

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Jiří Adámek

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie

Charakterizace high-tech polymerů

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jiří Adámek**
Osobní číslo: **C19466**
Studijní program: **B0531A130017 Polymerní materiály a kompozity**
Téma práce: **Charakterizace high-tech polymerů**
Zadávací katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

Zásady pro vypracování

1. V literární rešerši přehledně popište různé typy high-tech polymerů, zabývejte se jejich syntézami, důležitými vlastnostmi a vzájemně je porovnejte.
2. V další části rešerše se zaměřte na popis jednotlivých používaných technologií pro zpracování různých typů high-tech polymerů a na závěr se zabývejte přehledem různých aplikačních možností jednotlivých typů high-tech polymerů s uvedením konkrétních příkladů v praxi.
3. Z dodaných high-tech polymerů připravte vzorky dle příslušných norem na měření fyzikálně-mechanických vlastností.
4. Srovnajte a diskutujte zjištěné výsledky fyzikálně-mechanických vlastností v závislosti na použitém high-tech polymeru.

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

Seznam doporučené literatury:

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

Datum zadání bakalářské práce: **17. prosince 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. července 2022**

L.S.

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

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

V Pardubicích dne 22. února 2022

Prohlašuji:

Práci s názvem „Charakterizace high-tech polymerů“ jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

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

V Pardubicích dne 20. 6. 2022

Jiří Adámek

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych především poděkovat panu Ing. Luboši Prokúpkovi Dr. za jeho odborné vedení, pomoc, trpělivost a rady při zpracování této bakalářské práce.

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



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



ANOTACE

Tato bakalářské práce popisuje různé typy high-tech polymerů. Zabývá se jejich syntézou, důležitými vlastnostmi, možnými využitími v praxi a vzájemně je porovnává. Dále popisuje různé technologie zpracování těchto polymerů. V praktické části jsou dle příslušných norem připraveny vzorky high-tech polymerů pro měření fyzikálně-mechanické vlastností. Následně jsou porovnány a diskutovány zjištěné výsledky fyzikálně-mechanických vlastností.

KLÍČOVÁ SLOVA

High-tech polymery, aplikace, zpracování, fyzikálně-mechanické vlastnosti

TITLE

Characterization of high-tech polymers

ANNOTATION

This bachelor thesis describes different types of high-tech polymers. It deals with their synthesis, important properties, possible uses in practice and compares them. It also describes various technologies for processing these polymers. In the practical part, samples of high-tech polymers are prepared according to the relevant standards for measuring physical-mechanical properties. Finally, the results of physical-mechanical properties are compared and discussed.

KEYWORDS

High-tech polymers, applications, processing, physical-mechanical properties

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	10
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	12
ÚVOD	13
1. Teoretická část	14
1.1 Historie high-tech polymerů	14
1.2 Dělení high-tech polymerů	14
1.2.1 Polysulfon	15
1.2.1.1 Výroba polysulfonu	16
1.2.1.2 Zpracování a využití polysulfonu	17
1.2.2 Polyethersulfon	17
1.2.2.1 Výroba polyethersulfonu	18
1.2.2.2 Zpracování a využití polyethersulfonu	18
1.2.3 Polyfenylsulfon	19
1.2.3.1 Výroba polyfenylsulfonu	20
1.2.3.2 Zpracování a využití polyfenylsulfonu	20
1.2.4 Polyfenylensulfid	21
1.2.4.1 Výroba polyfenylensulfidu	22
1.2.4.2 Zpracování a využití polyfenylensulfidu	22
1.2.5 Polyetheretherketon	23
1.2.5.1 Výroba polyetheretherketonu	24
1.2.5.2 Zpracování a využití polyetheretherketonu	24
1.2.6 Polyetherketonketon	25
1.2.6.1 Výroba polyetheretherketonketonu	26
1.2.6.2 Zpracování a využití polyetherketonketonu	26
1.2.7 Polyetherimid	27
1.2.7.1 Výroba polyetherimidu	27

1.2.7.2 Zpracování a využití polyetherimidu	28
1.2.8 Polyimid.....	29
1.2.8.1 Výroba polyimidu	29
1.2.8.2 Zpracování a využití polyimidu	30
1.2.9 Polyamid-imid	31
1.2.9.1 Výroba polyamid-imidu.....	32
1.2.9.2 Zpracování a využití polyamid-imidu.....	32
1.2.10 Polybenzimidazol.....	33
1.2.10.1 Výroba polybenzimidazolu.....	33
1.2.10.2 Zpracování a využití polybenzimidazolu.....	34
1.3 Technologie zpracování high-tech polymerů	35
1.3.1 Zpracování termoplastů vytlačováním (extruzí).....	35
1.3.2 Zpracování termoplastů vstřikováním	37
2. Praktická část	38
2.1 Použité materiály	38
2.2 Příprava vzorků.....	38
2.3 Metody měření.....	41
2.3.1 Měření pevnosti v tahu	41
2.3.2 Měření tvrdosti podle Shore D.....	41
2.3.3 Měření tvrdosti podle Vickerse, Brinella a Knoopu	42
2.3.4 Měření vrubové houževnatosti metodou Charpy.....	43
2.3.5 Termomechanická analýza (TMA)	43
2.3.6 Dynamická termomechanická analýza (DMA)	45
2.4 Výsledky a diskuse	47
2.4.1 Měření pevnosti v tahu	47
2.4.2 Měření tvrdosti podle Shore D.....	48
2.4.3 Měření tvrdosti podle Vickerse, Brinella a Knoopu	48

2.4.4 Měření vrubové houževnatosti metodou Charpy.....	49
2.4.5 Termomechanická analýza (TMA).....	50
2.4.6 Dynamická termomechanická analýza (DMA)	50
ZÁVĚR	52
LITERATURA	53

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1 Pyramida polymerů [4].....	15
Obrázek 2 Vzorec PSU [10]	16
Obrázek 3 Syntéza PSU [10]	16
Obrázek 4 Polysulfonová filtrační svíce [13]	17
Obrázek 5 Vzorec PESU [15].....	18
Obrázek 6 Syntéza PESU [16].....	18
Obrázek 7 Snímek modifikovaných a nemodifikovaných membrán [17].....	19
Obrázek 8 Kompletní filtrační jednotka s PESU membránou [18]	19
Obrázek 9 Vzorec PPSU [21]	20
Obrázek 10 Syntéza PPSU [16].....	20
Obrázek 11 Armatura z PPSU [22].....	21
Obrázek 12 Vzorec PPS [25].....	22
Obrázek 13 Syntéza PPS [24].....	22
Obrázek 14 Vlákno z PPS [29]	23
Obrázek 15 Filament z PPS [30].....	23
Obrázek 16 Vzorec PEEK [32].....	24
Obrázek 17 Syntéza PEEK [31].....	24
Obrázek 18 Náhrady za kovové materiály z PEEK [35]	25
Obrázek 19 Implantát z PEEK [36]	25
Obrázek 20 Vzorec PEKK [37]	26
Obrázek 21 Různé využití PEKK ve stomatologii [39].....	27
Obrázek 22 Vzorec PEI [41].....	27
Obrázek 23 Syntéza PEI [44].....	28
Obrázek 24 Filament z PEI [45]	29
Obrázek 25 Vzorec PI [47]	29
Obrázek 26 Syntéza PI [46].....	30
Obrázek 27 Tkanina z PI [52].....	31
Obrázek 28 Flexibilní solární článek s PI [48]	31
Obrázek 29 Vzorec PAI [53]	31
Obrázek 30 Způsoby syntézy PAI [56].....	32
Obrázek 31 PAI v motorech [58].....	33
Obrázek 32 Vzorec PBI [60]	33

Obrázek 33 1. Způsob syntézy PBI [59].....	34
Obrázek 34 2. Způsob syntézy PBI [59].....	34
Obrázek 35 Skafandr s PBI vlákny [61]	35
Obrázek 36 Extrudér [67]	36
Obrázek 37 Schéma extrudéru [68]	36
Obrázek 38 Vstřikovací přístroj [69].....	37
Obrázek 39 Schéma vstřikovacího zařízení [63]	37
Obrázek 40 Řezačka	39
Obrázek 41 Nařezaný vzorek PSU	39
Obrázek 42 Nařezaný vzorek PESU	39
Obrázek 43 Nařezaný vzorek PPSU	40
Obrázek 44 Vzorek s vrubem	40
Obrázek 45 Vrubovací zařízení	40
Obrázek 46 Trhací stroj INSTRON 5500R	41
Obrázek 47 Tvrdoměr Shore.....	42
Obrázek 48 Tvrdoměr Nemesis 9000 – Innovatest	42
Obrázek 49 Přístroj PIT 501J.....	43
Obrázek 50 Přístroj TMA CX04R	44
Obrázek 51 Příklad vyhodnocení TMA pro PPSU	44
Obrázek 52 Přístroj DMA DX04T.....	46
Obrázek 53 Příklad vyhodnocení DMA pro PPSU	46
Tabulka 1 Výsledky pevnost v tahu PSU	47
Tabulka 2 Výsledky pevnost v tahu PESU	47
Tabulka 3 Výsledky pevnost v tahu PPSU	47
Tabulka 4 Výsledky Shore D.....	48
Tabulka 5 Výsledky Vickers.....	48
Tabulka 6 Výsledky Knoop	48
Tabulka 7 Výsledky Brinell.....	49
Tabulka 8 Výsledky vrubová houževnatost PSU	49
Tabulka 9 Výsledky vrubová houževnatost PESU	49
Tabulka 10 Výsledky vrubová houževnatost PPSU	50
Tabulka 11 Výsledky TMA	50
Tabulka 12 Výsledky DMA.....	50

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

PSU	Polysulfon
PESU	Polyethersulfon
PPSU	Polyfenylsulfon
PPS	Polyfenylsulfid
PEEK	Polyetheretherketon
PEKK	Polyetherketonketon
PEI	Polyetherimid
PI	Polyimid
PAI	Polyamid-imid
PBI	Polybenzimidazol
TMA	Termomechanická analýza
DMA	Dynamická termomechanická analýza
T_g	Teplota skelného přechodu
T_1	Teplota odečtená z tangenty závislosti reálné složky modulu pružnosti
T_2	Teplota odečtená z maxima imaginární ztrátové složky modulu pružnosti

ÚVOD

High-tech polymery jsou polymery, které splňují vyšší požadavky než standardní nebo technické polymery. Z pravidla jsou dražší a používají se v menších množstvích než ostatní druhy polymerů. Představují pouze asi 1 % celosvětově vyráběných polymerů. Využívají se zejména pro aplikace v oblastech, jako je obrana, letectví, lékařství nebo náročné průmyslové aplikace. V literatuře jsou také často označovány, jako vysoce výkonné polymery, vysokoteplotní plasty, nebo vysoce výkonné termoplasty. [1;2;3]

Klíčové vlastnosti high-tech polymerů jsou vysoká a dlouhodobá tepelná stabilita, vynikající mechanické vlastnosti, chemická odolnost, velká rozměrová stabilita a vysoká pevnost v tahu. Z toho důvodu se tyto polymery často používají jako náhrada kovu, protože nabízejí srovnatelnou pevnost při snížené hmotnosti a vyšší odolnost proti korozi. High-tech polymery mají také vynikající elektroizolační schopnosti. [3;4;5;6]

Přestože se high-tech polymery mohou jevit jako drahé a koncoví uživatelé často nechtějí přecházet z tradičních materiálů (kovů), jejich vývoj se v posledních letech velice posunul a rovnováhou mezi cenou a výkonem předčí mnohé materiály a v některých oblastech je dokonce kompletně nahrazují. Z tohoto důvodu jsem se jim rozhodl věnovat ve své bakalářské práci.

1. Teoretická část

1.1 Historie high-tech polymerů

Vylepšování tepelné stability a mechanických vlastností je a vždy bylo důležitým cílem výzkumu nových polymerů. Od počátku 60. let 20. století byl vývoj high-tech polymerů poháněn potřebami v letecké a jaderné technologii. Způsoby syntézy například pro polysulfon (PSU), polyethersulfon (PESU) a polyfenylsulfon (PPSU) byly vyvinuty již v 60. letech 20. století společnostmi Philips, ICI a Union Carbide. Na trh vstoupily na počátku 70. let. [5]

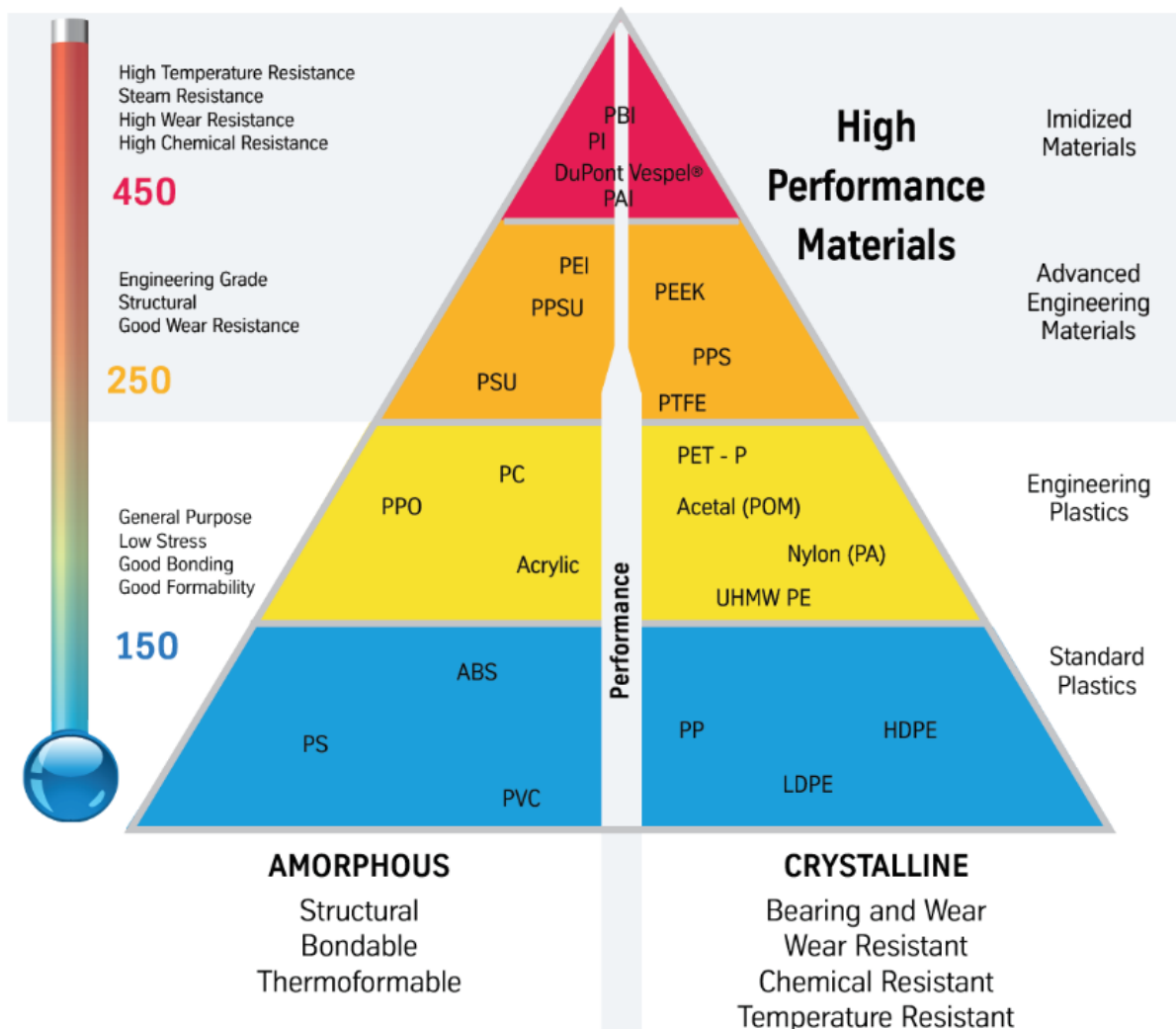
Výroba polyetheretherketonu (PEEK), polyetherketonketonu (PEKK) a polyetherimidu (PEI) prostřednictvím polykondenzace byla vyvinuta v 70. letech 20. století. PEKK byl prodáván od roku 1972, ale byl však vyrobený elektrofilní syntézou. Elektrofilní syntéza má obecně nevýhodu nízké selektivity k lineárním polymerům a používá agresivní reaktanty. Z tohoto důvodu se dnes většina high-tech polymerů vyrábí polykondenzačními procesy. [5]

