické fáze, především u termoplastů částečně krystalických. Dále závisí na rozložení a velikosti sférolitů a je daný také efektem zvaným skin-core, ten udává rozdíl mezi obsahy krystalických podílů v průřezu stěny výstřiku. (8), (20)

5.2.1 Fáze cyklu vstřikování

Cyklus vstřikování je možné členit na čtyři důležité fáze, jde o fáze, při kterých dochází k ovlivnění stavu výstřiku a zároveň i určuje kvalitu. V následujících odstavcích jsou charakterizovány hlavní předpoklady, které jsou zapotřebí při požadavcích na maximální stejnost výstřiků. (8),(20)

5.2.2 Fáze plastikační

Pro vyhovující naplnění tvarující dutiny formy termoplastickou taveninou je zapotřebí zajistit viskozitní a teplotní homogenitu v použitém množství taveniny před šnekovým čelem. Toto lze zajistit pomocí správné konfigurace teplot v topných částech plastikačního válce, také je to ovlivněno nastavením zpětného odporu šneku a jeho obvodové rychlosti. Otáčky šneku a zpětný odpor lze ale v průběhu plastifikace modifikovat, lze například v každém úseku dávkovací dráhy šneku nastavit různé parametry. Viskozitní a teplotní nečelistvost taveniny docílí toho, že povrch výstřiku bude nekvalitní a budou zde určité vady, jako je nevhodný lesk, viditelné spoje, viditelné čáry odkazující na proud toku, rozmístění plniva a makromolekul, nerovnoměrnost makromolekulární struktury a vnitřní pnutí. Hlavním původcem rozložení makromolekul a jejich orientaci ve výstřiku je teplota taveniny. Pokud teplota taveniny roste, pak stupeň orientace makromolekul klesá a fyzikální vlastnosti výstřiku se stávají nezávislé na směru měření. Ve směru toku taveniny se pak ale zhoršují vybrané mechanické vlastnosti, především pak houževnatost a pevnost v tahu, pevnost spojů však naopak narůstá a vnitřní pnutí ve výstřiku se snižuje. Vyššího

smrštění v návaznosti na nižší dosmrštění, pak dosahují výstřiky tehdy, pokud jsou tvořeny z krystalických materiálů. (21),(20)

5.2.3 Fáze vstřikovací

V této fázi dochází k plnění tvarové dutiny ve formě, která se postupně zaplňuje taveninou, která je termicky homogenní. Když dochází k plnění, je důležité, aby v každé části průřezu dutiny byla rychlost přední hrany proudu konstantní. To znamená, že průřez taveninou je po celou dobu toku stejný a zároveň je obvod průřezu taveninou konstantní. Tato skutečnost lze bez potíží dodržet za předpokladu, že se jedná o tvarově nenáročný výstřik se stejnou tloušťkou stěny po celém výstřiku, pokud však nastává situace, že je potřeba vytvořit výstřik, který je tvarově nestálý, neboli je jeho tvar daleko komplikovanější a nemá ani například konstantní tloušťku stěny, lze předpokládat problematické řešení i za použití nejmodernějších počítačových simulací plnicí fáze. Jak již bylo řečeno výše, povrchové defekty se objevují často ve chvíli, kdy není dodržena optimální rychlost výstřiku a jedná se především o viditelné vrásnění, kazy od studených spojů, zvrásnění povrchu, či viditelnost defektu na povrchu podobného pomerančové kůře. Proto je dodržení optimální rychlosti a zároveň i teploty taveniny + formy zásadním parametrem, který v kombinaci zabraňuje vysoké hodnotě smykového napětí na povrchu výstřiku. Pokud se jedná konkrétně o polymery, které mají částicové plnivo, pak je nejlepší kombinace vysoká teplota taveniny a nízká vstřikovací rychlost. Naopak zase u vláknitých plniv je lepší volit vysokou rychlost vstřiku. Horších vlastností je dosaženo, pokud je zvolena nízká vstřikovací rychlost, což způsobuje rychlé ochlazování čela v tvarové dutině formy a tím narůstá orientace a dochází k anizotropii vlastností po celé ploše výstřiku. Během toho co rychlost klesá, se zvyšuje houževnatost a pevnost materiálu ve směru toku taveniny, zároveň dochází ale k poklesu povrchového lesku a ke snížení pevnosti v místě studených spojů. Během této fáze se současně reguluje průtok oleje a dochází ke změně regulovaného oleje z průtokové na tlakovou. Z tlaku se přepíná na dotlak tak, že nedochází k ovlivnění plynulé tlakové odezvy, při realizaci plnicí fáze, která probíhá v dutině formy. Ve finální křivce tlaku tedy nesmí nastat žádný výrazný propad ani výrazný nárůst, křivka musí být plynulá, začínat na nízkých hodnotách a pomalu stoupat až do maxima, kde dochází ke zmiňovanému přepnutí na dotlak. Je tím dosaženo maximální izotopie vlastností a dochází k eliminaci vnitřního pnutí.

Pokud je na křivce viditelný výrazný pokles, jedná se o předčasné přepnutí, tím vzniká anizotropie vlastností materiálu a dochází k nárůstu vnitřního pnutí, které vznikne na základě přetoků v dělicí rovině. Dotlak se pro plnění dutiny využívá často tam, kde je požadavek na hodně pomalé vstřikování, aby šlo vůbec výstřik vyrobit, často je totiž dotlak nižší než nejnižší vstřikovací rychlost. (21)

5.2.4 Fáze dotlaková

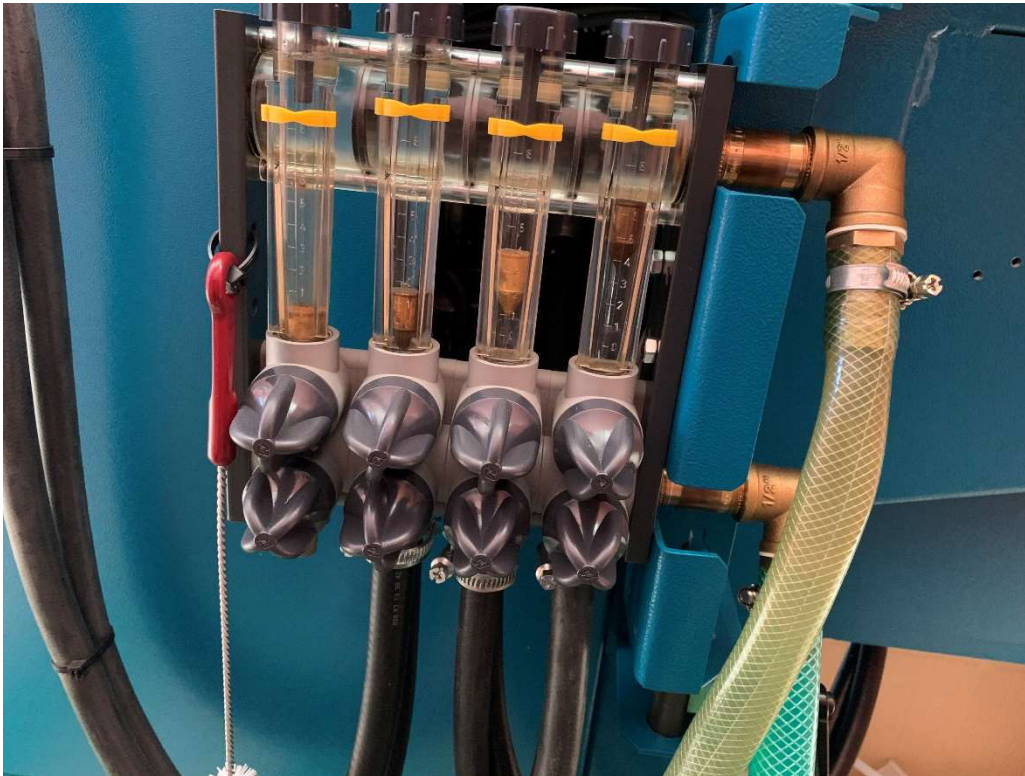
Dotlak, který je definovaný výší tlakové zpětné vazby v dutině a časem působení je vždy volen na základě požadavků na výstřik jako je tvar, hmotnost a rozměr výstřiku. Ve výstřiku se pomocí dotlaku a jeho parametrů vytváří mimo jiné vnitřní pnutí, během této fáze se vytváří požadovaná hmotnost výstřiku, stejně jako dochází k vyplnění tvarů formy. Což je zároveň i neekonomické, jelikož dochází ke zbytečné činnosti čerpadla. Dotlak je výhodným pro nápravu smrštění, tím i rozměrů, nebo deformací a slouží i k odstranění zmíněných propadlin, či bublin také potlačuje trhliny a zlepšuje kopírovatelnost dutiny formy, neboli přispívá k vyplnění krajů formy. Množství taveniny, jenž zůstává před čelem šneku po ukončení dotlakové fáze přezdíváme polštář, pomocí něhož můžeme kontrolovat dopad vlivu plnicí fáze a dotlaku na výstřik. Pokud hovoříme o tzv, reprodukovatelném procesu, pak to znamená, že je tento polštář v určité toleranci stejný v každém cyklu.(21)

5.2.5 Fáze ochlazovací

Jakmile je tvarová dutina plněna polymerní taveninou, respektive jakmile dojde k naplnění formy, dochází k ochlazování výstřiku, ochlazovací jednotkou (viz obr. č. 25) a trvá, až dokud není ukončen proces plnění a není výstřik vyhozen z formy. Můžeme si všimnout, že daný výstřik je po vyhození z formy stále horký, ale již je v plně pevném skupenství. Ochlazování se definuje teplotou formy a dobou samotného ochlazování. Správně nastavený ochlazovací systém je takový, který po vyhození výstřiku z formy nepůsobí deformaci výstřiku, respektive, pokud má ochlazování správné parametry, nedochází k deformaci tělesa vyhazovacím systémem ani dopadem tělesa do vzorkového zásobníku. Nejdůležitějším parametrem ochlazování pro dosažení požadované jakosti výstřiku, je teplota formy. Rychlost ochlazování, nám potom určuje především relaxační jevy materiálu, jako je orientace, tepelné a orientační pnutí nebo i krystalickou strukturu.