Při výrobních procesech polykondenzací je důležitá vysoká čistota výchozích materiálů. Vývoj nových high-tech polymerů je dnes proto úzce spjat s vývojem monomerů, z nichž se skládá. [5]

1.2 Dělení high-tech polymerů

V dnešní době se polymery nejčastěji dělí podle jejich výkonosti (tepelné stability a chemické odolnosti), množství produkce a jestli jsou krystalické nebo amorfní. Na základě těchto vlastností jsou polymery uspořádány do takzvané pyramidy polymerů (obrázek 1). [3;4]

Při pohledu na pyramidu polymerů jsou dvě nejvyšší vrstvy považovány za high-tech polymery. Nižší vrstva high-tech polymerů se často nazývá, jako pokročilé inženýrské materiály. Nejvyšší vrstva patří polymerům pro nejnáročnější aplikace, takzvaným imidizovaným materiálům. [4]



Obrázek 1 Pyramida polymerů [4]

Dnes jsou nejpoužívanějšími high-tech polymery: polysulfon, polyethersulfon, polyfenylsulfon, polyfenylsulfid, polyetheretherketon, polyetherketonketon, polyetherimid, polyimid, polyamid-imid a polybenzimidazol, [3;4;5]

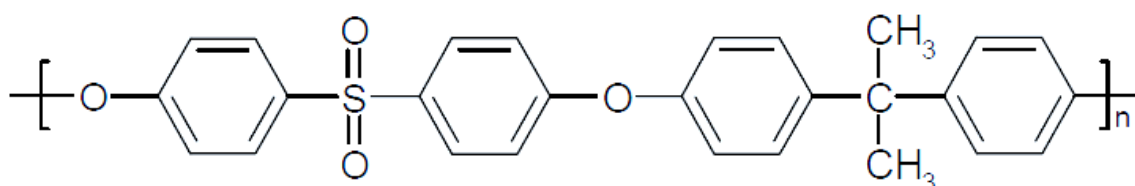
Charakterizací právě těchto polymerů se bude zabývat další část bakalářské práce.

1.2.1 Polysulfon

Polysulfon (PSU), celým systematickým názvem Poly(oxy-1,4-fenylensulfonyl-1,4-fenylen) (obrázek 2), je polymerem s vysokou tepelnou stabilitou. Je to amorfní, téměř průhledný (medově zbarvený) termoplast, který lze tvarovat, extrudovat nebo tepelně tvarovat do široké škály tvarů. [7;8;9;10]

Vysoká tepelná stabilita je zajištěna difenylensulfonovou skupinou, je houževnatý, tuhý, vysoce pevný a zachovává si své vlastnosti mezi -100 °C až +150 °C. Má velmi vysokou rozměrovou

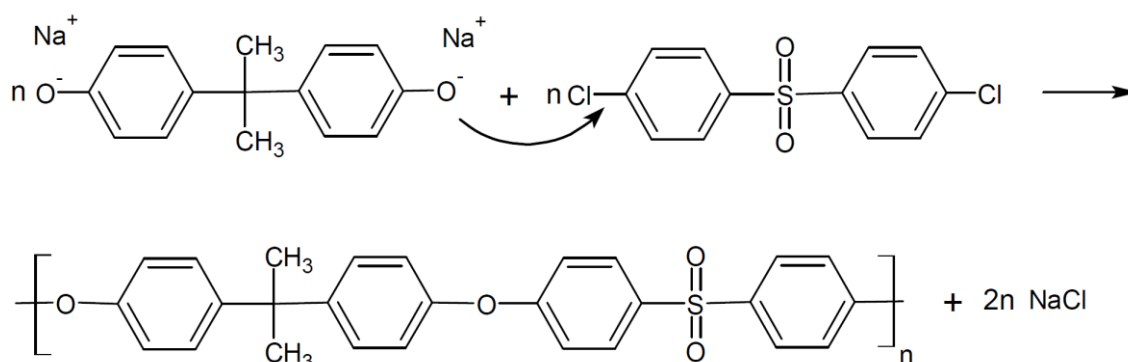
stabilitu, proto je jeho změna velikosti při vystavení vroucí vodě, vzduchu, nebo páře při 150 °C pouze 0,1 %. Dále tato skupina propůjčuje polymeru vysokou pevnost, vysokou odolnost proti oxidaci a vynikající zpomalení hoření, ale činí polymer tuhý. Mechanicky má polysulfon poměrně vysokou odolnost proti ztuhnutí, což umožňuje jeho použití při vysokých tlacích. Polysulfon je vysoce odolný vůči vodným minerálním kyselinám, zásadám a oxidačním činidlům v pH rozmezí 2 až 13 a je také poměrně odolný vůči mnoha nepolárním rozpouštědlům. Polysulfon však není odolný vůči nízko-polárním rozpouštědlům, jako jsou estery, ketony, aromatické a chlorované uhlovodíky. [9;10;11]



Obrázek 2 Vzorec PSU [10]

1.2.1.1 Výroba polysulfonu

Polysulfon lze připravit polykondenzací vhodných monomerů nebo polymerací cyklických ethersulfonů s otevřeným kruhem. Jednou z nejběžnějších metod je nukleofilní substituce aromatického chloridu nebo fluorsulfonu fenoxidovým iontem. Například reakce dvojsodné soli bisfenolu A s dichlordifenylsulfonem poskytuje polysulfon (obrázek 3). [9;11]



Obrázek 3 Syntéza PSU [10]

Historicky byl polysulfon také vyráběn Friedel-Craftsovou reakcí z benzensulfonylchloridu. Tato cesta je však komplikovaná tvorbou izomerů pocházejících z para a orto substituce. Dále bylo pozorováno síťování, které silně ovlivňuje mechanické vlastnosti polymeru, proto byla tato metoda opuštěna. [9]

1.2.1.2 Zpracování a využití polysulfonu

Obvykle má polysulfon dobrou stabilitu taveniny, která umožňuje zpracování konvenčními metodami zpracování termoplastů včetně vstřikování, vytlačování a tvarování za tepla. Díky nízkému smrštění formy lze PSU tvarovat na malé součástky s úzkými rozměrovými tolerancemi. PSU se dá obohatit o skelná vlákna, pro zvýšení dlouhodobé pevnosti při použití za vyšších teplot. [9;11]

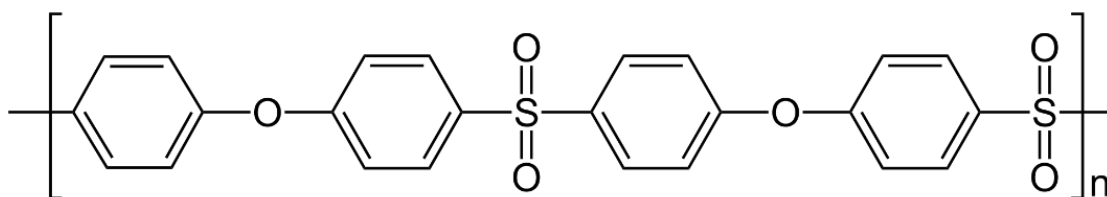
PSU je chemicky inertní, vysoce biokompatibilní, má vysokou provozní teplotu a lze ho snadno sterilizovat. Díky těmto vlastnostem je velmi vhodný pro lékařské aplikace a aplikace pro styk s potravinami a nápoji. PSU je vynikající volbou pro mnoho částí strojů a zařízení, které jsou vystaveny vysokým teplotám a korozivním médiím. Příklady zahrnují vnitřní součásti kávovarů, zásobníky baterií, nádoby na chemikálie a náplně do tiskáren. PSU se také používá v automobilovém a leteckém průmyslu pro aplikace, kde jsou požadovány vynikající tepelné a mechanické vlastnosti ve srovnání s konvenčními pryskyřicemi. Některé modifikované PSU mají vysokou propustnost a selektivitu pro plyny, proto našly použití jako membránové materiály pro separaci plynů. Také se dají připravit membrány pro filtraci užitkových vod (obrázek 4). [8;9;12]



Obrázek 4 Polysulfonová filtrační svíce [13]

1.2.2 Polyethersulfon

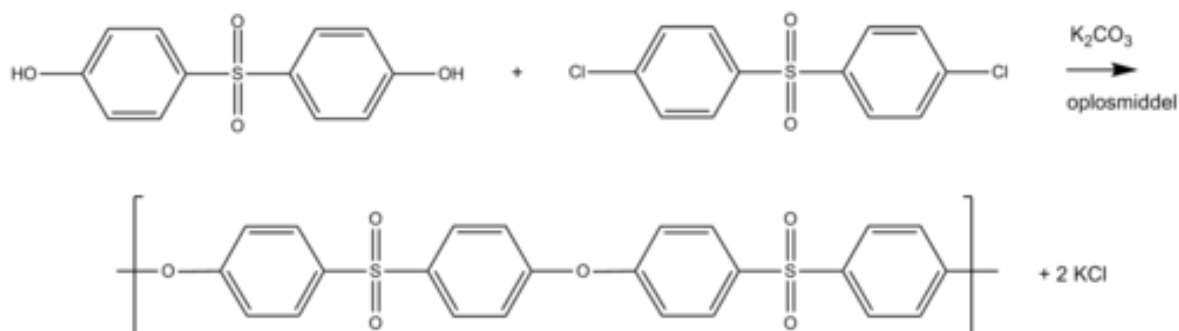
Polyethersulfon (PESU) celým systematickým názvem Poly(oxy-1,4-fenylsulfonyl-1,4-fenyl) (obrázek 5) má mnoho podobných vlastností s polysulfonen. Je amorfní, vysoce tepelně odolný a transparentní termoplast. Etherovými vazby mu však poskytují oproti PSU větší flexibilitu. Tyto etherové vazby také přispívají k tepelné stabilitě. [14;15]



Obrázek 5 Vzorec PESU [15]

1.2.2.1 Výroba polyethersulfonu

Syntéza PESU funguje na stejných principech jako u PSU jen se při výrobě místo bisfenolu A použije bisfenol S (obrázek 6). [15;16]

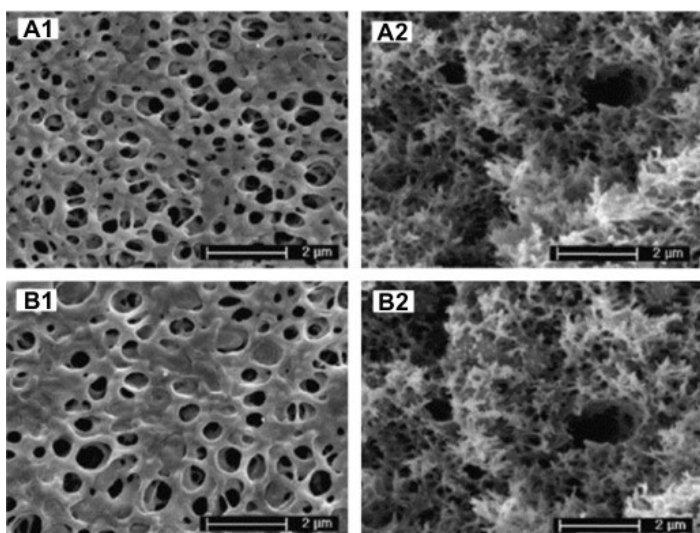


Obrázek 6 Syntéza PESU [16]

1.2.2.2 Zpracování a využití polyethersulfonu

Jeho dobrá stabilita taveniny umožňuje výrobu konvenčními metodami zpracování termoplastů včetně vstřikování, vytlačování, lití v roztoku a slinování. PESU je dobrou volbou pro komponenty, které jsou vystaveny vysokým teplotám a korozivním médiím (náplně do tiskáren, vnitřní součásti kávovarů a zásobníky baterií). Většina druhů však není vhodná pro venkovní použití kvůli špatné odolnosti vůči povětrnostním vlivům, ozónu a UV záření. [14;15]

V posledních letech bylo dosaženo významného pokroku v modifikaci polyethersulfonových membrán. Na obrázku 7 je možné pozorovat nemodifikovanou membránu (A) a modifikovanou membránu (B), rozdíl je v hmotnostním přírůstku, tedy i v hustotě membrány. Značení (1) vyobrazuje separační plochu, (2) vyobrazuje průřez. Nejvýraznějšího pokroku bylo dosaženo v přípravě membrán ve formě plochého listu a membrán ve formě dutých vláken. Nacházejí velké využití v medicíně a v chemickém průmyslu (obrázek 8). [15;17]