Vyšší teplota formy pak pozitivně ovlivňuje vlastnosti povrchového lesku a celkově jakost povrchu výstřiku. Nastavení správných parametrů doby ochlazování ovlivňuje pozitivně ekonomii výroby, z pohledu času potřebného pro vytvoření daného výrobku, jelikož je často nejdelším procesem. Pro dosažení patřičné kvality - minimální vnitřní pnutí, rovnoměrnost vnitřní struktury výrobku, izotopii a dalších jakostních parametrů, je dobré volit co nejdelší dobu ochlazování, z ekonomického hlediska pak naopak. V této fázi proto často volíme kompromisní řešení pro splnění požadavků na jakost výstřiku v kombinaci s cenovými požadavky, které zpravidla nastavují odběratelé výrobků. Samozřejmě je pro finální požadovanou kvalitu nutné dodržet celou řadu procesů a optimálních parametrů a nastavení. (22),(21)

Obr. č. 25: Ochlazovací jednotka vstřikovacího lisu Boy 35 E



Zdroj: Archiv autora

5.3 Postup při výrobě prvních výstřiků

Výrobě prvních výstřiků předchází samozřejmě výroba samotné formy pro vstřik, ve chvíli kdy máme vyrobenou a připravenou formu dle požadavků, můžeme začít se samotným procesem výroby výstřiků, v této práci je použita forma pro výrobu těles vhodných pro následné měření mechanických vlastností.

5.3.1 Příprava vstřikování

Postup:

1. Volba typu vstřikovacího stroje, dle požadavku na velikost formy a objemu vstřikovacího materiálu a velikosti konečného výrobku.
2. Připravený granulát s vlhkostí dle požadavků na daný granulát.
3. Osazení formy do vstřikovacího stroje.
4. Zapojení vyhazovacího mechanismu formy – zkontrolovat funkčnost.

5. Zapojení a příprava hydraulických tahačů jader – zkontrolovat funkčnost.
 6. Příprava vytáčecího (závitových) mechanismu – zkontrolovat funkčnost.
 7. Nastavení vzduchových systémů - zkontrolovat funkčnost a těsnost.
 8. Připojení kontrolních systémů – koncový spínač – zkontrolovat funkčnost.
 9. Zkontrolovat funkčnosti formy bez samotného materiálu – pohyblivost, srovnání čelistí, jádra, vytáčení.
 10. Nastavení temperačních systémů formy – Sledovat schéma zapojení – zkontrolovat funkčnost a těsnost, také průchodnost.
 11. Nastavení a zapojení horkého okruhu formy – funkčnost.
 12. Zapojení dalších zařízení – příprava dávkování granulátu (ručně), případných dávkovač aditiv do granulátu, temperační mechanismus, manipulátor pro hotové výstřiky a vtokové zbytky + montážní komponenty a zástřiky, montážní zařízení u stroje, kontrolní prvky atd.
- (8)

5.3.2 První nastavení strojních a technologických parametrů vstřikování

Můžeme k tomuto nastavení použít například údaje o parametrech materiálu. Postupujeme dle těchto bodů:

1. Nastavíme teplotu jednotlivých částí plastifikační jednotky.
2. Nastavíme hodnotu teploty temperačních okruhů.
3. Nastavíme teplotu částí teplého systému formy.
4. Dále charakterizujeme výšku a uzavírací sílu formy.
5. Nastavíme rychlosti a otevírací + uzavírací dráhy.
6. Nastavíme čas, dráhu a tlak, tak abychom chránili formu.
7. Nastavíme tlaky + polohy a dráhy vyhazování.
8. Nastavíme systémy vzduchu.
9. Nastavíme systémy závitů.
10. Nastavíme předběžně množství dávky a dekompresí.
11. Připravíme nastavení plastikace – to znamená otáčky šneku, charakterizujeme zpětný odpor s ohledem na množství a charakteristiky vstřikovaného materiálu.

12. Kvalifikovaný odhad charakteristiky rychlosti vstřikování s ohledem na dávku.
13. Dle charakteristiky rychlosti nastavíme tlak vstřikování.
14. Nastavíme dobu dotlaku, či tlakovou úroveň na nulu.
15. Charakterizujeme situaci přepnutí na dotlak ze vstřikovacího tlaku s ohledem na dráhu, tedy objem.
16. Odhadneme a nastavíme dobu ochlazování výstřiku.
17. V posledním kroku nastavíme připojená zařízení. (8)

5.3.3 Výroba prvních výstřiků

1. Nejdříve volíme nižší hodnoty vstřikovacího tlaku a rychlosti pro vstřikování.
2. Zvyšujeme tyto parametry až do chvíle, kdy dojde k naplnění taveniny do krajů formy a výstřik je tedy celistvý a kompletní bez jakýchkoliv přetoků.
3. Nyní máme výstřiky tvarově a objemově plné z minimálních 95%, bez dotlaku jsou však výstřiky propadlé nebo zvrásněné. Nyní zkontrolujeme velikost polštáře, ve chvíli, kdy se velikost jeví dostatečná, vezmeme ji jako výchozí část, kdy přepneme vstřikovací tlak na dotlak.
4. Nyní zvyšujeme účinnost dotlaku a jeho doby působení, cílíme tím na rovnost a celistvost materiálu a jeho lesk.
5. Nyní můžeme považovat vstřikovací proces za nastavený a ustálený, v tuto chvíli můžeme vyrobit několik vzorků pro jeho následné měření kvality, cca. 20 – 30 vzorků.
6. Provádíme kontrolu vyrobených polotovarů z hlediska požadavků na kvalitu. (8)

5.3.4 První optimalizace vstřikovacího procesu

Po nastavení a první výrobě výstřiků následuje většinou optimalizace celého procesu z několika jednoduchých důvodů, jde o to minimalizovat náklady při výrobě, zároveň optimalizaci jakosti výstřiků a celkově úpravu parametrů zvolených výstřiků, pro potlačení výroby zmetků. Jedná se především o úpravu vstupních parametrů procesu, například provozních teplot, rychlosti vstřikování, hodnoty tlaků, dále množství vstřikovaného materiálu, doby tlaku na formě, doby vstřiku apod. jedná se o celou řadu parametrů, které mohou ovlivnit výsledný proces. Celkově lze celý proces detailně pozorovat a na výrobku sledovat nežádoucí vlivy, například přetoky na výstřiku mohou být způsobeny přílišným množstvím vstřikovaného materiálu, proto je nutné optimalizovat dávku granulátu apod. (20)

5.3.5 Vstřikovací stroj

Nejdůležitějším aspektem z hlediska vstřikovacího stroje je především jeho údržba, i přes to, že v marketingových textech najdete hodně zkrášlujících vět o konkrétním typu stroje, je v tuto chvíli na trhu rovnocenných strojů, které se liší jen v málo parametrech a je prakticky nevýznamné vybírat stroj, dle výrobce. Všechny vstřikovací lisy poslouží velmi podobně a jejich rozdíly v parametrech jsou opravdu zanedbatelné. Největší roli tedy hraje údržba stroje, pokud jde o hydraulický vstřikolis je pak důležité i čištění oleje, stejně jako jeho pravidelná výměna. Dalším důležitým úkonem je správné nastavení stroje, které prodlužuje opět životnost stroje a především zlepšuje kvalitu výstřiků. Dále jsou zapotřebí samozřejmě správné parametry stroje, jak již bylo zmiňováno, jako je například velikost formy, uzavírací tlak formy (viz. obr. č. 26) apod. (20)

Jako granulát byly pro práci zvoleny recyklované LDPE materiály ze společnosti ETW s.r.o. se sídlem v Nelahozevsi. Tyto regranuláty jsou vyráběny za pomoci zpracování odpadních folií, příkaldy těchto folií lze vidět na obr.č. 25. LDPE regranuláty se vyznačují vysokou kvalitou především díky několika postupového procesu zpracování. Nejdříve se připraví materiál na třídící lince, tj. vyloučení nežádoucí příměsi a volba materiálu pro koncový výrobek, pak následuje technologické třířázové praní, které je charakteristické odseparováním nečistot pomocí frikční a flotační technologie. Dalším krokem je kontinuální automatická filtrace při procesu samotné regranulace – roztavení již vypraného a vysušeného materiálu, při kterém je důležitým aspektem odfiltrování zbývajících nečistot, odplynění a případně přidání požadovaných aditiv (Barva, UV, CaCo, apod.), následně homogenizace – promíchání regranulátu, pro stabilizaci následného výrobního procesu a provedení testů toku tavení (MFI).

Právě podle MFI byl poté vybrán regranulát pro požadavky stroje, pro jeho zpracování viz níže. V opačném případě, kdy by MFI materiálu bylo příliš nízké a nesplnilo by minimální požadavek vstřikovacího lisu, by mohlo dojít k ucpání trysek při roztavení použitého plniva, které by vedlo k selhání při výrobě kompozitního zkušební tělesa.

Plnivo bylo testováno na vstřikovacím lisu BOY E 35.

Obr. č. 25 Příklad odpadu LDPE fólií



Zdroj: Archiv autora

Obr. č. 26: Vstřikovací lis Boy 35 E pro výrobu polymerů vstřikovací technologií



Zdroj: Archiv autora

5.4 Plastové obaly a jejich alternativy

Na úvod je třeba říci, že z ekologického a environmentálního hlediska je plast asi jeden z nejhorších materiálů, který byl člověkem vytvořen. Nicméně i když mnozí bojují za jeho zrušení a z pohledu ekologie by bylo opravdu dobré ho okamžitě přestat používat, z technického hlediska je to výborný materiál se skvělými vlastnostmi napříč celou průmyslovou výrobou. Proto je jasné a je potřeba si to uvědomovat, že se bez plastových obalů zatím nedokážeme obejít na 100% – v některých případech totiž tento materiál nelze nahradit jiným za žádných okolností. Je proto potřeba vložit svůj čas do hledání alternativy zdrojů a původu jiných materiálů a najít takový, nebo takové, které by dokázali plastové obaly nahradit úplně, další variantou, jak v této problematice přispět je také hledání způsobu recyklace a dalšího využití plastového odpadu abychom tento materiál nemuseli stále dokola vyrábět, a zároveň se můžeme zbavit již starého materiálu, který v opačné případě končí na skládkách či ve spalovnách. Obrovským problémem je i chování spotřebitele, který často s produkcí plastového odpadu nešetří, ať už na základě nedostatku informací, nebo nezájmem o možné riziko. Plast je sice materiál s výbornými a všestrannými

mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, na druhou stranu se však začínají objevovat materiály přírodního charakteru, které dokáží plasty v mnohých místech nahradit. (6)

Využití a vlastnosti plastových obalů

Obaly a další výrobky z plastu jsou důležitou součástí výrobní politiky lidské činnosti. Bylo by pozitivní pro životní prostředí, kdybychom polymery nepoužívali vůbec s ohledem na jejich komplexní zpracování a jejich poloměr času rozpadu. Nicméně plasty globálně nemají v různých odvětvích kvalitní zastoupení jinými materiály a mají jedinečné mechanické vlastnosti, které je řadí mezi nejlepší materiály například v obalovém odvětví, jejich výroba zároveň není nákladná, a proto jsou z ekonomického i praktického hlediska hlavní volbou v různých průmyslových odvětvích po celém světě. Bylo by tedy nejjednodušší z hlediska životního prostředí, říct, že plasty nepotřebujeme, nicméně používáme je hojně, protože veškeré zboží podléhá určitým požadavkům na přepravu a balení. Plasty ve formě obalů slouží, jako ochrana výrobku před nepříznivým vlivem okolního prostředí zároveň potlačují vliv mechanického nebo chemického poškození. Plasty chrání před škůdci, vlivem tepla, světla, vlhkosti apod., ale také chrání výrobek při manipulaci a přepravě.(23) Plasty ale také dobře plní funkci marketingu, jsou totiž dobrým materiálem pro prezentaci výrobku, což má za následek především jejich průhlednost, tvarovatelnost, další výhodou je jejich přizpůsobivost – především v podobě fólií. Paradoxně se však marketingová výhoda pomalu obrací právě proti tomuto výrobku a stává se vlastně jeho nevýhodou, s rostoucí informovaností veřejnosti se totiž vrhá na plasty neblahé světlo z pohledu ekologie a zákazníci tak na základě různých informací začínají vybírat produkty bezobalové, či volí různé alternativy plastu, například v podobě papírových sáčků. (6)

Právě díky rozmanitým vlastnostem jsou však plastové obaly stále populární ze strany zpracovatele i ze strany spotřebitele výrobku a rozšířené po celém světě. Především pomocí tenké LDPE fólie dokážeme prodloužit dobu expirace u produktů jako je například zelenina a maso. Další využití pro plastové obaly najdeme třeba v chemickém průmyslu na balení například různých čističů, přípravků na nádobí a nap. ranní, nebo na balení nebezpečných látek v podobě plastových sudů, kde konkurenční materiály nemohou obstát buď z hlediska vlastností či ceně a tam kde plastové obaly neobstojí, se volí často kombinace tohoto materiálu s jiným, například často v kombinaci s hliníkem.

Na výrobu plastových produktů se ročně spotřebuje 8% celkové celosvětové produkce ropy. Postupem času se navíc tyto výrobky stávají odpadem, nejčastěji navíc hned po prvním použití.(23)

Postup třídění plastu

1. Na začátku procesu je spotřebitel, který plast musí vytřídit a odnést do správného kontejneru.
2. Další operací v procesu zpracování je svoz odpadu
3. Následuje dotřídění odpadu na dotřídňovací lince.
4. Na konci procesu je naopak zpracovatel plastového odpadu určeného k recyklaci.(23)

LDPE a HDPE fólie se samozřejmě v rámci nakupování v obchodech dají nahradit dosti neelegantním řešením, kdy si spotřebitel do obchodu přinese vlastní látkovou tašku a vše si dává do této tašky, tašku pak u pokladny vyprázdní, popřípadě v případě choulostivého zboží, jako je třeba pečivo, které nechceme, aby přišlo do styku s pásem pokladny, pak můžeme obsluze jen ukázat – to je v České republice legislativně v pořádku a měl by to každý obchodní řetězec respektovat. (11)

Další alternativou k použití LDPE a HDPE jsou sáčky, které pochází z kompostovatelného materiálu na bázi kukuřičného škrobu, zde je velká výhoda v možnosti jejich opětovného použití.

Dokonce zde existuje několik alternativních řešení v podobě sáčků, které lze vyrobit doma například ze starých záclon, či starého oblečení. V některých Asijských státech například začali hojně využívat k balení různého druhu zboží banánové listy, především pak k balení zeleniny, tyto alternativy nejsou technologickým pokrokem, ani nikterak nepřispívají k rozvoji technologií materiálů, ale jsou stále dobrým příkladem, jak lze používání plastů omezit. Nyní se ve světě pracuje na alternativních obalech masa, právě toto zboží, je totiž velice problémové, pokud jde o alternativu k plastovému obalu, podléhá totiž rychle zkáze a zároveň jde o zboží vlhkého charakteru (krev), který znemožňuje balení například ve formě papírového sáčku.

V Evropě již vědci přišli na řešení ve formě například mořských řas, které dokáží nahradit PET láhve, jde o plně rozložitelný obal do několika týdnů a zároveň je zdravotně nezávadný pro člověka, lze jej totiž bezzávadně i konzumovat. (6)

V nedávné době přišli dva studenti z jedné britské univerzity na řešení, které využilo skvělých vlastností v přírodě přirozeně vyskytující se houby. Za pomoci látky, kterou houba produkuje a díky kořenovému systému houby, respektive podhoubí, dokázali vytvořit materiál, který plně nahradí například pěnové polystyreny pro zajištění křehkého zboží při dopravě. Stále jde o biologicky rozložitelnou variantu materiálu a zároveň se podhoubí

pěstuje nejčastěji v zemědělském odpadu. Využití tento materiál může do budoucna najít i ve stavebnictví místo tepelné izolace. (11)

5.4.1 Třídění a recyklace vysokotlakého (nízkohustotního) polyethylenu

LDPE lze vhadzovat do žlutých sběrných nádob, které jsou určeny k třídění plastů nebo je zavážet sběrných dvorů, přičemž lze tyto druhy plastů recyklovat, pokud jsou splněny obecně platná pravidla pro správné třídění odpadu. Tj. například fólie by neměly být nadměrně znečištěné, a to především od přírodních olejů a jiných tuků, nebo by neměly být ve směsi s jiným materiálem, což je zejména u těchto odpadů nejčastějším problémem, jelikož je v nich často baleno jídlo, či jiné mastné výrobky. Pak by se fólie měly nejprve správně odmastit, aby je bylo možné zahrnout do recyklovaného odpadu, v praxi se tak často takového odpady z materiálu určenému k recyklaci vytřídí a zařadí zpět do komunálního odpadu, který končí na skládce, či ve spalovnách. Problém tedy není nemožnost recyklace tohoto odpadu, která byla moderními technologiemi a požadavky vyřešena, ale především jeho čistota, na základě vstupní čistoty materiálu, pak lze pozorovat i změny v různých vlastnostech konečného výrobku z tohoto recyklátu.

Reálně dnes končí v kontejnerech určených pro plastový odpad nejvíce právě LDPE materiály, či fólie, tato skutečnost vypovídá o povědomosti veřejnosti o druzích materiálu, jelikož ještě před 10 lety bylo nejčastější surovinou ve žlutém kontejneru PET, přičemž produkce plastového průmyslu, přesněji jednotlivých druhů plastu se za posledních 20 let nezměnila, neboli stále je ve výrobě nejvíce zastoupené LDPE a HDPE, především pak ve formě fólií, které jsou zároveň dnes nejčastějším druhem tohoto plastu, které nalezneme ve tříděném plastu. (4)

Kompozitní materiály hrají velkou roli, při recyklaci, jak již bylo zmíněno výše, jsou to právě tyto materiály, které často nelze kvůli svým různým neoddelitelným složkám recyklovat. Nejčastěji pak tyto materiály složené v kompozitu, mají odlišné vlastnosti a nelze je tedy recyklovat dohromady a často ani oddělit.

5.4.2 LDPE - recyklace

Při recyklaci těchto plastových fólií se postupuje prvotně od vážení sesbíraného materiálu, materiál se poté naváží ke vstupnímu dopravníku drtiče, kde se zapisuje jeho hmotnost a další identifikační údaje o vstupním materiálu. Materiál celým tímto procesem prochází svázaný ve formě balíku a až zde se z něho odstraňují vázací kovové dráty a dochází k mechanickému rozvolnění materiálu.

Při dávkování fólie na dopravní pás drtiče je znovu provedena vizuální kontrola materiálu a zároveň obsluha linky odstraňuje další materiály, které nejsou vhodné pro zpracování, takovým materiálem mohou být například tvrdé plasty, zmiňované mastné, či jinak zašpiněné fólie, etikety a samozřejmě i materiály jiného druhu, jako je kov, papír, dřevo a podobně. (4)

Vytríděný materiál je pomocí dopravníku dopraven do drtiče a nadrcen na frakci přibližně 40 mm.

Proces recyklace probíhá většinou tzv. mokrou cestou, kdy nadrcený materiál je praný pomocí šneku a flotační vany. Zde je plast mokrým způsobem zbaven mechanických a dalších chemických nečistot.

Po této mokré úpravě je u fólie zredukována hodnota vody na požadovanou vlhkost a dopravníky posílána do zásobního sila před konečnou tepelnou úpravou, kterou nazýváme extruzí.

Dopravník se skládá mimo jiné z aktivního magnetu. Proto dochází ještě po vizuální kontrole a mokré metodě, i k mechanickému zachytu kovových částic, které by mohli finální recyklát znehodnotit.

Dopravník posunuje a dávkuje materiál ze zásobního sila do extrudéru, zde dochází k roztavení materiálu na teplotu 180–200 °C, přičemž extruder dokáže zpracovat až 700 kg materiálu/hod.