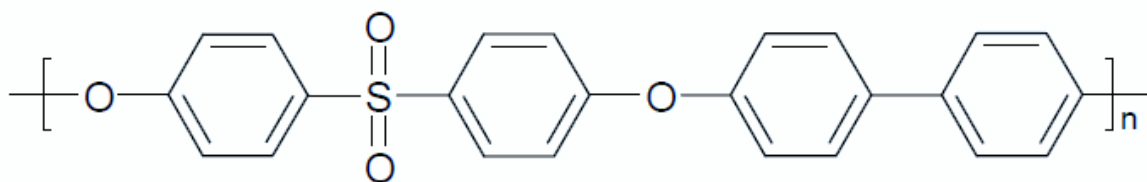
Obrázek 7 Snímek modifikovaných a nemodifikovaných membrán [17]



Obrázek 8 Kompletní filtrační jednotka s PESU membránou [18]

1.2.3 Polyfenylsulfon

Polyfenylsulfon (PPSU) (obrázek 9) má opět mnoho podobných vlastností s polysulfonem. Je to amorfní, tepelně odolný a transparentní termoplast, ale na rozdíl od PSU bifenylenetherová jednotka v PPSU zvyšuje rázovou houževnatost, která značně převyšuje hodnoty houževnatosti u PSU i PESU. Houževnatost PPSU je dokonce srovnatelná s polykarbonátem. Etherová skupina v PPSU také zvyšuje flexibilitu oproti samotnému PSU. Z těchto důvodů je PPSU považován za nejvýkonnější polymer z trojice PSU, PESU a PPSU, což se také odráží na jeho ceně. [19;20;21]

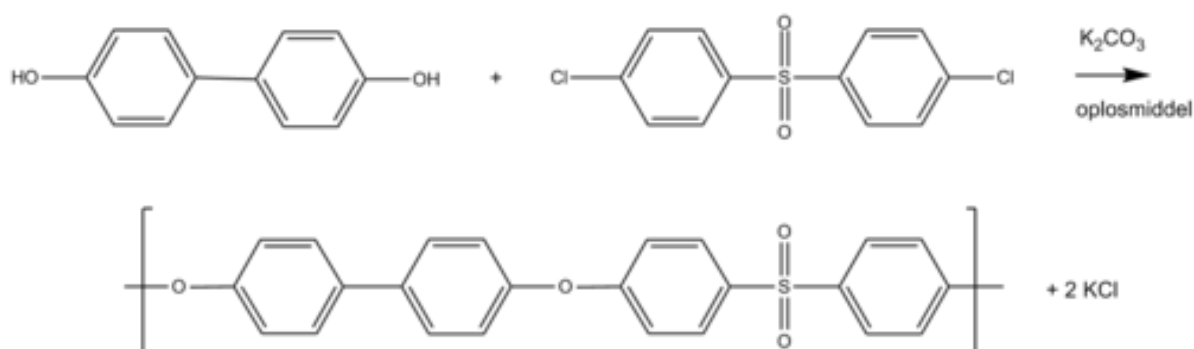


Obrázek 9 Vzorec PPSU [21]

Dále je PPSU známý pro svou, vynikající hydrolytickou stabilitu a dobrou odolnost vůči chemikáliím a teplu. Je například vysoce odolný vůči vodným minerálním kyselinám, zásadám, oxidačním činidlům a většině rozpouštědel. Nicméně aromatická rozpouštědla, jako jsou ketony a ethery, mohou způsobit určité narušení materiálu. [19;21]

1.2.3.1 Výroba polyfenylsulfonu

Syntéza PPSU funguje na stejných principech jako u PSU jen se při výrobě místo bisfenolu A použije difenol (obrázek 10). [16]



Obrázek 10 Syntéza PPSU [16]

1.2.3.2 Zpracování a využití polyfenylsulfonu

Bifenylenetherová skupina v PPSU, také přispívá k usnadnění výroby taveniny. Tyto pryskyřice mohou být stejně snadno, jako v případě PSU vstřikovány nebo vytlačovány na běžných zařízeních. Zpracování však vyžaduje relativně vysokou teplotu formy, přibližně 365 až 395 °C a druhy vyztužené skelnými vlákny vyžadují ještě vyšší teploty. [19;21]

PPSU je často vynikající volbou pro součásti, které jsou vystaveny vysokým teplotám a korozivním médiím, protože má výjimečnou chemickou odolnost. Příklady zahrnují potrubní armatury (obrázek 11), nádoby na baterie, součásti lékařských přístrojů a sterilizovatelné produkty pro zdravotnictví. Polyfenylsulfon se také používá v automobilovém a leteckém průmyslu pro aplikace, kde jsou požadovány vysoké tepelné a mechanické vlastnosti ve

srovnání s konvenčními pryskyřicemi. Většina druhů však není vhodná pro venkovní použití (není odolný vůči UV a ozonu). [19;21]



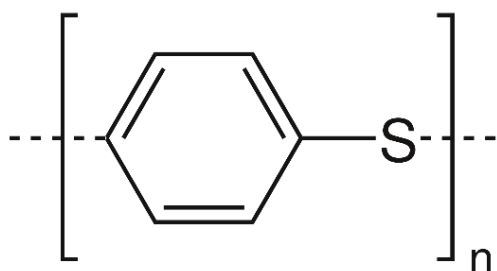
Obrázek 11 Armatura z PPSU [22]

1.2.4 Polyfenylensulfid

Polyfenylensulfid (PPS) (obrázek 12) má vynikající tepelnou a chemickou odolnost, dobrou rozměrovou stálost a také vysokou pevnost v tahu a ohybu díky aromatické kruhové struktuře základního řetězce polymeru. Na rozdíl od PSU, PESU a PPSU je PPS semikrystalický. Nabízí také vynikající dielektrickou pevnost, i když mechanické vlastnosti se zvyšující se teplotou nepatrně klesají. PPS je výbornou alternativou kovů a termosetů pro použití v automobilových součástkách, přístrojích, elektronice a několika dalších aplikacích. [23;24;25]

Díky chemické odolnosti nemají na PPS po vytvrzení vliv alkoholy, ketony, chlorované alifatické sloučeniny, estery, kapalný amoniak, bývá však ovlivněn zředěnou kyselinou chlorovodíkovou, kyselinou dusičnou a také koncentrovanou kyselinou sírovou. Je odolný vůči určitým chemikáliím, které ovlivňují PEEK, proto je dobrou volbou v průmyslových odvětvích, jako je zpracování papíru, kde takové chemikálie převládají. PPS je necitlivý na vlhkost a má dobrou odolnost proti povětrnostním vlivům. [24;25;26]

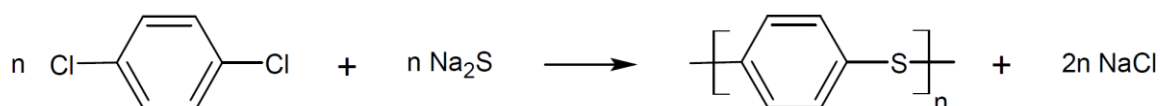
PPS je v aplikacích nejčastěji vyztužen skelnými vlákny nebo minerálními plnivými. Tyto druhy mají zlepšenou mechanickou pevnost, jsou znatelně tužší a vykazují lepší zachování pevnosti při zvýšené teplotě. Vykazují také zlepšenou nehořlavost. [26;27]



Obrázek 12 Vzorec PPS [25]

1.2.4.1 Výroba polyfenylensulfidu

Komerční polyfenylensulfid se vyrábí polykondenzační reakcí (obrázek 13) mezi p-dichlorbenzenem a sulfidem sodným v polárním rozpouštědle, jako je N-methylpyrrolidon, při vyšší teplotě (přibližně 250 °C). [24;27]



Obrázek 13 Syntéza PPS [24]

V původním procesu výroby vyvinutém společností Philips, byl PPS špinavě bílý, lineární polymerní materiál nízké molekulové hmotnosti a mechanické pevnosti a mohl být použit hlavně pro přípravu povlaků. Pro výrobu lisovaných výrobků se PPS vytvrzuje (síťuje), při teplotě kolem bodu tání polymeru v přítomnosti malého množství vzduchu. [24;25;26]

Mezi hlavní tři typy PPS patří: **Lineární PPS** (molekulová hmotnost tohoto polymeru je téměř dvojnásobná ve srovnání s běžným PPS). **Vytvrzený PPS** (získává se zahříváním běžného PPS v přítomnosti kyslíku). **Rozvětvený PPS** (má zlepšené mechanické vlastnosti, houževnatost a tažnost). [26]

1.2.4.2 Zpracování a využití polyfenylensulfidu

PPS (základní polymer nebo skelným vláknem vyztužený) se obvykle zpracovává vstřikováním nebo vytlačováním (extruzí). PPS lze zpracovávat v teplotním rozmezí 300 až 350 °C. Zpracování je často ztíženo, kvůli vysokému bodu tání. Pokud je použitý PPS vyztužený sklem, nebo dalšími aditivami, měla by být použita horní teplota zpracování, aby se zabránilo opotřebení válce, šroubu a špičky šroubu. [24;27;28]

PPS se dá také dobře zvlákňovat a jeho vlákna (obrázek 14) a textilie odolávají chemickému a tepelnému napadení, proto se PPS používá ve filtračních tkaninách pro kotle na uhlí, papírenské plsti, elektrické izolace, filmové kondenzátory, speciální membrány, těsnění a ucpávky. [25;27]



Obrázek 14 Vlákno z PPS [29]

PPS se široce používá pro elektronické součástky, jako jsou zástrčky, konektory, relé, spínače a zapouzdření elektronických součástí. Mezi další aplikace patří mechanické díly v automobilech a přesné strojírenství, jako jsou systémy sání vzduchu, části čerpadel, těsnění, ventily, pouzdra a ložiska, zejména pro provoz v korozivním prostředí. PPS se dá také zpracovat na filament pro 3D tisk (obrázek 15). [26;27]

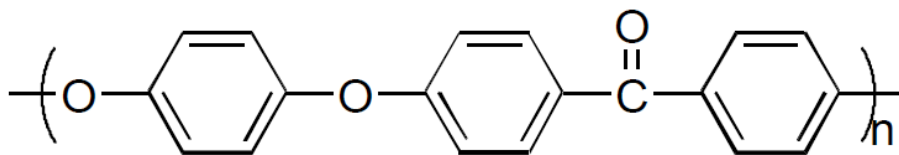


Obrázek 15 Filament z PPS [30]

1.2.5 Polyetheretherketon

Polyetheretherketon (PEEK) (obrázek 16) je semikrystalický, bezbarvý termoplast. Aromatická struktura spojená s ketonovými skupinami poskytuje vysoký modul pružnosti a dlouhodobou

tepelnou a oxidační stabilitu, zatímco etherové vazby (podobně jako u PESU a PPSU) poskytují houževnatost, flexibilitu a usnadňují zpracování. [31;32;33]

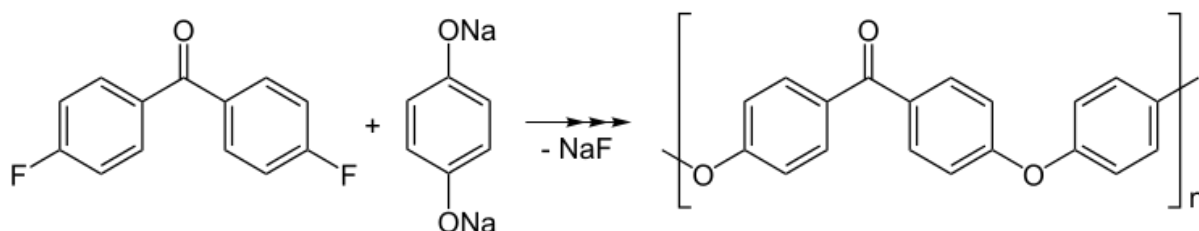


Obrázek 16 Vzorec PEEK [32]

PEEK má vynikající chemickou odolnost a vlastnosti si udržuje v širokém teplotním rozsahu. PEEK je také známý svou výjimečně vysokou odolností vůči hydrolyze v horké vodě a páře a lze jej používat při nepřetržité teplotě až 260 °C s malou, nebo žádnou trvalou ztrátou, jeho fyzikálních vlastností. Vykazuje však horší odolnost proti povětrnostním vlivům v důsledku poškození UV zářením. [33;34;35]

1.2.5.1 Výroba polyetheretherketonu

Pro přípravu PEEK se používají dva hlavní procesy pro polykondenzaci, jmenovitě nukleofilní a elektrofilní typ reakce. Nejčastěji se připravuje řetězovou polymerací a dialkylací bisfenolátových solí. Jedná se o reakci 4,4'-difluorbenzofenonu s disodnou solí hydrochinonu, která vzniká deprotonací uhličitanem sodným (obrázek 17). Reakce probíhá při teplotě kolem 300 °C v polárních aprotických rozpouštědlech (difenylsulfon). [31;32;34]



Obrázek 17 Syntéza PEEK [31]

1.2.5.2 Zpracování a využití polyetheretherketonu

PEEK se dá zpracovávat běžnými procesy pro termoplasty, jako je lisování a extruze, je i možné ho zpracovat na filament pro 3D tisk. [33;35]

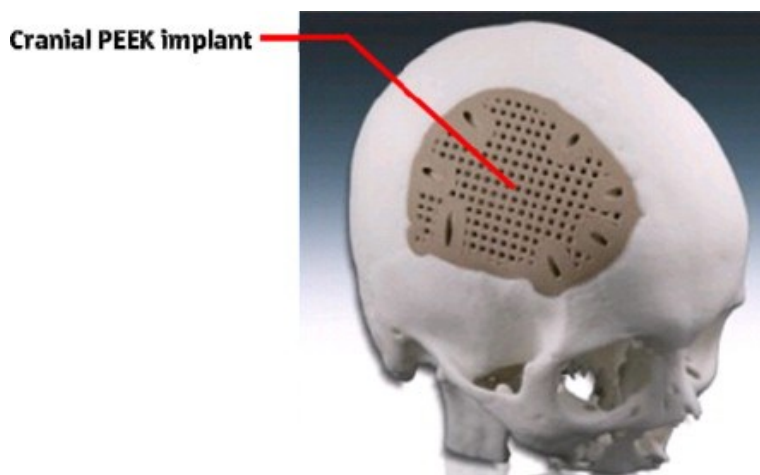
PEEK je díky vynikajícím mechanickým vlastnostem, jako je vysoká tuhost, vysoká houževnatost, vynikající odolnost proti opotřebení a dlouhodobá odolnost proti tečení a únavě, dobrou náhradkou oceli v mnoha aplikacích (obrázek 18). PEEK patří mezi nejvýkonnější termoplasty a je široce používán v leteckém, automobilovém a chemickém průmyslu pro velké

množství konstrukčních dílů, jako jsou ozubená kola, pouzdra, hřídele a těsnění kulových ventilů. Je to jeden z mála plastů kompatibilních s aplikacemi s ultra vysokým vakuem. [33;35;36]