Po dokončení extruze, dochází k dočištění taveniny na filtračním zařízení (filtru) a následně je rozlívána do peletizační hlavy – tzv. peletizéru, ve kterém již přichází samotné tvarování taveniny do konečné podoby – pelet (regranulátu). Z peletizéru je regranulát mechanicky vytlačován přímo do chladicí vodní lázně, poté dochází k jeho odstředění a k jeho dopravení do sila pomocí pneumatické dopravy. Silo je přímo propojené s technologií pro plnění obalů, které slouží ke skladování a přepravě zboží. Jakmile se obalové formy naplní taveninou, dochází k označení obalů pořadovým číslem a dalšími identifikačními údaji a recyklované LDPE fólie tak mohou být použity k výrobě dalších nových obalů. (24)

5.5 Ekonomické zhodnocení a použití v praxi

Pro výrobu vzorků vstřikováním byly vybrány 4 různé granuláty se zaměřením na recyklované LDPE, jenž jsou problémem v oblasti odpadového hospodářství, a jejich zpracování není zdaleka na potřebné úrovni s ohledem na znečišťování životního prostředí. Každý z materiálů je jiného složení ve smyslu čistoty materiálu, nejkvalitnějším ze zpracovaných granulátů je LDPE Green Natural, poté LDPE černý, dále LDPE hnědý a posledním materiálem zpracovaným z horší kvality vstupního odpadového materiálu je LDPE světle hnědý. V laboratořích vplynuly výsledky, které odkazují na vlastnosti zhotovených výstřiků a na základě ceny materiálu, s ohledem na zachování mechanických vlastností materiálu, jsou v této kapitole zhodnoceny vstupní a výstupní údaje z ekonomického hlediska. Z celkového posouzení vyplývá vhodnost použitých materiálů.

Pro postup výběru nejvhodnějšího materiálu pro výrobu byla v diplomové práci použita vícekriteriální analýza, kde na základě nejdůležitějších kritérií, kterým byla stanovena váha dle respondentů krátkého dotazníku, byl vybrán nejvhodnější materiál pro výrobu výstřiku za zachování mechanických vlastností.

Vstupní Kritéria: K1 - Ekologičnost, K2 - Cena, K3 - Konečná pevnost v tahu, K4 - Konečná tvrdost, K5 – Kvalita výrobku, K6 - Náročnost na výrobu. U každého kritéria platí, že čím větší známku má a celkově čím větší hodnota vyjde při výsledku, tím lepší je v této kategorii.

Pro hodnocení jednotlivých kritérií byly stanoveny váhy jednotlivých kritérií, hodnoceny známkou na stupnici 1 až 9, kdy 1 je nejmenší váha důležitosti daného kritéria a 9 je největší možný význam daného kritéria. Pro stanovení těchto vah bylo osloveno 20 různých respondentů, kteří jsou z různých oborů a různých názorů. Tato komise zvolila jako nejméně důležité kritérium K6, tedy Náročnost vstupního materiálu na výrobu s vahou 2 a za nejdůležitější pak komise zvolila kvalitu konečného výrobku s průměrnou vahou 8.

Z vícekriteriální analýzy jasně vyplývá důvod, proč by autorem této práce byl pro komerční výrobu zvolen materiál LDPE ČERNÝ, jehož výsledek oproti běžnému přírodnímu materiálu byl výrazně lepší, když navíc vezmeme v úvahu cenu, je pochopitelné posuzovat tento materiál jako výrazně lepší, než je čistý polymerní granulát pro výrobu technologií vstřikováním.

5.5.1 Vícekriteriální analýza dat

K analýze výběru vhodného materiálu pro vstřikování a porovnání jednotlivých materiálů, byly zohledňovány důležitá kritéria, které jsou známé, cena byla vzata přímo od prodejce jednotlivých granulátů, Ekologičnost byla posouzena dle toho, z jakého materiálu je granulát zhotoven, zda se jedná čistě o prvotní polymerní materiál a, nebo druhotný materiál. Jelikož materiál D pochází z nejhoršího recyklátu, který nejde prakticky jinou metodou zpracovat, měl nejvyšší známku v ekologičnosti mezi vstupními materiály. V náročnosti na výrobu byly posouzeny vstupní parametry pro vyrobení materiálu s ohledem i na jeho zpracování pomocí vstřikování, kde jasně materiál A je nejhůře nastavitelný pro tuto technologii. Šlo o kritéria K1-K6 popsaná výše. Pro stanovení vah k jednotlivým kritériím bylo formou rychlého kvízu osloveno 20 respondentů, kteří stanovili jednotlivé váhy dle jejich úsudku, tím bylo docíleno objektivního hodnocení.

V následujících tabulkách byly porovnávány kritéria K1-K6, dále stanoveny hodnoty kritérií a poté byly ve zvláštní tabulce ke každému kritériu přiřazeny průměrné váhy dle odpovědí respondentů. V poslední tabulce lze sledovat vyhodnocení daných kritérií s ohledem na stanovené váhy.

Označení jednotlivých materiálů v tabulkách 1-3:

A - LDPE černý (recyklát), B- LDPE GREEN NATURAL (přírodní), C- LDPE hnědý (recyklát), D - LDPE sv. hnědý (recyklát).

Celkově tedy dle tabulek nejlépe vyšel vstupní materiál A, který by autor práce na základě této analýzy doporučil komerčnímu sektoru pro vyrábění polymerních materiálů vstřikováním, s ohledem na požadavky ceny a zachování mechanických vlastností, podpořené ekologičností materiálu.

Vícekritériální analýza dat:

Tabulka 1: Hodnoty daných kritérií jednotlivých materiálů.

| Kritérium hodnocení | Vstupní hodnoty granulátu | | | |
|---------------------------|---------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | A | B | C | D |
| K1 - Ekologičnost | Recyklát | Výrobek z plastu | Recyklát | Recyklát |
| K2 - Cena | 25 Kč/kg | 88 Kč/Kg | 22 Kč/Kg | 18 Kč/kg |
| K3 - Konečná pevnost | 13,33 MPa | 9,37 MPa | 12,73 MPa | 13,07 MPa |
| K4 - Konečná tvrdost | 19,04 | 14,46 | 18,80 | 17,42 |
| K5 - Kvalita výrobku | Chvalitebná | Výborná | Dobrá | Dobrá |
| K6 - Náročnost na výrobu. | Náročný | Snadný | Středně náročný | Středně náročný |

Tabulka 2: Hodnocení daných kritérií vstupního materiálu, přiřazením vah dlerespondentů.

| Kritérium hodnocení | Váhy kritérií | Ohodnocení vstupního materiálu | | | |
|---------------------------|---------------|--------------------------------|---|---|---|
| | | A | B | C | D |
| K1 - Ekologičnost | 6 | 7 | 2 | 6 | 8 |
| K2 - Cena | 7 | 8 | 4 | 7 | 6 |
| K3 - Konečná pevnost | 8 | 8 | 3 | 6 | 7 |
| K4 - Konečná tvrdost | 7 | 8 | 3 | 7 | 6 |
| K5 - Kvalita výrobku | 9 | 6 | 8 | 5 | 5 |
| K6 - Náročnost na výrobu. | 2 | 4 | 7 | 5 | 5 |

Tabulka 3: Vyhodnocení daných kritérií na základě přiřazených vah.

| Kritérium hodnocení | Celkové ohodnocení vstupního materiálu | | | |
|---------------------------|--|-----|-----|-----|
| | A | B | C | D |
| K1 - Ekologičnost | 42 | 12 | 36 | 47 |
| K2 - Cena | 56 | 28 | 49 | 42 |
| K3 - Konečná pevnost | 64 | 24 | 48 | 56 |
| K4 - Konečná tvrdost | 56 | 21 | 49 | 42 |
| K5 - Kvalita výrobku | 54 | 72 | 45 | 45 |
| K6 - Náročnost na výrobu. | 8 | 14 | 10 | 10 |
| Celkem | 280 | 171 | 237 | 242 |

Zdroj Tabulka 1-3: Vlastní tvorba

5.6 Měření a výroba v laboratořích

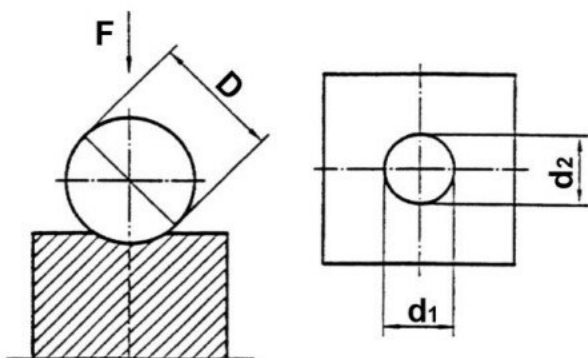
5.6.1 Zkouška tvrdosti

Norma ČSN EN ISO 2039-1

Tvrdot materiálu je definovaná odporem materiálu proti deformaci (plastické/elastické). Pro tuto práci byla zvolena metoda měření tvrdosti dle Brinella, tedy zkouška s použitím kalené ocelové kuličky o průměru 5 mm. Tvrdot materiálu byla provedena vícekrát na jednom vzorku materiálu dle zmíněné normy, tak aby nedošlo k ovlivnění zkoušky deformací měřeného úseku a zároveň se mohly výsledky statisticky vyhodnotit. Na měřený materiál jsou požadavky z hlediska čistoty, hladkosti a rovnosti. Pokud je použito velmi nízké zatížení, je často nutné povrch vzorku vybrousit a následně vyleštit, v případě našeho vzorku tomu tak však nebylo, jelikož byl měřen plastový vstřík, který byl optimalizovaný během výroby tak, aby splňoval dané požadavky. Hodnota zatížení se volí dle velikosti materiálu. Při vtlačování v průběhu měření tvrdosti je testovaný vzorek plasticky deformován. Touto deformací je ovlivněno i okolí vtisku. Z toho vyplývá, že musíme dodržovat určité minimální rozestupy mezi sousedními vtisky a minimální vzdálenost od okraje vzorku.(25)

Je vždy nutné před měřením zvolit vhodnou kombinaci zatížení a velikosti vtlačované kuličky. Pro každou skupinu materiálů známe konstantu „k“, která udává hodnotu zatížení i velikost kuličky. Při měření v laboratořích bylo zvoleno nastavení pro plastové materiály, které umožňuje tvrdoměr v laboratořích technické fakulty typu DuraJet G5 s kuličkou o průměru 5 mm a velikost zatížení 358 N. V obecném případě musíme, po zvolení vhodné konstanty s ohledem na odhadovanou tvrdost materiálu vybrat vhodnou velikost kuličky. Poté dle normy striktně použijeme definované konkrétní zatížení. Kuličkou s průměrem D je vytlačen vtisk kruhového tvaru. Dle obr. č. 27, na dvou kolmicích změříme průměry d1 a d2, z těchto hodnot pak vypočteme aritmetický průměr d a ten využijeme pro spočtení tvrdosti: $d = (d1+d2)/2$. Tvrdot podle Brinella pak počítáme dle vztahu: $HBW = 0,102 * \{2F / [\pi D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})]\}$. (26)

Obr.č. 27: Měření průměru vtlačované kuličky, při měření dle Brinella.