Obrázek 18 Náhrady za kovové materiály z PEEK [35]

Díky své biokompatibilitě, bioinertnosti a vysoké hydrolytické stabilitě je PEEK také ideální pro aplikace chirurgických tělesných implantátů, například pro vytvoření částečné náhrady lebky (obrázek 19). Dříve se velké kostní defekty způsobené nádory a traumaty léčili autogenní transplantací kosti, nebo lékařskými implantáty z kovových materiálů, ale existují mnohé nedostatky této léčby. Materiály PEEK byly úspěšně aplikovány v klinické praxi, jako náhrada v obou těchto případech a dosáhly vynikající klinické účinnosti a širokého uznání. [32;33;36]

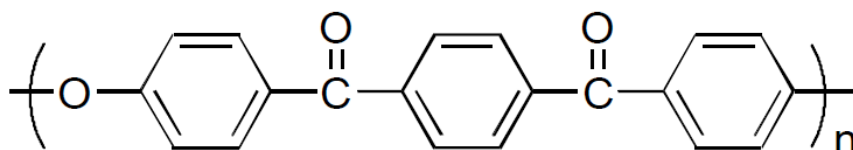


Obrázek 19 Implantát z PEEK [36]

1.2.6 Polyetherketonketon

Polyetherketonketon (PEKK) (obrázek 20) je stejně jako PEEK semikrystalický termoplast. Má vysokou tepelnou stabilitu, vynikající chemickou odolnost a vynikající mechanické vlastnosti

v širokém teplotním rozsahu. Benzenové kruhy spojené s ketonovými skupinami poskytují vysoký modul pružnosti a dlouhodobou tepelnou oxidační stabilitu, zatímco etherové vazby (podobně jako u PPSU a PESU) poskytují houževnatost, tažnost a usnadňují snadné zpracování. Na rozdíl od PEEK je PEKK díky dvěma ketonovým skupinám mírně tužší a má tedy vyšší modul pružnosti, nižší rázovou houževnatost, ale na druhou stranu má lepší bariérové vlastnosti a vyšší pevnost v tlaku. Z těchto důvodů se PEKK v pyramidě polymerů (obrázek 1) řadí výše než PEEK, což se odráží i na jeho ceně (je dražší). [37;38;39]



Obrázek 20 Vzorec PEKK [37]

PEKK je stejně jako PEEK citlivý na UV záření, ale má vynikající retardaci hoření a nízkou tvorbu kouře a toxicitu. [38]

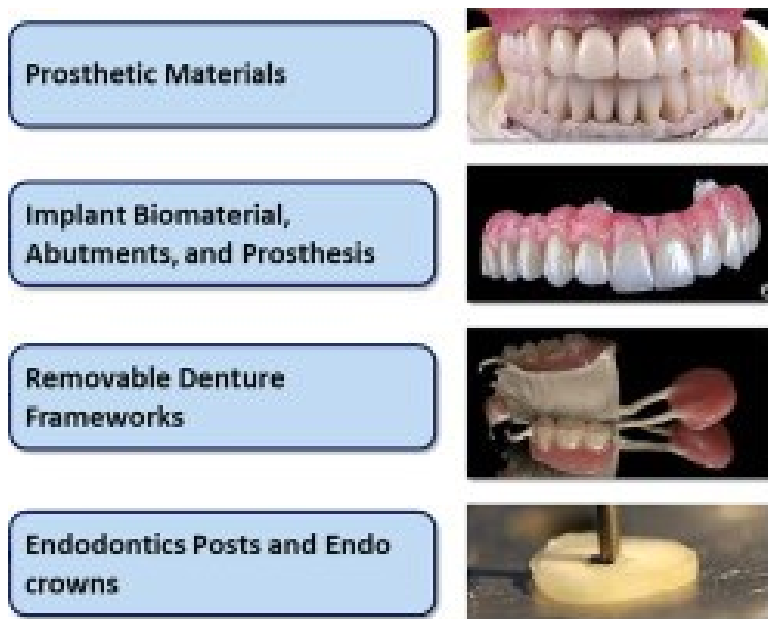
1.2.6.1 Výroba polyetheretherketonketonu

PEKK lze vyrobit z difenyletheru a tereftaloylchloridů s chloridem hlinitým a nitrobenzenem. [39]

1.2.6.2 Zpracování a využití polyetherketonketonu

PEKK se dá stejně jako PEKK zpracovávat běžnými procesy pro termoplasty, jako je lisování a extruze. Je i možné ho zpracovat na filament pro 3D tisk. [37;38]

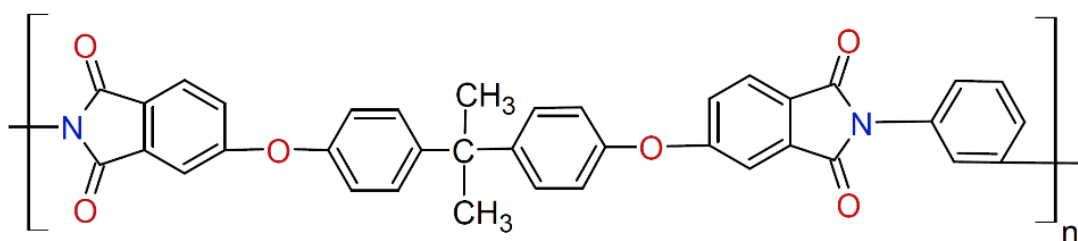
Díky vynikajícím mechanickým vlastnostem může PEKK nahradit ocel, a to v ještě více aplikacích než PEEK. PEKK se také úspěšně používá ve stomatologii jako protetický materiál. V poslední době se PEKK uplatňuje v různých oblastech stomatologie (obrázek 21) a to z důvodu vhodné mechanické odolnosti, odolnosti proti lomu, tlumení nárazů a lepšímu rozložení napětí, než má PEEK, který se díky své lepší flexibilitě zase více hodí na kostěné implantáty. [37;38;39]



Obrázek 21 Různé využití PEKK ve stomatologii [39]

1.2.7 Polyetherimid

Polyetherimid (PEI) (obrázek 22) je amorfní, jantarově zbarvený až průhledný termoplast s vlastnostmi podobnými PEEK. Ve srovnání s PEEK je sice PEI levnější, ale má nižší rázovou houževnatost a použitelnou teplotu. [40;41]

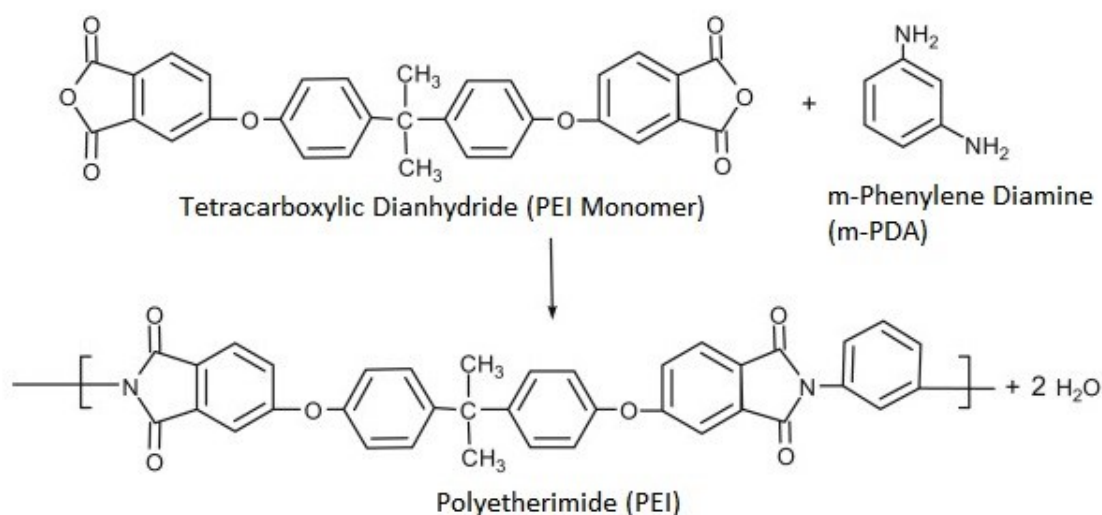


Obrázek 22 Vzorec PEI [41]

Struktura aromatického kruhu v hlavním řetězci polymeru zlepšuje tepelné, mechanické a chemické vlastnosti, zatímco flexibilní etherové vazby zlepšují zpracovatelnost taveniny a houževnatost. [40;41]

1.2.7.1 Výroba polyetherimidu

PEI se vyrábí polykondenzační reakcí (obrázek 23) mezi dianhydridem bisfenolu A, jako je dianhydrid kyseliny tetrakarboxylové (vyrábí se reakcí bisfenolu A a anhydridu kyseliny ftalové) a diaminem, jako je m-fenylendiamin. [42;43;44]



Obrázek 23 Syntéza PEI [44]

1.2.7.2 Zpracování a využití polyetherimidu

Na rozdíl od většiny ostatních polyimidů je PEI vhodný pro zpracování technologiemi typickými pro termoplasty, jako jsou vstřikování, vytlačování, tvarování za tepla a lisování. Polyetherimidy mohou být zpracovány v tavenině kvůli etherovým vazbám přítomným v hlavním řetězci polymeru. Stále si však zachovávají vysokoteplotní vlastnosti podobné polyimidům. Mohou také být vyztuženy skelnými vlákny, díky čemuž mají ještě větší pevnost v tahu, tuhost a rozměrovou stabilitu. [41;42;43]

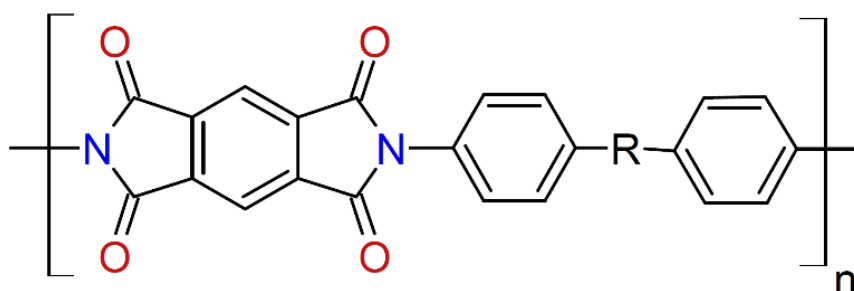
PEI jsou často vynikající volbou pro náročné aplikace v letectví a dopravě. Mnoho aplikací nacházejí také v průmyslu elektroniky a integrovaných obvodů. Některé další důležité aplikace jsou pouzdra ekletických sond, rámy digitálních tiskáren karet, vinuté pružiny, kryty kabelů, nebo filament pro 3D tiskárny (obrázek 24). [40;44]



Obrázek 24 Filament z PEI [45]

1.2.8 Polyimid

Polyimidy (PI) (obrázek 25) jsou vysoce výkonné polymery, které obsahují dvě acylové skupiny (C=O) vázané na dusík. Přítomnost inertního imidového kruhu a vysoká meziřetězcová interakce (koheze), dodává polymeru vysokou tepelnou stabilitu a odolnost, a to i výrazně vyšší, než mají polymery, které byly probírány výše. PI jsou odolné vůči teplotám až v rozmezí 400-500 °C. PI jsou většinou jantarové až průhledné barvy. [46;47;48]

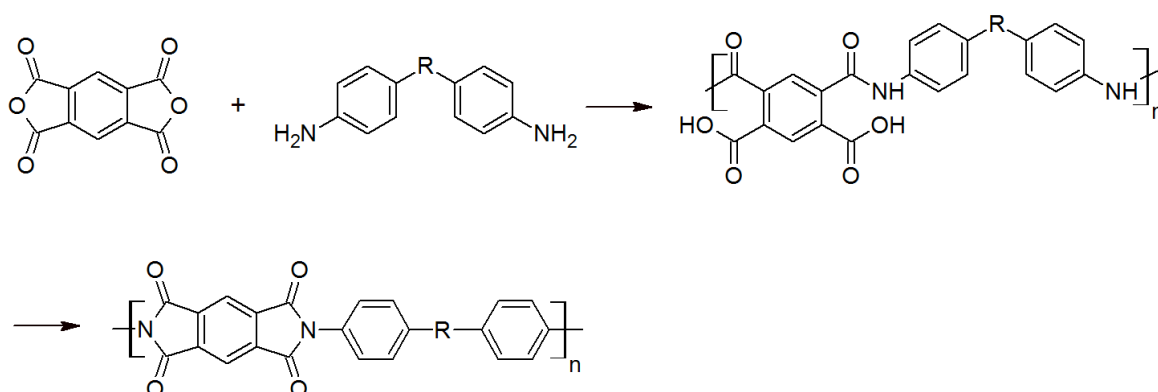


Obrázek 25 Vzorec PI [47]

1.2.8.1 Výroba polyimidu

Postup výroby je založen na dianhydridu kyseliny pyromellitové a 4,4'diaminodifenyletheru. Tato reakce se skládá ze dvou kroků: Roztoková polykondenzace aromatického diaminu a dianhydridu za vzniku poly(amové kyseliny), dále je poly(amová kyselina) zpracována do vhodného tvaru a následnou cyklodehydratací amidové kyseliny vzniká polyimid (obrázek 26).