Zdroj: www.pixabay.com

Pracovní postup měření:

1. Zapnutí stroje a kontrola funkčnosti
2. Příprava vzorku (nesmí být přítomny nečistoty)
3. Nastavení stroje – volba módu + zatěžovací síly.
4. Pomocí tlačítek pro posuv kuličky, nastavíme potřebnou vzdálenost kuličky od podložky.
5. Příprava zkoušeného materiálu na podložku.
6. Pomocí šipek pro posuv kuličky směrem dolů se přiblížíme až na povrch vzorku, dokud není spuštěno automatické měření.
7. Přístroj provede operaci vtlačení kuličky do vzorku, s následným automatickým ukončením zkoušky.
8. Zkouška je dokončena a na přenosném panelu se zobrazí naměřená tvrdost v jednotkách dle normy. (viz obr. č. 28)
9. Otočíme vzorek o 180° (kolem svislé osy) a připravíme materiál pro další vtlačení s potřebným rozstupem mezi novým namyšleným vtiskem a tím předchozím, tak aby nedošlo k ovlivnění měření.

Na každém prvku byly provedeny 2 vtlačení, tak aby nebyl ovlivněn výsledek zkoušky a pro každý materiál byla tvrdost měřena celkem dvacetkrát, tak aby šel zaznamenat statistický výsledek.

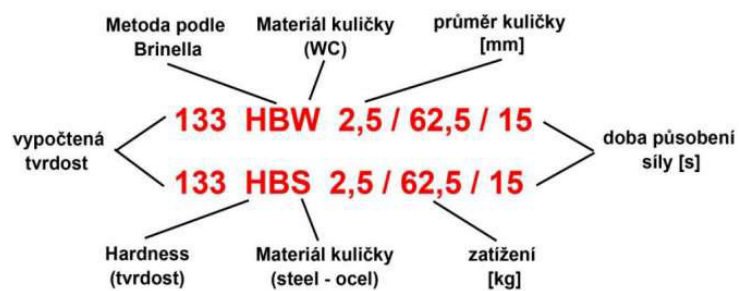
Měření proběhlo v rámci normy ČSN EN ISO 2039-1 (Plasty – stanovení tvrdosti – část 1 : Metoda vtlačení kuličky) na Tvrdoměru DuraJet G5, metodou Brinell za použití ocelové kalené kuličky o průměru 5 mm a testovací síly 358 N, stroj byl uveden do módu přímo pro polymerní materiály. A byly naměřeny tyto hodnoty pro jednotlivé materiály:

- 1 LDPE černý = 19,04 HBS 5 / 358/ 30
- 2 LDPE Green Natural = 14,46 HBS 5/ 358/ 30
- 3 LDPE Hnědý = 18,80 HBS 5 / 358/ 30
- 4 LDPE sv. hnědý = 17,42 HBS 5 / 358 / 30

Z naměřených hodnot vyplývá, že největší tvrdost materiálu má LDPE černý a nejnižší pak naopak LDPE Green Natural.

Obr.č. 28: Zapisování tvrdosti dle Normy ČSN EN ISO 2039-1.

Způsob zápisu tvrdosti podle Brinella



Zdroj: www.Pixabay.com

5.6.2 Zkouška tahem

Norma: ČSN EN ISO 527-1 (640604)

Zkouška tahem probíhá na trhacím tahovém zařízení, kde je prvek, respektive vyrobený výstřik uchopen na obou stranách do čelistí tak, aby byl v ose trhacího stroje a jeho uchycení v čelistích bylo na obou stranách stejně daleko od kraje vzorku. (Obr. č. 29) Stroj se poté nastaví tak, aby dle normy ČSN EN ISO 527-1 zkouška splňovala kritéria pro měření tahové zkoušky, nastaví se rychlost zatížení a kritéria pro přerušení zkoušky, jako je maximální dosažená síla v tahu, popřípadě výše poklesu napětí. Tím se docílí toho, že stroj při přetržení tělesa ukončí zkoušku. Když je připraveno těleso v kleštích stroje a nastavené veškeré potřebné hodnoty, můžeme vynulovat polohu kleští, tak aby si stroj pamatoval polohu, do které se po ukončení zkoušky vrátí, a poté spustíme zkoušku, v tuto chvíli se nám začne těleso zvolenou rychlostí napínat a začne se vykreslovat tahový diagram, kde narůstá zatěžující síla a roste prodloužení tělesa. Na základě tahové zkoušky pak můžeme pomocí výpočtů odvodit významné veličiny vypovídající o kvalitách a vlastnostech materiálu a možnostem jeho využití v praxi. Mezi nejčastější veličiny, které jsou z hlediska mechanických vlastností významné, jsou tažnost, mez pevnosti v tahu, prodloužení, kontrakce, nebo mez kluzu. Pro tahovou zkoušku využíváme normu ČSN EN 10002-1, která detailně definuje podmínky, které jsou nutné při měření dodržet. Běžně se využívá při deformaci přepočet síly na napětí, v případě že tedy známe velikost průřezu zkoušeného vzorku, v této práci je použita tyčinka standardních rozměrů dle zmiňované normy a to 40 mm² plochy průřezu. Z praxe známe vzorec $\sigma = F / S_0$. Co se prodloužení týče to je další veličina, důležitá v tahové zkoušce a jako samotná se přepočítává na deformaci, neboli relativní prodloužení. Opět uvažujeme v této práci délku danou normou L_0 a k deformaci se dopočítáme přes známý vzorec: $\epsilon = (L - L_0) / L_0 = \Delta L / L_0$. Prvotní fáze grafu, kde se přímo úměrně k napětí zkušební těleso prodlužuje, nám ukazuje platnost Hookova zákona. (8)

Další důležitou veličinou je mez kluzu, ta nám udává stav, kdy se začíná projevovat plastická deformace. Tato veličina se velmi sleduje v praxi, jelikož u kovových konstrukcí se například musí dbát zřetel na vysoké mechanické napětí, obzvláště pak na to, které je vyšší než mez kluzu, v takovém případě dochází k porušení materiálu v čase a pokud se jedná například o nosnou konstrukci je to velmi nebezpečné, v takovém případě totiž dochází k porušení lomem a tím materiál ztratí svoji funkčnost. Dalším pojmem je výrazná mez kluzu, jedná se o mez kluzu, která v grafu závislosti napětí na prodloužení vykreslí výrazný pokles

síly/napětí za zachování zvyšování síly a materiál se dále prodlužuje, děje se tak u materiálů, které mají tělesně centrovanou kubickou mřížku. Příkladem jsou například konstrukční oceli, se značením C. Z grafu se stanoví lokální maximum a minimum na křivce, neboli horní a dolní mez kluzu. U materiálů, které tuto anomálii v grafu nemají, je stanovena tzv. smluvní mez kluzu, tedy v případě, že nelze z grafu vyčíst horní nebo spodní hranice meze kluzu.

Veličina tažnost udává plastické vlastnosti zkušební vzorku. Zde platí, že čím je větší tažnost, tím je materiál více trvale deformovatelný, respektive tím snáze jej můžeme trvale deformovat. Jedná se vlastně o změnu délky dané oblasti materiálu měřené před a po realizaci tahové zkoušky, jde o relativní prodloužení, které je známé ze vztahu: $A = (L_u - L_0) / L_0 = \Delta L / L_0$. Jednotky tažnosti jsou procenta a běžně se udává s jedním desetinným číslem. Tažnost je veličina snadno definovatelná a počitatelná, ale komplikuje ji rozdílnost průřezů materiálu. Zde tedy platí, že je potřeba dodržovat tzv. geometrickou podmínku, jejíž princip tkví v tom, že měřený úsek L_0 vzorku odvodíme ze vztahu pro tažnost značenou jako A_x . Platí zde vztah: $L_0 = x \cdot S_0^{1/2}$.

X = poměrové číslo, S_0 = plocha průřezu vzorku před zkouškou (může být různý – kruh, čtverec, pětiúhelník apod.)

Obr. č. 29: Zkušební těleso uchycené v kleštích přístroje LabTest 5.50ST



Zdroj: Archiv autora

5.6.3 Naměřené hodnoty v laboratořích

V laboratořích byly měřeny tahové vlastnosti jednotlivých vzorků z různých materiálů a jejich tvrdost. Zkoušky probíhaly tahovém zařízení LabTest 5.50ST a na tvrdoměru dle Brinellovi metody, značky DuraJet G5. Metoda měření v tahu byla prováděna v rámci normy ČSN EN ISO 527-1 (640604) a bylo zjišťováno především poměrné prodloužení a mez pevnosti v tahu daných vzorků a to vždy u 10 různých vzorků od každého materiálu, hodnoty měření prodloužení Δl [mm], potřebné pro výpočet poměrného prodloužení, jsou uvedeny v tabulce č. 5 a bylo použito těles o rozměrech průřezu $S = 40 \text{ mm}^2$ a délky $l = 150 \text{ mm}$, kde S je průřez tělesa namáhaný tahem a 150 mm je celková délka tělesa porovnávaná s prodloužením materiálu. Zkouška tvrdosti viz tabulka 4, byla prováděna opět 10x na každém ze vzorků a je uváděna v jednotkách dle normy ČSN EN ISO 2039-1, zápis jednotek je pochopitelný z obr. Č. 28 výše. Měření tvrdosti probíhalo pomocí vtisku ocelové kalené kuličky o průměru 5 mm při zatěžující síle 358 N .

Tabulka 4: Naměřené hodnoty tvrdosti v jednotkách [„naměřená hodnota“ HBS 5 / 358 / 30] a výpočet směrodatné odchylky.

| Měření | LDPE černý | LDPE Natural Green | LDPE hnědý | LDPE sv. hnědý |
|----------------------------|--------------|--------------------|--------------|----------------|
| 1. | 19,80 | 14,42 | 18,55 | 17,07 |
| 2. | 19,09 | 14,23 | 18,72 | 17,84 |
| 3. | 19,01 | 14,68 | 19,22 | 18,12 |
| 4. | 18,73 | 14,27 | 18,16 | 17,13 |
| 5. | 18,45 | 14,75 | 19,00 | 17,07 |
| 6. | 18,84 | 14,51 | 18,72 | 17,15 |
| 7. | 19,33 | 14,36 | 19,20 | 17,52 |
| 8. | 19,12 | 14,22 | 18,40 | 17,66 |
| 9. | 19,22 | 14,41 | 18,46 | 17,44 |
| 10. | 18,82 | 14,72 | 19,60 | 17,23 |
| Průměr | 19,04 | 14,46 | 18,80 | 17,42 |
| Směrodatná odchylka | 0,27 | 0,16 | 0,36 | 0,29 |

Zdroj: Archiv autora

Tabulka 5: Naměřené hodnoty prodloužení Δl [mm] a výpočet směrodatné odchylky.

| Měření | LDPE černý | LDPE Natural Green | LDPE hnědý | LDPE sv. hnědý |
|---------------------------------|--------------|--------------------|------------|----------------|
| 1. | 182,4 | 115,6 | 303,2 | 355,6 |
| 2. | 181,6 | 116,9 | 302,8 | 354,1 |
| 3. | 180,8 | 115,9 | 302,1 | 353,8 |
| 4. | 179,9 | 116,3 | 303,2 | 356 |
| 5. | 181,8 | 117,1 | 304 | 356,3 |
| 6. | 183 | 116,1 | 305,1 | 355 |
| 7. | 181,3 | 116 | 302,8 | 355,2 |
| 8. | 181,7 | 117,1 | 303,7 | 353,4 |
| 9. | 181,6 | 116,8 | 301,5 | 354,4 |
| 10. | 180,9 | 115,2 | 301,6 | 356,2 |
| Průměr | 181,5 | 116,3 | 303 | 355 |
| Směrodatná odchylka [mm] | 0,62 | 0,54 | 0,84 | 0,86 |

Zdroj: Archiv autora

Tabulka číslo 6 ukazuje tažnost jednotlivých materiálů dle vzorce $A = [(L_k - L_0) / L_0] \cdot 100$ [%], kde L_k je konečná délka vzorku po zkoušce, L_0 je počáteční délka vzorku. V tabulce je uvedena i směrodatná odchylka naměřených údajů pro stanovení statistiky výsledků.

Tabulka 6: Naměřené hodnoty tažnosti A [%] a výpočet směrodatné odchylky.

| Měření | LDPE černý | LDPE Natural Green | LDPE hnědý | LDPE sv. hnědý |
|--------------------------------|---------------|--------------------|---------------|----------------|
| 1. | 124,1 | 77,4 | 201,4 | 238,1 |
| 2. | 123,3 | 77,8 | 202 | 238 |
| 3. | 123 | 78,4 | 201,6 | 237,1 |
| 4. | 123,6 | 76,9 | 202,4 | 236,8 |
| 5. | 124,2 | 76,3 | 202,3 | 236,4 |
| 6. | 122,9 | 77,8 | 201,6 | 236,9 |
| 7. | 122,8 | 77,2 | 201,9 | 237,4 |
| 8. | 123,1 | 76,3 | 202,7 | 237,1 |
| 9. | 122,6 | 78 | 202,7 | 236,6 |
| 10. | 123,2 | 78,1 | 201,7 | 237,8 |
| Průměr [%] | 123,28 | 77,42 | 202,03 | 237,22 |
| Směrodatná odchylka [%] | 0,416 | 0,6 | 0,396 | 0,484 |

Zdroj: Archiv autora

Tabulka číslo 7 ukazuje hodnoty naměřené meze pevnosti v tahu.

Tabulka 7: Vypočítané hodnoty meze v tahu [MPa] a výpočet směrodatné odchylky

Výpočet směrodatné odchylky mezi pevnosti v tahu

| Naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu [MPa] | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------------|----------------|
| Měření | LDPE černý | LDPE hnědý | LDPE Natural Green | LDPE sv. hnědý |
| 1. | 13,51 | 12,56 | 9,52 | 12,81 |
| 2. | 13,69 | 12,83 | 10,52 | 13,19 |
| 3. | 13,23 | 13,01 | 9,68 | 13,41 |
| 4. | 13,42 | 12,33 | 8,99 | 12,88 |
| 5. | 13,39 | 12,45 | 8,95 | 13,15 |
| 6. | 13,19 | 12,73 | 8,95 | 12,95 |
| 7. | 13,52 | 12,89 | 9,05 | 13,03 |
| 8. | 13,17 | 12,98 | 9,23 | 13,11 |
| 9. | 13,40 | 12,63 | 9,15 | 13,00 |
| 10. | 13,39 | 12,93 | 9,63 | 13,19 |
| Průměr | 13,39 | 12,73 | 9,37 | 13,07 |
| Odchylka [MPa] | 0,116405 | 0,1939 | 0,37652 | 0,137275 |

Zdroj: Archiv autora

Z uvedených výpočtů odchylek plyne, že jsou všechny materiály homogenní a rozptyl mezi jednotlivými vzorky jsou minimální, jsou tedy vhodné pro komerční výrobu.

Materiál: LDPE Green Natural

Mez pevnosti v tahu:

$$R_m = 374,64 / 40 = 9,37 \text{ MPa}$$

Prodloužení:

$$\Delta l = 116,3 \text{ mm}$$

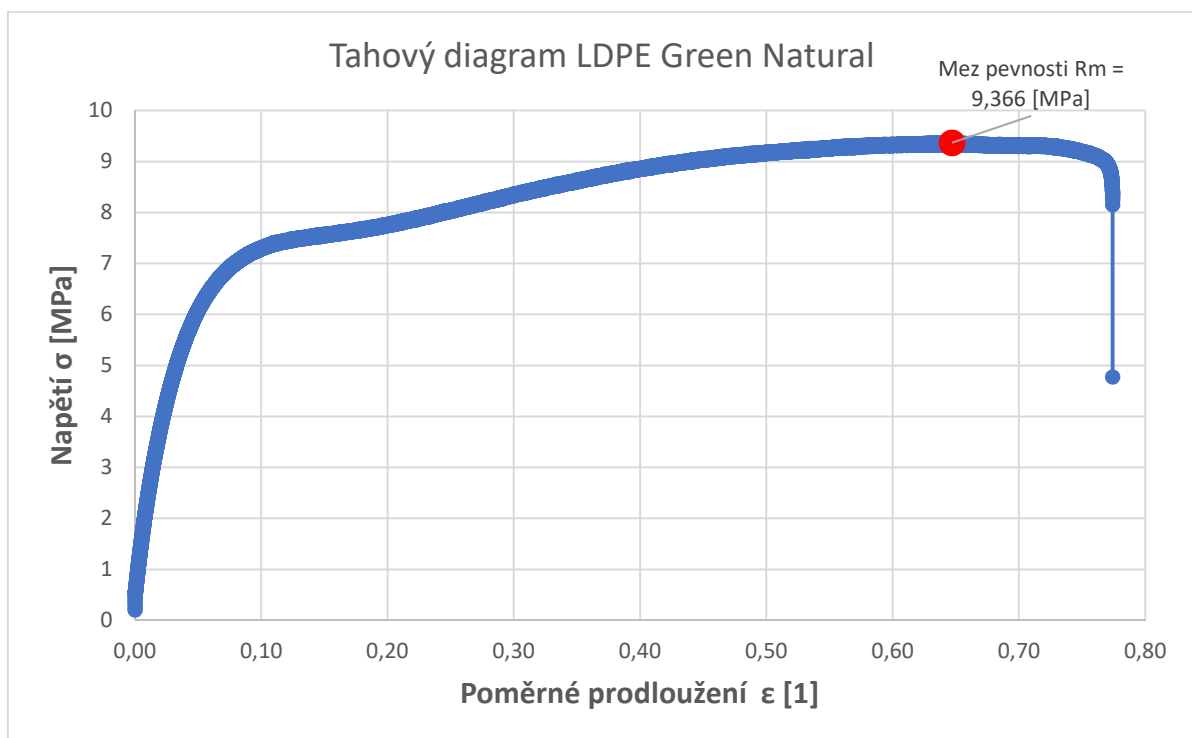
Poměrné prodloužení:

$$\epsilon = 116,3/150 = 0,78 \cdot 100 = 78\%$$

Výpočet tažnosti:

$$A = (xxx-150)/150 \cdot 100 =$$

Graf č. 1: Tahový diagram závislosti napětí na poměrném prodloužení ϵ – materiál LDPE Green Natural.