Tepelnou stabilitu polymeru lze dále zlepšit začleněním aromatických kruhů do hlavního řetězce, nebo do postranních skupin. [46;49]



Obrázek 26 Syntéza PI [46]

1.2.8.2 Zpracování a využití polyimidu

Většina polyimidů je netavitelná a nerozpustná v důsledku jejich planárních aromatických a heteroaromatických struktur, a proto je obvykle nutné je zpracovávat speciální rozpouštědlovou cestou. Teplota zpracování je 380 až 430 °C. Polyimid klasicky může být extrudován, vstřikován nebo často i zvlákňován do celé řady produktů. [46;47;50]

PI jsou často vynikající volbou pro velmi náročné aplikace, kde je vyžadována velmi vysoká mechanická pevnost v kombinaci s vysokou provozní teplotou, odolností proti korozi a opotřeбенí. Běžné aplikace zahrnují ložiska, objímky a další konstrukční díly, které musí obstát v náročném a korozivním prostředí. PI se také používají v lepidlech odolných vůči vysokým teplotám a jako tepelně vodivé fólie. Vlákna PI (obrázek 27) se používají ve filtračních materiálech pro horké plyny v chemickém průmyslu a jako materiál pro tepelné ochranné oděvy. PI mají vhodné vlastnosti pro elektronické aplikace v leteckém, dopravním průmyslu a flexibilních solárních člancích (obrázek 28) jako dielektrický substrát. PI také nachází široké použití v lékařských zařízeních, jako jsou kardiovaskulární katetry. [47;48;51]



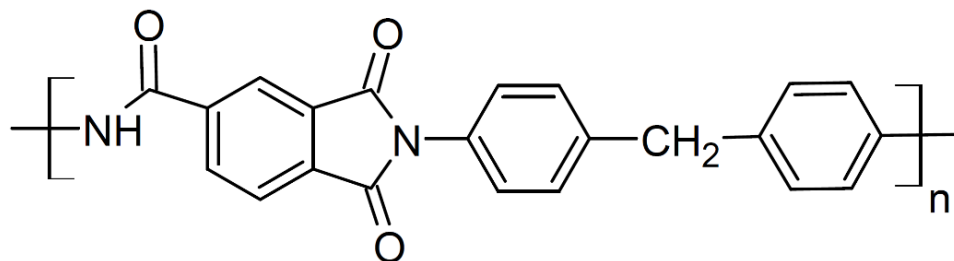
Obrázek 27 Tkanina z PI [52]



Obrázek 28 Flexibilní solární články s PI [48]

1.2.9 Polyamid-imid

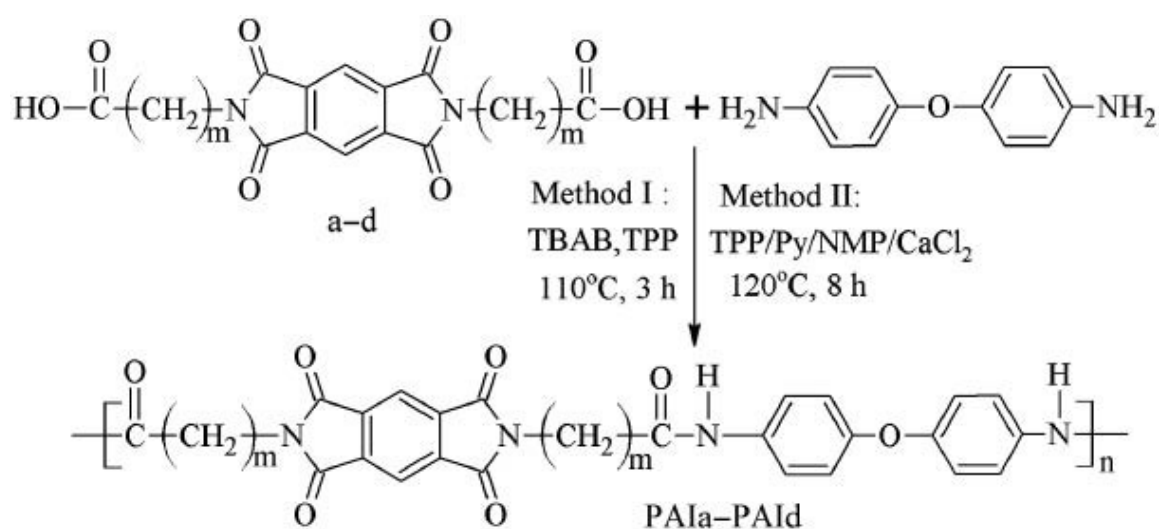
Polyamid-imidy (PAI) (obrázek 29) jsou vysoce výkonné, tavením zpracovatelné, amorfní a termoplastické nebo termosetové pryskyřice. PAI je známý pro své výjimečné mechanické vlastnosti a vynikající tepelnou a chemickou odolnost. Některé jakosti si udržují svou pevnost a tuhost až do 260 °C. PAI je svými vlastnostmi obecně na pomezí mezi polyamidy a polyimidy. [53;54]



Obrázek 29 Vzorec PAI [53]

1.2.9.1 Výroba polyamid-imidu

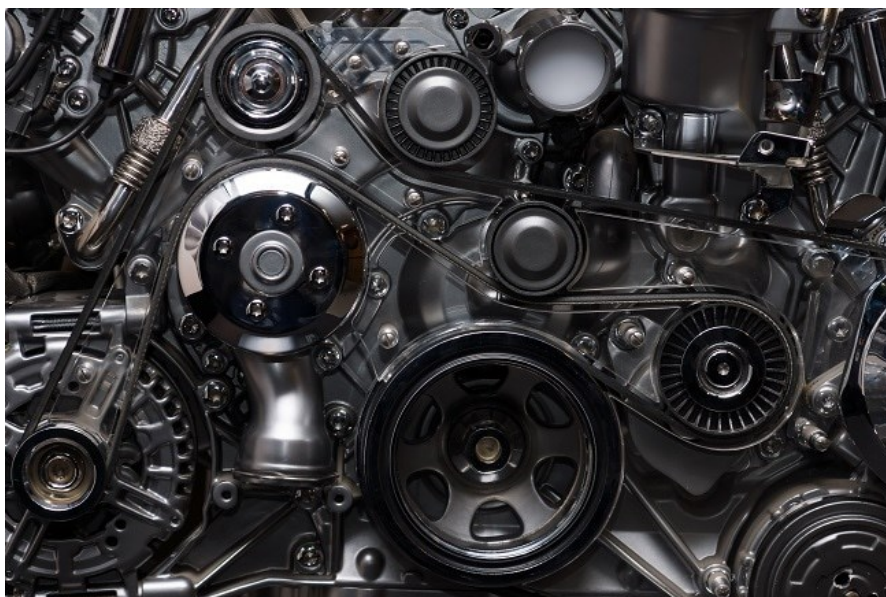
PAI se připravuje buď z aromatického diaminu a anhydridu chloridu aromatické kyseliny (cesta chloridu kyseliny), nebo z aromatického diisokyanátu a anhydridu (diisokyanátová cesta). Běžný PAI je kondenzační produkt chloridu anhydridu kyseliny trimellitové (nebo chloridu kyseliny trimellitové) a methyldianilinu (obrázek 30). Těmito dvěma cestami lze z velkého počtu monomerů připravit širokou škálu polyamidimidů. Dokonce i nepatrné odchylky ve struktuře dianhydridu a diaminu mohou mít významný vliv na vlastnosti konečného polyamidimidu. [53;55;56]



Obrázek 30 Způsoby syntézy PAI [56]

1.2.9.2 Zpracování a využití polyamid-imidu

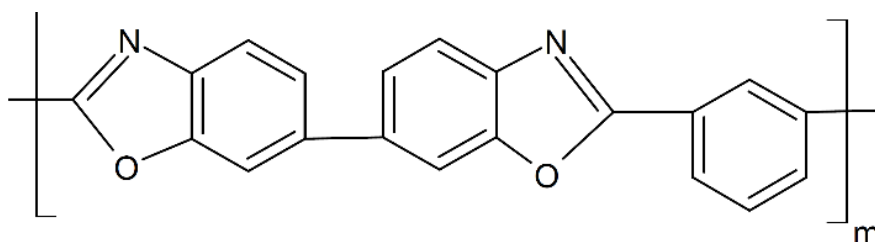
PAI je vhodný pro zpracování vytlačování (extruzí) nebo vstřikováním. Typickým využitím PAI jsou lisované nebo obráběné díly pro náročné aplikace, jako je například, těsnění, pouzdra pístů a ozubených kol. PEI se také široce používá ve smaltech magnetických drátů pro motory (obrázek 31) s vysokým zatížením a ve vysoce výkonných, nepřilnavých a korozi odolných nátěrech. PAI se již od konce 60. let používá jako materiály na potahování drátů. [53;56;57]



Obrázek 31 PAI v motorech [58]

1.2.10 Polybenzimidazol

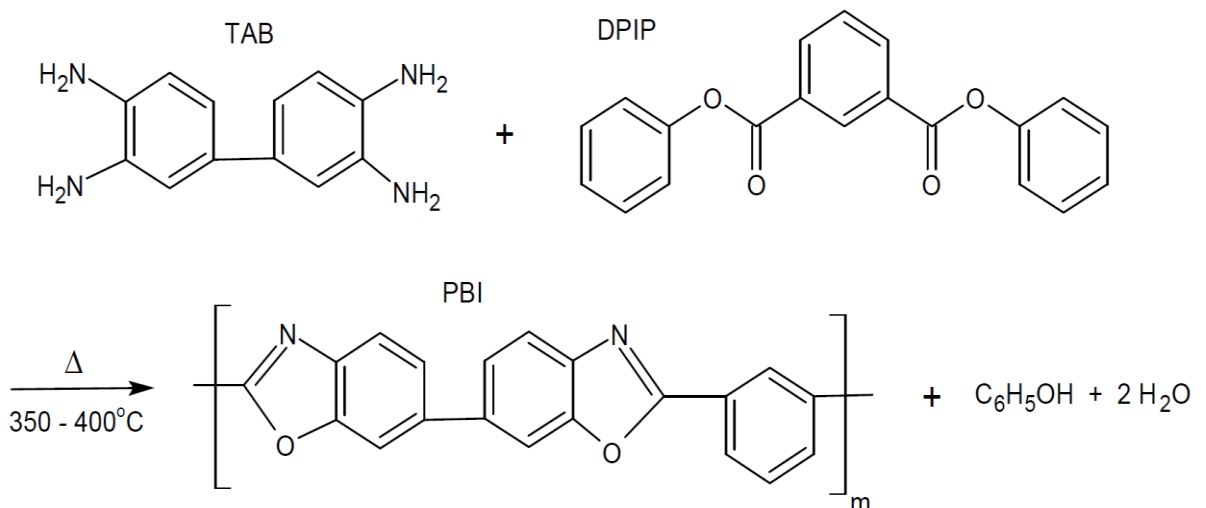
Polybenzimidazoly (PBI) (obrázek 32) jsou třídou extrémně tepelně odolných heterocyklických termoplastů. Polybenzimidazoly a jejich deriváty jsou velmi drahé a obtížně vyrobitelné, ale mají vynikající vlastnosti. PBI je jedním z nejvýkonnějších high-tech polymerů na trhu a nabízí jednu z nejvyšších teplotních odolností a provozní teploty ze všech polymerů uvedených v této bakalářské práci. PBI má velmi vysokou teplotu skelného přechodu a to kolem 425 °C a nemá žádný bod tání. Má také vynikající chemickou odolnost, včetně alkoholů, uhlovodíků, chlorovaných rozpouštědel, sirovodíku, slabých kyselin a zásad a mnoha dalších chemikálií. Jeho teplota rozkladu je více než 500 °C [59;60]



Obrázek 32 Vzorec PBI [60]

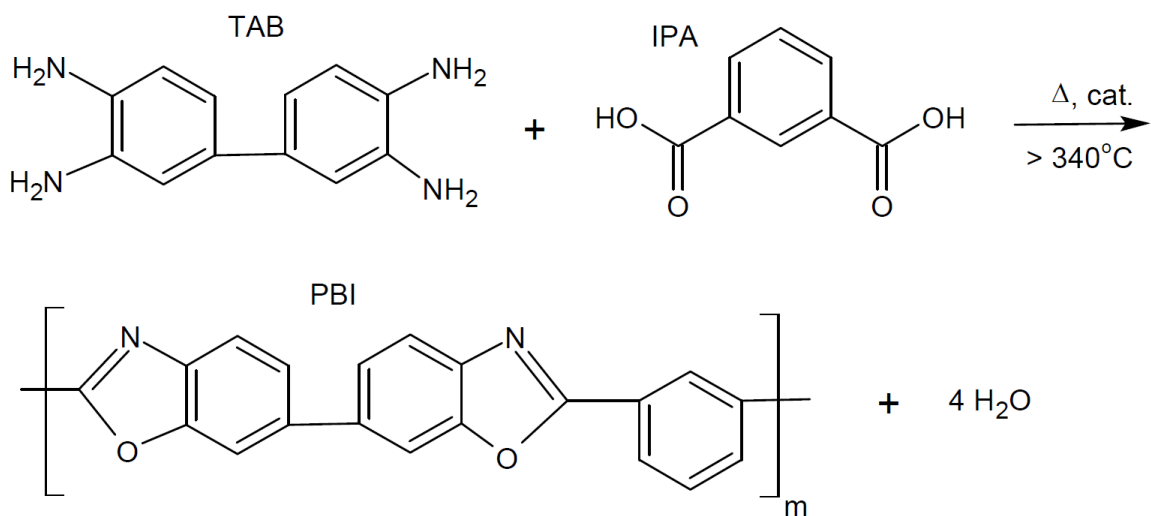
1.2.10.1 Výroba polybenzimidazolu

PBI se připravuje z aromatického tetraaminu a aromatické dikarboxylové kyseliny, nebo jejího derivátu. Významným příkladem je polykondenzační reakce difenylišoftalátu a 3,3',4,4'-tetraaminobifenyly při 270 °C s následnou cyklizací při teplotách mezi 350 a 400 °C v inertní atmosféře (obrázek 33). [59;60]



Obrázek 33 1. Způsob syntézy PBI [59]

PBI lze také vyrábět v jednostupňovém procesu, v tomto případě se kyselina isoftalová nechá reagovat s 3,3',4,4'-tetraaminobifenylem při teplotách vyšších než 340 °C a v přítomnosti vhodného katalyzátoru (obrázek 34). [59;60]

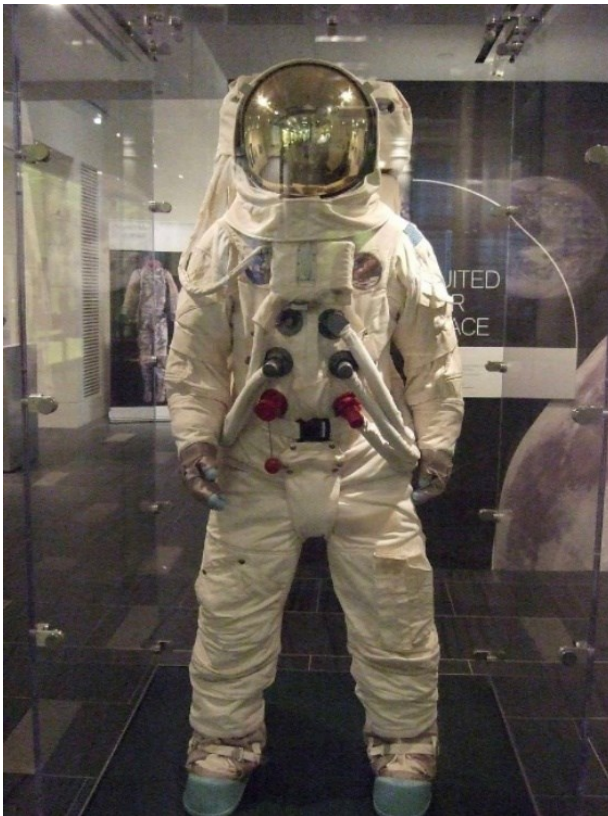


Obrázek 34 2. Způsob syntézy PBI [59]

1.2.10.2 Zpracování a využití polybenzimidazolu

PBI se dají zpracovat technologiemi pro zpracování termoplastů na standardní tvary a formy, zahrnují vlákna, tyče a trubky. Jejich extrémní tvrdost, ale ztěžuje jejich obrábění. Ve většině případů se doporučují nebo vyžadují diamantové nástroje. [59;61]

PBI mají velmi nízkou hladinu iontových nečistot, a to je činí ideálně vhodnými pro polovodičové aplikace (aplikace ve vakuové komoře). PBI jsou také vynikající tepelné izolátory, mají vynikající odolnost proti opotřebení a hoření. Mezi hlavní aplikace patří tepelně odolné oděvy, kontaktní těsnění, nosiče plátů pro neprůstřelné vesty, membrány pro různé separační procesy a tepelné izolátory. Díky těmto vlastnostem se PBI používají do hasičských ochranných uniforem, nebo byly dokonce použity ve skafandrech při misích Apollo (obrázek 35). Vlákna PBI se také často používají ve spojení s dalšími vysoce výkonnými vlákny, jako je kevlar. [59;61;62]



Obrázek 35 Skafandr s PBI vlákny [61]

1.3 Technologie zpracování high-tech polymerů

Z předchozí části bakalářské práce vyplývá, že nejpoužívanějšími metodami pro zpracování high-tech polymerů jsou metody běžné pro zpracování termoplastů, a to konkrétně nejvíce extruze a vstřikování.

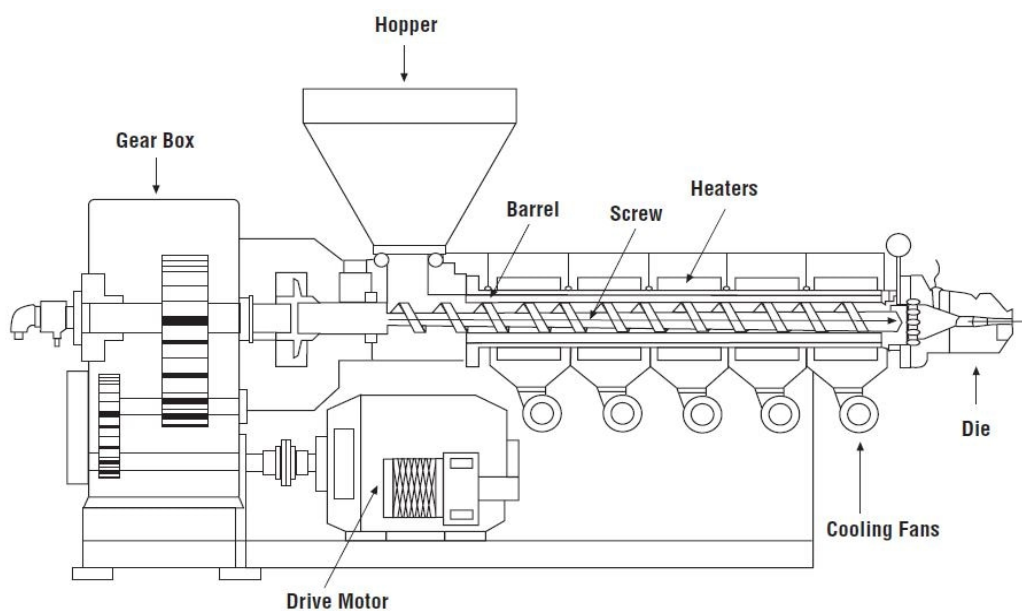
1.3.1 Zpracování termoplastů vytlačováním (extruzí)

Extruze je obvykle kontinuální proces, kterým se vyrábí potrubí, profilový materiál, desky, fólie, potahy drátů nebo polotovary pro některé další metody zpracování plastů (desky pro vakuové tváření nebo filamenty pro 3D tisk). Pro zpracování polymerů se nejčastěji používá

šnekový extrudér (obrázky 36 a 37), do kterého vstupuje polymer ve formě granulátu ve směsi s různými aditivami. Komora extrudéru je vyhřívána topnými články, díky čemuž se materiál v extrudéru roztaví (plastifikuje). Podle konkrétního použití (charakteru zpracovávaného polymeru) může být extrudér vybaven dalšími systémy, např. systémem odsávání plynu, který by jinak v konečném produktu způsoboval defekty (bubliny). [63;64;65;66]



Obrázek 36 Extrudér [67]



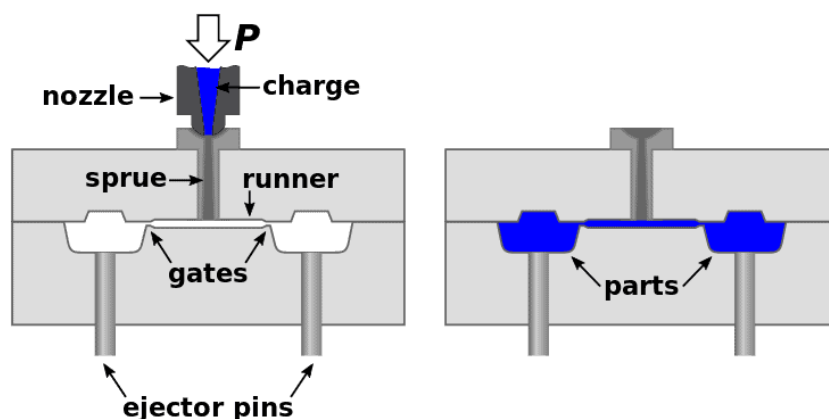
Obrázek 37 Schéma extrudéru [68]

1.3.2 Zpracování termoplastů vstřikováním

Vstřikování je jedna z nejpoužívanějších zpracovacích technologií, jehož pomocí lze termoplastické materiály tvarovat do téměř všech myslitelných tvarů. Plast je nejdříve roztaven (plastifikován) v plastifikační jednotce a následně pod vysokým tlakem vstříknut do formy, kde chladne a následně je jako hotový díl vyhozen. Jedná se o jedinou technologii, která je schopná masové výroby složitých tvarů s různými výstupky (žebrováním). Ke vstřikování plastů se používají vstřikovací stroje (obrázek 38), které z hlediska typu pohonu dělí na hydraulické, elektrické nebo hybridní. Vstřikovací stroje mají dvě na sobě nezávislé části, vstřikovací a uzavírací (obrázek 39), které jsou v současnosti automaticky řízené počítačem, což umožňuje téměř kontinuální proces výroby. Vstřikování plastů se dá dělit do mnoha různých speciálních metod, které závisí na charakteru zpracovávaného polymeru, jako například vstřikování s podporou plynu, vody, více komponentní vstřikování, vstřikování materiálu s pěnidlem a mnoho dalších. [63;64]



Obrázek 38 Vstřikovací přístroj [69]



Obrázek 39 Schéma vstřikovacího zařízení [63]

2. Praktická část

2.1 Použité materiály

Pro měření fyzikálně-mechanických vlastností byly použity tři různé vzorky Ultrason® od firmy BASF. Ultrason® jsou speciálně navržené polymery pro aplikace, které vyžadují vysokou tepelnou odolnost (vždy si zachovávají tuhost a rozměrovou stálost i při použití při velmi vysokých teplotách). [7]

Polymery Ultrason® jsou amorfní termoplasty odvozené z polysulfonu (PSU), polyethersulfonu (PESU) a polyfenylsulfonu (PPSU). Jejich široké spektrum prospěšných vlastností umožňuje jejich tvarování do vysoce kvalitních dílů pro domácí a gastronomické zařízení, membránovou filtraci a automobilový průmysl. Mohou být zpracovány téměř všemi technikami používanými pro termoplasty. [7]

Konkrétně byly použity vzorky ve formě odlitých destiček: Ultrason® S 2010 NAT (PSU), Ultrason® E 2010 NAT (PESU) a Ultrason® P 3010 NAT (PPSU). [7]

Tyto vzorky se vyznačují vysokou transparentností (medově zbarvený odstín), dobrými elektroizolačními vlastnostmi, příznivými dielektrickými vlastnostmi, velmi dobrým chováním při hoření a výbornou odolností vůči hydrolyze a chemikáliím. Z chemického hlediska se jedná o čisté a nemodifikované PSU, PESU a PPSU. [7]

2.2 Příprava vzorků

Bylo potřeba připravit 10 kusů vzorků od každého materiálu (celkem 30 kusů) o rozměrech 50 x 5 mm pro měření pevnosti v tahu, 10 kusů vzorku od každého materiálu (celkem 30 kusů) o rozměrech 80 x 10 mm pro vrubovou houževnatost metodou Charpy, dále vzorky pro měření tvrdostí dle Brinella, Knoop, Vickerse a Shore D (možno použít libovolný rozměr), 2 kusy vzorku o rozměrech 5 x 5 mm pro měření termomechanické analýzy (TMA) (celkem 6 kusů) a 2 kusy o rozměrech 30 x 5 mm pro měření dynamické termomechanické analýzy (DMA) (celkem 6 kusů).

Vzorky byly nejprve nařezány na potřebné šířky na řezačce (obrázek 40). Následně byly pomocí ruční pilky zkráceny na potřebné délky a očištěny (obrázky 41, 42 a 43). Vzorkům pro vrubovou houževnatost metodou Charpy, byl ještě vytvořen vrub (obrázek 44) na vrubovacím zařízení (obrázek 45).



Obrázek 40 Řezačka



Obrázek 41 Nařezaný vzorek PSU



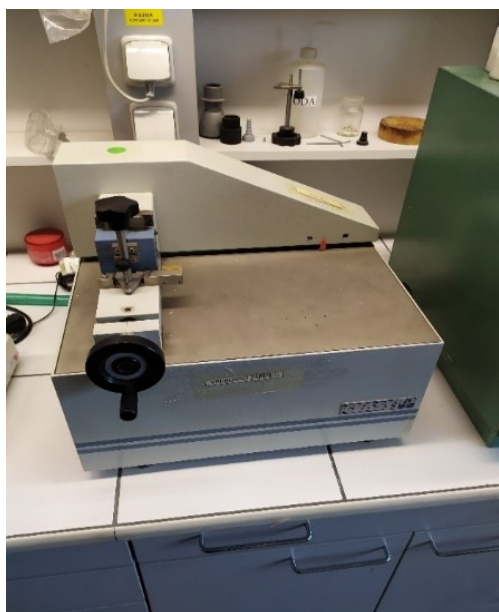
Obrázek 42 Nařezaný vzorek PESU



Obrázek 43 Nařezaný vzorek PPSU



Obrázek 44 Vzorek s vrubem



Obrázek 45 Vrubovací zařízení

2.3 Metody měření

2.3.1 Měření pevnosti v tahu

Měření pevnosti v tahu probíhalo na trhacím stroji INSTRON 5500R (obrázek 46) u zkušebních vzorků o rozměrech 50 x 5 mm a to 10x pro každý druh vzorku. Měření odpovídalo normě ASTM D1708-18. Tělíska byla upevněna do čelistí trhacího stroje, měření probíhala rychlostí posunu 5 mm/min s upínací délkou na čelistech 30 mm. Jako výsledek byly odečteny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky modulu pružnosti [MPa], meze pevnosti v tahu [MPa], maximální síly [N] a tažnosti [%].



Obrázek 46 Trhací stroj INSTRON 5500R

2.3.2 Měření tvrdosti podle Shore D

Podstatou zkoušky bylo měření odporu proti vtlačování hrotu předepsaného tvaru (pro tento případ Shore D) do zkoušeného vzorku dle normy ČSN EN ISO 868.

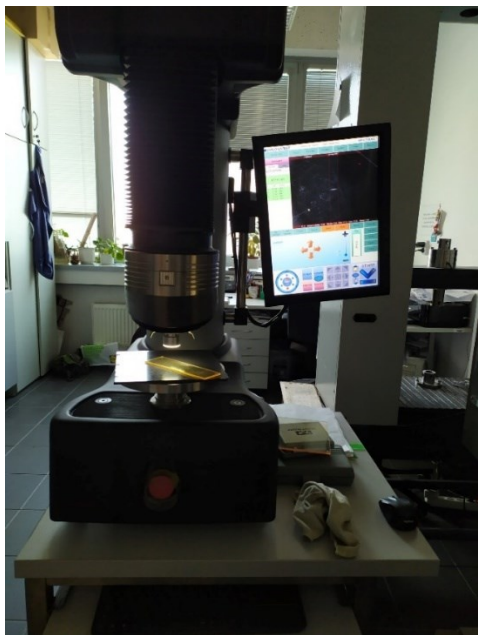
Odpor, který klade vzorek je zajišťován pomocí pružiny. Tvrdost je nepřímo úměrná vniku ocelového měřicího hrotu do zkoušeného vzorku a závisí na modulu pružnosti vzorku a viskoelastickém stavu vzorku. Vyjadřuje se v jednotkách Shore D. Měření bylo provedeno celkem 10x u každého druhu vzorku a byla vypočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka. Měření probíhalo na tvrdoměru Shore (obrázek 47).



Obrázek 47 Tvrdoměr Shore

2.3.3 Měření tvrdosti podle Vickerse, Brinella a Knoop

Měření byla provedena na univerzálním tvrdoměru Nemesis 9000 – Innovatest (obrázek 48). Principem metody je vlačování daného tělíška určitou silou a pod určitým úhlem do materiálu. Vzorky polymerů byly měřeny 5x dle Vickerse pod zatížením 10 kgf, 5x dle Brinella pod zatížením 62,5 kgf (kulička 5 mm) a 5x dle Knoop a pod zatížením 1 kgf. Následně byly odečteny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky.