Zdroj: Archiv autora

Materiál: LDPE černý

Mez pevnosti v tahu:

$$R_m = 535,55/40 = 13,39 \text{ MPa}$$

Prodloužení:

$$\Delta l = 181,5 \text{ mm}$$

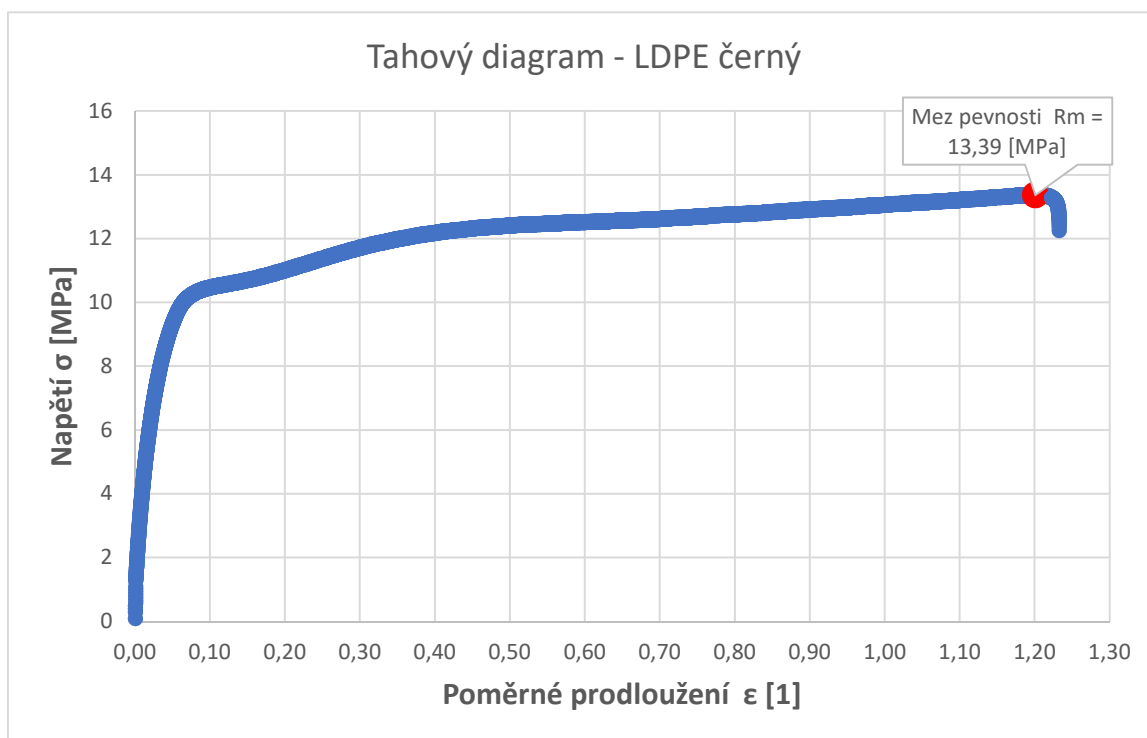
Poměrné prodloužení:

$$\epsilon = 181,5/150 = 1,21 * 100 = 121 \%$$

Výpočet tažnosti:

$$A = (xxx-150)/150 * 100 =$$

Graf č. 2: Tahový diagram závislosti napětí na poměrném prodloužení ϵ – materiál LDPE černý.



Zdroj: Archiv autora

Materiál: LDPE hnědý

Mez pevnosti v tahu:

$$R_m = 509,20 / 40 = 12,73 \text{ MPa}$$

Prodloužení:

$$\Delta l = 303 \text{ mm}$$

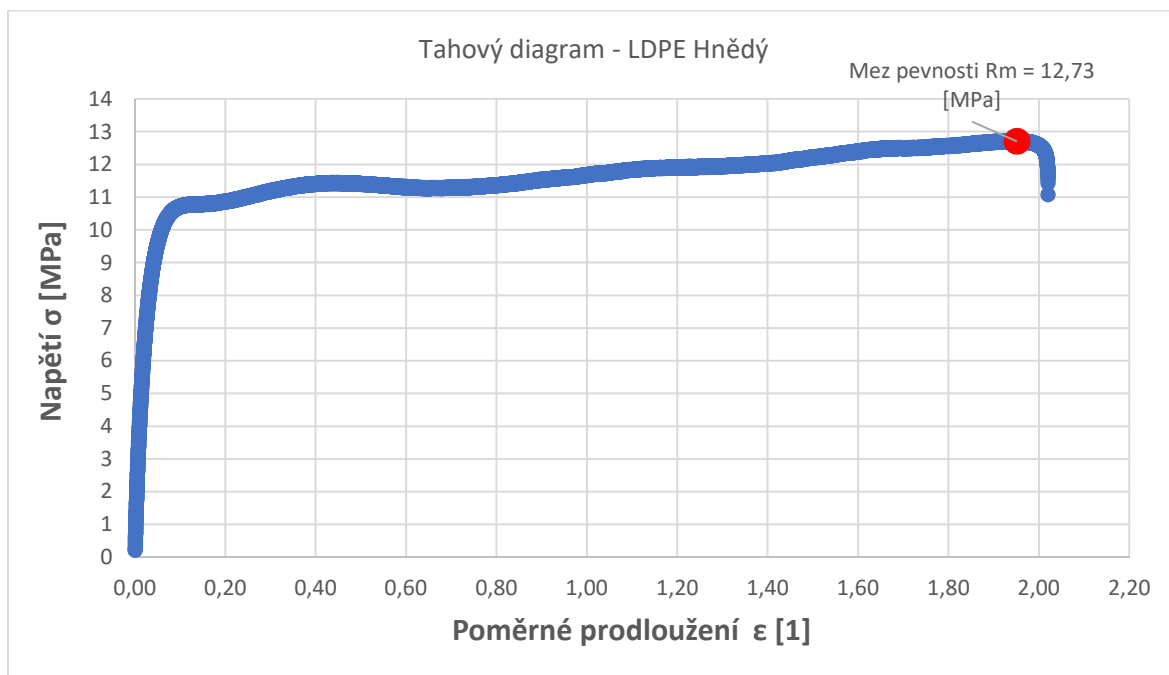
Poměrné prodloužení:

$$\epsilon = 303 / 150 = 2,02 * 100 = 202 \%$$

Výpočet tažnosti:

$$A = (xxx-150)/150*100 =$$

Graf č. 3: Tahový diagram závislosti napětí na poměrném prodloužení ϵ – materiál LDPE hnědý.



Zdroj: Archiv autora

Materiál: LDPE sv. hnědý

Mez pevnosti v tahu:

$$R_m = 522,8/40 = 11,86 \text{ MPa}$$

Prodloužení:

$$\Delta l = 369 \text{ mm (viz obr.č.27)}$$

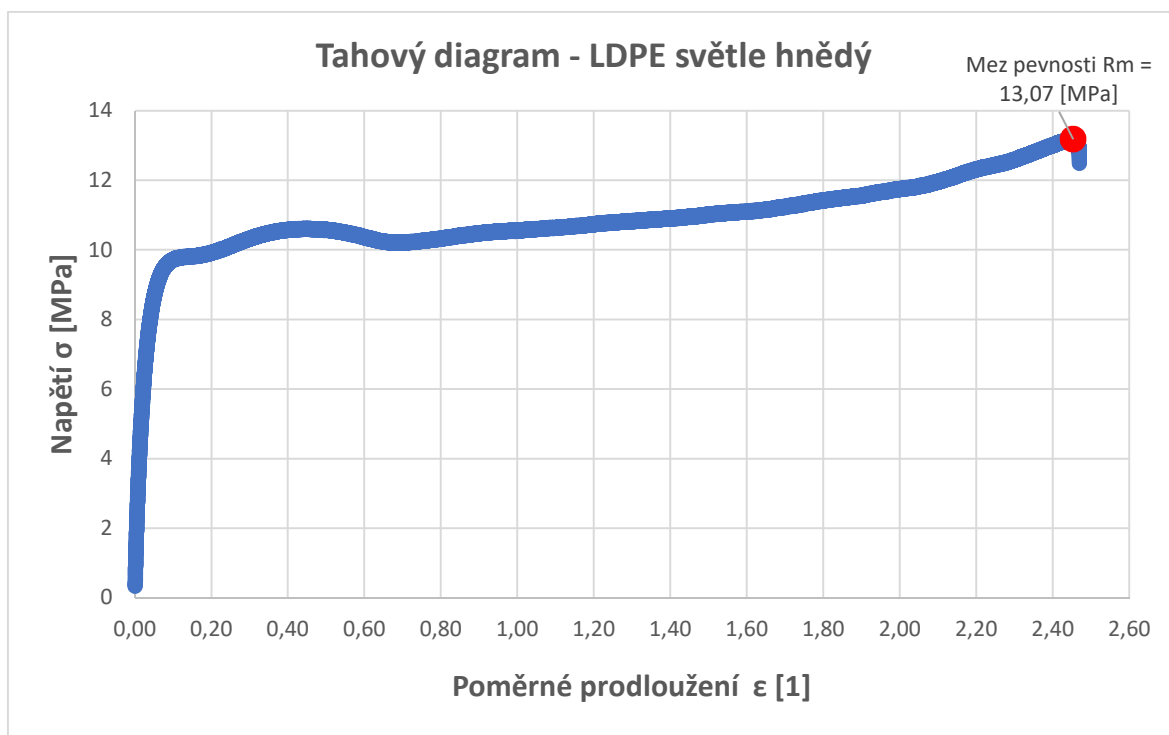
Poměrné prodloužení:

$$\epsilon = 369/150 = 2,46 * 100 = 246\%$$

Výpočet tažnosti:

$$A = (xxx-150)/150 * 100 =$$

Graf č. 4: Tahový diagram závislosti napětí na poměrném prodloužení ϵ – materiál LDPE světle hnědý.