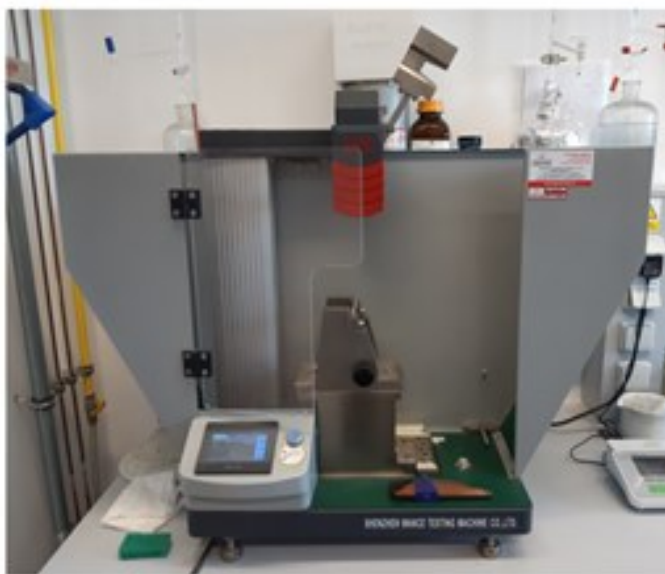


Obrázek 48 Tvrdoměr Nemesis 9000 – Innovatest

2.3.4 Měření vrubové houževnatosti metodou Charpy

Princip měření rázové houževnatosti metodou Charpy je rozdíl mezi nulovým kyvem kladiva a kyvem při nárazu na zkušební těleso, kdy dochází k měření rázové práce potřebné k přelomení zkušebního vzorku. Vztažením této hodnoty práce na plochu lze získat hodnotu rázové houževnatosti vzorku.

V našem případě bylo potřeba provést vrubovou zkoušku houževnatosti z důvodu pružných vzorků (nedocházelo k přelomení). Princip a postup zkoušky je stejný jako u běžné rázové houževnatosti metodou Charpy, ale rozdílem je to, že vzorek byl opatřen vrubem a na podpěry byl položen širší stranou. Vrub směřoval na opačnou stranu, než dopadalo kladivo. Zkouška byla provedena na přístroji PIT 501J (obrázek 49) dle normy ČSN EN ISO 179. Vzorky o rozměrech 80 x 10 mm byly opatřeny vrubem typu „A“ (vrub do hloubky 2 mm). Vzdálenost podpěr na přístroji byla 62 mm. Vrubová houževnatost byla měřena u každého materiálu 10x, následně byla vypočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka.



Obrázek 49 Přístroj PIT 501J

2.3.5 Termomechanická analýza (TMA)

Termomechanická analýza je založena na principu měření změn výšky studovaného vzorku v závislosti na čase, teplotě a vložené síle. Touto metodou je možné stanovit teplotu skelného přechodu T_g , koeficient tepelné roztažnosti α v daném teplotním intervalu nebo jeho závislost na teplotě a body měknutí a tání testovaných vzorků.

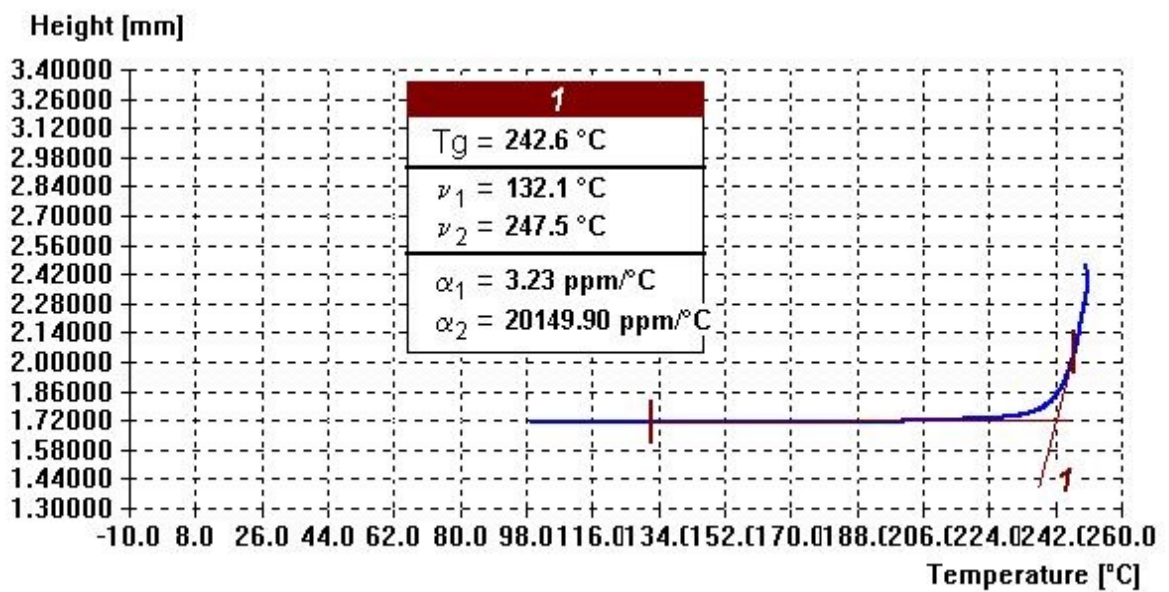
Vzorky byly testovány za definovaného teplotního režimu na přístroji TMA CX04R firmy R.M.I (Obrázek 50). Na vzorky o rozměrech 5 x 5 mm bylo působeno silou 50 mN. Teplota

skelného přechodu byla odečtena ze závislosti výšky vzorku na teplotě (Obrázek 51) a to z druhého kroku přístroje. Zvolený teplotní režim byl:

1. Krok: Ohřev na 250 °C rychlostí 3 °C/min
2. Krok: Ochlazení na 100 °C rychlostí 3 °C/min
3. Krok: Ohřev na 250 °C rychlostí 3 °C/min
4. Krok: Ochlazení na 100 °C rychlostí 3 °C/min



Obrázek 50 Přístroj TMA CX04R



Obrázek 51 Příklad vyhodnocení TMA pro PPSU

2.3.6 Dynamická termomechanická analýza (DMA)

Dynamická termomechanická analýza je metoda založena na principu mechanického namáhání vzorku definovanou silou (napětím) a na měření deformační odezvy vzorku za různých podmínek (např. s měnící se teplotou). Pokud mechanické namáhání vykazuje sinusový průběh, tak se jedná o klasickou dynamickou analýzu. Vyhodnocením naměřených průběhů napětí a deformace, získáme závislost modulu pružnosti a ztrátového úhlu na teplotě a dále také na čase, frekvenci působící síly a velikosti deformace. Naměřené průběhy slouží k určení charakteristických vlastností vzorků, kterými jsou teplota skelného přechodu T_g , stupeň krystalizace, míra orientace, gel point, ztrátu v materiálu (jeho tlumících schopností).

Jako měřicí mód bylo v našem případě použito uspořádání jednoduchý vetknutý nosník (single cantilever). Zkušební vzorky o rozměrech 30 x 5 mm byly měřeny za daných podmínek na přístroji DMA DX04T firmy R.M.I (Obrázek 52). Stanovení teplot T_1 , T_2 blízkých teplotě T_g bylo provedeno z grafické závislosti reálné a imaginární složky modulu pružnosti na teplotě (Obrázek 53). Teplota T_1 [°C] jako tangenta ze závislosti reálné složky modulu pružnosti, teplota T_2 [°C] jako maximum z imaginární ztrátové složky modulu pružnosti.

Podmínky měření:

Měřicí mód: Jednoduchý vetknutý nosník (single cantilever)

Frekvence: 1 Hz

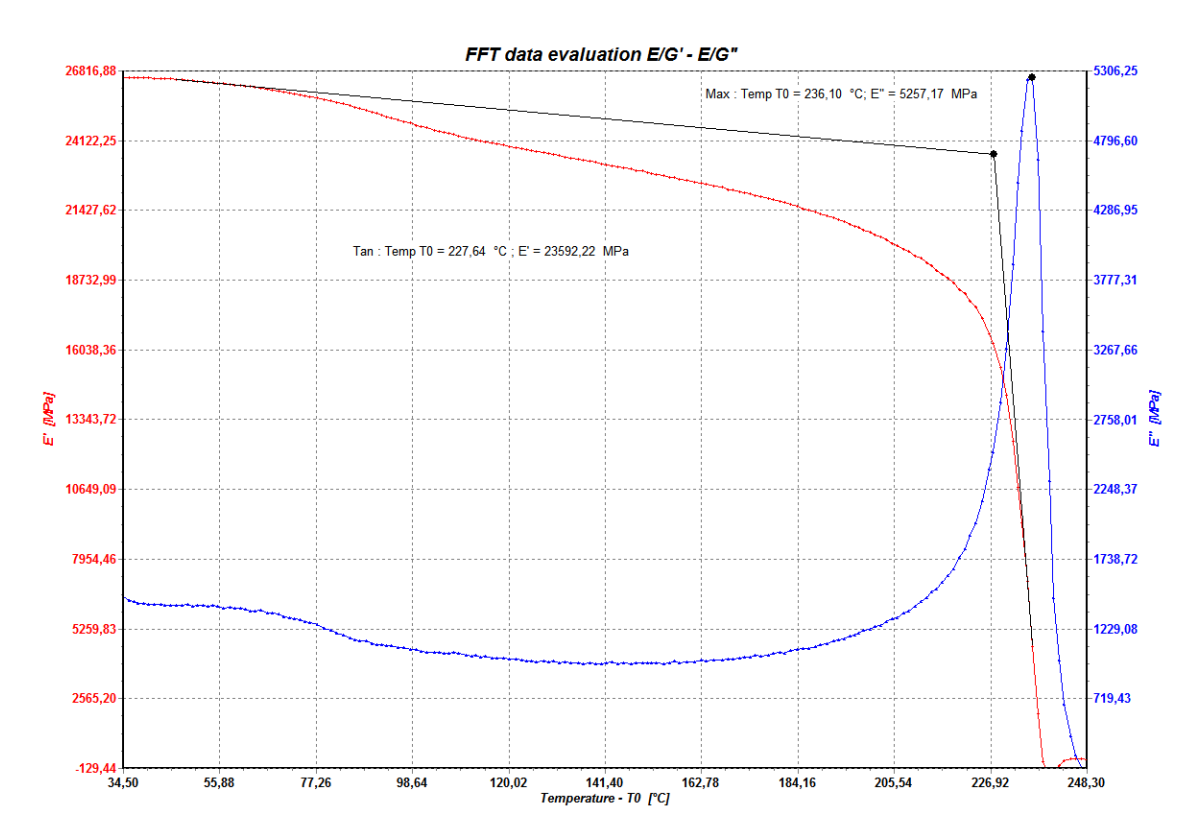
Výchylka: $\pm 0,15$ mm

Teplotní režim:

1. Krok: Ohřev na teplotu 250 °C rychlostí 3 °C/min



Obrázek 52 Přístroj DMA DX04T



Obrázek 53 Příklad vyhodnocení DMA pro PPSU

2.4 Výsledky a diskuse

2.4.1 Měření pevnosti v tahu

Byla měřena pevnost v tahu u vzorků PSU, PESU a PPSU o rozměrech 50 x 5 mm. Byly zaznamenány průměrné hodnoty a směrodatné odchylky modulu pružnosti [MPa], meze pevnosti v tahu [MPa], maximální síly [N] a tažnosti [%] (tabulky 1, 2 a 3).

Tabulka 1 Výsledky pevnost v tahu PSU

PSU	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Maximální síla [N]	Tažnost [%]
Průměr	1119,22	65,73	1051,10	11,16
Směrodatná odchylka	39,23	1,16	15,69	1,02

Tabulka 2 Výsledky pevnost v tahu PESU

PESU	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Maximální síla [N]	Tažnost [%]
Průměr	984,35	77,00	1241,87	16,56
Směrodatná odchylka	62,75	2,05	33,34	1,13

Tabulka 3 Výsledky pevnost v tahu PPSU

PPSU	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Maximální síla [N]	Tažnost [%]
Průměr	904,22	65,41	1018,82	16,77
Směrodatná odchylka	56,20	2,93	47,53	1,87

Ze získaných dat měření pevnosti v tahu vyplývá, že se všechny tři typy vzorků od sebe výrazně neodlišují. Pouze čistý PSU vykazuje nepatrně vyšší modul pružnosti a nižší tažnost než vzorky PPSU a PESU, je to z důvodu že etherové vazby dávají PPSU a PESU větší flexibilitu.

2.4.2 Měření tvrdosti podle Shore D

Byla měřena tvrdost podle Shore D u vzorků PSU, PESU a PPSU. Byly zaznamenány průměrné hodnoty a směrodatné odchylky tvrdosti (tabulka 4).

Tabulka 4 Výsledky Shore D

Shore D	PSU	PESU	PPSU
Průměr	85,90	88,80	87,30
Směrodatná odchylka	0,74	0,63	0,48

Ze získaných dat vyplývá, že všechny tři typy vzorků, mají podobné hodnoty tvrdosti měřené podle Shore D.

2.4.3 Měření tvrdosti podle Vickerse, Brinella a Knoop

Byly měřeny tvrdosti podle Vickerse, Brinella a Knoop u vzorků PSU, PESU a PPSU. Byly zaznamenány průměrné hodnoty a směrodatné odchylky tvrdosti pro každý typ měření (tabulky 5, 6 a 7).

Tabulka 5 Výsledky Vickers

Vickers [10 kgf]	PSU	PESU	PPSU
Průměr	16,98	19,38	15,91
Směrodatná odchylka	0,05	0,12	0,12

Tabulka 6 Výsledky Knoop

Knoop [1 kgf]	PSU	PESU	PPSU
Průměr	17,3	17,4	15,68
Směrodatná odchylka	0,15	0,10	0,10

Tabulka 7 Výsledky Brinell

Brinell [62,5 kgf]	PSU	PESU	PPSU
Průměr	18,25	21,93	17,61
Směrodatná odchylka	0,13	0,2	0,29

Ze získaných dat vyplývá, že PESU má hodnotu tvrdosti ve všech typech zkoušky vyšší než PSU a PPSU. Dále z dat vyplývá, že tvrdost PSU a PPSU je podobná.

2.4.4 Měření vrubové houževnatosti metodou Charpy

Byla měřena vrubová houževnatost metodou Charpy u vzorků PSU, PESU a PPSU o rozměrech 80 x 10 mm. Byly zaznamenány průměrné hodnoty a směrodatné odchytky energie nárazu [J] a síly [kJ/m²] pro každý typ vzorku (tabulky 8, 9 a 10).

Tabulka 8 Výsledky vrubová houževnatost PSU

PSU	energie nárazu [J]	síla [kJ/m ²]
Průměr	0,18	7,45
Směrodatná odchylka	0,02	0,73

Tabulka 9 Výsledky vrubová houževnatost PESU

PESU	energie nárazu [J]	síla [kJ/m ²]
Průměr	0,23	9,21
Směrodatná odchylka	0,01	0,24

Tabulka 10 Výsledky vrubová houževnatost PPSU

PPSU	energie nárazu [J]	síla [kJ/m ²]
Průměr	1,71	69,07
Směrodatná odchylka	0,13	4,60

Ze získaných dat vyplývá, že hodnoty vrubové houževnatosti jsou podobné u PESU a PSU, ale PPSU má hodnoty až desetinásobné, a to z důvodu, že obsahuje bifenylenetherovou jednotku, která poskytuje PPSU houževnatost srovnatelnou s polykarbonátem.

2.4.5 Termomechanická analýza (TMA)

Byla provedena termomechanická analýza vzorků PSU, PESU a PPSU. Teploty skelného přechodu byly odečteny ze závislosti výšky vzorků na teplotě a zaznamenány do tabulky (tabulka 11).

Tabulka 11 Výsledky TMA

	PSU	PESU	PPSU
T _g [°C]	211,2	247,5	242,6

Ze získaných dat vyplývá, že hodnota T_g je podobná u PESU a PPSU, ale u PSU je nižší. PESU a PPSU mají díky etherovým vazbám lepší tepelnou stabilitu.

2.4.6 Dynamická termomechanická analýza (DMA)

Byla provedena dynamická termomechanická analýza vzorků PSU, PESU a PPSU. Teploty T₁ a T₂, které jsou blízké teplotě skelného přechodu byly odečteny a zaznamenány do tabulky (tabulka 12) z grafické závislosti reálné a imaginární složky modulu pružnosti na teplotě.

Tabulka 12 Výsledky DMA

	PSU	PESU	PPSU
T ₁ [°C]	172,77	234,88	227,64
T ₂ [°C]	203,00	242,90	236,10

Stejně jako u měření TMA ze získaných dat vyplývá, že pravděpodobná hodnota T_g je podobná u PESU a PPSU, ale u PSU je nižší. PESU a PPSU mají opět díky etherovým vazbám lepší tepelnou stabilitu.

ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce byly popsány vlastnosti, syntézy a využití v současnosti nejpoužívanějších high-tech polymerů. Následně byly popsány nejpoužívanější technologie zpracování těchto polymerů, konkrétně vytlačování (extruze) a vstřikování.

V praktické části byly dle příslušných norem připraveny zkušební vzorky high-tech polymerů a následně byly na nich provedeny fyzikálně-mechanické zkoušky. Zajímavým zjištěním bylo, že každý z nich vynikal v jiné oblasti zkoušení, i když někdy pouze nepatrně a ostatní dva v dané oblasti mají vzájemně podobné hodnoty. Při měření pevnosti v tahu měl nejvyšší hodnotu modulu pružnosti PSU. Nejvyšší tvrdost měl u všech metod měření PESU. Během měření vrubové houževnatosti vykazoval PPSU téměř desetinásobné hodnoty oproti PSU a PESU. Teplota skelného přechodu byla u měření TMA i DMA nejnižší pro PSU. Tyto výsledky potvrzují data o PSU, PPSU a PESU popsané v rešeršní části bakalářské práce.

LITERATURA

- [1] High performance plastics. *Ensinger* [online]. [cit. 2022-06-07]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/high-performance-plastics>
- [2] What is a High Performance Plastic?. *Performance plastics problem solved* [online]. 2021 [cit. 2022-06-07]. Dostupné z: <https://performanceplastics.com/blog/what-is-a-high-performance-plastic/>
- [3] WHAT MAKES PLASTIC HIGH PERFORMANCE?. *Flourocarbon* [online]. [cit. 2022-06-07]. Dostupné z: <https://fluorocarbon.co.uk/news-and-events/post/25/what-makes-plastic-high-performance>
- [4] High Performance Plastics. *Thyssenkrupp* [online]. [cit. 2022-06-07]. Dostupné z: https://www.onlineplastics.com/products/high-performance-plastics-c-1_192.html#1-YToxOntzOjQ6ImdyaWQiO2k6MDt9
- [5] High-performance plastics. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/High-performance_plastics#cite_note-Kaiser-3
- [6] Defining “High-Performance” Plastics. *Readingplastic* [online]. [cit. 2022-06-07]. Dostupné z: <https://readingplastic.com/high-performance-plastics/>
- [7] Ultrason® (PSU, PESU, PPSU) – The Specialty Plastic for High-quality Parts. *BASF We create chemistry* [online]. [cit. 2022-06-07]. Dostupné z: https://plastics-rubber.basf.com/global/en/performance_polymers/products/ultrason.html
- [8] Polysulfone. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polysulfone>
- [9] Polysulfon (PSU). *VINK* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://www.vink.cz/polysulfon>

- [10] POLY(ETHER)SULFONES. *Plastic Technology* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polysulfone%20type.html>
- [11] Polysulfone. *CHEMEUROPE* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Polysulfone.html>
- [12] Huang, H.-L. & Yang, S. Filtration characteristics of polysulfone membrane filters. *J. Aerosol Sci.* **37**, 1198–1208 (2006). Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850205002314>
- [13] Hydrofilní polysulfon. *Filtrationgroup* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://filtrationgroup.cz/produkt/hydrofilni-polysulfon/>
- [14] PES - Polyethersulfone. *Ensinger* [online]. [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/high-performance-plastics/pes>
- [15] POLYETHERSULFONE (PES). *Polymerdatabase* [online]. [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: <https://blog.polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PES.html>
- [16] Polysulfon. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Polysulfon>
- [17] Zhao, C., Xue, J., Ran, F. & Sun, S. Modification of polyethersulfone membranes – A review of methods. *Prog. Mater. Sci.* **58**, 76–150 (2013). Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642512000503>
- [18] Kompletní filtrační jednotky s PES membránou, sterilní. *Shoeller pharma Praha* [online]. [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: <https://pharma.cz/produkt/kompletni-filtracni-jednotky-s-pes-membranou-sterilni/>
- [19] PPSU - Polyphenylsulfone. *ENSINGER* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/high-performance-plastics/ppsu>

- [20] Polyfenylsulfon (PPSU). *Lpm* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z:
https://lpm.cz/cs/technicky-datovy-list-plasty/polyfenylsulfon-ppsu?n=2461_5
- [21] POLYFENYLSULFON (PPSU, PPSF). *Polymerdatabase* [online]. [cit. 2022-06-09].
Dostupné z: <https://blog.polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PPSU.html>
- [22] REVEL – PPSU materiál – fitinky a další produkty. *TOPIN* [online]. [cit. 2022-06-10].
Dostupné z: <https://www.topin.cz/produkty/revel-ppsu-material-fitinky-a-dalsi-produkty-detail-4578>
- [23] PPS - Polyphenylensulfide. *Ensinger* [online]. [cit. 2022-06-10]. Dostupné z:
<https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/high-performance-plastics/pps>
- [24] POLYPHENYLTHIOETHERS (AROMATIC POLYTHIOLS). *Polymerdatabase* [online]. [cit. 2022-06-10]. Dostupné z:
<https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polyphenylthioether%20type.html>
- [25] Polyphenylene sulfide. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2022-06-12]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Polyphenylene_sulfide
- [26] Polyphenylene Sulfide (PPS) - A robust polymer with multiple applications. *Polyfluorold* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z:
<https://polyfluorold.com/blog/polyphenylene-sulfide-pps-a-robust-polymer-with-multiple-applications/>
- [27] Polyphenylene Sulfide (PPS): A Comprehensive Guide on High Heat Plastic. *Omnexus.specialchem* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z:
<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyphenylene-sulfide-pps-plastic-guide>

- [28] Esaklul, K. A. & Mason, J. 27 - Nonmetallics applications in oil and gas production (pipes, liners, rehabilitations). in *Woodhead Publishing Series in Energy* (ed. El-Sherik, A. M. B. T.-T. in O. and G. C. R. and T.) 627–660 (Woodhead Publishing, 2017).
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081011058000279>
- [29] POLYPHENYLENE SULFIDE (PPS) FIBER PRODUCTION LINE. *Fiber-machine* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://fiber-machine.com/en/polyphenylene-sulfide-pps-fiber-production-line/>
- [30] THERMAX PPS [POLYPHENYLENE SULFIDE]. *3dxtech* [online]. [cit. 2022-06-12].
Dostupné z: <https://www.3dxtech.com/product/thermax-pps/>
- [31] Polyether ether ketone. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyether_ether_ketone
- [32] POLYETHER ETHER KETONE (PEEK). *Polymerdatabase* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PEEK.html>
- [33] Fink, J. K. (2014). *High Performance Polymers (2nd Edition) - 6.2.1 Nucleophilic Process*. (pp. 155). Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U86N3D/high-performance-polymers/nucleophilic-process>
- [34] Polyetheretherketone (PEEK): A Complete Guide on High-Heat Engineering Plastic. *Omnexus.specialchem* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyetheretherketone-peek-thermoplastic>
- [35] Polyether Ether Ketone (PEEK): Properties, Production, and Applications. *Matmatch* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://matmatch.com/learn/material/polyether-ether-ketone-peek>

- [36] PEEK (Polyether-ether-ketone) and its composite materials in orthopedic implantation. *Arabian Journal of Chemistry* [online]. 2022, (14), 19 [cit. 2022-06-12].
Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535220305384#f0010>
- [37] POLYETHERKETONEKETONES (PEKK). *Polymerdatabase* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PEKK.html>
- [38] Polyetherketoneketon (PEKK). *Matmatch* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z:
<https://matmatch.com/materials/mbas044-polyetherketoneketone-pekk->
- [39] Alqurashi, H. *et al.* Polyetherketoneketone (PEKK): An emerging biomaterial for oral implants and dental prostheses. *J. Adv. Res.* **28**, 87–95 (2021). Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123220302137#f0025>
- [40] PEI - Polyetherimid. *Ensinger* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z:
<https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/high-performance-plastics/pei>
- [41] POLYETHERIMIDY (PEI). *Polymerdatabase* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z:
<https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PEI.html>
- [42] Polyetherimide (PEI): A Comprehensive Review. *Omnexus.specialchem* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyetherimide-pei-high-heat-plastic>
- [43] Chapter 29 - Polyetherimide. in *Handbook of Plastics Joining (Second Edition)* (ed. Troughton, M. J.) 345–351 (William Andrew Publishing, 2009). Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815515814500317>
- [44] POLY(ETHER)IMIDES (PEI). *Polymerdatabase* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polyetherimide%20type.html>
- [45] PEI - POLYETHERIMIDE. *Dhm-online* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z:
<https://www.dhm-online.com/en/229-pei-polyetherimide>

- [46] Comprehensive Guide on Polyimide (PI). *Omnexus.specialchem*. [online]. [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyimide-pi-plastic>
- [47] POLYIMIDY (PI). *Polymerdatabase* [online]. [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PI.html>
- [48] Polyimide: Properties, Processing, and Applications. *Matmatch* [online]. [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: <https://matmatch.com/learn/material/polyimide>
- [49] Fink, J. K. (2014). *High Performance Polymers (2nd Edition) - 15.2.1 Conventional Route*. (pp. 344-346). Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U86XC1/high-performance-polymers/polyimide-conventional>
- [50] Polyimidová vlákna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyimidov%C3%A1_vl%C3%A1kna
- [51] *High Performance Polymers and Engineering Plastics*. United States of America: Scrivener, 2011. ISBN 978-1-118-01669-5.
- [52] Polyimidové vlákno. *Cz.top-aluminumprofil* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <http://cz.top-aluminumprofile.com/polyimide-filament/>
- [53] POLYAMIDEIMIDES (PAI). *Polymerdatabase* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PAI.html>
- [54] PAI material - Polyamide-imide. *Ensinger* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/high-performance-plastics/torlon-pai-polyamide-imide>

- [55] Fink, J. K. (2014). *High Performance Polymers (2nd Edition) - 14.2.2 Acid Chloride Route*. (pp. 323-325). Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U86WD2/high-performance-polymers/polyamide-acid-chloride>
- [56] Synthesis and characterization of polyamide-imides based on the different chain length of amino acids in molten TBAB as a green media. *Degruyter* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/gps-2016-0033/html>
- [57] Polyamide-imide. *Precisioncoating* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.precisioncoating.com/engineered-coatings/polyamide-imide/>
- [58] Polyamideimide - PAI. *Azom* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=877>
- [59] POLYBENZIMIDAZOLE (PBI). *Polymerdatabase* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polybenzimidazole%20type.html>
- [60] POLYBENZIMIDAZOLE. *Polymerdatabase* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/Fibers/PBI.html>
- [61] Polybenzimidazole fiber. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Polybenzimidazole_fiber
- [62] Bocarsly, A. B. & Niangar, E. V. FUEL CELLS – PROTON-EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS | Membranes: Elevated Temperature. in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* (ed. Garche, J.) 724–733 (Elsevier, 2009). Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978044452745500232X>
- [63] Způsoby zpracování termoplastů. *Tecron* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://tecron.cz/zpusoby-zpracovani-termoplastu/>

- [64] Thermoplastics and Thermoplastic Composites: Technical Information for Plastics Users. *Globalspec* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.globalspec.com/reference/47050/203279/chapter-5-thermoplastic-processing>
- [65] Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites, Fourth Edition. *Globalspec* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.globalspec.com/reference/64229/203279/1-6-processing-of-thermoplastics>
- [66] POPIS TECHNOLOGIE EXTRUZE. *Fatra-extruze* [online]. [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.fatra-extruze.cz/vyroba/extruze-technologie/>
- [67] EXTRUZE. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-06-15]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Extruze>
- [68] An Introduction to Single Screw Extrusion. Azom [online]. [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13566>
- [69] Technické vybavení. *Eurotec* [online]. [cit. 2022-06-15]. Dostupné z: <https://www.eurotec-ks.cz/vstrikovani-plastu/>