Zdroj: Archiv autora

Obr. č. 30: Ukázka prodloužení materiálu LDPE sv. hnědý



Zdroj: Archiv autora

6 Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na výrobu polymerních materiálů za pomoci technologie vstřikování, v práci byla na základě literární rešerše objasněna problematika polymerních kompozitních materiálů, byla vymezena doba vzniku průmyslu výroby polymerů až do současného stavu. Práce se také zaměřovala na fakta z oblasti výroby polymerů a jejich zpracování. Práce dále klade velký důraz na problematiku recyklace a dalšího zpracování plastového odpadu a zmiňuje nebezpečí spojené se zpracováním a výrobou polymerních kompozitních materiálů. Praktická část byla především zaměřena na měření v laboratořích, kde byly zhotoveny výrobky na vstřikovacím lisu typu BOY E3. Pro výrobu bylo zapotřebí 4 různých granulátů, z nichž u 3 výrobků se jednalo o vstupní materiál typu recyklát. Tyto materiály byly zvoleny především pro řešení problematiky v oblasti odpadového hospodářství a cílem bylo vytvořit z druhotného materiálu další použitelný výrobek. Následně byly v laboratořích porovnávány vlastnosti zhotovených výstřiků a bylo provedeno ekonomické zhodnocení celého procesu. Závěrem je třeba říci, že recyklované granuláty se jeví jako velice dobrý materiál pro výrobu technologií vstřikování a to jak po ekonomické stránce výroby, tak po zachování mechanických vlastností, kde v obou těchto kategoriích byly jistěny dobré výsledky, právě u recyklátu, který byl srovnáván se stejným druhem materiálu, lišícím se ve způsobu výroby. Jednalo se o materiál LDPE Green Nature, který je prvotním materiálem pro výrobu vstřikováním. Z výsledků vyplývá, že čím je koncentrace LDPE v recyklovaném granulátu vyšší, tím lepších vlastností dosahuje v oblasti tahu a zkoušek tvrdosti. LDPE černý je materiál, který je výhradně tvořen právě z polyethylenu nízké hustoty a tak dosahuje 95% čistoty materiálu, 5% pak tvoří příměsi v podobě LLDPE či HDPE, následuje LDPE světle hnědý, kde procento HDPE (10%) a dochází u něho proto k většímu poměrnému prodloužení a dosahuje nižší meze pevnosti v tahu a tvrdosti. Posledním z recyklovaných granulátů je LDPE hnědý, který je tvořen z velké části právě HDPE a LLDPE, s nejnižším obsahem LDPE z těchto materiálů a dosahuje horších vlastností celkově než předchozí materiály, s výjimkou tvrdosti, kde byly naměřeny vyšší hodnoty než u LDPE světle hnědé. Podstatně horší mechanické vlastnosti pak byly zaznamenány u LDPE Natural Green, což je materiál čistého původu, vyrobený z rozložitelných plastových LDPE. Jeho cena je navíc s porovnáním s recyklovanými granuláty vyšší. Z výsledků zároveň vyplývá, že čím více je v materiálu obsažených vedlejších materiálů, tedy čím menší je procento složení materiálu přímo z LDPE materiálu, tím vyšší je procentuální tažnost materiálu, kde nejvyšší hodnoty tažnosti dosahuje LDPE

světle hnědý, tento výsledek by mohl mít souvislost s použitým LLDPE v materiálu, který sám o sobě dosahuje vyšší tažnosti a je pružnější než samotný LDPE či HDPE.

Jak je vidět ve výsledcích měření a ekonomicko-matematického zhodnocení v této práci, je zde velký potenciál v komerční výrobě vstřikovaných kompozitních polymerů právě z recyklovaného LDPE materiálu, rád bych tímto doporučil zaměřit se na další výzkum v této oblasti recyklovaných materiálů, a tím by se mohl snížit i ekologický dopad na planetu, právě v důsledku výroby polymerů a poté především v důsledku nevyužitého odpadu. Na základě této práce bych také doporučil zvážení tohoto materiálu pro komerční výrobu v oblasti technologie vstřikování namísto materiálů prvotních, které mají větší dopad na životní prostředí a dosahují dle měření horších mechanických vlastností a jsou přibližně 3x dražší pro použití ve výrobě.

Závěrem je nutno říci, že problematika plastového odpadu ve světě narůstá a je opravdu třeba hledat nová řešení a využití v oblasti polymerních materiálů, které budou dosahovat lepších výsledků v oblasti udržitelnosti.

7 Použitá literatura

- 1) MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
- 2) ÅSTRÖM, B. T. *Manufacturing of polymer composites*. London: Chapman & Hall, 1997. ISBN 0412819600.
- 3) LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.
- 4) SMIL, Vaclav. *Jak se vyrábí dnešní svět: materiály a dematerializace*. Přeložil Jana KOČIČKOVÁ. Brno: BizBooks, 2017. ISBN 978-80-265-0673-7.
- 5) Český statistický úřad, [Online], [Citace: 31.10.2019.], *Produkce, využití a odstranění odpadů – 2018*, Tab. 23 Nakládání s odpady v České republice v letech 2008 – 2018. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2018>.
- 6) TERRY, Beth. *Plastic free, aneb, Jak se zbavit plastů v životě*. Přeložil Kateřina HARRISON LIPENSKÁ. Praha: Audiolibrix, 2021. ISBN 978-80-907884-1-1.
- 7) SAMOSEBOU, *PLASTOVÉ OBALY A JEJICH ALTERNATIVY*, [Online]. [Citace: 28.11.2019.], neznámý autor, Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2019/11/28/plastove-obaly-a-jejich-alternativy/>.
- 8) ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- 9) KRATOCHVÍL B., ŠVORČÍK V., VOJTĚCH D. *Úvod do studia materiálů*. 1. vydání. VŠCHT, Praha, 2005, ISBN 80-7080-568-4.
- 10) WAGNER, Martin, LAMBERT, Scott, *Freshwater Microplastics: Emerging Environmental Contaminants*, SpringerOpen, 2018. ISBN 978-3-319-61614-8.
- 11) SAMOSEBOU, *ENCYKLOPEDIE PLASTŮ: POLYETHYLENY (PE, LDPE I HDPE)*, [Online], [Citace: 28.02.2020.], neznámý autor, Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2020/02/28/encyklopedie-plastu-polyethyleny-pe-ldpe-i-hdpe/>.
- 12) RAGUSSA, SVELATOLA, SANTACROCEB, CATALANOB, (Valentina Notarstefanoc, Oliana Carnevalic, Fabrizio PapabMauro, Ciro Antonio Rongiolettib,

Federico Baioccoa, Simonetta Draghia, Elisabetta D'Amorea, Denise Rinaldod, Maria Mattae, Elisabetta Giorginic),

Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta [online]. [citace 01.2021]. Environment International

Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020322297>.

13) SAMOSEBOU, RECYKLAČNÍ SYMBOLY PLASTŮ

[Online], [Citace: 15.01.2018., neznámý autor,] Dostupné z:

<https://www.samosebou.cz/2018/01/15/recyklaalni-symboly-plastu/>.

14) SAMOSEBOU, RECYKLAČNÍ SYMBOLY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ Z PLASTU, [Online], [Citace: 16.01.2018.], neznámý autor, Dostupné z:

<https://www.samosebou.cz/2018/01/16/recyklaalni-symboly-kompozitnich-materialu-z-plastu/>.

15) SAMOSEBOU, ENCYKLOPEDIE PLASTŮ: VYSOKOTLAKÝ (NÍZKOHUSTOTNÍ) POLYETHYLEN (LDPE), [Online], [Citace: 30.04.2020.] neznámý autor, Dostupné z:

<https://www.samosebou.cz/2020/04/30/encyklopedie-plastu-vysokotlaky-nizkohustotni-polyethylen-ldpe/>.

16) ZEMAN, Lubomír, Studie proveditelnosti a výroba výstřiků z termoplastů, 1. část, [Online], [Citace: 16.12.2016.], Dostupné z:

<https://www.plasticportal.cz/cs/studie-proveditelnosti-a-vyroba-vystriku-z-termoplastu-1-cast.html/c/4057/>

17) BAJPAI, Pramedra K., SINGH, Inderdeep, Reinforced Polymer Composites: Processing, Characterization and Post Life, Germany, 2020. ISBN 978-3-527-34599-1.

18) JAARSMA, Frank, Injection molding and design with plastic, Ticona corporation, Summit, NJ, Květen 2001, článek z technického časopisu manufacturing center, dostupné z: www.manufacturingcenter.com

19) Hybrid polymer composite materials: properties and characterisation. Editor Vijay Kumar THAKUR, editor Manju Kumari THAKUR, editor Asokan PAPPU. Duxford: Woodhead Publishing, [2017]. Woodhead Publishing series in composites science and engineering. ISBN 9780081007884.

20) CHAWLA, K. KUMAR. Composite materials: science and engineering. 2nd ed. New York: Springer, 1998. Materials research and engineering (Unnumbered). ISBN 0-387-98409-7.

21) OLMSTED, B., DAVIS, M., Practical Injection Molding, New York, 2001, ,Marcel Dekker Inc., ISBN 0-8247-0529-7.

22) BOGAERTSA, L., FAESA, M., BERGENA, J., (CLOOTSA, VASILIAUSKAITEB, VOGELERB, MOENSA) Procedia, CIRP, [Citace: 2021.], Influence of thermo-mechanical loads on the lifetime of plastic inserts for injection moulds produced via additive manufacturing,

dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121000858>.

23) OECD, Hodnocení politik životního prostředí OECD: Česká republika 2018, překlad: Ministerstvo životního prostředí České republiky, OECD Publishing,, 2018. ISBN 9264310371.

24) DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.

25) MACHÁČ, Miroslav, Měření tvrdosti materiálů a zpracovávání zjištěných hodnot, BRNO 2010, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství ústav strojírenské technologie, Vedoucí práce Ing. KALIVODA Milan.

26) KOCH, Karel, Měření tvrdosti materiálů se zaměřením na měření tvrdosti kovových materiálů dynamickou metodou pomocí mobilního tvrdoměru DHT-100, České Budějovice 2013, Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích Pedagogická Fakulta Katedra aplikované fyziky a techniky, Vedoucí práce PaedDr. Bedřich VESELÝ, Ph.D.

27) FARUK , Omar, Mohini SAIN. Biofiber reinforcements in composite materials. Cambridge: Woodhead Publishing, [2015]. Woodhead publishing series in composites science and engineering. ISBN 978-1-78242-122-1.

28) Hybrid polymer composite materials: properties and characterisation. Editor Vijay Kumar THAKUR, editor Manju Kumari THAKUR, editor Asokan PAPPU. Duxford: Woodhead Publishing, [2017]. Woodhead Publishing series in composites science and engineering. ISBN 9780081007884.

29) MILLERA, E., SEDLAKA, M., LINA, D., Journal of Hazardous Materials, článek v Science Direct, [online]. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420327606?via%3Dihub>.

30) NAPPER, E., DAVIES, B., CLIFFORD, H., ELMORE, A., Reaching New Heights in Plastic Pollution—Preliminary Findings of Microplastics on Mount Everest [online]. [cit. 20.11.2020]. Dostupné z:

[https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322\(20\)30550-9?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2590332220305509%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322(20)30550-9?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2590332220305509%3Fshowall%3Dtrue).